

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Qualifizierung und Weiterentwicklung von Schleppegasdüsen für eine verbesserte
Schutzgasabdeckung beim Schweißen

der Forschungsstelle

TU Dresden, Institut für Fertigungstechnik / Professur Fügetechnik und Montage

Das IGF-Vorhaben 18.021 BR der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte
Verfahren e.V. des DVS wurde über die



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



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

vom

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Dresden, 04.04.2016

Ort, Datum

Name und Unterschrift des Projektleiters der TU Dresden

Abschlussbericht

Titel: Qualifizierung und Weiterentwicklung von Schleppgasdüsen für eine verbesserte Schutzgasabdeckung beim Schweißen

IGF-Nr.: 18.021 BR

Forschungsstelle: Technische Universität Dresden
Institut für Oberflächen- und Fertigungstechnik
Professur Fügetechnik und Montage
01062 Dresden

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. S. Jäckel
Dipl.-Ing. M. Hertel
Dr.-Ing. S. Rose

Laufzeit: 01.01.2014 – 31.12.2015

Das IGF-Vorhaben Nr.: 18.021 B / DVS-Nr.: 03.115 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. Für die finanzielle Unterstützung unseres Vorhabens bedanken wir uns.

Dresden, 04.04.2016

Ort, Datum

Stempel und Unterschrift

Leiter der Forschungsstelle

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	7
2	Technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	9
3	Stand von Technik und Forschung.....	11
3.1	Einfluss der Schutzgasabdeckung auf die Schweißverbindung	11
3.2	Konstruktion von Schleppgasdüsen	15
3.3	Methoden der Strömungsanalyse.....	18
4	Zielstellung	22
5	Methodische Vorgehensweise und Versuchsbeschreibung.....	24
5.1	Druckverlustmessung.....	26
5.2	Sauerstoffmessung	28
5.3	Strömungssimulation.....	29
5.4	Schweißversuche.....	30
6	Ergebnisse.....	32
6.1	Materialdatenermittlung von Funktionselementen	32
6.2	Bewertung bestehender Schleppgasdüsenkonzepte.....	35
6.3	Untersuchungen zu Gasboxen ohne Prozessbeeinflussung.....	38
6.3.1	Direkter Einlass	41
6.3.2	Gasverteiler	44
6.3.3	Schalldämpfer	47
6.4	Verbindungsmöglichkeiten von Schleppgasdüse und Schweißbrenner	52
6.5	Untersuchungen zu Gasboxen mit Prozessbeeinflussung.....	55
6.5.1	Kontamination durch düseninterne Wirbelfelder	56
6.5.2	Kontamination aufgrund unzureichender Verdrängungswirkung.....	66
6.6	Zusätzliche Praxisanforderungen	71
6.6.1	Spülzeiten.....	71

6.6.2	Prozessvorlaufende Bereiche	74
6.6.3	Modularisierbarkeit	76
6.7	Vorzugsvariante und Praxisbeispiel.....	77
7	Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse für KMU	80
7.1	Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse.....	80
7.2	Industrielle Anwendung der Forschungsergebnisse	80
8	Erläuterung zur Kostenaufteilung.....	83
8.1	Erläuterungen zum Personaleinsatz.....	83
8.2	Erläuterungen zu Geräteanschaffung.....	83
8.3	Erläuterungen zu Ausgaben für Leistungen Dritter	83
9	Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen	84
10	Projektbegleitender Ausschuss	87
	Quellenverzeichnis.....	88
	Abbildungsverzeichnis	94
	Tabellenverzeichnis	100

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit	Benennung
<i>Lateinische Symbole</i>		
a	mm	Abstand Schleppgasdüse-Werkstück
\vec{A}	T m	magnetisches Vektorpotential
A_0	%	relative freie Lochfläche
\vec{B}	T	Vektor der magnetischen Induktion
d	mm	Durchmesser
h	J kg ⁻¹	spezifische Enthalpie
I	A	Stromstärke
\vec{j}	A m ⁻²	Stromdichtevektor
K_1	kg m ⁻³ s ⁻¹	linearer Widerstandskoeffizient
K_2	kg m ⁻⁴	quadratischer Widerstandskoeffizient
p	Pa	Druck
s	mm	Materialstärke
S	N m ⁻³	Kraftdichte des porösen Materials
T	K	Temperatur
t	s	Zeit
\vec{u}	m s ⁻¹	Geschwindigkeitsvektor
Y	kg kg ⁻¹	Masseanteil
<i>Griechische Symbole</i>		
ε_{NEK}	W m ⁻³ sr ⁻¹	Nettoemissionskoeffizient
λ	W m ⁻¹ K ⁻¹	thermische Leitfähigkeit
μ_0	V s A ⁻¹ m ⁻¹	magnetische Feldkonstante
φ	V	elektrisches Potential
ρ	kg m ⁻³	Dichte

σ	$S\ m^{-1}$	elektrische Leitfähigkeit
Indizes		
<i>A</i>		Komponente A
<i>B</i>		Komponente B
<i>BG</i>		Bohrungen Gasverteiler
<i>BLB</i>		Bohrungen Lochblech
<i>E</i>		Einlass
<i>i</i>		Laufvariable
<i>j</i>		Laufvariable

Abkürzung	Benennung
Ar	Argon
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
H ₂	Wasserstoff
He	Helium
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MHD	Magnetohydrodynamik
MSG	Metallschutzgasschweißen
N ₂	Stickstoff
O ₂	Sauerstoff
PbA	Projektbegleitender Ausschuss
PG	Prozess- bzw. Schutzgas
SD	Schalldämpfer
SG	Schleppgas
WIG	Wolframinertgasschweißen

1 Zusammenfassung

Ziel des Vorhabens war die strömungstechnische Bewertung, Kategorisierung und Verbesserung von Schleppgasdüsen sowie die Erarbeitung verallgemeinerter konstruktiver Gestaltungshinweise. Anwender von Schleppgasdüsen sollen damit in die Lage versetzt werden, anwendungsspezifische Düsen zielgerichtet und mit reduziertem Aufwand selbst zu entwickeln bzw. aus dem Portfolio kommerzieller Anbieter auszuwählen und in der eigenen Fertigung zu adaptieren. Des Weiteren sollen Hersteller von Brenner- und Schleppgasdüsen systemen bei der Auslegung von Schleppgasdüsen durch alternative und zielführende Konstruktionsansätze unterstützt werden.

Die Entwicklung von Schleppgasdüsen erfolgte bisher vorrangig empirisch, was mit einer hohen Anzahl an Schweißversuchen an z.T. sehr kostenintensiven Werkstoffen abgesichert werden musste. Erschwerend kommt hinzu, dass bestehende konstruktive Ausführungen häufig nur bedingt auf andere Anwendungsfälle übertragbar waren, da bereits geringe Änderungen der geometrischen Randbedingungen zu einer drastischen Verschlechterung der Gasabdeckung führten. Für eine zielgerichtete Entwicklungen von Schleppgasdüsen entsprechend der geometrischen und technologischen Randbedingungen fehlte bisher sowohl das vertiefte Verständnis der zugrundeliegenden Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge als auch die Beschreibung der Kontaminationsursachen, welche durch experimentelle Untersuchungsmethoden nicht oder nur bedingt zu erarbeiten sind.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden gezielt numerische und experimentelle Untersuchungsmethoden verknüpft, um zum einen die Vielzahl bestehender Schleppgasdüsenkonzepte hinsichtlich Ihrer Gebrauchseigenschaften zu bewerten und zum anderen Vorzugsvarianten zu entwickeln, welche eine übergreifende Anwendbarkeit auf unterschiedliche Werkstoffe, Bauteilgeometrien und Schweißprozesse ermöglichen.

Durch Messung des Restsauerstoffgehaltes auf der Werkstückoberfläche sowie durch die numerischen Simulation der Schutzgasströmungen wurde zum einen der Einfluss unterschiedlicher Faktoren auf die Qualität des Gasschutzes quantifiziert, Kontaminationsmechanismen identifiziert sowie Optimierungspotenziale abgeleitet. Zum anderen erfolgten ein quantifizierter Vergleich sowie eine Kategorisierung von Funktionselementen (z.B. Schalldämpfer, Lochbleche oder Sintereinsätze) hinsichtlich ihrer Eignung für den Einsatz in Schleppgasdüsen.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass die Anwendung vieler bestehender Gestaltungsvarianten aufgrund ihrer signifikanten Nachteile als kritisch einzustufen ist. Eine weitere Ein-

schränkung der zielführend anzuwendenden Schleppgasdüsenkonzepte resultiert aus den verstärkten konvektiven und diffusiven Transportmechanismen von Atmosphärgas durch die Kraft- und Wärmewirkung des Lichtbogens.

So wurde geschlussfolgert, dass sowohl der Einsatz von ausgeformten Primärgasdüsen als auch Schutzgasorgeln nicht zu empfehlen ist. Für sogenannte Gasboxen konnte gezeigt werden, dass der Lichtbogenprozess zwingend innerhalb der Schleppgasdüse anzuordnen ist, um einer Kontamination der Schleppgasdüse mit Atmosphärgasen entgegenzuwirken. Für die gleichmäßige Verteilung des Gases in der Schleppgasdüse ist die Anwendung von Funktionselementen am Gaseinlass (Schalldämpfer) respektive an der Unterseite der Schleppgasdüse (Strömungsgleichrichter) zielführend und notwendig. Generell gilt, dass eine hinreichende Verteilung des Schleppgases durch das Gaseinleitungssystem gegenüber dem Einsatz von Strömungsgleichrichtern zu bevorzugen ist, da die Verwendung von Strömungsgleichrichtern mit einer Vielzahl an Nachteilen, wie z.B. einer erhöhten Spritzeranfälligkeit, korreliert.

Auf Grundlage der Ergebnisse wurde als Vorzugsvariante eine Gasbox mit integriertem Schweißbrenner, kommerziell verfügbaren Schalldämpfern sowie einem Strömungsgleichrichter mit einer geringen Druckdifferenz abgeleitet. Die Anwendung des Konstruktionsprinzips korreliert mit qualitativ hochwertigen Gasabdeckungen, einer sehr guten Zugänglichkeit (mögliche Düsenabstände zum Werkstück bis 15 mm) bzw. stark reduzierten Schleppgasvolumenströmen und signifikant verringerten Spülzeiten (ca. 75%). Speziell für KMU ergibt sich ein maßgeblicher Vorteil durch einen einfachen, robusten, reproduzierbaren sowie kostengünstigen Aufbau der Düsen.

Basierend auf der beschriebenen Vorzugsvariante wurde die Möglichkeit einer modularen Bauweise von Schleppgasdüsen untersucht und nachgewiesen. Das beschriebene Konzept erlaubt eine einfache Längenskalierung von Schleppgasdüsen, womit das Anwendungsspektrum von gegebenen Düsen erheblich erweitert werden kann.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2 Technische und wirtschaftliche Problemstellung

Hochlegierte Stähle, Aluminium, Titan, Magnesium und Nickelbasislegierungen sind wichtige Werkstoffe in der metallverarbeitenden Industrie, welche aufgrund ihrer charakteristischen Vorteile immer häufiger eingesetzt werden. Zur Erhaltung der materialspezifischen Festigkeitseigenschaften bzw. des Leichtbaupotentials werden zum Fügen von Bauteilkomponenten verstärkt Schweißverfahren eingesetzt. Aufgrund der hohen Produktivität und Verfügbarkeit, der sehr guten Adaptierbarkeit sowie der moderaten Investitionskosten sind in KMUs Schutzgasschweißverfahren die dominierenden Fügeverfahren zum stoffschlüssigen Fügen von metallischen Werkstoffen. Zur Herstellung einer qualitätsgerechten Fügeverbindung an den genannten Werkstoffen ist eine hochwertige und prozesssichere Schutzgasabdeckung Grundvoraussetzung für eine qualitätsgerechte Fügeverbindung. Erhöhte Konzentrationen von Atmosphärgasen im Bereich des Schweißprozesses können sowohl zu Prozessinstabilitäten, Schweißspritzern, Poren als auch Oxideinschlüssen führen.

In Abhängigkeit des Werkstoffs und der Fertigungsrandbedingungen resultiert eine unzureichende bzw. fehlende Gasabdeckung in erwärmten Schweißnaht- und Bauteilbereichen in der Bildung von Anlauffarben, welche vor allem im Hinblick auf das Korrosionsverhalten der Fügeverbindung bzw. der gesamten Baugruppe als besonders kritisch zu bewerten sind. Die entstehenden Oxide können sowohl durch mechanische (Bürsten, Strahlen, Schleifen) als auch durch chemische Verfahren (Beizen) entfernt werden, wobei letztere mit dem Einsatz von umweltkritischen und gesundheitsschädlichen Chemikalien korrelieren. Der entstehende Nacharbeitsaufwand und der daraus resultierende Zeit- und Kostenfaktor ist materialspezifisch und stark abhängig von der Stärke der Oxidation.

Zur Reduzierung bzw. Vermeidung des Nacharbeitsaufwandes werden Schleppgasdüsen eingesetzt, welche die nachlaufende Schmelze sowie stark erwärmte Bauteilbereiche durch einen zusätzlichen Gasschutz vor den Wechselwirkungen mit Atmosphärgasen schützen. Die zu schützende Bauteilfläche ist stark abhängig von den Fertigungsrandbedingungen und den materialspezifischen Eigenschaften des Grundwerkstoffs. Gegenüber dem Schutzgasvolumenstrom für den Prozessbereich ergeben sich stark erhöhte Schleppgasvolumenströme, welche die Gesamtgaskosten dominieren. Die Effektivität der Schleppgasdüse beeinflusst folglich maßgeblich die Wirtschaftlichkeit des Schweißprozesses.

Die konstruktive Gestaltung von Schleppegasdüsen ist stark anwendungs- und materialspezifisch, weshalb neben kommerziell verfügbaren Düsensystemen vor allem individuell entwickelte und an die spezifischen Fertigungsrandbedingungen angepassten Schleppegasdüsen verwendet werden. In der industriellen Anwendung sind eine Vielzahl von unterschiedlichen Gestaltungsmöglichkeiten und Bauformen bekannt, wobei sowohl ein qualifizierter Vergleich der Konzepte als auch allgemeingültige, firmenübergreifende Gestaltungsempfehlungen fehlen. Die Entwicklung erfolgt fast ausschließlich iterativ, was sowohl mit einem hohen finanziellen als auch zeitlichen Aufwand verbunden ist. Auf Grundlage der rein experimentell erlangten Kenntnisse sind eindeutige Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge nur schwer ableitbar, was ein erfolgreiches Übertragen eines Konstruktionsprinzips zwischen Anwendungen mit unterschiedlichen geometrischen und fertigungstechnischen Randbedingungen stark erschwert. Zusätzlich ist zu hinterfragen, ob die entwickelten Düsen das volle Potential hinsichtlich Gasabdeckung, Gasverbrauch und Zugänglichkeit ausschöpfen.

Im Rahmen des DFG / AiF Forschungsclusters Lichtbogenschweißen - Physik und Werkzeug wurden sowohl experimentelle als auch numerische Werkzeuge entwickelt, welche die Beschreibung der komplexen Vorgänge in Schutzgasschweißprozessen mit einer hohen zeitlichen und örtlichen Auflösung erlauben. Durch die kombinierte Anwendung von experimentellen und numerischen Methoden kann das Prozessverständnis entscheidend erweitert, sensitiven Einflussgrößen identifiziert und Optimierungspotenziale gezielt abgeleitet werden. Im Rahmen des AiF-Projektes „Strömungstechnische Auslegung von Brennersystemen zum wirtschaftlichen und emissionsreduzierten Lichtbogenschweißen“ (IGF 15.871B, Laufzeit: 2008-2011) wurde die Möglichkeit aufgezeigt, derartigen Methoden und Werkzeuge zur strömungstechnischen Auslegung von Schweißbrennerkomponenten einzusetzen. Basierend auf den erlangten Erkenntnissen wurde durch Industrievertreter ein hoher Forschungsbedarf im Bereich von Schleppegasdüsen adressiert und der Wunsch geäußert, im Hinblick auf die hohe wirtschaftliche und technologische Relevanz derartige innovative Werkzeuge für die Qualifizierung und Weiterentwicklung der Düsensysteme einzusetzen.

3 Stand von Technik und Forschung

3.1 Einfluss der Schutzgasabdeckung auf die Schweißverbindung

Das Schutzgas sorgt beim Schweißen nicht nur für die Abschirmung von Lichtbogen und Schmelze vor Umgebungsluft, sondern beeinflusst den gesamten Schweißprozess in entscheidendem Maße. Nach ZSCHETZSCHE [Zsch2007] kann der Einfluss des Schutzgases auf folgende Merkmale herausgearbeitet werden:

- die äußere Nahtform,
- den Einbrand,
- das Zündverhalten,
- die Lichtbogenstabilität,
- die Metallurgie und die mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht,
- den Werkstoffübergang,
- die Spritzerbildung und
- die Emission von Rauchen und Gasen.

Die richtige Schutzgasauswahl und eine hochwertige Gasabdeckung sind daher die Voraussetzung für einen sicheren, wirtschaftlichen, reproduzierbaren und sauberen Schweißprozess sowie für die Gewährleistung der gewünschten Eigenschaften der Fügeverbindung. Je nach Werkstoff und Anwendung werden zum Schutzgasschweißen im Wesentlichen Gase oder Gasgemische der Komponenten Argon (Ar), Helium (He), Kohlendioxid (CO₂), Sauerstoff (O₂), Wasserstoff (H₂) und Stickstoff (N₂) verwendet. Die Gase und Gasgemische werden nach DIN EN ISO 14175 [DIN14175] als Schutzgase für das Lichtbogenschweißen klassifiziert. Die positiven Eigenschaften der gezielten und definierten Zumischung von molekularen Gasen in das Schutzgas sind in der Literatur dokumentiert [Bau1999] [Böh1990] [Dil2006] [Mat2008] [Ste1993] [Tru1999] [Tru2001] [Zsc2007].

Der Gasschutz beim Schweißen wird in einen primären Gasschutz (Brenner), einen sekundären Gasschutz (Schleppgasdüse) und den Wurzelschutz (Formiergasvorrichtung) untergliedert [AGA1996] [Wui1992]. Zu beachten ist, dass sich die Zusammensetzung vom primären und sekundären Gasschutz unterscheiden kann. Für Schleppgasdüsen wird zumeist Ar oder ein Zweikomponentengasgemisch aus N₂ und H₂ verwendet, in seltenen Fällen auch Ar mit geringen Zumischungen von H₂ und N₂ [Amm2004] [Fro2003].

Für verschiedene Werkstoffe, im Speziellen für hochlegierte Stähle, Aluminium, Magnesium, Titan, Kupfer oder Nickelbasislegierungen, sind bereits geringe Anteile von Atmosphärengasen kritisch. Wird das Schutzgas durch Umgebungsluft und damit durch N_2 , O_2 oder auch H_2 (H_2O wird nach [Sei1988] bei Temperaturen oberhalb 1500 °C in ein gasförmiges Gemisch aus H_2 und O_2 gespalten) verunreinigt, entstehen je nach Werkstoff und Randbedingungen negative Effekte wie z.B. Oxidanhäufungen, Anlauffarben, Schweißspritzer, Poren, Oxideinschlüsse oder sogar Risse im Gefüge [Amm2004] [Bau1999] [Bru2005] [Dil2005] [Goe2005] [Rei2007] [Sch1992], vgl. Abbildung 3.1. Diese müssen durch kostenintensive Nacharbeit entfernt werden oder führen teilweise zur Unbrauchbarkeit des Bauteils. Abbildung 3.1 veranschaulicht exemplarische Auswirkungen einer unzureichenden Schutzgasabdeckung für verschiedene Werkstoffe.

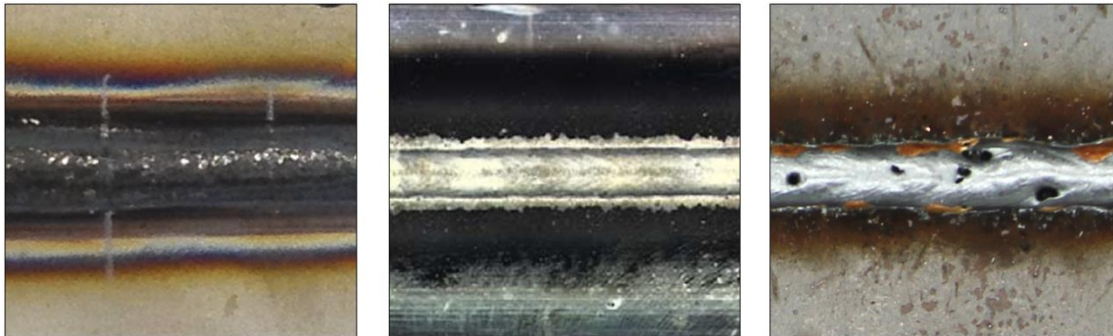


Abbildung 3.1: Anlauffarben an 1.4301 [Schu2012] (links), Rußablagerungen auf Aluminium EN AW-5182 [Goe2005] (mittig) und Poren sowie Oxidinseln einer MAG-Schweißnaht an S235 [Wei2012] (rechts) durch mangelhafte Qualität der Schutzgasabdeckung.

Beim Schweißen von **hochlegierten Stählen** stellen neben Oxidanhäufungen auf der Naht vor allem Anlauffarben ein Problem dar. Anlauffarben sind Oxidschichten, deren Dicke und damit auch Farbe durch die Menge des vorhandenen Sauerstoffs bzw. durch die Temperatur der Werkstückoberfläche bestimmt werden. Nach FINKE *et al.* [Fin1999] können Anlauffarben anhand ihrer chemischen Zusammensetzung in drei Bereiche eingeteilt werden.

1. Bis zu einer Gelbfärbung handelt es sich um Chromoxide. Die Schichtdicke ist deutlich dicker als die Passivschicht des Grundwerkstoffs.
2. Rote Oxidschichten bestehen oberflächlich aus Chromoxiden, welche sich auf einer chromverarmten Unterschicht befinden.
3. Blau- und Grautöne bestehen vorwiegend aus korrosionsanfälligen Eisenoxiden.

International hat sich die Bezeichnung „Strohgelb“ bzw. „straw yellow“ als gerade noch zulässige Anlauffarbe etabliert. Als Schichtdicke für „strohgelbe“ Anlauffarben sind in der Litera-

tur Werte im Bereich von 25 bis 80 nm zu finden [Rug1990] [Hen2003]. Nach KOPITZKE [Kop2010] besitzen Oberflächen mit „strohgelben“ Anlauffarben eine vergleichbare Korrosionsbeständigkeit wie der Grundwerkstoff. Daher gelten im Baugewerbe nach [DIB2009] für die Korrosionsklassen I und II dunklere Anlauffarben als „strohgelb“ als unzulässig. In den Korrosionsklassen III und IV sind Anlauffarben generell nicht akzeptiert. Ähnliches gilt nach [DIN12502] für den Bau von Trinkwasserverteilungs- und -speichersystemen. AMMANN [Amm2010] spricht bei CrNi-Stählen für „Strohgelb“-Färbungen von einer Grenztemperatur von 250°C. In anderen Quellen werden Temperaturen zwischen 340 °C und 400 °C angegeben [Rug1990] [BSSA2012]. Ein Grenzwert für freien O₂ in Bereichen höherer Temperatur wird nicht direkt festgelegt. Auf Grundlage von Schweißergebnissen [Amm2010] [AWS18.2] können, in Abhängigkeit des jeweiligen Werkstoffes, Werte größer 50 ppm jedoch als kritisch angesehen werden. Daraus abgeleitet müssen beim Schweißen hochlegierter Werkstoffe neben dem eigentlichen Prozessbereich auch alle Bereiche des Werkstückes vor Luftzutritt geschützt werden, die eine Grenztemperatur von 250 °C überschreiten. Sind Anlauffarben generell unzulässig ist die zu schützende Fläche weitaus größer.

Für das Schweißen von **Aluminiumwerkstoffen** wird festgestellt, dass Verunreinigungen des Schutzgases durch O₂ und N₂ zu einem unruhigen Lichtbogen sowie zu verstärkter Spritzer- und Rußbildung führen. Verschiedenfarbige Oxidniederschläge auf und neben der Naht sind die Folge [Erl2012] [Fah2008]. Nach GOECKE [Goe2005] können aus Sicht des Nahtbildes bereits O₂- bzw. N₂-Konzentrationen von 1000 vpm als problematisch eingeschätzt werden. Eine direkte Grenze der O₂-Konzentration im Prozessgas beim MIG-Aluminiumschweißen wird nicht angegeben. NOWASZ [Now2007] spricht im Hinblick auf das Nahtbild beim Aluminiumschweißen von einer maximal zulässigen Lufteinmischung von 0,14 % (ca. 300 ppm O₂ und ca. 1100 ppm N₂). Diese Angaben beziehen sich auf den Gasgehalt im direkten Prozessbereich. Neben dem Einfluss auf das Nahtbild wird von SCHNICK [Sch2010] darauf hingewiesen, dass auf Grund der hohen O₂-Affinität von Aluminium und der im Lichtbogen stattfindenden Aufspaltung von Wasserdampf in O₂ und H₂ unbedingt auf eine gute Schutzgasabdeckung zu achten ist. Wasserstoff kann in der Schmelze gut gelöst werden und führt auf Grund eines Löslichkeitssprungs beim Erstarren zu Porosität im Schweißgut. Gerade deshalb sollte beim Aluminiumschweißen der Zutritt von Umgebungsluft nicht nur im unmittelbaren Prozessbereich sondern auch im Bereich des nachlaufenden Schmelzbadens durch Schleppgas verhindert werden.

Auf Grund der niedrigen Verdampfungstemperaturen und des hohen Dampfdruckes neigt **Magnesium** beim Schweißen zu starker Spritzerbildung. Wird die Schutzgasabdeckung durch Atmosphäregase verunreinigt, verstärkt sich dieser Effekt und es bildet sich vermehrt

ein schwarzer Niederschlag auf und neben der Naht. Dabei handelt es sich, wie auch beim Schweißen von magnesiumhaltigen Aluminiumlegierungen, um Magnesiumoxid (MgO). Um die Verdampfung und Oxidbildung so gering wie möglich zu halten, muss der Zutritt von Atmosphärgasen in den Prozessbereich unbedingt verhindert werden. Auf Grund der Sauerstoffaffinität und der hohen Löslichkeit von H_2 im flüssigen Zustand muss jedoch auch die Schmelze vor Luftzutritt geschützt werden [AiF13.143] [Jüt2000].

Für das Schweißen von **Titan** werden meist Argon beziehungsweise auch Ar-He-Gemische verwendet. Einmischungen von O_2 , N_2 oder H_2 in die Schmelze führen zu einer Versprödung des Werkstoffes. Werkstückbereiche mit Temperaturen oberhalb von 300 °C müssen vor dem Zutritt von Umgebungsluft geschützt werden. Andernfalls entstehen korrosionskritische Anlauffarben, die sowohl die Oberfläche beeinträchtigen als auch auf eine Diffusion der Atmosphärgase in den Werkstoff schließen lassen, was zu Gefügeveränderungen führt [DVS2003-1] [DVS2003-2].

Besondere Anforderungen an die Schutzgasabdeckung beim Schweißen stellen auch **Kupferwerkstoffe**. Bei einer unzureichenden Schutzgasabdeckung kommt schmelzflüssiges Kupfer mit O_2 in Berührung und verbindet sich zu Kupferoxydul (Cu_2O), was beim Abkühlen der Schmelze zu einem Cu_2O -Cu-Eutektikum an den Korngrenzen führt. Es resultiert eine Reduzierung der Schweißnahtzähigkeit. Wird der Schmelze zusätzlich noch H_2 zugeführt, verbindet sich dieser mit dem Sauerstoff des Cu_2O . Der entstehende Wasserdampf (H_2O) ist auf Grund seiner Molekülgröße nicht mehr diffusionsfähig und wird beim Erstarren unter hohem Druck im festen Gefügeverbund eingeschlossen. Dies führt nachfolgend zur Aufweitung der Korngrenzen und zu Rissbildung bzw. Gefügelockerung (Wasserstoffkrankheit) [Ani1987]. Aus diesem Grund wird bei hohen Anforderungen an die Festigkeit sauerstofffreies Kupfer eingesetzt. Beim Schweißen dieser Werkstoffe ist daher die Aufnahme von O_2 während des Schweißens mit Hilfe geeigneter Gasschutzsysteme zu verhindern [DKI2009].

Wird die Schutzgasabdeckung beim Schweißen von **Nickel oder Nickellegierungen** verunreinigt, können vorwiegend durch N_2 - aber auch durch O_2 -Aufnahme in die Schmelze beim Erstarren Poren entstehen. Kommt der Werkstoff bei Temperaturen von mehr als 650 °C mit der Atmosphäre in Berührung, kann interkristalline Oxidation einsetzen und das Gefüge wird geschädigt. Im Zusammenhang dazu steht ein zeitabhängiges Risswachstum (SAGBO-Effekt), welcher von der chem. Zusammensetzung, der Temperatur (bereits ab 500 °C), dem O_2 -Partialdruck und der Spannung im Gefüge abhängt. Ein nachlaufender Gasschutz ist demnach notwendig [GSI2012] [Heu2009] [Roo2008].

3.2 Konstruktion von Schleppgasdüsen

Auf Grund der hohen Bedeutung des Gasschutzes für die Qualität der Schweißverbindung ist die Sicherung der Schutzgasabdeckung ein wichtiges Kriterium für die Auslegung und Konstruktion von Schweißwerkzeugen. Für den primären Gasschutz im Schweißbrenner haben sich seit vielen Jahren Gestaltungsvarianten durchgesetzt, die seitdem im Wesentlichen unverändert angewendet werden. Das Schutzgas in MSG-Schweißbrennern wird bspw. durch das Innen- oder Außenrohr zum Brennerkopf geführt und strömt durch den Düsenstock und ggf. durch einen Gasverteiler radial nach außen in eine Schutzgasdüse, die den Freistrah axial auf die Werkstückoberfläche lenkt. Für WIG-Schweißbrenner hat sich im Bereich der Gasdüse der Einsatz von Gassieben etabliert. Das Ziel ist ein möglichst gleichmäßiger, turbulenzarmer Schutzgasfreistrah, der zu einer geringen Vermischung von Schutzgas mit Atmosphärgasen führt. Derartige Siebe werden in MSG-Schweißbrennern nicht eingesetzt, da sich die Siebe durch prozessbedingte Schweißspritzer zusetzen und die Qualität der Gasabdeckung damit reduzieren würden [Bin2012] [EWM2012] [Din2012] [Tbi2012].

Durch ein in den Jahren 2008-2011 beim Antragsteller bearbeitetes Forschungsprojekt [AiF15.871] konnte das Verständnis über die primäre Gasströmung in MSG-Schweißbrennern und die Wechselwirkungen von Schutzgasfreistrah und Prozess deutlich verbessert werden. Neben vielen Konstruktionsempfehlungen und Hinweisen für KMU hinsichtlich einer guten Schutzgasabdeckung wurde erläutert, in wie weit es sinnvoll ist, auf geänderte Prozessparameter oder Randbedingungen mit einer Erhöhung der Schutzgasmenge zu reagieren um eine hochwertige Gasabdeckung sicherzustellen. Diese Erhöhung der Gasmenge bezieht sich auf Werte mehrerer Liter je Minute. Da die Mantelfläche einer Schleppgasdüse gegenüber dem Querschnitt eines Schweißbrenners um ein Vielfaches größer ist (z.T. Faktor 1.000) würde eine Steigerung der Gasmenge zu einer unzulässigen Erhöhung der Gaskosten führen. Diese Maßnahme zur Verbesserung der Gasabdeckung ist für Schleppgasdüsen daher ungeeignet.

Um den geforderten Gasschutz bei zugleich möglichst geringen Gasmengen sicherzustellen, existieren für Schleppgasdüsen verschiedenste Gestaltungsvarianten (Abbildung 3.2). Unabhängig, ob es sich um kommerzielle Produkte [Dän2010] [PWT2012] [WAL2005] oder selbstentwickelte Schleppgasdüsensysteme handelt, können diese Gestaltungsvarianten in die nachfolgend aufgeführten Typenvertreter eingeteilt werden, deren grundlegende Funktionsweisen im Anschluss beschrieben werden.

- ausgeformte Primärgasdüsen
- nachlaufende Rohre (sog. "Gasorgeln")
- Gasboxen ohne poröse Materialien
- Gasboxen mit porösen Materialien

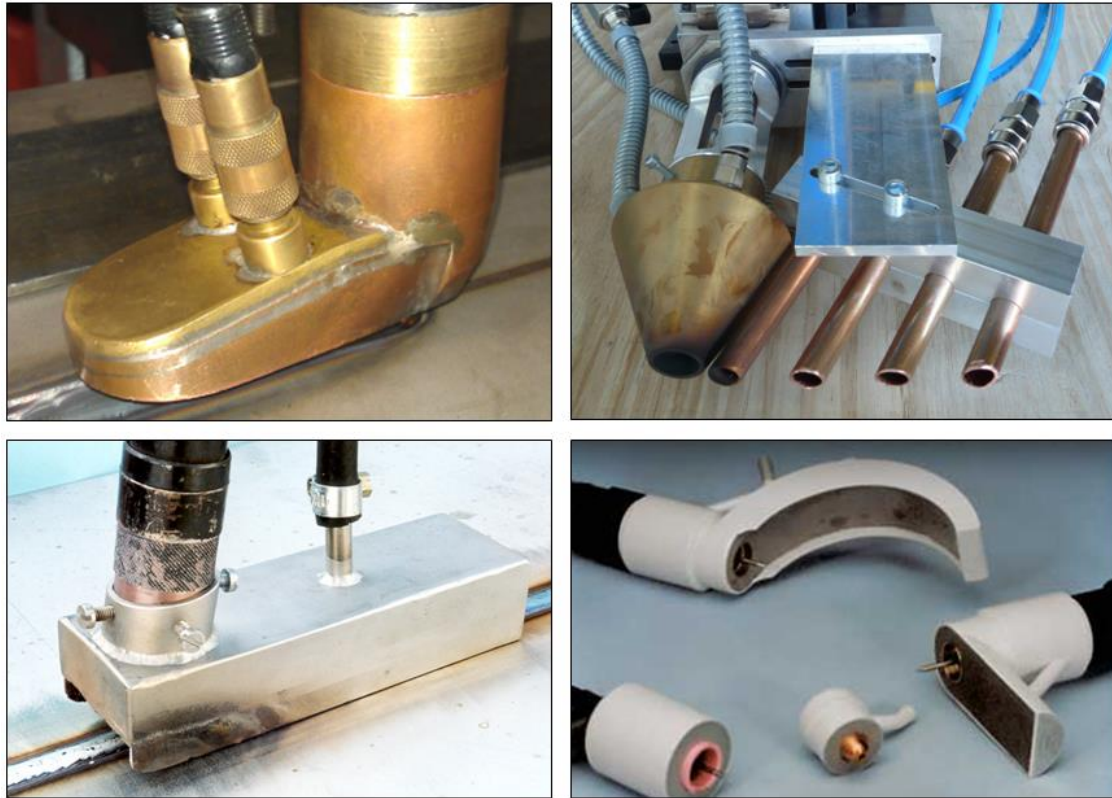


Abbildung 3.2: Gestaltungsvarianten derzeit genutzter Schleppegasdüsen (oben links: ausgeformte, wassergekühlte Primärgasdüse, oben rechts: Gasorgel, unten links: Gasbox MSG-Schweißen [Amm2004], unten rechts: Precision Welding Technologies [PWT2012])

In einigen Fällen wird eine **ausgeformte Primärgasdüse** eingesetzt und auf eine vom Prozessgas unabhängige, zweite Gaszuführung verzichtet. Diese Variante findet vor allem bei langsamen Prozessen mit entsprechend kleinen Schmelzbädern und niedrigem Energieeintrag Anwendung. Es ist jedoch zu hinterfragen, ob durch dieses Gestaltungskonzept eine gleichmäßige Gasströmung erzielt werden kann oder ob Geschwindigkeitsgradienten und Wirbelstrukturen zur Einmischung von Umgebungsluft führen, die die Wirksamkeit derartiger Düsen stark einschränken und zu einem erhöhten Gasverbrauch führen.

Sogenannte **Gasorgeln** realisieren einen zusätzlichen Gasschutz durch ein oder mehrere hintereinander angeordneter Gasröhren, welche die Schweißnaht mit zusätzlichem Schleppegas umgeben sollen. Derartige Anwendungen sind vor allem aus dem Bereich der

Laserschweißtechnik bekannt, werden vereinzelt aber auch beim MSG-Schweißen eingesetzt. Es ist zu erwarten, dass die einzelnen Freistrahle in Wechselwirkung stehen und Turbulenzen am Werkstück induziert werden, welche die Qualität der Gasabdeckung limitieren. Untersuchungen zur Visualisierung der resultierenden Strömungseigenschaften und auftretender Turbulenzeffekte konnten bisher nicht recherchiert werden. Weiterhin fehlen Aussagen zu geeigneten Durchmessern oder Abständen derartiger Gasröhrchen.

