

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 18.708 N

Thema

Autogenes MAG-C Schweißen als Hybridprozess für das kontinuierliche, nasse hyperbare Unterwasserschweißen(UW-A-MAG-C) mit Massivdrahtelektroden

Berichtszeitraum

01.04.2015 - 30.09.2017

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V des DVS

Aachener Straße 172

40223 Düsseldorf

Forschungseinrichtung(en)

1: Leibniz Universität Hannover

Institut für Werkstoffkunde

An der Universität 2

30823 Garbsen

Garbsen, 31.01.2018

Ort, Datum

Dr.-Ing. Thomas Hassel

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Zusammenfassung

Im Forschungsvorhaben 18.708 N

„Autogenes MAG-C Schweißen als Hybridprozess für das kontinuierliche, nasse hyperbare Unterwasserschweißen(UW-A-MAG-C) mit Massivdrahtelektroden“

wurde ein Hybridschweißverfahren für die Unterwasseranwendung entwickelt, mit dem Ziel der Kombination einer autogenen Flamme und einem Lichtbogenschweißverfahren. Eine synergetische Verbindung zweier Prozesse in einer Prozesszone bietet hierbei die Möglichkeit, die Vorteile der einzelnen Prozesse zu nutzen. Die entstehende Wärme des autogenen Verbrennungsprozesses wird zum Vor- bzw. Nachwärmen der Fügezone und das entstehende CO₂ als Schutzgas für den MSG-Schweißprozess genutzt. Hierdurch ist es möglich einen endlosen Massivdraht als Schweißzusatzwerkstoff, ohne Schlackebildung, beim hyperbar, nassen Schweißen zu verwenden.

In der ersten Phase des Projektes wurden diverse Maschinenschneidbrenner derart modifiziert, dass die Förderung des Massivdrahts durch den Schneidsauerstoffzugang erfolgte. Der Lichtbogenprozess wurde mit einem MIG/MAG-Schweißgerät der Fa. EWM (Modell WEGA 601) realisiert. Es zeigte sich, dass ein Hybridprozess im Grunde möglich war und eine porenfreie, mit tiefem Einbrand versehene Schweißnaht erzeugt werden konnte, das komplexe Zusammenwirken aus den Parametern des autogenen Flammprozesses und des Lichtbogenprozesses jedoch keine synergetische Verbindung in einer Prozesszone ermöglichte. Die gegenseitige Beeinflussung der sich ausbildenden autogenen Flamme und die Dynamik des Lichtbogens erlaubten keinen beständigen stabilen Hybridprozess.

Im weiteren Projektverlauf erfolgte eine örtliche Trennung des Hybridprozesses in einen Lichtbogenprozess und einen Flammprozess, wodurch ein stabiler MSG-Schweißprozess mit einem endlosen Massivdraht ermöglicht wurde.

Die erzeugten Schweißnähte zeigten eine gleichmäßige Nahtausbildung, geringe bis keine Spritzer und in Abhängigkeit des eingestellten Schutzgasdruckes keine Poren.

Des Weiteren ergaben die Untersuchungen zum diffusiblen Wasserstoffgehalt eine deutliche Reduktion desselbigen auf etwa 20 ml / 100 g Schweißgut im Vergleich zum klassischen E-Handschiessen unter Wasser (ca. 70 – 90 ml / 100 g Schweißgut).

Das Ziel des Vorhabens wurde teilweise erreicht.

Inhaltsverzeichnis

1	Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	5
1.1	Stand der Technik und Forschung	6
1.1.1	UW-Schweißtechnik	6
1.1.2	Autogentechnik im UW-Bereich	8
1.1.3	Herausforderungen beim nassen, hyperbaren Unterwasserschweißen	9
2	Forschungsziel / Lösungsweg	17
2.1	Angestrebte Forschungsergebnisse	17
3	Forschungsergebnisse	19
3.1	Methodischer Ansatz	19
3.2	Integration des MAG-C-Prozesses in eine UW-Druckkammer zum hyperbar nassen Schweißen	19
3.3	Untersuchung der Hybridschweißparameter zur UW Schweißung und Optimierung des Flammdüsensystems	24
3.3.1	Brenner 1	26
3.3.2	Brenner 2	29
3.3.3	Zwischenfazit	32
3.3.4	Reines CO ₂ -Schweißen	33
3.3.5	UW-MIG	38
3.4	Temperaturfeldmessungen	43
3.5	Untersuchungen zum diffusiblen Wasserstoffgehalt	48
3.6	Prozessevaluierung	50
4	Gegenüberstellung der Zielsetzungen und der Ergebnisse des Forschungsvorhabens	53
4.1	Verwendung der Zuwendung	53
4.2	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	53
5	Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsvorhabens für kleine und mittlere Unternehmen	54
6	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	55
6.1	Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen	55
6.2	Weitere geplante Transfermaßnahmen	56
6.3	Realisierbarkeit der Umsetzung in der Wirtschaft	56
6.4	Zusammenstellung der im Projektrahmen veröffentlichten Arbeiten	57

7	Förderhinweis	57
8	Literaturverzeichnis.....	58
9	Abbildungsverzeichnis.....	62
10	Tabellenverzeichnis.....	65

1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Einhergehend mit der steigenden Streckgrenze bei höherfesten Baustählen sinkt die Schweißbarkeit dieser Materialien. Während die Werkstoffe unter atmosphärischen Bedingungen mittels Vor- bzw. Nachwärmprozessen noch gut schweißbar sind, trifft dies auf die Schweißbarkeit in hyperbar nasser Umgebung nicht mehr zu. Dies liegt daran, dass der Lichtbogenschweißprozess einerseits unter Wasser nicht durch Vor- oder Nachwärmen unterstützt werden kann. Andererseits ist das Überangebot an Wasserstoff mit steigender Streckgrenze des Materials ($Re \geq 355 \text{ MPa}$) bei der Anwendung der derzeit verfügbaren Schweißtechnik so schädigend, dass in kühleren Gewässern nicht ohne Kaltrisserzeugung geschweißt werden kann. Die einzige praktisch anwendbare Technik zum Verschweißen höherfester Materialgüten ist die „Temper-Bead-Technik“, welche auf dem Prinzip einer Wärmenachbehandlung der Schweißnaht durch eine direkt im Anschluss an die eigentliche Schweißung in jeder Lage erfolgten Temperschweißnaht beruht. Damit verbunden ist eine enorme Erhöhung der Nebenzeiten, da die Unebenheiten der Temperschweißraupe durch Schleifen wieder entfernt werden müssen. Zusätzlich muss die Tempernaht direkt nach dem Erstellen der Schweißnaht aufgebracht werden, um eine zu schnelle Abkühlung des Materials zu verhindern. Dem steht entgegen, dass der Unterwasserschweißer beim E-Handschiessen vor der nächsten Lagenschweißung die Schlacke sorgfältig entfernen muss, um Einschlüsse bzw. Bindefehler zu vermeiden. Im Falle der Reparatur von z.B. von Spundwandbauwerken nach Schlosssprüngen durch eine schweißtechnisch anzubringende Vorplattierung konnte bisher mit dem E-Handschiessen mit einer dreilagigen Kehlnaht kalkuliert werden. Im Falle höherfester Spundwandmaterialien muss hier nun mit wesentlich längeren Bearbeitungszeiten gerechnet werden, da die Temper-Bead-Nähte vor dem Setzen der nächsten Schweißlage vollständig ausgeschliffen werden müssen. Dieser Vorgang vervielfacht nun die zu kalkulierenden Kosten, da der Aufwand extrem steigt und dazu führt, dass eine schweißtechnische Reparatur eines solchen Bauwerkes nicht mehr als wirtschaftlich angesehen werden kann. Ein Schlacke freies, kontinuierliches Schweißverfahren, mit welchem in Temper-Bead derart geschweißt werden kann, dass der Tempervorgang der ersten Lage durch das Aufbringen der zweiten Schweißlage erfolgen kann würde hier einen immensen Sprung in der Wirtschaftlichkeit für die Anwendung des UW-Schweißens bringen. Zusätzlich hätte

ein kontinuierliches Schweißverfahren den großen Vorteil, dass weniger Ansatzstellen, welche potentielle Fehlerquellen darstellen notwendig sind, da durch das endlose Zuführen des Zusatzwerkstoffes die Länge der Schweißnaht nicht mehr durch die endliche Länge der Elektrode festgelegt ist, sondern beliebig lange Nähte gefertigt werden können. Durch die Entwicklung des Hybridverfahrens, bestehend aus autogenem Flammprozess und dem MSG-Schweißen, wäre damit erstmals ein kontinuierliches Schweißen unter Wasser in nasser Umgebung ohne Spezialzusatzwerkstoff möglich.

1.1 Stand der Technik und Forschung

1.1.1 UW-Schweißtechnik

Das Unterwasserschweißen kann im Wesentlichen in zwei Gruppen eingeteilt werden. Zum einen findet der Schweißprozess in trockener Atmosphäre innerhalb von Habitaten unter hyperbaren oder Normaldruckbedingungen statt. Zum anderen erfolgt das nasse Unterwasserschweißen direkt unter den tiefenabhängigen Druckbedingungen und findet in einem Tiefenbereich von 0-60 m durch dort eingesetzte Unterwasserschweißer Anwendung [1]. Zur Anwendung kommt hier seit ca. 40 Jahren nahezu ausschließlich das E-Handschweißen mit außenummantelten Stabelektroden [2]. Dabei schweißt der Taucher eine Stabelektrode ähnlich der Vorgehensweise unter atmosphärischen Bedingungen ab. Es entsteht auf der Schweißnaht eine Schlacke, welche anschließend entfernt werden muss. In Deutschland dürfen hierfür nur Schweißzusätze mit einer gültigen Zulassung für das nasse Unterwasserschweißen, z.B. nach DIN 2302 [3], verwendet werden. Die Stabelektroden sind aus einem artgleichen (unlegierten) Kerndraht, einer Schutzgas und Schlacke bildenden Pulverummantelung und einer äußeren, wasserabweisenden Lackschicht aufgebaut. Im Normalfall werden Elektroden mit einer Länge von 350 mm und einem Kernstabdurchmesser von 3,25 mm verwendet. Der Lichtbogen brennt dabei zwischen der negativ gepolten Elektrode sowie dem positiv gepolten Werkstück und wird mit Gleichstrom betrieben (s. Abbildung 3). Für die Geräte und Anlagen und hier insbesondere für die Schweißstromquelle gelten die im DVS Merkblatt 1814 [4] formulierten Anforderungen. Dabei ist zu beachten, dass nur Geräte zugelassen sind, welche für das Arbeiten unter erhöhter elektrischer Gefährdung verwendet werden

dürfen. Zulässig ist hier eine maximale Gleichspannung bis 65V Scheitelwert (maximale Leerlaufspannung im Schweißstromkreis). Geschweißt werden hierbei hauptsächlich Kehlnähte in allen Positionen. Die Schweißstelle muss dabei frei von groben Ablagerungen, wie z.B. Lack, Zunder, Rostplatten und Bewuchs sein, damit eine qualitativ hochwertige Schweißung möglich ist.

Das kontinuierliche Schweißen kommt bisher im nassen Unterwasserbereich noch nicht zur Anwendung. Entwicklungen zu diesem Ansatz wurden hinsichtlich des Schweißens mit selbstschützenden Fülldrähten durchgeführt. Dabei wird ein kontinuierlich abgespulter Metallfülldraht eingesetzt, welcher durch seine Füllung ähnlich dem Prinzip der außenummantelten Stabelektrode durch die Zersetzung der Pulverkomponenten das Schutzgas (CO₂) und die Schlacke bildet [5,6]. Die damit durchgeführten Schweißungen zeigen zum Teil erhebliche Porosität, da das Schutzgas beim Abschmelzen des Fülldrahtes im Zentrum der Lichtbogenkaverne gebildet wird und eine optimale Dynamik des Werkstoffüberganges noch nicht erreicht werden kann. Verwendet werden können hier einfache Falzdrähte, Doppelmantelfülldrähte und Fülldrähte aus nahtlos gezogenen Rohren. Die für diese Variante notwendige schweißtechnische Ausrüstung (Schweißbrenner, Drahtvorschubeinheit und Schweißstromquelle) sind in der Vergangenheit erfolgreich umgesetzt worden, das Verfahren ist aber bis heute nicht in die Praxis des Unterwasserschweißers übertragen worden [7,8,1].

Als weitere in Entwicklung befindliche Schweißverfahren können das Laserstrahlschweißen und das Bolzenschweißen angeführt werden. Das Laserschweißen wurde im Bereich der hochlegierten Stähle zum Reparaturschweißen im kerntechnischen Bereich evaluiert, hat aber aufgrund des hohen Technisierungsgrades bisher keine Anwendung als Handschweißverfahren im Bereich der Unterwassertaucherei gefunden. Gearbeitet wird hier in einer lokal ausgebildeten Schutzgaskaverne, welche eine Übertragung des Laserstrahls auf das zu schweißende Bauteil durch diese Atmosphäre ermöglicht [9].

Das Bolzenschweißen in nasser Umgebung ermöglicht das Anbringen von Teilen oder Vorrichtungen an Stahlbauteilen im Unterwasserbereich. Es konkurriert also nicht direkt mit der Anwendungsbreite des Verbindungsschweißens, da hier lediglich Bolzen stoffschlüssig an die Materialien angeschweißt werden [10].

1.1.2 Autogentechnik im UW-Bereich

Während im atmosphärischen Bereich die autogenen Flammprozesse, wie z.B. Brennschneiden, Flammrichten etc. hauptsächlich mit Azetylen (C_2H_2) als Brenngas verwendet werden, kann dies im tieferen Unterwasserbereich nicht verwendet werden. Aufgrund der Gefahr des Selbstzerfalls von C_2H_2 besteht bei der Verwendung unter hohem Druck eine starke Explosionsgefahr, welche durch die molekulare Instabilität begründet wird [11]. Zur Anwendung kommen im Unterwasserbereich das Ethen (C_2H_4) sowie Propen (C_3H_6), welches ebenfalls zum Brennschneiden geeignete Gase darstellen, ohne den nachteiligen, druckabhängigen Selbstzerfall zu zeigen [12]. Propen ist in Wasser schlecht löslich, sodass unter Wasser eine vollständige Verbrennung erfolgen kann und die damit entstehende exotherme Verbrennungswärme als Prozesswärme genutzt werden kann.

Dieses Gas ist unter diversen Handelsbezeichnungen weltweit auf dem Markt und wird für das UW-Brennschneiden verwendet. Hauptsächlich findet jedoch in der Unterwasseranwendung das Mischgas MAPP Gas Anwendung, welches aus einer Mischung von verschiedenen Kohlenwasserstoffen besteht (Methyl-Azetylen / Propen / Allene / Isobutan / n-Butane / Propan Mischung) (s. Tabelle 1-1). Beiden Gasen gemeinsam ist aber die Verbrennung, welche auch unter Wasser stabil abläuft. Am Beispiel des Propens lässt sich diese Reaktion mit Sauerstoff folgendermaßen als exotherme Reaktion darstellen:

Dies verdeutlicht, dass die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen zum einen Kohlendioxid produziert und zum anderen aus der exotherm ablaufenden Reaktion Wärme frei wird, welche normalerweise zum Schneiden verwendet wird.

Tabelle 1-1: Übersicht über die unter Wasser zur Anwendung kommenden autogenen Brenngase und deren Anbieter.

Gashersteller	Chemische Bezeichnung	Handelsbezeichnung
AirGas	methylacetylene/propen/allene/isobutane/n-butane/propane mixture	MAPP Gas
AGA	methylacetylene/propen/allene/isobutane/n-butane/propane mixture	MAPP Gas

Messer Industriegase GmbH	methylacetylene/propen/allene/isobutane/n-butane/propane mixture	MAPP-Gas
Air Products	Propen (C ₃ H ₆)	MAPP Gas
Air Liquide	Propen (C ₃ H ₆)	Propen N25
Westfalen	Propen (C ₃ H ₆)	Wegaleen
Linde AG	Propen (C ₃ H ₆)	Propen 2.5

1.1.3 Herausforderungen beim nassen, hyperbaren Unterwasserschweißen

Die meisten Ingenieurbauwerke, welche Unterwasser aufgebaut werden bestehen aus Metallkonstruktionen. Während des Lebenszyklus verschleißten diese Anlagen zunehmend durch Korrosionsprozesse oder Havarien (z.B. Schiffskollisionen) und es besteht die Notwendigkeit von Sanierungs- oder Reparaturarbeiten zur Wiederherstellung der Funktion des Bauwerkes [13].

