Schlussbericht

der Forschungsstelle

TU Dresden, Institut für Fertigungstechnik / Professur Fügetechnik und Montage

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

> vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

> > geförderten Vorhaben 16.779 BR

Wirtschaftliches WIG-Fügen durch magnetisches Pendeln des Lichtbogens

(Bewilligungszeitraum: 01.11.2010 - 31.01.2013)

der AiF-Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS

Dresden, 23.05.2013

Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel

Name und Unterschrift des Projektleiters an der (ggf. federführenden) Forschungsstelle

Ort, Datum



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis II			
Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und AbkürzungenV			
1	Zusammenfassung1		
2	Technische und wirtschaftliche Problemstellung4		
3	Stand von Technik und Forschung5		
3.1	Grundlagen 5		
3.2	Wissenschaftliche Untersuchungen 5		
3.3	Technologische Umsetzung 8		
4	Zielstellung und Methodischer Ansatz10		
5	Untersuchungsmethoden 12		
5.1	Magnetfeld- und Temperaturmessung am Demonstrator		
5.2	Numerische Analyse und Bewertung der Schutzgasabdeckung 13		
5.3	Particle-Image Velocity (PIV)		
5.4	Schlierenmessung		
5.5	Messung der elektrischen Stromdichte und Wärmestromdichte 19		
6	Arbeitspunkte und erzielte Ergebnisse 23		
6.1	Entwicklung des WIG-Demonstratorbrenners		
6.1.1	Untersuchung zur Dimensionierung der Magnetfeldbaugruppe und der Schutzgasabdeckung		



6.1.2	Aufbau des Demonstrators	28
6.1.3	Erprobung des Demonstrators	30
6.2	Diagnostizierung der Lichtbogenauslenkung	32
6.3	Ermittlung der Prozessparameter	36
6.3.1	Beeinflussung der Lichtbogenauslenkung durch den Grundwerkstoff	36
6.3.2	Beeinflussung der Lichtbogenauslenkung durch die Prozessparameter	37
6.4	Kopplung der Regelung mit der Stromquelle	40
6.5	Bauteilerprobung	41
6.6	Entwicklung eines magnetisch gependelter WIG-Engspaltbrenners	47
6.6.1	Aufbau des Demonstrators zum magnetisch gependelter WIG- Engspaltschweißen	47
6.6.2	Erprobung des Demonstrators zum magnetisch gependelten WIG- Engspaltschweißen	49
7	Gegenüberstellung von Ergebnissen und Zielsetzung	51
8	Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse für kmU	53
8.1	Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse	53
8.2	Industrielle Anwendung der Forschungsergebnisse	54
9	Erläuterung zur Kostenaufteilung	55
9.1	Erläuterungen zu Personaleinsatz	55
9.2	Erläuterungen zu Geräteanschaffung	55
9.3	Erläuterungen zu Leistungen Dritter	55
10	Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen	56



11	Projektbegleitender Ausschuss	59
Quelle	nverzeichnis	I
Abbild	ungsverzeichnis	V
Tabelle	enverzeichnis	IX



Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit	Benennung	
Lateinische Symbole			
\vec{A}	V s m ⁻¹	magnetisches Vektorpotential	
\vec{B}	т	magnetische Flussdichte	
D^X	m ² s ⁻¹	thermo-molarer Diffusionskoeffizient	
h	J kg ⁻¹	Enthalpie	
Ι	А	Stromstärke	
\vec{j}	A m ⁻²	Stromdichte	
\overline{m}	kg mol⁻¹	mittlere molare Masse der Schwerteilchen	
п	mol m ⁻³	Teilchendichte	
р	Pa	Druck	
$S_{\scriptscriptstyle NEC}$	W m ⁻³	Nettostrahlungsemission	
Т	К	Temperatur	
t	S	Zeit	
ū	m s⁻¹	Geschwindigkeit	
Х	mol mol ⁻¹	Molarfraktion	
Y	kg kg⁻¹	Massenfraktion	
Griechische Symbole			
λ	W m ⁻¹ K ⁻¹	thermische Leitfähigkeit	
μ0	N A ⁻²	magnetische Feldkonstante	
ϕ	V	elektrisches Potential	
ρ	kg m ⁻³	Dichte	
σ	$\Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$	elektrische Leitfähigkeit	

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Symbole



Indizes

A	Komponente A
В	Komponente B
i	Variable
j	Variable

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Begriffe

Abkürzung	Benennung
Ar	Argon
MHD	Magnetohydrodynamik
NEC	Nettoemissionskoeffizient
PA	Projektbegleitender Arbeitskreis
PIV	Particle Image Velocimetry
SST	Shear Stress Transport (Turbulenzmodell)
WIG	Wolframinertgasschweißen
WST	Werkstück



1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurden Untersuchungen zur Stabilisierung des Lichtbogenansatzes durch magnetisches Pendeln durchgeführt. Ansatz war, im Prozess auftretende Störeinflüsse durch ein überlagertes magnetisches Feld und eine erzwungene Lichtbogenauslenkung auszugleichen. Das lichtbogenspezifische Problem des unregelmäßigen Ansetzens kann verschiedene Ursachen haben. Zum Ersten führen die geringen Leistungen beim Fügen dünner Bleche grundsätzlich zu vergleichsweise instabilen Lichtbogenansätzen. Zum Zweiten kann der Lichtbogen durch Metallverdampfungen einseitig ansetzen, was vor allem bei verzinkten Blechen zu beobachten ist. Zum Dritten kann der Lichtbogen durch magnetische Blaswirkung infolge von Bauteiltoleranzen oder auch Höhenversätzen an Bördelnähten abgelenkt werden. Zur Stabilisierung des Lichtbogens wurde ein WIG-Demonstratorbrenner mit magnetischer Auslenkung des Lichtbogens entwickelt und erprobt. Der Demonstrator wurde Schutzgasabdeckung, Magnetfelderzeugung hinsichtlich der und -ansteuerung sowie einer verringerten thermischen Belastung optimiert. Hierfür wurde die Schutzgasströmung in einem numerischen Strömungsmodells analysiert und mittels Particle-Image-Velocimetry (PIV) Messungen validiert. In einem Variantenvergleich wurde eine in Auslenkungsrichtung vergrößerte ovale Düsenform als beste Schutzgasdüsengeometie bestimmt und am Demonstrator praktisch umgesetzt. Das zur Auslenkung des Lichtbogens erforderliche Magnetfeld wird über zwei seitlich an der Schutzgasdüse angebrachte Spulen mit Eisenkernen und Magnetjoch erzeugt. Untersuchungen zu Spulenkernwerkstoffen aus weichferritischem Material oder Elektroblech ergaben im untersuchten Frequenzbereich keine Vorteile gegenüber Volleisenkernen aus Baustahl. Über Polschuhe wird das Magnetfeld zum Lichtbogen geleitet. Durch die aktive Kühlung der Eisenkerne wird eine thermische Überbelastung der Spule verhindert. Entgegen bisherigen Brenner magnetischer Lichtbogenauslenkung bestehen die Spulen aus einem mit vergleichsweise lackisolierter Kupferdraht mit großem Leitungsquerschnitt (Ø1,25 mm) und wenigen Wicklungen, welcher direkt auf den aktiv gekühlten Eisenkern gewickelt ist. Die hieraus resultierende geringe Induktivität der Spule



ermöglicht die Erzeugung hoher Magnetfelder auch bei hohen Pendelfrequenzen. Durch einen in den Spulenstromkreis integrierten Lastwiderstand wird die Ummagnetisierung des Magnetfeldes bei hohen Pendelfrequenzen unterstützt. Zur Ansteuerung der Spulen wird eine modifizierte AC/DC Schweißstromquelle mit einer maximalen Pendelfrequenz von 200 Hz verwendet. Die hohen Spannungsreserven der Stromquelle erlauben schnelle Stromanstiege und eine hohe Auslenkungsgeschwindigkeit des Lichtbogens. Die Pendelstromquelle erfüllt zudem alle sicherheitstechnischen Anforderungen für elektrische Geräte. Die Stärke der Lichtbogenauslenkung kann über die Vorgabe des Spulenstromes und der Pulsform am Frontpanel der Pendelstromquelle sehr einfach vom Bediener gesteuert werden.

In Absprache und auf Wunsch der PA-Mitglieder konnte daher das Arbeitspaket "Kopplung der Regelung mit Stromquelle" gekürzt und zusätzlich zum beantragten Arbeitsprogramm die Möglichkeit des magnetisch Pendelns im Engspalt untersucht werden. Hierbei wurde ein weiterer Demonstratorbrenner aufgebaut.

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Möglichkeiten zur Charakterisierung der Lichtbogenauslenkung untersucht. Es wurde erkannt, dass sich die optische Auswertung der Lichtbogenauslenkung nicht zur Vorhersage des Energieeintrages ins Werkstück eignet. Die Forschungshypothese, dass der Energieeintag und die Auslenkung des Lichtbogens nur mit Hilfe des Geteilte-Anoden-Verfahrens richtig erfasst werden können, wurde bestätigt.

In Lötversuchen an Bördelnähten wurde die Leistungsfähigkeit des Demonstrators nachgewiesen und das Verbesserungspotential zum konventionellen WIG-Prozess aufgezeigt. Es konnte gezeigt werden, dass durch eine periodische Auslenkung des Lichtbogens das Toleranzfeld, in dem eine qualitativ gute Lötnaht erzeugt werden kann, verbessert wird. Vor allem in Hinblick auf die noch beherrschbare Spaltüberbrückbarkeit zwischen den Fügepartnern und der Positionierung des Brenners über dem Bördel konnten Verbesserungen gegenüber dem konventionellem Prozess ohne Lichtbogenauslenkung erzielt werden. Die Verbesserungen sind jedoch stark vom Fließverhalten des Lotes abhängig, so dass eine Anpassung des Lotes an den gependelten Prozess notwendig ist.



Auf Wunsch des PA's wurde im Projekt zusätzlich das Potential einer magnetischen Lichtbogenauslenkung im Engspalt untersucht. Ziel war es, die aufwendige und bauraumintensive Kinematik einer mechanischen Lichtbogenauslenkung der Elektrode durch eine berührungsloses magnetisches Pendeln des Lichtbogens zu ersetzten. Durch den magnetisch gependelten Lichtbogen kann eine beliebige Auslenkcharakteristik mit einer maximalen Frequenz von 200 Hz vorgegeben werden. Hierdurch lässt sich der Energieeintrag in den Nutgrund und in die Nahtflanken exakt steuern, wodurch eine sichere Anbindung des zugeführten Zusatzwerkstoffes an den Grundwerkstoff sichergestellt werden kann. Durch den neuen Ansatz, das zur magnetischen Auslenkung des Lichtbogens benötigte Magnetfeld durch eine außerhalb des Engspalt angeordnete Spule zu erzeugen und dieses durch seitlich am Engspaltschwert montierte Elektrobleche zum Lichtbogen zu leiten, kann die Schwertbreite des Engspaltschwerts im Vergleich zu bisherigen Engspaltbrennern deutlich verringert werden. Hierdurch werden die Anwender in die Lage versetzt, beim Fügen dickwandiger Bauteile die erforderliche Spaltbreite und somit das aufzufüllende Nahtvolumen deutlich zu reduzieren, wodurch die benötigte Schweißzeit verkürzt und die Wirtschaftlichkeit gesteigert wird. Die Umsetzung in einem funktionsfähigen Demonstrator erfolgte in Zusammenarbeit mit dem PA.

Das Forschungsvorhaben "Wirtschaftliches WIG-Fügen durch magnetisches Pendeln des Lichtbogens" wurde unter den Förderkennzeichen DVS-Nr. 03.097 und IGF-Nr. 16.779 B durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) finanziert. Für die Förderung und die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten sei gedankt. Wir danken außerdem 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.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.



2 Technische und wirtschaftliche Problemstellung

Zum Schweißen und Löten von dünnen Blechen mit Stirnkehl- und Bördelnähten wird der Lichtbogen trotz der im Vergleich zum Laser deutlich geringeren Kosten nur selten genutzt. Ursache hierfür ist, dass die Prozesssicherheit, besonders bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten, durch unregelmäßiges Ansetzen und Durchbrennen des Lichtbogens begrenzt ist. Die Folgen dieser Prozessinstabilitäten sind fehlerhafte Verbindungen, die aufwändige und kostenintensive Nacharbeit erfordern. Zur Erhöhung der Prozesssicherheit ist ein ausreichender und gleichmäßiger Energieeintrag in beide Bleche notwendig. In der Großindustrie werden hierzu z. T. Laserverfahren oder fokussierte Lichtbögen eingesetzt. Diese Verfahren stellen für KMU aufgrund der hohen Kosten allerdings oftmals keine Alternative dar. Das Fehlen eines definierten Lichtbogenansatzes begrenzt die Einsatzgebiete des kostengünstigen konventionellen WIG-Prozesses. Das magnetische Pendeln bietet die Möglichkeit, einen stabilen Lichtbogenansatz zu erzwingen, indem etwaige Störeinflüsse durch ein überlagertes permanentes magnetisches Pendeln ausgeglichen werden. Das magnetische Pendeln bietet damit die Möglichkeit, Prozesse bei KMU mit dem WIG-Lichtbogen ausführen zu können, für die bisher technologisch aufwändigere Verfahren notwendig sind. Diese Prozesse finden sich sowohl im Dünnblech- als auch im Dickblechbereich sowie bei Blechen mit metallischen Beschichtungen. Ein weiterer potentieller Anwendungsbereich sind Reparaturen, z. B. von Laserlötnähten in Kfz-Werkstätten.



3 Stand von Technik und Forschung

3.1 Grundlagen

Die magnetische Auslenkung des Lichtbogens beruht auf der Wirkung der Lorentzkraft, die seit dem 19. Jh. bekannt ist /4/, siehe Abbildung 3.1. Bereits Ende des 19. Jh. wurden Apparaturen zu magnetisch abgelenkten Lichtbögen patentiert, wobei vor allem die Einschnürung des Lichtbogens zum Zwecke der Stabilisierung beim Schweißen mit Kohleelektroden verfolgt wurde /5/ /6/.



Abbildung 3.1: Prinzipskizze der magnetischen Beeinflussung des Lichtbogens nach /7/

Das Magnetfeld zur Beeinflussung eines Lichtbogens kann zeitlich veränderlich oder konstant sein. Der Hauptvorteil gegenüber mechanischen Systemen liegt in den sehr viel höheren erreichbaren Pendelfrequenzen und dem relativ einfachen Aufbau /3/ /8/. Diese Vorteile wurden bereits zu Beginn des 20. Jh. technologisch in einer Vielzahl von patentierten Verfahren, wie z. B. /9/, umgesetzt. Die wissenschaftlichen Grundlagen der statischen und dynamischen Auslenkung von WIG-Lichtbögen wurde seit den 1960er, u. a. von Bačelis und Kovalev /10/, untersucht.

3.2 Wissenschaftliche Untersuchungen

Seit den Untersuchungen von Bačelis und Dilthey /11/ ist bekannt, dass insbesondere beim WIG-Schweißen das Schutzgas und die Lichtbogenlänge entscheidenden Einfluss auf die Auslenkung des Lichtbogens haben. Allerdings



konzentrierten sich diese Arbeiten vor allem auf eine Quantifizierung der möglichen Auslenkung, der Führbarkeit und der Steuerungsentwicklung zur Nahtverfolgung die positive Beeinflussung der Prozessstabilität aufgrund der aufgeprägten Kräfte gegenüber externen Kräften wurde bei den bisher durchgeführten Untersuchungen nicht berücksichtigt. Bačelis erstellte zur magnetischen Lichtbogenauslenkung ein empirisches Berechnungsmodell. Der empirische Charakter erstes dieser Gleichungen stellt jedoch einen Nachteil für den universellen Einsatz dar, da beispielsweise ein Faktor für den Lichtbogentyp zur Berechnung notwendig ist, der sich je nach Grundwerkstoff verändert. Es ist anzumerken, dass sich mit dem Berechnungsmodellen die möglichen Auslenkungen bis zu einer bestimmten Feldstärke sehr genau vorhersagen lassen. Die Auslenkungen werden bisher optisch mittels Kamera und anhand der Schweißnaht bewertet /3/ /14/ /22/, Abbildung 3.2. Die Restriktion dieser Auswertungsmethode besteht darin, dass es bei großen Magnetfeldstärken zu Knickungen des Lichtbogens kommen kann, infolge dessen eine direkte Zuordnung des Strompfades zur optischen Erscheinung nicht möglich ist. Vor allem die Instabilitäten durch Lichtbogenknickung führten dazu, dass beispielsweise von Kovalev die maximale Feldstärke bzw. Auslenkung relativ stark begrenzt wird /10/. Die optische Auswertungsmethode zur Regelung des Lichtbogens numerischen bedingt außerdem den Einsatz von Kameratechnik, Auswertungsalgorithmen und führt insbesondere im manuellen Betrieb und beim Einsatz unter eingeschränkten Zugänglichkeiten zu Schwierigkeiten.