Weit verbreitet sind **Gasboxen mit porösen Materialien** wie Schäumen, Sinterwerkstoffen oder Gassieben. Das vom porösen Werkstoff angestaute Schutzgas baut im Düseninneren gegenüber der Umgebung einen Überdruck auf. Der daraus resultierende Druckabfall soll zu einer homogenen Geschwindigkeitsverteilung über die Düsenfläche und zu einer gleichmäßigen, turbulenzarmen Anströmung des Werkstücks führen. Obwohl die Anbieter von Schleppgasdüsen z.T. mit dem Potential zur Gaseinsparung werben, sind diese Systeme im Vergleich zu anderen Schleppdüsenvarianten durch lange Spülzeiten und einen hohen Gasdurchsatz gekennzeichnet. Unklar ist, ob der Anforderung an einen geringen Gasverbrauch durch ein gleichmäßiges Strömungsprofil über der gesamten Düsenfläche entsprochen werden kann. In Forschungsvorhaben [AiF15.871] wurde gezeigt, dass definierte Geschwindigkeitsverteilungen in Primärgasdüsen von MSG-Brennern Vorteile in Bezug auf das Ansaugverhalten des Lichtbogens besitzen. Das Konstruktionsprinzip von sogenannten gradierten Strömungen ist hinsichtlich des Gassparpotentials an Schleppgasdüsen zu untersuchen. Besonders geeignet sind Gasboxen mit porösen Materialien für sehr saubere Schweißprozesse, u.a. für das Wärmeleitungsschweißen mit nichtabschmelzender Elektrode (WIG, Plasma). Entstehen während des Schweißens jedoch Ruß oder Spritzer werden die porösen Materialien zugesetzt. Der Einsatz an MSG- oder Stichlochprozessen (WIG, Laser, Plasma) ist somit nur eingeschränkt möglich.

Speziell für spritzerbehaftete Prozesse werden **Gasboxen ohne poröse Materialien** eingesetzt. Dabei wird versucht, eine gute Gasabdeckung durch ein möglichst gleichmäßiges Einströmen des Gases zu erreichen. So werden beispielsweise Verteilungsrohre im Düsenraum angebracht [Wad2010]. Auf Grund von Praxiserfahrungen ist jedoch davon auszugehen, dass am Werkstück keine gleichmäßige Gasabdeckung erreicht werden kann. Es ist zu hinterfragen, ob Wirbelfelder und Turbulenzen zur Einmischung von Schutzgas mit Umgebungsluft führen.

Offensichtlich ist, dass jedes Konstruktionsprinzip durch spezielle Randbedingungen in der Praxis gerechtfertigt wird. Es fehlen jedoch objektive strömungstechnische Bewertungen, ein Vergleich der Düsenvarianten untereinander sowie eine Quantifizierung der Anwendungspos-

tentiale. Weiterhin ist nicht bekannt, inwieweit durch neue konstruktive Maßnahmen, z.B. durch alternative Konstruktionsmöglichkeiten zur Gasverteilung oder Anpassung von Strömungsprofilen, eine Verbesserung der Gasabdeckung erreicht werden kann.

3.3 Methoden der Strömungsanalyse

Um Schleppgasdüsen hinsichtlich der individuellen Strömungsstrukturen und der daraus resultierenden Schutzgasabdeckung zu analysieren und zu verbessern, ist es notwendig, die Schutzgasströmung zu visualisieren und die Qualität der Gasabdeckung zu quantifizieren. Hierfür können prinzipiell sowohl numerische als auch diagnostische Methoden angewendet werden. Im Rahmen des DFG/AiF-Lichtbogenclusters „Lichtbogenschweißen – Physik und Werkzeug“ wurden diese Methoden für Untersuchungen von Gasströmungen an Schweißprozessen an der Forschungsstelle angewendet und weiterentwickelt [AiF15.871]. Abbildung 3.3 zeigt exemplarische Ergebnisse der Methoden bei der Untersuchung von MSG-Primärgasströmungen. Die Methoden werden nachfolgend kurz beschrieben. Detaillierte Informationen können [Dre2013-1] und [Dre2013-2] entnommen werden.

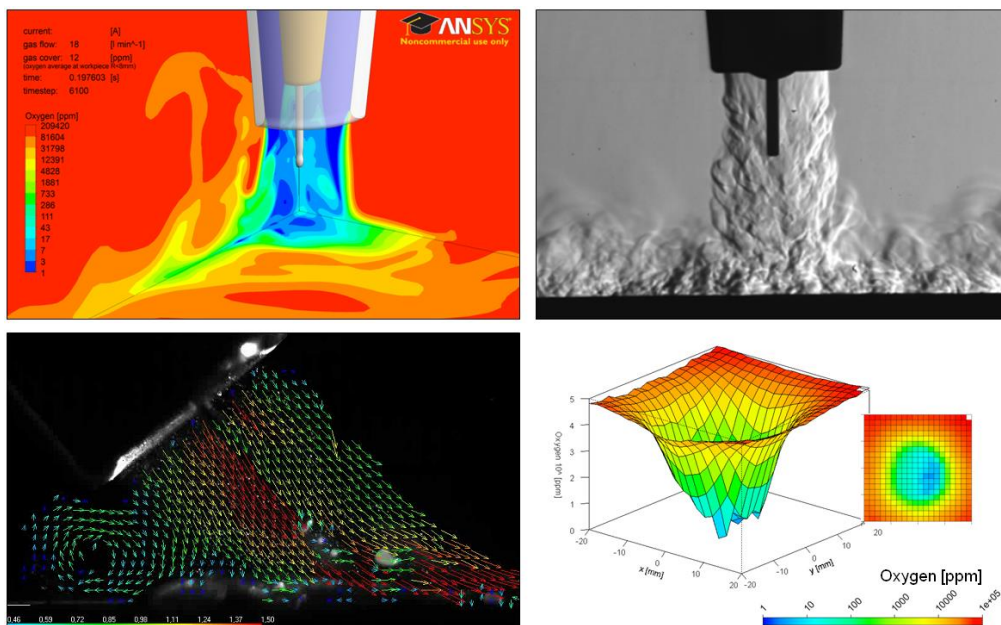


Abbildung 3.3: Methoden der Strömungsanalyse, oben links: Numerische Simulation, oben rechts: Schlierentechnik, unten links: Particle Image Velocimetry (PIV), unten rechts: O₂-Messung

Die Anwendung der **numerischen Simulation** ermöglicht die örtlich und zeitlich hochaufgelöste Visualisierung der Gasströmung sowohl im Brenner und der Schleppdüse als auch im Prozessbereich.

Die Simulation eignet sich insbesondere um Spülzeiten sowie die Entstehung von Wirbeln und turbulenten Strömungseffekten in verdeckten Bereichen im Düseninneren darzustellen und auf ihre Ursachen zurückzuführen. Im Modell können nahezu alle physikalischen Größen, u.a. auch Diffusionsprozesse, visualisiert werden, sodass auch komplexe Wechselwirkungen zwischen Schutzgasströmung und Prozess oder Ursache-Wirkungszusammenhänge für die Verunreinigung der Gasabdeckung analysiert werden können. Die Simulation ist damit ein nützliches Werkzeug für die schnelle und kosteneffiziente Entwicklung von Funktionsmustern und deren numerischer Erprobung. Die numerische Strömungssimulation sollte auf Grund der notwendigen Modellvalidierung und der Absicherung von Ergebnissen immer in Kombination mit diagnostischen Verfahren der Strömungsanalyse angewendet werden.

Grundlage der numerischen Simulation von Schweißlichtbögen bildet ein magnetohydrodynamisches Gleichungssystem, welches die Gleichungen der Strömungsmechanik mit den Gleichungen der Elektromagnetik verknüpft. Zusätzlich zur Masseerhaltungsgleichung (3.3.1) wird eine Gleichung für den Massenanteil der Luft (hier als Komponente B bezeichnet) eingeführt, vgl. Gleichung (3.3.2).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (3.3.1)$$

$$\frac{\partial (\rho Y_B)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \vec{u} Y_B + \frac{n^2}{\rho} \bar{m}_A \bar{m}_B D^{X_{A-B}} \nabla X_B \right) = 0 \quad (3.3.2)$$

Die Plasmageschwindigkeit wird durch die Lorenzkraft bestimmt. Im Rahmen der Simulation erfolgt die Berücksichtigung in der Impulserhaltungsgleichung (3.3.3) durch das Kreuzprodukt der elektrischen Stromdichte und der magnetischen Induktion. Die geschwindigkeitsabhängigen Strömungswiderstände von porösen Materialien werden durch einen zusätzlichen Quellterm berücksichtigt.

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \vec{j} \times \vec{B} + S \quad (3.3.3)$$

In der Energieerhaltungsgleichung (3.3.4) wird sowohl die Widerstandserwärmung als auch die Nettostrahlungsemission nach dem Nettoemissionkoeffizientenmodell von LOWKE [Low1974] berücksichtigt.

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \frac{j^2}{\sigma} - 4\pi \epsilon_{NEK} \quad (3.3.4)$$

Die Berechnung des elektrischen Potentials und der elektrischen Stromdichte erfolgt durch die Implementierung der Ladungsträgererhaltungsgleichung (3.3.5), die Berechnung der magnetischen Induktion auf Grundlage des magnetischen Vektorpotentials (3.3.6).

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) = 0 \quad (3.3.5)$$

$$\Delta \vec{A} = -\mu_0 \vec{j} \quad (3.3.6)$$

Eine detaillierte Beschreibung des Lichtbogenmodells und der verwendeten Stoffdaten ist u.a. in [Mur2001] [AiF15.774] [Dreh2014] [Schn2010] zu finden.

Zur experimentellen Bestimmung von Strömungsfeldern werden partikelbasierte Verfahren wie die Laser-Doppler-Anemometrie (LDA) oder die **Partikel Image Velocimetry (PIV)** eingesetzt. Durch ZSCHETZSCHE [Zsch2007] und FÜSSEL *et al.* [Füs2005] wurden beide Methoden bereits hinsichtlich deren Eignung zur Analyse der Schutzgasströmung an Schweißprozessen erprobt. Dabei wurde aufgezeigt, dass sich aufgrund der stark instationären Strömungsverhältnisse besonders die PIV als 2D-Ganzfeldmessverfahren eignet. Bei der PIV wird die zu analysierende Strömung mit Tracer-Partikeln wie z.B. Magnesiumoxid versetzt, die durch einen Laser belichtet und mit einer Kamera aufgezeichnet werden. Die Belichtung der Partikel erfolgt mit Hilfe einer speziellen Optik, die das Laserlicht in einer Ebene auffächert. Somit werden lediglich Partikel belichtet, die sich in dieser Analyseebene befinden. Im Postprocessing werden die Verschiebungen von Partikelgruppen zwischen zwei Bildern mit einem definierten Zeitabstand analysiert, um die quantitative Rekonstruktion von Strömungsfeldern durchzuführen. Zusammenfassend ermöglicht die PIV die zeitlich und örtlich hochaufgelöste quantitative Beschreibung des Strömungsfeldes von Schutzgasschweißprozessen. Die Strömung kann unabhängig der chemischen Zusammensetzung des verwendeten Gases visualisiert werden. Zu berücksichtigen ist, dass die Partikel trotz ihrer Größe gerade bei hohen Geschwindigkeitsgradienten gewissen Trägheitseinflüssen unterliegen. Strömungen außerhalb des Schutzgasfreistrahls können nicht visualisiert werden, da sich in diesem Bereich keine Partikel befinden. Zudem werden durch das Korrelationsverfahren im Wesentlichen die Hauptströmungen berechnet, sodass die PIV zur Visualisierung von Turbulenzen nur bedingt geeignet ist. Eine Anwendung der PIV an Gasführungen mit porösen Werkstoffen ist aufgrund der Verschmutzung nur sehr eingeschränkt möglich.

Um Gasströmungen zu visualisieren, kann der Strömung neben definierten Tracer-Partikeln auch ein Nebelgas oder Rauch zugemischt werden. In der Schweißtechnik wurde die **Rauchfadenmethode** von EBERT [Ebe2007] verwendet um die Schutzgas- bzw. die Absaugströmung von MSG-Absaugbrennern zu visualisieren. Durch Anwendung des Verfah-

rens kann beispielsweise überprüft werden, ob Düsensysteme Leckagen und damit potentielle Verunreinigungsquellen aufweisen oder in wie weit das Austreten von Gas gleichmäßig über den Düsenquerschnitt erfolgt. Zudem können eingeschränkte Aussagen zum Turbulenzgrad oder zu Geschwindigkeitsprofilen getroffen werden. Bei der Visualisierung von Staustromungen über dem Werkstück wird die Gasdüse teilweise durch den Nebel verdeckt. Weiterhin ist anzumerken, dass durch die Zumischung des heißen Nebel-Fluids die ursprünglichen Eigenschaften des Schutzgases beeinflusst werden. Auf diese Weise verändern sich jedoch auch Ablösungen am Werkstück sowie Auftriebsströmungen. Aufnahmen inkl. Lichtbogen sind auf Grund der fehlenden Schutzgasatmosphäre nicht möglich.

Durch die **Schlierenmesstechnik** werden Strömungen in transparenten Medien auf Basis des von der Dichte bestimmten Brechungsindex visualisiert. In einer Schlierenapparatur werden die durch Brechung ausgelenkten Lichtstrahlen an einer Schlierenkante ausgeblendet. Im resultierenden Schattenbild können Dichteunterschiede infolge von Wirbeln und Turbulenzen, unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung oder Temperaturunterschieden im Gas visualisiert und deren Bewegung (Strömung) analysiert werden. Durch die Anwendung strahlungsselektiver Beleuchtungsquellen und darauf abgestimmter Filtertechnik können Schutzgasströmungen auch an strahlungsintensiven Lichtbögen visualisiert werden. Die Schlierenmethode ist insbesondere geeignet um Strömungen zu charakterisieren, die sich nicht unmittelbar zwischen Schutzgasdüse und Werkstück ausbilden. Es ist jedoch zu beachten, dass Rückschlüsse auf die exakte Position einer turbulenten Strömungsstruktur nur eingeschränkt getroffen werden können, da es sich um ein Durchlichtverfahren handelt. Äußere Effekte können demnach auch innerer Strömungsstrukturen überlagern und die Visualisierung erschweren. Die Bestimmung von Strömungsgeschwindigkeiten und Konzentrationen ist nicht möglich.

Neben den Methoden der Strömungsvisualisierung kann mit Hilfe der **Sauerstoffmessung**, unter Nutzung des Lambda-Sonden-Verfahrens und einer gekühlten Kupferanode, der Verunreinigungsgrad des Schutzgases gemessen werden. FUENTES MUÑOZ [Fue2011] verwendete diese Methode zur Untersuchung von WIG-Schweißbrennern. Für die Untersuchung von MSG-Schweißbrennern müssen verfahrensbedingt kurze Wolframstifte in die Stromkontaktrohre eingepresst werden. Dadurch wird der Einfluss der abschmelzenden Elektrode vernachlässigt. Die Analyse erfolgt, unter Verwendung von inerten Schutzgasen, durch automatisierte linien- oder flächenförmige Auswertungen.

4 Zielstellung

Das Ziel des Vorhabens ist die strömungstechnische Bewertung, Kategorisierung und Verbesserung von Schleppgasdüsen. Durch das Vorhaben sollen die Anwender von Schleppgasdüsen in die Lage versetzt werden, die technologischen sowie wirtschaftlichen Vor- und Nachteile einzelner Gestaltungsvarianten abschätzen zu können und diese gezielt zur Steigerung ihrer Wettbewerbsfähigkeit auszunutzen. Des Weiteren sollen die Anwender sowohl bei der Auswahl geeigneter Schleppgasdüsenkonzepte als auch bei der zielgerichteten und effizienten Anpassung bestehender Konstruktionen an fertigungsspezifische Anforderungen unterstützen werden. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden zur **Reduzierung der Entwicklungskosten** die folgenden Ziele verfolgt:

- I. Steigerung des Prozessverständnisses: Auf Grundlage von numerischen und experimentellen Methoden werden die konstruktionsspezifischen Ursachen der Kontamination mit Umgebungsluft aufgezeigt sowie sensitive Einflussgrößen diskutiert. Neben der Beschreibung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen werden Funktionselemente (poröse und nichtporöse Materialien) zur möglichen Anwendung in Schleppgasdüsen untersucht und bewertet.
- II. Erarbeitung von Vorzugsvarianten: Auf Grundlage eines verbesserten Prozessverständnisses erfolgt zum einen eine Kategorisierung von Schleppgasdüsenkonzepten in Abhängigkeit des Gaseinlasses und der verwendeten Funktionselemente. Zum anderen werden Vorzugsvarianten definiert, wobei durch die Reduzierung der geometrischen Vielfalt KMU in die Lage versetzt werden, Schleppgasdüsenkonzepte zielgerichtet und mit reduziertem Aufwand auszuwählen bzw. aus dem Portfolio kommerzieller Anbieter auszuwählen.
- III. Formulierung allgemeiner Konstruktionsempfehlungen: Im Hinblick auf die sehr starke Abhängigkeit der konstruktiven Gestaltung von Schleppgasdüsen von den fertigungsspezifischen Randbedingungen werden allgemeine Konstruktionsempfehlungen abgeleitet, welche eine deutlich vereinfachte Übertragbarkeit gegebener Konstruktionen auf andere Anwendungsfälle ermöglichen.

Zur **Reduzierung der Fertigungskosten** und zur **Verbesserung der Anwendbarkeit** von Schleppgasdüsen werden die folgenden Ergebnisse angestrebt:

- I. Erhöhung der Prozesssicherheit: Basierend auf den oben genannten Erkenntnissen wird das Ziel verfolgt, allgemeingültige Gestaltungsvarianten mit einem sehr guten

und robusten Gasschutz abzuleiten. Dabei werden sowohl die Stabilität der Gasabdeckung als auch der Einfluss von Leckagen diskutiert.

- II. Verbesserung der Zugänglichkeit: Im Hinblick auf die meist stark eingeschränkte Zugänglichkeit bei der Anwendung von Schleppgasdüsen in realen Fertigungsumgebungen werden Möglichkeiten aufgezeigt, den Abstand zwischen der Schleppgasdüsenunterseite und der Werkstückoberseite zu vergrößern.
- III. Steigerung der Wirtschaftlichkeit: In Bezug auf den Gasverbrauch wird, neben einer Reduzierung des notwendigen Schleppgasvolumenstroms während des Schweißens, vor allem eine Verringerung der notwendigen Spülzeiten angestrebt.

Als allgemeines Ziel des Forschungsprojektes wird des Weiteren eine Reduzierung der Nacharbeit definiert. Die notwendige Anwendung kostenintensiver und umweltkritischer Chemikalien für die nass-chemische Entfernung von Oxidschichten sowie eine teure mechanische Nachbehandlung von geschweißten Bauteilen soll erheblich reduziert werden bzw. vollständig entfallen. Für eine verbesserte Anwendbarkeit und zur Minimierung von potenziellen Fehlerquellen werden anwendungsnahe, einfache und robuste Lösungen angestrebt. Speziell für das WIG-Schweißen von hochlegiertem Stahl werden die erarbeiteten Ergebnisse aus den experimentellen und numerischen Untersuchungen zusätzlich durch Schweißversuche verifiziert. Dadurch wird gleichzeitig der Nachweis der Praxisrelevanz der beabsichtigten Projektziele erbracht.

5 Methodische Vorgehensweise und Versuchsbeschreibung

Die Evaluierung unterschiedlicher Schleppgasdüsenkonzepte sowie deren konstruktiver Ausführung erfolgt anhand von WIG-Schweißprozessen und unter Nutzung der nachfolgend genannten **experimentellen und numerischen Methoden**.

- Experimentelle bzw. numerische Bestimmung der materialspezifischen Kennwerte der unterschiedlichen Funktionselemente mittels Druckverlustmessung.
- Experimentelle Quantifizierung der Schutzgasabdeckung an der Werkstückoberfläche durch O₂-Messung.
- Qualitative Bewertung der Strömungscharakteristik mittels Schlierentechnik.
- Beschreibung von Ursache-Wirkungs-Zusammenhängen, Diskussion sensitiver Einflussgrößen und Optimierung von strömungsrelevanten Düsengeometrien durch die Anwendung der numerischen Simulation.
- Nachweis der Erkenntnisse durch Blind- und Verbindungsschweißungen an hochlegiertem Stahl.

Grundlage der Untersuchungen bilden die nachfolgend genannten **Zielkriterien und Forderungen**:

- Zur Realisierung oxidationsfreier Schweißnähte, unabhängig vom zu fügenden Grundwerkstoff, wird als Zielkriterium eine maximal zulässige O₂-Konzentration an der Werkstückoberfläche von 20 ppm definiert.
- Zur Gewährleistung der Prozesssicherheit wird ein minimaler Abstand zwischen der Schleppgasdüsenunterseite und der Werkstückoberfläche von 3 mm gefordert (schleifende Abdichtungen werden nicht betrachtet).
- Für eine robuste Anwendung von Schleppgasdüsen ohne exakte Kenntnis des optimalen Arbeitspunktes wird ein hinreichend guter Gasschutz über einen weiten Einstellbereich des Schleppgasvolumenstroms gefordert.

Abbildung 5.1 veranschaulicht die methodische Vorgehensweise. Eine Diskussion der Strömungseigenschaften sowie der resultierenden Schutzgasabdeckung erfolgt, nach einer grundsätzlichen Bewertung unterschiedlicher Düsenkonzepte, zunächst an Schleppgasdüsen ohne Prozesseinfluss. Auf Grundlage einer reduzierten physikalischen Komplexität werden so eindeutige Rückschlüsse von der konstruktiven Ausführung der Schleppgasdüse auf die Qualität der Gasabdeckung möglich. Zum anderen bilden die erarbeiteten Ergebnisse die Grundlage für eine angestrebte modulare Längenskalierung (modularer Aufbau von

Schleppgasdüsen). Nach anschließendem Ausschluss ungeeigneter Konstruktionsprinzipien erfolgt die Berücksichtigung des Lichtbogenprozesses, eine Diskussion sensibler Prozessparameter sowie die Schwachstellenanalyse und Optimierung zielführender Düsenkonzepte.

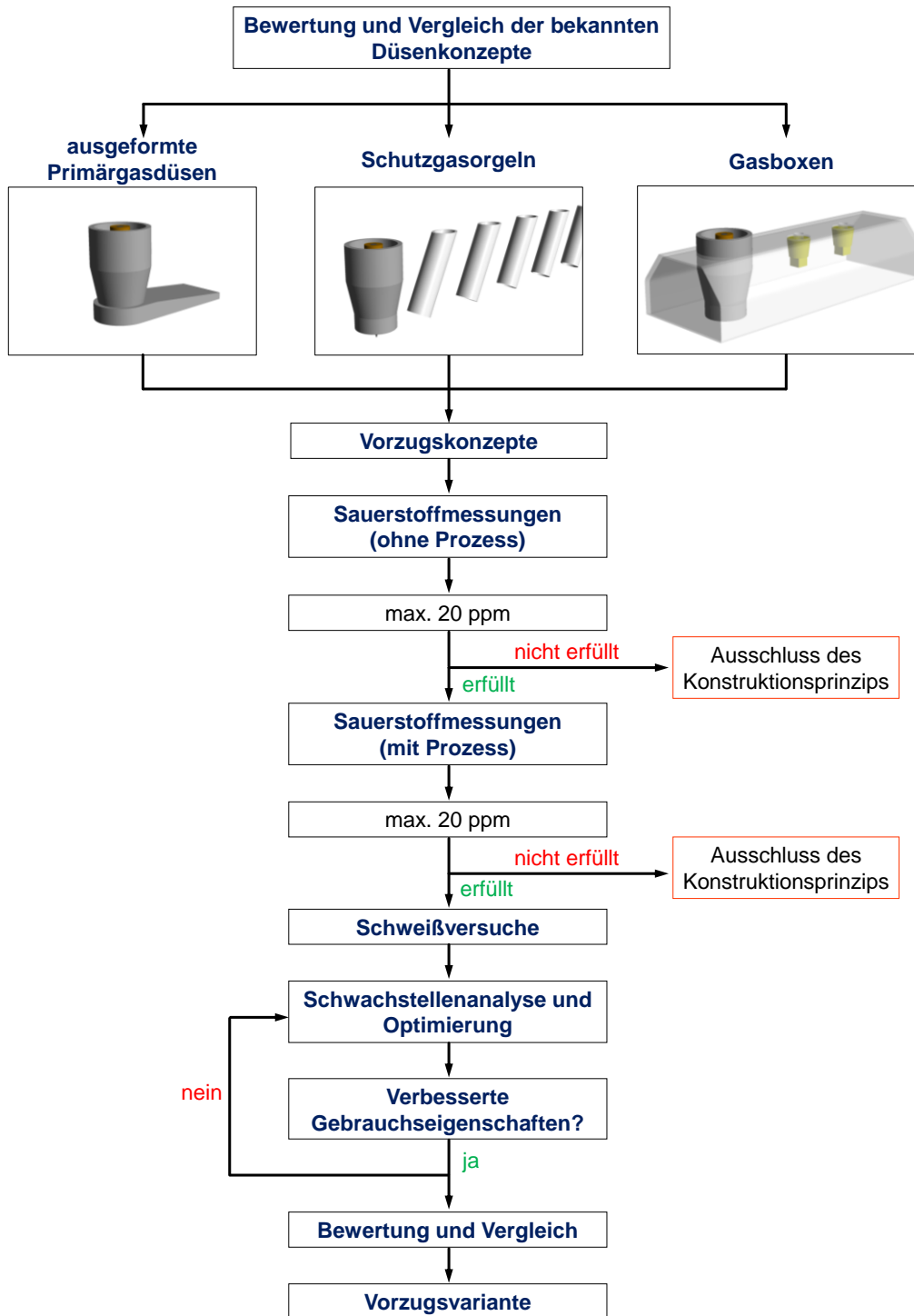


Abbildung 5.1: Methodische Vorgehensweise bei der Beurteilung unterschiedlicher Gestaltungsvarianten von Schleppgasdüsen

Im Hinblick auf die große Vielfalt an konstruktiven Ausführungen von Gasboxen werden als Abmessungen der Schleppgasdüse eine Breite von 50 mm und eine Höhe von 30 mm festgelegt. Die Länge wird auf 100 mm (Untersuchungen von Gasboxen ohne Prozess) bzw. 150 mm (Untersuchungen von Gasboxen mit Prozess) beschränkt.

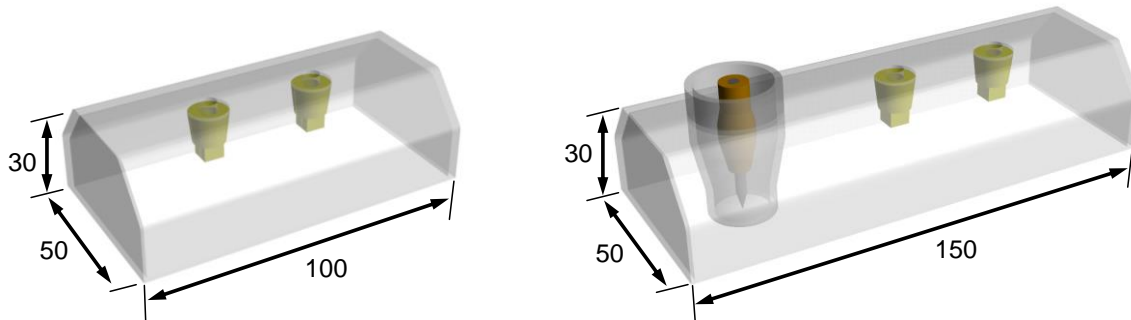


Abbildung 5.2: Abmessungen der untersuchten Gasboxen ohne (links) und mit Prozess (rechts)

5.1 Druckverlustmessung

Ziel der Untersuchungen ist ein quantifizierter Vergleich der Funktionselemente (Schalldämpfer und Strömungsgleichrichter) hinsichtlich ihrer Einflussnahme auf die Strömung. Die Berücksichtigung in der numerischen Simulation erfolgt durch die Definition eines Quellterms in der Impulserhaltungsgleichung, wobei die Definition der geschwindigkeitsabhängigen Kraftdichte im Modell nach Gleichung (5.1.1) die Vorgabe eines linearen (C_{R1}) und eines quadratischen Widerstandskennwertes (C_{R2}) voraussetzt.

$$\vec{S} = C_{R1}\vec{u} + C_{R2}|\vec{u}|\vec{u} = \frac{K_1}{s}\vec{u} + \frac{K_2}{s}|\vec{u}|\vec{u} \quad (5.1.1)$$

Die materialspezifischen Widerstandskennwerte werden auf Grundlage der gemessenen Druckverlustkurve bestimmt, in der der funktionale Zusammenhang zwischen dem Druckverlust und der mittlerer Geschwindigkeit bzw. zwischen dem Druckverlust und dem Volumenstrom beschrieben wird (5.1.2). Die Anpassung an die experimentell bestimmten Druckverlustwerte erfolgt durch ein Polynom zweiten Grades.

$$\Delta p = K_1 u + K_2 u^2 = K_1 \frac{V}{\pi/4 d^2} + K_2 \left(\frac{V}{\pi/4 d^2} \right)^2 \quad (5.1.2)$$

Abbildung 5.3 veranschaulicht den Versuchsaufbau zur messtechnischen Bestimmung des Druckabfalls einzelner Funktionselemente. Grundlage ist eine laminarisierte Rohrströmung,

wobei der über das Funktionselement entstehende Druckverlust durch ein Druckdifferenzmessgerät bestimmt wird.

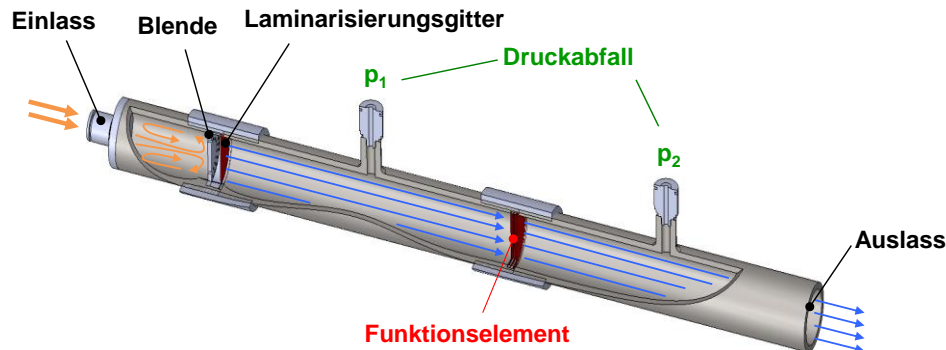


Abbildung 5.3: Versuchsaufbau zur experimentellen Bestimmung der spezifischen Druckverlustkurve in Abhängigkeit des Volumenstroms

In Abhängigkeit der Komplexität des Funktionselements ergeben sich zwei unterschiedliche Methoden zur Bestimmung der materialspezifischen Kennwerte:

Grundlage der **analytischen Kennwertermittlung** sind Funktionselemente mit konstanter Wandstärke und definierter Oberfläche. Die Bestimmung der Widerstandskennwerte erfolgt auf Grundlage der experimentell bestimmten Druckverlustkurven sowie unter Verwendung der Gleichungen (5.1.1) und (5.1.2). Bei bekannter Materialcharakteristik ist eine Kennwertermittlung von Funktionselementen mit wechselnder Wandstärke und / oder nicht quantifizierbarer Oberfläche durch Druckverlustmessung eines Referenzkörpers mit bekannten Geometriedaten möglich.

Zur Kennwertermittlung von dreidimensionalen Geometrien mit veränderlichen Wandstärken und unbekannter Materialcharakteristik (z.B. Schalldämpfer) erfolgt die Materialdatenbestimmung auf Grundlage von numerischen Methoden (**numerische Kennwertermittlung**). Grundlage ist die räumliche Diskretisierung der Geometrie des Funktionselementes (Abbildung 5.4) sowie die Berücksichtigung des Druckverlustes durch einen ortsabhängigen Quellterm in der Impulserhaltungsgleichung (Definition im Bereich des Funktionselementes). Auf Grundlage der experimentell bestimmten Druckdifferenzkurven erfolgt die Bestimmung der Widerstandskennwerte im Anschluss durch das Newton-Verfahren mit Vorwärtsdifferenzenquotienten.

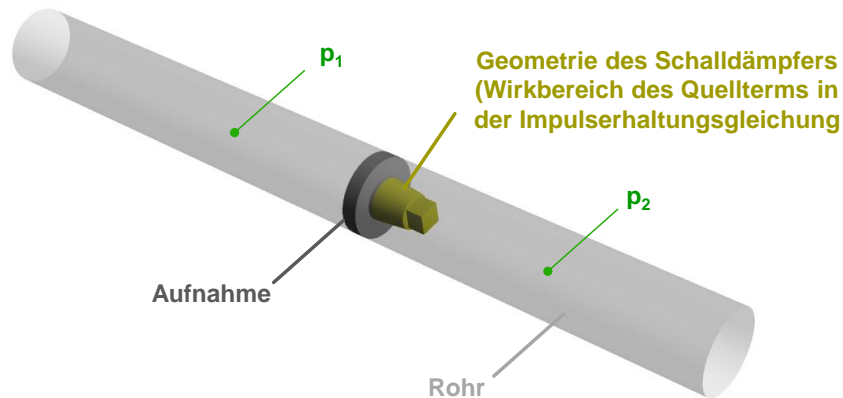


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung des Berechnungsgebiets des numerischen Modells zur Bestimmung der Widerstandskennwerte für dreidimensionale Geometrien mit variabler Wandstärke und unbekannter Materialcharakteristik

5.2 Sauerstoffmessung

Zur experimentellen Bewertung der Schutzgasabdeckung wird die O_2 -Konzentration auf der Oberfläche einer gekühlten Kupferanode stationär und in diskreten Abständen bestimmt. Grundlage ist das Lambda-Sonden-Verfahren, wobei als Schutz- und Schleppegas Argon verwendet wird. Im Hinblick auf die sehr große geometrische Vielfalt von Schleppegasdüsen und dem daraus resultierenden Versuchsumfang erfolgt die Messung entlang charakteristischer Linienzüge, vgl. Abbildung 5.5. Die Methodik erlaubt es, gegenüber den von DREHER [Dreh2014] verwendeten Flächenscans, aussagefähige Messungen für nichtrotationssymmetrische Geometrien mit maßgeblich reduzierten Messzeiten zu erreichen.

Die Bestimmung der notwendigen Spülzeit erfolgt zeitaufgelöst an fünf unterschiedlichen Stellen der Werkstückoberfläche. Die Lage der Messpositionen ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Als Abbruchkriterium der Messungen wird eine O_2 -Konzentration von 20 ppm definiert.

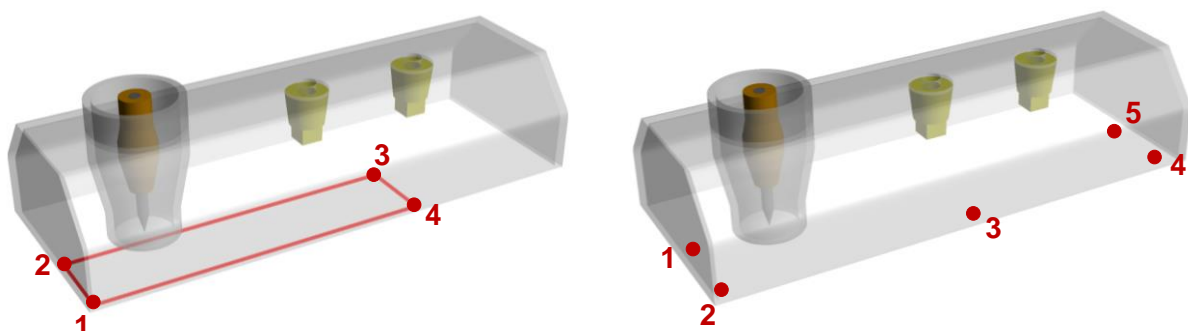


Abbildung 5.5: Prinzip der Sauerstoffmessung zur Bewertung der Schutzgasabdeckung (links) und der Spülzeiten (rechts)

5.3 Strömungssimulation

Im Rahmen von numerischen Untersuchungen erfolgt eine Abstraktion des Strömungsraums und der Festkörpergeometrien (Werkstück, Wolframelektrode, Stromkontaktdüse, Schutz- und Schleppgasdüse) zu einem spiegelsymmetrischen Modell, wobei das Werkstück vereinfacht als eben angenommen wird. Zur Diskussion der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge werden alle relevanten Konstruktionsprinzipien sowie Geometrievariationen räumlich diskretisiert. Abbildung 5.6 veranschaulicht exemplarisch das Modell einer Schleppgasdüse mit zwei Sintermetallschalldämpfern.

Die Implementierung des Lichtbogens erfolgt auf Grundlage des in Kapitel 3.3 beschriebenen MHD-Modells. Als Werkstoff wird für die Elektrode lanthanisiertes Wolfram, für die Stromkontaktdüse Kupfer und für die Schutz- sowie die Schleppgasdüse Aluminium angenommen. Die Berechnungen erfolgen auf Grundlage der temperaturabhängigen Stoffeigenschaften nach RADAJ [Rad1999]. Als Fluid wird, unter der Annahme eines lokalen thermodynamischen Gleichgewichtes, ein Zweistoffgemisch aus Argon und Luft definiert. Auftretende Diffusionseffekte werden durch temperatur- und konzentrationsabhängige Diffusionskoeffizienten nach MURPHY berücksichtigt [Mur1995].