In den meisten Fällen kommen dabei un- bzw. niedriglegierte Stähle zum Einsatz, wobei aus dem kerntechnischen Bereich ebenfalls höher legierte Werkstoffe Anwendung finden [14]. Das Schweißen von Duplexstählen unter Wasser betrifft aber lediglich die Anwendung bei der Reparatur kerntechnischer Anlagen, wo durch das Unterwasserschweißen eine Minimierung der radiologischen Belastung des Umfeldes erreicht wird.

Im Off-, bzw. Near Shore Bereich und in den Binnengewässern werden vorwiegend die unlegierten Baustähle eingesetzt und verwendet. Dabei werden sowohl die P-Stähle z.B. für den Pipe Line Bau [15], die S-Stähle für den allgemeinen Stahlbau meist sehr großer Strukturen (Gründungsstrukturen für Offshore WEA) und die Spundwandstähle für z.B. Ufereinfassungen eingesetzt. Unabhängig von den unterschiedlichen Einsatzgebieten sind die Materialien sehr ähnlich und hinsichtlich der Einsatzgrenzen für das UW-Schweißen liegen die Einsatzgrenzen derzeit bei den Güten mit einer Streckgrenze von ca. 355 MPa. Perspektivisch wird zunehmend über den Einsatz höherfester Feinkornstähle diskutiert, da hier ein enormes Leichtbaupotential besteht und die Fertigungsverfahren (On Shore) an diese Werkstoffgruppen angepasst werden [16].

Sowohl der zu schweißende als auch der Zusatzwerkstoff nehmen beim UW-Schweißen einen immensen Einfluss auf die Schweißnahtqualität [17]. Die eigentliche Schweißnaht setzt sich daher aus zwei wesentlichen Bereichen zusammen. Zum ersten ist dies die Schmelzzone, in welcher durch die Lichtbogenwärme der Zusatzwerkstoff abgeschmolzen wird und durch das Anschmelzen mit dem Grundwerkstoff die stoffschlüssige Verbindung der Schweißung erfolgt. Zum anderen ist dies die Wärmeeinflusszone (WEZ), in welcher zum Teil erhebliche Gefügeveränderungen durch den Wärmeeintrag der Lichtbogenschweißung erfolgen, ohne dass aufgeschmolzen wird (s. Abbildung 1-1). Dabei wird deutlich, dass es verschiedene Zonen der Fehlerbildung in der Schweißnaht geben kann, wobei in der Schweißzone andere Fehlerursachen wirken, als in der Wärmeeinflusszone. Dies ist von der umgebenden Atmosphäre insofern von Bedeutung, da unter Wasser die beschleunigten Abkühlbedingungen diesen Prozess der Fehlerbildung wesentlich beeinflussen können. Einen großen Einfluss bei der Reparatur stellt demnach der zu schweißende Werkstoff dar. Im Falle von Stahlspundwandmaterialien sind dies unlegierte Stähle, genormt nach DIN 10248-1 [18]. Beispielhaft sind die unterschiedlichen Güten in Tabelle 1-3 zusammengefasst.

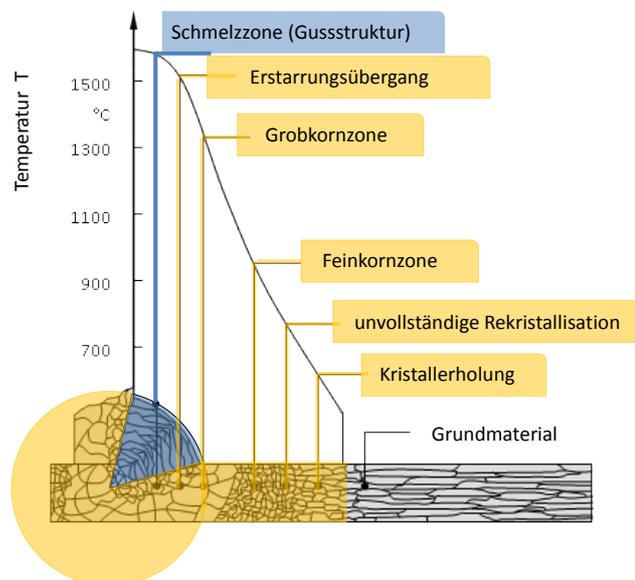


Abbildung 1-1: Schematische Darstellung des Gefüges der Schmelzzone (blau) und der Wärmeeinflusszone (gelb) am Beispiel einer Kehlnaht

Anhand der Materialzusammensetzung allein können aber noch keine wesentlichen Aussagen über die Schweißbarkeit der Materialien gemacht werden. Für das Unterwasserschweißen ist dazu die genaue Kenntnis des Kohlenstoffäquivalentes

erforderlich, da dieser Wert gemeinhin zur Klassifizierung der Schweißbarkeit genutzt werden kann und laut Merkblatt für das Unterwasser-Lichtbogenhandschweißen maximal 0,40 (CEV) betragen darf [19,20]. Zur Berechnung des Kohlenstoffäquivalentes gibt es verschiedene Ansätze, welche für unterschiedliche Anwendungsbereiche entwickelt worden sind. In Tabelle 1-2 sind einige Varianten mit deren Herkunft und Intension aufgeführt. Das Kohlenstoffäquivalent stellt die Wirkung der Legierungselemente auf die Kaltrissneigung der nach dem Schweißen aufgehärteten Zonen dar, wobei es keine direkte Berechnungsvariante, speziell für die nasse Schweißung unter Wasser gibt, sondern hier nur mit Erfahrungswerten und daher mit dem CEV kalkuliert wird.

Für die Schmelzzone stellt sich zusätzlich die Erstarrung des Schweißgutes als besondere Herausforderung dar, da die schnelle Abkühlung im Wasser diametral zur Notwendigkeit die kristallisationsbedingte Volumenkontraktion zu kompensieren steht. Damit gibt es auch unter Wasser eine Änderung der Gefügeausbildung und eine größere Gefährdung in Bezug auf Erstarrungs-, Aufschmelzungsrisse und Risse durch Verformungsabfall (ductility dip cracks). Zusätzlich besteht die Gefahr der Aufhärtungsrisssbildung durch die meist martensitischen Umwandlungen im Schweißgut und in der Wärmeeinflusszone.

Tabelle 1-2: Arten und Berechnungsgrundlagen für das Kohlenstoffäquivalent

Berechnungsarten des Kohlenstoffäquivalentes		
CEV [19]	— ——— ——— [%]	gilt nach [21] für längere Abkühlzeiten $t_{8/5}=10s$ und wird zur Bestimmung der Vorwärmtemperatur empfohlen
C_{eq} [23]	— — — — — — — — [%]	gilt nach [21] für die Vorwärmung von Feinkornstählen und höherfesten Stählen, wegen der Wärmeempfindlichkeit, und daher für geringere $t_{8/5}$ Zeiten
CET [19,21]	————— ——— ———	geeignet für moderne hochfeste Baustähle, als ein zielführender Wert zur Beurteilung der Kaltrissigkeit [22]
P_{CM} [23]	— ————— ——— ——— —	$P_{CM}<0,3\%$ gilt für die niedriglegierten Feinkornbaustähle als atmosphärischer Wert zum kaltrissssicheren schweißen [21]

Tabelle 1-3: Berechnung der verschiedenen Kohlenstoffäquivalente anhand der vorliegenden Legierungsbestandteile und die Zusammensetzung der nach DIN EN 10248 definierten Spundwandgüten

Stahlgüte ²	CEV	C _{eq}	CET	P _{CM}
S240GP	0,20	0,20	0,20	0,20
S270GP	0,24	0,24	0,24	0,24
S320GP	0,48	0,34	0,40	0,34
S355GP	0,58	0,34	0,40	0,34
S390GP	0,51	0,34	0,40	0,34
S430GP	0,51	0,34	0,40	0,34
S460G1M	0,60	0,33	0,38	0,31

²Chemische Zusammensetzung aus dem Nachschlagewerk Stahlschlüssel;
Stahlschlüssel 2010; (Vers. 6.01.0000); Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH [24]

Stahl [24]	C	Mn	Cr	Mo	V	Ni	Cu	Si	P	S	N	Nb	Ti	Al	B	As
S240GP	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0,045	0,045	0,009	0	0	0	0	0
S270GP	0,24	0	0	0	0	0	0	0	0,045	0,045	0,009	0	0	0	0	0
S320GP	0,24	1,6	0	0	0	0	0	0,55	0,045	0,045	0,009	0	0	0	0	0
S355GP	0,24	1,6	0	0	0	0	0	0,55	0,045	0,045	0,009	0	0	0	0	0
S390GP	0,24	1,6	0	0	0	0	0	0,55	0,04	0,04	0,009	0	0	0	0	0
S430GP	0,24	1,6	0	0	0	0	0	0,55	0,04	0,04	0,009	0	0	0	0	0
S460G1M	0,14	1,65	0,25	0,25	0,08	0,7	0,3	0,55	0,02	0,01	0,01	0,04	0,025	0,055	0,0005	0,03

Betrachtet man die unter Tabelle 1-3 dargestellten Werte für das CEV, wird die Problematik des nassen Unterwasserschweißens schnell klar, denn schon der S320GP ist mit seinem Legierungskonzept durch die Beigabe von Mangan mit einem Wert von CEV=0.48 außerhalb des zulässigen Bereiches. Es besteht also ein erhebliches Risiko, dass das Schweißen, ausgeführt unter Wasser, diesen Werkstoff stark durch Kaltrisse schädigen kann (s. Abbildung 1-2). Damit ist es sehr schwierig eine Entscheidung zu treffen, ob ein Spundwandbauwerk durch das Unterwasserschweißen instandgesetzt werden kann.

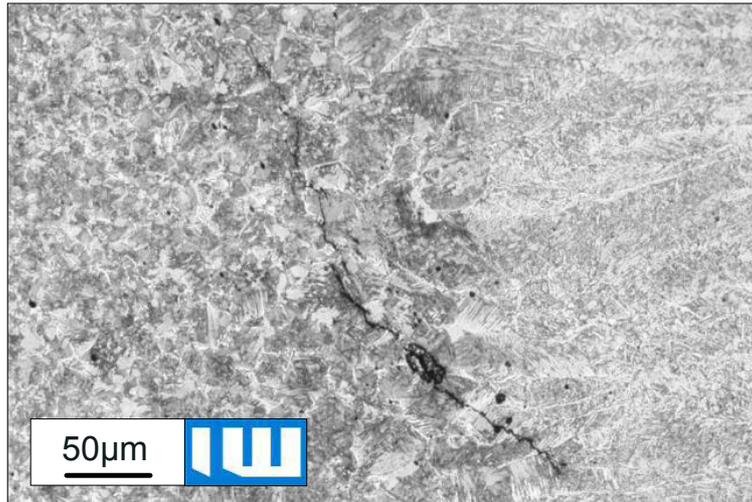


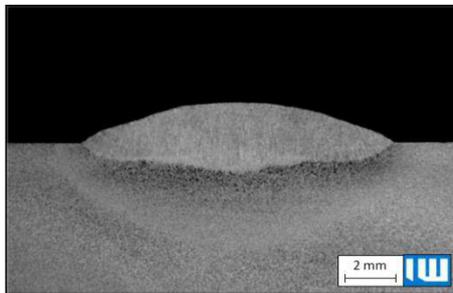
Abbildung 1-2: Unternahtriss an einer hyperbar, nass geschweißten Naht (E-Hand Schweißung) entstanden durch den eingetragenen diffusiblen Wasserstoff, Aufhärtung und innere Spannungen

Zur Bewertung der Schweißbarkeit ist daher allein nur die Verwendung des CEV nicht empfehlenswert, da letztlich nicht nur die Legierungsbestandteile über die Schweißbarkeit entscheiden, sondern der Schweißprozess an sich und dessen Ausführung enormes Einflusspotential enthält. Gesteigert fokussiert werden muss z.B. das Umwandlungsverhalten des Werkstoffes in der Wärmeeinflusszone. Durch die Polymorphie des Eisens, also die Möglichkeit bei bestimmten Temperaturen die Gitterstruktur spontan und reversibel zu ändern, besteht die Möglichkeit der gezielten Gefügeeinstellung. Insbesondere ist hierbei die Zeit der Abkühlung von einem gesteigerten Interesse, da sich dabei entscheidet, ob vermehrt sprödes oder duktiler Material entsteht.

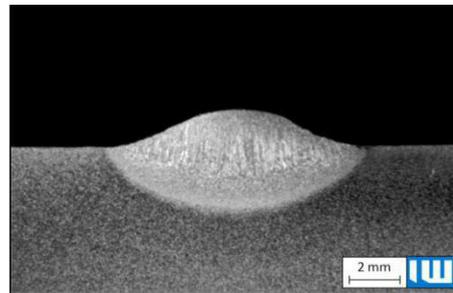
Das Wasser als umgebende Atmosphäre hat weiterhin einen erheblichen Einfluss auf den Schweißprozess und das Schweißergebnis [29]. Durch den direkten Kontakt des Lichtbogens mit dem Wasser und der damit verbundenen Dissoziation steigt das Angebot an diffusionsfähigen Wasserstoff an der heißen Metalloberfläche stark an. Ebenfalls verschiebt sich durch die Druckabhängigkeit der Schweißtiefe das Reaktionsgleichgewicht der Oxidation von Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid, sodass vermehrt neben dem Wasserstoff auch Sauerstoff und Kohlenstoff zur Verfügung stehen. Dieser Prozess verändert das Abbrandverhalten der Legierungs- und Begleitelemente und führt zum Eindringen von Wasserstoff und Kohlenstoff in das Metallgitter.

Zusätzlich führt das den Lichtbogen umgebende Wasser zu dessen Einschnürung (besonders mit steigender Tiefe), wobei sich bei gleicher Einstellung der

Schweißparameter die Streckenenergie erhöht und damit die Wirkfläche des Lichtbogens auf der Werkstückoberfläche minimiert wird. Dies führt zu einen zu einem tieferen Einbrand, welcher als vorteilhaft zu bezeichnen ist und zum anderen führt die Einschnürung zu einem höheren Nahtaufbau unter gleichen Schweißbedingungen. (s. Abbildung 1-3)



Elektroden-Handschiweißung an Luft
Werkstoff: S235JR; I=155 A; U=29 V



Elektroden-Handschiweißung unter Wasser
Werkstoff: S235JR; I=155 A; U=27 V

Abbildung 1-3: Ausbildung der Schweißnaht in Abhängigkeit der Umgebung

Durch die höhere Wärmeleitfähigkeit des Wassers gegenüber der Luft, kommt es zu einer Minimierung der WEZ. Dies kann, sofern sich in der WEZ nicht besonders starke Martensitbildung zeigt von Vorteil sein, da sich hierbei weniger Grobkornzone bildet.

Um abschätzen zu können, wie groß die Gefahr von Kaltrissen ist kann die Umwandlungsdauer als Qualitätskriterium genutzt werden. Wie in Abbildung 1-4 gezeigt ist, wird diese bestimmt durch die Abkühldauer, also die Zeit die notwendig ist, um die Phasenumwandlungsprozesse in der WEZ zu einer bestimmten Härte zu führen. Diese mit $t_{8/5}$ Zeit benannte Abkühldauer bezeichnet die Zeit, die das Werkstück braucht, um vom 800°C auf 500°C abzukühlen (s. Abbildung 1-5).

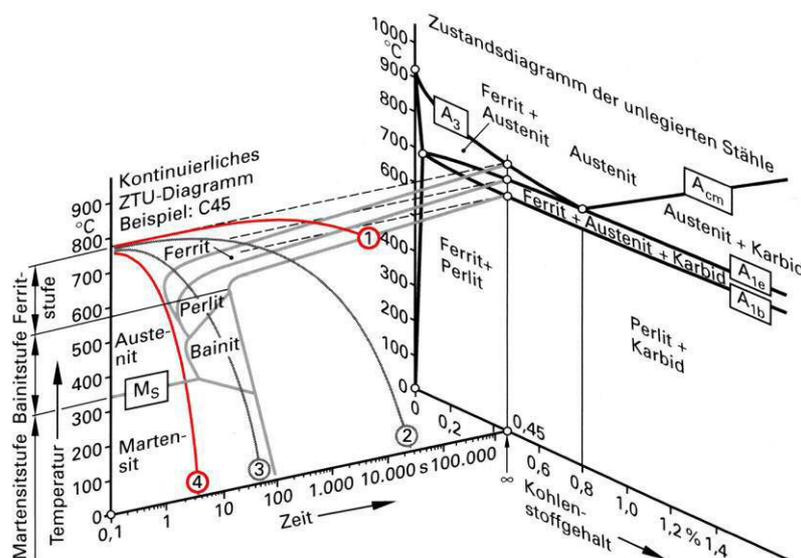


Abbildung 1-4: Illustration des Einflusses der Abkühlung des Gefüges und der resultierenden und eigenschaftsbildenden Gefügeausbildung für Fe-Basiswerkstoffe (z.B. C45) [25]

Zumindest für das atmosphärische Schweißen erfährt man diese Zeit im Normalfall beim Hersteller und hat somit einen validen praktischen Wert zur Einschätzung der Kaltrissgefahr. Bei Kenntnis dieser Zeit und dem notwendigen Equipment zur praktischen Messung dieses Parameters kann eine Schweißaufgabe sehr sicher durchgeführt werden. In der DIN EN ISO 13916 wird die praktische Messung der Vorwärm-, Zwischenlage und Haltetemperaturen und damit auch der $t_{8/5}$ Zeit gegeben und festgelegt, wo die Messpunkte im Bereich der Schweißnaht gesetzt werden müssen. [26]

Problematisch wird es hier aber ebenfalls für die Anwendung beim Unterwasserschweißen, da hier ohne weitere Vorkehrungen beim Schweißen diese Werte immer unterschritten werden, da das Wasser die Schweißstelle zu schnell abkühlt und Vor- bzw. Nachwärmoperationen derzeit nicht Stand der Technik sind.