Neuere Untersuchungen von Chen und Lucas /22/ zur Regelung von WIG-Lichtbögen beim Engspaltschweißen mittels Magnetfeldern nutzen die Grauwertkontrolle von Bilddaten zur Regelung der magnetischen Auslenkung des Lichtbogens. Die untersuchten Regelungsansätze beim Engspaltschweißen konnten sich jedoch vor allem aufgrund der räumlichen Restriktionen durch die Kameraüberwachung nicht durchsetzen. Weiterhin ist stets die aufwändige Adaptierung dieser Technik an den konkreten Einsatzfall notwendig.

In den 1980er Jahren wurde von Hughes und Walduck ein kompakter Plasmabrenner mit magnetischer Beeinflussung entwickelt /3/. An diesem konnte gezeigt werden, dass ein schnelles Lichtbogenpendeln und die daraus resultierende deutliche Verbreiterung der Naht erreichbar sind. Untersuchungen zum Einfluss auf



die Prozessstabilität wurden von Hughes und Walduck nicht veröffentlicht, doch wurde bereits großer Wert auf ein kompaktes Brennerdesign gelegt und die Wasserkühlung der Magnetkerne umgesetzt. Allerdings ist auch von dieser technischen Lösung kein kommerzieller Einsatz bekannt. Sowohl die Arbeiten von Hughes und Walduck als auch von Chen und Lucas stellen jedoch den Energieeintrag und nicht die Prozesssicherheit in den Fokus ihrer Untersuchungen. Die in diesen Arbeiten belegte Wirkung auf das Nahtaussehen und die positive Beeinflussung der Schmelze zeigen jedoch das große Potential für die Weiterentwicklung des WIG-Verfahrens vor allem im Hinblick auf die Konkurrenz zu Laserverfahren.



Abbildung 3.2: Ausgelenkter Lichtbogen und optische Bestimmung der Auslenkung /14/

Die numerische Simulation der magnetischen Ablenkung hat seit den 1990er Jahren große Fortschritte erzielt /12/ /13/ /14/. Hervorzuheben sind die Arbeiten von Gonzalez et al. /15/. Diese zeigen die Beeinflussung der Lichtbogenströmung durch Magnetfelder. Mögliche Instabilitäten des Lichtbogens durch die magnetische Ablenkung wurden u. a. von Serdjuk und Kovalec /10/ festgestellt. Auch die Untersuchungen von Matjas über maximal mögliche Magnetfeldstärken bei WIG-Lichtbögen und die Beschreibung durch einen Stabilitätsindex belegen eine reduzierte Lichtbogenstabilität vor allem bei kurzen Lichtbögen und Stromstärken unter 100 A Stromstärke in 50 Hz-Wechselfeldern /10/. Es ist weiterhin bekannt, dass die Auslenkung maßgeblich vom Grundwerkstoff und der Wirkung des Metalldampfs auf die Lichtbogensäule abhängt, was einem universellen Einsatz entgegensteht. Magnetische beeinflusste MAG- und MIG-Schweißprozesse wurden seit den 1970er Jahren verstärkt untersucht /11/ /26/ /27/. Von großem Interesse war dabei vor allem



die Nutzung als Sensorsystem. Die hierbei entwickelten prozessorientierte Sensorsysteme zum Steuern und Regeln auf Grundlage der magnetischen Beeinflussung des Lichtbogens wurden dabei bis in die jüngste Zeit weiterentwickelt /28/ /29/. Allerdings wurden diese vor allem an MSG-Prozessen erarbeitet, die sich von WIG-Prozessen erheblich unterscheiden. Neben den unterschiedlichen Führungsgrößen ist vor allem das ungleiche Verhalten von Lichtbogen und Werkstoffübergang bei den MSG-Prozessen entscheidend. Weiterhin wurden bzw. werden aktuell Messsysteme mit anderen Wirkprinzipien entwickelt, wie z. B. durch Radar- /30/ oder Temperatursensoren /31/.

3.3 Technologische Umsetzung

Im Zuge der Antragstellung wurde eine umfassende Patentrecherche zur magnetischen Beeinflussung von Lichtbögen und der Kopplung mit der Stromquelle durchgeführt. Hierbei wurde festgestellt, dass seit den 1950er vielfältige Brennerkonstruktionen patentiert wurden. bei denen u. a. verschiedene Magnetfelderzeugungen durch Permanentund Elektromagneten sowie unterschiedliche Magnetanordnungen geschützt wurden /16/ /17/ /24/ /25/. So ist in /16/ die Umsetzung einer ovalen Düse bereits vorgesehen. Insbesondere in /17/ wurde die kompakte Integration der Magnete in den Brennerkörper verfolgt, wobei sich die Erfindung auf die Anordnung der Magnete und die Gestaltung der Polschuhe bezieht. In /16/ wird auch auf die Möglichkeit der Schweißgeschwindigkeitserhöhung durch magnetische Beeinflussung hingewiesen. Mecke et al. /23/ beschäftigen sich neben der konstruktiven Umsetzung des Brenners für transversalen und quadropolaren Magnetfeldern auch mit der Synchronisation von MIG-Impulsstromquellen mit dem Magnetfeld. /18/ sichert die Nutzung eines Magnetfeldes auch bei Hybridverfahren. In /8/ wird die Änderung der Impedanz als Auswertegröße für eine Prozessregelung beschrieben. Neben der Beeinflussung des Lichtbogens selbst existiert mit dem magnetic stirring ein weiteres Verfahren, bei dem ein externes Magnetfeld beim Schweißen eingesetzt wird. Es kommt hauptsächlich beim Laserschweißen zum Einsatz und beeinflusst die Schmelze. Dadurch lässt sich beispielsweise die Heißrissgefahr bei Aluminiumlegierungen stark reduzieren /19/ /20/. Aufgrund der vielfältigen Untersuchungen zum magnetic stirring wurden vor



allem in jüngster Zeit große Fortschritte bei den Magnetwerkstoffen erzielt /21/. Es ist daher festzuhalten, die vielfältigen Untersuchungen zur magnetischen Lichtbogenbeeinflussung zu umfangreicher Literatur und auch zu vielen Schutzrechten geführt haben, die zum Großteil abgelaufen sind. Allerdings wurden mögliche Prozessstabilisierungen durch magnetische Beeinflussung bisher nicht ausreichend untersucht.



4 Zielstellung und Methodischer Ansatz

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Prozesssicherheit beim WIG-Schweißen und -Löten durch eine periodische magnetische Auslenkung des Lichtbogens zu erhöhen. Damit sollen neue Anwendungsbereiche für das WIG-Verfahren erschlossen sowie die Nacharbeit reduziert und die Vorschubgeschwindigkeit erhöht werden.

Benötigt wird ein kompakter und gut gekühlter WIG-Brenner mit leistungsstarken und hochdynamischen Ferritwerkstoffen sowie angepasster Schutzgasabdeckung. Hierzu werden erstmals neuartige Magnetwerkstoffe eingesetzt, die die konstruktiven Freiheiten erhöhen und höhere Pendelfrequenzen ermöglichen. Insbesondere wird die Schutzgasführung angepasst, da das Auslenken des Lichtbogens die Funktionsweise des bisherige Schutzgasströmungskonzept beeinträchtigt. Die Prozessgasströmung und deren Beeinflussung durch den Lichtbogen werden mit dem Lichtbogenmodell in ANSYS CFX und mit experimentellen Methoden beschrieben. Das Lichtbogenmodell ist geeignet, die Prozessgasströmung und die diffusive bzw. turbulente Vermischung der Prozess- und Atmosphärengase an komplexen Brennergeometrien und unter Berücksichtigung der Effekte des abzubilden. Die Validierung des Modells erfolgen Lichtbogens mit den Diagnosemethoden der Schlierentechnik und der Particle Image Velocimetry (PIV). Die Erkenntnisse werden in Konstruktionsempfehlungen zusammengefasst und ein Demonstrator entwickelt und erprobt.

Am Demonstrator werden anschließend Untersuchungen zur Quantifizierung der Lichtbogenauslenkung durchgeführt. Neben der bisher vor allem optisch in Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bestimmten Lichtbogenauslenkung wird die Auslenkung des Lichtbogens zusätzlich über die Strom- und Energieeintragsmessung am Werkstück ermittelt. Das hierfür verwendete Geteilte-Anoden-Verfahren erlaubt die genaue Lokalisierung der Strom- und Energieeintragsverteilung ins Werkstück und ermöglicht die Ermittlung der Lichtbogenauslenkung. Über die Variation der Prozessparameter werden die zur Beeinflussung der Lichtbogenauslenkung sensitiven Parameter ermittelt, so dass dem Anwender



umfangreiche Erkenntnisse zur Beeinflussung der Lichtbogenauslenkung zur Verfügung stehen.

Auf Grundlage des erzielten Wissens werden geeignete Parameter zum Löten von Referenzbauteilen mittels pendelndem Lichtbogen abgeleitet und erprobt. In Versuchen wird die Verbesserung der Toleranzfähigkeit des Fügeprozesses durch magnetisches Pendeln des Lichtbogens im Vergleich zum konventionellem Prozess beim Löten verzinkter Stahlbleche im Bördelstoß untersucht. Es werden der seitliche Brennerversatz zur Fuge, der Höhenversatz und der Lötspalt zwischen den Blechen sowie die Lötgeschwindigkeit variiert.

Aufbauend auf den Ergebnissen zur Entwicklung eines magnetisch gependelten Demonstrators zum Löten verzinkter Stahlbleche wird ein Demonstrator zum magnetischen Pendeln des Lichtbogens im Engspalt entwickelt. Als Basis dient ein Engspaltschweißbrenner mit mechanisch gependelter Elektrode. Am Brenner wird eine Magnetfeldbaugruppe zum berührungslosen, magnetischen Auslenken des Lichtbogens adaptiert. Über Eisenspäne erfolgt eine Visualisierung des Magnetfeldes. Der Demonstrators zum magnetisch gependelten WIG-Engspaltschweißen wird an einer simulierten Engspaltgeometrie getestet. Untersucht wird die im Engspalt maximal erreichbare Lichtbogenauslenkung sowie das Lichtbogenpendelverhalten zu den Flanken hin.



5 Untersuchungsmethoden

5.1 Magnetfeld- und Temperaturmessung am Demonstrator

Für grundlegende Untersuchungen zur Auslegung der Magnetfeldbaugruppe wurde ein spezieller Messstand für die experimentelle Bestimmung der magnetischen Flussdichte aufgebaut. Die Messvorrichtung besteht aus einem Hall-Senseor (Typ Honeywell SS496A1) und einem Kunststoffgehäuse, in dem der Sensor fixiert wird. Im Gehäuse befinden sich Aussparungen zur Aufnahme von zwei gegenüberliegenden Spulen mit Magnetkern. Mit diesem wurde der Einfluss der Gestaltungsparameter der Magnetfeldbaugruppe auf die magnetische Flussdichte untersucht, unter Anderem die Spulenformen, Magnetkernwerkstoffe sowie Magnetkernform.



Abbildung 5.1: Bestimmung der magnetischen Flussdichte mittels Hall-Sonde. Links: Vorrichtung für Grundlagenuntersuchung. Mitte/Rechts: Vorrichtung für Magnetfeldmessung am Demonstrator

Das durch die Magnetfeldbaugruppe am Demonstrator erzeugt Magnetfeld wurde ebenfalls gemessen. Hierfür wurde eine weitere Versuchsvorrichtung aufgebaut, bei der der Demonstrator in einer Kunstoffvorrichtung gehalten wird. Der Hall-Sernsor wird direkt unter der Elektrodenspitze platziert, sodass die später im Prozess auf den Lichtbogen wirksame magnetische Flussdichte experimentell erfasst wird.



5.2 Numerische Analyse und Bewertung der Schutzgasabdeckung

Für die numerischen Untersuchungen der Schutzgasströmung beim ausgelenken WIG-Lichtbogen wird die Software ANSYS CFX 13 verwendet. Die Grundlage für die Berechnung der Strömung bilden die Gleichungen von Energie-, Masse- und Impulserhaltung (Gleichungen 1-3). Zur Modellierung der Vermischung von Schutzgas mit Atmosphärengasen (Gleichung 4) sind sowohl die Diffusion als auch die turbulente Vermischung zu berücksichtigen. Hierbei ist es notwendig, die Diffusion in Abhängigkeit der Gastemperatur zu berücksichtigen. Es werden die temperaturabhängigen Diffusionskoeffizienten von Argon-Luft-Gemischen nach MURPHY /41/ verwendet. Das Gleichungssystem der Strömungsmechanik muss für die Untersuchung von Lichtbogenprozessen erweitert werden, so dass auch die Effekte der Lichtbogensäule und der Plasmaströmung (Elektrodynamik) berücksichtigt werden. Hierzu wird ein MHD-Modell verwendet. Die zugrunde liegenden Gleichungen (Gleichungen 5-8) sind nachfolgend aufgeführt und sind detailliert veröffentlicht /39/ /42/.

Gleichungen der Strömungsmechanik:

• Massebilanz:

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

• Energiebilanz: (2)

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

• Impulserhaltung:

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

(3)

(1)

• Masseanteil der Komponenten:

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

Gleichungen der Elektrodynamik:

• Ladungsträgererhaltung: (5)

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

• Stromfluss (Ohm`sches Gesetz):

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

• Magnetisches Vektorpotential:

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

• Magnetische Flussdichte:

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

Aus dem Kreuzprodukt von Magnetischer Flussdichte und Stromdichte wird die Lorentzkraft berechnet. Der Einfluss der Lorentzkraft auf das Geschwindigkeitsfeld wird durch einen Quellterm in den Impulserhaltungsgleichungen (Gleichung 3) berücksichtigt. Des Weiteren wird die Widerstandserwärmung, durch einen Quellterm in der Energieerhaltungsgleichung (Gleichung 2) implementiert.

Im Modell wird ein vereinfachter WIG-Schweißbrenner, bestehend aus der Kathode, dem Werkstück sowie der Schutzgasdüse und dem umgebenden Strömungsraum in einem spiegelsymmetrischen Modell (180°) aufgebaut, Abbildung 5.2.



(8)

(7)

(6)





Abbildung 5.2: Geometrie und Randbedingungen 180°-Modell

Zur numerischen Lösung des Gleichungssystems werden an den Grenzflächen des Modells folgende Randbedingungen definiert, Tabelle 5.1.