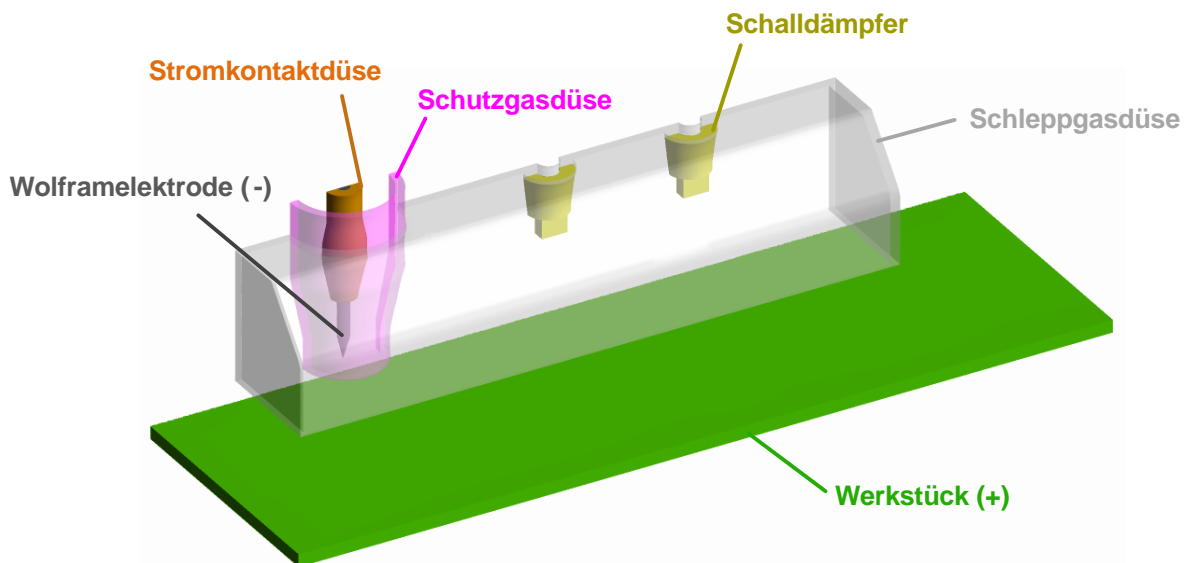


Abbildung 5.6: Beispielhafte Darstellung des Berechnungsgebietes des numerischen Modells

Basierend auf den Untersuchungen von DREHER [Dreh2014] und FÜSSEL [AiF15.871] werden turbulente Strömungseffekte durch die Anwendung des SST- (stationär) bzw. des DES-Turbulenzmodells (transient) approximiert. Die Berücksichtigung der Thermoemission und des damit verbundenen Wärmestroms an der Kathode erfolgt auf Grundlage der Ergebnisse von FÜSSEL [AiF15.774] und SCHNICK [Schn2010]. Die Beschreibung von Funktionselemen-

ten (Schalldämpfer bzw. Strömungsgleichrichter) erfolgt durch Definition eines Quellterms in der Impulserhaltungsgleichung, vgl. Kapitel 5.1.

5.4 Schweißversuche

Im Rahmen von Schweißversuchen mit hochlegierten Stahl wurden sowohl die erzielten Ergebnisse durch Blindschweißungen auf ebenen Blechen und Rohren verifiziert als auch deren Übertragbarkeit auf praxisrelevante Fügeaufgaben durch Verbindungsschweißungen an Blechen (I-Naht im Stumpfstoß) überprüft. Unter Voraussetzung einer qualitätsgerechten Schweißverbindung wurden die resultierenden Anlauffarben in Abhängigkeit der konstruktiven Ausführung der Schleppgasdüse bewertet und verglichen.

Die Vorschubbewegung während des Schweißprozesses wurde über eine Linearachse realisiert, wobei der Schweißbrenner über ein auf einer Kupferplatte gespanntes Werkstück bewegt wurde. Bei der Durchführung der Verbindungsschweißungen wurde die Werkstückunterseite durch eine mittige Formiereinrichtung vor dem Zutritt von Atmosphäregasen geschützt. Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die verwendete Gerätetechnik sowie den Grundwerkstoff. Tabelle 5.2 zeigt die verwendeten Prozessparameter und Randbedingungen.

Tabelle 5.1: Angaben zum Versuchsaufbau und Grundwerkstoff

Schweißstromquelle	Tetrix 400 Comfort Plasma (EWM)
Schweißbrenner	ABITIG 400 W MT (Abicor Binzel)
Schutzgasdüse	d = 18 mm; l = 40 mm
Elektrodenhalter	mit Gaslinse
Schlauchpaketlänge	5 m
Elektrode	
Material	WLa 20
Durchmesser	3,2 mm
Spitzenwinkel	30°
Abplattungsdurchmesser	0 mm
Grundmaterial	
Werkstoffnummer	1.4301
Oberflächenzustand	kaltgewalzt
Materialstärke	2 mm
Rohrdurchmesser	154 mm

Tabelle 5.2: Prozessparameter und Randbedingungen

Stromstärke	
Konstantstrom	200 A
Pulsstrom Grundstrom Frequenz	250 A 150 A 10 Hz
Vorschubgeschwindigkeit	
Blindnaht	70 cm/min
I-Naht	60 cm/min
Lichtbogenlänge	3 mm
Elektrodenüberstand	4 mm
Gas	
Schutzgas Volumenstrom	Ar 10 l/min
Schleppgas Volumenstrom	N ₂ (95%) + H ₂ (5%) 30 l/min
Formiergas Volumenstrom	N ₂ (95%) + H ₂ (5%) 10 l/min
Schweißposition	PA
Brennerposition	neutral

6 Ergebnisse

6.1 Materialdatenermittlung von Funktionselementen

Der spezifische Druckverlust eines Funktionselementes ist stark von der jeweiligen Materialcharakteristik, den Wandstärken sowie dem Schutzgasvolumenstrom abhängig. Je höher der Druckverlust über ein Funktionselement mit konstanter Wandstärke, desto stärker ist die Vereinheitlichung der Strömungsgeschwindigkeiten des Schutzgases an der Austrittsfläche. Grundvoraussetzung für das Erreichen von hohen Druckdifferenzen ist die Dichtheit des Systems. Undichtigkeiten bzw. Leckagen führen sowohl zu einem ungleichmäßigen Abströmen des Schutzgases als auch zu Schutzgasfreistrahlen, was zu einer starken Kontamination der Schleppgasdüse mit Atmosphärgasen führen kann.

Schalldämpfer sind dreidimensionale Sintermetalle mit unbekannter Materialspezifik und z.T. variablen Wandstärken. Die Anwendung unterschiedlicher Schalldämpfer resultiert in stark unterschiedlichen Druckverlustkurven. Bei gleichem Anschlussmaß ergeben sich vor allem für hohe Volumenströme stark unterschiedliche Druckverluste in Abhängigkeit des gewählten Sintermetallkörpers. Bei Schalldämpfern mit hohen Druckdifferenzen aber lokal geringen Wandstärken ist mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten des Schutzgases an den Stellen mit geringer Wandstärke zu rechnen, was als potenzielle Ursache für inhomogene Strömungszustände und weiterführend für erhöhte O₂-Konzentrationen angesehen werden muss. Abbildung 6.1 veranschaulicht den beschriebenen Sachverhalt am Beispiel von vier kommerziell verfügbaren Schalldämpfern mit einem Anschlussmaß von 1/8".

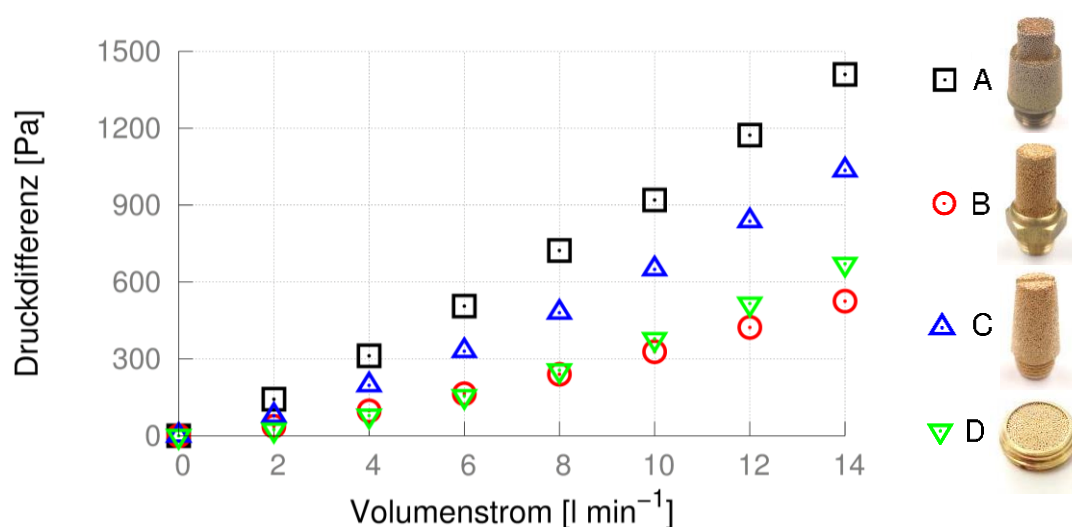


Abbildung 6.1: Resultierende Druckverluste unterschiedlicher Schalldämpfer in Abhängigkeit des Volumenstroms (Anschlussmaß der Schalldämpfer: 1/8")

Bei Verwendung von flächigen **Strömungsgleichrichtern** können, bei einer maximalen Wandstärke von 5 mm, hohe Druckverluste durch die Anwendung von Sintermetallen mit große Wandstärken und / oder mit geringen Korngrößen erreicht werden. Geringe Druckverluste resultieren aus der Anwendung von Metallschäumen, Drahtsieben, Loch- und Wabenblechen sowie Sintermetallen mit geringen Wandstärken und / oder großen Korngrößen. Der Übergang zwischen niedrigen und hohen Druckverlusten bei Sintermetallen ist kontinuierlich.

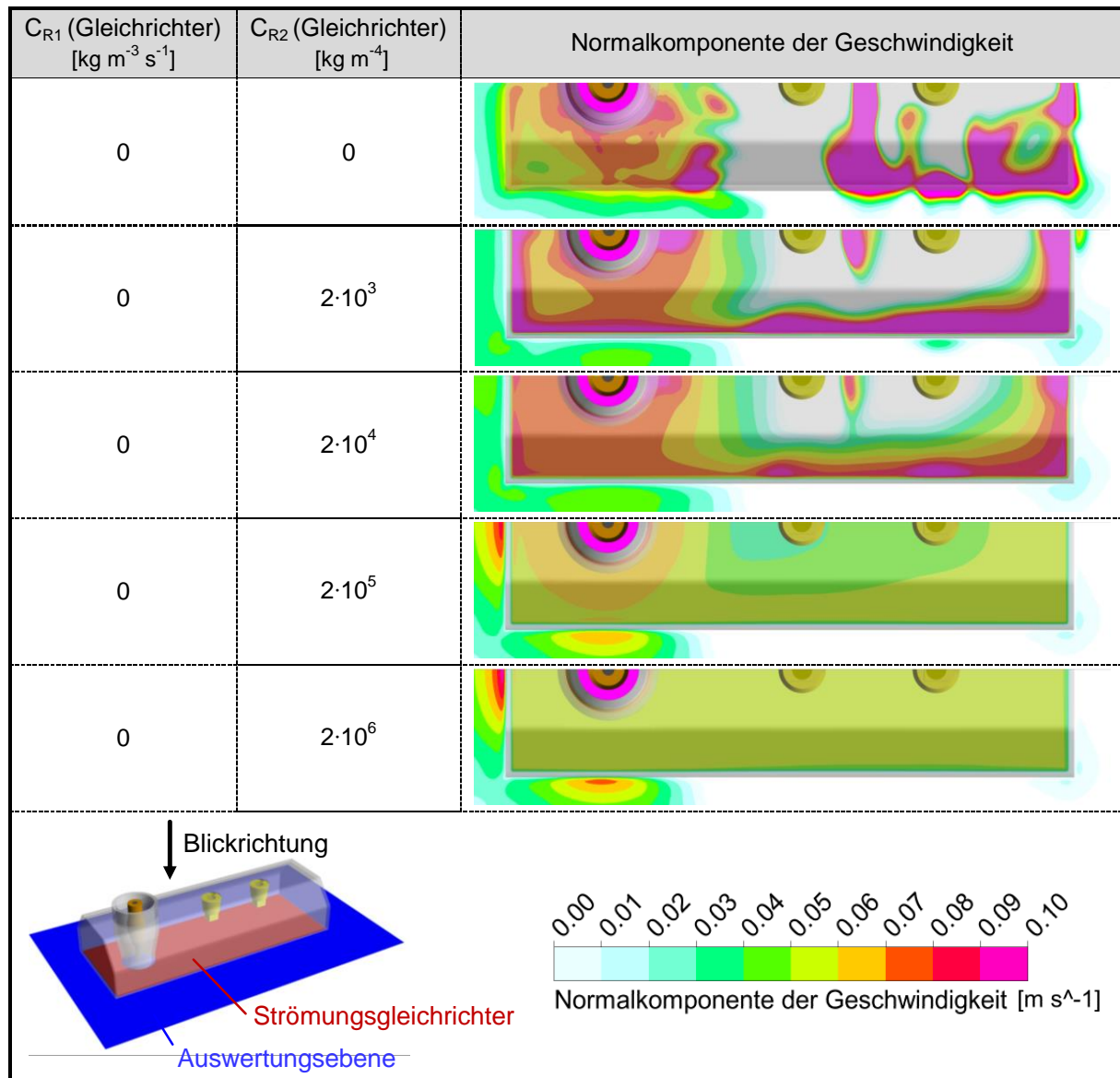
Tabelle 6.1 veranschaulicht numerisch (Schalldämpfer) bzw. analytisch (Sintermetall, Metallschaum, Lochblech) bestimmte Widerstandskoeffizienten für vier unterschiedliche Typenvertreter von Funktionselementen. Die aus dem linearen Widerstandskoeffizienten resultierende Kraftdichte führt zu einer gleichmäßigen Dämpfung des Geschwindigkeitsfeldes der Strömung. Die Kraftdichte des quadratischen Widerstandskoeffizienten wirkt proportional zum Quadrat der Geschwindigkeit, weshalb hohe Geschwindigkeiten stärker gedämpft werden als geringe.

Tabelle 6.1: Widerstandskoeffizienten C_{R1} und C_{R2} für ausgewählte Funktionselemente

Material	Spezifikation	C_{R1} [kg m ⁻³ s ⁻¹]	C_{R2} [kg m ⁻⁴]
Schalldämpfer	Typ: A	400 000	170 000
Metallschaum	Porosität: 80 ppi	9 820	5 150
Lochblech	$d_{LBL} = 1 \text{ mm}$; $A_0 = 30 \%$	0	19 130
Sintermetall	$d_{Korn} = 0,08 - 0,16 \text{ mm}$	2 338 000	366 500

Die Koeffizienten unterscheiden sich z.T. um mehrere Größenordnungen, was zu einer stark unterschiedlichen Einflussnahme auf die Strömung des Schutzgases führt. Eine zunehmende Größe der Koeffizienten korreliert mit steigenden Druckverlusten über das Funktionselement. Bei konstanter Wandstärke resultiert eine Vereinheitlichung des Strömungsfeldes. Beide Widerstandskoeffizienten haben prinzipiell die gleiche Auswirkung, aber durch ihre Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsfeld unterschiedliche Größenordnungen für die gleiche Wirkung auf das Strömungsfeld. Tabelle 6.2 zeigt die Ergebnisse von numerischen Sensitivuntersuchungen zur Wirkungsweise des quadratischen Widerstandskoeffizienten am Beispiel eines flächigen Strömungsgleichrichters an der Schleppgasdüsenunterseite. Der lineare Anteil der Kraftdichte wurde hierbei nicht berücksichtigt.

Tabelle 6.2: Berechnete Geschwindigkeitsfelder einer Gasbox mit zwei Schalldämpfern (Abmessungen siehe Kapitel 5) und einem Strömungsgleichrichter an der Unterseite der Schleppgasdüse ($s = 1 \text{ mm}$) in Abhängigkeit des quadratischen Widerstandskoeffizienten des Gleichrichters



Bei Verzicht auf einen Strömungsgleichrichter ($C_{R1} = 0 \text{ kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ | $C_{R2} = 0 \text{ kg m}^{-4}$) resultiert, im dargestellten Beispiel, ein stark inhomogenes Strömungsfeld an der Unterseite der Schleppgasdüse. Die ungleichmäßige Verdrängungswirkung als auch die starken Interaktionen zwischen den einzelnen Gasströmungen sind maßgebliche Ursachen der Kontamination von Schleppgasdüsen mit Atmosphäregasen. Die Implementierung eines Strömungsgleichrichters mit geringer Druckdifferenz ($C_{R1} = 0 \text{ kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ | $C_{R2} = 2 \cdot 10^3 \text{ kg m}^{-4}$) führt zu einer signi-

fikanten Vereinheitlichung des Strömungsfeldes, was zu einem kontinuierlichen Ausströmen von Schleppgas entlang der gesamten Düsenkante führt. Die zunehmende Steigerung des quadratischen Widerstandskoeffizienten (Verwendung von Sintermetallen mit abnehmenden Korngrößen) resultiert in einer Reduzierung der auftretenden Geschwindigkeitsgradienten. Bei der Anwendung von Strömungsgleichrichtern mit sehr hohen Druckdifferenzen (Sintermetalle mit kleinen Korngrößen und / oder großen Materialstärken) erfolgt eine vollständige Vereinheitlichung des Geschwindigkeitsfeldes über die gesamte Fläche der Schleppgasdüse ($C_{R1} = 0 \text{ kg m}^{-3} \text{ s}^{-1}$ | $C_{R2} = 2 \cdot 10^6 \text{ kg m}^{-4}$), was weiterführend zu stark verminderten Interaktionen zwischen den inerten Gasströmungen und der umgebenden Atmosphäre führt.

6.2 Bewertung bestehender Schleppgasdüsenkonzepte

Ausgeformte Primärgasdüsen sind individuell gefertigte und angepasste Schutzgasdüsen. Die Anwendung erfolgt mit erhöhten Schutzgasvolumenströmen des Schweißbrenners, wobei auf ein zusätzliches Schleppgas verzichtet wird. Durch die sehr lokale Zuführung von Schutzgas können zum einen, im Vergleich zu Gasboxen, nur kleine Werkstückoberflächen vor dem Zutritt von Atmosphäre geschützt werden. Zum anderen ergibt sich eine starke Sensitivität zum Abstand zwischen der Schleppgasdüsenunterseite und der Werkstückoberfläche. Als möglicher Anwendungsbereich sind vor allem Heftnähte zu sehen. Das Konstruktionsprinzip wurde nicht weiterverfolgt, da sowohl das Optimierungspotenzial als auch die industrielle Relevanz als gering eingestuft wird. Abbildung 6.2 veranschaulicht exemplarisch die numerisch berechnete Sauerstoffkonzentration im Bereich einer ausgeformten Primärgasdüse.

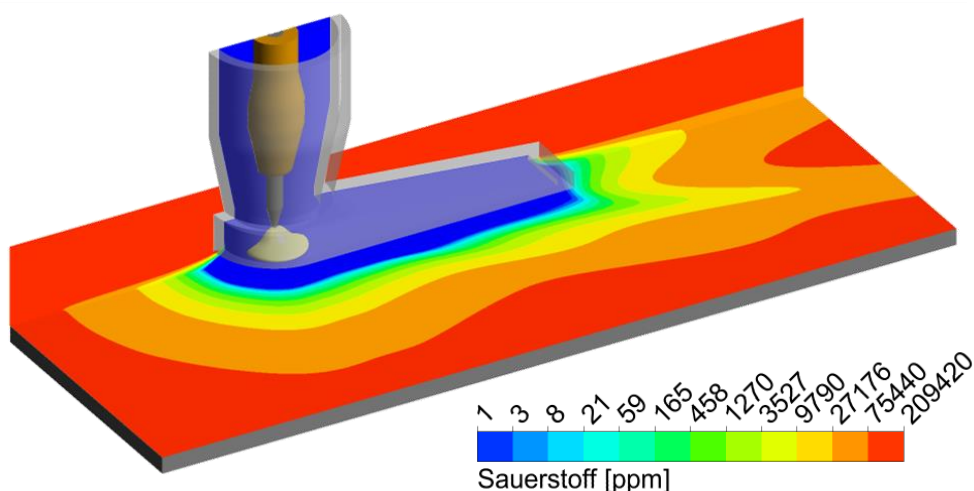


Abbildung 6.2: Berechnete Sauerstoffkonzentration im Bereich einer ausgeformten Primärgasdüse ($I_w = 150 \text{ A}$ | $a = 3 \text{ mm}$ | $SG = 15 \text{ l/min}$)

Schutzgasorgeln sind Schleppgasdüsen auf Basis einer definierten Anzahl von Rohrströmungen, wobei auf eine zusätzliche Einhausung / Abschirmung vor der umgebenden Atmosphäre verzichtet wird. Das maßgebliche Defizit des Konstruktionsprinzips sind die starken Interaktionen zwischen den einzelnen Gasströmungen, was sowohl zum Ansaugen von Atmosphärgasen als auch zu einer erhöhten turbulenten Diffusion führt, vgl. Abbildung 6.3. Im Hinblick auf die konstruktive Ausführung der Düsen führen geringe Abstände zwischen den Rohren bzw. der Schutzgasdüse und dem ersten Rohr zu zunehmenden Wechselwirkungen der Gasströmungen. Erhöhte Abstände verringern dagegen die beschriebenen Interaktionen, führen aber zu lokal erhöhten Sauerstoffkonzentrationen an der Werkstückoberfläche infolge einer unzureichenden Verdrängungswirkung. Aufgrund der sehr starken Abhängigkeit der Gasabdeckung von der konstruktiven Ausführung als auch von den Prozessparametern und Randbedingungen wurde das beschriebene Konstruktionsprinzip, im Hinblick auf das gewählte Zielkriterium von 20 ppm, als nicht zielführend angesehen. Auf weiterführende Untersuchungen wurde verzichtet.

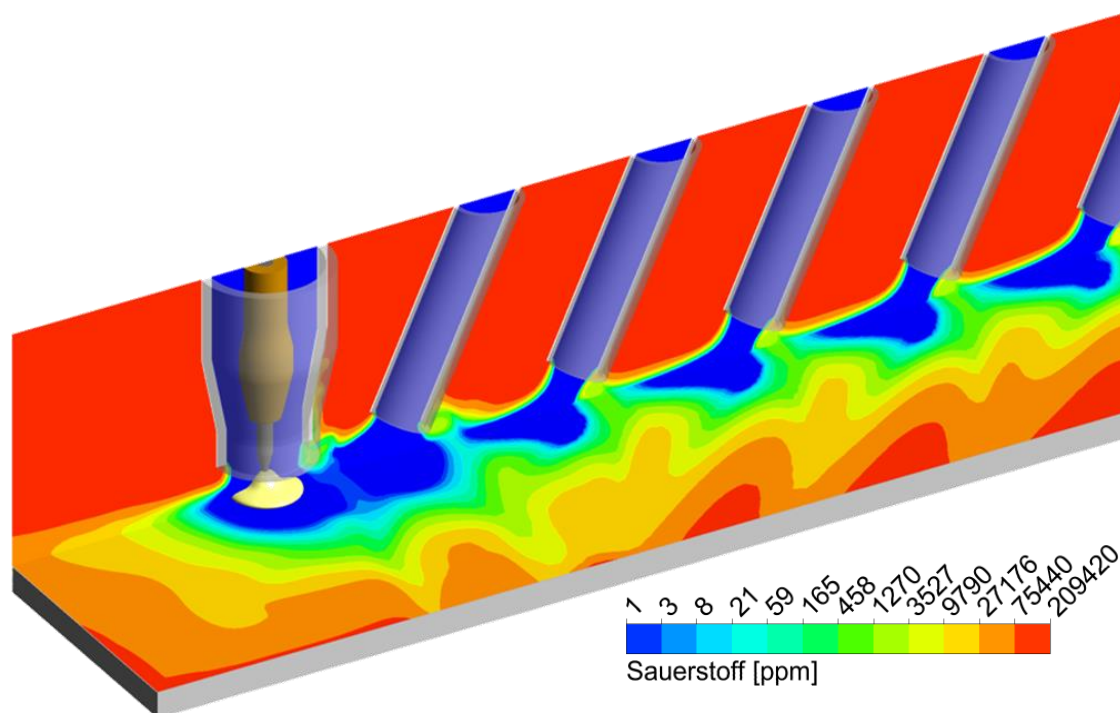


Abbildung 6.3: Berechnete Sauerstoffkonzentration bei Verwendung einer Schutzgasorgel
($I_w = 150 \text{ A}$ | $a_{\min} = 3 \text{ mm}$ | $PG = 10 \text{ l/min}$ | $SG = 30 \text{ l/min}$)

Häufig eingesetzt wird das Konstruktionsprinzip von **Gasboxen**. Die konstruktive Ausführung ist stark abhängig von den fertigungstechnischen Randbedingungen, wobei sowohl Gasboxen ohne als auch mit integrierten porösen Materialien angewendet werden. Die Qualität der Gasabdeckung ist stark von der Strömungsführung des Schleppgases innerhalb der Düse

und damit von den eingesetzten Funktionselementen (Schalldämpfer bzw. Strömungsgleichrichter) abhängig. Durch die Anwendung von Gasboxen sind sehr geringe Sauerstoffkonzentrationen über den gesamten Bereich der Schleppgasdüse erreichbar. Durch Verwendung eines zusätzlichen Gases (im Folgenden als Schleppgas bezeichnet) können beliebig lange Schleppgasdüsen realisiert werden, was vor allem bei der Fertigung von metallisch blanken Schweißnähten von essentieller Bedeutung ist. Abbildung 6.4 veranschaulicht das Konstruktionsprinzip sowie die berechnete Sauerstoffkonzentration im Bereich einer Gasbox mit zwei Schalldämpfern und einem Abstand zwischen der Schleppgasdüsenunterseite und der Werkstückoberfläche von 3 mm.

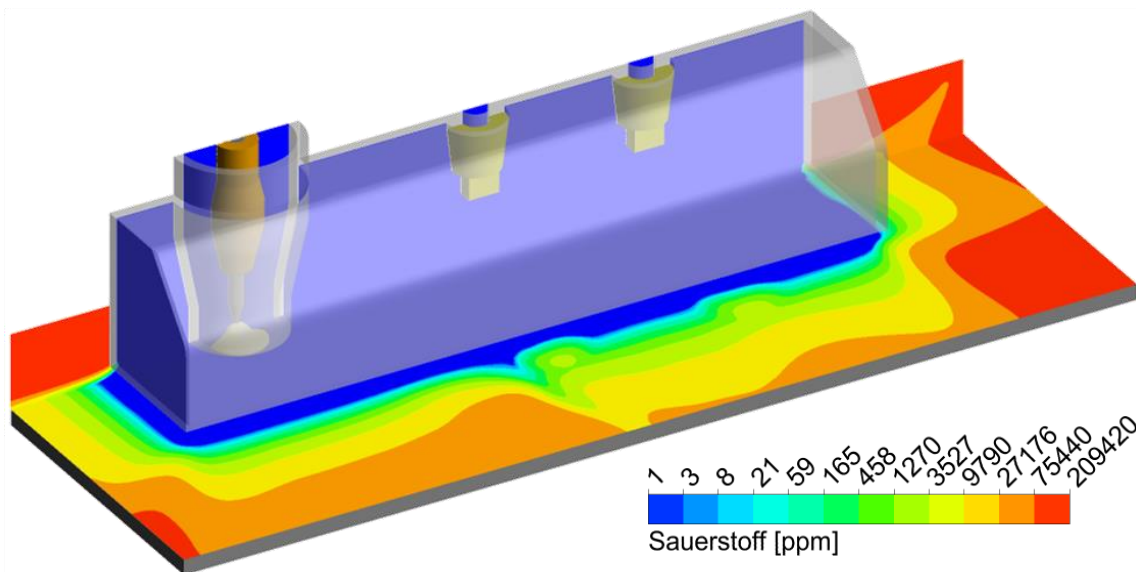


Abbildung 6.4: Berechnete Sauerstoffkonzentration im Bereich einer Gasbox mit zwei Schalldämpfern ($I_w = 150 \text{ A}$ | $a = 3 \text{ mm}$ | $PG = 10 \text{ l/min}$ | $SG = 30 \text{ l/min}$)


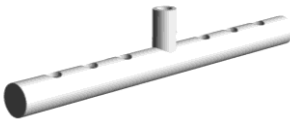

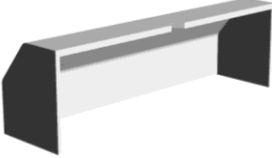
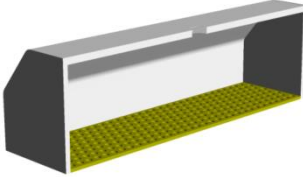
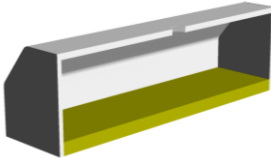
Aufgrund der generellen Einsetzbarkeit, der hohen Vielfalt an konstruktiven Ausführungen und der sehr großen industriellen Relevanz stellen Gasboxen das bevorzugte Konstruktionsprinzip dar. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine umfangreiche Charakterisierung der einsetzbaren Funktionselemente, sensitiver Einflussgrößen sowie der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge durchgeführt. Auf Basis der Ergebnisse wurde eine Vorzugsvariante abgeleitet, welche eine sehr gute Gasabdeckung bei gleichzeitig stark reduzierter Komplexität der Düse gewährleistet. Durch die maßgebliche Reduzierung der geometrischen Vielfalt von zielführend anwendbaren Gasboxen und der Definition von allgemeinen Konstruktionsempfehlungen soll dem Anwender eine maßgebliche Hilfestellung bei der Auslegung und Anwendung von Schleppgasdüsen gegeben werden.

6.3 Untersuchungen zu Gasboxen ohne Prozessbeeinflussung

Im Rahmen umfangreicher Untersuchungen an Gasboxen ohne Schweißprozess wurden, auf Basis der reduzierten physikalische Komplexität, sowohl Wirkzusammenhänge und konstruktionsbedingte Einflussgrößen identifiziert als auch mögliche Funktionselemente charakterisiert. Die Ergebnisse bilden den Ausgangspunkt zur Untersuchung von Gasboxen mit Prozess (Identifizierung prozessbedingter Einflussgrößen) und zur im Projekt angestrebten modularen Bauweise von Schleppgasdüsen.

Aus konstruktiver Sicht wird die Qualität der Gasabdeckung von zwei Funktionselementen determiniert - dem Gaseinleitungssystem und dem verwendeten Strömungsgleichrichter, vgl. Tabelle 6.3.

Tabelle 6.3: Kategorisierung von Gasboxen nach dem Gaseinleitungssystem und dem verwendeten Strömungsgleichrichter

	direkter Einlass	Gasverteiler	Schalldämpfer
Gaseinleitungssystem			
Strömungsgleichrichter	ohne	mit geringer Druckdifferenz	mit hoher Druckdifferenz
			

Bei Verzicht auf ein **Gaseinleitungssystem** wird das Schleppgas über ein oder mehrere Bohrungen direkt in die Schleppgasdüse eingeleitet. Als konstruktionsbedingte Einflussgrößen ergeben sich die Anzahl, Größe und Anordnung der Bohrungen.

Gasverteiler erzeugen durch das Aufteilen und anschließende Umlenken des Schleppgasvolumenstroms Prallströmungen, wobei gegenüber einem direkten Einlass eine maßgebliche Vereinheitlichung des Strömungsfeldes erreicht werden kann. Im Hinblick auf den resultierenden Druckabfall im Gasverteiler und das daraus resultierende Geschwindigkeitsfeld des Schutzgases ist sowohl die Anzahl an Bohrungen und deren Durchmesser als auch die Posi-

tion des Gaseinlasses in den Gasverteiler von entscheidender Bedeutung. Bei der Anwendung von Schalldämpfern kann eine Vereinheitlichung des Strömungsfeldes durch eine erhöhte Druckdifferenz erzielt werden. Der Einfluss auf das Strömungsfeld ist sowohl vom Schalldämpfer als auch von der Anzahl und der Position der Sinterkörper abhängig. Bei einer zu geringen Anzahl ist mit einer unzureichenden Vereinheitlichung, bei einer zu großen Anzahl mit einem erhöhten konstruktiven Aufwand zu rechnen.

Die Einteilung von **Strömungsgleichrichtern** erfolgt auf Basis der resultierenden Druckdifferenz. Als Materialien für Strömungsgleichrichter mit geringer Druckdifferenz können Metallsiebe, Loch- und Wabenbleche, Metallschäume und Sintermetalle mit großen Korngrößen und geringer Materialstärke angesehen werden. Zur Realisierung einer hohen Druckdifferenz ist die Anwendung von Sintermetallen mit geringer Korngröße und / oder großer Materialstärke zielführend, wobei im Hinblick auf die konstruktive Gestaltung der Schleppgasdüse eine hinreichend gute Abdichtung des Funktionselementes von essentieller Bedeutung ist. Eine eindeutige und geometrieunabhängige Zuordnung von Materialien ist aufgrund der starken Abhängigkeit der resultierenden Druckdifferenz von der geometrischen Ausbildung / Stärke des Materials nicht möglich. Neben den genannten Materialien ist zur Vereinheitlichung des Strömungsfeldes der Einsatz von Stahlwolle mit feinen Fasern zielführend. Aufgrund der schlechten Quantifizierungsmöglichkeiten (verwendete Menge) wird auf eine Zuordnung zu den in Tabelle 6.3 genannten Kategorien verzichtet.

Um einer Einwirbelung und Diffusion von Atmosphärgasen entgegenzuwirken, ist ein kontinuierliches Ausströmen von Schleppgas über die gesamte Verdrängungsfläche erforderlich (Abbildung 6.5). Eine hinreichende Vereinheitlichung der Strömungsgeschwindigkeiten an der Unterseite der Schleppgasdüse wird hierfür als zielführend angesehen.

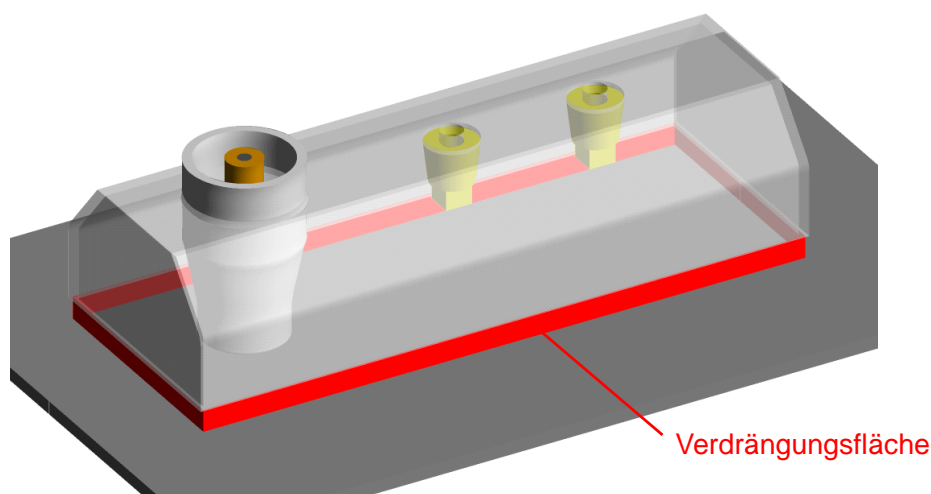

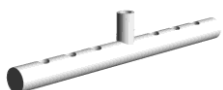


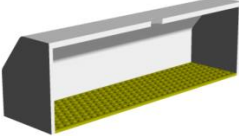
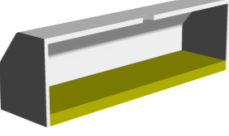


Abbildung 6.5: Prinzipielle Darstellung der Verdrängungsfläche

Die Vereinheitlichung der Strömungsgeschwindigkeiten kann über das Gaseinleitungssystem und / oder den verwendeten Strömungsgleichrichter realisiert werden. Je besser die Verteilung durch das Gaseinleitungssystem, desto geringer ist die notwendige Druckdifferenz über den Strömungsgleichrichter zur Gewährleistung einer laminaren und kontinuierlichen Ausströmung über die gesamte Verdrängungsfläche. Generell gilt, dass eine hinreichende Verteilung des Schutzgases durch das Gaseinleitungssystem gegenüber dem Einsatz von Strömungsgleichrichtern zu bevorzugen ist, da die Verwendung von Strömungsgleichrichtern mit einer maßgeblich erhöhten Spritzer- bzw. Verschmutzungsanfälligkeit verbunden ist. Des Weiteren ergeben sich neben der starken thermischen Belastung z.T. sehr hohe Anforderungen an die Dichtheit des Systems, was mit einer stark reduzierten Austauschbarkeit der Funktionselemente sowie erhöhten Fertigungskosten zur Herstellung der Schleppgasdüse einhergeht. Die Eignung der verschiedenen Gaseinleitungssysteme und Strömungsgleichrichter für den Einsatz in Schleppgasdüsen ohne Prozessbeeinflussung sowie die erreichten maximalen Arbeitsabstände (für die in Kapitel 5 dargestellten Düsenabmessungen) lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Tabelle 6.4: Prinzipielle Eignung von Konstruktionsprinzipien für die Fertigung von Schleppgasdüsen ohne Prozess und erreichbare maximale Abstände zur Werkstückoberfläche

	direkter Einlass 	Gasverteiler 	Schalldämpfer 
ohne Strömungsgleichrichter 	✗	✗	✓ 5 mm
mit Strömungsgleichrichter (geringe Druckdifferenz) 	✗	✓ 7 mm	✓ 23 mm
mit Strömungsgleichrichter (hohe Druckdifferenz) 	✓ 23 mm	✓ 23 mm	✓ 23 mm

Bei der Verwendung von Funktionselementen mit hohem Druckverlust ist die Dichtheit zwischen dem Funktionselement und der Schleppgasdüse zu garantieren. Eine unzureichende Abdichtung von Funktionselementen mit einer großer Druckdifferenz resultiert in einer ungleichmäßigen Verdrängungswirkung sowie in der Bildung von Schutzgasfreistrahlen, welche beim Auftreffen auf die Werkstückoberfläche zu turbulenten Strömungsstrukturen und / oder Wirbelfeldern führen und weiterführend die Einbringung von Atmosphärgasen begünstigen.