Derzeit führt die starke Erwärmung und das schnelle Abkühlen der Wärmeeinflusszone durch das Elektrode Handschweißen zu einer großen Aufhärtung. Der hohe Wasserstoffgehalt im Lichtbogen (>70%) [6] führt zu einem hohen Angebot an diffusiblen Wasserstoff in das Schmelzbad, wodurch es durch das Zusammenspiel von Aufhärtungszone, Wasserstoffeintrag und Schweißspannungen zu Kaltrissen kommt (s. Abbildung 1-2) [27].

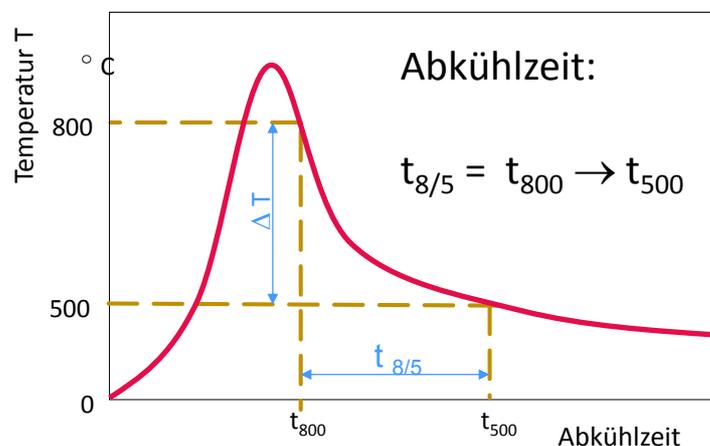


Abbildung 1-5: Graphische Darstellung der Abkühlzeit $t_{8/5}$

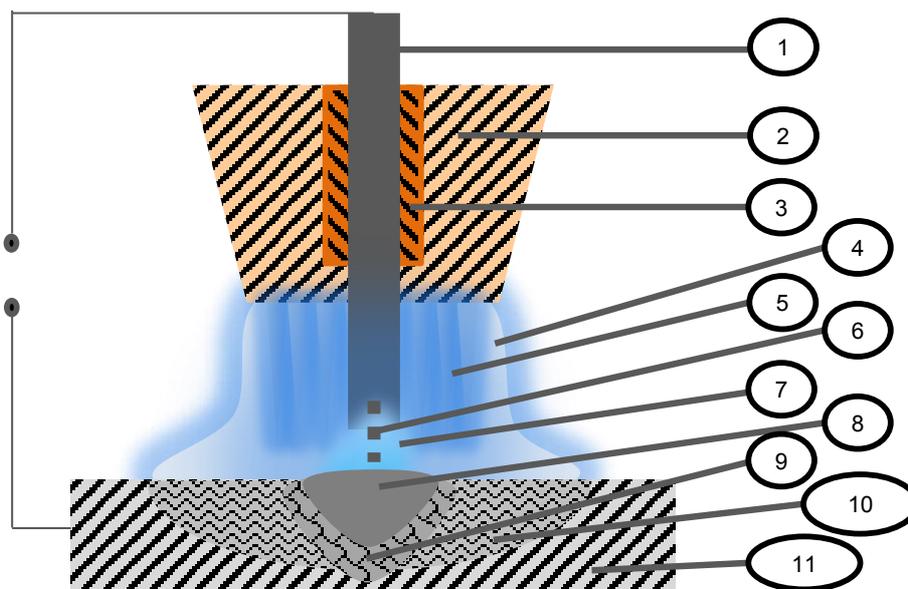
Die einzige bekannte und praktizierte Möglichkeit schweißtechnisch auf die Phasenbildung positiv einzuwirken ist derzeit die Temper Bead Technik [20, 38]. Diese Technik kann angewendet werden, um die Schweißspannungen sowie die Härte nach dem Schweißen zu reduzieren. Dabei soll die eigentliche Verbindungsschweißnaht durch eine weitere Überschweißung wärmebehandelt werden. Prinzipiell ist dies ein erfolgversprechender Weg, denn damit kann die $t_{8/5}$ Zeit und somit die

Schweißnahtqualität positiv beeinflusst werden. Die große Herausforderung hierbei besteht darin, dass diese Technik mit dem Stabelektrodenschweißen kaum zu bewerkstelligen ist. Der Unterwasserschweißer muss sofort nach dem Schweißen der Verbindungsnaht die Schlacke entfernen, die Elektrode neu auf der schon vorhandenen Schweißnaht aufsetzen, neu zünden und ohne den Grundwerkstoff anzuschmelzen eine Schweißraupe auf die darunterliegende Schweißnaht auftragen. Sofern dies erfolgreich ausgeführt werden kann, muss anschließend das gesamte Material der Temper Schweißraupe wieder abgeschliffen werden. Damit ist diese Technik bisher nicht wirtschaftlich durchführbar und an höherfesten Feinkornstählen nur theoretisch erfolgreich für das E-Hand Schweißen anwendbar [29]. Durchgeführte Untersuchungen diesen Effekt zu nutzen, sowie das Potential auszuschöpfen, durch die Änderung der Polung den Energieeintrag in das Material zu steuern zeigen, dass der tempernde Effekt durchaus eine positive Wirkung bezüglich des Eigenschaftsprofils haben kann, bei diesen Versuchen aber die nicht kontrollierbare Porosität das eigentliche nicht gelöste Problem war [30,31]. Sofern Schlacke frei und kontinuierlich gearbeitet werden kann greift aber diese Bearbeitungsstrategie gut, was z.B. beim Laserschweißen unter Wasser im Bereich der Nukleartechnik zu einer Minimierung der Härte und einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften beim UW-Schweißen von niedrig legiertem Stahl geführt hat. Durch Mehrlagenschweißungen wurde dabei die WEZ der vorhergehenden Schweißnaht getempert und damit die Rissanfälligkeit gesenkt [32,33].

2 Forschungsziel / Lösungsweg

2.1 Angestrebte Forschungsergebnisse

Die Kombination von autogener Flamme und Metallschutzgasschweißen ist eine synergetische Verbindung zweier Prozesse in einer Prozesszone, welche die Nachteile durch die Sonderumgebung Wasser kompensieren kann (s. Abbildung 2-1). Zum einen wird die im autogenen Verbrennungsprozess entstehende Wärme zum Vor- bzw. Nachwärmen der Schweißstelle genutzt und zum anderen wird das, durch die Verbrennung entstehende, Kohlendioxid als Schutzgas für den MSG-Schweißprozess verwendet. Damit kann erstmals ein endloser Massivdraht als Schweißzusatzwerkstoff beim hyperbar, nassen Schweißen verwendet werden, ohne dass dieser eine Schlacke bildende Schutzfunktion haben muss.



1	kontinuierlich geförderter Massivdraht
2	Gasdüse
3	Stromkontaktrohr
4	Gasglocke aus CO ₂
5	Heizflammkegel
6	abschmelzender Zusatzwerkstoff
7	MAG-Lichtbogen
8	Schweißgut
9	Wärmeeinflusszone durch den Lichtbogenprozess
10	Wärmeeinflusszone durch den autogenen Prozess
11	Grundwerkstoff

Abbildung 2-1: Darstellung der Prozesszone des Autogen-MAG-C-Hybridprozesses für das hyperbar nasse Schweißen

Die Verbrennung der autogenen Flamme, welche konzentrisch um den Schweißdraht angeordnet ist leistet drei wesentliche Beiträge zum Gelingen des Unterwasserschweißprozesses:

1. Die Wärme der Flamme wird auf das Werkstück geleitet und erwärmt die Schweißstelle vor und nach dem Schweißen mit dem Betrag der Wärmeübertragung aus der Verbrennung.
2. Das ausströmende und exotherm abreagierende Gasmisch verdrängt das Wasser an der Schweißstelle und ermöglicht damit eine deutliche Reduktion des Wasserstoffgehaltes im Lichtbogen des MSG-Prozesses.
3. Das Reaktionsprodukt aus der Verbrennung des Propens, das Kohlendioxid stellt eine wesentliche Grundlage des MSG-Lichtbogenprozesses dar.

Der damit mögliche MSG-C Prozess trägt dann mit den folgenden Beiträgen zum Gesamtprozess bei:

1. Ein kontinuierlicher MSG Prozess ist möglich, womit weniger Ansatzstellen geschweißt werden müssen, da hierbei ein endlos förderbarer Schweißdraht verwendet wird.
 2. Es sind keine Schlacke bildenden Zusatzstoffe in Füllungen oder Ummantelungen notwendig, womit es ermöglicht wird mit Standardmassiv- oder Metallpulverfülldrähten einen kontinuierlichen Schweißprozess zu realisieren.
 3. Im Gegensatz zu den verfügbaren Stabelektroden eröffnet sich hier ein großes Feld anwendbarer Legierungen, welche die Erfahrungen aus dem atmosphärischen Schweißen in die UW-Schweißtechnik übertragen.
 4. Der Lichtbogen wird gleichzeitig als Zündmechanismus für die autogene Flamme genutzt, sodass hier keine externe Zündhilfe mehr erforderlich ist.
-

3 Forschungsergebnisse

3.1 Methodischer Ansatz

Die Stabilität des Hybridprozesses ist sehr stark vom Zusammenspiel der Parameterfelder des autogenen Flammprozesses und des Lichtbogenprozesses abhängig. Hierfür müssen stabile Zündbedingungen des Flammprozesses durch den Lichtbogen ermittelt und eine Untersuchung der Flammeneinstellung vorgenommen werden. Im ersten Arbeitsschritt wurden stabile Prozessparameter zum reinen CO₂-Schweißen an Luft sowie unter Wasser eingestellt. Anschließend erfolgte eine Anpassung der Lichtbogenparameter beim Schweißen mit der Autogenflamme an Luft, um im abschließenden Prozess den Lichtbogenprozess in Kombination mit dem Autogenprozess unter Wasser zu evaluieren.

3.2 Integration des MAG-C-Prozesses in eine UW-Druckkammer zum hyperbar nassen Schweißen

Für reproduzierbare hyperbare Versuchsschweißungen steht dem Institut für Werkstoffkunde eine Innenüberdruckkammer mit angeflanschem Steigrohr zur Verfügung (Abbildung 3-1). Durch eine Wasserbefüllung des Steigrohres kann eine maximale Wasserstandshöhe von 15 m erreicht werden.



Abbildung 3-1: Innenüberdruckkammer mit angeflanschem Steigrohr

Die Kammer verfügt über einen Innendurchmesser von 1780 mm, eine nutzbare Länge von 2040 mm und sechs Auflagerpunkte zur Befestigung von Anlagenkomponenten in 300 mm Höhe.

Die Prozessbeobachtung und –steuerung erfolgt über 2 seitlich an der Innenüberdruckkammer angeflanschte Bullaugen (Abbildung 3-2).

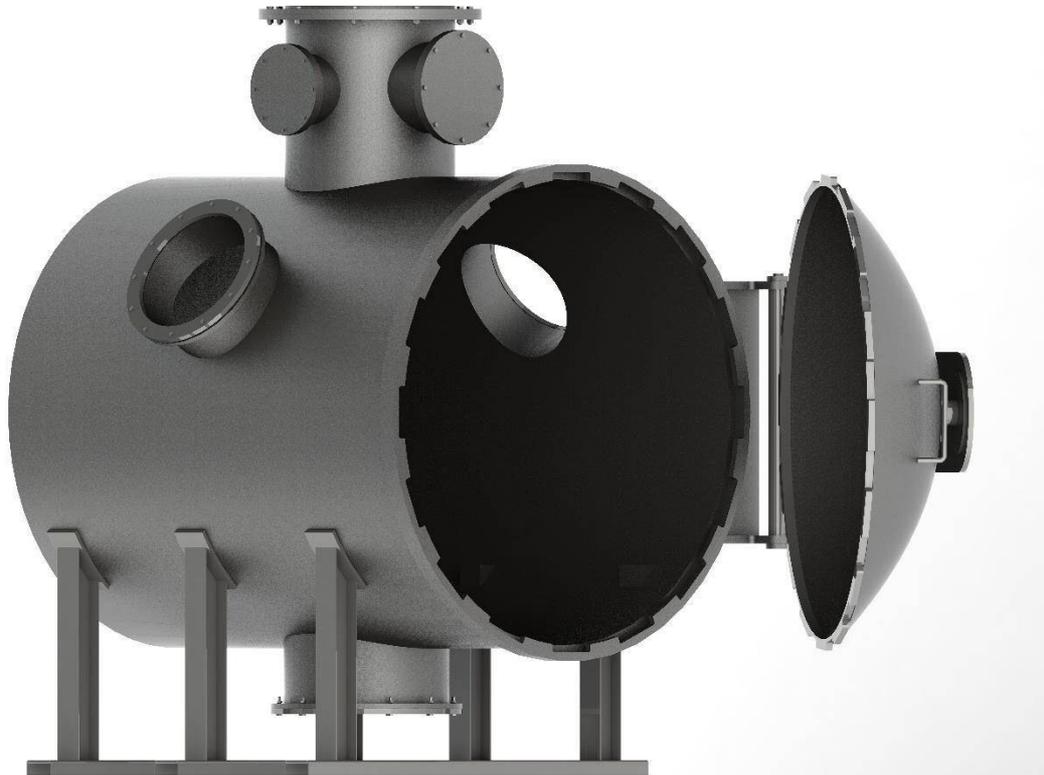


Abbildung 3-2: 3D-Modell der Innenüberdruckkammer

Zur Brennermanipulation innerhalb der Druckkammer wurde ein unterwasserfähiges Achssystem mit einem Arbeitsraum von 1660 mm x 910 mm x 100 mm (X,-Y-, Z-Achse) entwickelt und konstruiert (Abbildung 3-3). Die Achsen, sowie die Gehäuselager, Traverse und Motorflansche sind aus eloxiertem Aluminium gefertigt. Kupplungen und Verbindungswelle bestehen aus Edelstahl. Antriebs und Umlenkrollen nutzen Keramik-Kugellager, die Gleitlager bestehen aus Keramik. Als Riemenmaterial kommt für den Unterwassereinsatz geeignetes Elastomer zum Einsatz. Als Motor wird ein NEMA34-Schrittmotor mit einem Haltemoment von 3,6 Nm der Firma Igus verwendet. Durch seine IP68-Zertifizierung ist er auch für den Unterwassereinsatz geeignet. Die Synchronisation der beiden Zahnriemenachsen übernimmt eine Verbindungswelle aus Edelstahl im hinteren Teil der Anlage.