Rand	Bezeichnung	Masse / Impuls	Energie	Elektrisches Potential	Magnetisches Potential
ADNK	Symmetrie	-	$\partial T / \partial n = 0$	$\partial \phi / \partial n = 0$	$\partial A_i / \partial n = 0$
KNRO	Symmetrie	-	$\partial T / \partial n = 0$	$\partial \phi / \partial n = 0$	$\partial A_i / \partial n = 0$
KLPO	WST Links	-	$T = 300 \mathrm{K}$	$\partial \phi / \partial n = 0$	$A_i = 0$
LMQP	WST Hinten	-	$T = 300 \mathrm{K}$	$\partial \phi / \partial n = 0$	$A_i = 0$
NMQR	WST Rechts	-	$T = 300 \mathrm{K}$	$\partial \phi / \partial n = 0$	$A_i = 0$
OPQR	WST Unten	-	$T = 300 \mathrm{K}$	$\phi = 0 \mathrm{V}$	$\partial A_i / \partial n = 0$
ABLK	Gas Links	p = 1 bar (Luft)	$T = 300 \mathrm{K}$	$\partial \phi / \partial n = 0$	$A_i = 0$
BCML	Gas Hinten	p = 1 bar (Luft)	$T = 300 \mathrm{K}$	$\partial \phi / \partial n = 0$	$A_i = 0$
DCMN	Gas Rechts	p = 1 bar (Luft)	$T = 300 \mathrm{K}$	$\partial \phi / \partial n = 0$	$A_i = 0$
ABCDEJ	Gas Oben	p = 1 bar (Luft)	$T = 300 \mathrm{K}$	$\partial \phi / \partial n = 0$	$\partial A_i / \partial n = 0$
IFGH	Gas Einlass SG	$\dot{V}_{_{SG}}$ (Argon)	$T = 300 \mathrm{K}$	$\partial \phi / \partial n = 0$	$\partial A_i / \partial n = 0$
HG	Kathode Oben	-	$T = 600 \mathrm{K}$	Ι	$\partial A_i / \partial n = 0$
JEFI	Gasdüse Oben	-	$T = 600 \mathrm{K}$	$\partial \phi / \partial n = 0$	$\partial A_i / \partial n = 0$
Interface	Kathode - Gas	$u_i = 0$	flux	flux	flux
Interface	Gasdüse - Gas	$u_i = 0$	flux	$\partial \phi / \partial n = 0$	flux
Interface	Werkstück - Gas	$u_i = 0$	flux	flux	flux

Tabelle 5.1: Randbedingungen 180°-Modell



Die Erzeugung der Lichtbogenauslenkung erfolgt im Modell über das Aufprägen eines zusätzlichen homogenen Magnetfeldes.

5.3 Particle-Image Velocity (PIV)

Beim PIV werden hoch schmelzende Keramikoxid-Partikel in die Schutzgasströmung eingebracht, durch einen Laser belichtet und mit Hilfe einer Hochaeschwindigkeitskamera aufgenommen. Die Belichtung erfolgt mit Hilfe einer speziellen Optik, die das Laserlicht in einer Ebene auffächert. Somit werden lediglich Partikel belichtet, die sich in dieser Ebene befinden. Die anschließende, statistische Auswertung der Position einzelner Partikelgruppen durch spezielle Auswertealgorithmen ermöglicht die quantitative Berechnung von Strömungsfeldern Bewertung der Schutzgasströmung, vgl. Abbildung 5.3 und die Einen entscheidenden Einfluss auf die Abbildung der Gasströmung hat die Partikelgröße. Sind die Partikel zu groß, können sie auf Grund ihrer Trägheit der Strömung nicht ausreichend folgen. Sind die Partikel zu klein, werden sie unzureichend beleuchtet und sind für die Auswertung nicht nutzbar.



Abbildung 5.3: Versuchsaufbau der Particle Image Velocimetry (PIV) /37/

Das experimentelle Setup ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Dabei wird der WIG-Schweißbrenner durch einen Roboter über einer wassergekühlten Kupferanode positioniert. Während des Schweißens werden Brenner und Werkstück nicht



17

verfahren. Durch eine spezielle Mischvorrichtung erfolgt die Zugabe von Partikeln in den Schutzgasvolumenstrom kontinuierlich. Die jeweilige Partikelmenge im Schutzgas kann variiert werden. Es wurden Magnesiumoxidpartikel mit Partikelgrößen von 0,5-50 µm, einer Schmelztemperatur von 2640 °C und einer Dichte von $3,65 \text{ g/cm}^3$ verwendet. Durch die Nutzung eines gepulsten Beleuchtungslasers (Cavilux 500HF, 808 nm) und die Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera (Photron SA4) mit Bildraten von bis zu 1.000.000 Hz wird die zeitliche Bewegung der Partikel im Lichtschnitt aufgezeichnet. In den durchgeführten Versuchen wurde mit einer Bildrate von 5.000 fps und einer Belichtungszeit von 2,4 µs sowie der daraus resultierenden maximalen Bildgröße von 768 x 512 Pixel gearbeitet. Kamera und Laser sind dabei so aufeinander abgestimmt, dass während jeder Belichtungszeit der Kamera genau ein Laserimpuls von 2 µs Pulszeit und einer Pulsenergie von 1 mJ ausgelöst wird. Um die Beleuchtung der Partikel nur durch den Laser zu realisieren und die Strahlung des Lichtbogens auszublenden wurde ein Schmalbandfilter von 808 ±3,1 nm verwendet. Entscheidend für die qualitativ hochwertige Beleuchtung der Partikel ohne Überblendungen ist dabei das Verhältnis von Belichtungszeit, Pulsdauer, Intensität und der spektralselektiven Eigenschaften der eingesetzten Filtertechnik sowie die Qualität des Lichtschnittes, welcher durch die Lichtschnittoptik in einem Bereich von 0,5 x 40 mm aufgespannt wurde. Nur optimal beleuchtete Partikelgruppen sind durch die Korrelationssoftware auswertbar und können in Strömungsprofile umgerechnet werden. Für die im Projekt durchgeführten Untersuchungen ist neben der von der Firma DANTEC[®] angebotenen Software FlowManager 4.7 auch eine eigene, MATLAB-LabVIEW basierte Auswertesoftware entwickelt worden, die neben einer definierten Skalierung der Strömungsvektoren auch eine farbliche Geschwindigkeitsanalyse ermöglicht. In drei Verfeinerungsschritten wird dabei der Bereich der Partikelkorrelation von 64 x 64 Pixel auf 16 x 16 Pixel reduziert.



5.4 Schlierenmessung

Die Schlierenmesstechnik visualisiert die in der Strömung bestehenden Dichteunterschiede bzw. den von der Dichte linear abhängigen Brechungsindex, um die Ablenkung von Lichtstrahlen zu erfassen. Ursachen für einen geänderten Brechungsindex sind kompressible Wirbel, unterschiedliche chemische Zusammensetzung oder Temperaturunterschiede im Gas. Stand der Technik ist der kompakte Aufbau in der Töpplerschen Z-Schlierenanordnung, Abbildung 5.4. Zwischen zwei Parabolspiegeln wird ein paralleler Strahlengang erzeugt und durch eine Schlierenblende geführt. Auf Grund der Dichteunterschiede werden die Lichtstrahlen abgelenkt und führen damit nicht mehr durch den Brennpunkt des Spiegels bzw. der Schlierenblende blockiert. In der Folge werden von ergeben sich Helligkeitsunterschiede im Bild, die das Strömungsverhalten charakterisieren.



Abbildung 5.4: Prinzip Schlierentechnik in Töpplerscher Z-Anordnung /37/

Die verwendeten Hohlspiegel haben eine Brennweite von 1600 mm und einen Abstand von ca. 3 m zueinander, welcher aber flexibel eingestellt werden kann. In den Untersuchungen wurde deutlich, dass auf die Fokussierung der Beleuchtungsquelle durch Fokussierlinse und Beleuchtungsblende verzichtet werden kann, so dass die Beleuchtungsquelle genau in den Brennpunkt des ersten Hohlspiegels gesetzt wird. Diese Anpassung wird ermöglicht, indem an der Kamera



ein Objektiv mit einer Brennweite von 360 mm verwendet und auf den Schweißprozess scharf gestellt wird. Der Schweißprozess wird etwa mittig zwischen den beiden Hohlspiegeln im parallelisierten Strahlengang ausgeführt. Der Lichtbogen brennt auf einer wassergekühlten Kupferanode.

Um Überblendungen im Schlierenbild zu vermeiden, wurde eine kurze Belichtungszeit der Kamera (Photron SA4) verwendet. In den durchgeführten Untersuchungen wurde mit einer Bildrate von 5.000 fps und Belichtungszeiten von 2 bis 10 µs gearbeitet. Das Verhältnis von Beleuchtungsintensität und Strahlung des Prozesses wird somit erhöht und Überblendungen im Bild werden reduziert. Zur Beleuchtung wird ein zweiter WIG-Lichtbogen mit einer Stromstärke zwischen 150 und 300 A verwendet. Je nach Einstellung der Schlierenblende ist es möglich, die Sensibilität des Messaufbaus zu ändern und die Intensität der abgebildeten Schlieren zu beeinflussen. Es ist jedoch zu beachten, dass Rückschlüsse auf die exakte Position einer turbulenten Strömungsstruktur nur sehr eingeschränkt getroffen werden können, da es sich im Gegensatz zu PIV um ein Durchlichtverfahren handelt.

5.5 Messung der elektrischen Stromdichte und Wärmestromdichte

In Anlehnung an den Versuchsaufbau von Nestor /38/ und der Weiterentwicklung von SCHNICK /39/ zur Messung der elektrischen Stromdichte und der Wärmestromdichte wird das Geteilte-Anoden-Verfahren auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit genutzt. Dazu werden zwei galvanisch und thermisch voneinander entkoppelte Kupferplatten verwendet. Der Lichtbogen wird senkrecht zur Trennebene über die Platten geführt, vgl. Abbildung 5.5: .

Für aussagekräftige Ergebnisse ist ein stationärer Zustand in jedem Messpunkt notwendig. Hierzu wird durch die Steuerung der Gradient des Wärmeflusses geprüft. Erst wenn dieser Gradient einen definierten Grenzwert unterschreitet, wird das Weiterverfahren des Brenners ausgelöst.





Abbildung 5.5: Versuchsaufbau für Messung der elektrischen Stromdichte und Wärmestromdichte

Mittels zweier LEM-Wandler werden die über die einzelnen Platten abgeführten elektrischen Ströme in Abhängigkeit des Verfahrwegs gemessen. Zur Bestimmung Wärmestromdichte werden der die Kühlwassermasseströme sowie die Temperaturdifferenz von Kühlwasserein- und -auslauf bestimmt. Die dadurch ermittelten Verteilungskurven sind in Abbildung 5.6: links dargestellt.



Abbildung 5.6: Auswertung der mittels des Geteilte-Anoden-Verfahrens ermittelten Strom- und Wärmestromverteilungen /40/

Unter Annahmen eines rotationssymmetrischen Lichtbogens wird aus diesen Verteilungskurven mit Hilfe eines mathematischen Lösungsansatz, das so genannte Abel-Integral, die elektrischen Ströme und Wärmeströme in Abhängigkeit vom



Abstand zur Trennebene der Kupferplatten in eine radiale Stromdichteverteilung umgerechnet, vgl. Abbildung 5.6: .

Im Projekt werden jedoch magnetisch ausgelenkte Lichtbögen untersucht, so dass ein unsymmetrischer Lichtbogen vorliegt und Strom- und Energieeintrags auf der Werkstückoberfläche nicht mehr rotationssymmetrische verteilt sind. Die Umrechnung der Messkurven in eine Verteilungskurve durch das Abel-Integral ist somit nicht möglich. Daraufhin wurde ein neuer Auswerteansatz entwickelt, mit dem die Strom- und Energieverteilung am Werkstück auch für unsymmetrische Lichtbögen visualisiert werden kann. Um den gemeinsamen Schnittpunkt der Messkurven herum werden, einzelne Abschnitte gebildet. Die Bereiche entsprechen unterschiedlichen Anteilen vom Gesamtwert und werden in einem neuen Graphen als Bereichsbalkendiagramm dargestellt. Die Strom- und Energieeintragsverteilung lässt sich hierdurch stufenweise abbilden.

Beispielhaft zeigt Abbildung 5.7 die Auswertung der aufgenommenen Stromkurven eines unausgelenkten und eines magnetisch ausgelenkten Lichtbogens. Die Verschiebung des Lichtbogenansatzes am Werkstück (Fußpunktverschiebung) lässt sich aus der Wegdifferenz zwischen den Schnittpunkten der gemessenen Plattenströme (50 % vom Gesamtstrom) mit und ohne Lichtbogenauslenkung ermitteln. Zur Charakterisierung der Stromverteilung erfolgt im Diagramm eine Einteilung in vier Strombereiche, 25; 50; 75 und 90 % von der Gesamtstromstärke. Der Strombereich, in dem 90% des Gesamtstrom (blau) eingetragen werden, entspricht dem Abschnitt in dem eine Differenz von 5 % zum minimalem bzw. maximalen Strom besteht. Im Stromverlauf von Platte 1 entspricht dieser Bereich Werten zwischen 95 % (95 A) und 5 % (5 A) des Gesamtstromes. Analog werden die anderen Stromverteilungsbereiche ermittelt und in einem Balkendiagramm veranschaulicht. In einen Referenzversuch mit nicht ausgelenktem Lichtbogen wird der Maßstab für die Höhe der Balken definiert. Bei der Darstellung des ausgelenkten Lichtbogens wird die Höhe der einzelnen Balken durch Erhalt der Balkenfläche (Balkenbreite x Balkenhöhe) im Vergleich zum nicht ausgelenkten Lichtbogen bestimmt. Dabei wird angenommen, dass sich der ausgelenkte Lichtbogen senkrecht zur Auslenkungsrichtung nur unwesentlich verändert. Die Darstellung der Stromverteilung in der Balkenansicht ermöglicht die Visualisierung der



22

Lichtbogenauslenkung sowie den Intensitätsvergleich zum Referenzlichtbogen und bildet den prinzipiellen Verlauf der Strom- und Energieverteilung am Werkstück ab.



Abbildung 5.7: Auswertung der mittels des Geteilte-Anoden-Verfahrens ermittelten Strom- und Wärmestromverteilungen für nicht rotationssymmetrische Lichtbögen. Oben: Referenzmessung eines nicht ausgelenken Lichtbogens. Unten: magnetisch ausgelenkter Lichtbogen mit verschobener und verbreiterter Stromverteilung



6 Arbeitspunkte und erzielte Ergebnisse

6.1 Entwicklung des WIG-Demonstratorbrenners

Im Rahmen des Projektes wurde ein Demonstrator mit magnetisch gependeltem Lichtbogen entwickelt. Hierzu wurde eine Magnetfeldbaugruppe konzipiert und nach thermischen und elektromagnetischen Gesichtspunkten ausgelegt sowie die Schutzgasführung an die veränderten Lichtbogeneigenschaften angepasst.

6.1.1 Untersuchung zur Dimensionierung der Magnetfeldbaugruppe und der Schutzgasabdeckung

Für die Auslegung der Magnetfeldgruppe wurde zuerst die Größe des Magnetfeldes, welches zur Auslenkung des Lichtbogens benötigten wird, mit Hilfe des numerischen Strömungsmodells (Kapitel 5.2) abgeschätzt. Die Erzeugung der Lichtbogenauslenkung erfolgt im Modell über das Aufprägen eines zusätzlichen homogenen Magnetfeldes. Es wurde ein Lichtbogen mit einer Stromstärke von 200 A verwendet, da größere Stromstärken in der Regel für die beabsichtigte Lötanwendung nicht verwendet werden. Die Stärke des zusätzlichen Magnetfeldes wurde im Modell so lange erhöht, bis eine genügend große Auslenkung des Lichtbogens erreicht wurde, Abbildung 6.1.



Abbildung 6.1: Auslenkung eines 200 A Lichtbogens durch Aufbringen eines homogenen externen Magnetfeld von 0; 3 und 5 mT



Aus der Variation des aufgebrachten externen Magnetfeldes kann abgeleitet werden, dass durch die Magnetfeldbaugruppe eine magnetische Flussdichte im Bereich von 5 mT aufgebracht werden muss, um den Lichtbogen genügend weit auszulenken.