6.3.1 Direkter Einlass

Das direkte Einleiten von Schleppgas führt, **ohne zusätzliche Verwendung eines Strömungsgleichrichters**, beim Auftreffen auf die Werkstückoberfläche zu einem stark instationären und turbulenten Strömungsfeld mit hohen Geschwindigkeitsgradienten. Es resultiert ein diskontinuierliches und ungleichmäßiges Abströmen des Schutzgases über die Verdrängungsfläche. Eine Kontamination der Schleppgasdüse mit Atmosphärgasen kann aufgrund der unzureichenden Verdrängungswirkung und der turbulenten Strömungsstrukturen nicht verhindert werden. Das Zielkriterium von 20 ppm kann, unabhängig von der Anzahl an Einströmungen, deren Durchmesser und dem eingestellten Schleppgasvolumenstrom nicht erreicht werden. Abbildung 6.6 veranschaulicht das Strömungsfeld sowie die resultierende Sauerstoffkonzentration bei der Verwendung eines Gaseinlasses mit einem Durchmesser von 4 mm, einem Schleppgasvolumenstrom von 20 l/min und einem Abstand zwischen der Schleppgasdüse und dem Werkstück von 3 mm.

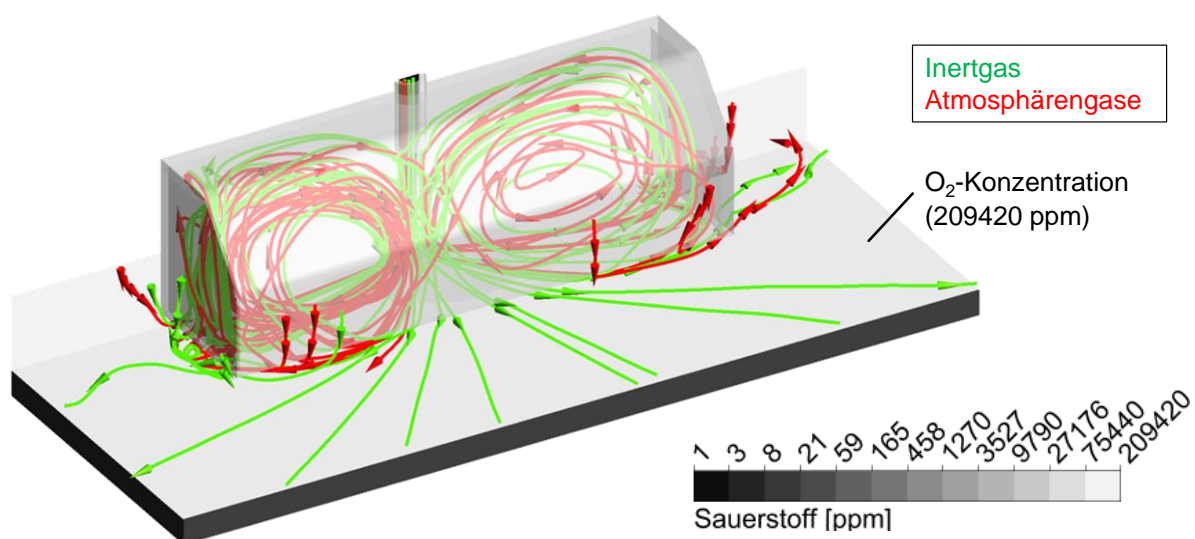


Abbildung 6.6: Stromlinien und Sauerstoffkonzentration bei einem direkten Einlass des Schleppgases ohne Strömungsgleichrichter ($N_E = 1$ | $d_E = 4$ mm | $SG = 20$ l/min | $a = 3$ mm)

Eine signifikante Reduzierung der Sauerstoffkonzentrationen ist nur durch Verringerung des Abstandes zwischen der Schleppgasdüsenunterseite und der Werkstückoberfläche unter das Zielkriterium von 3 mm möglich. Der damit verbundene zusätzliche Druckverlust über die verkleinerte Verdrängungsfläche führt zu einer Vereinheitlichung der Strömung und weiterführend zu signifikant verringerten Sauerstoffkonzentrationen. Im Hinblick auf die sehr starke Abstandssensitivität und der damit verbundenen Reduzierung der Prozesssicherheit (Kollisionsgefahr beim Auftreten von Störkonturen) wird eine Anwendung des Konstruktionsprinzips nicht empfohlen.

Zur Realisierung einer hinreichend guten Gasabdeckung ist bei einem Abstand von mindestens 3 mm eine Vereinheitlichung des Schleppgasvolumenstroms am Einlass und / oder an der Unterseite der Schleppgasdüse erforderlich. Die Verwendung einer direkten Einströmung in Kombination **mit einem Strömungsgleichrichter mit geringer Druckdifferenz** führt zur einer maßgeblichen Verringerung der Sauerstoffkonzentrationen in der Schleppgasdüse bei gleichzeitig verringerten Volumenströmen. Aufgrund des geringen Druckverlustes über den Strömungsgleichrichter und der unzureichenden Vereinheitlichung der Strömung über die Verdrängungsfläche, konnte das Zielkriterium von 20 ppm jedoch nicht erreicht werden. Als Ursache sind die hohen lokalen Strömungsgeschwindigkeiten unter dem Einlass zu sehen. Eine Steigerung des Schleppgasvolumenstroms ist nicht zielführend, da der zunehmende Turbulenzgrad der Strömung zu steigenden Interaktionen des Schleppgases mit der umgebenen Atmosphäre führt. Aufgrund der erhöhten turbulenten Diffusion resultieren erhöhte Sauerstoffkonzentrationen im Bereich der Schleppgasdüse. Aufgrund der sehr starken Abhängigkeit der Gasabdeckung vom eingestellten Schleppgasvolumenstrom wird die Anwendung des Konstruktionsprinzips nicht empfohlen.

Die Anwendung von **Strömungsgleichrichtern mit hoher Druckdifferenz** resultiert in einer ausreichenden Vereinheitlichung des Strömungsfeldes, vgl. Abbildung 6.7. Durch das kontinuierliche Abströmen des Schutzgases über die Verdrängungsfläche können, über einen breiten Einstellbereich des möglichen Schleppgasvolumenstroms, Sauerstoffkonzentrationen von unter 20 ppm prozesssicher gewährleistet werden. Das Konstruktionsprinzip einer direkten Einströmung von Schleppgas in Kombination mit einem Strömungsgleichrichter mit einer hohen Druckdifferenz wird daher als zielführend angesehen.

Zielführend ist demnach der Einsatz von Sintermetall mit einer Korngröße von 0,08 mm bis 0,16 mm und einer Materialstärke von 5 mm. Sintermetalle mit einer größeren mittleren Korngröße können durch die Anpassung der Materialstärke eingesetzt werden. Als maßgeblicher Nachteil des beschriebenen Konstruktionsprinzips muss die notwendige Dichtheit des

Systems genannt werden. Möglicherweise auftretende Undichtigkeiten resultieren in Freistrahlen, welche zur Einwirbelung von Atmosphärgasen führen können. Zur Realisierung einer hinreichend guten Abdichtung ist das Einkleben (aktive Kühlung der Schleppgasdüse notwendig) und Einpressen des Sinterkörpers in die Schleppgasdüse geeignet. Eine Austauschbarkeit des Sinterkörpers ist nur bedingt möglich.

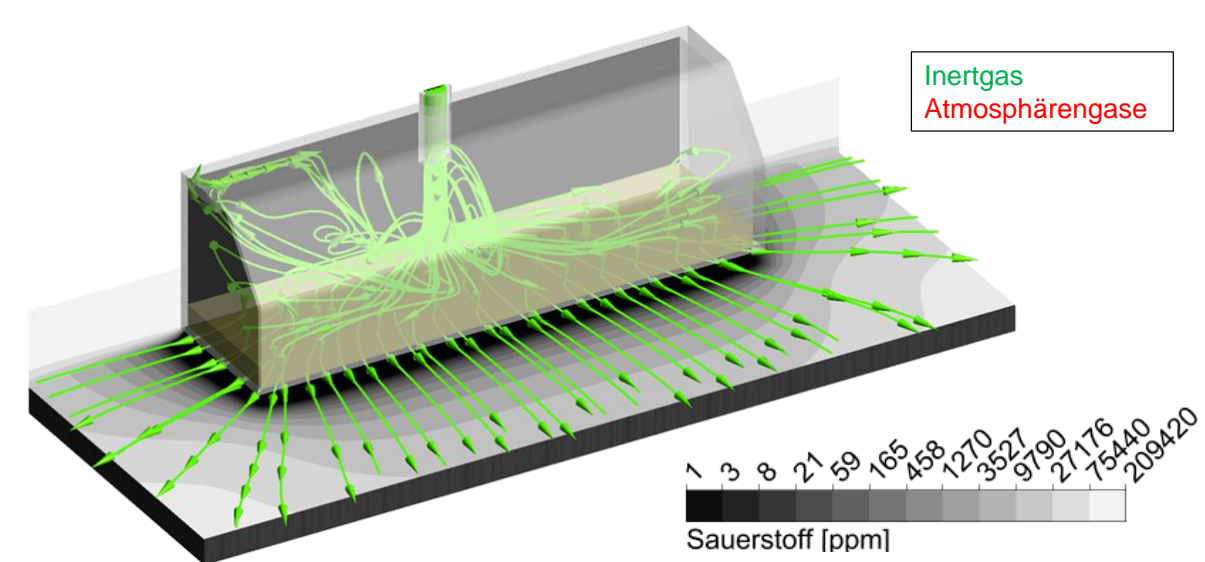


Abbildung 6.7: Stromlinien und Sauerstoffkonzentration bei einem direktem Einlass in Kombination mit einem Strömungsgleichrichter mit hoher Druckdifferenz ($N_E = 1$ | $d_E = 4$ mm | $SG = 20$ l/min | $a = 3$ mm)

Abbildung 6.8 veranschaulicht die maximal gemessenen Sauerstoffkonzentrationen auf der Werkstückoberfläche für Gasboxen mit direktem Einlass des Schleppgases in Abhängigkeit des Volumenstroms und der Art des verwendeten Gleichrichters ($N_E = 1$ | $d_E = 4$ mm). Im Beispiel wurde zur Realisierung einer geringen Druckdifferenz ein Lochblech ($d_{BLB} = 1$ mm | $A_0 = 30$ %) und zur Gewährleistung einer hohen Druckdifferenz ein Sintermetall mit Korngrößen im Bereich von 0,08 mm bis 0,16 mm sowie einer Materialstärke von 5 mm verwendet.

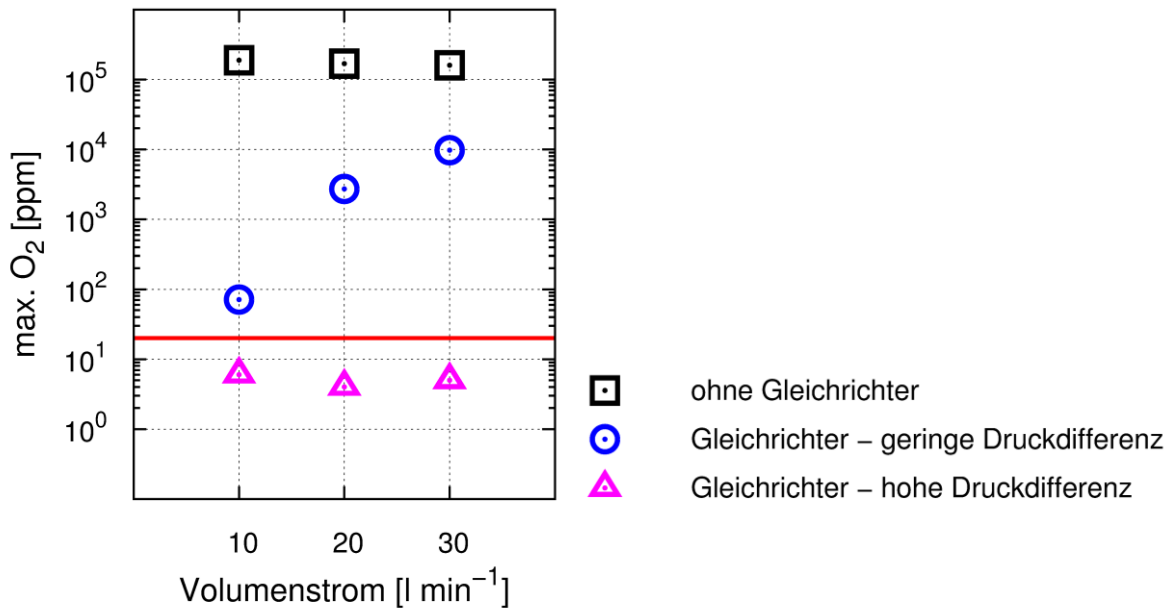


Abbildung 6.8: Maximale Sauerstoffkonzentration bei direkter Einleitung des Schleppgases in Abhängigkeit des verwendeten Strömungsgleichrichters und des Schleppgasvolumenstroms ($N_E = 1$ | $d_E = 4$ mm | $a = 3$ mm)

6.3.2 Gasverteiler

Bei der Verwendung von Gasverteilern wird der Schleppgasvolumenstrom in Teilvolumenströme aufgeteilt und durch Prallströmungen an der Düsenoberseite in der Schleppgasdüse verteilt. Es resultieren düseninterne Wirbelfelder, welche **ohne zusätzliche Anwendung eines Strömungsgleichrichters** zum Eindringen von Atmosphärgasen führen. Die Kontamination der Düse erfolgt sowohl durch das ungleichmäßige und diskontinuierliche Abströmen des Schutzgases über die Verdrängungsfläche als auch durch eine erhöhte turbulente Diffusion. Abbildung 6.9 veranschaulicht das Strömungsfeld sowie die Sauerstoffkonzentration einer Schleppgasdüse bei Verwendung eines Gasverteilers mit zwei Austrittsöffnungen. Die Stärke der Kontamination mit Atmosphärgasen ist zum einen stark abhängig vom gewählten Schleppgasvolumenstrom. Hohe Volumenströme resultieren in hohen Strömungsgeschwindigkeiten, was weiterführend zu einer erhöhten Scherwirkung führt. Zusätzlich zum stärkeren Ansaugen von Atmosphärgasen steigt die Kontamination aufgrund einer zunehmend erhöhten turbulenten Diffusion. Durch das Verringern des Schleppgasvolumenstroms können die Interaktionen des Schleppgases mit der umgebenden Atmosphäre reduziert werden. Eine hinreichend gute Gasabdeckung ist, aufgrund einer stark verminderten Verdrängungswirkung, nicht möglich. Als maßgeblicher Einfluss auf die Stärke der Kontamination müssen zum anderen die konstruktive Gestaltung des Gasverteilers (Anzahl der

Bohrungen, Bohrungsdurchmesser, Länge des Gasverteilers, Position des Gaseinlasses) und die Abmessungen der Düse gesehen werden.

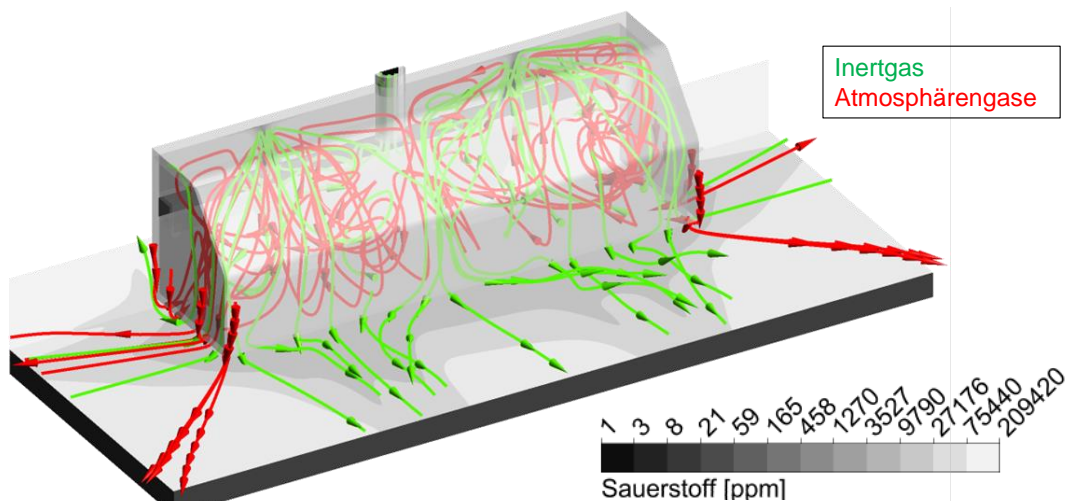


Abbildung 6.9: Stromlinien und Sauerstoffkonzentration bei Verwendung eines Gasverteilers ohne Strömungsgleichrichter ($N_{BG} = 2$ | $d_{BG} = 4$ mm | $a = 3$ mm | $SG = 20$ l/min)

Abbildung 6.10 veranschaulicht exemplarisch den Einfluss der Anzahl der Bohrungen des Gasverteilers auf die resultierende maximale Sauerstoffkonzentration. Die Verwendung eines Gasverteilers mit zwei Bohrungen ist, unabhängig vom eingestellten Schleppgasvolumenstrom, nicht zielführend. Bei Verwendung von sechs Bohrungen ist aufgrund der beschriebenen Interaktionen eine maßgebliche Verringerung der Sauerstoffkonzentration nur für geringe Schleppgasvolumenströme oder geringere Abstände zum Werkstück möglich.

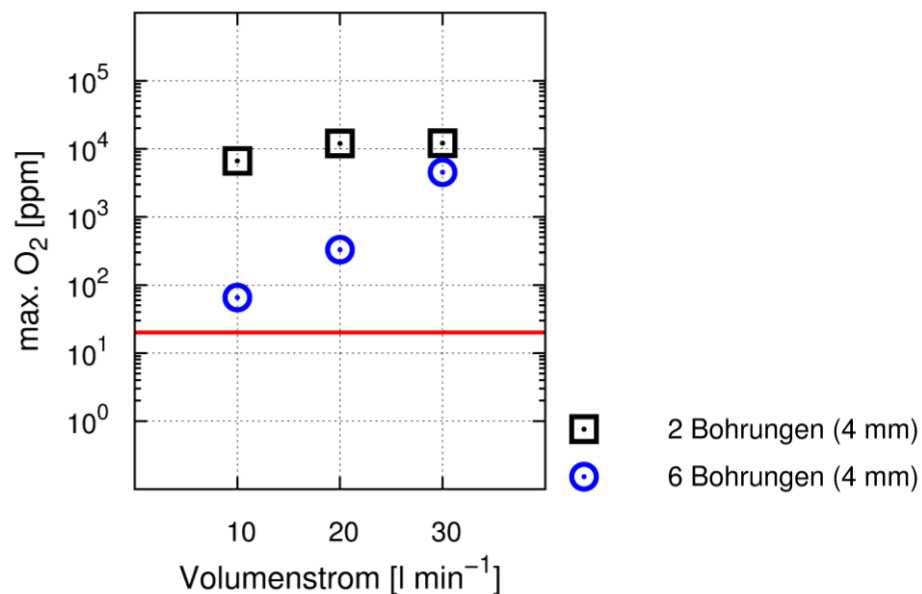


Abbildung 6.10: Maximale Sauerstoffkonzentration bei Verwendung eines Gasverteilers in Abhängigkeit der Bohrungsanzahl und des Schleppgasvolumenstroms ($d_{BG} = 4$ mm | $a = 3$ mm)

Die Definition allgemeingültiger Gestaltungsempfehlungen ist nicht möglich. Eine Optimierung des Gasverteilers für eine gegebene Schleppgasdüse ist prinzipiell durch die Anwendung der numerischen Simulation realisierbar, aber vor allem für KMU nicht zielführend.

Gegenüber einer direkten Einströmung des Schleppgases kann bei Verwendung eines Gasverteilers eine Vereinheitlichung des Strömungsfeldes bereits durch den Einsatz von **Strömungsgleichrichtern mit geringer Druckdifferenz** erreicht werden. Die Anwendung resultiert in einem kontinuierlichen Abströmen des Schutzgases über die gesamte Verdrängungsfläche. Ein Ansaugen von Atmosphärgasen durch düseninterne Wirbelfelder wird unterdrückt. Die gemessenen Sauerstoffkonzentrationen fallen mit der Steigerung des Schleppgasvolumenstroms / der Verdrängungswirkung. Das Zielkriterium von 20 ppm wird bei einem vergleichsweise hohen Schleppgasvolumenstrom von 30 l/min erreicht. Das Konstruktionsprinzip wird als bedingt zielführend angesehen.

Durch die Anwendung eines **Strömungsgleichrichters mit einer hohen Druckdifferenz** kann eine weitere Vereinheitlichung des Strömungsfeldes erreicht werden. Es resultiert eine sehr gute und kontinuierliche Gasabdeckung im gesamten Bereich der Schleppgasdüse. Gegenüber der Verwendung von Strömungsgleichrichtern mit geringer Druckdifferenz kann der zur Realisierung des Zielkriteriums notwendige Schleppgasvolumenstrom maßgeblich reduziert werden. Die Qualität der Gasabdeckung ist sowohl bei geringen als auch hohen Schleppgasvolumenströmen sehr gut (breiter Einstellbereich des Schleppgasvolumenstroms für den Anwender). Analog zur Diskussion von Strömungsgleichrichtern mit hoher Druckdifferenz in Gasboxen mit direktem Einlass ist die Dichtheit des Systems von essentieller Bedeutung. Eine Austauschbarkeit des Sinterkörpers ist nicht bzw. nur bedingt möglich. Das Konstruktionsprinzip wird als zielführend angesehen.

Abbildung 6.11 veranschaulicht die maximal gemessenen Sauerstoffkonzentrationen auf der Werkstückoberfläche für Gasboxen mit einem Gasverteiler ($N_{BG} = 6$ | $d_{BG} = 4$ mm) in Abhängigkeit des Volumenstroms und der Art des verwendeten Strömungsgleichrichters. Im Beispiel wurde für die Realisierung einer geringen Druckdifferenz ein Lochblech ($d_{BLB} = 1$ mm | $A_0 = 30$ %) und zur Gewährleistung einer hohen Druckdifferenz ein Sintermetall mit Korngrößen im Bereich von 0,08 mm bis 0,16 mm sowie einer Materialstärke von 5 mm verwendet.

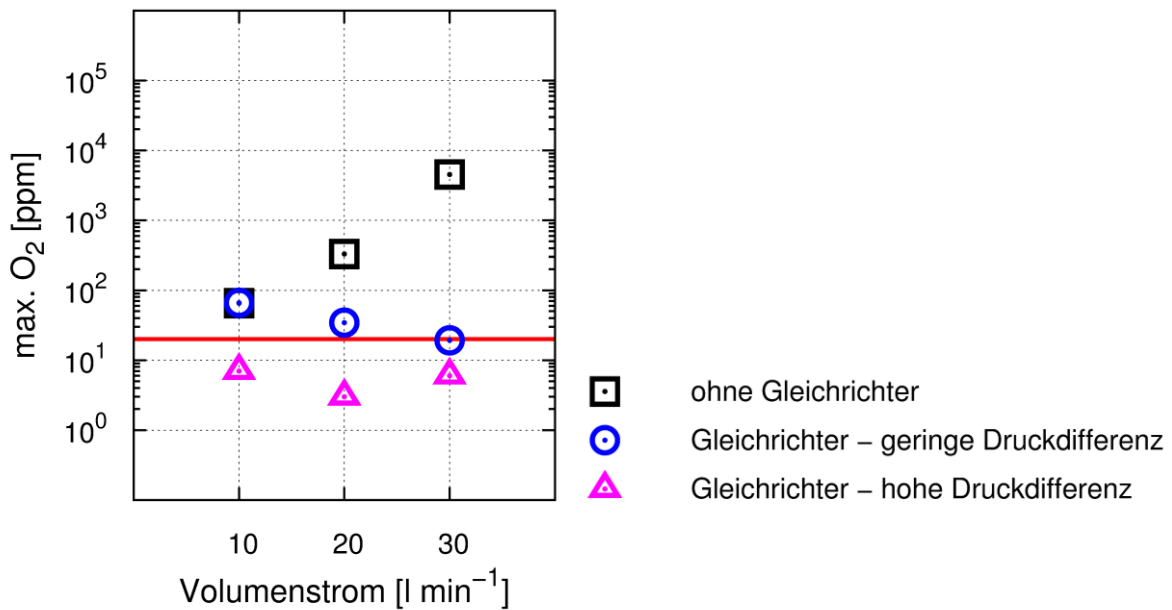


Abbildung 6.11: Maximale Sauerstoffkonzentration bei Verwendung eines Gasverteilers in Abhängigkeit des verwendeten Strömungsgleichrichters und des Schleppegasvolumenstroms ($N_{BG} = 6$ | $d_{BG} = 4$ mm | $a = 3$ mm)

6.3.3 Schalldämpfer

Durch die Verwendung von Schalldämpfern ist eine sehr gute Schutzgasabdeckung über den gesamten Bereich der Schleppegasdüse erreichbar. Grund ist ein hinreichend hoher Druckverlust über den Sinterkörper, der zur Vereinheitlichung des Schleppegasvolumenstroms und weiterführend zu einer kontinuierlichen Abströmung über die Verdrängungsfläche führt. Abbildung 6.12 veranschaulicht das Strömungsfeld einer Schleppegasdüse bei Verwendung von zwei Schalldämpfern mit dreidimensionaler Ausströmung des Schutzgases (Typ A, siehe Kapitel 6.1), einem Abstand der Düse zum Werkstück von 3 mm und einem Schleppegasvolumenstrom von 20 l/min.

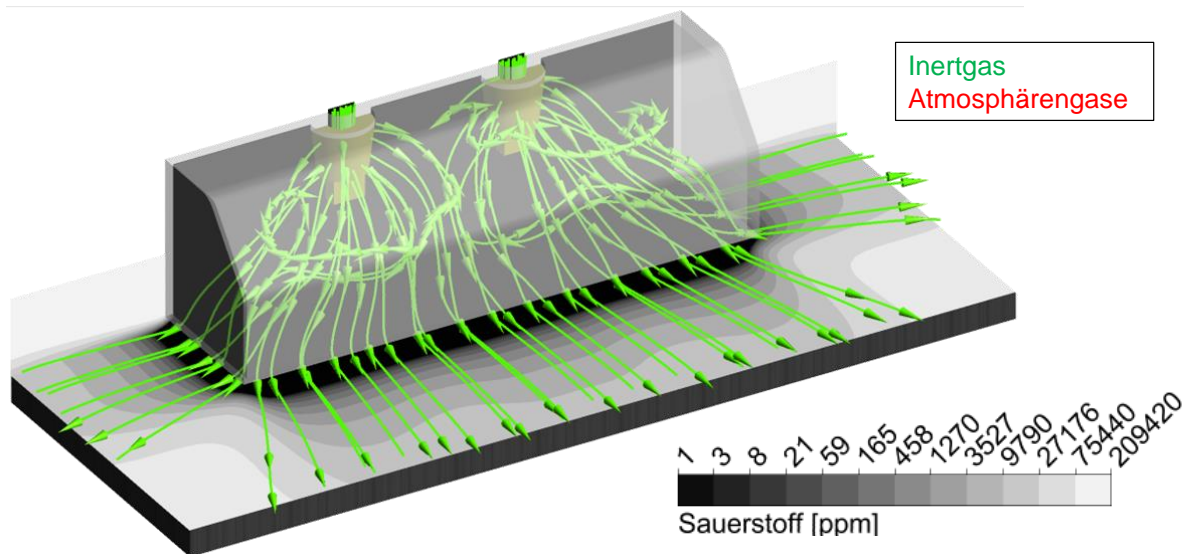


Abbildung 6.12: Stromlinien und Sauerstoffkonzentration bei Verwendung von Schalldämpfern ohne Strömungsgleichrichter ($N_{SD} = 2$ | $a = 3$ mm | $SG = 20$ l/min)

Ohne zusätzliche Verwendung eines Strömungsgleichrichters ist die Qualität der Schutzgasabdeckung von Schleppgasdüsen mit Schalldämpfern signifikant abhängig von:

1. der Geometrie und den Materialeigenschaften des Schalldämpfers,
2. der Anzahl an Schalldämpfern sowie
3. dem Schleppgasvolumenstrom.

Schalldämpfer sind kommerziell verfügbare Sintermetallkörper mit gegebener **Geometrie** und meist unbekanntem **Materialeigenschaften**. Der volumenstromspezifische Druckverlust über den Schalldämpfer variiert stark in Abhängigkeit des verwendeten Sinterkörpers (Kapitel 6.1), was zu einer stark unterschiedlichen Verdrängungswirkung und damit Qualität der Gasabdeckung im Bereich der Schleppgasdüse führt, vgl. Abbildung 6.13. Bei gleichem Anschlussmaß sind Schalldämpfer mit dreidimensionaler Abströmung des Schleppgases zu verwenden, wobei mit zunehmender **Anzahl** eine verbesserte Gasabdeckung über einen breiten Einstellbereich des Schleppgasvolumenstroms erreicht werden kann. Als Ursachen sind sowohl eine verbesserte Vereinheitlichung des Schleppgasvolumenstroms als auch eine Reduzierung der lokalen Strömungsgeschwindigkeiten und eine Verringerung der turbulenten Diffusion zu nennen. Im Hinblick auf die Fertigung der Düsen korreliert die Verwendung von mehreren Schalldämpfern mit einem gesteigerten konstruktiven und fertigungstechnischen Aufwand. Eine allgemeingültige Aussage bezüglich der notwendigen Anzahl an Schalldämpfern ist nicht möglich.

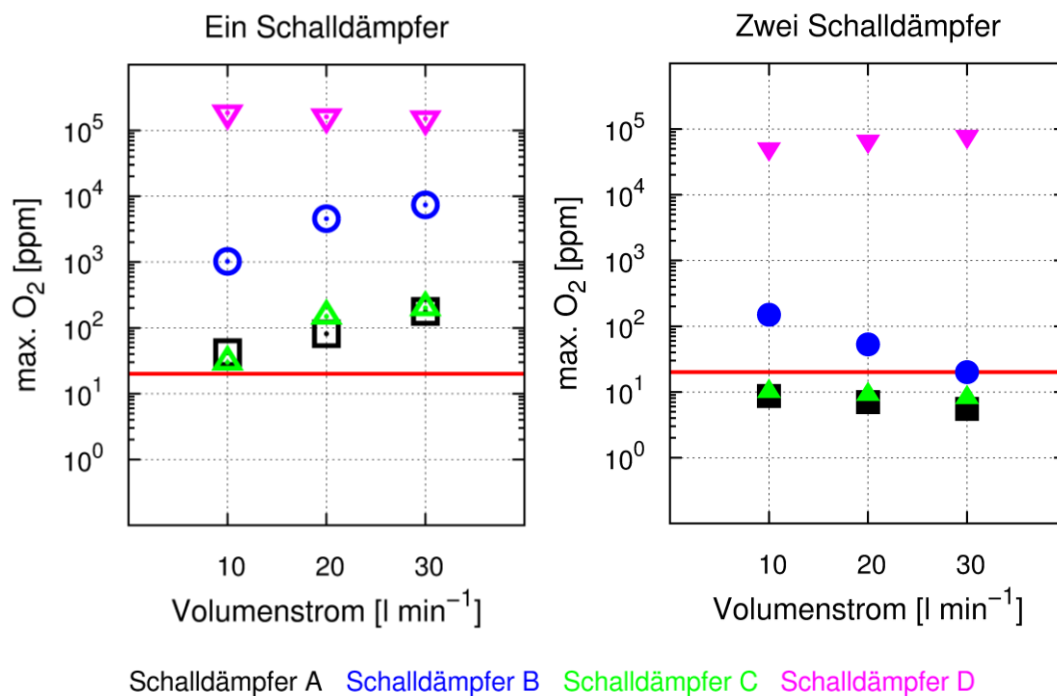
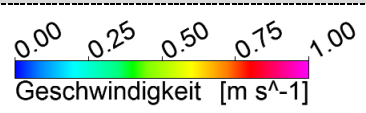

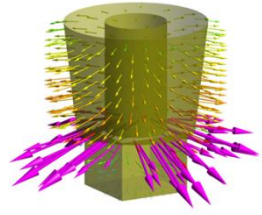
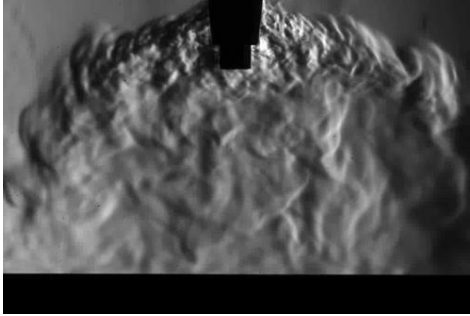

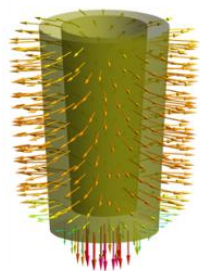
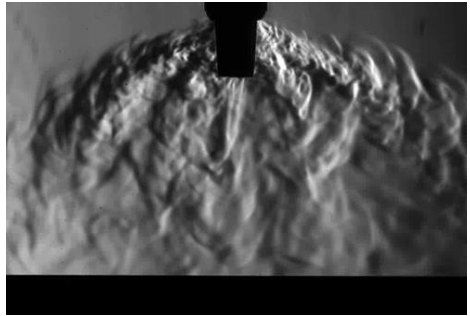

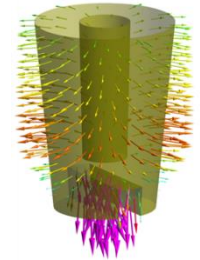
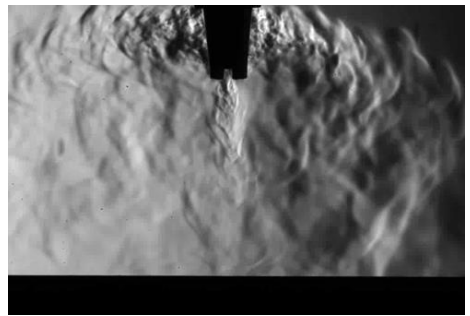

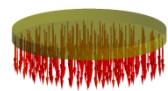
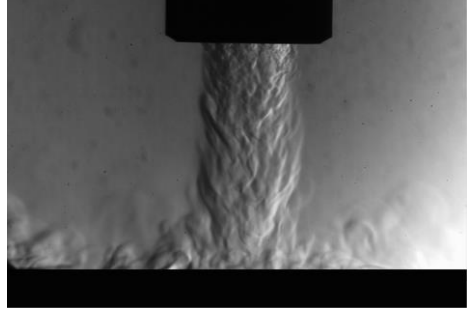


Abbildung 6.13: Maximale Sauerstoffkonzentration bei Verwendung von einem (links) bzw. zwei Schalldämpfern (rechts) in Abhängigkeit des Volumenstroms ($a = 3 \text{ mm}$)

Sowohl die Verdrängungswirkung als auch die Stärke der beschriebenen Kontaminationseffekte sind signifikant vom **Volumenstrom** abhängig. Eine Steigerung des Volumenstroms führt zu einer zunehmenden Verdrängungswirkung, wobei gleichzeitig eine Erhöhung der lokalen Strömungsgeschwindigkeiten als auch des Turbulenzgrades der Strömung resultiert. Bei Verwendung eines Schalldämpfers kann den beschriebenen Kontaminationseffekten durch Erhöhung der Verdrängungswirkung nicht mehr entgegengewirkt werden – eine Steigerung des Schleppegasvolumenstroms resultiert in einer zunehmenden Kontamination der Schleppegasdüse. Mit steigender Anzahl an Schalldämpfern dominiert die mit zunehmendem Volumenstrom vergrößerte Verdrängungswirkung, wobei für alle Schalldämpfer mit dreidimensionaler Abströmung des Schutzgases eine maximale Sauerstoffkonzentration unter 20 ppm erreicht werden kann. Die Geschwindigkeitsverteilung des Schleppegases beim Austritt aus dem Schalldämpfer wird, neben der zugrundeliegenden Materialcharakteristik, maßgeblich durch die Wandstärke des Sinterkörpers definiert. Die Anwendung von Schalldämpfern mit hohen Druckdifferenzen aber lokal geringen Wandstärken resultiert in hohen Strö-

mungsgeschwindigkeiten des Schleppgases an den Stellen mit geringer Wandstärke. Der beschriebene Sachverhalt ist in Tabelle 6.5 dargestellt.