Abbildung 3-3: drylin E Raumportal ohne Zusatzanbauten und Montagehilfen

Zur Brennerbefestigung an der Z-Achse und zur Einstellung eines definierten Winkels vom Brenner zur Probenoberfläche wurde eine entsprechende Halterung konstruiert. Sie muss einen Brennerwinkel von 45° Stehend zur Schweißrichtung und 45° schleppend zur Schweißrichtung ermöglichen. Abbildung 3-4 zeigt die Baugruppe:

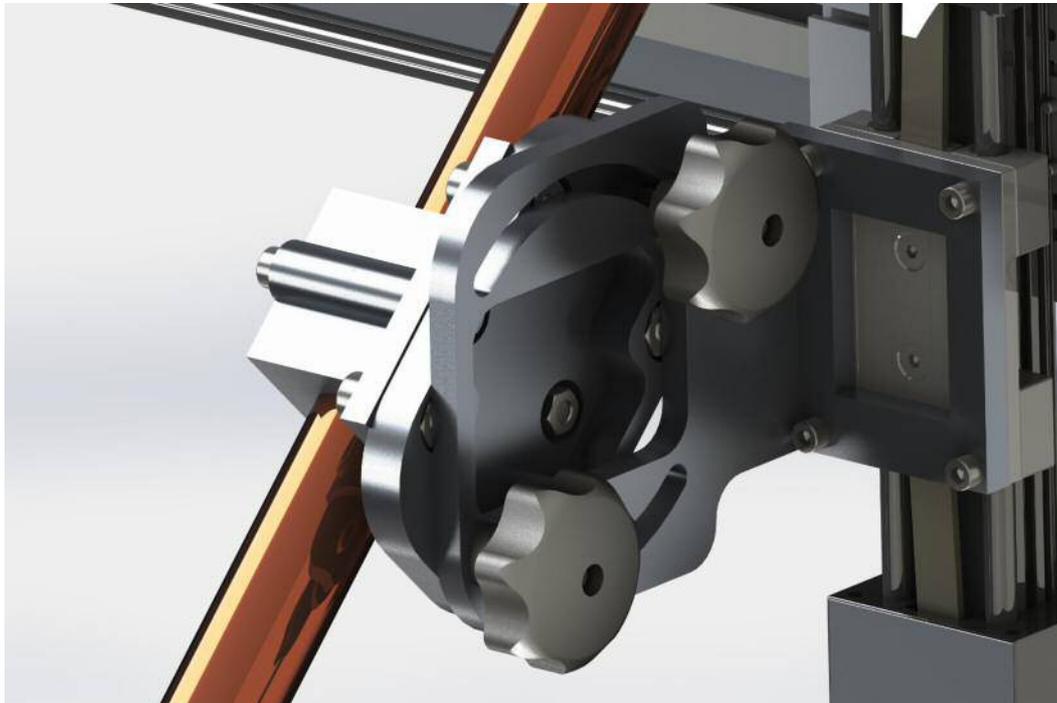


Abbildung 3-4: Brennerhalterung und Winkelstelleinheit

Über zwei in eine der Halteplatten gefräste Nuten kann die Brennerhalterung entsprechend verstellt werden. Über die Sterngriffe wird der Winkel fixiert. Abbildung 3-5 zeigt eine Explosionsansicht der Baugruppe.

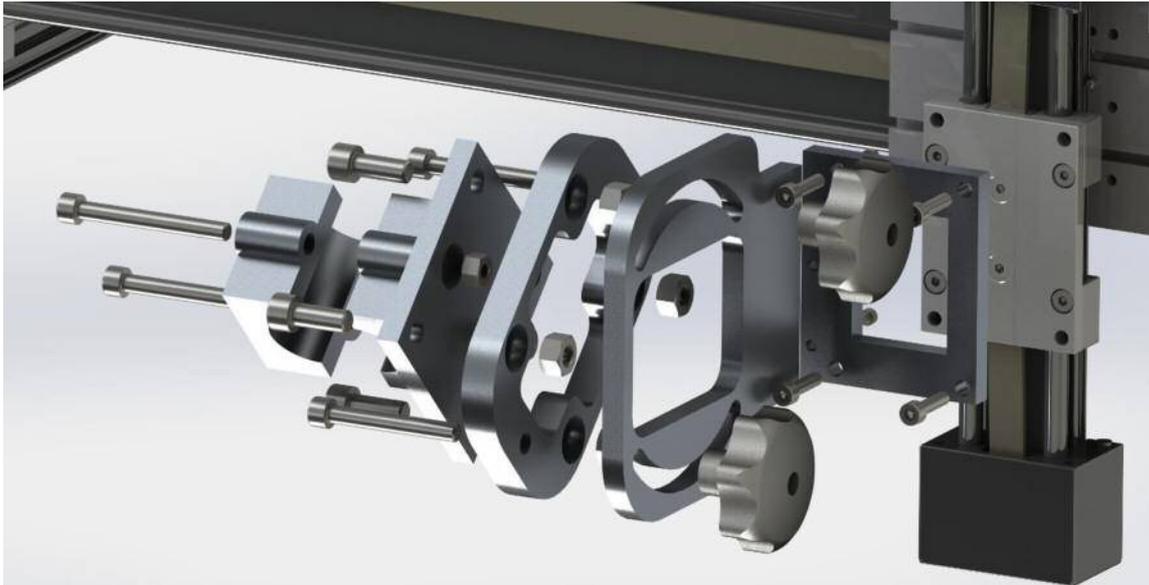


Abbildung 3-5: Explosionsansicht der Brennerhalterung und Winkelstelleinheit

Aufgrund des Schrittmotors der X-Achse können die Auflagerpunkte in der Druckkammer nicht ohne weiteres für die Anlage genutzt werden. Hierfür werden Traversen zwischen den vorderen und hinteren beiden Auflagerpunkten angefertigt, auf denen die Anlage montiert werden kann. Um genug Arbeitsraum unter der Anlage bereitzustellen, muss das Portal zusätzlich erhöht werden (Abbildung 3-6).

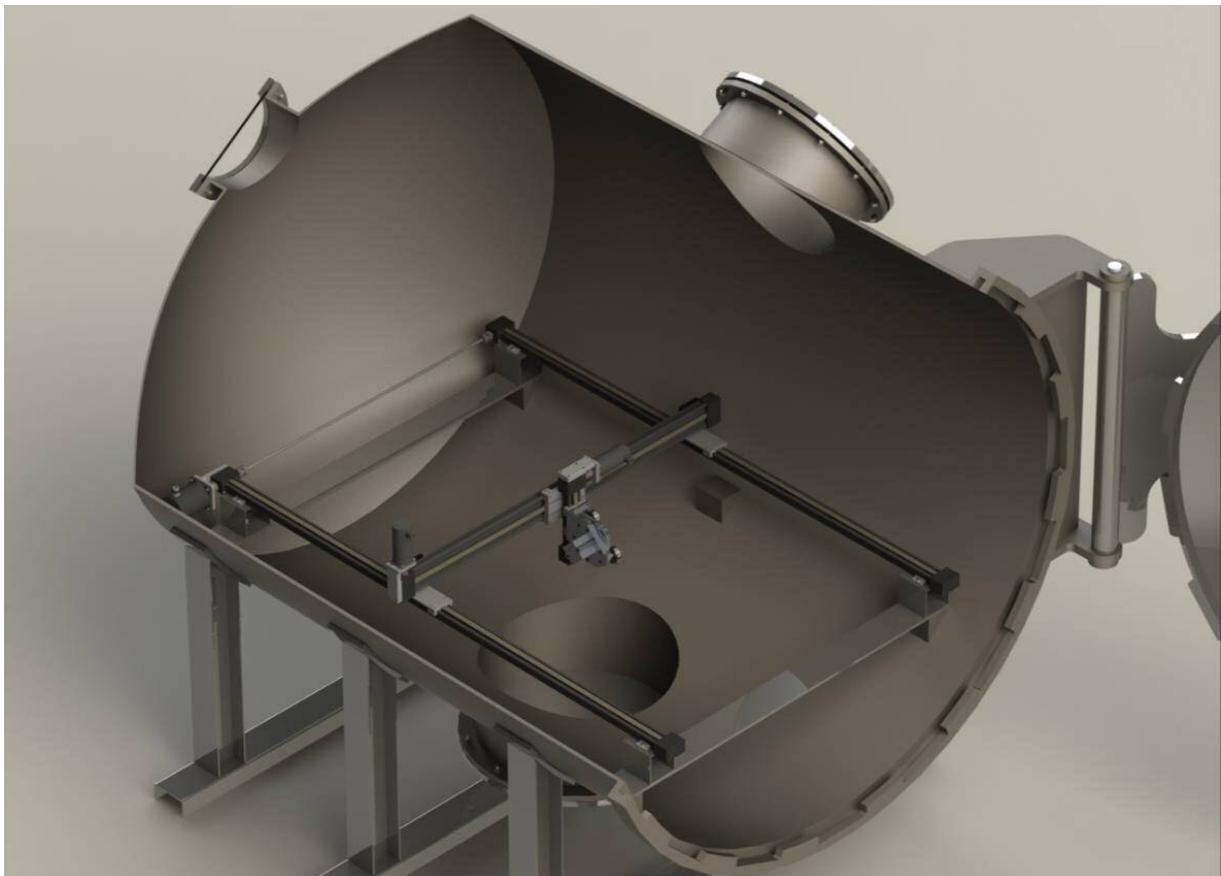


Abbildung 3-6: Schnittansicht der Druckkammer und integriertem Achsportal

Seite 23 des Schlussberichts zu IGF-Vorhaben 18.708 N

Im Anschluss an den Einbau des Achssystems in der Druckkammer (Abbildung 3-7) wird diese elektrisch verkabelt und steuerungstechnisch programmiert und einem Testlauf unterzogen (Abbildung 3-8).

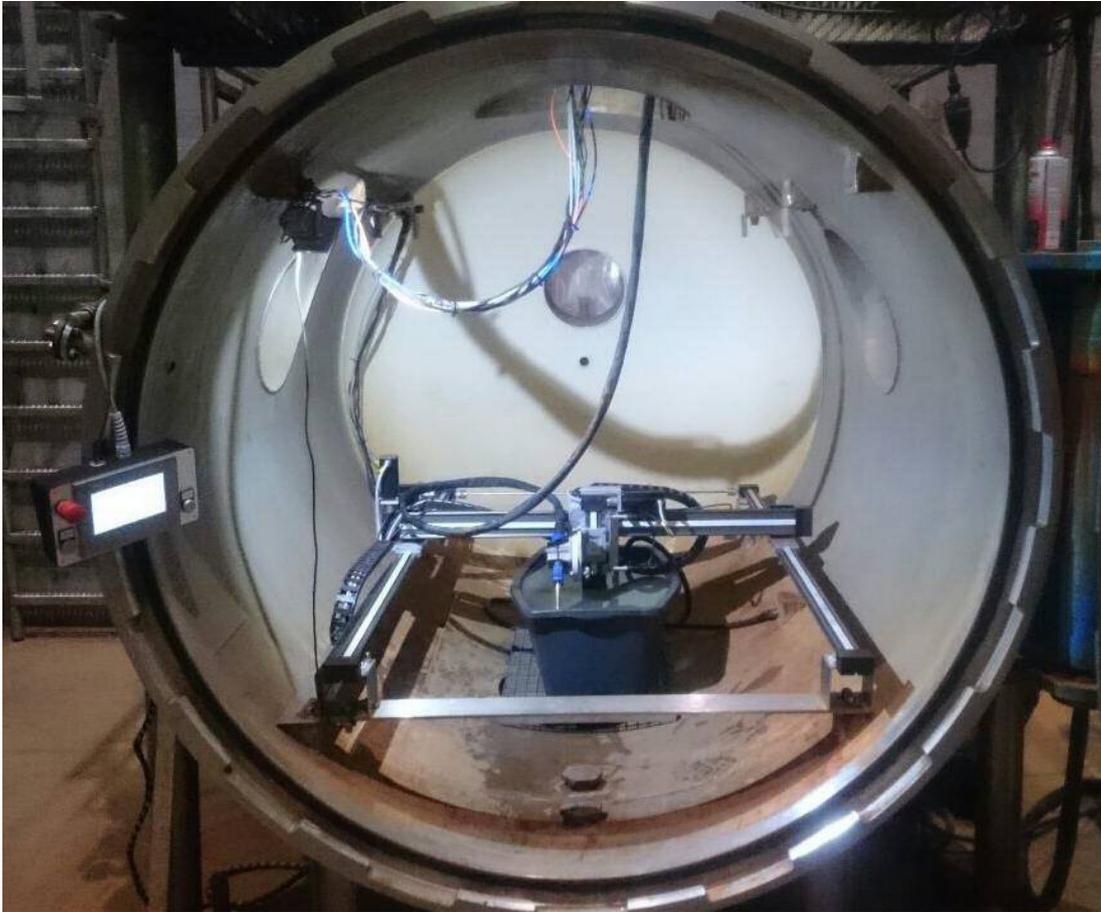


Abbildung 3-7: Eingebautes Achsportal in der Innenüberdruckkammer

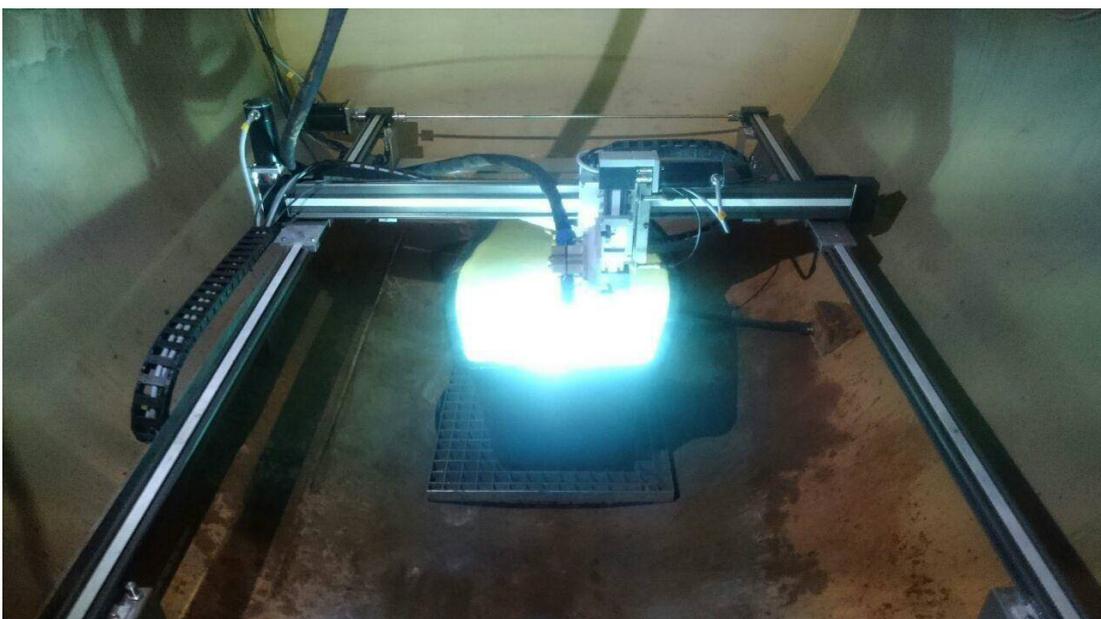


Abbildung 3-8: Testlauf des Achsportal

3.3 Untersuchung der Hybridschweißparameter zur UW Schweißung und Optimierung des Flammdüsen systems

Die praktischen Schweißversuche wurden in einem Becken mit den Abmessungen 2000 x 3100 x 800 mm (Breite x Länge x Tiefe) durchgeführt, Abbildung 3-9. Über dem Becken befand sich eine X, Y-Portalanlage, mit der die Brennvorrichtung, an der der Brenner befestigt war, horizontal über dem Becken bewegt werden konnte. Eine Abstandsregelung stellte die vertikale Position des Brennersystems ein.



Abbildung 3-9: Versuchsstand für geringe Wassertiefen

Abbildung 3-10 stellt schematisch den Versuchsaufbau und Verbindungen der einzelnen Komponenten dar.

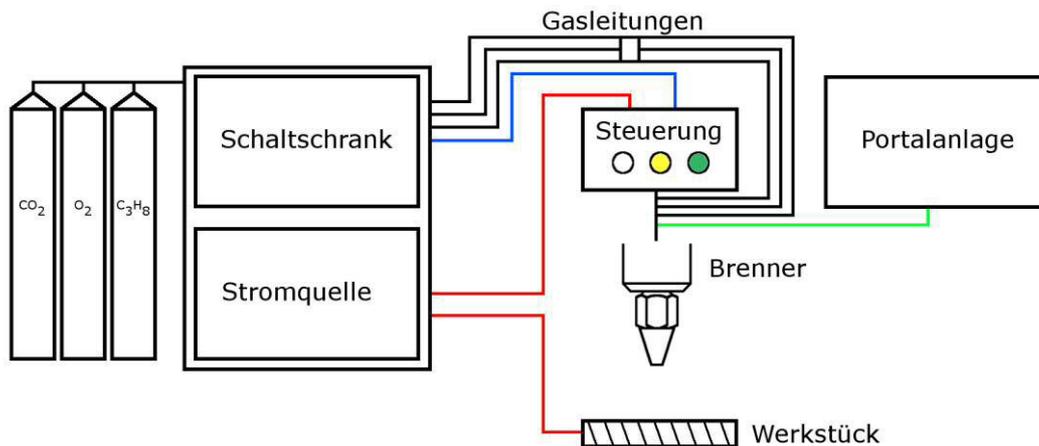


Abbildung 3-10: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für geringe Wassertiefen

Folgende Brenner mit unterschiedlichen Modifikationen (u.a. Hüllgaskappe und Wasservorhangdüse) wurden zur Nutzung der Synergieeffekte aus autogenem Flammprozess und der Lichtbogentechnik untersucht:

Brenner 1: MSD 250 Maschinenschneidbrenner für außenmischende Düsen (Abbildung 3-11 links)

Brenner 2: MS 3450 Maschinenschneidbrenner für Ringschlitzdüsen (Abbildung 3-11 Mitte)

Brenner 3: Sonderanfertigung eines UW-Handsneidbrenners (Abbildung 3-11 rechts)



Abbildung 3-11: Links Brenner 1, Mitte Brenner 2, Rechts Brenner 3

3.3.1 Brenner 1

Für die ersten Versuche, den Flammprozess unter Wasser zu stabilisieren, wurde ein Hochleistungs-Maschinenschneidbrenner des Typs MSD 250 des Herstellers Messer-Griesheim Schweißtechnik GmbH verwendet.