Ausgehend von dieser Zielgröße wurde mit Hilfe eines speziellen Messstandes (Kapitel 5.1) der Einfluss der Gestaltungsparameter der Magnetfeldbaugruppe auf die magnetische Flussdichte experimentell untersucht, unter Anderem die Spulenformen, Magnetkernwerkstoffe sowie Magnetkernform. Speziell wird untersucht, die Forschungshypothese, dass moderne weichferritische ob Kernwerkstoffe Vorteile hinsichtlich der erreichbaren Frequenz bieten, bestätigt werden kann. Als Vergleichskernwerkstoffe werden Volleisenkerne und geschichtete Elektrobleche verwendet. In Abbildung 6.2 sind die maximal gemessenen magnetischen Flussdichten für zwei im Sinuspuls betriebene Spulen mit ferritischem (Eisenkern) und weichferritischem Kernmaterial in Abhängigkeit der verwendeten Frequenz dargestellt.



Abbildung 6.2: Vergleich der maximal gemessenen magnetischen Flussdichte für mit sinusförmigen Stromverlauf betriebene Spulen mit ferritsischem (Eisenkern) und weichferritischem Kernmaterial

Die Verwendung von weichferritischen Kernwerkstoffen bietet für die beabsichtigten Zielfrequenzen keine Vorteile gegenüber normalen Eisenkernen. Ab einer Frequenz von 100 Hz ist bei beiden Kernwerkstoffen ein steiler Abfall der maximal erreichbaren



magnetischen Flussdichte zu beobachten. Verursacht wird die Verringerung der magnetischen Flussdichte bei steigender Frequenz durch die Zunahme des induktiven Widerstands in den Spulen. Die vom Leistungsteil bereitgestellte Versorgungsspannung ist nicht mehr ausreichend, um die vorgegebene Stromstärke aufrecht zu erhalten. Es wurde erkannt, dass nicht die Leitung des Magnetfeldes, sondern die Erzeugung des Magnetfeldes in den Spulen verbessert werden muss.

Aus den Untersuchungen zur Magnetfelderzeugung wurde erkannt:

- 1) Im untersuchten Frequenzbereich von 1-1000 Hz bestimmen die unterschiedlichen Spulenkernwerkstoffe die Magnetfeldstärke nur sehr geringfügig. Somit kann auf weichferritische Magnetkernen verzichtet und stattdessen einfach zu bearbeitende und temperaturbeständigere magnetische Stahlwerkstoffe verwendet werden. Hierdurch ist es möglich auch komplexe Magnetkerngeometrie in der Konstruktion zu berücksichtigen. In Abstimmung mit dem PA erfolgte eine stärkere Fokussierung auf Elektrobleche und Volleisenkerne.
- 2) Ein signifikanter Einfluss konnte der Selbstinduktion in den Spulen zugeordnet werden. So steigt bei Erhöhung der Pendelfrequenz die zur Aufrechterhaltung des Stromes notwendige Spannung sehr stark an. Der Fokus muss deshalb vor allem auf die Auslegung der Magnetfelderzeugung gelegt werden. Spule und Verstärker müssen für hohe Spannungen konzipiert werden. Es ist zu erwarten, dass hierdurch auch die Temperaturbelastung in den Spulen zunimmt. Eine Kühlung der Spulen ist deshalb unerlässlich.

Aus diesen Erkenntnissen wurde abgeleitet, dass zukünftig zur Magnetfelderzeugung geringer Wicklungszahl, aber deutlich Spulen mit mit einem stärkeren Leistungsmodul, welches hohe Spannungsreserven besitzt, verwendet werden. Hierzu wird eine Schweißstromquelle verwendet. Vorteil dieses Aufbaus ist, dass die modifizierte Schweißstromquelle alle elektrischen Sicherheitsanforderungen erfüllt und ohne spezielle Einschränkungen in einer schweißtechnischen Umgebung betrieben werden kann. Der schnelle Wechsel der Magnetfeldausrichtung (Entmagnetisierung) wird durch einen im Stromkreis der Spule in Reihe geschalteten Lastwiderstand unterstützt.



Anschließend wurde die Beeinflussung der Schutzgasströmung durch das Auslenken des Lichtbogens untersucht. Hierfür wurde sowohl das numerische Strömungsmodell (Kapitel 5.2) als auch experimentelle Strömungsvisualisierung mittels Schlieren (Kapitel 5.4) und PIV (Kapitel 5.3) angewendet. Numerische Untersuchungen zeigen eine erhebliche Verschlechterung der Schutzgasabdeckung sobald der Lichtbogen durch das externe Magnetfeld ausgelenkt wird, Abbildung 6.3 (links). Hohe Sauerstoffkonzentrationen werden durch die verstärkte Diffusion von Sauerstoff aufgrund der hohen Lichtbogentemperaturen und durch Lufteinwirbelungen infolge von Turbulenzen im Bereich der Lichtbogenablenkung berechnet. Eine seitliche Ansaugwirkung aus dem nicht abgelenkten Bereich der Schutzgasströmung in den Lichtbogen erfolgt nicht. Die Schutzgasabdeckung auf der nicht vom Lichtbogen erfassten Seite bleibt sehr gut. In PIV-Untersuchungen konnte das numerisch berechnete Strömungsfeld experimentell bestätigt werden, Abbildung 6.3 (rechts). In Schlierenuntersuchengen wurde zudem eine starke Turbulenz der seitlichen Strömung in Folge der Lichtbogenauslenkung festgestellt.





Ein durchgeführter Variantenvergleich mit verschiedenen Varianten von Schutzgasdüsenformen in Kombination mit verschiedenen Durchflussmengen hat gezeigt, dass die Verwendung einer ovalen Schutzgasdüsengeometrie in Kombination mit einem Laminarisierungseinsatz zur gleichmäßigen Verteilung der Gasströmung zu einer deutlichen Verbesserung der Schutzgasabdeckung führt. Außerdem wird durch die größere Geometrie eine thermische Überlastung der Düse aufgrund der Lichtbogenauslenkung vermieden. Durch die numerischen Untersuchungen der Schutzgasströmung wurde erkannt:

- Die seitliche Auslenkung des Lichtbogens führt zwar zu einem seitlichen Abströmen des Schutzgases. Es kommt nicht zu einem Ansaugen von Atmosphärengas von der gegenüberliegenden Seite. Die numerischen Ergebnisse wurden durch PIV-Messungen bestätigt.
- 2) Das Temperaturfeld des Lichtbogens divergiert bei großen Auslenkungen sehr stark, wodurch sich Diffusionseffekte im Bereich der ausgelenkten Seite verstärken. Die Sauerstoffkontamination nimmt erheblich zu. Zusätzlich führt die Auslenkung des Lichtbogens zu einer stärkeren thermischen Belastung der Schutzgasdüse.

Für den Bau des Demonstrators wurden deshalb folgende Möglichkeiten zur Verbesserung der Düsengeometrie abgeleitet und weiterverfolgt:

- Ausführung der Düse mit einem ovalen Querschnitts bzw. als "Langlochdüse"
- Verwendung von Laminarisierungseinsätzen in der Düse zur Vorgabe gradierter Strömungsprofile

Aus den numerisch untersuchten Varianten wurde erkannt, dass die beste Schutzgasabdeckung mit Hilfe der ovalen bzw. Langlochdüse mit eingebautem Strömungssieb erreicht wird.



6.1.2 Aufbau des Demonstrators

Anhand der Ergebnisse aus der Strömungsoptimierung und der Auslegung der Magnetfeldbaugruppe wurde mit Unterstützung der PA-Mitglieder Abicor Binzel Schweißtechnik GmbH & Co. KG und EWM Hightec Welding GmbH ein Demonstratorbrenner konstruiert und gefertigt, Abbildung 6.4. Verwendet wird ein modifizierter Automatenschweißbrenner (ABICOR BINZEL MT400W) mit veränderter Schutzgasdüse und adaptierter Magnetfeldbaugruppe. Die Schutzgasdüse besteht aus zwei Kupferbauteilen, einem aufschraubbaren Kühlkörper mit Wasserkühlung und einer aufgesteckten Düse. Die Querschnittsfläche der Schutzgasausströmung ist in Richtung der Lichtbogenauslenkung verbreitert, wodurch eine bessere Schutzgasdüse sorgt für eine laminare und über dem Umfang gleichmäßige Schutzgasströmung. Die Magnetfeldbaugruppe, bestehend aus zwei Spulen mit Magnetkernen und einem Magnetjoch, wird axial am Brenner befestigt.



Abbildung 6.4: Standardautomatenschweißbrenner (links) und adaptierter WIG-Schweißbrenner mit neu entwickelter Schutzgasdüse und verbesserter Magnetbaugruppe zum magnetischen Lichtbogenpendeln (rechts)



Für den Aufbau der Magnetfeldbaugruppe wurde ein temperaturbeständiger Wickeldraht (Temperaturbelastbarkeit bis 180 °C, Thermoklasse H) auf eine Volleisenkern- bzw. Elektroblechkonstruktion gewickelt. Die Konstruktionen verfügen über Aussparungen im Magnetjoch, so dass sie axial am Brenner befestigt werden können ohne den Magnetfluss zu stören. Die Kühlung der Spulen wurde zunächst indirekt über die Auflage der Drahtwicklungen an der gekühlten Schutzgasdüse realisiert.

Um die Temperaturbelastung während des Schweißens zu beurteilen, wurden am Demonstrator Temperaturmessungen an Schutzgasdüse und Magnetbaugruppe für Stromstärken von 50 A bis 150 A durch Thermographieaufnahmen durchgeführt. Abbildung 6.5 zeigt die am Brenner mittels Thermographie ermittelten Temperaturen in Abhängigkeit der Schweißstromstärke. Bei einer Stromstärke von 150 A wurden am Magnetjoch Temperaturen von über 180 °C erreicht. An den Polschuhen wurden Anschmelzungen festgestellt. Lackisolierter Draht, wie er bei konventionellen Spulen verwendet wird, kann jedoch nur bis zu einer Temperatur von 180 °C (Isolierklasse H, DIN VDE 0530 Teil 1) betrieben werden.



Abbildung 6.5: Thermographieaufnahmen mit eingetragenen Temperaturmesspunkten (SP) am WIG-Demonstrator (ohne Spulenwicklung) bei Stromstärken von 50 A (links), 100 A (Mitte) und 150 A (rechts). Die störende Lichtbogenstrahlung wird durch ein im Strahlengang positioniertes Blech blockiert.

Um die Temperaturen des Magnetkerns und der Spulenwicklung zu senken, werden die Spulenkerne mit einer direkte Kühlung mit Wasser versehen. Berechnungen zur Durchflutung der Magnetkerne ergaben, dass auch viel dünnere Kerne die Leitung des Magnetfeldes sicherstellen, ohne die Sättigung zu erreichen. In einer


angepassten Baugruppe wurde daher der Querschnitt der Kerne verringert und die Wasserkühlung im Kern eingebracht.

Die Spulen wurden zunächst über einen Frequenzgenerator mit Audioverstärker und MATLAB-Steuerungssoftware betrieben. Im Ergebnis der Magnetfelduntersuchungen wurde dieser Aufbau nicht weiterverfolgt und stattdessen ein neues Konzept zur Magnetfelderzeugung aufgebaut, der auf einer umgerüstet AC-Schweißstromquelle (EWM TETRIX 300 AC/DC COMFORT TGD) der Firma EWM basiert, Abbildung 6.6.



Abbildung 6.6: Aufbau der magnetischen Lichtbogenpendeleinrichtung bestehend aus einer modifizierten Schweißstromquelle (links), einem Lastwiderstand und dem Demonstrator

Durch das veränderte Leistungsteil konnten die Spulenkonstruktion nochmals weiterentwickelt werden. Durch das Bereitstellen einer größeren Stromstärke kann die Windungszahl gemindert werden. Es wird ein lackisolierter Wickeldraht mit einem Durchmesser von Ø1,25 mm verwendet. Auf jedem Eisenkern werden 35 Wicklungen aufgebracht. Die Ummagnetisierung wird außerdem durch einen Lastwiderstandes (Dioden) unterstützt.

6.1.3 Erprobung des Demonstrators

Mittels Hochgeschwindigkeitskinematographie wird die Funktionsweise der Lichtbogenauslenkung am Demonstrator überprüft. Im Versuch wird mit einem Schweißstrom von 100 A, einem Elektrodenabstand von 5 mm und einer



Pendelfrequenz von 100 Hz bei einem maximalen Spulenstrom von 10 A im Sinusbetrieb gearbeitet. Als Grundwerkstoff wird Baustahl verwendet. Weiterhin erfolgt ein Belastungstest, bei dem der Demonstrator mit der maximal vorgesehenen Stromstärke von 200 A und pendelndem Lichtbogen betrieben wird.

In Abbildung 6.7 sind Hochgeschwindigkeitsaufnahmen für acht gleichmäßig über einen sinusförmigen Pendelzyklus verteilte Zeitpunkte dargestellt. In den Aufnahmen ist trotz des verwendeten ferritischen Grundwerkstoffs eine große Lichtbogenauslenkung zu beiden Seiten des Schweißbrenners zu beobachten. In Folge der geringen Blechvorschubgeschwindigkeit bildet sich im Versuch ein großes Schmelzbad aus, wodurch eine hohe Metallverdampfung am Werkstück verursacht wird. Der Metalldampf wird durch die Auslenkung des Lichtbogen seitlich abtransportiert, so dass eine gelber fackelartiger Schweif im Bild zu sehen ist.



Abbildung 6.7: Hochgeschwindigkeitskameraaufnahme der magnetischen Lichtbogenablenkung bei 100 A Schweißstrom und einer Pendelfrequenz von 100 Hz auf Baustahl

Die Aufnahmen verdeutlichen die Leistungsfähigkeit des entwickelten Demonstrators im Hinblick auf die zu erzielende Lichtbogenauslenkung und erreichbare Pendelfrequenz. Die hohe Pendelfrequenz des Lichtbogens von bis zu 200 Hz kann ohne Probleme vom Demonstrator realisiert werden. Im Dauerversuch konnte der Demonstrator mit einer maximalen Stromstärke von 200 A betrieben werden. Durch die aktive Kühlung der Kupferdüse und der Spulenkerne bleiben die Temperaturen am Demonstrator trotz der vom Lichtbogen in den Brenner eingebrachten Wärme gering, so dass keine thermische Überlastung der Bauteile auftritt.



6.2 Diagnostizierung der Lichtbogenauslenkung

Lichtbogenauslenkungen wurden bisher vor allem optisch ermittelt. Dies ist als kritisch zu bewerten, da die Helligkeit nicht zwangsläufig dem Strompfad entspricht. Mit Hilfe des Geteilte-Anoden-Verfahrens (Kapitel 5.5) wird überprüft, ob die Verschiebung des Energieeintrags ins Werkstück mit der optischen Auslenkung des Lichtbogens korreliert und in wie weit sich die Energieeintragsverteilung durch das Auslenken des Lichtbogens verändert. Zur Darstellung der Energieeintragsverteilung wird die in Kapitel 5.5 beschriebene neue Auswertemethode angewendet. Zusätzlich werden die im Experiment erfasste Lichtbogengestalt sowie die Strom- und Energieeintragsverteilung am Werkstück verwendet, um die Aussagefähigkeit des numerischen Modells überprüfen. Hierfür werden zu Stromund Energiedichtemessungen für die Stromstärken 75; 100 und 125 A mit und ohne ausgelenkten Lichtbogen durchgeführt.

Eine Möglichkeit, die Lichtbogenauslenkung zu quantifizieren, besteht in der optischen Auswertung der Lichtbogengestalt. Abbildung 6.8 zeigt die Bestimmung der optischen Auslenkung im Experiment und im numerischen Modell anhand der Lichtbogenstrahlung. Durch die Definition eines externen Magnetfeldes gleicher Stromstärke wie im Experiment, wird im numerischen Modell ein Lichtbogen fast identischer Gestalt vorausgesagt. In Abhängigkeit der Belichtungszeit der Kamera verändert sich jedoch die Lichtbogengestalt im Bild, so dass keine eindeutige Beschreibung der optischen Lichtbogenauslenkung mehr möglich ist. Vor allem bei Lichtbögen mit starker Auslenkung bzw. bei geknickten Lichtbögen ist die optische Auswertung der Lichtbogenauslenkung in Frage zu stellen.