Tabelle 6.5: Berechnete Strömungsvektoren an der Ausströmfläche der Schalldämpfer sowie Schlierenaufnahmen für verschiedene Schalldämpfergeometrien (SG = 15 l/min)

	Geometrie	Geschwindigkeitsvektoren	Schlierenaufnahmen
		 <p>0.00 0.25 0.50 0.75 1.00 Geschwindigkeit [m s⁻¹]</p>	
A			
B			
C			
D			

Die Anwendung von Schalldämpfern bedingt, unabhängig vom verwendeten Sinterkörper, ein turbulentes Strömungsfeld. Im Rahmen der industriellen Anwendung des Konstruktionsprinzips muss daher das Ziel sein, Turbulenzen und die daraus resultierende erhöhte Diffusion von Sauerstoff in die Schleppgasdüse zu vermeiden. Demnach sind Schalldämpfer mit einem ausreichend hohen Abstand zur Unterseite der Schleppgasdüse zu positionieren. Entstehende turbulente Strukturen werden dadurch bis zur Werkstückoberfläche abgebaut. Es resultiert ein gleichmäßiges und kontinuierliches Abströmen des Schleppgases über die Verdrängungsfläche. Bei geringen Abständen zwischen Schleppgasdüse und der Werkstückoberfläche ist eine zusätzliche Verwendung von Strömungsgleichrichtern somit nicht erforderlich, vgl. Abbildung 6.14. Das Konstruktionsprinzip wird als zielführend angesehen.

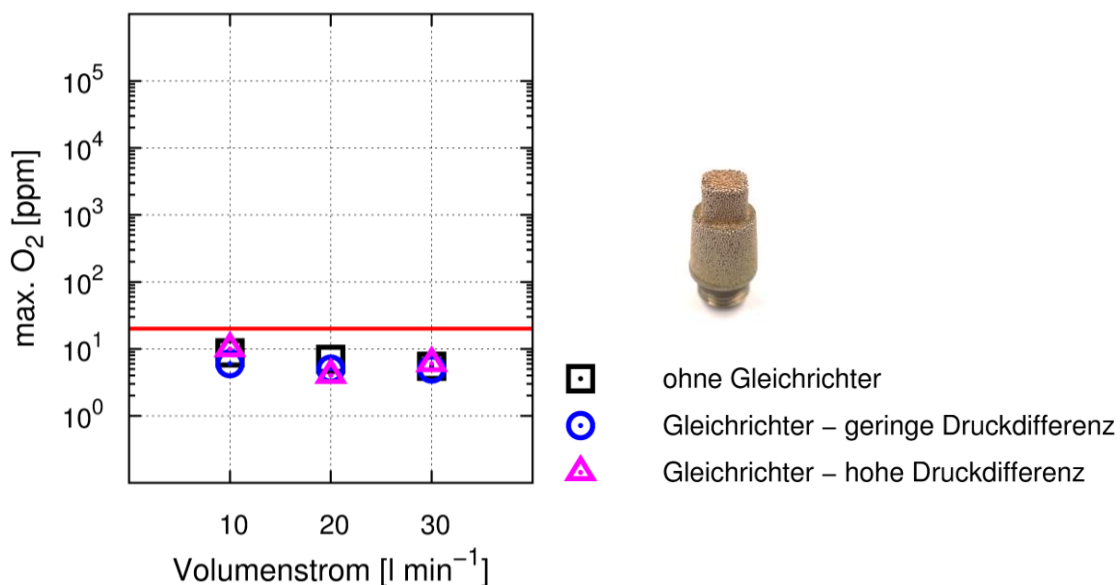


Abbildung 6.14: Maximale Sauerstoffkonzentration bei Verwendung von Schalldämpfern (Typ A) in Abhängigkeit des verwendeten Strömungsgleichrichters und des Volumenstroms ($N_{SD} = 2$ | $a = 3$ mm)

Mit zunehmendem Abstand zwischen der Schleppgasdüse und dem Werkstück resultiert eine Vergrößerung der Verdrängungsfläche, wodurch sich erhöhte Anforderungen an die Abströmung des Schleppgases ergeben. Zur Realisierung der in Tabelle 6.4 dargestellten maximalen Abstände ist eine verbesserte Vereinheitlichung des Schleppgasvolumenstroms über den gesamten Bereich der Verdrängungsfläche notwendig. Die konstruktive Umsetzung kann erfolgen durch:

- eine Erhöhung der Anzahl an Schalldämpfern (Vereinheitlichung durch erhöhte Anzahl an Einströmungen) und / oder
- durch die Kombination mit Strömungsgleichrichtern mit geringem Druckverlust (Vereinheitlichung durch zusätzliche Druckdifferenz).

Durch die Kombination von Schalldämpfern mit Strömungsgleichrichtern mit hohem Druckverlust kann keine weitere Verbesserung der Gebrauchseigenschaften erreicht werden, da das Strömungsfeld in der beschriebenen Kombination ausschließlich durch den Strömungsgleichrichter bestimmt wird. Eine Anwendung von Schalldämpfern ist bei der beschriebenen Kombination nicht notwendig. Die Ergebnisse von Schleppgasdüsen mit direktem Einlass und Strömungsgleichrichtern mit einem hohen Druckverlust (Kapitel 6.3.1) sind, sowohl in Bezug auf die Qualität der Gasabdeckung als auch im Hinblick auf die Dichtheit des Systems, übertragbar. Die Anwendung des Konstruktionsprinzips wird nicht empfohlen.

6.4 Verbindungsmöglichkeiten von Schleppgasdüse und Schweißbrenner

Durch Lichtbogenschweißprozesse ergeben sich, aufgrund stark erhöhter Temperaturen und Strömungsgeschwindigkeiten, erhöhte Restriktionen bezüglich der Konstruktion von Schleppgasdüsen. Steigende Temperaturen resultieren in erhöhten Diffusionsmassenströmen, zunehmende Strömungsgeschwindigkeiten der Lichtbogenströmung zu vergrößerten konvektiven Massenströmen von Sauerstoff in die Schleppgasdüse. Für gleiche Konstruktionsprinzipien wird, gegenüber Gasboxen ohne Schutzgasschweißprozess, der mögliche Abstand der Schleppgasdüse zum Werkstück verringert. Die grundsätzlichen Aussagen der Untersuchungen ohne Prozess bezüglich der Eignung von Gaseinlasssystemen und Strömungsgleichrichtern behalten jedoch ihre Gültigkeit. Die Kopplung von Prozess und Schleppgasdüse kann prinzipiell über drei verschiedene Varianten erfolgen, welche mit stark unterschiedlichen Sauerstoffkonzentrationen korrelieren, vgl. Abbildung 6.15.

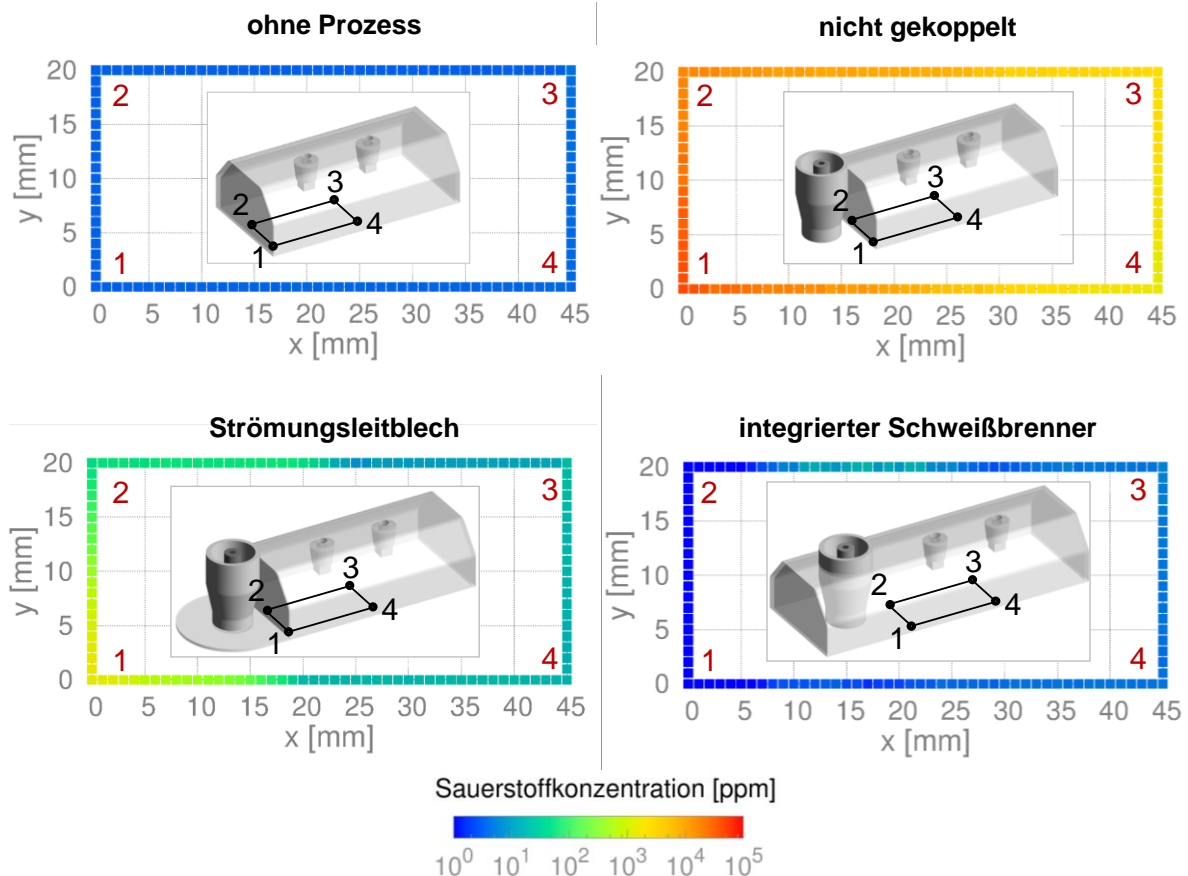


Abbildung 6.15: Gemessene Sauerstoffkonzentrationen für unterschiedliche Verbindungsmöglichkeiten von Schleppgasdüse und Schweißbrenner (Schalldämpfer: A | $N_{SD} = 2$ | $I_w = 200$ A | $a = 3$ mm | PG = 10 l/min | SG = 30 l/min)

Eine fehlende Verbindung zwischen Schweißbrenner und Schleppgasdüse (**nicht gekoppelt**) resultiert in stark erhöhten Sauerstoffkonzentrationen im Vergleich zu Düsen ohne Prozessbereich. Ursache der Kontamination ist das Ansaugen von Atmosphärgasen im Luftspalt zwischen dem Schweißbrenner und der Schleppgasdüse infolge der stark beschleunigten Lichtbogenströmung, vgl. Abbildung 6.16. Das beschriebene Konzept der Kopplung wird als nicht zielführend angesehen. Als allgemeiner Hinweis zur Konstruktion von Schleppgasdüsen kann abgeleitet werden, dass Luftspalte zwischen Schweißbrenner und Schleppgasdüse zu vermeiden sind.

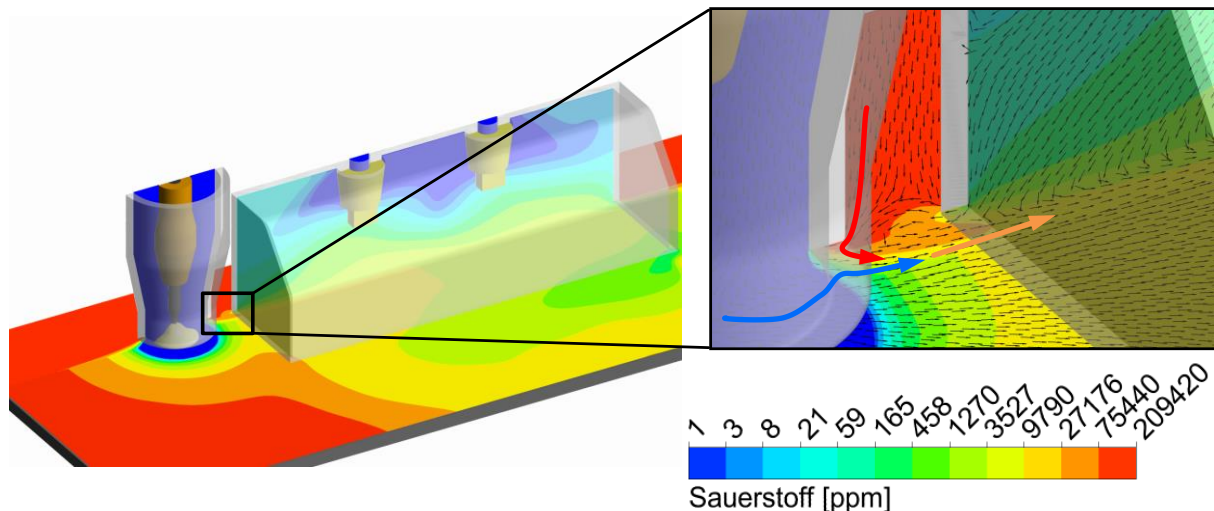


Abbildung 6.16: Berechnete Sauerstoffkonzentration bei fehlender Verbindung zwischen Schleppgasdüse und Schweißprozess (Schalldämpfer: A | $N_{SD} = 2$ | $I_w = 200$ A | $a = 3$ mm | PG = 10 l/min | SG = 30 l/min)


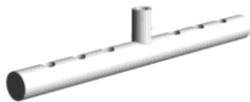

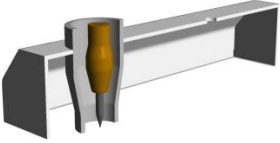
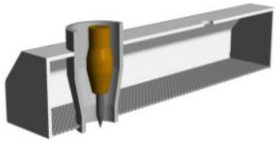
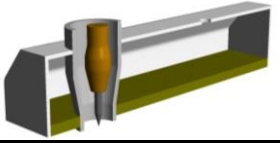
Eine Kopplung von Schweißbrenner und Schleppgasdüse durch ein **Strömungsleitblech** führt, gegenüber der nicht gekoppelten Variante, zu einer signifikanten Reduzierung der maximalen Sauerstoffkonzentrationen, vgl. Abbildung 6.15 links unten. Ursache ist die Substitution der Luftspalte. Gegenüber Schleppgasdüsen ohne Prozess ergeben sich erhöhte Sauerstoffkonzentrationen sowohl durch die Interaktion der Gasströmungen mit den umgebenden Atmosphärgasen als auch durch die starke Erwärmung der strömungsführenden Bauteilkomponenten (zunehmende Diffusionsmassenströme von Atmosphärgasen). Die Verwendung des Kopplungskonzeptes wird nicht empfohlen.

Eine signifikante Absenkung der maximalen Sauerstoffkonzentrationen im Bereich der Schleppgasdüse ist durch die **Integration des Schweißbrenners in die Schleppgasdüse möglich**. Interaktionen des Schutz- und der Schleppgasvolumenströme finden innerhalb der Schleppgasdüse und ohne Beteiligung von Atmosphärgasen statt, wobei auftretende turbulente Strömungsstrukturen bis zur Düsenkante abgebaut werden. Es resultiert ein kontinuierliches Abströmen von Schutz- und Schleppgas über die gesamte Verdrängungsfläche. Das beschriebene Konzept der Kopplung ist zielführend und bildet die Grundlage für die nachfolgenden Untersuchungen.

6.5 Untersuchungen zu Gasboxen mit Prozessbeeinflussung

Die Eignung unterschiedlicher Konstruktionsprinzipien sowie die erreichten maximalen Abstände (für die in Abschnitt 5 dargestellten Düsenabmessungen) werden in Tabelle 6.6 zusammengefasst:

Tabelle 6.6: Eignung unterschiedlicher Gaseinleitungssysteme und Strömungsgleichrichter für die Anwendung in Schleppgasdüsen mit Schweißprozess sowie erreichte maximale Abstände zur Werkstückoberfläche

	direkter Einlass 	Gasverteiler 	Schalldämpfer 
ohne Strömungsgleichrichter 	✗	✗	✓ 5 mm
mit Strömungsgleichrichter (geringe Druckdifferenz) 	✗	✓ 3 mm	✓ 15 mm
mit Strömungsgleichrichter (hohe Druckdifferenz) 	✓ 15 mm	✓ 15 mm	✓ 15 mm

Unter Berücksichtigung der resultierenden Sauerstoffkonzentration und der maximal möglichen Arbeitsabstände der Schleppgasdüsen kann die geometrische Vielfalt auf die folgenden Konstruktionsprinzipien eingeschränkt werden.

1. Schalldämpfern ohne Strömungsgleichrichter oder in Kombination mit einem Strömungsgleichrichter mit geringer Druckdifferenz

Vorteile: Sehr gute Gasabdeckung, einfache Konstruktion, geringe Beschaffungskosten und einfache Auswechselbarkeit von Funktionselementen, breiter Einstellbereich des Schleppgasvolumenstroms

Nachteil: geringe Arbeitsabstände und hohe notwendige Schleppgasvolumenströme bei Verzicht auf einen Strömungsgleichrichter

2. Direkter Einlass / Gasverteiler in Kombination mit einem Strömungsgleichrichters mit einer hohen Druckdifferenz

Vorteile: Sehr gute Gasabdeckung, Qualität der Gasabdeckung ist unabhängig vom Gaseinleitungssystem, breiter Einstellbereich des Schleppgasvolumenstroms

Nachteile: notwendige Abdichtung des Strömungsgleichrichters, Verschmutzungs- / Spritzeranfälligkeit des Strömungsgleichrichters, Auswechselbarkeit von Funktionselementen nur bedingt / nicht möglich, hoher Fertigungsaufwand, hohe Beschaffungskosten

Die Kontamination von Schleppgasdüsen mit integriertem WIG-Prozess lässt sich auf zwei wesentliche Ursachen zurückführen. Schleppgasdüsen mit Schalldämpfern (ohne Strömungsgleichrichter) sind durch starke Interaktionen zwischen der Lichtbogenströmung und den Schleppgasvolumenströmen geprägt. Es resultieren stationäre **Wirbelfelder**, welche zum Ansaugen von Atmosphärgasen im Zentrum des Wirbels führen. Bei der zusätzlichen Verwendung eines Strömungsgleichrichters mit einer geringen Druckdifferenz bzw. bei Anwendung von Schleppgasdüsen mit einem Strömungsgleichrichter mit einer hohen Druckdifferenz führt eine **unzureichende Verdrängungswirkung** an der prozessnahen Schleppgasdüsenunterkante zur Kontamination mit Atmosphärgasen. Ursache ist die stark beschleunigte Lichtbogenströmung.

6.5.1 Kontamination durch düseninterne Wirbelfelder

Die Ursache der Kontamination von Schleppgasdüsen mit Schalldämpfern (ohne Strömungsgleichrichter) ist in der Ausbildung von düseninternen Wirbelfeldern zu sehen, welche durch starke Interaktionen zwischen dem Schutzgasvolumenstrom des Brenners und den Schleppgasvolumenströmen der Schalldämpfern hervorgerufen werden. Hohe lokale Strömungsgeschwindigkeiten des Schleppgases beim Austritt aus dem Schalldämpfer führen beim Auftreffen auf die Werkstückoberfläche, in Kombination mit starken Scherkräften zwischen den Gasströmungen, zum Umlenken der Lichtbogenströmung. Es resultiert ein stationäres Wirbelfeld, welches Atmosphärgase im Zentrum des Wirbels in die Schleppgasdüse transportiert. Die Wirbelbildung ergibt sich sowohl bei Blech- als auch bei Rohranwendungen, vgl. Abbildung 6.17.

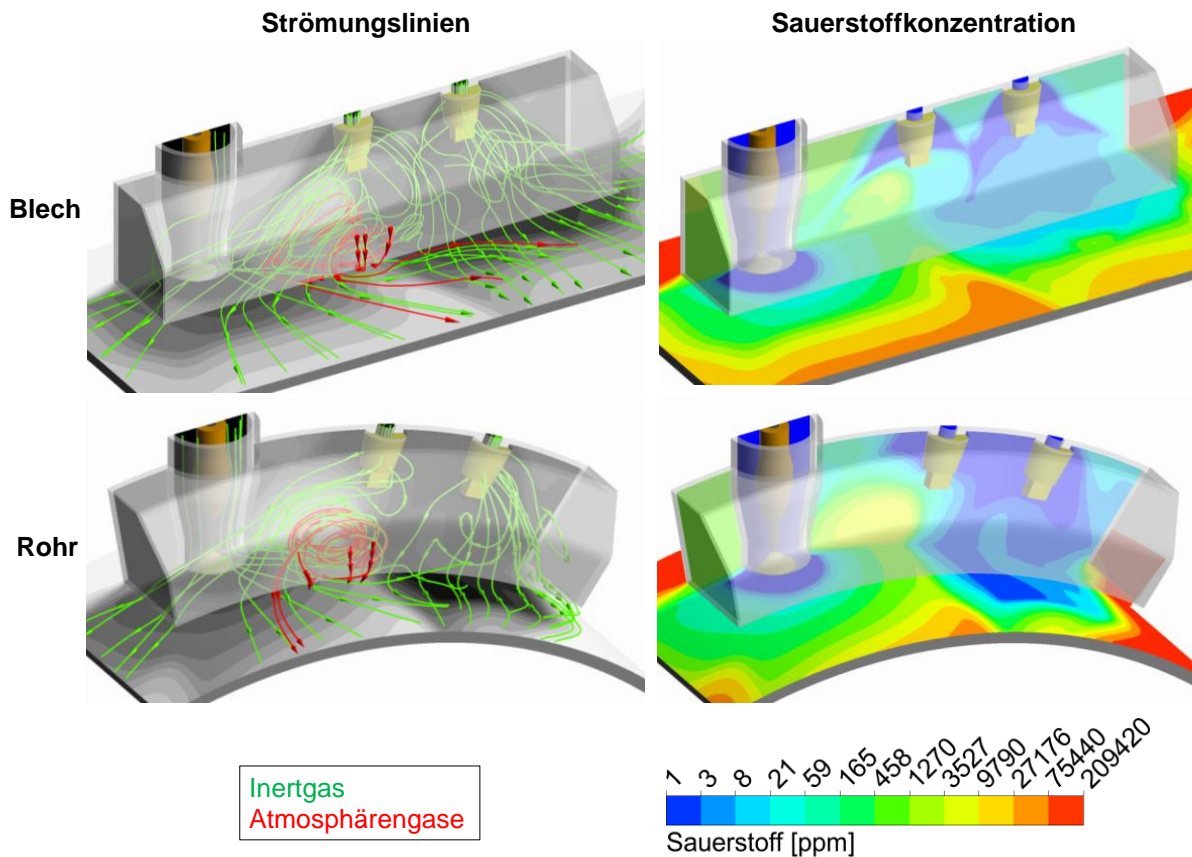


Abbildung 6.17: Stromlinien (links) und Sauerstoffkonzentrationen (rechts) von Schleppegasdüsen mit Schalldämpfern (Typ A) ($I_w = 150 \text{ A}$ | $N_{SD} = 2$ | $a = 5 \text{ mm}$ | $PG = 10 \text{ l/min}$ | $SG = 20 \text{ l/min}$)

Bei geringen Abständen zwischen der Schleppegasdüse und dem Werkstück (bis 3 mm) kann, unabhängig vom verwendeten Schalldämpfer, dem Ansaugverhalten des Wirbels durch eine hinreichend hohe Verdrängungswirkung an der Düsenkante entgegengewirkt werden. Eine Steigerung des Abstandes auf 5 mm resultiert in einer stark erhöhten Konzentration an Atmosphäregasen in der Schleppegasdüse, wobei dem beschriebenen Kontaminationseffekt durch Steigerung des Schleppegasvolumenstroms nicht entgegengewirkt werden kann. Die Stärke des Ansaugverhaltens bzw. die resultierende Konzentration an Atmosphäregasen vergrößert sich maßgeblich mit weiterer Steigerung des Arbeitsabstandes. Abbildung 6.18 veranschaulicht die Nahtoberfläche bei Verwendung einer Schleppegasdüse mit zwei Schalldämpfern bei drei unterschiedlichen Arbeitsabständen. Aufgrund der starken Sensitivität der Gasabdeckung vom Abstand der Schleppegasdüse zum Werkstück ist die Zugänglichkeit des Düsenkonzeptes stark eingeschränkt. Des Weiteren sind die beschriebenen Schleppegasdüsen stark anwendungsbezogen, d.h. die Verwendung einer Schleppegasdüse für verschiedene fúgetechnische Aufgabenstellungen ist nur bedingt möglich.

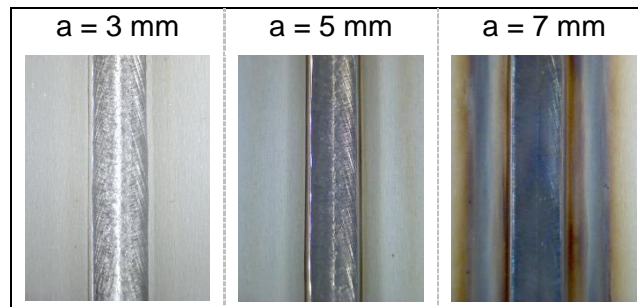


Abbildung 6.18: Resultierende Anlauffarben von Blindschweißungen (Randbedingungen entsprechend Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2) für unterschiedliche Abstände zwischen Schleppgasdüse und Bauteiloberfläche bei Verwendung von Schalldämpfern (Typ A) ohne Strömungsgleichrichter ($N_{SD} = 2$ | $PG = 10$ l/min | $SG = 30$ l/min)

Abbildung 6.19 veranschaulicht, dass die Verwendung der links dargestellten Düsengeometrie auf ebenen Blechen und einem Arbeitsabstand von 3 mm metallisch blanke Schweißnähte ermöglicht. Eine Übertragung der Düse auf eine Rohr-Anwendung (Geometriedaten entsprechend Tabelle 5.1) bedingt, bei einem minimal geforderten Arbeitsabstand von 3 mm, die Bildung von signifikanten Anlauffarben. Durch Anpassung der Düsengeometrie an die Form des Werkstücks kann jedoch ein zum ebenen Blech vergleichbares Nahtbild realisiert werden.

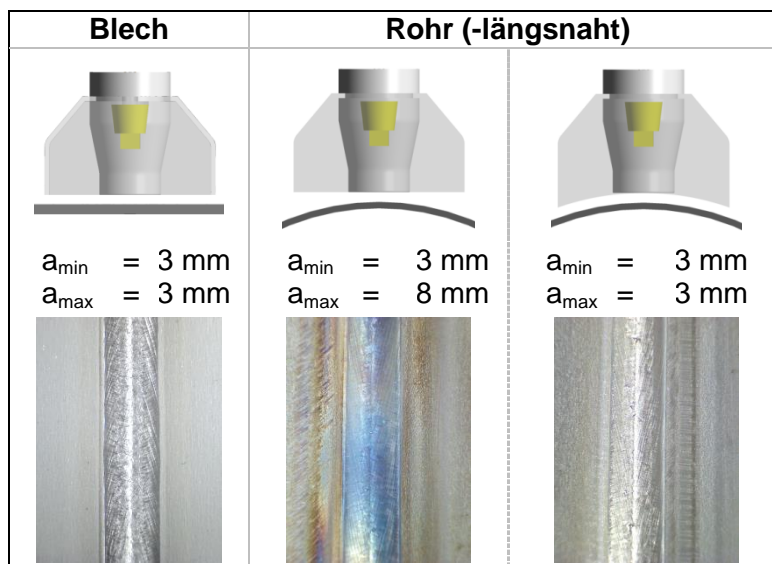


Abbildung 6.19: Resultierende Anlauffarben von Blindschweißungen (Randbedingungen entsprechend Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2) in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie und des Abstandes zur Bauteiloberfläche bei Verwendung von Schalldämpfern (Typ A) ohne Strömungsgleichrichter ($N_{SD} = 2$ | $PG = 10$ l/min | $SG = 30$ l/min)

Abbildung 6.20 veranschaulicht vereinfacht die Strömungscharakteristik im Bereich des Schweißbrenners und des ersten Schalldämpfers. Das Ansaugverhalten des Wirbels bzw. die Stärke der Kontamination der Schleppgasdüse mit Atmosphärgasen ist neben dem Arbeitsabstand der Schleppgasdüse abhängig von:

- der Stromstärke, dem Elektrodenspitzenwinkel, dem Abplattungsdurchmesser der Elektrode, dem Elektrodenwerkstoff, der Lichtbogenlänge, der Art des Schutzgases, dem Schutzgasvolumenstrom sowie
- dem Schleppgasvolumenstrom, der Position und Anzahl der Schalldämpfer als auch der Geometrie und den Materialeigenschaften der Sinterkörper.

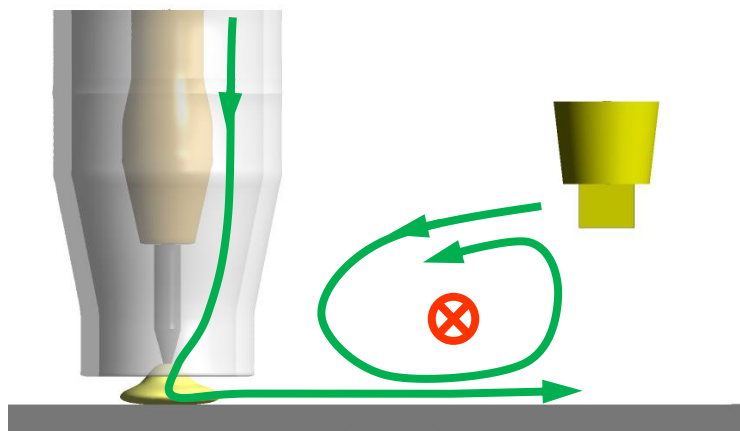


Abbildung 6.20: Prinzipdarstellung der Wechselwirkung zwischen Schutz- und Schleppgasvolumenstrom

Allen genannten Faktoren beeinflussen das Geschwindigkeitsprofil des Lichtbogens und / oder der Schleppgasströmung. Die Stromstärke, der Elektrodenspitzenwinkel, der Abplattungsdurchmesser der Elektrode, die Lichtbogenlänge und die Art des Schutzgases wirken sich zudem direkt auf das resultierende Schweißergebnis aus. Eine Anpassung der Parameter zur Verbesserung der Gasabdeckung ist nur begrenzt möglich. Auf eine Diskussion der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge der genannten Parameter wird verzichtet. Für vertiefende Informationen wird auf Untersuchungen von FÜSSEL [AiF15.774] verwiesen.

Bei einem Abstand von 5 mm zwischen der Schleppgasdüsenunterseite und der Werkstückoberfläche ergibt sich eine starke Sensitivität bezüglich der Qualität der Gasabdeckung und dem eingestellten **Schutzgasvolumenstrom** des Schweißbrenners. Eine Reduzierung des Volumenstroms führt zu einer Verringerung der lokalen Strömungsgeschwindigkeiten, was mit einem reduzierten Ansaugen von Atmosphärgasen durch den Wirbel bzw. mit einer verringerten Kontamination der Schleppgasdüse korreliert. Bei einer weiteren Steigerung des

Arbeitsabstandes kann der Ansaugwirkung des Wirbels nicht mehr entgegengewirkt werden. Abbildung 6.21 veranschaulicht den beschriebenen Zusammenhang für einen Schutzgasvolumenstrom von 10 l/min (Referenz) und 4 l/min.

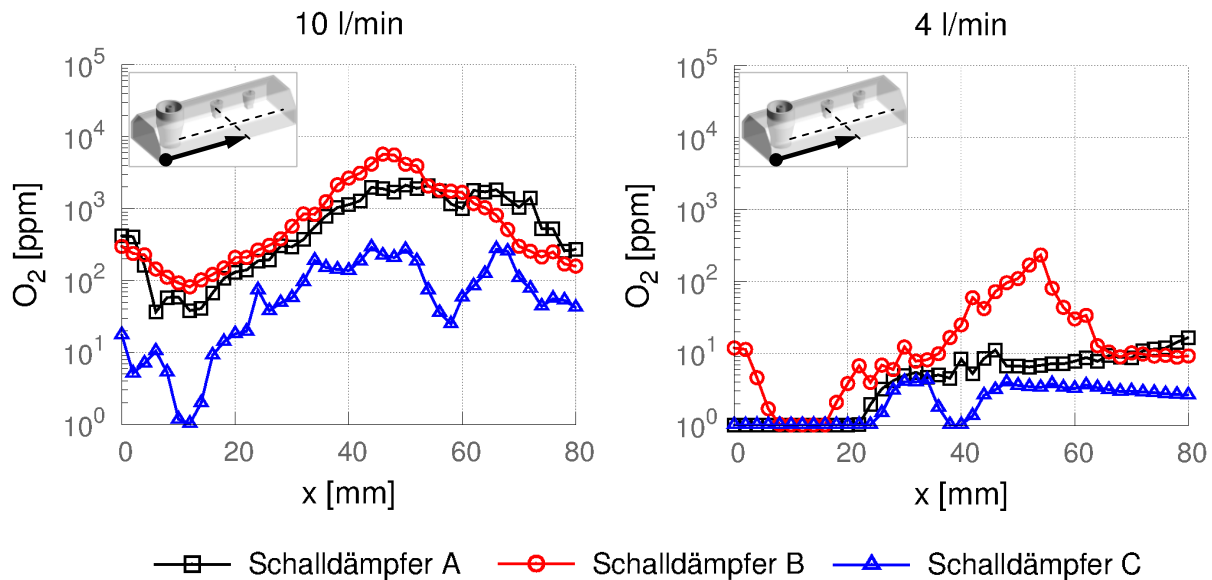


Abbildung 6.21: Gemessene Sauerstoffkonzentration einer Schleppgasdüse mit Schalldämpfern (Typ A) in Abhängigkeit des verwendeten Sinterkörpers für einen Schutzgasvolumenstrom von 10 l/min (links) und 4 l/min (rechts) ($I_W = 200$ A | $N_{SD} = 2$ | $a = 5$ mm | SG = 30 l/min)

Hohe **Schleppgasvolumenströme** resultieren in hohen Strömungsgeschwindigkeiten des Schleppgases beim Austreten aus dem Schalldämpfer, was zu erhöhten Wechselwirkungen zwischen den Gasströmungen als auch zu großen Scherraten führt. Eine Reduzierung des Schleppgasvolumenstroms führt zu geringeren Interaktionen bei einer gleichzeitig verringerten Gesamtverdrängungswirkung. Eine allgemeingültige Aussage bezüglich des optimalen Schleppgasvolumenstroms für die Anwendung von Schleppgasdüsen mit Schalldämpfern ist nicht möglich.

Bei der Anwendung von Schleppgasdüsen mit Schalldämpfern ist die Qualität der Gasabdeckung sowohl von der **Position und der Anzahl der verwendeten Schalldämpfer** als auch von deren Geometrie und Materialeigenschaften abhängig. Bei der Positionierung der Schalldämpfer in der Schleppgasdüse ist eine möglichst gleichmäßige Verteilung anzustreben. Eine erhöhte Anzahl an Schalldämpfern führt zu einer Verringerung des Volumenstroms pro Schalldämpfer bei gleicher Gesamtverdrängungswirkung, was zu einer Abnahme der maximalen Strömungsgeschwindigkeiten des Schleppgases beim Austritt aus dem Schalldämpfer führt. Es resultieren verringerte Scherkräfte und weiterführend eine starke Abnahme

des Ansaugeffektes, was zusammen mit einer stark verbesserte Vereinheitlichung des eingeleiteten Schleppegasvolumenstroms zu einer signifikant verbesserten Gasabdeckung führt. Als Nachteil ergibt sich ein erhöhter konstruktiver Aufwand. Abbildung 6.22 veranschaulicht gemessene Sauerstoffkonzentrationen bei einem Abstand von 5 mm und unter Verwendung von vier Schalldämpfern.