Dieser Maschinenbrenner mit selbstmischenden Düsen (Abbildung 3-12, oben) erzeugte einen großflächigen Flammenbereich mit einer geringen Flammeneinschnürung.

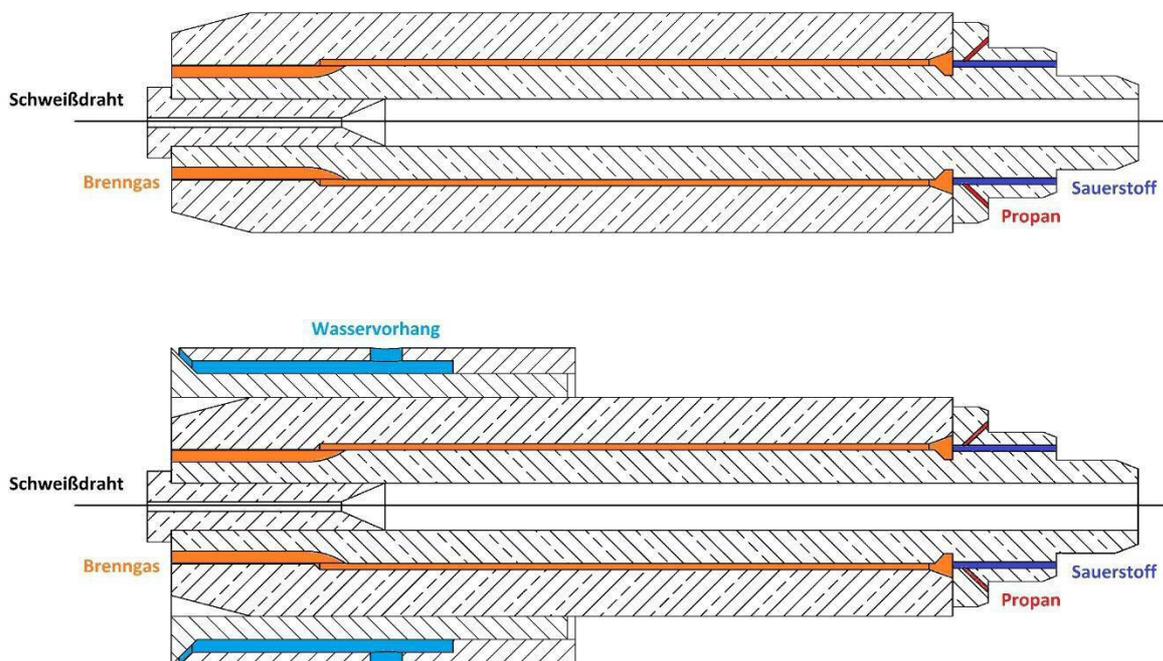


Abbildung 3-12: Außenmischendes Düsensystem ohne (oben) und mit (unten) Wasservorhang

Eine Kombination aus einem Lichtbogenprozess und dem Autogenprozess bringt große Herausforderungen in der Minimierung der Störungen, welche durch die Flamme in den Lichtbogen eingetragen werden. Das in der Flamme produzierte Kohlendioxid dient als Schutzgas für den Schweißprozess, kann aber durch eine unzureichende Strömungsgeschwindigkeit und die Wasserverdrängung große Turbulenzen im Bereich des Lichtbogens bilden und damit störend wirken.

Schlierenoptische Aufnahmen (Abbildung 3-13) am Austritt des Düsensystems verdeutlichen die entstehenden Turbulenzen am Gasaustritt des Düsensystems. Diese Turbulenzen konnten zum einen durch eine Optimierung der

Düsenaustrittsgeometrie und zum anderen durch eine Adaption verschiedener Hüllgas- bzw. Vorhangkappen reduziert werden.



Abbildung 3-13: Schlierenoptische Aufnahme der Gasströmung

Hierzu wurde die Geometrie der außenmischenden Düse zum einen hinsichtlich einer höheren Austrittsgeschwindigkeit optimiert (Abbildung 3-14 linkes Bild Mitte) und zum anderen wurden die Gasaustrittsöffnungen am Düsenende in einem Winkel zur Längsachse (Wirbelgasdüse) gefertigt, um einen Drall der Gasströmung und somit eine Stabilisierung zu erzeugen (Abbildung 3-14 vergrößerter Bereich), welches sich in einer deutlichen Reduktion der Turbulenzen am Brenneraustritt widerspiegelte. Eine durchgehend stabil brennende Flamme unter Wasser ließ sich dennoch nicht aufrechterhalten. Eine zusätzlich entwickelte und gefertigte Wasservorhangdüse (Abbildung 3-12, unten) erzielte eine zusätzliche Barriere zwischen dem Umgebungsmedium und dem Prozessraum und reduzierte den Einfluss des umgebenden Wassers auf die Prozesszone.

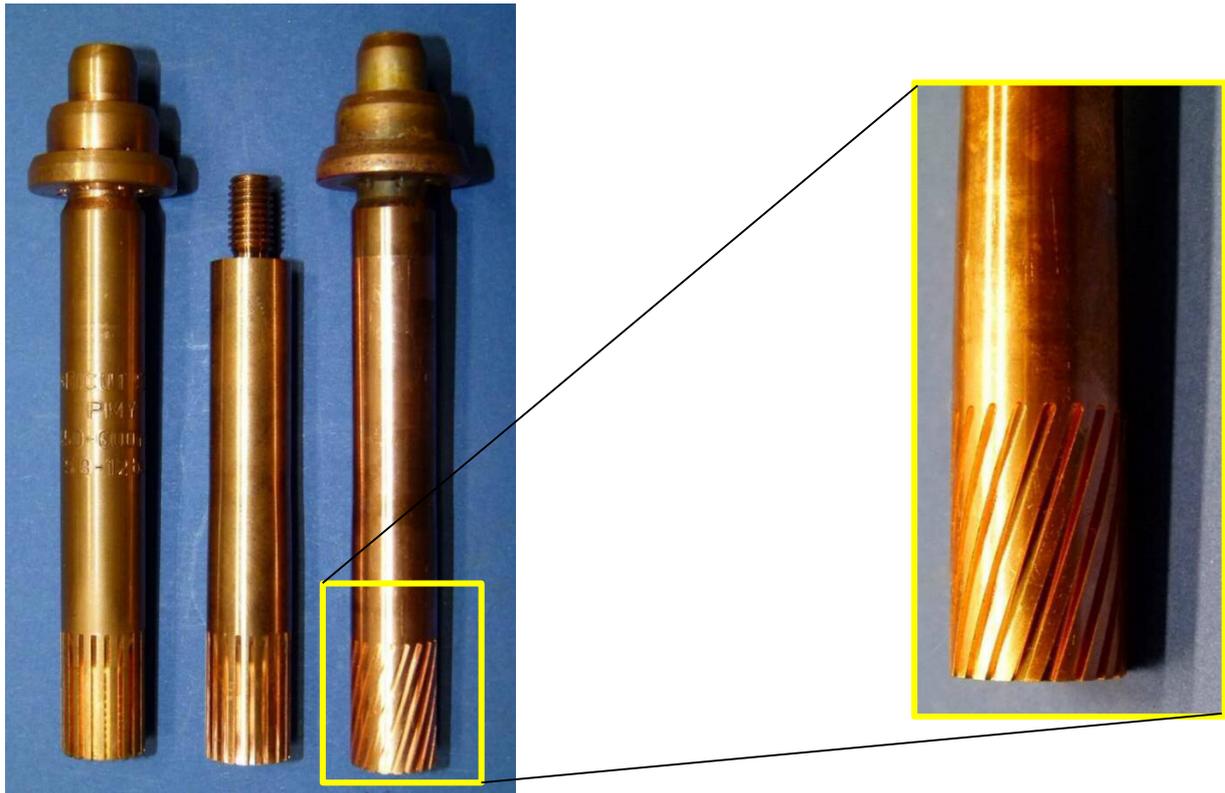


Abbildung 3-14: Düsenkonzepte für außenmischende Düsen

Eine ausreichende Stabilisierung der autogenen Flamme und des gleichzeitig brennenden Lichtbogens konnte durch den Einsatz der Wirbelgasdüse und des Wasservorhanges dennoch nicht gewährleistet werden. Die autogene Flamme und der Lichtbogen beeinflussten sich gegenseitig, so dass keine geeignete Kombination von Flammen-Lichtbogen-Parametern gefunden werden konnte und sich die einzelnen Prozesse in einem sehr dynamischen Gesamtprozess manifestierten, Abbildung 3-15.



Abbildung 3-15: Einsatz des außenmischenden Düsensystems mit Wasservorhang beim Unterwasserschweißen

3.3.2 Brenner 2

Als Brenner 2 wurde ein Maschinenschneidbrenner der Fa. Messer Griesheim Typ MS 3450 verwendet. Die genutzten Heiz- bzw. Schneiddüsen sind in Tabelle 3-1 gelistet.

Tabelle 3-1: Typenbezeichnung und Größen der verwendeten Düsen

Verwendete Düsen	Größen
Schneiddüse Gricut®-1230-PMYF	3 - 10 mm 7 - 15 mm 10 - 25 mm 25 - 40 mm 40 - 60 mm 60 -100 mm
Heizdüse Gricut®-1230-PMYF	3 - 100 mm
Schneiddüse Gricut®-1280-PMYF	100 – 200 mm 200 – 250 mm 250 – 300 mm
Heizdüse Gricut®-1280-PMYF	100 – 300 mm

Zu Beginn der Untersuchungen des Maschinenschneidbrenners mit Ringschlitzdüsen wurde der Betriebsdruck für Propan zwischen 0,3 und 1,5 bar und für Sauerstoff zwischen 1,5 und 10 bar variiert. Nach der Zündung der Flamme an Atmosphäre wurde der Brenner unter die Wasseroberfläche getaucht. Eine „weiche“ Flammeneinstellung führte zu einem Erlöschen der Flamme nach wenigen Sekunden. Harte Flammeneinstellung mit hohen Gasdrücken (Propan: >1,5bar und Sauerstoff: >7bar) führten zu einer stabilen Ausbildung einer Flamme unter Wasser, mit einer hohen kinetischen Energie. Besonders kritisch ist dabei der Bereich von der Wasseroberfläche bis zu einer Wassertiefe von etwa 0,1 m zu betrachten. Die hohe Dynamik der Flamme und der aufsteigenden Verbrennungsprodukte erzeugte starke Turbulenzen und damit ein hohes Risiko für ein Erlöschen der Flamme.

Die Kombination aus einem Flammprozess und einem Lichtbogenprozess bietet zur Umgehung dieses kritischen Bereiches die Möglichkeit den Lichtbogen als Zündmechanismus für die autogene Flamme zu nutzen, so dass hier keine externe Zündhilfe mehr erforderlich ist. Ein kurzzeitig existierender Lichtbogen zwischen der Drahtelektrode und dem Werkstück war hier bereits ausreichend um das ausströmende Brenngas-Sauerstoff-Gemisch zu entzünden. Nachdem sich eine stabil autogene Flamme unter Wasser einstellte, wurde der Lichtbogenprozess unter Wasser mit einem MIG/MAG Schweißgerät der Fa. EWM, Modell WEGA 601 realisiert. Hierzu wurde der autogene Maschinenschneidbrenner derart modifiziert, dass der Drahtvorschub durch den Schneidsauerstoffzugang erfolgt ist. Die wesentlichen Einflussfaktoren auf den sich nun eingestellten Hybridschweißprozess sind der Abstand zwischen Werkstück und Düse, die Vorschubgeschwindigkeit des Brenners, der Drahtvorschubgeschwindigkeit und die eingestellten Gasdrücke des Brenngas-Sauerstoff-Gemisches. Bei einem Werkstück-Düsenabstand von unter 10mm war die kinetische Energie des ausströmenden Gases bzw. der Flammenausbreitung sehr hoch. Das Schmelzgut wurde von der vorgesehenen Schweißposition verdrängt (Abbildung 3-16) und der notwendige Schutz vor dem Umgebungsmedium war nicht gegeben.



Abbildung 3-16: Düsen-Werkstückabstand 10 mm, Schweißspannung 28 V, Schweißstrom 160 A
Eine Erhöhung des Werkstück-Düsenabstandes auf 20 mm ermöglichte ebenfalls keine gleichmäßige Schmelzbadausbildung. Der fehlende Schutz der Flamme resultiert in einer stark zerklüfteten Schweißnahtoberfläche.



Abbildung 3-17: Düsen-Werkstückabstand 20 mm, Schweißspannung 28 V, Schweißstrom 160 A

Abbildung 3-18 zeigt Auftragschweißnähte bei einem Düsen-Werkstückabstand von 12 mm. Es ist erkennbar, dass die durchgängige Schweißnaht stark von der Austrittsrichtung der Flamme und der Vorschubgeschwindigkeit abhängig ist.

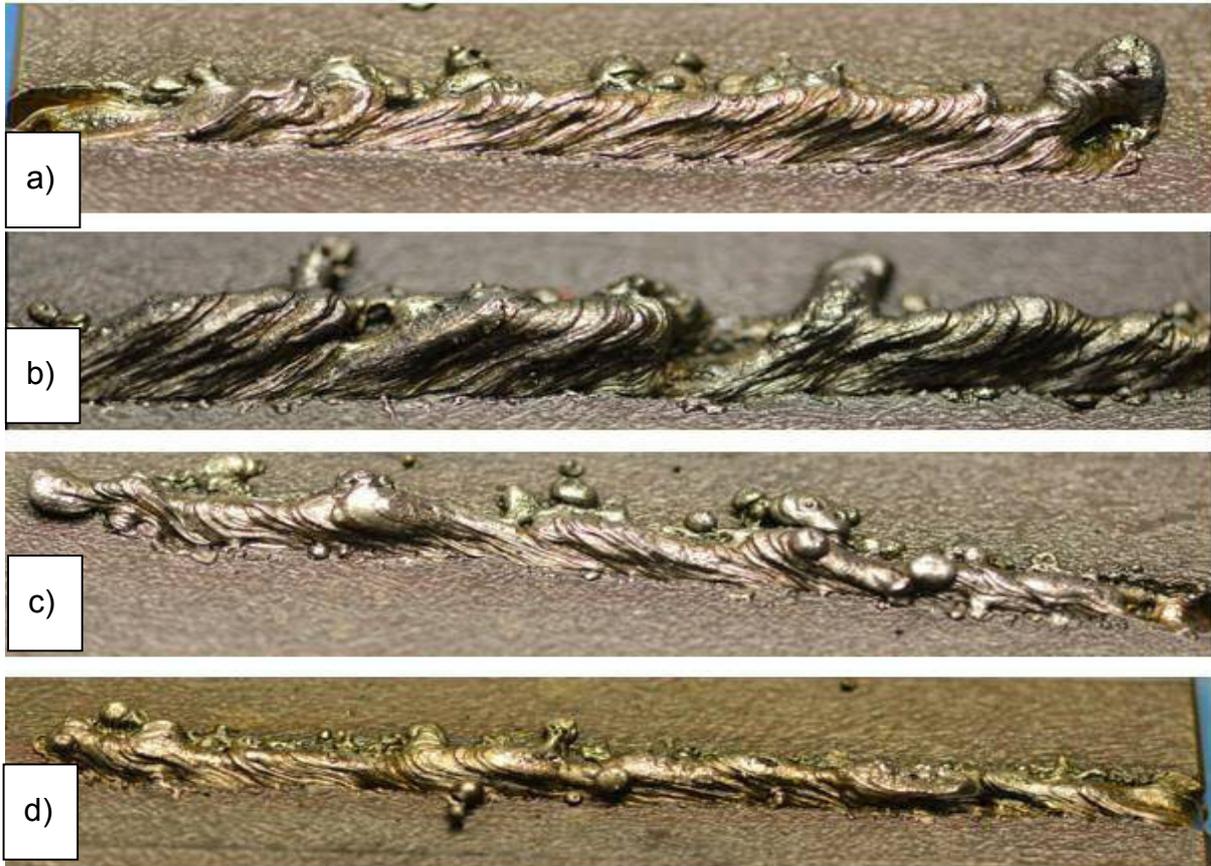


Abbildung 3-18: Düsen-Werkstückabstand 12 mm, Vorschubgeschwindigkeit a) 0,3 , b) 0,4, c) 0,5, d) 0,8 m/s

Die Untersuchungen zum nassen autogenen MAG-C Hybridschweißen zeigen, dass eine porenfreie, mit tiefem Einbrand versehene, Schweißnaht zwar erzeugt werden kann (Abbildung 3-19), das komplexe Zusammenspiel aus den Lichtbogen- und Flammenparametern allerdings keine synergetische Verbindung in einer Prozesszone ermöglicht.