Abbildung 6.8: Gegenüberstellung von Hochgeschwindigkeitskameraaufnahmen und num. berechneter Lichtbogenstrahlung mit und ohne Lichtbogenauslenkung



Für das Schweißergebnis ist der Energieeintrag ins Bauteil und somit die Verteilung der Wärmestromdichte auf der Werkstückoberfläche entscheidend. Abbildung 6.9 zeigt die experimentell durch das Geteilte-Anoden-Verfahren bestimmte Verteilung des Strom- und Wärmestromeintrags ins Werkstück bei ausgelenktem Lichtbogen. Die Darstellung der experimentell bestimmten Strom- und Wärmestromverteilung erfolgt jeweils über zwei Bereichsbalken in denen 50 % (grün) bzw. 90 % (rot) vom Gesamtwert erreicht werden. Ein Punkt auf der Werkstückoberfläche verdeutlicht den Ort (Fußpunkt) der maximalen Strom- (lila) bzw. Wärmestromeinbringung (orange). Eine Rückrechnung der experimentellen Daten auf eine kontinuierliche Verteilung ist aufgrund der fehlenden Rotationssymmetrie beim ausgelenkten Lichtbogen nicht möglich. Im Gegensatz zur optischen Lichtbogenauslenkung wird für die Strom- und Wärmestromverteilung am Werkstück eine deutlich geringere Auslenkung des Lichtbogens bestimmt, Abbildung 6.9. Die optische Lichtbogenauslenkung ist daher nicht zur Vorhersage des Energieeintrages zu verwenden.



Abbildung 6.9: Experimentell bestimmte Lichtbogenauslenkung für einen magnetisch ausgelenkten 100 A WIG-Lichtbogen. Optische Lichtbogenauslenkung (links), Auslenkung des Strom- (Mitte) und Wärmestromseintrags am Werkstück (rechts)

Im Gegensatz zur Messung kann im numerischen Modell der kontinuierliche Verlauf der Strom- und Wärmestromdichte auf der Werkstückoberfläche wiedergegeben werden. Der Verlauf ist in Abbildung 6.10 mittels einer roten Line eingezeichnet. Die Skalierung der Kurve entspricht einer Rasterweite von 1 mm und 10⁵ A/m² bei der Strom- bzw. 10⁸ W/m² Wärmestromdichte. Die numerisch berechnete und experimentell bestimmte Lichtbogenauslenkung stimmen sehr gut überein.





Abbildung 6.10: Experimentell bestimmte und numerisch berechnete Strom- bzw. Wärmestromdichte mit und ohne Lichtbogenauslenkung für einen 100 A WIG-Lichtbogen

Die Auslenkung des Lichtbogens bewirkt nicht nur eine reine Verschiebung des Strom- bzw. Wärmestromprofils, sondern führt auch zu einer veränderten Verteilung. Während die Breite des Stromprofils beim Auslenken des Lichtbogens nahezu konstant bleibt, wird das Wärmestromprofil um ca. 25 % verbreitert. Verursacht wird die Verbreiterung des Wärmestromprofils durch die veränderte Lichtbogenströmung zu einer Seite hin, welche zu einer Vergrößerung des Lichtbogens führt und den Energieeintrag verbreitert. Die erreichte Wärmestromdichte wird hierdurch lokal verringert, wodurch der verminderte Einbrand in Abbildung 6.12 beim ausgelenkten Lichtbogen erklärt werden kann. Für Anwendungen, in denen keine konzentrierte Wärmeeinbringung erwünscht ist, lässt sich dieser Effekt gezielt einsetzen und ausnutzen.

Abbildung 6.11 zeigt die Beeinflussung der Strom- und Wärmestromdichte sowie der Lichtbogenauslenkung für unterschiedliche Stromstärken mit und ohne Lichtbogenauslenkung. Ein linearer Zusammenhang zwischen der verwendeten Schweißstromstärke und der Lichtbogenauslenkung besteht nicht. Bei Erhöhung der Schweißstromstärke von 100 A auf 125 A bleibt die Verschiebung des Fußpunktes am Werkstück nahezu konstant. Eine beliebig weite Auslenkung des Lichtbogens ist somit nicht möglich und stellt eine Verfahrensgrenze dar. Gleichzeitig kann die Auslenkungsgrenze genutzt werden, um einen stabilen Fußpunktes am Werkstück auszubilden, der sich auch durch Prozessschwankungen oder Störeinflüsse von Außen nicht beeinflussen lässt.





Abbildung 6.11: Experimentell bestimmte Verteilung von Strom- und Wärmestromeintrag sowie Lichtbogenauslenkung für unterschiedliche Stromstärken



6.3 Ermittlung der Prozessparameter

Im Rahmen des Arbeitspaketes wird der Einfluss der Prozessparameter auf das Magnetfeld bestimmt. Dabei wird die Beeinflussung der Lichtbogenauslenkung durch den Grundwerkstoff und durch die Schweißparameter untersucht. Außerdem werden verschiedene Möglichkeiten zur Quantifizierung der Lichtbogenauslenkung vorgestellt und bewertet.

6.3.1 Beeinflussung der Lichtbogenauslenkung durch den Grundwerkstoff

Die beim Schweißen und Löten eingesetzten Grundwerkstoffe können sowohl ferromagnetisch als auch paramagnetisch sein. Ferromagentische Stahlwerkstoffe wie zum Beispiel ferritischer Stahl (Baustahl 1.0037) besitzen eine hohe magnetische Permeabilität µ (magnetische Leitfähigkeit), so dass sie sehr gut von Magnetfeldern durchdrungen werden können. Werkstoffe wie Kupfer, Aluminium oder austenitischer Stahl (1.4301) sind hingegen paramagnetisch und leiten das magnetische Feld ähnlich schlecht wie Luft. Da hierdurch die Auslenkung des Lichtbogenauslenkung in Abhängigkeit der verwendeten Grundmaterialen, ferromagnetischer Baustahl 1.0037 und paramagnetischer Austenit 1.4301, untersucht. Es wird mit einer Stromstärke von 100 A und einem Spulenstrom von 2 A (ca. 2,5 mT) gearbeitet. Die Charakterisierung der Lichtbogenauslenkung erfolgt optisch in Hochgeschwindigkeitsaufnahmen. Zusätzlich wird das Einbrandverhalten durch Querschliffe bei nicht ausgelenktem und ausgelenktem Lichtbogen bewertet, um Rückschlüsse auf die Energieeintragsverteilung am Werkstück zu erhalten.

Die Versuche an ferritischen und austenitischen Stählen bestätigen die Forschungshypothese, dass bei niedrig legierten Stählen deutlich geringere Auslenkungen erreicht werden und auch der Einbrand deutlich weniger beeinflusst wird, Abbildung 6.12.





Abbildung 6.12: Ermittlung der optischen Lichtbogenauslenkung und Bestimmung des Einbrandprofils auf verschiedenen Stahlwerkstoffen, jeweils mit und ohne Lichtbogenauslenkung. Links: ferritischer Stahl (1.0037), Rechts: austenitischer Stahl (1.4301)

Die Ursache für die geringe Lichtbogenauslenkung auf Ferriten resultiert aus einem erhöhten magnetischen Streufluss durch das Grundmaterial in Folge der besseren magnetischen Leitfähigkeit (magnetische Permeabilität μ_r) des Ferrits. Hierdurch verringert sich das zur Lichtbogenauslenkung zur Verfügung stehende Magnetfeld im Bereich des Lichtbogens. Bei der Auswahl geeigneter Lichtbogenpendelparameter muss die Abhängigkeit der Lichtbogenauslenkung vom verwendeten Grundmaterial beachtet werden.

Im Querschliff kann bei ausgelenktem Lichtbogen außerdem ein breiteres und gleichzeitig flacheres Einbrandprofil beobachtet werden. Die Auslenkung des Lichtbogens führt zudem zu einer Oberflächendeformation der Naht.

6.3.2 Beeinflussung der Lichtbogenauslenkung durch die Prozessparameter

Für die praktische Anwendung der Lichtbogenpendeltechnik ist es erforderlich, die wesentlichen Einflussfaktoren zur Beeinflussung der Lichtbogenauslenkung zu kennen, damit gezielt günstige Pendelparameter einstellt bzw. auf Prozessänderungen reagieren werden kann. Weiterhin ermöglicht dies die direkte Kopplung der Prozessparameter der Schweißstromquelle mit den Lichtbogenpendelparametern. Hierfür wird die Sensitivität der Lichtbogenauslenkung sowie der Stromund Energieeintrag bei veränderten Schweißprozessparametern mit und ohne Lichtbogenauslenkung untersucht. Bei ausgelenktem Lichtbogen wird ein externes Magnetfeld von 2,5 mT angelegt. Verändert werden die Schweißstromstärke der Elektrodenabstand, die Polschuhposition, der Kathodenwinkel, der Schutzgas-



volumenstrom sowie die Schutzgasart. Tabelle 6.1 zeigt den Versuchsplan zur Untersuchung der Prozessparameter.

Tabelle 6.1: Variation der Prozessparameter

Standardparameter:

Merkmal	Wert
Stromstärke [A]	100
Elektrodenabstand [mm]	5
Polschuhposition [mm]	10
Elektrodenanspitzwinkel [°]	30
Schutzgasvolumenstrom [l/min]	12
Schutzgasart	Argon
Ext. Magnetfeld [mT] / Spulenstrom [A]	2,5 / 2



Versuchsplan:

Reihe A (grob)	Variation des externen Magnetfeldes			
Spulenstrom [A]	0 2 4			4
Reihe B (fein)	Variation des externen Magnetfeldes			
Spulenstrom [A]	0	1	2 3	4
Merkmal	Reihe	ihe Variation		
Stromstärke [A]	A/B	75	100	125
Elektrodenabstand [mm]	А	5	8	
Polschuhposition [mm]	A/B	10	20	
Elektrodenanspitzwinkel [°]	A	10	30	60
Schutzgasvolumenstrom [l/min]	A	12	20	
Schutzgasart	А	Argon (Ar 4.6)	Argon/Helium (50/50)	

Die Ergebnisse sind in einer Einflussmatrix übersichtlich dargestellt, so dass die Beeinflussung bei Veränderung der Prozessparameter leicht abgeschätzt werden können, Abbildung 6.13. So haben Veränderungen der Lichtbogenstromstärke, -länge sowie die Position der Polschuhe und die Art des Schutzgases einen großen Einfluss auf die resultierende Lichtbogenauslenkung. Wird die Stromstärke von 75 A auf 100 A gesteigert, verringert sich die Lichtbogenauslenkung um mehr als die



Hälfte. Die Vergrößerung des Elektrodenabstandes von 5 mm auf 8 mm führt hingegen zu einer Verdopplung der Lichtbogenauslenkung. Wird die Schutzgaszusammensetzung von Argon auf ein Argon/Helium-Gemisch (50/50) geändert, wird bei einer Stromstärke von 100 A eine nur halb so große Lichtbogenauslenkung gemessen. Bei Veränderung des Kathodenwinkels tritt hingegen nur eine geringe Beeinflussung der Auslenkung auf. Die Vergrößerung des Kathodenanspitzwinkels von 30° auf 60° bewirkt lediglich eine Erhöhung der Auslenkung um ca. 15 %. Eine Erhöhung des Schutzgasvolumenstromes von 12 l/min auf 20 l/min bewirkt hingegen keine Veränderung der Lichtbogenauslenkung.

Variations- parameter	keinen Einfluss	geringer Einfluss	großer Einfluss
Lichtbogen- stromstärke			\checkmark
Elektrodenabstand			\checkmark
Polschuhposition			\checkmark
Kathodenwinkel		\checkmark	
Schutzgas- volumenstrom	\checkmark		
Schutzgasart			\checkmark

Abbildung 6.13: Bewertung der Einflussfaktoren auf die Strom- und Wärmestromdichte sowie die Lichtbogenauslenkung

Mit Hilfe der Einflussmatrix (Abbildung 6.13) kann abgeschätzt werden, in wie weit prozessbedingte Veränderungen der Schweißparameter die Lichtbogenauslenkung beeinflussen und welche Prozessparameter außer der Magnetfeldstärke verwendet werden können, um einer unerwünschten Veränderung der Lichtbogenauslenkung entgegen zu wirken. So kann der verringerten Auslenkung des Lichtbogens beim Wechsel des Grundmaterials von einem austenitischen auf einen ferritischen Werkstoff zum Beispiel durch eine Verlängerung des Elektrodenabstandes begegnet werden, um eine gleich bleibende Lichtbogenauslenkung zu erzielen.



6.4 Kopplung der Regelung mit der Stromquelle

Das Arbeitspaket "Kopplung und Regelung mit der Stromquelle" sieht vor, die Lichtbogenpendelparameter direkt bei der Auswahl der Schweißparameter zu berücksichtigen, um dem Bediener eine einfache und schnelle Handhabung der Lichtbogenpendeltechnik zu ermöglichen. Moderne Stromquellen besitzen eine Vielzahl von Steuerungs- und Regelungsmöglichkeiten, die eine Kopplung und den Austausch mit zusätzlichen Geräten wie Roboter oder einer Lichtbogenpendeleinheit ermöglichen. Die Schnittstellen der Schweißstromquelle zu anderen Geräten sind jedoch nicht standardisiert, sondern herstellerspezifisch.

Zu Beginn des Projektes wurden zwei Labornetzteile über eine Verstärkerschaltung miteinander verschaltet und zur Ansteuerung der Spulen verwendet. Mit Hilfe der Software MATLAB konnte ein beliebiger, zeitabhängige Spulenstrom vorgegeben werden. Dieser Ansatz wurde jedoch aufgrund der fehlenden Leistungsreserven und der nicht für HF-Zündimpulse geeigneten Geräte nicht weiter verfolgt und stattdessen eine zusätzliche modifizierte Schweißstromquelle zur Ansteuerung der Spulen verwendet. Zum Pendeln des Lichtbogens werden somit zwei Schweißstromquellen eingesetzt. Eine Stromquelle stellt den Schweißstrom des Lichtbogens, die andere den Spulenstrom zur Erzeugung des Magnetfeldes zur Verfügung. Moderne Stromquellen ermöglichen den Einsatz von Heißdrahttechnik, bei der ebenfalls zwei Stromquellen im Master-Slave Betrieb verwendet werden. Eine Adaption von Schweißstrom- und der herstellerspezifischen Pendelstromquelle ist laut den im PA vertretenen Stromquellenherstellen unproblematisch möglich. Zugleich ist es hierüber auch möglich, die Schweiß- und Lichtbogenpendelparameter direkt bei der Auswahl der Schweißparameter zu berücksichtigen, um dem Bediener eine einfache und schnelle Handhabung der Lichtbogenpendeltechnik zu ermöglichen.



6.5 Bauteilerprobung

Es wird die Verbesserung der Toleranzfähigkeit des Fügeprozesses durch magnetisches Pendeln des Lichtbogens beim Löten verzinkter Stahlbleche im Bördelstöß untersucht. Verwendet werden schmelztauchverzinkte (DX54+Z100) und elektrolytisch verzinkte Stahlbleche (DC06+ZE75/75-B-PO) mit und ohne phosphatierter Oberfläche. Die 0,8 mm dicken Blech sind mit einem Bördelradius von 2 mm versehen. Es werden der seitliche Brennerversatz zur Fuge, der Höhenversatz und der Lötspalt zwischen den Blechen sowie die Lötgeschwindigkeit variiert. Tabelle 6.2 zeigt den untersuchten Parameterbereich.