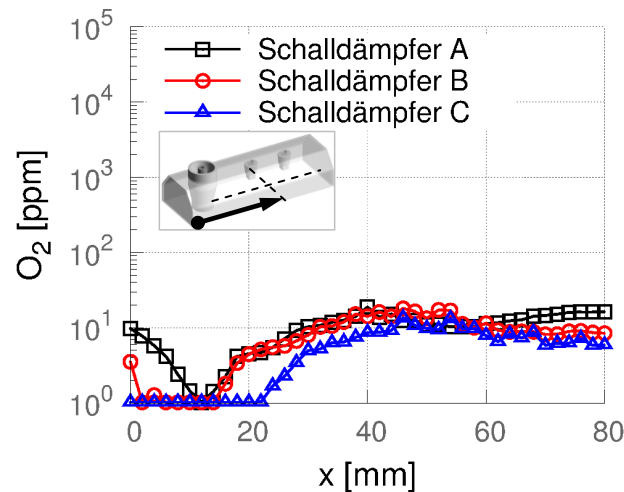


Abbildung 6.22: Gemessene Sauerstoffkonzentration einer Schleppegasdüse mit Schalldämpfern in Abhängigkeit des verwendeten Sinterkörpers ($I_w = 200 \text{ A}$ | $N_{SD} = 4$ | $a = 5 \text{ mm}$ | $PG = 10 \text{ l/min}$ | $SG = 30 \text{ l/min}$)

Die beschriebenen Interaktionen zwischen den einzelnen Gasströmungen können durch zusätzliche Verwendung eines Strömungsgleichrichters mit geringer Druckdifferenz wirkungsvoll unterdrückt werden. Hohe lokale Strömungsgeschwindigkeiten des Schleppegases werden geblockt, wodurch eine Umlenkung der Lichtbogenströmung und damit weiterführend die Ausbildung des Wirbelfeldes verhindert wird. Es resultiert ein kontinuierliches und gleichmäßiges Abströmen über die gesamte Verdrängungsfläche und damit eine qualitativ hochwertige Gasabdeckung. Abbildung 6.23 veranschaulicht das Geschwindigkeitsfeld auf der Symmetrieebene der Schleppegasdüse, Abbildung 6.24 in einem Abstand von 0,5 mm über der Werkstückoberfläche ohne (oben) und mit (unten) Strömungsgleichrichter. Im Rahmen der Untersuchungen wurde als Strömungsgleichrichter ein Lochblech ($d_{BLB} = 1 \text{ mm}$ | $A_0 = 30 \%$) verwendet.

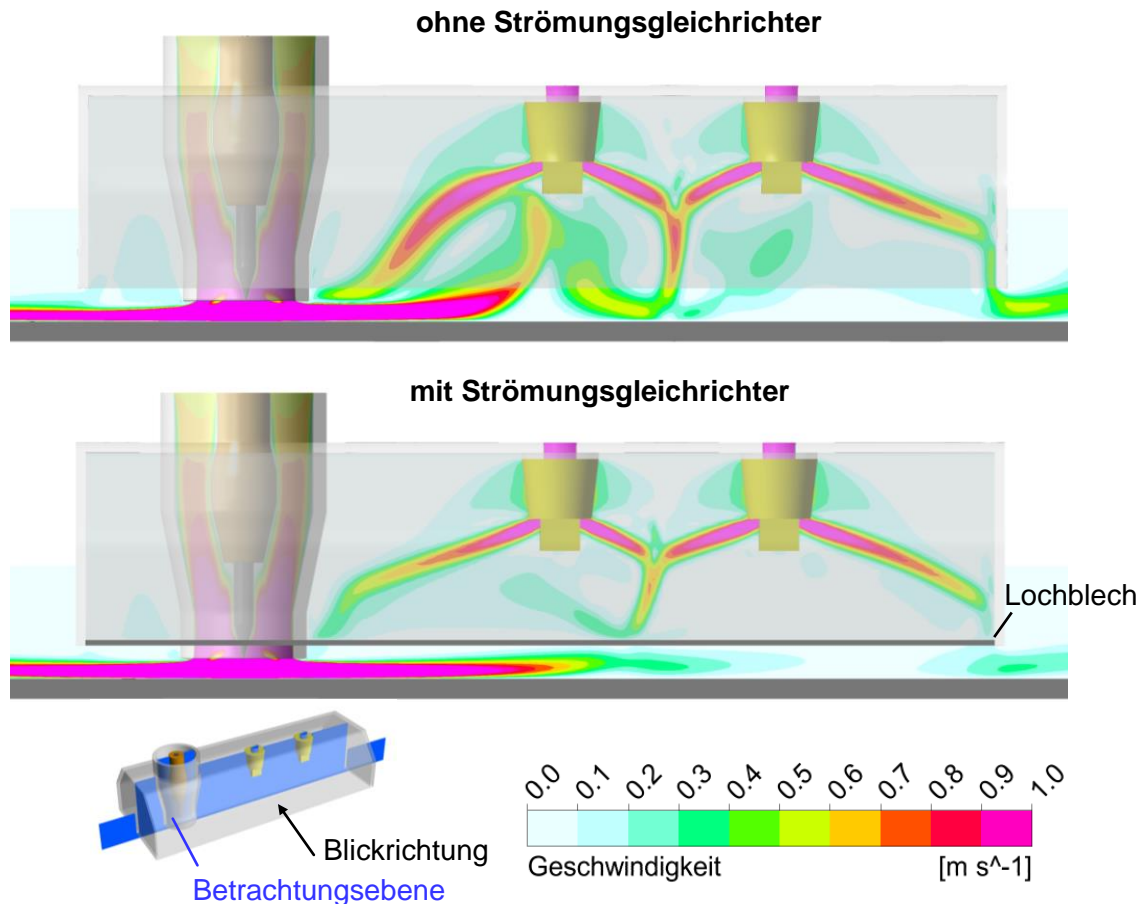


Abbildung 6.23: Numerisch berechnetes Geschwindigkeitsfeld in der Symmetrieffläche einer Schleppgasdüse mit Schalldämpfern (Typ A) ohne (oben) bzw. mit einem Strömungsgleichrichter mit geringer Druckdifferenz (unten) ($I_w = 150 \text{ A}$ | $N_{SD} = 2$ | $a = 5 \text{ mm}$ | $PG = 10 \text{ l/min}$ | $SG = 20 \text{ l/min}$)

Ohne zusätzliche Verwendung eines Strömungsgleichrichters ist, bei einem Abstand ab 5 mm zwischen der Schleppgasdüsenunterseite und der Werkstückoberfläche, ein kontinuierliches Abströmen über die gesamte Verdrängungsfläche nicht möglich. Im Bereich des Wirbels ist keine Verdrängungswirkung gegeben, vgl. Abbildung 6.24. Es resultiert ein starker konvektiver Massenfluss von Atmosphärgasen in die Schleppgasdüse, wobei eine Kompensation mit hohen Schleppgasvolumenströmen nicht möglich ist. Aufgrund der starken Interaktionen der Gasströmungen ergibt sich zudem ein stark instationäres Strömungsfeld, was die Diffusion von Atmosphärgasen begünstigt. Die Verwendung eines Strömungsgleichrichters mit einer geringen Druckdifferenz führt zu einer maßgeblich verbesserten Vereinheitlichung des Schleppgasvolumenstroms. Für die praktische Umsetzung ist der Einsatz von Lochblechen mit kleinen Lochdurchmessern und einer großen relativen freien Lochfläche zielführend.

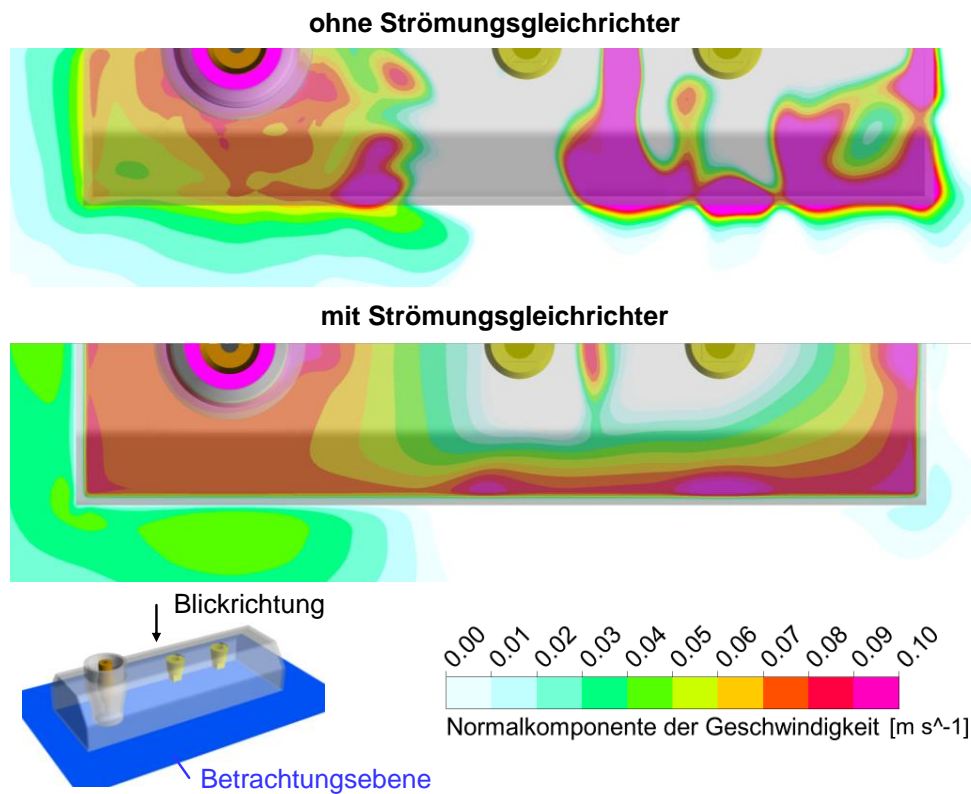


Abbildung 6.24: Normalkomponenten der Geschwindigkeitsvektoren einer Schleppgasdüse mit Schalldämpfern (Typ A) ohne (oben) bzw. mit einem Strömungsgleichrichter mit geringer Druckdifferenz (unten) 0,5 mm über der Werkstückoberfläche ($I_w = 150 \text{ A}$ | $N_{SD} = 2$ | $a = 5 \text{ mm}$ | $PG = 10 \text{ l/min}$ | $SG = 20 \text{ l/min}$)

Durch die Verwendung von Strömungsgleichrichtern mit geringer Druckdifferenz kann auf eine zusätzliche Abdichtung des Gleichrichters zur Düsenwand verzichtet werden. Das Entstehen von Schutzgasfreistrahlen und die damit korrelierende negative Beeinflussung der Gasabdeckung sind vernachlässigbar. Die maximal möglichen Abstände zwischen der Schleppgasdüse und dem Werkstück können signifikant gesteigert werden, was zu einer deutlich verbesserten Zugänglichkeit führt. Abbildung 6.25 veranschaulicht die maximalen erreichten Abstände für unterschiedliche Schalldämpfer in Abhängigkeit der Anzahl an Sinterkörpern ohne bzw. mit zusätzlicher Verwendung eines Strömungsgleichrichters.

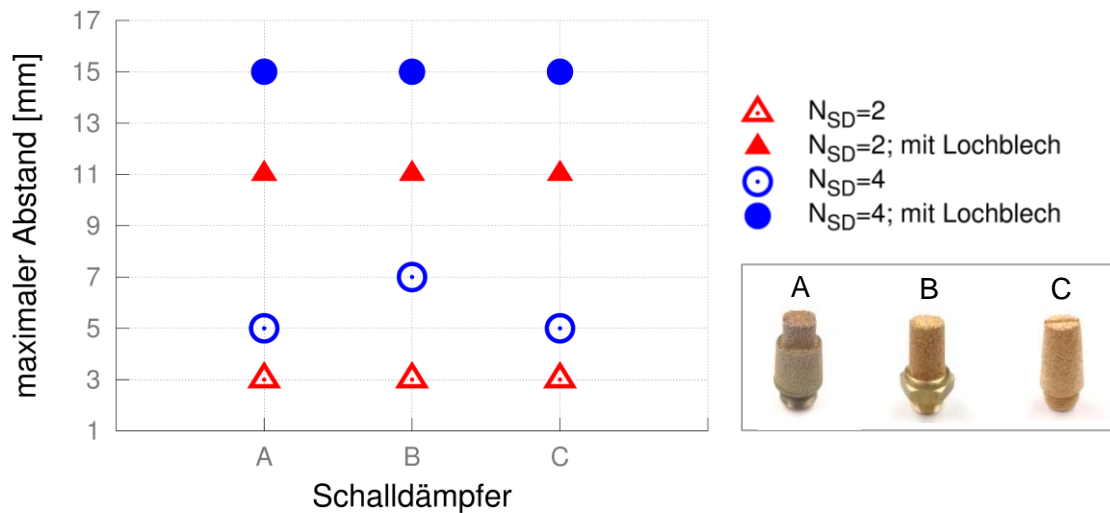


Abbildung 6.25: Maximale Arbeitsabstände von Schleppgasdüsen mit Schalldämpfern ohne bzw. mit einem Strömungsgleichrichter mit geringer Druckdifferenz ($I_w = 200 \text{ A}$ | $PG = 10 \text{ l/min}$ | $SG = 30 \text{ l/min}$)

Durch die stark verbesserte Zugänglichkeit wird eine Übertragbarkeit von Schleppgasdüsen auf verschiedene fügetechnische Aufgabenstellungen ermöglicht, womit sowohl eine Reduzierung von Entwicklungs- als auch Fertigungskosten erreicht werden kann. Abbildung 6.26 veranschaulicht Schweißergebnisse von Rohr-Längsnähen. Bei einem minimal geforderten Abstand zwischen Schleppgasdüse und Werkstück von 3 mm führt die Anwendung von Schleppgasdüsen ohne Strömungsgleichrichter, ohne Anpassung der Schleppgasdüse an die Form des Werkstücks, zu erheblichen Anlauffarben. Die Integration eines Strömungsgleichrichters mit geringer Druckdifferenz führt auch bei erhöhten Abstandswerten zu oxidationsfreien Schweißnähten.

Neben einer stark verbesserten Zugänglichkeit wird durch die kombinierte Anwendung von Schalldämpfern und Strömungsgleichrichtern mit geringer Druckdifferenz zum einen die Sensitivität von Einflussgrößen (z.B. verwendeter Schalldämpfer) maßgeblich reduziert, was eine robuste Anwendbarkeit entscheidend fördert. Zum anderen werden sowohl eine einfache Austauschbarkeit aller Funktionselemente als auch eine einfache und kostengünstige Fertigung der Schleppgasdüsen gewährleistet.

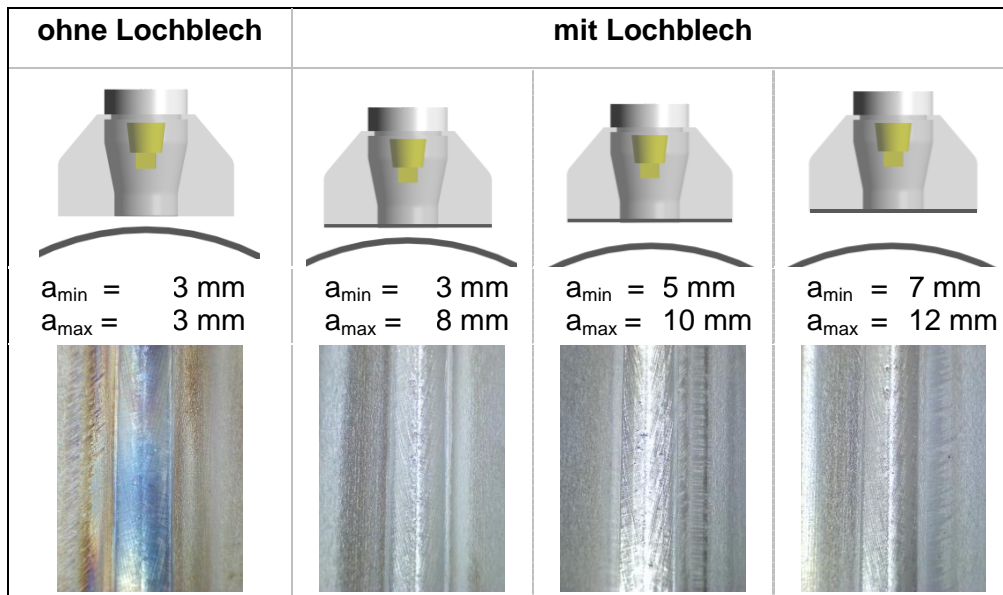


Abbildung 6.26: Resultierende Anlauffarben von Blindschweißungen auf Rohren (Randbedingungen entsprechend Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2) bei Verwendung von Schalldämpfern (Typ A) ohne (links) und mit einem Strömungsgleichrichter mit geringer Druckdifferenz (rechts) ($N_{SD} = 2$ | $PG = 10$ l/min | $SG = 30$ l/min)

Die im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen erzielten Ergebnisse sind auf reale schweißtechnische Anwendungen übertragbar. Abbildung 6.27 veranschaulicht die Schweißnahtoberfläche von Verbindungsschweißungen an ebenen Blechen (I-Naht im Stumpfstoß) bei verschiedenen Abständen zwischen der Schleppgasdüsenunterseite und der Werkstückoberfläche. Analog zu den zuvor diskutierten Blindnähten resultiert die Verwendung von Schleppgasdüsen mit Schalldämpfern, bei erhöhten Abstandswerten, in einer Oxidation der Schweißnahtoberfläche. Bei zusätzlicher Verwendung eines Strömungsgleichrichters mit geringer Druckdifferenz können metallisch blanke Schweißnähte auch bei stark erhöhten Abständen realisiert werden.

Alternativ zur diskutierten Steigerung des Abstandes ist eine **Reduzierung des Schleppgasvolumenstroms** möglich. Hohe Abstände zwischen Schleppgasdüse und Werkstück erfordern, aufgrund der stark vergrößerten Verdrängungsfläche, zur Gewährleistung einer hinreichend guten Qualität der Gasabdeckung den Einsatz hoher Schleppgasvolumenströme. Im Rahmen von Stichprobenversuchen konnte durch die zusätzliche Implementierung eines Strömungsgleichrichters mit geringer Druckdifferenz der zur Realisierung des Zielkriteriums notwendige Schleppgasvolumenstrom, bei einem Abstand zwischen der Schleppgasdüsenunterseite und der Werkstückoberfläche von 5 mm, um über 60 % gesenkt werden. Die Ursachen sind sowohl das verhinderte Ansaugen von Atmosphärgasen durch

stationäre Wirbelfelder als auch eine maßgeblich verbesserte Vereinheitlichung des Schleppgasvolumenstroms über den gesamten Bereich der Verdrängungsfläche.

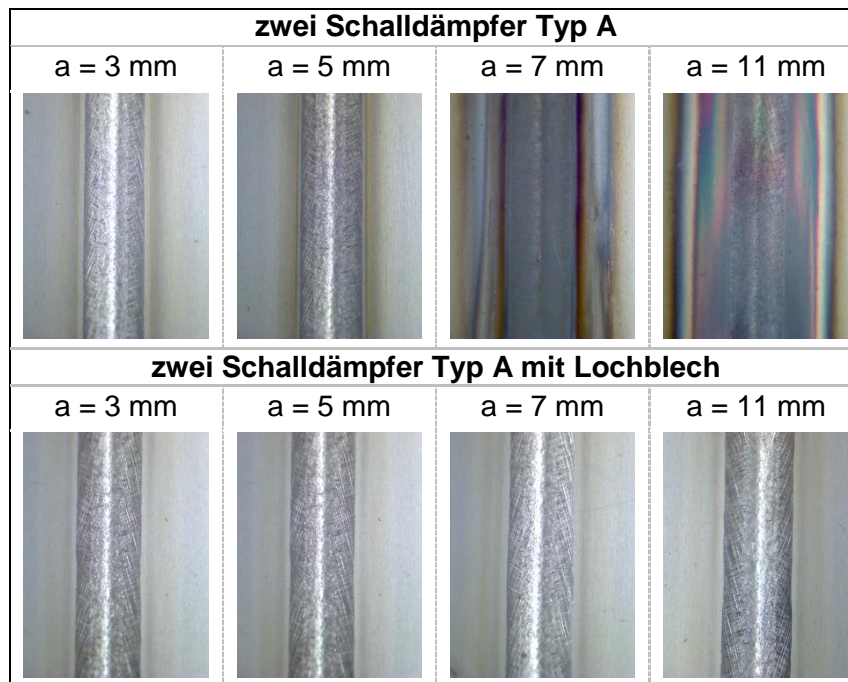


Abbildung 6.27: Resultierende Anlauffarben von Verbindungsschweißungen (Randbedingungen entsprechend Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2) bei Verwendung von Schalldämpfern (Typ A) ohne (oben) und mit einem Strömungsgleichrichter mit geringer Druckdifferenz (unten) ($N_{SD} = 2$ | $PG = 10$ l/min | $SG = 30$ l/min)

6.5.2 Kontamination aufgrund unzureichender Verdrängungswirkung

Die zweite maßgebliche Kontaminationsursache ist das Ansaugen von Atmosphäregasen durch eine unzureichende bzw. fehlende Verdrängungswirkung an der prozessnahen Schleppgasdüsenunterkante. Der Kontaminationsmechanismus tritt bei allen Konstruktionsprinzipien mit einem vereinheitlichten Geschwindigkeitsfeld des Schleppgases an der Schleppgasdüsenunterseite auf (Schalldämpfer in Kombination mit einem Strömungsgleichrichter mit geringer Druckdifferenz sowie alle Konstruktionsprinzipien mit Strömungsgleichrichtern mit hoher Druckdifferenz). Abbildung 6.28 veranschaulicht das Strömungsfeld einer Schleppgasdüse mit Gasverteiler und einem Strömungsgleichrichter mit hoher Druckdifferenz. Die Verwendung der genannten Konstruktionsprinzipien resultiert in einem Ansaugen von Atmosphäregasen in prozessnahen Gebieten der Schleppgasdüse. Prozessnachlau-

fende Bereiche sind mit zunehmendem Abstand von der Lichtbogenachse durch eine sehr gute Gasabdeckung gekennzeichnet.

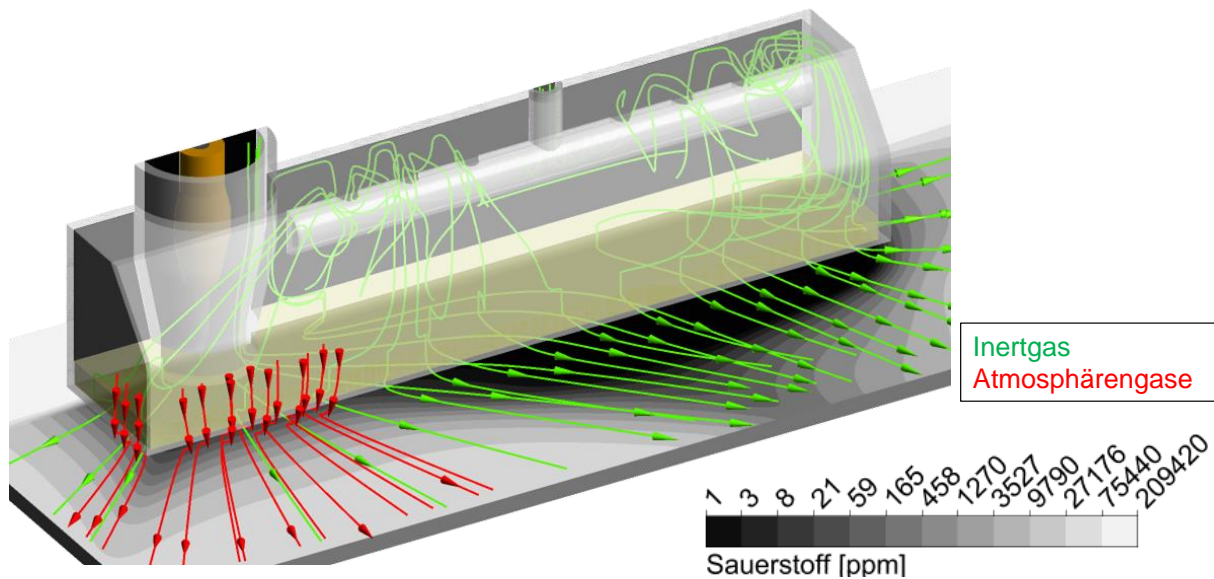


Abbildung 6.28: Stromlinien und Sauerstoffkonzentrationen einer Schleppgasdüsen mit Gasverteiler und einem Strömungsgleichrichter mit hoher Druckdifferenz ($I_w = 150 \text{ A}$ | $N_{BG} = 6$ | $d_{BG} = 4 \text{ mm}$ | $a = 5 \text{ mm}$ | $PG = 10 \text{ l/min}$ | $SG = 20 \text{ l/min}$)

Ursache der Kontamination ist die stark beschleunigte und erwärmte Lichtbogenströmung, welche zu einem stark veränderten und inhomogenen Geschwindigkeitsprofil an den prozessnahen Schleppgasdüsenkanten sowie weiterführend zu einer unzureichenden Verdrängungswirkung führt. Es resultiert eine Kontamination an der Kante der Schleppgasdüse durch einen erhöhten konvektiven und diffusiven Massenstrom von Atmosphärgasen in die Schleppgasdüse.

Die Kontamination steigt mit zunehmender Düsenhöhe und ist abhängig vom Schutz- und Schleppgasvolumenstrom sowie allen weiteren Einflussfaktoren, welche das Geschwindigkeitsfeld des Lichtbogens und / oder der prozessnaher Bereiche der Schleppgasdüse beeinflussen (siehe Kapitel 6.5.1). Abbildung 6.29 veranschaulicht die normierten Geschwindigkeitsvektoren (schwarz) und die prinzipielle Kontamination mit Atmosphärgasen (rot) an einer prozessnahen Schleppgasdüsenkante. Geringe Abstände zwischen der Schleppgasdüsenunterseite und Werkstückoberfläche und / oder geringe Stromstärken führen zu einem gleichmäßigen Ausströmen von Inertgas über die gesamte Höhe der Verdrängungsfläche. Die Verdrängungswirkung kann mit steigendem Abstand der Schleppgasdüse nicht aufrechterhalten werden. Eine Steigerung der Stromstärke resultiert in einer Erhöhung der Lorenzkraft, was weiterführend zu stark erhöhten Strömungsgeschwindigkeiten führt. Durch das

zunehmende Ansaugen von Schleppegas in Richtung des Prozessbereiches sinkt mit zunehmender Stromstärke die Verdrängungswirkung an der Düsenkante. Die Veränderung des Geschwindigkeitsprofils führt in beiden Fällen zu einer Kontamination der Schleppegasdüse durch erhöhte Konvektions- und Diffusionsmassenströme von Atmosphärgasen in Bereichen unterhalb der Düsenkante.

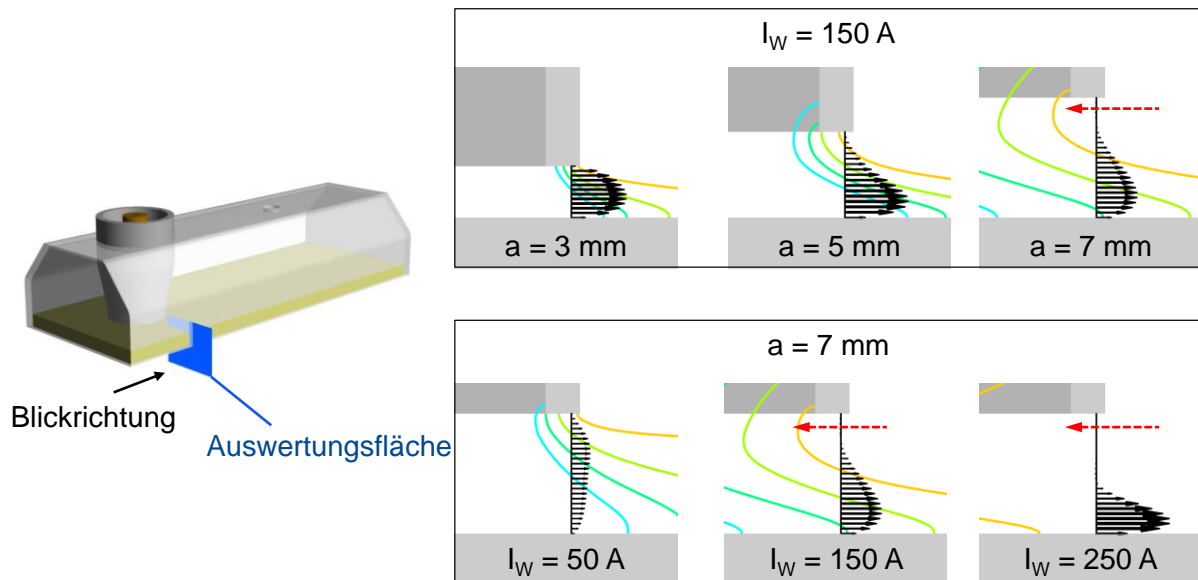


Abbildung 6.29: Normiertes Geschwindigkeitsprofil (schwarz) und prinzipielle Darstellung der Massenflüsse von Atmosphärgasen (rot) an der prozessnahen Schleppegasdüsenkanten bei Verwendung von Strömungsgleichrichtern mit hoher Druckdifferenz – oben: Variation des Abstandes ($I_W = 150 \text{ A}$); unten: Variation der Stromstärke ($a = 7 \text{ mm}$)

Dem beschriebenen Kontaminationseffekt kann durch zwei Ansätze entgegengewirkt werden:

1. Durch Erhöhung des Schleppegasvolumenstroms und der damit verbundenen Steigerung der Gesamtverdrängungswirkung und / oder
2. durch die Veränderung der Strömungsprofile mithilfe von profilierten Sintermetallen.

Der Bedarf an Schleppegas ist im Bereich der Schleppegasdüse nicht konstant. Prozessnahe Bereiche benötigen zur Gewährleistung einer hinreichend guten Gasabdeckung einen erhöhten, prozessferne einen vergleichsweise geringen Schleppegasvolumenstrom. Eine **Erhöhung der Gesamtverdrängungswirkung** durch Steigerung des Schleppegasvolumenstroms ist theoretisch möglich, aber unter Berücksichtigung einer wirtschaftlichen Fertigung nicht zielführend.

Die Realisierung **profilerter Strömungen** ist durch die lokale Anpassung der Druckdifferenz des Strömungsgleichrichters möglich, wobei die praktische Umsetzung durch Anpassung der Materialstärke realisiert werden kann. Zielführend ist eine Absenkung der Materialstärke in prozessnahen und / oder eine Steigerung der Materialstärke in prozessfernen Gebieten der Schleppgasdüse. Zu beachten ist, dass eine zu starke Profilierung des Sintermetalls zur Kontamination der Schleppgasdüse in prozessnachlaufenden Bereichen führt. Abbildung 6.30 veranschaulicht die Gasabdeckung einer Schleppgasdüse mit einem Strömungsgleichrichter mit hoher Druckdifferenz und konstanter (oben) sowie lokal unterschiedlicher Wandstärke (unten). Die Verwendung eines Strömungsgleichrichters mit konstanter Wandstärke ($s = 5 \text{ mm}$) führt zu einer Vereinheitlichung des Strömungsfeldes über den gesamten Bereich der Schleppgasdüse. Es resultiert eine Kontamination der Schleppgasdüse aufgrund der beschriebenen unzureichenden Verdrängungswirkung an den prozessnahen Schleppgasdüsenkanten.

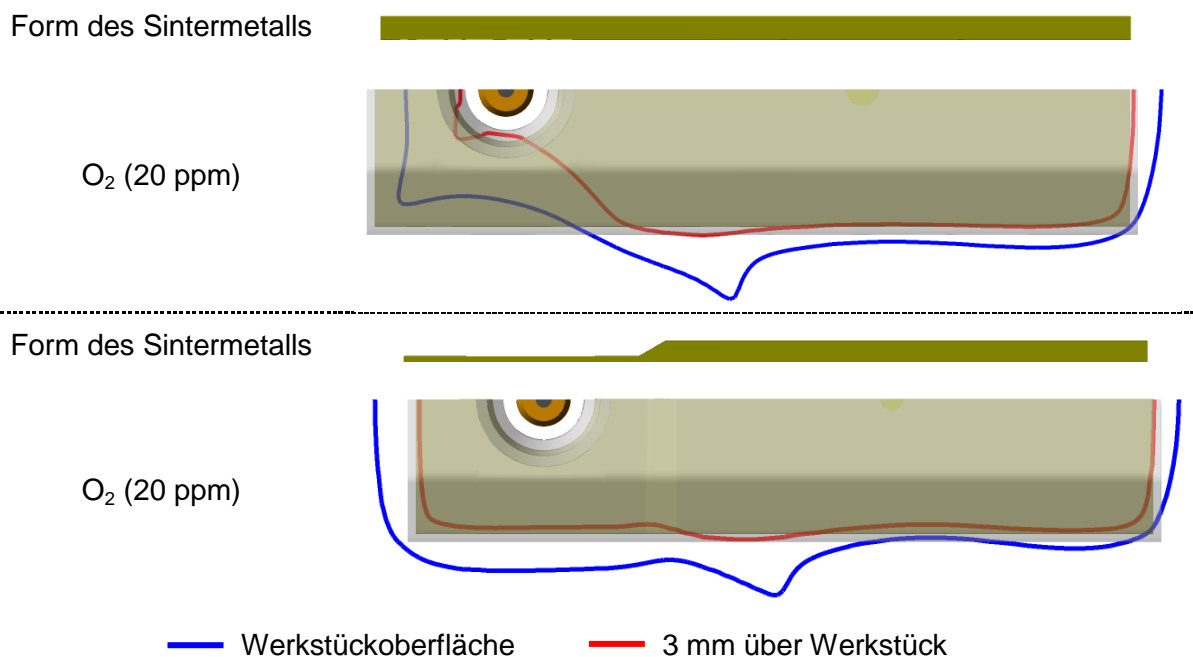


Abbildung 6.30: Berechnete Isolinien für 20 ppm Sauerstoff bei Verwendung eines Strömungsgleichrichters mit hoher Druckdifferenz; oben: einheitliche Materialstärke; unten: profiliertes Sintermetall; ($I_w = 150 \text{ A}$ | $a = 5 \text{ mm}$ | $PG = 10 \text{ l/min}$ | $SG = 20 \text{ l/min}$)

Die Verdrängungswirkung in prozessnahen Bereichen der Schleppgasdüse kann durch ein lokales Absenken der Materialstärke des Sintermetalls auf 1,5 mm signifikant gesteigert werden. Eine weitere Absenkung der Materialstärke resultiert in einer zunehmenden Kontamination von prozessnachlaufenden Bereichen der Schleppgasdüse. Grundlage der durchgeführ-

ten Untersuchungen waren Sintermetalle mit Korngrößen von 0,08 mm bis 0,16 mm. Als maßgebliche Nachteile des Konstruktionsprinzips müssen die Forderung nach einer hinreichend guten Abdichtung des Strömungsgleichrichters, die starke Anfälligkeit hinsichtlich der Verschmutzung der Funktionselemente, die fehlende Austauschbarkeit sowie die hohen Investitionskosten für profilierte Sintermetallplatten (Einzelteilfertigung) angesehen werden.

Bei Verwendung von Strömungsgleichrichtern mit einer hohen Druckdifferenz sind sowohl die Qualität der Gasabdeckung als auch die Gebrauchseigenschaften (minimal notwendiger Schleppgasvolumenstrom / maximal möglicher Arbeitsabstand) der Schleppgasdüse stark von der Dichtheit des Systems abhängig. Eine unzureichende Abdichtung des Sintermetalls zur Schleppgasdüsenwand führt zu Schleppgasfreistrahlen, welche zu einer unzureichenden Vereinheitlichung des Schleppgases (erhöhte Massenströme an den Leckagen) und zu einer erhöhten turbulenten Diffusion führen können. In beiden genannten Fällen ist mit einer reduzierten Qualität der Gasabdeckung sowie verschlechterten Gebrauchseigenschaften zu rechnen. Abbildung 6.31 veranschaulicht anhand von Sauerstoffmessungen (oben) und Schlierenaufnahmen (unten) exemplarisch mögliche Auswirkungen einer unzureichenden Abdichtung von Sintermetallen mit hohen Druckdifferenzen. Die dargestellten Schlierenaufnahmen zeigen das Strömungsfeld des Schleppgases.