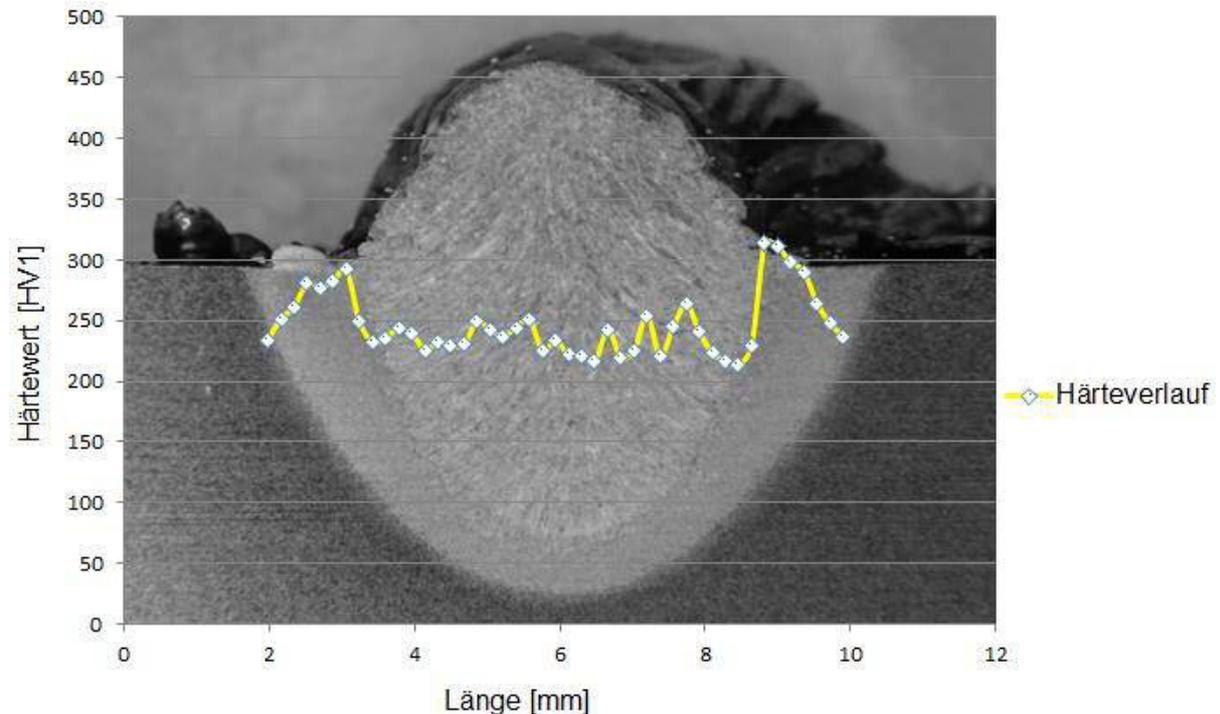


Abbildung 3-19: Querschliff durch eine UW-A-MAG-C-Schweißnaht (S235 geschweißt mit SG2 Draht d=1,2mm)

3.3.3 Zwischenfazit

Die Untersuchungen mit außenmischenden und Ringschlitzdüsen zeigen, dass ein Hybridprozess aus autogener Flamme und einem Lichtbogen zwar grundsätzlich ermöglicht werden kann; das komplexe Zusammenspiel aus den Parametern der beiden Prozesse allerdings keine synergetische Verbindung in einer Prozesszone ermöglicht. Die Dynamik der sich ausbildenden Flamme (Abbildung 3-20) und die Lichtbogensausbildung beeinflussen sich gegenseitig so stark, dass kein dauerhafter stabiler Hybridprozess aufrecht erhalten werden kann. Aus diesem Grund werden die Prozesse örtlich in einen Lichtbogenprozess und einen Flammprozess getrennt.

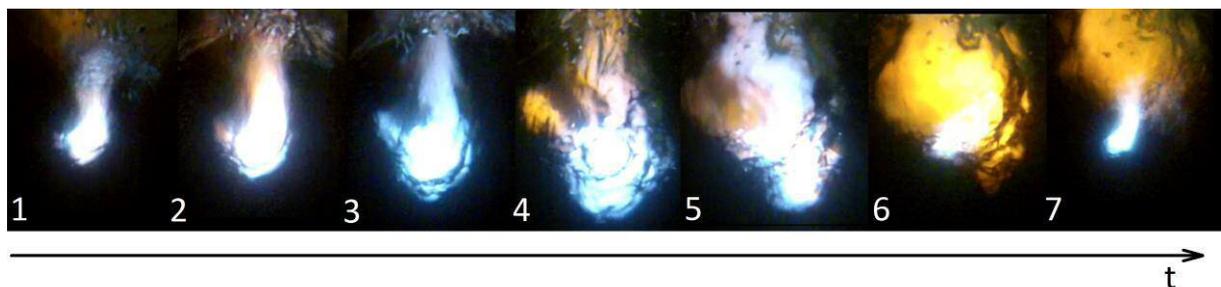


Abbildung 3-20: Zeitlicher Ablauf der Flammenausbildung unter Wasser mit außenmischender Düse

3.3.4 Reines CO₂-Schweißen

Die örtliche Prozesstrennung erfolgte unter Verwendung eines Unterwasser-Handschnidbrenner zur Vor- und Nachwärmung und eines MSG-Brenners (Abbildung 3-21).

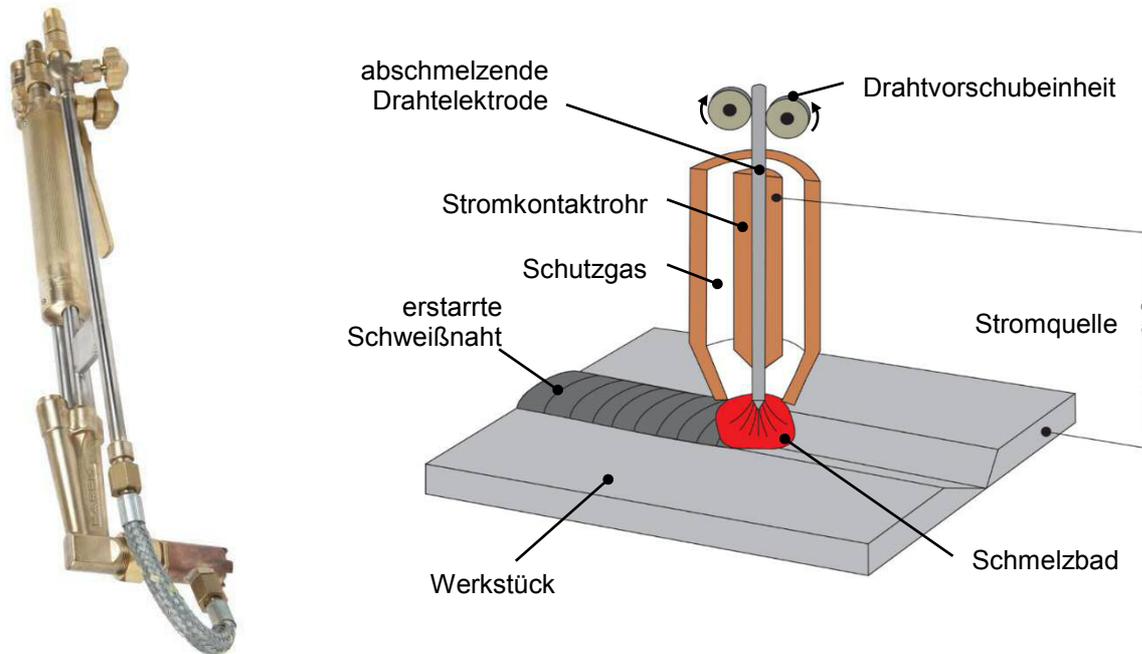


Abbildung 3-21: Kombination aus UW-Handschnidbrenner (li.) und MSG-Prozess (re.)

Der Handschnidbrenner der Fa. Harris; Modell 62-3FW ist entwickelt für Propan/Sauerstoff Anwendungen unter Wasser und ist mit einer Gasdüse ummantelt, welche zusätzlich über eine separate Leitung mit Sauerstoff versorgt wird und dadurch eine vollständige Verbrennung unter Wasser gewährleistet.

Die Tabelle 3-2 - Tabelle 3-3 stellen Auftragschweißnähte in Abhängigkeit vom Brennevorschub und von der Drahtvorschubgeschwindigkeit dar. Mit steigendem Drahtvorschub reduzieren sich die Anzahl der Spritzer und die Schweißnaht verläuft sowohl in der Breite als auch in der Höhe bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,5 m/min sehr gleichmäßig und rissfrei.

Tabelle 3-2: Auftragschweißnähte eines UW-MAG Prozesses in Abhängigkeit von Brennvorschubgeschwindigkeit und Drahtvorschubgeschwindigkeit – Teil 1

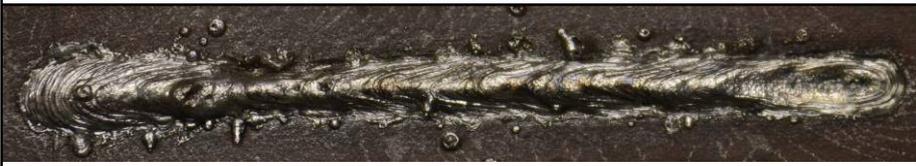
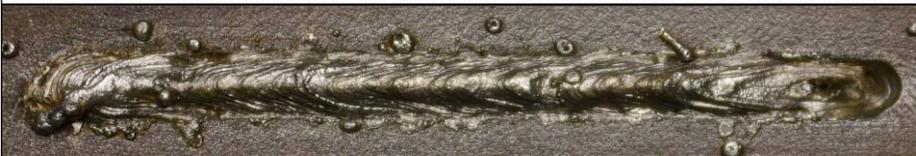
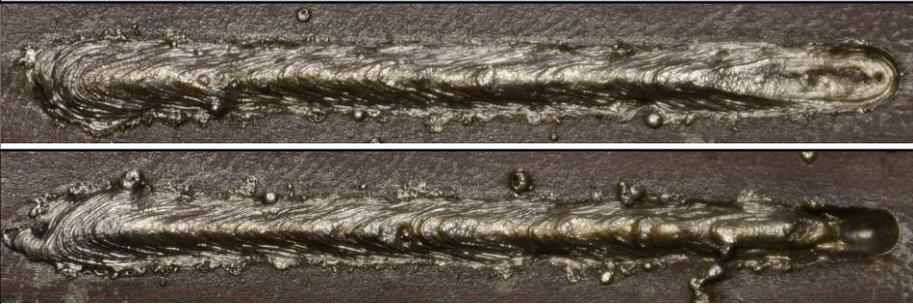
Vorschub in mm/s	Draht- vorschub in m/min	Auftragschweißnähte
6,0	0,5	
		
6,1	0,5	
		
		
		
6,3	0,5	
		

Tabelle 3-3: Auftragschweißnähte eines UW-MAG Prozesses in Abhängigkeit von Brennvorschubgeschwindigkeit und Drahtvorschubgeschwindigkeit – Teil 2

Vorschub in mm/s	Drahtvorschub in m/min	Auftragschweißnähte
6,4	0,5	

In Abbildung 3-22 ist ein metallografischer Querschliff der Schweißnaht mit den Schweißparametern aus Tabelle 3-3 dargestellt. Die Schweißnaht ist 9,3 mm breit, 2,8 mm hoch, besitzt eine Einbrandtiefe von 3,1 mm und eine WEZ von 3,9 mm. Die maximale Härte liegt bei 397 HV_{0,2} innerhalb der wärmebeeinflussten Zone und die gemittelte Härte des Schweißgutes beträgt 258 HV_{0,2}. Deutlich zu erkennen ist der porenfreie Nahtaufbau mit leichten Einbrandkerben.

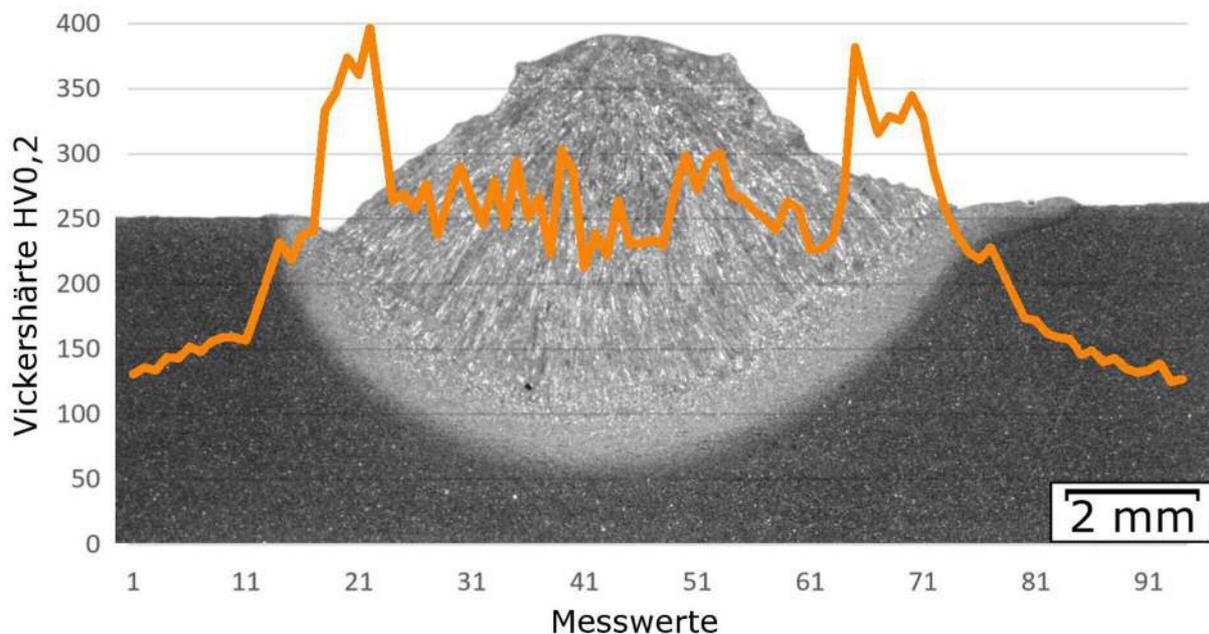


Abbildung 3-22: Querschliff einer Auftragschweißnaht beim UW-MAG Schweißen mit Härteverlauf

In Abbildung 3-23 sind Einbrandtiefe und WEZ über der Schweißgeschwindigkeit dargestellt. Gemäß dem Trend dieser Kurve zeigt sich, dass die steigende Geschwindigkeit keinen signifikanten Einfluss auf Einbrandtiefe und WEZ hat. Obwohl eine steigende Schweißgeschwindigkeit zu einem lokal geringeren Materialaufkommen führt, da sich die abschmelzende Drahtelektrode auf einen größeren Bereich verteilt, scheint die Schweißgeschwindigkeit keine Variation von Einbrandtiefe und WEZ zur Folge zu haben. Im Hinblick auf die Anwendung im Handprozess durch den Schweißtaucher, ermöglicht dieser Sachverhalt dem Schweißtaucher einen Geschwindigkeitsspielraum in dem der Brenner geführt werden kann, ohne dass sich die Einbrandverhältnisse ändern.