Merkmal	Schrittweite	Variationsbereich
Brennerseitenversatz x [mm]	0,2	0 2
Lötspaltbreite s [mm]	0,5	0 2
Blechhöhenversatz h [mm]	0,5	0 2
Lötgeschwindigkeit [m/min]	0,5	0,5 5

Tabelle 6.2: Variation der Prozessparameter für Referenzbauteile

Als Zusatzwerkstoff werden Ø1,6 mm dicke Drähte aus CuSi3 und CuSn6P verwendet. CuSn6P hat gegenüber dem standardmäßig zum Löten verwendeten deutlich Fließeigenschaften, wodurch CuSi3-Lot bessere eine leichtere Prozessbeeinflussung ermöglicht wird. Die Drahtfördergeschwindigkeit wird so angepasst, dass die Lötfuge gut ausgefüllt wird. Es wird mit einem Abstand der Elektrode zum Blech von 1 mm gearbeitet. Beim magnetisch gependeltem Lichtbogen wird ein sinusförmiger Spulenstrom mit einer mittleren Stromstärke von 2 A (2,5 mT) verwendet. Um auch bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten unerwünschte Lichtbogenpendelspuren auf der Blechoberseite zu verhindern wird eine Pendelfrequenz von 100 Hz vorgegeben.

Abbildung 6.14 zeigt den verwendeten Versuchsaufbau bestehend aus Schweiß- und Pendelstromquelle, Linearfahrtisch sowie dem mit einer Kaltdrahtzuführung versehenen Demonstrator zum magnetischen Pendeln des Lichtbogens.





Abbildung 6.14: Versuchsstand zum Bördelnahtlöten bestehend aus Schweiß- und Pendelstromquelle, Linearfahrtisch sowie dem mit einer Kaltdrahtzuführung versehenen Demonstrator zum magnetischen Pendeln des Lichtbogens

Es konnte festgestellt werden, dass durch ein periodisches Auslenken des Lichtbogens größere Abweichungen der Elektrodenposition von der Mittellage beherrscht werden können, Abbildung 6.15 (links). Während im konventionellem Prozess ohne periodische Lichtbogenauslenkung nahezu keine Abweichung von der Mittellage toleriert wird, können durch einen magnetisch gependelten Lichtbogen Abweichungen der Elektrodenposition von der Mittellage bis 0,5 mm beherrscht werden. Abbildung 6.15 (rechts) zeigt die zugehörigen Lötnähte mit und ohne eine magnetische Lichtbogenoszillation. Beim konventionellem Prozess erfolgt die Anbindung des Lotes infolge einer um 0,5 mm nach oben verschobenen Brennerposition fast ausschließlich auf dem oberen Blech. Das untere Blech wird nur sporadisch angebunden. Durch die periodische Auslenkung des Lichtbogens kann eine deutlich bessere Anbindung des Lotes auf dem zweiten Blech erreicht werden, was auf die Verschiebung des Energieeintrages zum unteren Blech hin zurückzuführen ist. In Abhängigkeit der verwendeten Pendelfrequenz können jedoch Pendelspuren auf den Blechen und auf der Lötoberfläche auftreten, welche die Qualität der Lötnaht beinträchtigen. Zur Vermeidung unerwünschter Pendelspuren muss mit hohen Frequenzen, zum Beispiel 100 Hz, gearbeitet werden.





Abbildung 6.15: Einfluss des Brennerversatzes auf die Lötbarkeit. Links: Toleranzfeld des Lötprozesses mit und ohne magnetisch gependeltem Lichtbogen. Rechts: gelötete Blechproben bei einem Brennerversatz von 0,5 mm

Bei der Brennerpositionierung ohne Versatz wird durch das Pendeln des Lichtbogens ein ähnliches Lötergebnis erzielt, wie beim konventionellen Prozess. Lotnahtbreite und Erscheinungsbild der beeinflussten Zinkschicht auf der Rückseite sind äquivalent.

Weiterhin wurde untersucht, in wie weit ein einseitiges Ansetzen des Lichtbogens bei einem vorgegebenen Höhenversatz der Fügepartner durch eine periodische Auslenkung des Lichtbogens vermieden werden kann und eine Benetzung des Lotes auf beiden Blechen ermöglicht. Dabei wurde festgestellt, dass ein periodisches Auslenken signifikanten Verbesserung des Lichtbogens zu keiner des Anbindungsverhaltens führt, Abbildung 6.16 (links). Mittels Hochgeschwindigkeitskinematographie konnte zwar die Auslenkung des Lichtbogens auf beiden Bleche beobachtet werden, jedoch erfolgte die Lotanbindung bevorzugt auf dem erhöhten Blech.



44



mit Pendeln ($v_s = 0.6$ m/min; $v_{Draht} = 1.3$ m/min (CuSn6P); $I_{weld} = 120A$; $I_{coil} = 2A$ [100Hz])

Abbildung 6.16: Einfluss des Blechhöhenversatzes auf die Lötbarkeit. Links: Toleranzfeld des Lötprozesses mit und ohne magnetisch gependeltem Lichtbogen. Rechts: gelötete Blechproben bei einem Blechhöhenversatz von 2,0 mm

Mit Hilfe des magnetisch gependelten Lichtbogens konnte die maximal erreichbare Spaltüberbrückbarkeit erhöht werden. Beim konventionellem Prozess konnten in den Versuchen nur Bleche mit einer Luftspaltbreite bis 0,5 mm sicher verlötet werden. Durch den Einsatz des magnetisch gependelten Lichtbogens konnte die Spaltüberbrückbarkeit auf 1,0 mm gesteigert werden, Abbildung 6.17. Durch die Verwendung eines Ø1,6 mm dicken Drahtes wurde trotz Luftspalt eine Führung des Zusatzwerkstoff im Blechspalt erreicht.



mit Pendeln (v_s = 0,6 m/min; v_{Draht} = 1,3 m/min (CuSn6P); EL_{Dist} = 1mm; I_{weld} = 120A; I_{coil} = 2A [100Hz])

Abbildung 6.17: Einfluss der Blechsplatgröße auf die Lötbarkeit. Links: Toleranzfeld des Lötprozesses mit und ohne magnetisch gependeltem Lichtbogen. Rechts: gelötete Blechproben mit 1,0 mm Spalt zwischen den Fügepartnern



45

Des Weiteren wurde untersucht, in wie fern sich durch den Einsatz eines magnetisch gependelten WIG-Lichtbogens die Lötgeschwindigkeit steigern lässt. Die Vorschubgeschwindigkeiten wurde dabei zwischen 0,5 und 5 m/min variiert. In Abbildung 6.18 (links) sind die Ergebnisse der Lötgeschwindigkeitsvariation dargestellt. Im Vergleich zum konventionellem Prozess konnte das Geschwindigkeitsfenster für gualitativ gute Lötnähte (grüner Bereich) trotz Pendelns nicht beeinflusst werden. Bei hohen Lötgeschwindigkeiten (>2,5 m/min) wurde sogar eine Verschlechterung des Lötung Abbildung 6.18 (rechts). Ursache ist dabei die festaestellt. verbreiterte Energieeinbringung infolge der magnetischen Lichtbogenauslenkung, wodurch der Zusatzwerkstoff nur ungenügend aufgeschmolzen wird, so dass ein Teil des Drahtes unaufgeschmolzen im Lotgut vorliegt. Eine Erhöhung der Lichtbogenleistung zur Aufschmelzung des Drahtes führt jedoch zu unerwünschten Zinkverdampfungen auf der Blechrückseite. Durch eine Verringerung der Lichtbogenauslenkung konnte zwar die Energieeinbringung in den Draht erhöht werden, jedoch geht hierdurch auch das Potential, das einseitige Ansetzen des Lichtbogens auf den Blechen zu verhindern, verloren.



mit Pendeln ($v_s = 2,0$ m/min; $v_{Draht} = 4,5$ m/min (CuSn6P); EL_{Dist} = 1mm; I_{weld} = 180A; I_{coil} = 2A [100Hz])

Abbildung 6.18: Einfluss der Lötgeschwindigkeit auf die Lötbarkeit. Links: Toleranzfeld des Lötprozesses mit und ohne magnetisch gependeltem Lichtbogen. Rechts: mit magnetisch gependeltem Lichtbogen gelötete Blechproben für 0,6 m/min und 2,0 m/min Lötgeschwindigkeit



Zusammenfassend wird festgestellt, dass das magnetische Pendeln des Lichtbogens vor allem bei der Positionierung des Brenners über dem Bördel größere Toleranzen ermöglicht. Außerdem führt eine periodische Auslenkung des Lichtbogens zu einer besseren Spaltüberbrückbarkeit, so dass Spalte zwischen den beiden Blechen besser kompensiert werden können. Im Bezug auf den Ausgleich eines Höhenversatzes zwischen den beiden Fügepartnern wurde hingegen keine Einfluss festgestellt. Bei schnellen Lötgeschwindigkeiten wird hingegen eine geringfügige Verschlechterung des Lötergebnissen aufgrund einer zu breiten Energieeinbringung ins Blech beobachtet.



Abbildung 6.19: Übersicht zur Veränderung des Prozesstoleranzfeldes beim Löten verzinkter Bleche im Bördelstoß durch den Einsatz eines magnetisch gependelten Lichtbogens

Untersuchungen mit verschiedenen Lotwerkstoffen zeigen außerdem eine starke Abhängigkeit der Prozessbeeinflussbarkeit durch das Fließverhalten des Lotes. Besonders mit dem "Standardlot" CuSi3 sind kaum Verbesserung erzielbar. Zur Nutzung der Vorteile eines magnetisch gependelten Lichtbogens bei der Erweiterung des Prozesstoleranzfeldes ist eine geringe Viskosität des Lotes (z. B. CuSn6P) notwendig. Es ist somit erforderlich den Lotwerkstoff an das Verfahren anzupassen, um die Vorteile eines magnetisch gependelten WIG-Lichtbogens auszuschöpfen.



6.6 Entwicklung eines magnetisch gependelter WIG-Engspaltbrenners

Im Rahmen des Projektes wurde zusätzlich zum eigentlichen Projektumfang die Möglichkeit einer magnetischen Lichtbogenauslenkung im Engspalt untersucht. In Zusammenarbeit mit den im PA vertretenen Engspaltanwendern wurde ein Demonstrator zum magnetischen Pendeln des Lichtbogens im Engspalt entwickelt und erprobt.

6.6.1 Aufbau des Demonstrators zum magnetisch gependelter WIG-Engspaltschweißen

Aufbauend auf den Ergebnissen zur Entwicklung eines magnetisch gependelten Demonstrators zum Löten verzinkter Stahlbleche wird ein magnetisch gependelter WIG-Engspaltbrenner entwickelt. Basis ist ein Engspaltschweißbrenner mit mechanisch gependelter Elektrode. Die abgeknickte Elektrode wird durch eine gerade Elektrode ersetzt. Der Brenner wird mit einer Magnetfeldbaugruppe zum berührungslosen, magnetischen Auslenken des Lichtbogens versehen.

Abbildung 6.20 zeigt das Engspaltschwert mit integrierter Magnetfeldbaugruppe zum Auslenken des Lichtbogens. Bei bisherigen Brennerkonzepten mit magnetischer Lichtbogenauslenkung wurden die Spulen jeweils seitlich am Brenner angebracht, so dass sie sich im Engspalt befinden. Hierdurch ergeben sich eine Reihe von Nachteilen, wie zum Beispiel eine relativ große Engspaltschwertdicke aufgrund des erhöhten Platzbedarfs der Spulenkörper oder der Einbau einer zusätzlichen Spulenkühlung. Im entwickelten Demonstrator befindet sich die Spule zur Magnetfelderzeugung hingegen außerhalb des Engspaltes, so dass keine Nachteile für die Engspaltschwertkonstruktion entstehen. Das Magnetfeld wird über zwei seitlich in das Engspaltschwert eingefasste dünne Eisenkerne (Elektrobleche) von der Spule zum Lichtbogen geleitet. Die Ausformung so genannter Polschuhe wurde durch Veränderung der Querschnittsfläche am Blechende realisiert, so dass sich das Magnetfeld zum Lichtbogen hin verdichtet. Zur Visualisierung des Magnetfeldes werden Eisenspäne gleichmäßig auf einer Glasplatte verteilt und diese auf die Magnetfeldbaugruppe aufgelegt. Beim Anschalten der Spule richten sich die Eisenspäne entlang der magnetischen Feldlinien aus, so dass ein Abbild des



Magnetfeldes sichtbar wird. Bereiche mit starker lokaler Anhäufung von Eisenspänen weisen auf eine große magnetische Flussdichte hin, Abbildung 6.20 (rechts). Ein Teil des von der Spule erzeugten Magnetfeldes wird durch Streuverluste nicht in das Elektroblech eingekoppelt. Jedoch bestätigt die verstärkte Ansammlung von Eisenspänen zwischen den Polschuhen die Ausbildung eines starken Magnetfeldes, welches zur Auslenkung des Lichtbogens zur Verfügung steht.



Abbildung 6.20: Konstruktion (links) und Umsetzung (Mitte) eines Demonstrators zum magnetischen pendeln des Lichtbogens im Engspalt. Rechts: Visualisierung des Magnetfeldes durch Eisenspäne

Als Spule wird ein dicker lackisolierter Kupferdraht verwendet, der auf ein Magnetjoch gewickelt ist (ca. 200 Wicklungen). Die bei der Magnetfelderzeugung entstehende Wärme in der Spule wird durch ein im Magnetjoch integrierten Kühlwasserkreislauf abgeführt, um eine thermische Überlastung der Spule zu vermeiden. Außerdem fasst das Magnetjoch die beiden aus dem Engspaltschwert kommenden Elektrobleche, so dass das Magnetfeld in diese einkoppelt. Zur Ansteuerung der Spule wird die schon beim ersten Demonstrator verwendete



modifizierte AC/DC Schweißstromquelle mit Lastwiderstand verwendet. Die im Engspaltschwert schräg eingesetzte Elektrode zum mechanischen Pendeln wurde durch eine gerade Elektrode ausgetauscht.

6.6.2 Erprobung des Demonstrators zum magnetisch gependelten WIG-Engspaltschweißen

Die Erprobung des Demonstrators zum magnetisch gependelten WIG-Engspaltschweißen erfolgt an einer simulierten Engspaltgeometrie. Der Lichtbogen wird auf einer gekühlten Kupferplatte bei einem Schweißstrom von 150 A betrieben. Durch zwei weitere, senkrecht auf der Kupferplatte aufgesetzte, Kupferblöcke wurde die Geometrie des Engspalts nachempfunden und eine Spaltbreite von 12 mm eingestellt. Der Elektrodenabstand beträgt 5 mm. Am Demonstrator wird ein Schutzgasvolumenstrom von 12 l/min Argon eingestellt. Die Spulen wurde mit einem Strom von 20 A bei einer Frequenz von 100 Hz im Recheckpuls betrieben. Untersucht wird die im Engspalt maximal erreichbare Lichtbogenauslenkung sowie das Lichtbogenpendelverhalten zu den Flanken hin.

In Abbildung 6.21 sind Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der maximal nach links bzw. rechts erreichten Lichtbogenauslenkung bei 20 A Spulenstrom im Engspalt sowie die neutrale Lichtbogenposition dargestellt. Die optisch bestimmte Lichtbogenablenkung nach links bzw. rechts beträgt im Versuch ca. 2,5 mm.



Abbildung 6.21: Hochgeschwindigkeitskameraaufnahme der magnetischen Lichtbogenablenkung im Engspalt (12 mm) bei 150 A Schweißstrom und einer Pendelfrequenz von 100 Hz



Das Potential des vorgestellten Konzeptes zur magnetischen Lichtbogenauslenkung im Engspalt lässt sich vor allem im Hinblick auf die Konzipierung eines Engspaltschwertes mit verringerter Schwertbreite nutzen. Hierdurch kann beim Fügen dickwandiger Bauteile die erforderliche Spaltbreite und somit das aufzufüllende Nahtvolumen deutlich reduziert werden, wodurch die benötigte Schweißzeit verkürzt wird. Durch die Verwendung von Elektroblechen zur Leitung des Magnetfeldes und einer außerhalb des Engspalts befindlichen Spule, kann auf eine aufwendige Anordnung der Spulen im Engspalt verzichtet werden. Auf eine Kinematik zur mechanischen Lichtbogenauslenkung der Elektrode kann beim Einsatz eines magnetisch gependelten Lichtbogens ebenfalls verzichtet werden. Über die eingesetzte Stromquelle zur Ansteuerung der Spule sind periodische Lichtbogenauslenkungen mit Sinus-, Rechteck- oder einer beliebigen Charakteristik bis zu einer maximalen Frequenz von 200 Hz möglich. Hierdurch lässt sich der Energieeintrag in den Nutgrund und in die Nahtflanken exakt steuern, wodurch eine sichere Anbindung des zugeführten Zusatzwerkstoffes an den Grundwerkstoff sichergestellt werden kann.