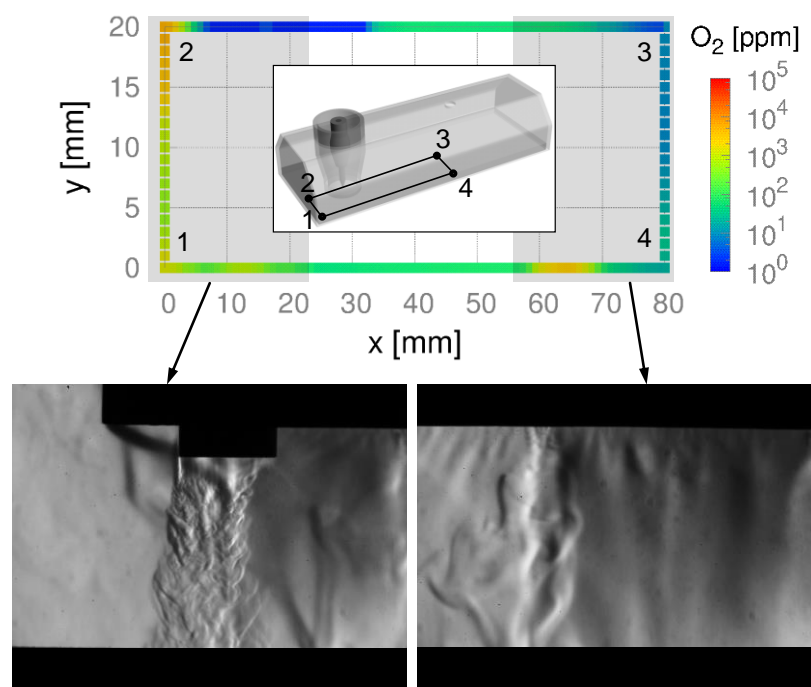


Abbildung 6.31: Einfluss von Leckagen bei Verwendung von Strömungsgleichrichtern mit hoher Druckdifferenz (PG = 10 l/min | SG = 30 l/min) – oben: Sauerstoffmessung mit Prozess ($I_w = 200$ A | $a = 5$ mm); unten: Schlierenaufnahmen ohne Prozess

Der Verzicht auf eine zusätzliche Abdichtung des Gleichrichters zur Schutzgasdüse resultiert in einem stark instationären und turbulenten Strömungsfeld. Aufgrund des resultierenden, hohen Massenstroms an Schleppgas im Bereich der Schutzgasdüse ist eine hinreichend hohe Verdrängungswirkung an den Kanten der Schleppgasdüse nicht mehr gegeben, vgl. Abbildung 6.31 links. Entstehende Schleppgasfreistrahlen führen sowohl zu einer Einwirbelung von Atmosphäregasen als auch in einer gesteigerten turbulenten Diffusion, vgl. Abbildung 6.31 rechts. Das veränderte Abströmverhalten des Schleppgases in prozessnahen Bereichen sowie die beobachteten Schleppgasfreistrahle führen, auch bei geringen Abständen zwischen Schleppgasdüse und Werkstück, zu einer maßgeblichen Kontamination der Schleppgasdüse. Bei vollständiger Abdichtung der Funktionselemente ist eine qualitativ hochwertige Gasabdeckung bis zu einem Abstand von 15 mm möglich, vgl. Tabelle 6.6. Im Hinblick auf die sehr starke Sensitivität der Gasabdeckung von der Qualität der Abdichtung des Strömungsgleichrichters wird die Verwendung von Strömungsgleichrichtern mit hoher Druckdifferenz nicht empfohlen.

6.6 Zusätzliche Praxisanforderungen

6.6.1 Spülzeiten

Das prinzipielle Spülverhalten ist unabhängig vom verwendeten Konstruktionsprinzip. Für unterschiedliche Positionen auf der Werkstückoberfläche ergeben sich z.T. unterschiedliche Spülzeiten - prozessnachlaufende Bereiche sind durch vergleichsweise geringe, prozessvorgelagerte Bereiche durch erhöhte Spülzeiten gekennzeichnet. Abbildung 6.32 veranschaulicht den Sachverhalt exemplarisch an einer Schleppgasdüse mit zwei Schalldämpfern.

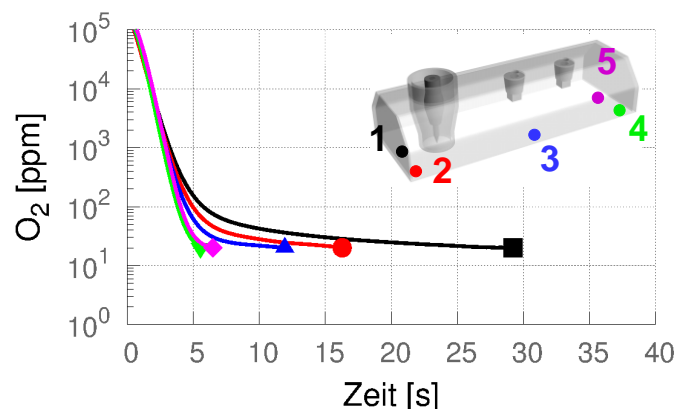


Abbildung 6.32: Gemessene Spülzeiten einer Schleppgasdüse mit Schalldämpfern (Typ A)
($N_{SD} = 2$ | $a = 3$ mm | $PG = 10$ l/min | $SG = 30$ l/min)

Die absolute Dauer des Spülvorgangs ist maßgeblich abhängig von den folgenden Einflussfaktoren:

1. Abstand Schleppgasdüse-Werkstück
2. Schleppgasvolumenstrom
3. Konstruktive Gestaltung der Schleppgasdüse

Eine Reduzierung des **Abstandes** zwischen der Schleppgasdüse und dem Werkstück führt zu Verkleinerung der Verdrängungsfläche sowie zu einer Vereinheitlichung des Strömungsfeldes durch einen zunehmenden Überdruck in der Düse. Eine maßgebliche Reduzierung der notwendigen Spülzeiten ergibt sich vor allem für prozessnahe Bereiche. Eine Vergrößerung des **Schleppgasvolumenstroms** führt zu einer Erhöhung der Gesamtverdrängungswirkung, wobei der positive Einfluss durch verstärkte Interaktionen zunehmend kompensiert wird. Für eine signifikante Reduzierung der Spülzeiten ist die alleinige Steigerung des Schleppgasvolumenstroms nicht zielführend. Abbildung 6.33 veranschaulicht den Sachverhalt exemplarisch an einer Spülposition im prozessvorlaufenden Bereich einer Schleppgasdüse.

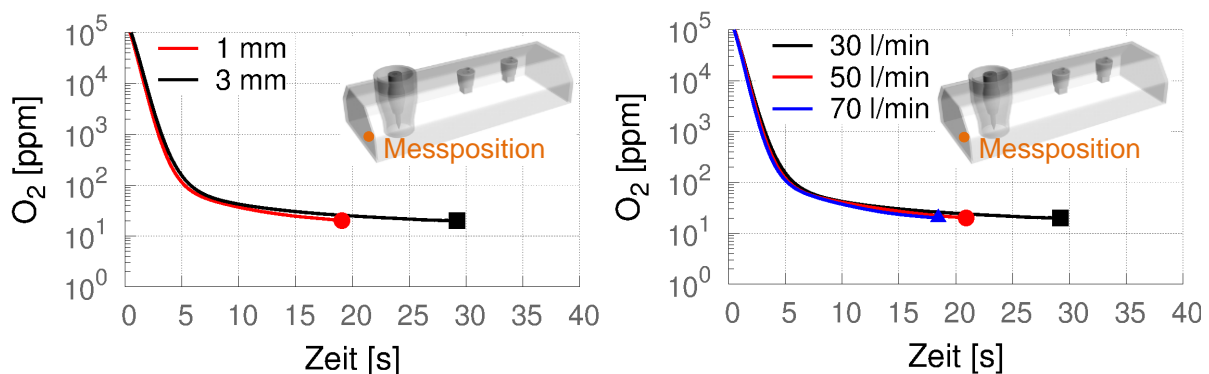


Abbildung 6.33: Spülzeiten einer Schleppgasdüse mit Schalldämpfern (Typ A) an der angegebenen Messposition in Abhängigkeit des Abstandes (links) und des Schleppgasvolumenstroms (rechts)

Die notwendigen Spülzeiten sind signifikant von der **konstruktiven Gestaltung** der Schleppgasdüse abhängig. Als maßgeblicher Einflussfaktor muss zum einen das zu spülende Volumen angesehen werden, wobei mit zunehmenden Volumen deutlich erhöhte Spülzeiten resultieren. Für eine Reduzierung von Spülzeiten ist bei der Konstruktion von Schleppgasdüsen eine Minimierung des Baumraums anzustreben. Als zweiter maßgeblicher Einflussfaktor sind konstruktiv bedingte Strömungstoträume zu sehen. Strömungstoträume sind

durch stark verringerte konvektive Massenströme gekennzeichnet. Das Ausspülen von Atmosphärgasen wird durch Diffusionseffekte dominiert. Für Schleppgasdüsen charakteristische Toträume ergeben sich zum einen durch die Integration des Brenners in die Schleppgasdüse (prozessvorlaufende Bereiche) und zum anderen am Düsenende. Abbildung 6.34 veranschaulicht exemplarisch das Strömungsfeld sowie die konstruktiv bedingten Strömungstoträume einer Schleppgasdüse mit zwei Schalldämpfern. Während der Einfluss des Strömungstotraumes am Ende der Schleppgasdüse auf die notwendigen Spülzeiten vernachlässigt werden kann, resultiert der Totraum vor dem Schweißbrenner in signifikant erhöhten Spülzeiten. Der absolute Einfluss von Strömungstoträumen nimmt bei Verwendung von Strömungsgleichrichtern mit zunehmender Druckdifferenz ab.

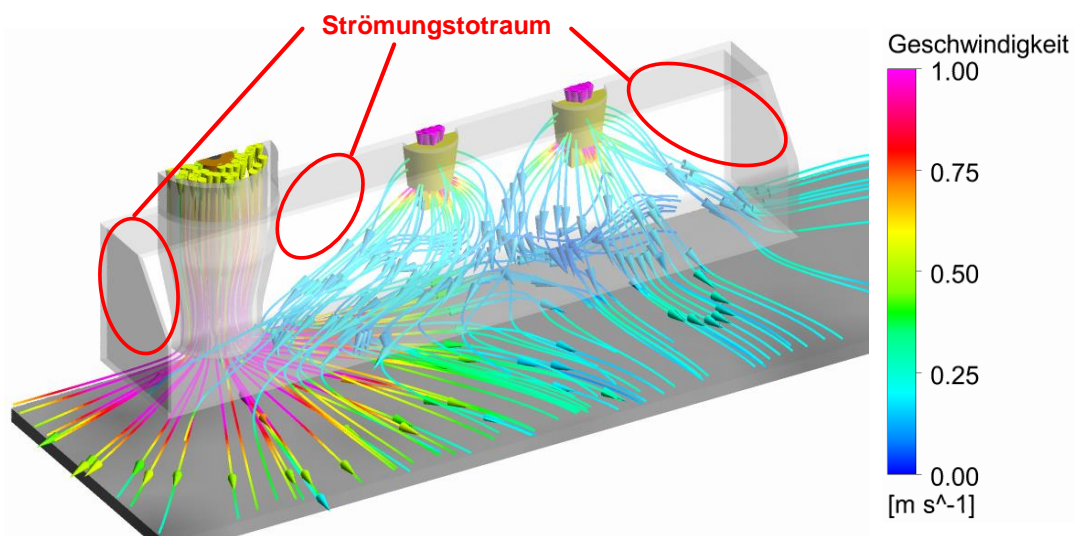


Abbildung 6.34: Strömungslinien beim Spülvorgang einer Schleppgasdüse mit Schalldämpfern (Typ A) ($N_{SD} = 2$ | $a = 3$ mm | $PG = 10$ l/min | $SG = 30$ l/min)

Abbildung 6.35 veranschaulicht die resultierende Spülzeit vor dem Schweißbrenner bei Verwendung der Referenzgeometrie (schwarz) und einer Schleppgasdüse ohne prozessvorlaufenden Strömungstotraum (rot). Bei den gegebenen geometrischen Abmessungen der Düse konnte durch die Eliminierung des Strömungstotraums eine Reduzierung der Spülzeit um ca. 75% erreicht werden. Die Umsetzung kann durch Integration eines Verdrängungskörpers oder durch Anpassen der Außenkontur der Schleppgasdüse erfolgen.

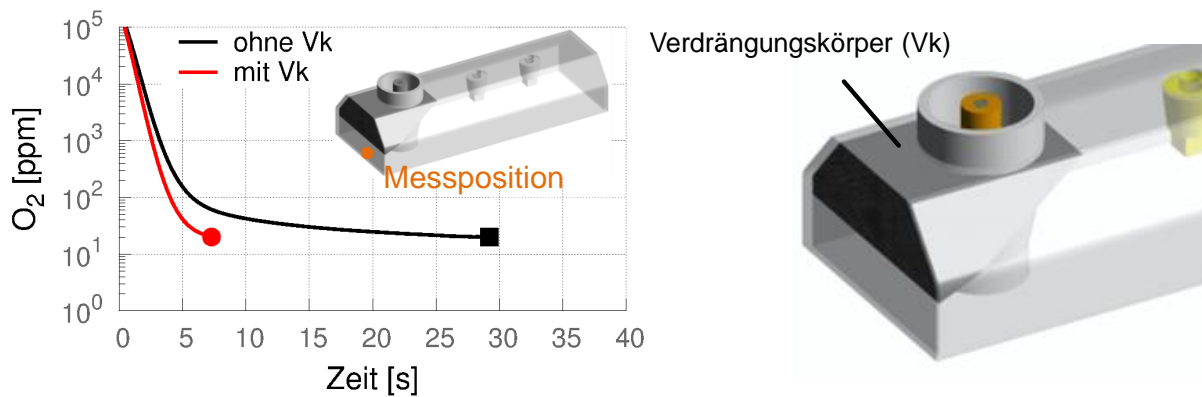


Abbildung 6.35: Spülzeiten von Schleppgasdüsen mit Schalldämpfern (Typ A) an der angegebenen Messposition mit und ohne Verdrängungskörper ($N_{SD} = 2$ | $a = 3$ mm | $PG = 10$ l/min | $SG = 30$ l/min)

Wie in Kapitel 6.5.2 diskutiert, resultieren Undichtigkeiten zwischen Strömungsgleichrichtern mit hoher Druckdifferenz und der Schleppgasdüsenwand in erhöhten konvektiven Massenströmen des Schleppgases im Bereich der Leckagen. Der Effekt kann bei Verwendung von Strömungsgleichrichtern mit geringer Druckdifferenz zur Reduzierung von Spülzeiten ausgenutzt werden. Durch einen definierten Spalt zwischen Schweißbrenner und Strömungsgleichrichter kann eine definierte Austrittsmöglichkeit des Schleppgases geschaffen werden. Eine ausreichend gute Schleppgasabdeckung in prozessnachlaufenden Bereichen wird durch die Porosität und / oder Wandstärke des Strömungsgleichrichters auch im hinteren Teil der Düse gewährleistet. Als Nachteil ergeben sich reduzierte Arbeitsabstände. Bei zu großer Druckdifferenz über den Strömungsgleichrichter entweicht der Großteil des Schleppvolumenstroms über den Spalt, was sich negativ auf die resultierende Gasabdeckung auswirkt (siehe Kapitel 6.5.2). Der Ansatz wird für die industrielle Anwendung nicht empfohlen.

6.6.2 Prozessvorlaufende Bereiche

Als maßgebliche Nachteile von prozessvorlaufenden Bereichen ergeben sich, neben stark erhöhten Spülzeiten und der verschlechterten Zugänglichkeit, maßgebliche Probleme bei der Zuführung von Zusatzwerkstoff. Eine Reduzierung oder Vermeidung entsprechender Schleppgasdüsenbereiche ist folglich von essentieller Bedeutung. Abbildung 6.36 veranschaulicht gemessene Sauerstoffkonzentrationen einer Schleppgasdüse mit (oben) und ohne prozessvorlaufenden Bereich (unten). Eine Reduzierung von prozessvorlaufenden Berei-

chen ist möglich und wird als zielführend zur Kompensation der beschriebenen Nachteile angesehen. Zu beachten ist, dass die Stärke des Ansaugeffektes des Lichtbogens und die daraus resultierende Kontamination der Schlepplgasdüse maßgeblich vom Abstand zur Lichtbogenachse abhängig sind. Mit zunehmender Reduzierung von prozessnahen Bereichen ist das Vermeiden von strömungstechnisch kritischen Geometrielementen (z.B. Düsennecken) von essentieller Bedeutung. Bei zu starker Reduzierung entstehen hohe Konzentrationsgradienten in unmittelbarer Nähe der heißen Schweißnaht, was zu verstärkten Diffusionsmassenströmen von Atmosphärgasen in die Schlepplgasdüse führt. Der beschriebene Sachverhalt wird besonders bei großen Abständen zwischen der Schlepplgasdüse und dem Werkstück sowie bei hohen Streckenenergien als kritisch angesehen.

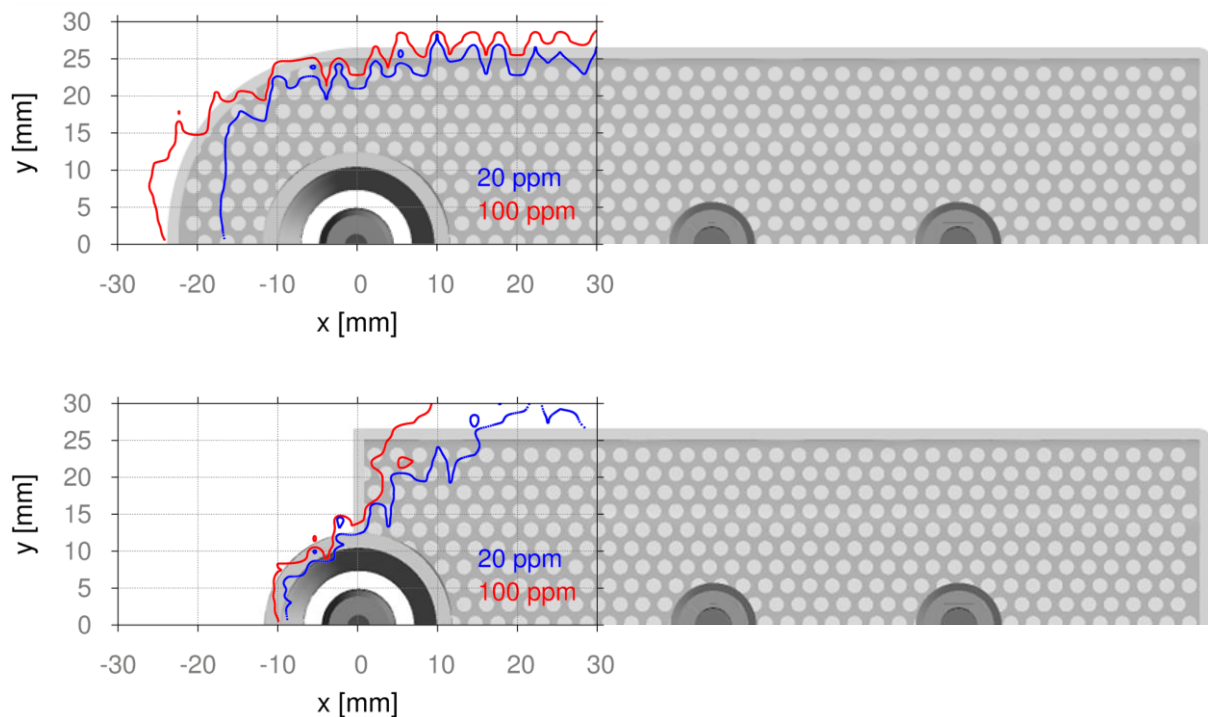


Abbildung 6.36: Gemessene Isolinien für 20 und 100 ppm Sauerstoff bei Verwendung einer Schlepplgasdüse mit verrundeten (oben) sowie stark reduzierten prozessvorlaufenden Bereich (unten), Schalldämpfern (Typ A) und einem Strömungsgleichrichter mit geringer Druckdifferenz ($N_{SD} = 2$ | $a = 11$ mm | $PG = 10$ l/min | $SG = 30$ l/min)

6.6.3 Modularisierbarkeit

Die Länge von Schleppegasdüsen ist abhängig von der eingebrachten Streckenenergie, dem Grundwerkstoff sowie den Auflagebedingungen des Bauteils. Zur Realisierung von metallisch blanken Schweißnähten sind bei unterschiedlichen Schweißaufgaben z.T. stark unterschiedliche Schleppegasdüsenlängen notwendig. Eine zunehmende Länge der Schleppegasdüse korreliert mit einer vergrößerten Verdrängungsfläche, woraus ein erhöhter Bedarf an Schleppegas resultiert. Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des Prozesses sind Schleppegasdüsen folglich nur so lang wie nötig zu konzipieren. Basierend auf den Ergebnissen aus Kapitel 6.3 und 6.5 wird eine modulare Bauweise, bestehend aus einem Schweiß- (Modul mit Schweißprozess) und einer beliebigen Anzahl von Verlängerungsmodulen (Module ohne Schweißprozess) empfohlen. Die Verbindung der einzelnen Module kann über kraftschlüssige Verbindungen realisiert werden. Luftspalte zwischen den Modulen sind zu vermeiden. Abbildung 6.37 veranschaulicht exemplarisch das Prinzip.

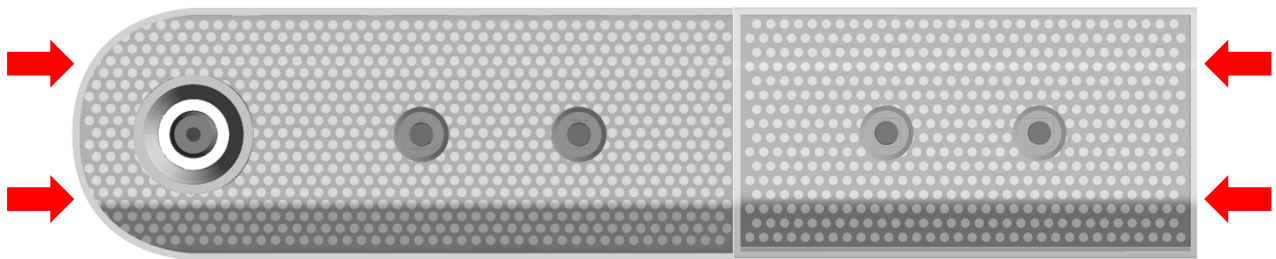


Abbildung 6.37: Prinzipielle Darstellung der Modulbauweise von Schleppegasdüsen – links: Schweißmodul; rechts: Verlängerungsmodul; rot: Spannkräfte

Das beschriebene Konzept erlaubt eine einfache Längenskalierung von Schleppegasdüsen, womit das Anwendungsspektrum erheblich erweitert werden kann. Abbildung 6.38 veranschaulicht die Nahtoberfläche einer I-Naht im Stumpfstoß, 50 mm nach dem Prozessmodul. Bei unzureichender Düsenlänge ergibt sich eine maßgebliche Oxidation der Schweißnaht, was durch zusätzliche Verwendung eines Verlängerungsmoduls kompensiert werden kann.

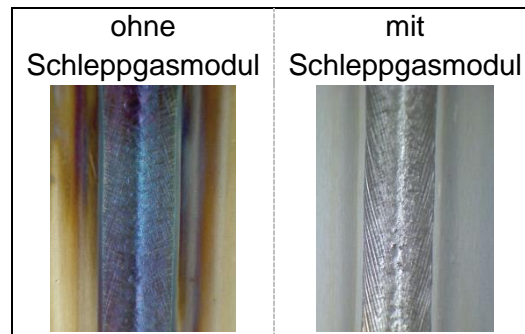


Abbildung 6.38: Nahtoberfläche einer Verbindungsschweißung (Randbedingungen entsprechend Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2) 50 mm nach den Schweißmodul ohne (links) und mit (rechts) Verwendung eines Verlängerungsmoduls ($N_{SD} = 2 \times 2$ | $a = 3 \text{ mm}$ | $PG = 10 \text{ l/min}$ | $SG_{\text{gesamt}} = 30 \text{ l/min}$)

6.7 Vorzugsvariante und Praxisbeispiel

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen wird der Einsatz von Schleppgasdüsen mit integriertem Schweißbrenner, Schalldämpfern und einem Strömungsgleichrichter mit einer geringen Druckdifferenz empfohlen.

Durch die **Integration des Schweißbrenners in die Schleppgasdüse** können Luftspalte ausgeschlossen und damit Ansaugeffekte vermieden werden. Die Interaktionen der Gasströmungen finden unter Ausschluss von Atmosphäregasen statt, was zu einer maßgeblich verringerten Gefahr von Einwirbelungen und Diffusionseffekten führt.

Durch die **Anwendung von Schalldämpfern** kann eine sehr gute und reproduzierbare Einströmbedingung geschaffen werden, welche zu einer hinreichend guten Verteilung des Schleppgases in der Düse führt.

Die aus dem Einsatz der Schalldämpfer resultierenden Interaktionen mit der Lichtbogenströmung können durch die zusätzliche Anwendung eines **Strömungsgleichrichters mit einer geringen Druckdifferenz** (z.B. Lochblech) signifikant reduziert werden. Aufgrund des geringen Druckverlustes ist eine zusätzliche Abdichtung zwischen dem Gleichrichter und der Schleppgasdüse nicht notwendig, womit eine einfache Auswechselbarkeit der Funktionselemente gewährleistet wird. Der Strömungsgleichrichter bietet gleichzeitig einen Verschmutzungsschutz für die eingesetzten Sinterkörper. Durch die Anwendung des Konstruktionsprinzips können qualitativ hochwertigen Gasabdeckungen, eine sehr gute Zugänglichkeit sowie eine gesteigerte Übertragbarkeit von Schleppgasdüsen auf unterschiedliche Anwendungen erreicht werden. Für KMU ergeben sich als maßgebliche Vorteile zudem die mögliche Ver-

wendung von kommerziell verfügbaren Funktionselementen sowie ein einfacher und robuster Aufbau der Düsen.

Eine industrielle Umsetzung dieses Konstruktionsprinzips erfolgte auf Grundlage der in den PbA-Sitzungen vorgestellten Ergebnisse durch Kjellberg Finsterwalde für den Hochleistungs-WIG-Prozess InFocus. Durch die Anwendung dieses kathodenfokussierten WIG-Schweißprozesses können Schweißungen mit hohen Schweißgeschwindigkeiten realisiert werden, was zu einer maßgeblichen Verlängerung der zu schützenden Werkstückoberfläche führt. Eine modulare Längenskalierung ist folglich aus technologischer sowie wirtschaftlicher Sicht zielführend, um oxidationsfreie Schweißnähe für den gesamten Anwendungsbereich des Schweißbrenners zu realisieren. Des Weiteren ist insbesondere bei hohen Prozessgeschwindigkeiten die Möglichkeit einer Brenneranstellung vorteilhaft, um entweder den Einbrand sicherzustellen oder die Entstehung von Randkerben zu vermeiden.

Ausgehend von diesen Anforderungen wurde auf Basis der Projektergebnisse eine Schleppgasdüse entwickelt, welche sich sowohl durch einen modularen Aufbau bzw. eine modulare Längenskalierung als auch durch ein Gelenk zum Anpassen der Brennerneigung auszeichnet. Abbildung 6.39 veranschaulicht den Aufbau der entwickelten Schleppgasdüse.

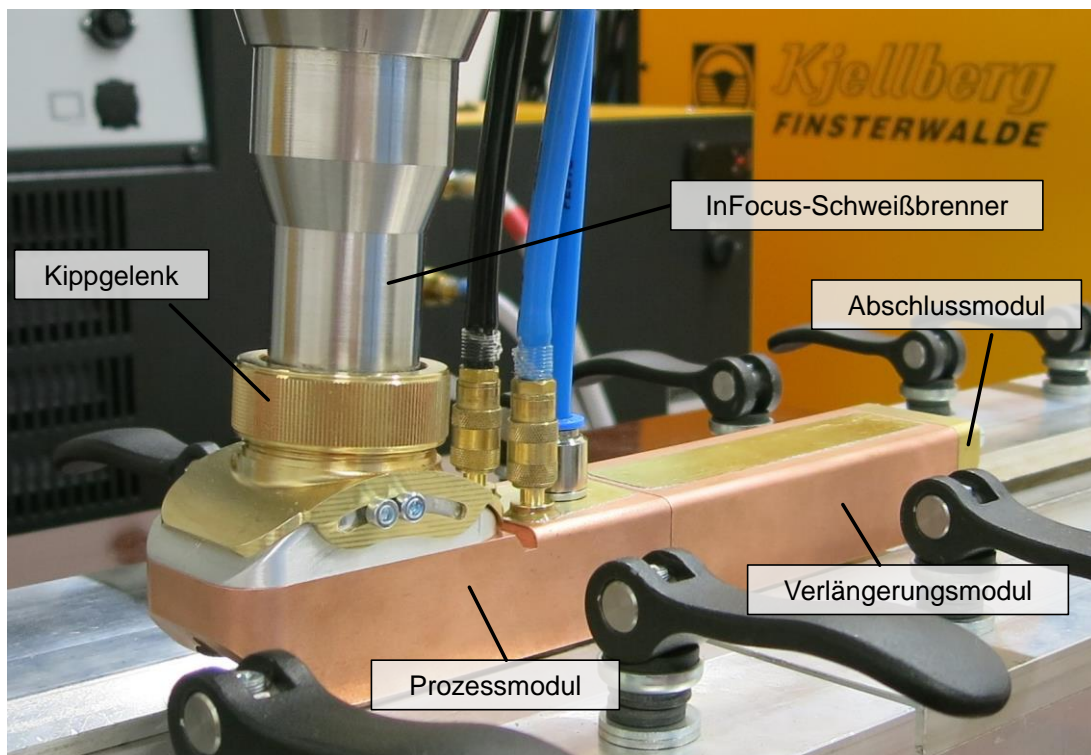


Abbildung 6.39: Schleppgasdüse des InFocus-Schweißbrenners auf Basis der im Projekt erarbeiteten Vorzugsvariante

Der modulare Aufbau ist durch ein Prozessmodul, Verlängerungsmodule und ein Abschlussmodul gekennzeichnet. Das Prozessmodul beinhaltet ein Kippgelenk, durch das eine Brenneranstellung im Bereich von $\pm 10^\circ$ realisiert werden kann. Der Kontamination mit Atmosphärgasen wird im Bereich des Gelenkes durch die Verwendung von Zylinderschalensegmenten entgegengewirkt. Außerdem werden alle Medien (Schleppgas und Kühlwasser) in das Prozessmodul eingeleitet und durch kraftschlüssige Schnittstellen zwischen den Modulen, ohne zusätzlich notwendige Anschlüsse, übergeben. Das Abschlussmodul dient zum Schließen des Kühlkreislaufes. Zwischen dem Prozessmodul und dem Abschlussmodul können verschiedene gerade oder gekrümmte Verlängerungsmodule implementiert werden. Bei Verwendung von Verlängerungsmodulen muss durch den Anwender lediglich die Schleppgasmenge erhöht werden. Die Schleppgasdüse ist so aufgebaut, dass auch Zusatzwerkstoff eingebracht werden kann.

7 Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse für KMU

7.1 Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse

Die Ergebnisse des Projekts stellen einen neuartigen und innovativen Ansatz für die gezielte Auswahl, Weiterentwicklung und Anwendung von Schleppegasdüsen dar. Durch die Kombination von numerischen und experimentellen Analysemethoden konnten Ursache-Wirkungszusammenhänge aufgezeigt und das Prozessverständnis beim Einsatz von Schleppegasdüsen maßgeblich erhöht werden.

Wichtige Voraussetzung hierfür war eine Separierung von konstruktions- und prozessbedingten Einflussfaktoren, welche sich direkt oder indirekt auf die Qualität der Gasabdeckung auswirken. Im Rahmen der Untersuchungen konnten sowohl eindeutige Rückschlüsse zwischen der konstruktiven Ausführung der Schleppegasdüse und der resultierenden Qualität der Gasabdeckung als auch sensitive Prozessparameter aufgezeigt werden. Wesentlich für die Identifizierung der komplexen Wirkungszusammenhänge im System Schweißbrenner-Schleppegasdüse ist das numerische Simulationsmodell. Durch die Anwendung konnten turbulente Strömungsstrukturen und Diffusionsprozesse visualisiert und quantifiziert werden, welche die Verdrängungswirkung an der Düsenkante und damit die Qualität der Gasabdeckung reduzieren. Die durch das numerische Modell erarbeiteten Ergebnisse bildeten die Basis für die Formulierung verallgemeinerter, konstruktiver Gestaltungsempfehlungen von Schleppegasdüsen.

Auf Grundlage der durchgeführten Sensitivanalysen konnte das Verhalten von primärer und sekundärer Gasströmung in Abhängigkeit der konstruktiven Ausführung der Schleppegasdüse eindeutig auf die zugrundeliegenden Wirkzusammenhänge zurückgeführt werden. Die Ergebnisse tragen so zu einem maßgeblich erhöhten Prozessverständnis bei, was Anwender unmittelbar für eine verbesserte Auslegung, eine effiziente Anpassung bestehender Konstruktionen bzw. eine zielgerichtete Auswahl aus kommerziell verfügbaren Schleppegasdüsen ermöglicht.

7.2 Industrielle Anwendung der Forschungsergebnisse

Hochlegierte Stähle aber auch Leichtmetalle, Titan oder Nickelbasislegierungen sind wichtige Werkstoffe in der metallverarbeitenden Industrie und werden auf Grund ihrer spezifischen Vorteile immer häufiger eingesetzt. Aufgrund der geringen Investitionskosten und der hohen Verfügbarkeit sind Schutzgasschweißverfahren besonders in KMU existenzielle Fertigungsverfahren zum stoffschlüssigen Fügen von schutzgassensiblen Werkstoffen. Voraussetzung

für die Anwendung dieser Verfahren an den genannten Werkstoffen ist eine hochwertige Schutzgasabdeckung sowie das Bereitstellen einer entsprechenden Schleppgasdüsentech-
nologie. Folglich ist die Stärkung der Kompetenz von KMU hinsichtlich der Gestaltung von
Schleppgasdüsen mit besserer Schleppgasabdeckung, geringerem Gasverbrauch und einer
verbesserten Zugänglichkeit ein wesentlicher Beitrag zur Erhöhung der Konkurrenzfähigkeit.

Die Anwender werden durch die Ergebnisse in die Lage versetzt, Schleppgasdüsen zielge-
richtet und mit reduziertem Aufwand selbst zu entwickeln bzw. aus dem Portfolio kommerzi-
eller Anbieter auszuwählen. Hierzu ist die Kenntnis von Ursache-Wirkungs-
Zusammenhängen und sensitiven Einflussgrößen notwendig, welche durch das Vorhaben
deutlich gesteigert werden konnte. Der Nutzen für KMU betrifft zum einen die Bewertung von
kommerziellen Schleppgasdüsen-Systemen sowie eine objektive und sichere Auswahl ent-
sprechend der zugrundeliegenden Randbedingungen. Zum anderen wird die Konstruktion
und Auslegung von Schleppgasdüsen durch konkrete Konstruktionsempfehlungen unter-
stützt. Basierend auf den erarbeiteten Ergebnissen wurden sowohl zielführende als auch
nicht zielführende Konstruktionsprinzipien benannt, womit eine maßgebliche Reduzierung
der geometrischen Vielfalt von Schleppgasdüsen erreicht werden konnte. Auf Grundlage von
Sensitivuntersuchungen konnten Einflussgrößen identifiziert, zielführend anzuwendende
Funktionselemente definiert sowie eindeutige und allgemeingültige Konstruktionsempfehlun-
gen abgeleitet werden. Basierend auf den erarbeiteten Ergebnissen werden Unternehmen in
die Lage versetzt, Schwachstellen und Defizite ihrer bisherigen Schleppgasdüsen zu erken-
nen und Möglichkeiten zu deren Weiterentwicklung zu identifizieren. Vorhandene Lösungen
können so zielgerichtet überarbeitet und neue, zusätzlich benötigte Schleppgasdüsen-Systeme
schneller und leistungsfähiger ausgelegt werden.

Basierend auf den durchgeführten Schwachstellenanalysen konnte eine KMU-gerechte Vor-
zugsvariante abgeleitet werden, welche neben einer qualitativ hochwertigen Gasabdeckung
auch eine sehr gute Zugänglichkeit, einen geringen Gasverbrauch sowie marginale Spülzei-
ten gewährleistet. Durch die Verwendung von kommerziell verfügbaren Sintermetallschall-
dämpfern kann der konstruktions- und fertigungsbedingte Einfluss von Leckagen auf die
Qualität der Gasabdeckung maßgeblich reduziert werden, was eine robuste und allgemein-
gültige Anwendung der Schleppgasdüsen gewährleistet. Für die Anwender der Technologie
ergibt sich zudem ein maßgeblicher Vorteil durch eine mögliche Übertragung von Schlepp-
gasdüsen auf verschiedene fúgetechnische Anwendungen.

Der bisher notwendige Personal- und Entwicklungsaufwand während der Einrichtung neuer
Fertigungslinien kann auf Grund der erarbeiteten Konstruktionsempfehlungen und Anleitun-

gen für den praktischen Einsatz von Schleppegasdüsen erheblich reduziert werden. Dies führt zum schnelleren Anlaufen der Fertigung und geringerer Ausschussproduktion. Das Einsparen von Werkstoff, Chemikalien, Gas, Energie und Zeit führt zudem nicht nur zu einer Reduzierung der Entwicklungs- und Fertigungskosten und damit zu einem Marktvorteil für die KMU, sondern verbessert auch die Ökobilanz und damit den Marktwert des Produktes. Das Vorhaben leistet damit einen unmittelbaren Beitrag, die Wettbewerbsfähigkeit von KMU maßgeblich zu erhöhen.

8 Erläuterung zur Kostenaufteilung

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

8.1 Erläuterungen zum Personaleinsatz

Der wissenschaftliche Mitarbeiter übernahm die Planung und Inbetriebnahme der Versuchsstände sowie die Koordination, Vorbereitung und Überwachung der experimentellen Untersuchungen. Weiterhin erfolgte durch ihn die Entwicklung, Überprüfung und Anwendung der numerischen Simulation sowie der numerischen Auslegung von Vorzugsvarianten. Die Untersuchungen wurden vom wissenschaftlichen Mitarbeiter ausgewertet, die Ergebnisse zusammengeführt und federführend die Zwischen- und Abschlussberichte angefertigt.

- Summe Personalmonate wiss.-techn. Personal (A.1): 24

Der technische Mitarbeiter unterstützte den wissenschaftlichen Mitarbeiter sowohl beim Aufbau der Versuchsstände als auch bei der Durchführung aller experimentellen Untersuchungen und übernahm die Fertigung aller Bauteile. Unter Anleitung des wissenschaftlichen Mitarbeiters führte er den überwiegenden Teil der experimentellen Untersuchungen aus. Dies umfasste Schlierenaufnahmen, Messungen der Sauerstoffkonzentration und die Anfertigung von Schweißproben. Durch ihn erfolgten die umfassende Dokumentation dieser Versuche und die diskussionsgerechte Aufbereitung der Ergebnisse.