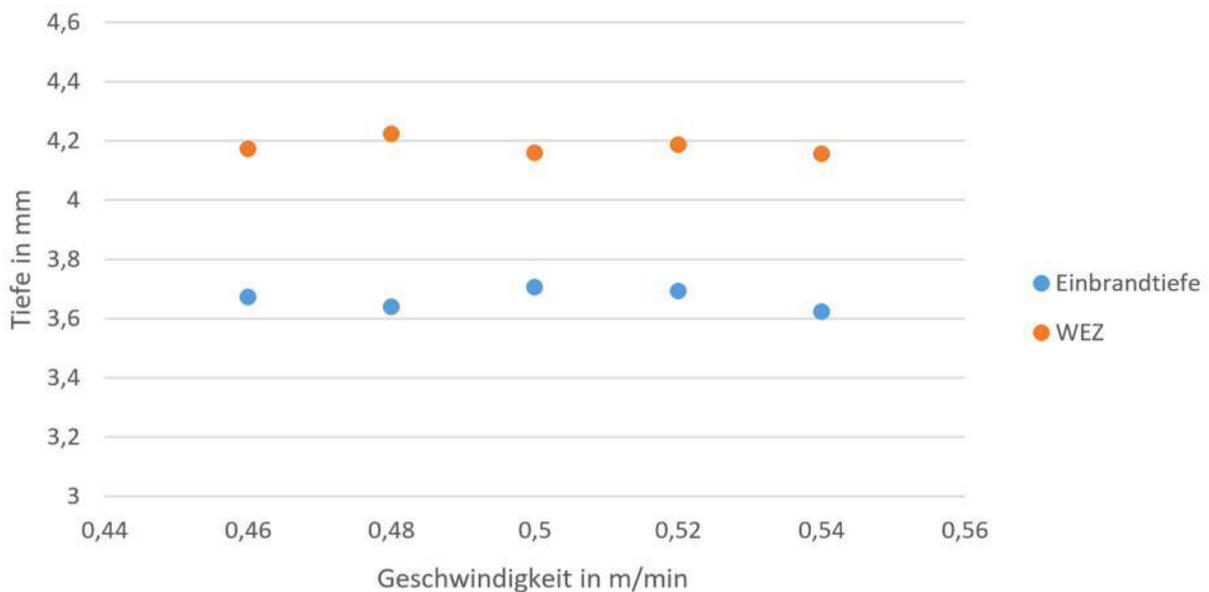


Abbildung 3-23: Einbrandtiefe und WEZ in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit beim UW-MAG Schweißen

Abbildung 3-24 zeigt die Einbrandtiefe und die WEZ über dem Drahtvorschub. Gemäß dem Trend der Kurven nehmen Einbrandtiefe und WEZ mit steigendem Drahtvorschub zu. Die Schweißnaht, die mit einem Drahtvorschub von 6,4 mm/s und einer Schweißgeschwindigkeit von 0,5 m/min geschweißt wurde, ist zudem sehr gleichmäßig, porenfrei und nahezu spritzerfrei.

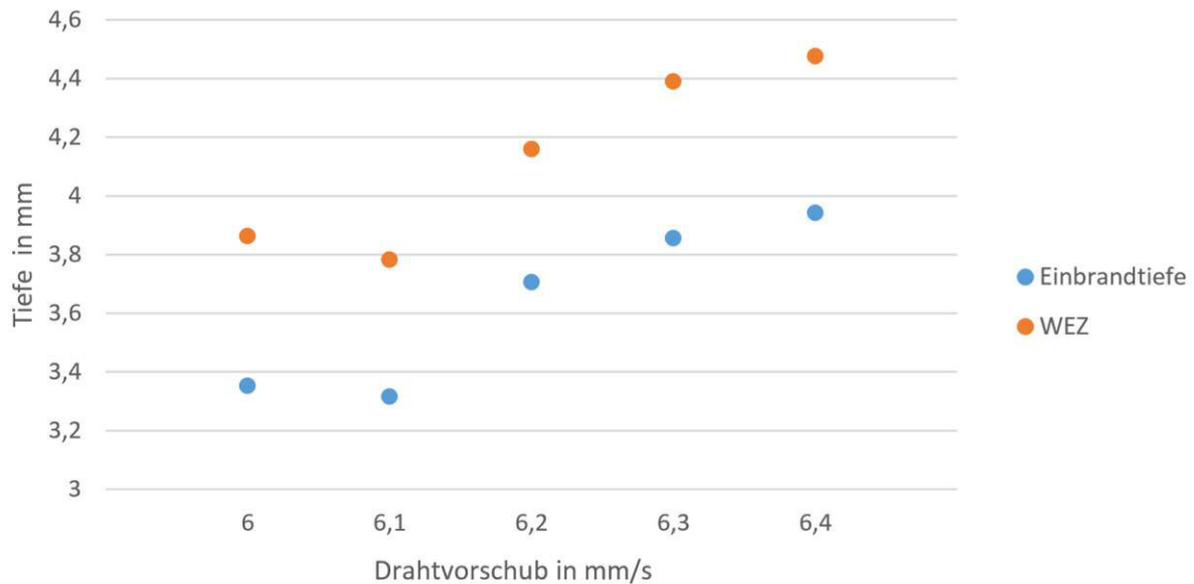


Abbildung 3-24: Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ in Abhängigkeit des Drahtvorschubes beim UW-MAG Schweißen

Neben der Drahtvorschub- und der Schweißgeschwindigkeit hat der Abstand zwischen Brennerdüse und Werkstück bzw. der eingestellte Gasdruck einen erheblichen Einfluss auf die Schweißnahtausbildung. Der Gasdruck darf weder zu hoch noch zu gering sein, da sich in beiden Fällen die Austrittsgeschwindigkeit des Schutzgases unerwünscht auf die Schweißnaht auswirkt. Bei zu hohem Druck, der zu einer zu hohen Austrittsgeschwindigkeit des Gases führt, wird die flüssige Schmelze aus der Kerbe geblasen. Analog sorgt ein zu geringer Druck zu einer zu geringen Austrittsgeschwindigkeit des Gases, das durch den Gegendruck des Wassers direkt an die Wasseroberfläche gedrückt wird, ohne sich schützend auf die Schweißnaht zu legen.

3.3.5 UW-MIG

Eine Möglichkeit die Spritzerbildung zu vermeiden, und somit den Schweißdrahtverbrauch zu reduzieren, besteht in der Möglichkeit statt eines Aktivgases ein Inertgas zu verwenden. Die folgenden Untersuchungen wurden daher mit Argon als Schutzgas und dem Versuchsaufbau aus Kapitel 3.3.4 durchgeführt.

Eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit des Brennersystems (V_{Brenner}) korreliert stark mit Auftragsvolumen, Tabelle 3-4. Die Schweißnaht wird schmaler und flacher. Ab $V_{\text{Brenner}} \geq 0,35$ m/min nimmt die Prozessstabilität zunehmend ab und die Schweißnaht weist Ungleichmäßigkeiten sowie Einbrandkerben auf.

Tabelle 3-4: Auftragschweißnähte eines UW-MIG Prozesses in Abhängigkeit von der Brennervorschubgeschwindigkeit

Parameter	Wert	Abbildung
Vorschubgeschwindigkeit	0,25 m/min <u>0,30 m/min</u> 0,35 m/min 0,40 m/min 0,45 m/min	
Drahtvorschub	7 mm/s	
Maschinen-einstellung	3 / 5	
Gasdruck	7 bar	
		

Eine Variation der eingestellten Drahtvorschubgeschwindigkeit in einem Wertebereich von 6,8 – 7,2 mm/s zeigt keinen signifikanten Einfluss auf die sich ausbildende Schweißnaht. Sowohl die Höhe und Breite als auch die Schuppung der Nahtoberfläche sind gleichbleibend, Tabelle 3-5.

Tabelle 3-5: Auftragschweißnähte eines UW-MIG Prozesses in Abhängigkeit vom Drahtvorschub

Parameter	Wert	Abbildung
Vorschubgeschwindigkeit	0,30 m/min	
Drahtvorschub	7,2 mm/s	
	7,1 mm/s	
	7,0 mm/s	
	6,9 mm/s	
	<u>6,8 mm/s</u>	
Maschinen-einstellung	3 / 5	
Gasdruck	7 bar	

Die Schweißspannung des MIG/MAG Schweißgeräts mit Konstantspannungscharakteristik lässt sich über 3 x 12 Stufen einstellen. Hierzu sind 3 x 12 Stufen zur Vor- und Feineinstellung vorhanden, wodurch ein Einstellbereich von 16,5 – 44,0 V ermöglicht wird. Das Zusammenspiel von Stromquellenkennlinie und Lichtbogenbrennphase führt dabei zur Selbststabilisierung der Lichtbogenlänge infolge eines Ausgleichs. Wird der Lichtbogen kürzer, so verringert sich durch den geringeren ohmschen Widerstand die Schweißspannung. Dadurch steigt die

Stromstärke an und die Abschmelzleistung der Drahtelektrode nimmt zu. Die Ergebnisse verdeutlichen den negativen Effekt eines zu langen Lichtbogens ab der Schaltstufe 3 / 6. Der Schweißprozess und der Werkstoffübergang werden zunehmend instabiler, welches sich in einer ungleichmäßigen Nahtausbildung manifestiert.

Tabelle 3-6: Auftragschweißnähte eines UW-MIG Prozesses in Abhängigkeit von der Maschineneinstellung

Parameter	Wert	Abbildung
Vorschubgeschwindigkeit	0,30 m/min	
Drahtvorschub	6,8 mm/s	
Maschineneinstellung	3 / 3 3 / 4 3 / 5 3 / 6 3 / 7	
Gasdruck	7 bar	
		

In einem Iterationsschritt wird der Drahtvorschub und somit die Schweißstromstärke in einem größeren Wertebereich variiert, Tabelle 3-7. Der Schweißprozess verläuft stabil, die Schweißnahtausbildung ist gleichmäßig und frei von Spritzer. Im Falle einer manuellen UW-MIG Handhabung ermöglicht diese Eigenschaft, die Ausbringung zu variieren ohne Einbußen in der Schweißnahtqualität.

Tabelle 3-7: Auftragschweißnähte eines UW-MIG Prozesses in Abhängigkeit vom Drahtvorschub – Iterationsschritt 1

Parameter	Wert	Abbildung
Vorschubgeschwindigkeit	0,30 m/min	
Drahtvorschub	7,6 mm/s 7,2 mm/s 6,8 mm/s 6,4 mm/s <u>6,0 mm/s</u>	
Maschineneinstellung	3 / 4	
Gasdruck	7 bar	
		

Neben den maschinenseitigen Schweißparametern hat der eingestellte Gasdruck des Schutzgases einen signifikanten Einfluss auf die Ausbildung von Poren innerhalb des Schweißgutes. Die hohe Abkühlgeschwindigkeit der Schmelze unter Wasser hat zur Folge, dass bei einem zu großen Gasdruck bzw. Volumenstrom des Schutzgases, dieses nicht ausreichend schnell aus der Fügezone entweichen kann und hier in Form von Poren verbleibt. Abbildung 3-25 stellt den Einfluss des Gasdruckes auf die Porenbildung im Schweißgut dar. Bei einer Reduktion des Gasdruckes auf ≤ 5 bar konnten keine Poren mehr nachgewiesen werden.

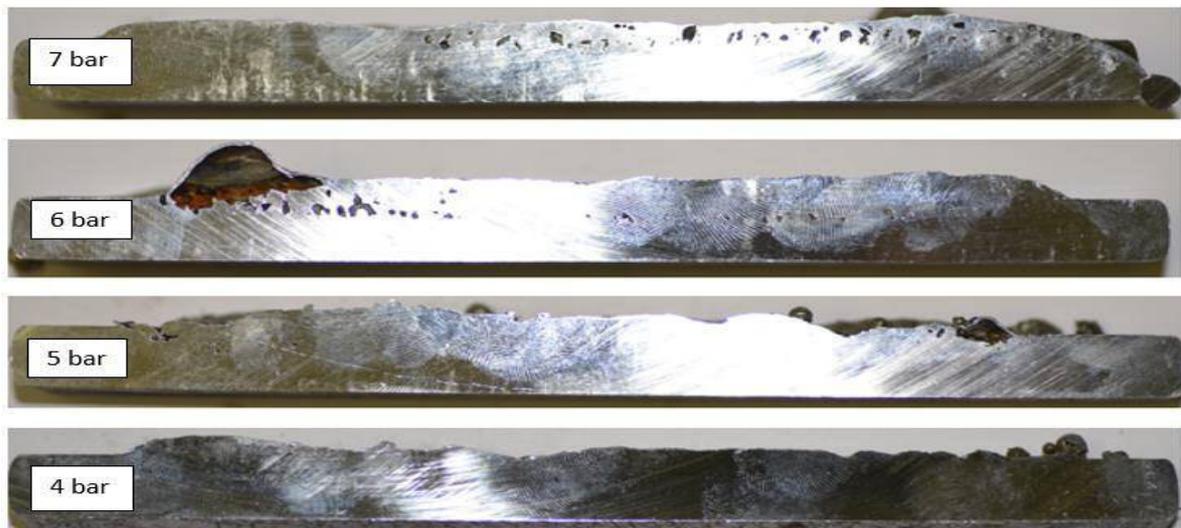


Abbildung 3-25: Längs getrennte Auftragschweißungen in Abhängigkeit des eingestellten Gasdruckes, Schweißparameter: $V_{\text{Brenner}} = 0,30 \text{ m/min}$, $V_{\text{Draht}} = 6,8 \text{ mm/s}$, Stufeneinstellung 3 / 4

Während der metallografische Querschliff der, mit einem Gasdruck von 7 bar, geschweißten Probe (Abbildung 3-26) viele große Poren aufweist, sind im Schweißgut einer Probe mit einem Gasdruck von 4 bar nahezu keine Poren zu erkennen.

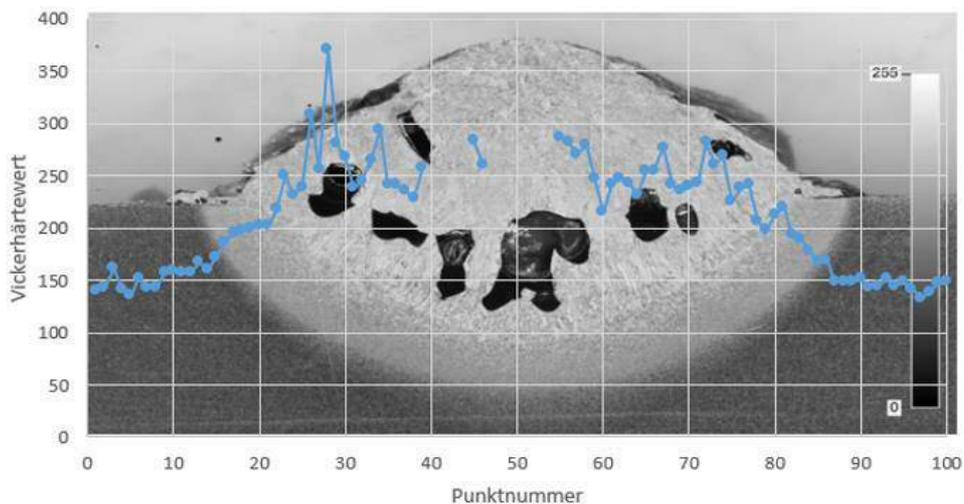


Abbildung 3-26: Metallografischer Querschliff einer UW-MIG Schweißnaht Schweißparameter: $V_{\text{Brenner}} = 0,30 \text{ m/min}$, $V_{\text{Draht}} = 6,8 \text{ mm/s}$, Stufeneinstellung 3 / 4, Gasdruck = 7 bar

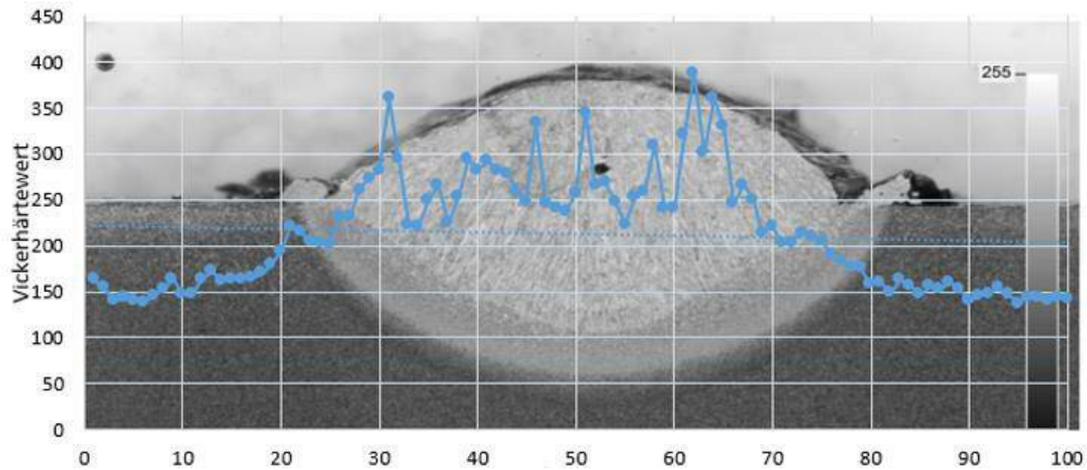


Abbildung 3-27: Metallografischer Querschliff einer UW-MIG Schweißnaht
Schweißparameter: $V_{\text{Brenner}} = 0,30 \text{ m/min}$, $V_{\text{Draht}} = 6,8 \text{ mm/s}$,
Stufeneinstellung 3 / 4, Gasdruck = 4 bar

3.4 Temperaturfeldmessungen

Die Schweißbarkeit von Stählen an Luft wird mittels des Kohlenstoffäquivalents $CEV = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$ bestimmt. Ab einem CEV über 0,45 gilt, dass seine Wärmebehandlung des Werkstücks nötig ist, um sicher ohne Kaltrisse schweißen zu können.