7 Gegenüberstellung von Ergebnissen und Zielsetzung

Das Ziel des Forschungsvorhabens war es, die Prozesssicherheit beim WIG-Schweißen und -Löten durch eine periodische magnetische Auslenkung des Lichtbogens zu erhöhen. Hierdurch sollte die Nacharbeit reduziert und die Vorschubgeschwindigkeit erhöht werden.

Im Rahmen des Projekts wurde ein kompakter und gut gekühlter WIG-Demonstrator mit magnetischer Lichtbogenpendeleinheit entwickelt und erprobt. Hierbei wurde erkannt, dass hochdynamische Ferritwerkstoffe (Weichferrite) im untersuchten Frequenzbereich keine Vorteile bei der Leitung des Magnetfeldes gegenüber Eisenkernen aus Baustahl besitzen. Über ein Magnetjoch, welches die beiden Spulenkerne miteinander verbindet und so genannte Polschuhe konnte die Leistungsfähigkeit der Elektromagnete und somit die Stärke der Lichtbogenauslenkung deutlich gesteigert werden. Durch die aktive Kühlung der Eisenkerne wird die thermische Überlastung der Spulen verhindert. Die aus einem lackisolierten Kupferdraht vergleichsweise großem mit Leitungsquerschnitt (Ø1.25 mm) bestehenden Spulen sind direkt auf die aktiv gekühlten Eisenkerne gewickelt. Die hieraus entstehende geringe Induktivität der Spule ermöglicht die Erzeugung starker Magnetfelder auch bei hohen Pendelfrequenzen. Die durch das Auslenken des Lichtbogens veränderte Prozessgasströmung wurde durch numerische und diagnostische Methoden (Schlierentechnik und PIV-Messungen) untersucht. Mit dem in ANSYS CFX entwickelten Lichtbogenmodell konnte die Beeinflussung der Schutzgasströmung durch den ausgelenkten Lichtbogen analysiert werden. In einem Variantenvergleich wurde eine in Auslenkungsrichtung vergrößerte ovale Düsenform als beste Schutzgasdüsengeometrie bestimmt und am Demonstrator praktisch umgesetzt. Die Erkenntnisse wurden in Konstruktionsempfehlungen zusammengefasst und ein Demonstrator entwickelt und erprobt.

Am Demonstrator wurden, wie im Projekt beantragt, Untersuchungen zur Quantifizierung der Lichtbogenauslenkung durchgeführt. Neben der bisher vor allem optisch in Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bestimmten Lichtbogenauslenkung wurde die Auslenkung des Lichtbogens über die Strom- und Energieeintrags-



messung am Werkstück ermittelt. Hierfür wurde das Geteilte-Anoden-Verfahren verwendete, welches die genaue Lokalisierung der Strom- und Energieeintragsverteilung am Werkstück erlaubt. Hierüber konnte die Lichtbogenauslenkung auf Basis der Energieeinbringung ermittelt werden, welche sich deutlich von der optisch bestimmten Lichtbogenauslenkung unterscheidet. Über die Variation der Prozessparameter wurden die sensitiven Parameter zur Beeinflussung der Lichtbogenauslenkung ermittelt, so dass dem Anwender umfangreiche Erkenntnisse zur Beeinflussung der Lichtbogenauslenkung zur Verfügung stehen.

Mit Hilfe des Demonstrators wurden geeignete Parameter zum Löten von Referenzbauteilen mittels pendelndem Lichtbogen ermittelt und erprobt. In Versuchen wurde die Verbesserung der Toleranzfähigkeit des Fügeprozesses durch magnetisches Pendeln des Lichtbogens im Vergleich zum konventionellem Prozess beim Löten verzinkter Stahlbleche im Bördelstoß untersucht. Es wurden der seitliche Brennerversatz zur Fuge, der Höhenversatz und der Lötspalt zwischen den Blechen sowie die Lötgeschwindigkeit variiert. Die Versuche haben gezeigt, dass vor allem in Hinblick auf die noch beherrschbare Spaltüberbrückbarkeit zwischen den Fügepartnern und der Positionierung des Brenners über dem Bördel Verbesserungen gegenüber dem konventionellem Prozess ohne Lichtbogenauslenkung erzielt werden konnte.

Zusätzlich zum eigentlichen Projektumfang und auf Wunsch des PA's wurde ein Demonstrator zum magnetischen Pendeln des Lichtbogens im Engspalt entwickelt. Als Basis diente ein Engspaltschweißbrenner mit mechanisch gependelter Elektrode. Am Brenner wurde eine Magnetfeldbaugruppe zum berührungslosen, magnetischen Lichtbogens adaptiert. Mittels Eisenspänen Auslenken des erfolate eine Visualisierung des Magnetfeldes. Der Demonstrator zum magnetisch gependelten WIG-Engspaltschweißen wurde an einer simulierten Engspaltgeometrie getestet. Untersucht wurde die im Engspalt maximal erreichbare Lichtbogenauslenkung sowie das Lichtbogenpendelverhalten zu den Flanken hin.



8 Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse für kmU

8.1 Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse

Im Rahmen des Vorhabens wurden Untersuchungen zur Stabilisierung des Lichtbogens durch magnetisches Pendeln durchgeführt. Dabei wurden neue Möglichkeiten zur Charakterisierung der Lichtbogenauslenkung entwickelt. Es konnte gezeigt werden, dass die optische Ermittlung der Lichtbogenauslenkung zur Vorhersage des Energieeinbringungsortes ins Werkstück nicht geeignet ist. Eine exakte Lokalisierung der Energieeinbringung ist nur mit Hilfe des Geteilte-Anoden-Verfahren möglich. Zur Beschreibung der Energieverteilung am Werkstück wurde eine neuartige Methode entwickelt, welches eine Auswertung der aufgenommenen Messkurven aus dem Geteilte-Anoden-Verfahren auch für eine nicht rotationssymmetrische Energieverteilung am Werkstück, wie sie bei ausgelenkten Lichtbögen auftritt, ermöglicht. Außerdem konnte gezeigt werden, dass heutige numerische Modelle des Lichtbogens in der Lage sind, sowohl das optische Erscheinungsbild des Lichtbogens als auch die Strom- und Energiedichteverteilung am Werkstück äquivalent zum Experiment vorherzusagen. Dies ermöglicht eine detaillierte Betrachtung von experimentell nur schwer zugänglichen physikalischen Größen sowie Effekte im Lichtbogen und das Ableiten komplexer Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge.



8.2 Industrielle Anwendung der Forschungsergebnisse

Durch das Projekt stehen dem Anwender umfangreiche Erkenntnisse zu magnetisch ausgelenkten Lichtbögen zur Verfügung, die einen industriellen Einsatz dieser innovativen Verfahrenserweiterung ermöglicht. Vorteil der magnetisch gependelten Lichtbogentechnik ist, dass ein einseitiges Ansetzen des Lichtbogens auf den infolge prozessbedingter äußerer Störeinflüsse, Fügepartnern. durch ein überlagertes permanentes magnetisches Pendeln ausgeglichen werden kann. Das magnetische Pendeln bietet damit die Möglichkeit, Prozesse bei KMU mit dem WIG-Lichtbogen ausführen, für die bisher technologisch aufwändigere Verfahren notwendig sind. Die Forschungsergebnisse werden in Versuchen zum Löten verzinkter Stahlbleche weitergeführt und das Verbesserungspotential von Lichtbogenauslenkung magnetischer in Kombination neuen angepassten Lotwerkstoffen analysiert. Zudem kommen die Erkenntnisse zur Beeinflussung des Energieeintrages durch magnetisches Pendel des Lichtbogens bei Anwendungen zum "Finishen" von Nähten zum Einsatz. Hierbei werden prozessbedingte Einbrandkerben durch einen nachgeführten magnetisch gependelten Lichtbogen beseitigt.

Aus den Erkenntnissen zur Gestaltung der Magnetfeldbaugruppe wurde ein Konzept für einen Demonstrator zum magnetischen Pendeln des Lichtbogens im Engspalt abgeleitet und ein weiterer Demonstrator aufgebaut. Der Demonstrator wurde zunächst an einer simulierten Engspaltgeometrie aus Kupfer getestet und befindet sich in weiterer Erprobung an bauteilähnlichen Probekörpern.



55

9 Erläuterung zur Kostenaufteilung

9.1 Erläuterungen zu Personaleinsatz

Der wissenschaftliche Mitarbeiter führte in Vollzeitbeschäftigung die notwendigen Entwicklungsschritte zum Aufbau des Demonstrators, die Modellierung und Validierung des Schutzgasströmungsmodells sowie die Durchführung bzw. Überwachung der Versuche durch. Die Untersuchungen wurden vom wissenschaftlichen Mitarbeiter ausgewertet und die Ergebnisse zusammengeführt.

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

Die studentischen Hilfskräfte haben vorwiegend bei der Anpassung der Versuchsstände und der Durchführung von Messungen mitgearbeitet.

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

9.2 Erläuterungen zu Geräteanschaffung

Es wurde eine MATLAB-Software Lizenz für 4997,43 € angeschafft. Die Software wurde verwendet, um zwei über eine Verstärkerschaltung miteinander verschaltete Labornetzteile anzusteuern und einen beliebigen, zeitabhängigen Spulenstrom zum magnetischen Auslenken des Lichtbogens vorzugeben.

9.3 Erläuterungen zu Leistungen Dritter

Es wurde keine Leistung Dritter in Anspruch genommnen.



10 Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen

Im Rahmen dieses Projektes wurden in den Jahren 2010-2013 mehrere Sitzungen des PA durchgeführt. Die aktuellen Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden weiterhin den jeweiligen Sitzungen des Fachausschuss 3 des Deutschen Verbandes für Schweißtechnik und verwandte Verfahren (DVS) vorgelegt. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse des Forschungsprojektes im Rahmen von Vorträgen und Postern auf verschiedenen nationalen und internationalen Tagungen und Kongressen vorgestellt. In Form von Workshops für KMU wurden die Ergebnisse ausführlich dargelegt und anwendungsorientiert diskutiert. Ein Überblick über die konkreten Transfermaßnahmen wird in gegeben.

	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Maßnahme A Projektbegleitender Ausschuss	Diskussion der Forschungs- ergebnisse im PA	 A1: Vorstellung des Projektes A2: Vorstellung der erzielten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens A3: Vorstellung der erzielten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens A4: Abschlusspräsentation 	 A1: 5. Mai 2011 TU Dresden A2: 29. März 2012 TU Dresden A3: 18. April 2012 Linde AG, Unter- schleißheim A4: 23. Januar 2013 TU Dresden
Maßnahme B Transfer der Projektergebnisse über FA3 (Lichtbogen)	Information über das laufende Forschungsprojekt	B1: Vorstellung der erzielten Ergeb- nisse und Diskussion des weiteren Vorgehens	 B1: 13. Oktober 2011 Berlin B1: 13. März 2012 Greifswald B1: 10. Oktober 2012 Düsseldorf B1: 13. März 2012 Magdeburg
Maßnahme C Fachvorträge auf Konferenzen	Information interessierter Firmen	C1: GST 2013 C2: IIW Assembly C3: Institutsseminare	 C1: Vortrag auf dem DVS Congress 2013 Essen (eingereicht) C2: Vortrag auf der IIW 2012 in Denver, Commission XII

Tabelle 10	0.1: Trans	fermaßnahme	n im	Bearbeitungszeitraum
------------	------------	-------------	------	----------------------



			C2: Vortrag Dresdner fügetechnisches Kolloquium 2012
Maßnahme D Ausstellung auf Messen	Direkte Ansprache inter- essierter Unternehmen	D1: Schweißen und Schneiden (Essen)	
Maßnahme E Veröffentlichung	Interesse an der Technologie wecken und über neue Möglichkeiten aufklären.	E1: Fachzeitschrift "Schweißen und Schneiden" E2: Fachzeitschrift "Praktiker" E3: Internetseite der FST	E1: Veröffentlichung "Schweißen und Schneiden" (geplant 2013) E3: <u>http://tu- dresden.de/mw/iof/fu</u> e/forschung/arbeitsgr uppelichtbogenschw eissen/projekte_datei /Projekte
Maßnahme F Aus- und Weiterbildung	Ausbildung und Qualifizierung von Studierenden	 F1: Integration in die Vorlesungen "Schweißverfahren" F2: Integration in Aufbaustudium zum Schweißfachingenieur (mit der SLV Halle) F3: Vergabe von Bachelor- und Masterarbeiten 	F3: Großer Beleg Weinrich F3: Großer Beleg Wippert
Maßnahme G Weitergabe von Zusatzinformationen und Beratung	Information interessierter Firmen	G1: Weitergabe von prozess- und werkstofftechnischen Empfehlungen	G1: Workshop Binzel / KHD am 20.Oktober 2011 Dresden
Maßnahme H Berichterstattung	Information interessierter Firmen	H1: Zwischenbericht H2: Abschlussbericht	H1: 14.02.2011 Zwischenbericht H1: 07.03.2012 Zwischenbericht H2: 15.05.2013 Abschlussbericht

Tabelle 10.2: Geplante Transfermaßnamen

Ziel	Form	Datum / Zeitraum
Transfer und Diskussion der	geplante Veröffentlichungen:	2013
Ergebnisse in Wissenschaft und	Zeitschrift "Schweißen und	
Wirtschaft	Schneiden"	
	eingereichter Vortrag und	2013
	Veröffentlichungen zum DVS	
	Congress 2013 in Essen	



Übersicht über die Veröffentlichungen:

Häßler, M.; Rose, S.; Füssel, U.; Schnick, M.: TIG welding torch with magnetic arc oscillation and optimized shielding gas flow. 65th Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding Commission XII – Arc Welding Processes and Production Systems. 2012

M. Lohse, M. Schnick, M. Hertel, J. Zähr, M. Häßler, U. Füssel: Numerische Analyse des WIG-Prozesses. Lichtbogenschweißen - Prozessdiagnostik und -modellierung in der Verfahrenstechnik, Dresdner Fügetechnisches Kolloquium, Selbstverlag der Technischen Universität Dresden, Dresden, 29.-30.03.2012 - ISBN 978-3-86780-274-1

geplante Veröffentlichungen

M. Häßler, S. Rose, U. Füssel: Charakterisierung magnetisch ausgelenkter Lichtbögen und Anwendungspotential zum Schweißen und Löten. Schweißen und Schneiden (voraussichtlich 3. Quartal 2013)

M. Häßler, S. Rose, U. Füssel, M. Schnick: WIG-Schweißen mit magnetischer Lichtbogenauslenkung zum Löten verzinkter Bleche. DVS Congress (Essen) 2013 (*Status: eingereicht*)



11 Projektbegleitender Ausschuss

Alexander Binzel Schweisstechnik GmbH & Co. KG Herr H. Metzger Kiesacker 35418 Buseck

AREVA NP GmbH Herr G. Engelhard Paul-Gossen-Straße 100 91052 Erlangen

AUDI AG Herr D. Rudolph Postfach 1144 74148 Neckarsulm

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

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

Endress+Hauser Flowtec AG Herr T. Undi Kaegenstrasse 7 4153 Reinach BL (Switzerland)



60

INOCON Technologie GmbH Herr C. Höniges Wienerstraße 3 4800 Attnang-Puchheim (Austria)

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

Kraftanlagen München GmbH Herr D. Rosenfeld Am Bleichbach 10 85452 Moosinning

Lorch Schweisstechnik GmbH Herr B. Jaeschke Im Anwänder 24 - 26 71549 Auenwald

OERLIKON Schweißtechnik GmbH Herr F. Heinrichsmeier Christinenstr. 25 40880 Ratingen