Die studentischen Hilfskräfte unterstützten die Arbeit des technischen Mitarbeiters hinsichtlich der Fertigung von Baugruppen und Einzelteilen. Des Weiteren übernahmen sie Hilfstätigkeiten bei der Aufbereitung und Dokumentation der experimentellen Ergebnisse.

8.2 Erläuterungen zu Geräteanschaffung

Es wurden keine Geräte beschafft.

8.3 Erläuterungen zu Ausgaben für Leistungen Dritter

Zur Anschaffung der notwendigen Lizenzen für die Simulationssoftware ANSYS CFX an der TU Dresden wurden 14 400 € aufgewendet.

9 Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen

Im Rahmen dieses Projektes wurden in den Jahren 2012-2014 vier PbA-Sitzungen durchgeführt. Die aktuellen Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden weiterhin im Rahmen der Fachausschusssitzung 3 der Forschungsvereinigung Schweißen und Schneiden präsentiert und diskutiert. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse des Forschungsprojektes im Rahmen von Vorträgen auf verschiedenen nationalen und internationalen Tagungen und Kongressen vorgestellt. In Form von Workshops für KMU wurden die Ergebnisse ausführlich dargelegt und anwendungsorientiert diskutiert. Ein Überblick über die konkreten Transfermaßnahmen wird in Tabelle 12.1 gegeben.

Tabelle 9.1: Transfermaßnahmen im Bearbeitungszeitraum

	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Maßnahme A Projektbegleitender Ausschuss	Diskussion der Forschungsergebnisse im PbA	4 PbA-Sitzungen (A1-A4) A1: Projektvorstellung und Diskussion des Arbeitsplans A2+A3: Zwischenergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens A4: Abschlusspräsentation	A1: 01.04.2014 (Dresden) A2: 14.10.2014 (Dresden) A3: 28.04.2015 (Dresden) A4: 21.10.2015 (Dresden)
Maßnahme B Transfer der Projektergebnisse über den DVS-Fach-ausschuss FA3 bzw. die Arbeitsgruppen V2.3 / V2.4	Information über das laufende Forschungsprojekt	B1: Vorstellung der erzielten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens	B1: 26.03.2014 (Aachen) B1: 25.09.2014 (Halle) B1: 25.03.2015 (Duisburg) B1: 14.10.2015 (Ilmenau)
Maßnahme C Fachvorträge und Poster auf Konferenzen	Information interessierter Firmen	C1: GST C2: IIW Assembly	C1: Vortrag am 17.09.2015 (Nürnberg) C2: Vortrag Vortrag am 01.07.2015 (Helsinki)

Maßnahme D Messeausstellungen	Direkte Ansprache interessierter Unternehmen (PbA, Unterstützung)		Workshop Kjellberg Finsterwalde am 11.11.2015 und 10.12.2015 (Dresden)
Maßnahme E Veröffentlichungen	Interesse an der Technologie wecken und über neue Möglichkeiten aufklären.	E1: Fachzeitschrift „Schweißen und Schneiden“ E2: Internetseite der FST	E1: Veröffentlichung "Schweißen und Schneiden" (geplant 2016) E2: ab 05/2016
Maßnahme F Aus- und Weiterbildung	Ausbildung und Qualifizierung von Studierenden	F1: Integration in die Vorlesung „Schweißverfahren“ F2: Integration in Aufbaustudium zum Schweißfachingenieur (mit der SLV Halle)	F1: ab WS 2016 an der TU Dresden F2: Vortrag: Weiterbildung für Schweißfachingenieure und Schweißfachmänner 02.06.2015
Maßnahme G Berichterstattung	Information interessierter Firmen	G1: Zwischenbericht G2: Abschlussbericht	G1: 27.02.2015 Zwischenbericht G2: 08.04.2016 Abschlussbericht

Ziel	Form	Datum / Zeitraum
Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft	Veröffentlichung - Zeitschrift „Schweißen und Schneiden“ (angenommen 05/2014)	2016 (vorauss. 09/16)
	DVS-Merkblatt	2016
	Vortrag - IIW Tagung 2016 in Melbourne	07/2016

Übersicht über die Veröffentlichungen:

S. Jäckel, S. Rose, U. Füssel: Schleppegasdüsen - Bewertung industriell eingesetzter Varianten und Entwicklung neuartiger, numerisch und experimentell optimierter Konzepte. DVS-Berichte Bd. 315, Große Schweißtechnische Tagung 2015, S. 701-707

S. Jäckel, M. Hertel, S. Rose, U. Füssel: Evaluation and comparison of gas trailing shield concepts using diagnostic and numerical methods. 68th Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding Commission XII – Arc Welding Processes and Production Systems, Helsinki, 2015

S. Rose, S. Jäckel, U. Füssel: Optimale Gestaltung von Schleppegasdüsen zum Schweißen. SLV Halle, Weiterbildung für Schweissfachingenieure und Schweissfachmänner, 02.06.2015

geplante Veröffentlichungen

S. Jäckel, M. Hertel, U. Füssel: Qualifizierung und Weiterentwicklung von Schleppegasdüsen. Schweißen und Schneiden (Voraussichtlich 3. Quartal 2016)

S. Jäckel, M. Hertel, U. Füssel: Improving the shielding gas coverage of gas trailing shields using numerical methods. 69th Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding Commission XII – Arc Welding Processes and Production Systems, Melbourne, 2016

Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Mit den genannten Transfermaßnahmen wurde und wird weiterhin sichergestellt, dass die im Rahmen des Forschungsvorhabens erzielten Ergebnisse in vollem Umfang der Wirtschaft und allen Anwendern durch Veröffentlichungen sowie Vorträge diskriminierungsfrei zur Verfügung stehen. Durch die Erarbeitung eines Merkblattes zum Thema Schleppegasdüsen in der Arbeitsgruppe V 2.3 „Lichtbogenschweißen mit nichtabschmelzender Elektrode“ des DVS wird der Ergebnistransfer insbesondere zu KMU sichergestellt. Die Forschungsstelle ist als Ansprechpartner auch nach Projektabschluss verfügbar.

10 Projektbegleitender Ausschuss

Schnelldorfer Maschinenbau GmbH
Herr Dr. F. Daus
Kappelweg 6
91625 Schnelldorf

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

Alexander Binzel Schweisstechnik GmbH
Herr H. Metzger
Kiesacker
35418 Buseck

Endress+Hauser Flowtec AG
Herr T. Undi
Kaegenstrasse 7
CH-4153 Reinach BL | Switzerland

Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH
Herr Dr. W. Scheller
Otto-Hahn-Ring 6
81739 München

Linde AG
Herr Dr. E. Siewert
Carl-von-Linde-Strasse 25
85716 Unterschleissheim

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

IMAWIS GmbH
Herr M. Neumann
Industriestraße 8
18069 Rostock

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

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

EWM Hightec Welding GmbH
Herr A. Burt
Dr.-Günter-Henle-Str. 8
56271 Mündersbach

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

INOCON Technologie GmbH
Herr C. Höniges
Wiener Straße 3
4800 Attnang-Puchheim

Lorch Schweißtechnik GmbH
Herr Dr. B. Jaeschke
Im Anwänder 24
71549 Auenwald

MTU Aero Engines AG München
Herr P. Alexandr
Dachauer Str. 665
80995 München

Bautz Gesellschaft mbH
Frau C. Bautz
Amboßweg 15
38229 Salzgitter

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

- [AGA1996] AGA Gas GmbH: facts about: Der richtige Gasschutz. Schriftenreihe Wissenswertes für den Praktiker, 1996
- [AiF15.774] Füssel, U.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zur gezielten Beeinflussung des Lichtbogens und des Schweissbades beim Schutzgasschweißen durch die Schutzgaseigenschaften und die Schutzgaszusammensetzung. Abschlussbericht AiF 15.774 B, Technische Universität Dresden, Laufzeit: 01.09.2008-31.08.2010, Dresden, 2010
- [AiF15.871] Füssel, U.: Strömungstechnische Auslegung von Brennersystemen zum wirtschaftlichen und emissionsreduzierten Lichtbogenschweißen. Abschlussbericht Teilprojekt A3 im Rahmen des DFG/AiF Forschungsclusters „Lichtbogenschweißen - Physik und Werkzeug“, Technische Universität Dresden, Laufzeit: 01.11.2008-31.12.2011, Dresden, 2012
- [AiF13.143] Dilger, K.; Vogt, M.: Mechanisiertes MIG-Schweißen von Magnesiumlegierungen. Abschlussbericht AiF 13.143N, Braunschweig, 2004
- [Amm2010] Ammann, T.: Formieren beim Schweißen. Facts about, Publikation von Linde Gas 2010
- [Amm2004] Amman, T.: Schutzgasschweißen und Formieren von hochlegierten Werkstoffen. ERL Fachtagung, 03.03.2004
- [Ani1987] Anik, S.; Dorn, L.: Metallphysikalische Vorgänge beim Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen - Werkstoffliche Grundlagen. Schweißen und Schneiden, 39(1987), Heft 12, ISSN 0036-7184, Düsseldorf, 1987
- [AWS18.2] AWS D18.2:1999: Guide to Weld Discoloration Levels on Inside of Austenitic Stainless Steel Tube. American Welding Society, Miami, 1999
- [Bau1999] 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.
- [Bin2012] Alexander Binzel Schweisstechnik GmbH & Co. KG: „MIG/MAG-Katalog / Ersatzteilliste 2.0/V1“, <http://www.binzel.de>, Zugriff: 02.08.2012
- [Böh1990] Böhme, D.: Gezielte Beeinflussung des Lichtbogenschweißprozesses in der Fertigung. DVS-Berichte Band 127, DVS-Verlag, Düsseldorf, 1990

- [Bru2005] Brune, E.: Titan-Schweisstechnik - Schweisstechnische Verarbeitung von Titanwerkstoffen. Linde Gas, PanGas Sonderdruck, Luzern, 2005
- [BSSA2012] British Stainless Steel Association, www.bssa.org.uk, Zugriff: 14.08.2012
- [Dän2010] Dänner Industrie Services: ARGWELD® Formier Schleppschuhe, Langerwehe, 2010
- [DIB2009] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Z-30.3-6. Erzeugnisse, Bauteile und Verbindungen aus nichtrostenden Stählen. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, 2009
- [DIN12502] DIN EN 12502-4:2004: Korrosionsschutz metallischer Werkstoffe – Hinweise zur Abschätzung der Korrosionswahrscheinlichkeit in Wasserverteilungs- und -speichersystemen – Teil 4: Einflussfaktoren für nichtrostende Stähle. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2004
- [DIN14175] DIN EN ISO 14175:2008-06: Schweißzusätze - Gase und Mischgase für das Lichtbogenschweißen und verwandte Prozesse. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008
- [Dil2005] Dillthey, U.: „Schweißtechnische Fertigungsverfahren - Band 2 - Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen“, 3. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 3-540-21674-X, Berlin, 2005
- [Dil2006] Dillthey, U.: „Schweißtechnische Fertigungsverfahren - Band 1 - Schweiß- und Schneidtechnologien“, 3. Auflage, Springer Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 3-540-21673-1, Berlin, 2006
- [Din2012] Dinse GmbH: „BLACKline Handschweißsysteme“, <http://www.dinse-gmbh.com>, Zugriff: 02.08.2012
- [DKI2009] Deutsches Kupferinstitut: Schweißen von Kupfer und Kupferlegierungen. Informationsdruck i.12, Düsseldorf, 2009
- [Dre2013-1] Dreher, M.; Füssel, U.; Rose, S.; Häßler, M.; Hertel, M.; Schnick, M.: Methods and results concerning the shielding gas flow in GMAW. *Welding in the World* (2013), Volume 57, Issue 3, pp 391-410
- [Dre2013-2] Dreher, M.; Füssel, U.; Rose, S.; Hertel, M.; Schnick, M.: Strömungstechnische Auslegung von Brennersystemen zum wirtschaftlichen und emissionsreduzierten Lichtbogenschweißen: Teil I - Methoden der Strömungsanalyse. *Schweißen und Schneiden* 65 (2012), Band 65, S. 26-33, Düsseldorf, 2012

- [Dre2014] Dreher, M.; „Numerische und diagnostische Untersuchung der Schutzgasströmung beim Metallschutzgasschweißen für die Brenner- und Verfahrensentwicklung“, Dissertation, Dresdner Fügetechnische Berichte, Band 29/2014, ISBN 978-3-944331-90-4, 2014
- [Ebe2007] Ebert, L.: Optimierung der Schweißraucherfassung an Brennerintegrierten Absauganlagen. Abschlussbericht, AiF 14.436BR, Chemnitz, 2007
- [Erl2012] ERL Schweißen und Schneiden: Anwendungstechnische Hinweise. Schweißen von nichtrostenden Stählen, Lichtbogenschweißen von Aluminium, Lichtbogenlöten. Landau, 2012
- [EWM2012] EWM Hightec Welding GmbH: „MIG/MAG Schweißbrenner - MT-Serie“, <http://www.ewm-group.com>, Zugriff: 02.08.2012
- [Fah2008] Fahrenwaldt, H.J.; Schuler, V.: Praxiswissen Schweißtechnik - Werkstoffe und Schweißen. Vieweg und Teubner GWV Fachverlag GmbH, ISBN 978-3-8348-0382-5, 3. Auflage, 2008
- [Fin1999] Finke, M.; Pries, H.; Wohlfahrt, H.: Aufbau und Korrosionsanfälligkeit der Oxidschichten bei CrNi-Stählen. 4. VSA-Symposium, Bad Kissingen, Tagungsband. Industrieverband Schornsteinbau und Abgastechnik e.V. (VSA), Bad Kissingen, 1999
- [Fro2003] Fronius: Fronius wagt sich an heißes Eisen. Weld&Vision, Magazin für Schweißtechnik, 11(2003), Pettenbach, 2003
- [Fue2011] Fuentes Muñoz, J. E.: „Einfluss der Brennergestaltung auf den WIG-Lichtbogen“, Dissertation, Dresdner Fügetechnische Berichte, Band 22/2011, ISBN 978-3-942710-41-1, 2011
- [Füs2005] Füssel, U., Zschetzsche J., Zosel, J. and Guth, U.: "Strömungsmessung in Lichtbogen- und Plasmaprozessen", Stiftung Industrieforschung, Forschungsvorhaben S 559, Abschlussbericht, 2005
- [Goe2005] Goecke, S.-F.: Auswirkungen von Aktivgaszumischungen im vpm-Bereich zu Argon auf das MIG-Impulsschweißen von Aluminium. Dissertation, Technische Universität Berlin, Berlin, 2005
- [GSI2012] Lehrunterlagen zur Ausbildung zum Internationalen Schweißfachingenieur nach Richtlinie IIW®-DVS 1170, Gesellschaft für Schweißtechnik International GmbH, 2012

- [Hen2003] Henkel, G.; Henkel, B.: Hinweise zur Herstellung und Prüfung von Orbital-schweißnähten im sensiblen Edelstahlrohrleitungsbau. Henkel Beiz- und Elektropoliertechnik, Technical Bulletin, Aufsatz-Nr. 46/Rev. 02, Waidhofen, 2003
- [Heu2009] Heubner, U.; Klöwer, J.: Nickelwerkstoffe und hochlegierte Sonderedelstähle - Eigenschaften, Verarbeitung, Anwendungen. Expert-Verlag, 4. Auflage 2009, ISBN 973-38169-2859-1, Renningen, 2009
- [Jüt2000] Jüttner, S.: Untersuchungen zum Schutzgasschweißen von Magnesiumlegierungen für Konstruktionsbauteile im Automobilbau. Dissertation, Shaker Verlag, Aachen, 2000
- [Kop2010] Kopitzke, T.: Anlauffarben und deren Beseitigung. Vortrag Arbeitsgruppe V2.3 des DVS, Finsterwalde, 2010
- [Lan2012] Lang, A.: Diskussion zur Gasschutzproblematik in der Fahrwerksfertigung. BMW Group, Dingolfing, 2012
- [Low1974] J. J. Lowke: Predictions of arc temperature profiles using approximate emission coefficients for radiation losses. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, Band 14, S. 111-122, 1974
- [Mat2008] Matthes, K.-J.: Schweißtechnik. Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen. Hanser Fachbuch, 2008
- [Mur1995] Murphy, A.B.: Transport Coefficients of Air, Argon-Air, Nitrogen-Air, and Oxygen-Air Plasmas. Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 15, No. 2, pp. 279-307, 1995
- [Mur2001] A. B. Murphy: Thermal plasmas in gas mixtures. Journal of Physics D: Applied Physics, Band 34, S. R151-R173, 2001
- [PWT2012] Precision Welding Technologies: <http://www.pwt-online.com/products/prodGSD.htm>, Zugriff 04.09.2012
- [Rad1999] Radaj, D.: Schweißprozesssimulation: Grundlagen und Anwendung. DVS-Verlag, ISBN 3-87155-188-0, Düsseldorf, 2008
- [Rei2007] Reisinger, U.: Einfluss von Gasschläuchen auf die Feuchte-, Wasserstoff und Sauerstoffproblematik in Schutzgasschweißprozessen, AiF-Abschlussbericht 14.426 N, Aachen, 2007

- [Roo2008] Roos, E.; Maile, K.: Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung. 3. Auflage, Springer Verlag Berlin, ISBN 978-3-540-68403-9, Heidelberg, 2008
- [Rug1990] Ruge, J.; Radebold, L.: Einfluss von durch Schweißen erzeugten Oxidfilmen auf die Lochfraßbeständigkeit nichtrostender austenitischer Chrom-Nickel-Stähle in annähernd neutralen Chloridlösungen. BMFT-Abschlußbericht FE-KKs, Vol. 5, Proj.-Nr. B2.6/3, Frankfurt, 1990.
- [Sch1992] Schulze, G.; Krafka, H.; Neumann, P.: Schweißtechnik: Werkstoffe - Konstruieren - Prüfen, VDI-Verlag GmbH, ISBN 3-18-401007-4, Düsseldorf, 1992
- [Sch2010] Schulze, G.: Die Metallurgie des Schweißens. Eisenwerkstoffe - nichteisenmetallische Werkstoffe. Springer Verlag, ISBN 973-3-642-03182-3, Berlin, 2010
- [Schn2010] Schnick, M., "Numerische und experimentelle Verfahrens- und Brennerentwicklung beim Plasmalichtbogenschweißen", Dissertation, Technische Universität Dresden, Verlag der Wissenschaften GmbH, ISBN 978-3-942710-16-9, Dresden, 2010
- [Schu2012] Schuster, H.; Schnick, M.; Lohse, M.; Füssel, U.: InFocus - Stichlochschiweißen mit kathodenfokussiertem Lichtbogen. Tagungsband Dresdener Füge-technisches Kolloquium 2012, Dresden, 2012
- [Ste1993] Besonderheiten und Eigenschaften von Mehrkomponentengasen in der Schweißtechnik. DVS Berichte 155, DVS-Verlag, 1993
- [Tbi2012] TBi Industries: „Classic - TBi 240 (DR) - MIG / MAG-Handschiweißbrenner“, <http://www.tbi-industries.com>, Zugriff: 02.08.2012
- [Teß2012] Teßmar, V.: Diskussion zur Gasschutzproblematik in der Karosseriefertigung. Volkswagen AG, Schweißkompetenzzentrum, Braunschweig, 2012
- [Tru1999] Trube, S.: Auswahl von Schutzgasen zum Schweißen von Stahlwerkstoffen. Jahrbuch Schweißtechnik 99, DVS-Verlag, 1999
- [Tru2001] Trube, S.; et al.: Schutzgase zum Schweißen und Formieren von CrNi-Stählen. Jahrbuch Schweißtechnik 2001, DVS-Verlag, 2001
- [Wad2010] Wada, Y.; Inoue, S.; Tsukamoto, H.; Yamaguchi, T.; Nishio, K.: Computational Fluid Dynamics Analysis of Shielding Gas Behavior in Tungsten Inert Gas Welding of Titanium Plate. 63rd Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding. IIW Doc. XII-1999-10, Istanbul, 2010

- [Wal2005] Walter Schnorrer Welding Equipment: Professionell - Formiergas Systeme, Ausgabe 2005, Aalborg, 2005
- [Wei2012] Weiss, H. D.: Experimentelle Untersuchungen zur Entwicklung eines MSG-Schweißbrenners mit interner Rauchgasabsaugung. Belegarbeit TU Dresden, Dresden 2012
- [Wui1992] Wuich, W.: Technische Gase schützen das Schweißbad. Metallhandwerk und Technik, 94(1992), Heft 5, Seiten 59-61, ISSN 0343-012, 1992
- [Zsch2007] Zschetzsche, J., "Diagnostik von Schutzgasschweißprozessen", Dissertation, Technische Universität Dresden, Verlag der Wissenschaften, ISBN-13 978-3-940046-33-8, Dresden, 2007

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1:	Anlauffarben an 1.4301 [Schu2012] (links), Rußablagerungen auf Aluminium EN AW-5182 [Goe2005] (mittig) und Poren sowie Oxidinseln einer MAG-Schweißnaht an S235 [Wei2012] (rechts) durch mangelhafte Qualität der Schutzgasabdeckung.....	12
Abbildung 3.2:	Gestaltungsvarianten derzeit genutzter Schleppgasdüsen (oben links: ausgeformte, wassergekühlte Primärgasdüse, oben rechts: Gasorgel, unten links: Gasbox MSG-Schweißen [Amm2004], unten rechts: Precision Welding Technologies [PWT2012]).....	16
Abbildung 3.3:	Methoden der Strömungsanalyse, oben links: Numerische Simulation, oben rechts: Schlierentechnik, unten links: Particle Image Velocimetry (PIV), unten rechts: O ₂ -Messung.....	18
Abbildung 5.1:	Methodische Vorgehensweise bei der Beurteilung unterschiedlicher Gestaltungsvarianten von Schleppgasdüsen.....	25
Abbildung 5.2:	Abmessungen der untersuchten Gasboxen ohne (links) und mit Prozess (rechts).....	26
Abbildung 5.3:	Versuchsaufbau zur experimentellen Bestimmung der spezifischen Druckverlustkurve in Abhängigkeit des Volumenstroms	27
Abbildung 5.4:	Schematische Darstellung des Berechnungsgebiets des numerischen Modells zur Bestimmung der Widerstandskennwerte für dreidimensionale Geometrien mit variabler Wandstärke und unbekannter Materialcharakteristik	28
Abbildung 5.5:	Prinzip der Sauerstoffmessung zur Bewertung der Schutzgasabdeckung (links) und der Spülzeiten (rechts)	28
Abbildung 5.6:	Beispielhafte Darstellung des Berechnungsgebietes des numerischen Modells.....	29
Abbildung 6.1:	Resultierende Druckverluste unterschiedlicher Schalldämpfer in Abhängigkeit des Volumenstroms (Anschlussmaß der Schalldämpfer: 1/8")	32

Abbildung 6.2:	Berechnete Sauerstoffkonzentration im Bereich einer ausgeformten Primärgasdüse ($I_W = 150 \text{ A}$ $a = 3 \text{ mm}$ $SG = 15 \text{ l/min}$)	35
Abbildung 6.3:	Berechnete Sauerstoffkonzentration bei Verwendung einer Schutzgasorgel ($I_W = 150 \text{ A}$ $a_{\min} = 3 \text{ mm}$ $PG = 10 \text{ l/min}$ $SG = 30 \text{ l/min}$)	36
Abbildung 6.4:	Berechnete Sauerstoffkonzentration im Bereich einer Gasbox mit zwei Schalldämpfern ($I_W = 150 \text{ A}$ $a = 3 \text{ mm}$ $PG = 10 \text{ l/min}$ $SG = 30 \text{ l/min}$)	37
Abbildung 6.5:	Prinzipielle Darstellung der Verdrängungsfläche	39
Abbildung 6.6:	Stromlinien und Sauerstoffkonzentration bei einem direkten Einlass des Schleppgases ohne Strömungsgleichrichter ($N_E = 1$ $d_E = 4 \text{ mm}$ $SG = 20 \text{ l/min}$ $a = 3 \text{ mm}$)	41
Abbildung 6.7:	Stromlinien und Sauerstoffkonzentration bei einem direktem Einlass in Kombination mit einem Strömungsgleichrichter mit hoher Druckdifferenz ($N_E = 1$ $d_E = 4 \text{ mm}$ $SG = 20 \text{ l/min}$ $a = 3 \text{ mm}$)	43
Abbildung 6.8:	Maximale Sauerstoffkonzentration bei direkter Einleitung des Schleppgases in Abhängigkeit des verwendeten Strömungsgleichrichters und des Schleppgasvolumenstroms ($N_E = 1$ $d_E = 4 \text{ mm}$ $a = 3 \text{ mm}$)	44
Abbildung 6.9:	Stromlinien und Sauerstoffkonzentration bei Verwendung eines Gasverteilers ohne Strömungsgleichrichter ($N_{BG} = 2$ $d_{BG} = 4 \text{ mm}$ $a = 3 \text{ mm}$ $SG = 20 \text{ l/min}$)	45
Abbildung 6.10:	Maximale Sauerstoffkonzentration bei Verwendung eines Gasverteilers in Abhängigkeit der Bohrungsanzahl und des Schleppgasvolumenstroms ($d_{BG} = 4 \text{ mm}$ $a = 3 \text{ mm}$)	45
Abbildung 6.11:	Maximale Sauerstoffkonzentration bei Verwendung eines Gasverteilers in Abhängigkeit des verwendeten Strömungsgleichrichters und des Schleppgasvolumenstroms ($N_{BG} = 6$ $d_{BG} = 4 \text{ mm}$ $a = 3 \text{ mm}$)	47
Abbildung 6.12:	Stromlinien und Sauerstoffkonzentration bei Verwendung von Schalldämpfern ohne Strömungsgleichrichter ($N_{SD} = 2$ $a = 3 \text{ mm}$ $SG = 20 \text{ l/min}$)	48

- Abbildung 6.13: Maximale Sauerstoffkonzentration bei Verwendung von einem (links) bzw. zwei Schalldämpfern (rechts) in Abhängigkeit des Volumenstroms ($a = 3 \text{ mm}$).....49
- Abbildung 6.14: Maximale Sauerstoffkonzentration bei Verwendung von Schalldämpfern (Typ A) in Abhängigkeit des verwendeten Strömungsgleichrichters und des Volumenstroms ($N_{SD} = 2 \mid a = 3 \text{ mm}$).....51
- Abbildung 6.15: Gemessene Sauerstoffkonzentrationen für unterschiedliche Verbindungsmöglichkeiten von Schleppgasdüse und Schweißbrenner (Schalldämpfer: A $\mid N_{SD} = 2 \mid I_w = 200 \text{ A} \mid a = 3 \text{ mm} \mid PG = 10 \text{ l/min} \mid SG = 30 \text{ l/min}$)53
- Abbildung 6.16: Berechnete Sauerstoffkonzentration bei fehlender Verbindung zwischen Schleppgasdüse und Schweißprozess (Schalldämpfer: A $\mid N_{SD} = 2 \mid I_w = 200 \text{ A} \mid a = 3 \text{ mm} \mid PG = 10 \text{ l/min} \mid SG = 30 \text{ l/min}$)54
- Abbildung 6.17: Stromlinien (links) und Sauerstoffkonzentrationen (rechts) von Schleppgasdüsen mit Schalldämpfern (Typ A) ($I_w = 150 \text{ A} \mid N_{SD} = 2 \mid a = 5 \text{ mm} \mid PG = 10 \text{ l/min} \mid SG = 20 \text{ l/min}$)57
- Abbildung 6.18: Resultierende Anlauffarben von Blindschweißungen (Randbedingungen entsprechend Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2) für unterschiedliche Abstände zwischen Schleppgasdüse und Bauteiloberfläche bei Verwendung von Schalldämpfern (Typ A) ohne Strömungsgleichrichter ($N_{SD} = 2 \mid PG = 10 \text{ l/min} \mid SG = 30 \text{ l/min}$).....58
- Abbildung 6.19: Resultierende Anlauffarben von Blindschweißungen (Randbedingungen entsprechend Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2) in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie und des Abstandes zur Bauteiloberfläche bei Verwendung von Schalldämpfern (Typ A) ohne Strömungsgleichrichter ($N_{SD} = 2 \mid PG = 10 \text{ l/min} \mid SG = 30 \text{ l/min}$).....58
- Abbildung 6.20: Prinzipdarstellung der Wechselwirkung zwischen Schutz- und Schleppgasvolumenstrom59
- Abbildung 6.21: Gemessene Sauerstoffkonzentration einer Schleppgasdüse mit Schalldämpfern (Typ A) in Abhängigkeit des verwendeten Sinterkörpers für

	einen Schutzgasvolumenstrom von 10 l/min (links) und 4 l/min (rechts) ($I_W = 200 \text{ A}$ $N_{SD} = 2$ $a = 5 \text{ mm}$ $SG = 30 \text{ l/min}$).....	60
Abbildung 6.22:	Gemessene Sauerstoffkonzentration einer Schleppgasdüse mit Schalldämpfern in Abhängigkeit des verwendeten Sinterkörpers ($I_W = 200 \text{ A}$ $N_{SD} = 4$ $a = 5 \text{ mm}$ $PG = 10 \text{ l/min}$ $SG = 30 \text{ l/min}$).....	61
Abbildung 6.23:	Numerisch berechnetes Geschwindigkeitsfeld in der Symmetrieffläche einer Schleppgasdüse mit Schalldämpfern (Typ A) ohne (oben) bzw. mit einem Strömungsgleichrichter mit geringer Druckdifferenz (unten) ($I_W = 150 \text{ A}$ $N_{SD} = 2$ $a = 5 \text{ mm}$ $PG = 10 \text{ l/min}$ $SG = 20 \text{ l/min}$).....	62
Abbildung 6.24:	Normalkomponenten der Geschwindigkeitsvektoren einer Schleppgasdüse mit Schalldämpfern (Typ A) ohne (oben) bzw. mit einem Strömungsgleichrichter mit geringer Druckdifferenz (unten) 0,5 mm über der Werkstückoberfläche ($I_W = 150 \text{ A}$ $N_{SD} = 2$ $a = 5 \text{ mm}$ $PG = 10 \text{ l/min}$ $SG = 20 \text{ l/min}$)	63
Abbildung 6.25:	Maximale Arbeitsabstände von Schleppgasdüsen mit Schalldämpfern ohne bzw. mit einem Strömungsgleichrichter mit geringer Druckdifferenz ($I_W = 200 \text{ A}$ $PG = 10 \text{ l/min}$ $SG = 30 \text{ l/min}$).....	64
Abbildung 6.26:	Resultierende Anlauffarben von Blindschweißungen auf Rohren (Randbedingungen entsprechend Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2) bei Verwendung von Schalldämpfern (Typ A) ohne (links) und mit einem Strömungsgleichrichter mit geringer Druckdifferenz (rechts) ($N_{SD} = 2$ $PG = 10 \text{ l/min}$ $SG = 30 \text{ l/min}$).....	65
Abbildung 6.27:	Resultierende Anlauffarben von Verbindungsschweißungen (Randbedingungen entsprechend Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2) bei Verwendung von Schalldämpfern (Typ A) ohne (oben) und mit einem Strömungsgleichrichter mit geringer Druckdifferenz (unten) ($N_{SD} = 2$ $PG = 10 \text{ l/min}$ $SG = 30 \text{ l/min}$).....	66
Abbildung 6.28:	Stromlinien und Sauerstoffkonzentrationen einer Schleppgasdüsen mit Gasverteiler und einem Strömungsgleichrichter mit hoher Druckdifferenz ($I_W = 150 \text{ A}$ $N_{BG} = 6$ $d_{BG} = 4 \text{ mm}$ $a = 5 \text{ mm}$ $PG = 10 \text{ l/min}$ $SG = 20 \text{ l/min}$)	67

- Abbildung 6.29: Normiertes Geschwindigkeitsprofil (schwarz) und prinzipielle Darstellung der Massenflüsse von Atmosphärgasen (rot) an der prozessnahen Schleppgasdüsenkanten bei Verwendung von Strömungsgleichrichtern mit hoher Druckdifferenz – oben: Variation des Abstandes ($I_W = 150 \text{ A}$); unten: Variation der Stromstärke ($a = 7 \text{ mm}$).....68
- Abbildung 6.30: Berechnete Isolinien für 20 ppm Sauerstoff bei Verwendung eines Strömungsgleichrichters mit hoher Druckdifferenz; oben: einheitliche Materialstärke; unten: profiliertes Sintermetall; ($I_W = 150 \text{ A}$ | $a = 5 \text{ mm}$ | $PG = 10 \text{ l/min}$ | $SG = 20 \text{ l/min}$).....69
- Abbildung 6.31: Einfluss von Leckagen bei Verwendung von Strömungsgleichrichtern mit hoher Druckdifferenz ($PG = 10 \text{ l/min}$ | $SG = 30 \text{ l/min}$) – oben: Sauerstoffmessung mit Prozess ($I_W = 200 \text{ A}$ | $a = 5 \text{ mm}$); unten: Schlierenaufnahmen ohne Prozess.....70
- Abbildung 6.32: Gemessene Spülzeiten einer Schleppgasdüse mit Schalldämpfern (Typ A) ($N_{SD} = 2$ | $a = 3 \text{ mm}$ | $PG = 10 \text{ l/min}$ | $SG = 30 \text{ l/min}$)71
- Abbildung 6.33: Spülzeiten einer Schleppgasdüse mit Schalldämpfern (Typ A) an der angegebenen Messposition in Abhängigkeit des Abstandes (links) und des Schleppgasvolumenstroms (rechts).....72
- Abbildung 6.34: Strömungslinien beim Spülvorgang einer Schleppgasdüse mit Schalldämpfern (Typ A) ($N_{SD} = 2$ | $a = 3 \text{ mm}$ | $PG = 10 \text{ l/min}$ | $SG = 30 \text{ l/min}$)73
- Abbildung 6.35: Spülzeiten von Schleppgasdüsen mit Schalldämpfern (Typ A) an der angegebenen Messposition mit und ohne Verdrängungskörper ($N_{SD} = 2$ | $a = 3 \text{ mm}$ | $PG = 10 \text{ l/min}$ | $SG = 30 \text{ l/min}$)74
- Abbildung 6.36: Gemessene Isolinien für 20 und 100 ppm Sauerstoff bei Verwendung einer Schleppgasdüse mit verrundeten (oben) sowie stark reduzierten prozessvorlaufenden Bereich (unten), Schalldämpfern (Typ A) und einem Strömungsgleichrichter mit geringer Druckdifferenz ($N_{SD} = 2$ | $a = 11 \text{ mm}$ | $PG = 10 \text{ l/min}$ | $SG = 30 \text{ l/min}$).....75
- Abbildung 6.37: Prinzipielle Darstellung der Modulbauweise von Schleppgasdüsen – links: Schweißmodul; rechts: Verlängerungsmodul; rot: Spannkraften.....76

- Abbildung 6.38: Nahtoberfläche einer Verbindungsschweißung (Randbedingungen entsprechend Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2) 50 mm nach den Schweißmodul ohne (links) und mit (rechts) Verwendung eines Verlängerungsmoduls ($N_{SD} = 2 \times 2$ | $a = 3$ mm | $PG = 10$ l/min | $SG_{gesamt} = 30$ l/min)77
- Abbildung 6.39: Schleppgasdüse des InFocus-Schweißbrenners auf Basis der im Projekt erarbeiteten Vorzugsvariante.....78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1:	Angaben zum Versuchsaufbau und Grundwerkstoff	30
Tabelle 5.2:	Prozessparameter und Randbedingungen.....	31
Tabelle 6.1:	Widerstandskoeffizienten C_{R1} und C_{R2} für ausgewählte Funktionselemente.	33
Tabelle 6.2:	Berechnete Geschwindigkeitsfelder einer Gasbox mit zwei Schalldämpfern (Abmessungen siehe Kapitel 5) und einem Strömungsgleichrichter an der Unterseite der Schleppgasdüse ($s = 1 \text{ mm}$) in Abhängigkeit des quadratischen Widerstandskoeffizienten des Gleichrichters.....	34
Tabelle 6.3:	Kategorisierung von Gasboxen nach dem Gaseinleitungssystem und dem verwendeten Strömungsgleichrichter	38
Tabelle 6.4:	Prinzipielle Eignung von Konstruktionsprinzipien für die Fertigung von Schleppgasdüsen ohne Prozess und erreichbare maximale Abstände zur Werkstückoberfläche	40
Tabelle 6.5:	Berechnete Strömungsvektoren an der Ausströmfläche der Schalldämpfer sowie Schlierenaufnahmen für verschiedene Schalldämpfergeometrien ($SG = 15 \text{ l/min}$)	50
Tabelle 6.6:	Eignung unterschiedlicher Gaseinleitungssysteme und Strömungsgleichrichter für die Anwendung in Schleppgasdüsen mit Schweißprozess sowie erreichte maximale Abstände zur Werkstückoberfläche	55
Tabelle 9.1:	Transfermaßnahmen im Bearbeitungszeitraum	84