Photon AG Herr S. Neumann Staakener Straße 23 13581 Berlin

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



SOSTA GmbH & Co. KG Herr A. Ehrich Windrose 1-2 06420 Könnern

Thyssen Krupp / Drauz Nothelfer GmbH Herr J. Husner Schlossstrasse 22 D-66687 Wadern-Lockweiler

TRIDELTA Weichferrite GmbH Herr S. Grund Marie-Curie-Straße 7 07629 Hermsdorf

Varialux GmbH Herr T. Löbel Kleinwolmsdorfer Str. 16 01477 Arnsdorf

VW AG Herr V. Teßmar Konzernforschung Brieffach 177 38436 Wolfsburg

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



Quellenverzeichnis

- /1/ http://www.ap-automation.com/products/mac/index.html: Homepage, San Diego (USA), 06.08.08
- /2/ http://www.saf-airliquide.com/FR/prod_mater/fiches/notvent/productivite/9231_1.pdf: Homepage, Cergy-Pontoise Cedex (France), 07.08.08
- /3/ Hughes, R. V.; Walduck, R. P.: Electromagnetic arc path control in robot plasma welding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Springer London, Volume 1, Number 1, 1985 S. 9 - 25
- /4/ Bernsdorf, G.: Auf heißen Spuren vom Schmieden, Löten, Schweißen. VEBFachbuchverlag Leipzig, 1. Auflage, 1986
- /5/ Schutzrecht DE 53502 (1889-12-05): Apparat zur Erwärmung, Schmelzung oder Vergasung fester Körper mittels eines durch elektrische Ströme oder durch Magnete abgelenkten elektrischen Lichtbogens
- /6/ Schutzrecht DE 45777 (1888-03-20): Anwendung eines magnetischen Feldes bei Metallbearbeitung mittelst direct angewendeten elektrischen Stromes nach dem in der Patentschrift No. 38011 beschriebenen Verfahren
- Baum, L.; Fischer, H.: Der Schutzgasschweißer. Reihe: Die Schweißtechnische Praxis, Teil 1: WIG-Schweißen/Plasmaschweißen, Band 11, 3. Aufl., DVS-Verlag, Düsseldorf, 1987
- /8/ Puschner, P.: Prozesssignale. Schweißen und Schneiden, Große
 Schweißtechnische Tagung, Band 83 (1983), S. 124 128
- /9/ Schutzrecht DE 535 631 (1931-10-13): Verfahren zur elektrischen Lichtbogenschweißung
- /10/ Schellhase, M.: Der Schweißlichtbogen ein technologisches Werkzeug. VEB Verlag Technik, Berlin, 1985
- /11/ Dilthey, U.: Beitrag zur Lichtbogensteuerung durch transversale Zusatzmagnetfelder bei mechanisierten Lichtbogenschweissverfahren.
 Dissertation RWTH Aachen, 1972



- /12/ Speckhofer, G.: Der magnetisch ausgelenkte Argonhochdrucklichtbogen: Experimentelle Untersuchungen und 3D-Modellierung. Dissertation TU München, 1995
- /13/ Karasik: Driven Motion and Instability of an Atmospheric Pressure Arc, Princeton Promotion, 2000
- /14/ Kang, Y. H.; Na, S. J.: A Study of the Modelling of Magnetic Arc Deflection and Dynamic Analysis of Arc Sensor, Welding Journal, 1, 2002, S. 8-13, ISSN: 0043-2296
- /15/ Gonzalez, J. J.; Lago, F.; Freton, P.; Masquère, M.; Franceris, X.: Numerical modelling of an electric arc and its interaction with the anode. Journal of Physics D: Applied Physics, 38(2005), S. 306 – 318
- /16/ Schutzrecht DE 935688 (1952-03-06): Lichtbogen-Schutzgas-Schweißgerät mit magnetischer Ablenkung des Lichtbogens
- /17/ Schutzrecht DE 1615485 (1967-06-02): Einrichtung zur magnetischen Ablenkung eines Schweißlichtbogens
- /18/ Schutzrecht DE 19944468 A1 (1999-09-16): Verfahren und Vorrichtung zum WIG/WP-Hybridschweißen
- /19/ Tseng, C-H.; Savage, W. F.: The Effect of Arc Oscillation. Welding Journal, 11(1971), S. 777 786
- /20/ Vollertser, F.; Thomy, C.: Magnetic stirring during laser welding of aluminium.Journal of Laser Applications, 18 (2006) Issue 1, S. 28 34
- /21/ http://www.tu-dresden.de/sfb609/: Homepage, Elektromagnetische Strömungsbeeinflussung in Metallurgie, Kristallzüchtung und Elektrochemie (SFB 609), Dresden, 06.08.08
- /22/ Chen, X. Q; Lucas J.: Sensors for arrow gap welding. Proceedings of welding production procedures being technology—arc welding. DVS Berichte 127, 1989, S. 101–105



- Mecke, H.; Fischer, W.; Hettkamp, E.; Schupp, J.: Magnetic influenced MIGwelding. Eurojoin – 4th European conference on welding joining and cutting. Tagungsband, 2001, S. 569 – 576
- /24/ Schutzrecht JP 58209476 A (1982-05-28): Magnetic stirring welding device
- /25/ Schutzrecht US 3701881 (1971-03-08): Method and apparatus for welding metal sheets
- /26/ Basler, H.-B.: Beeinflussung der Metall-Schutzgasschweißung durch Magnetfelder. Dissertation TU Hannover, 1973
- /27/ Repenning, J.: Grundlagen und Anwendung der magnetischen Lichtbogenbewegung zur Regelung und Steuerung des Metallschutzgasschweißprozesses. Dissertation RWTH Aachen, 1976
- /28/ Schlussbericht AiF-Nr. 13.771 N: Lichtbogensensorsystem zum MSG-Band-Engspaltschweißen mit magnetischer Auslenkung des Lichtbogens. Aachen, 2007
- /29/ Schlussbericht AiF-Nr. 13.483 N: Schweißtechnische und sensorische Anwendung des rotierenden Brenners. Aachen, 2005
- /30/ Schlussbericht AiF-Nr. 13.863 BR: Quasi-interner Sensor zum MIG-Schweißen. Chemnitz, 2003
- /31/ Zwischenbericht AiF-Nr. 15.296 N: Entwicklung eines Schweißkopfführungssystems für das automatisierte MSG-Schweißen von Aluminium-Legierungen. Aachen, 2007
- /32/ Olesch, M.: Magnetische Lichtbogenablenkung zur Kompensation von Blaswirkung. Studienarbeit, TU Dresden, 2008
- /33/ Nestor, O.: Heat Intensity and Current Density Distribution at the Anode of High Current Inert Gas Arcs. Journal of Applied Physics, vol. 33, no. 5, 1962
- /34/ Füssel, U.; Zschetzsche, J.; Guth, U.; Zosel, J.: Strömungsmessung von Lichtbogenund Plasmaprozessen. Stiftung Industrieforschung, Fördervorhaben S559, Abschlussbericht 2004



- /35/ Füssel, U.; Schnick, M.; Zschetzsche, J.: Strömungssimulation von MSG- und Plasmabrennern. Stiftung Industrieforschung, Fördervorhaben S235, Abschlussbericht 2006
- /36/ Schutzrecht EP2008750 (06/26/2008)
- /37/ Dreher, M.; Füssel, U.; Rose, S.; Häßler, M.; Hertel, M.; Schnick, M.: Strömungstechnische Auslegung von Brennersystemen zum wirtschaftlichen und emissionsreduzierten Lichtbogenschweißen: Teil I - Methoden der Strömungs¬analyse. Schweißen und Schneiden, 65 (2013) [1-2] 26-33, Düsseldorf, 2013
- /38/ Nestor, O. H.: Heat Intensity and Current Density Distributions at the Anode of High Current, Inert Gas Arcs. Linde Company, Division of UnionCarbide Corporation, Indianapolis, Indiana, 1961
- /39/ Schnick, M.: Numerische und experimentelle Verfahrens- und Brennerentwicklung beim Plasmalichtbogenschweißen. Dissertation, TU Dresden, 2011
- /40/ Zähr, J.; Füssel, U.; Sende, M.; Lohse, M.; Schnick, M.: Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf die Eigenschaften eines WIG-Lichtbogens und dessen Schmelzbadbeeinflussung. In: DVS-Berichte Band 267, S. 152– 158, 2010
- Murphy, A. B.: Transport Coefficients of Air, Argon-Air, Nitrogen-Air, and Oxygen-Air Plasmas. Plasma Chemistry and Plasma Processing, Volume 15, Issue 2, pp 279-307, 1995
- /42/ Füssel, U.; Schnick, M.; Zähr, J.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zur gezielten Beeinflussung des Lichtbogens und des Schweißbads beim Schutzgasschweißen durch die Schutzgaseigenschaften und die Schutzgaszusammensetzung. AiF-Abschlussbericht IGF-Nr. 15.774 B / DVS-Nr. 03.082, 2010


Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1:	Prinzipskizze der magnetischen Beeinflussung des Lichtbogens nach /7/	5
Abbildung 3.2:	Ausgelenkter Lichtbogen und optische Bestimmung der Auslenkung /14/	7
Abbildung 5.1:	Bestimmung der magnetischen Flussdichte mittels Hall-Sonde. Links: Vorrichtung für Grundlagenuntersuchung. Mitte/Rechts: Vorrichtung für Magnetfeldmessung am Demonstrator	12
Abbildung 5.2:	Geometrie und Randbedingungen 180°-Modell	15
Abbildung 5.3:	Versuchsaufbau der Particle Image Velocimetry (PIV) /37/	16
Abbildung 5.4:	Prinzip Schlierentechnik in Töpplerscher Z-Anordnung /37/	18
Abbildung 5.5:	Versuchsaufbau für Messung der elektrischen Stromdichte und Wärmestromdichte	20
Abbildung 5.6:	Auswertung der mittels des Geteilte-Anoden-Verfahrens ermittelten Strom- und Wärmestromverteilungen /40/	20
Abbildung 5.7:	Auswertung der mittels des Geteilte-Anoden-Verfahrens ermittelten Strom- und Wärmestromverteilungen für nicht rotationssymmetrische Lichtbögen. Oben: Referenzmessung ein nicht ausgelenken Lichtbogens. Unten: magnetisch ausgelenkte Lichtbogen mit verschobener und verbreiterter Stromverteilung	nes er 22
Abbildung 6.1:	Auslenkung eines 200 A Lichtbogens durch Aufbringen eines homogenen externen Magnetfeld von 0; 3 und 5 mT	23
Abbildung 6.2:	Vergleich der maximal gemessenen magnetischen Flussdichte f mit sinusförmigen Stromverlauf betriebene Spulen mit ferritsischem (Eisenkern) und weichferritischem Kernmaterial	für 24



Abbildung 6.3:	Numerisches Strömungsmodell (links) zeigt die Verschlechterun der Schutzgasabdeckung in Folge der Lichtbogenauslenkung un Validierung der Gasströmung mittels PIV-Messung (rechts)	g nd 26
Abbildung 6.4:	Standardautomatenschweißbrenner (links) und adaptierter WIG- Schweißbrenner mit neu entwickelter Schutzgasdüse und verbesserter Magnetbaugruppe zum magnetischen Lichtbogenpendeln (rechts)	28
Abbildung 6.5:	Thermographieaufnahmen mit eingetragenen Temperaturmesspunkten (SP) am WIG-Demonstrator (ohne Spulenwicklung) bei Stromstärken von 50 A (links), 100 A (Mitte und 150 A (rechts). Die störende Lichtbogenstrahlung wird durch ein im Strahlengang positioniertes Blech blockiert.) ו 29
Abbildung 6.6:	Aufbau der magnetischen Lichtbogenpendeleinrichtung bestehe aus einer modifizierten Schweißstromquelle (links), einem Lastwiderstand und dem Demonstrator	nd 30
Abbildung 6.7:	Hochgeschwindigkeitskameraaufnahme der magnetischen Lichtbogenablenkung bei 100 A Schweißstrom und einer Pendelfrequenz von 100 Hz auf Baustahl	31
Abbildung 6.8:	Gegenüberstellung von Hochgeschwindigkeitskameraaufnahme und num. berechneter Lichtbogenstrahlung mit und ohne Lichtbogenauslenkung	n 32
Abbildung 6.9:	Experimentell bestimmte Lichtbogenauslenkung für einen magnetisch ausgelenkten 100 A WIG-Lichtbogen. Optische Lichtbogenauslenkung (links), Auslenkung des Strom- (Mitte) un Wärmestromseintrags am Werkstück (rechts)	ıd 33
Abbildung 6.10:	Experimentell bestimmte und numerisch berechnete Strom- bzw Wärmestromdichte mit und ohne Lichtbogenauslenkung für eine 100 A WIG-Lichtbogen	'. n 34



Abbildung 6.11:	Experimentell bestimmte Verteilung von Strom- und	
	Wärmestromeintrag sowie Lichtbogenauslenkung für	
	unterschiedliche Stromstärken	35
Abbildung 6.12:	Ermittlung der optischen Lichtbogenauslenkung und Bestimmur des Einbrandprofils auf verschiedenen Stahlwerkstoffen, jeweils mit und ohne Lichtbogenauslenkung. Links: ferritischer Stahl (1.0037), Rechts: austenitischer Stahl (1.4301)	ng 5 37
Abbildung 6.13:	Bewertung der Einflussfaktoren auf die Strom- und Wärmestromdichte sowie die Lichtbogenauslenkung	39
Abbildung 6.14:	Versuchsstand zum Bördelnahtlöten bestehend aus Schweiß- u Pendelstromquelle, Linearfahrtisch sowie dem mit einer Kaltdrahtzuführung versehenen Demonstrator zum magnetische Pendeln des Lichtbogens	en 42
Abbildung 6.15:	Einfluss des Brennerversatzes auf die Lötbarkeit. Links: Toleranzfeld des Lötprozesses mit und ohne magnetisch gependeltem Lichtbogen. Rechts: gelötete Blechproben bei eine Brennerversatz von 0,5 mm	em 43
Abbildung 6.16:	Einfluss des Blechhöhenversatzes auf die Lötbarkeit. Links: Toleranzfeld des Lötprozesses mit und ohne magnetisch gependeltem Lichtbogen. Rechts: gelötete Blechproben bei eine Blechhöhenversatz von 2,0 mm	em 44
Abbildung 6.17:	Einfluss der Blechsplatgröße auf die Lötbarkeit. Links: Toleranzfeld des Lötprozesses mit und ohne magnetisch gependeltem Lichtbogen. Rechts: gelötete Blechproben mit 1,0 mm Spalt zwischen den Fügepartnern	44
Abbildung 6.18:	Einfluss der Lötgeschwindigkeit auf die Lötbarkeit. Links: Toleranzfeld des Lötprozesses mit und ohne magnetisch gependeltem Lichtbogen. Rechts: mit magnetisch gependeltem Lichtbogen gelötete Blechproben für 0,6 m/min und 2,0 m/min Lötgeschwindigkeit	45



Abbildung 6.19:	Übersicht zur Veränderung des Prozesstoleranzfeldes beim Löt	en
	verzinkter Bleche im Bördelstoß durch den Einsatz eines	
	magnetisch gependelten Lichtbogens	46
Abbildung 6.20:	Konstruktion (links) und Umsetzung (Mitte) eines Demonstrators	5
	zum magnetischen pendeln des Lichtbogens im Engspalt. Rech	ts:
	Visualisierung des Magnetfeldes durch Eisenspäne	48
Abbildung 6.21:	Hochgeschwindigkeitskameraaufnahme der magnetischen	
	Lichtbogenablenkung im Engspalt (12 mm) bei 150 A	
	Schweißstrom und einer Pendelfrequenz von 100 Hz	49



Tabellenverzeichnis

Tabelle 5.1: Randbedingungen 180°-Modell	15
Tabelle 6.1: Variation der Prozessparameter	38
Tabelle 6.2: Variation der Prozessparameter für Referenzbauteile	41
Tabelle 11.1: Transfermaßnahmen im Bearbeitungszeitraum	56
Tabelle 11.2: Geplante Transfermaßnamen	57