Die Wärmebehandlung erfolgt hier als Vor- und Nachwärmung. Diese beeinflusst, durch geeignetes Erhöhen der Grundtemperatur des Werkstücks, eine verlangsamte Abkühlung der Schweißzone nach der Schweißung. Besonders großen Einfluss auf das resultierende Gefüge und die Eigenschaften der Schweißverbindung hat die $t_{8/5}$ -Zeit.

$$t_{8/5} = (Q/2\pi\lambda) \cdot (1/(500 - T_0) - 1/(800 - T_0))$$

Die Startgeschwindigkeit T_0 hat demnach einen großen Einfluss auf das bestimmende Abkühlintervall. Gelingt es, diese in geeignetem Maße zu erhöhen, kann das Martensitgebiet umgangen werden und eine eher ferritisch / perlitische Struktur erreicht werden.

Die Temperaturfeldaufnahmen werden mit Hilfe von verschiedenen Thermoelementen und einem Datenerfassungsmodul TC-08, der Newport Electronics GmbH, über die USB-Schnittstelle eines Messrechners verwirklicht. Der tatsächliche Messbereich ist vom verwendeten Thermoelementtyp abhängig. Für die Versuche unter Wasser

werden Ni-Cr-Ni Mantelthermoelemente verwendet. Sie entsprechen der Typ-Klasse K. Der Messbereich bei diesem Thermoelementtyp beträgt zwischen -270 bis 1300°C. Da die Temperaturbeeinflussung des Stahlwerkstoffes S 235 in unterschiedlicher Werkstücktiefe untersucht werden soll, sind Sacklöcher mit verschiedenen Tiefen gebohrt worden. In diese Bohrungen werden die Thermoelemente mit Wärmeleitpaste eingebracht. Verschraubte Blechstreifen dienen dabei dazu, sie in den Probenbohrungen zu fixieren. Bei der Temperaturmessung sollte das Temperaturfeld nicht durch die Größe des Thermoelementes negativ beeinträchtigt werden. Daher wurden sowohl unter Wasser als auch an Atmosphäre Thermoelemente mit einem Durchmesser von 1mm eingesetzt. Die Sacklochdurchmesser betragen 1,1mm (Abbildung 3-28).

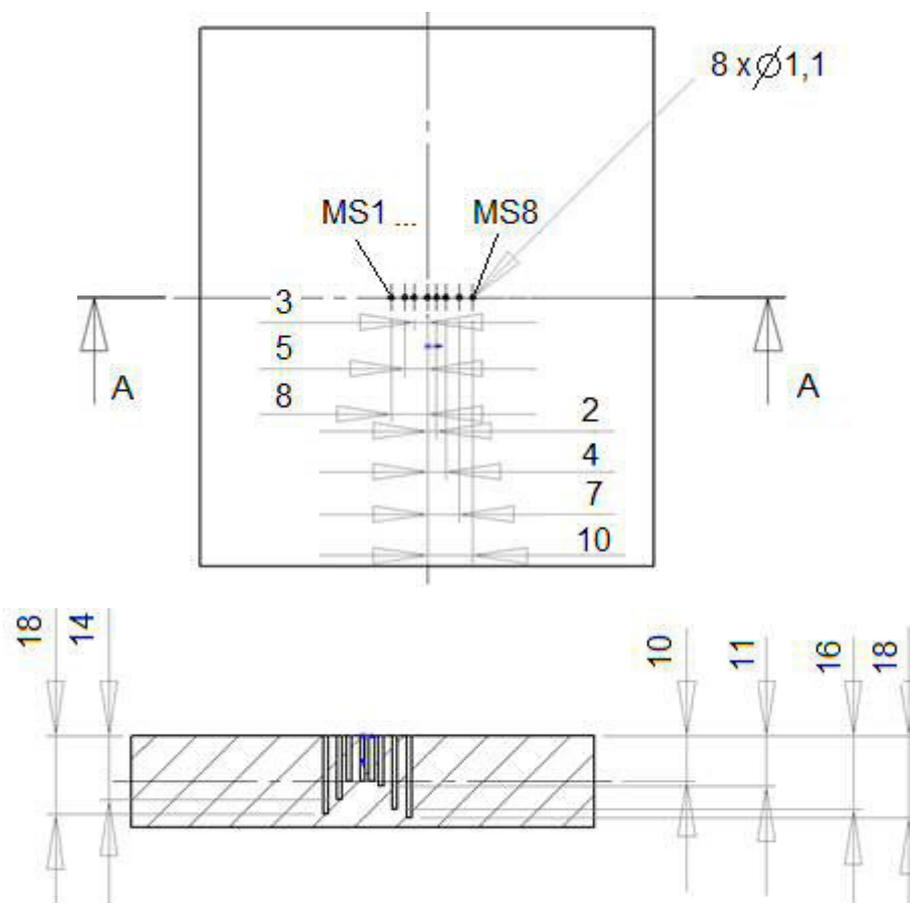


Abbildung 3-28: Skizzierter Aufbau zur Temperaturfeldmessung

Der Lichtbogenprozess konnte durch die örtliche Trennung der beiden Prozesse gezielter durch den Flammprozess vor- bzw. nachgewärmt werden. Zur Untersuchung der sich einstellenden Temperaturen innerhalb des Werkstückes in Folge der Wärmebehandlung durch den Flammprozess wurden Untersuchungen mit und ohne

Lichtbogen durchgeführt. Diese Messungen erlauben eine Untersuchung der Wärmewirkung der Flamme auf das Material unabhängig vom Schweißprozess.

In Tabelle 3-8 ist der Temperaturverlauf der einzelnen Thermoelementsensoren über der Zeit dargestellt. MS1 weist hierbei ein Maximum von 108°C auf. Die Maxima bei MS2, MS7 und MS8 betragen 98°C, 78°C und 74°C. Die Messstellen MS3 bis MS6 weisen keine auffälligen Unterschiede weder in ihren Maxima noch in ihren Temperaturverläufen auf. Ihre Temperaturmaxima liegen etwa bei 58°C.

Der stark abfallende Temperaturverlauf nach dem Maximum des Messpunktes MS1 und die geringen Unterschiede an den Gradienten zwischen den Temperaturen an den Messpunkten zeigen die schnelle Abkühlgeschwindigkeit unter Wasser.

Tabelle 3-8: Temperaturmessungen ohne Lichtbogen

Parameter	Wert	
Vorschubgeschwindigkeit	0,2 m / min	
Düse-Werkstückabstand	12 mm	

Tabelle 3-9 zeigt die gemessenen Temperaturverläufe einer Schweißraupe an den Messstellen MS1 bis MS8. Mit dem Start des Schweißvorganges werden steigende Temperaturverläufe beobachtet. Aufgrund der zusätzlichen Energie des Lichtbogens neben der Flamme ist die Steigung der Temperaturen stärker progressiv. Nach dem Erreichen eines Maximums weisen die Gradienten der Temperaturverläufe fallende Tendenzen auf. An der MS4 wird das absolute Maximum mit 634°C gemessen. Die

beiden Maxima bei MS5 und MS3 betragen 565°C, 537°C. Die anderen Messstellen weisen keine auffälligen Unterschiede weder in ihren Maxima noch in ihren Temperaturverläufen auf. Die höchsten Temperaturen werden unterhalb der Schweißraupe ermittelt. Von der Mitte der Schweißnaht nach außen hin werden geringe Temperaturentwicklungen beobachtet.

Tabelle 3-9: Temperaturmessungen mit Lichtbogen

Parameter	Wert	
Vorschubgeschwindigkeit	0,2 m / min	
Düse-Werkstückabstand	12 mm	

Des Weiteren wurde der Einfluss des Bypass-Sauerstoffs beim Brenner 3 untersucht. Ohne Bypass-Sauerstoff und ohne Lichtbogen wird die gemessene Maximaltemperatur in Tabelle 3-8 von 108 °C nicht erreicht. Die Maxima liegen bei etwa 85 °C.

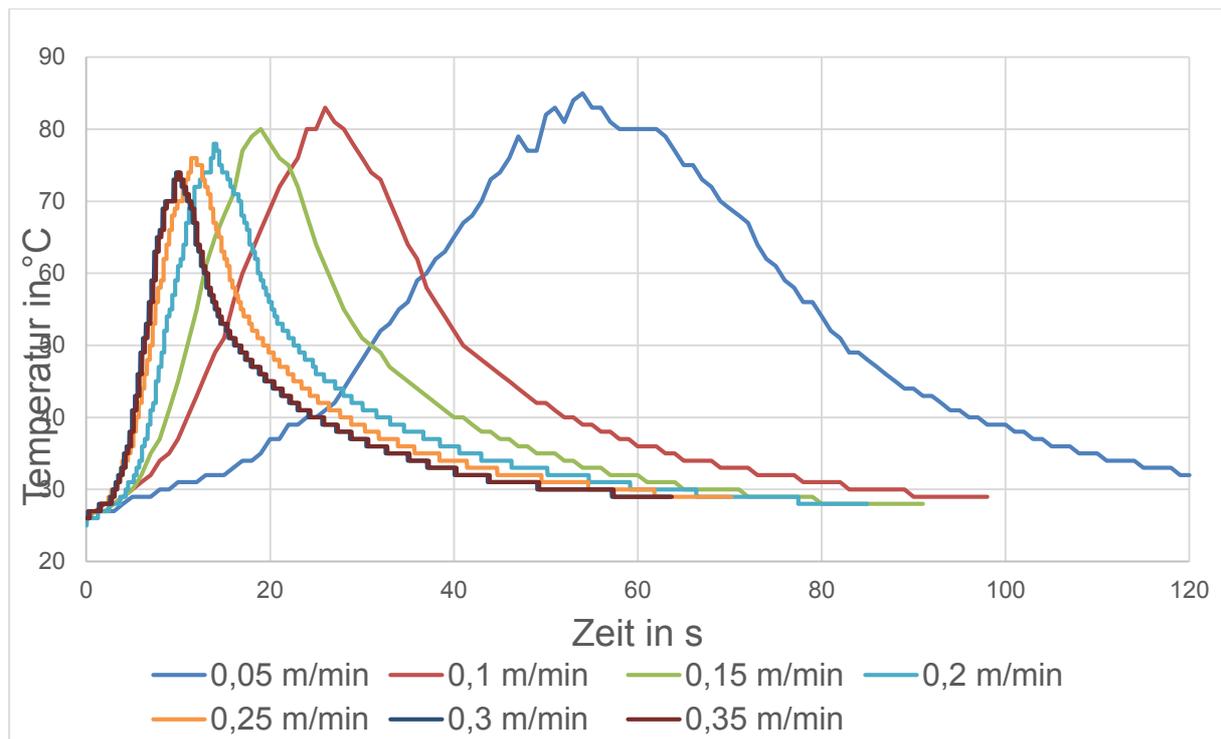


Abbildung 3-29: Temperaturmessungen ohne Bypass-Sauerstoff

Wird der Bypass-Sauerstoff hinzugeschaltet, erhöht sich die gemessene Maximaltemperatur auf ca. 140°C Abbildung 3-30. Die Erwärmung durch die nun vollständige Verbrennung der Flamme hat das Potential als Wärmebehandlungsmethode eingesetzt zu werden.

So kann eine Vorwärmung den Hohen Wärmeabgang zur Wasser-Seite zwar nicht beeinflussen, eine geänderte Ausgangstemperatur des Stahls könnte jedoch die t8/5-Zeit erhöhen.

Bei konstanter Wärmeeinbringung ($\dot{Q} = 42 \text{ kW} / \text{m}^2 = \text{konstant}$) und gleichbleibender Wärmeleitfähigkeit ($\lambda = 45 \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{s}) = \text{konstant}$) folgt, dass die t8/5-Zeit durch eine Vorwärmtemperatur von 100 °C gegenüber 23 °C von 12 s auf 16 s verlängert wird. Diese Temperatur wurde 12 s lang an der Oberfläche des Stahls gehalten.

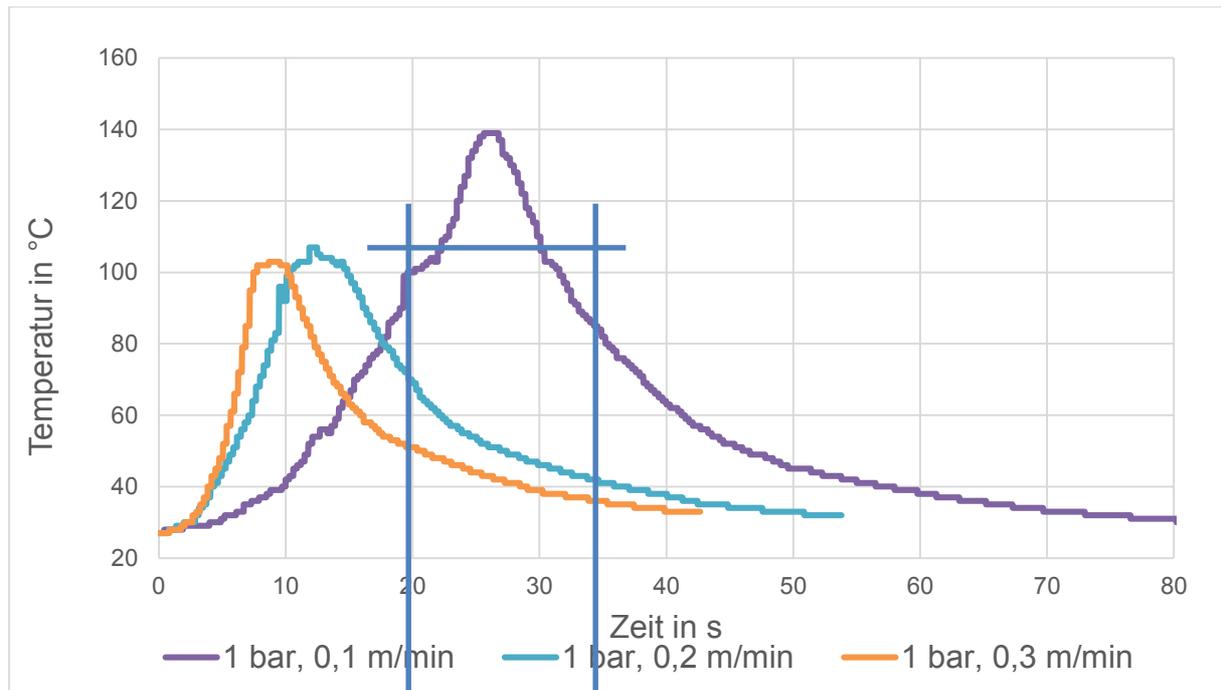


Abbildung 3-30: Temperaturmessungen mit Bypass-Sauerstoff

3.5 Untersuchungen zum diffusiblen Wasserstoffgehalt

In diesem Arbeitspunkt wurde untersucht, welchen Vorteil dieser Prozess in Bezug auf den Wasserstoffeintrag in das Schweißgut und in die Wärmeeinflusszone hat und ob das Verfahren eine Reduktion des H₂-Gehaltes gegenüber dem E-Handschiessen bringt. Die Ermittlung des diffusiblen Wasserstoffgehaltes erfolgte mittels eines G4 Phoenix Heißextraktions-Analysator der Fa. Bruker (Abbildung 3-31). Der schweißtechnische Versuchsablauf erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 3690:2012-07.



Abbildung 3-31: Bruker G4 Phoenix

Zur Abgrenzung der einzelnen Einflüsse des Lichtbogen- und des Flammprozesses wurden 3 verschiedene Prozesse untersucht.

- LB: Lichtbogenprozess mit anschließender Einlagerung der geschweißten Normproben in flüssigen Stickstoff.
- LB+1min: Lichtbogenprozess plus 1-minütige Auslagerung im Wasser und anschließende Einlagerung in flüssigen Stickstoff.
- LB+FL: Kombination aus Lichtbogen- und Flammprozess und anschließende Einlagerung in flüssigen Stickstoff.

Hierbei konnte festgestellt werden, dass der Gehalt des diffusiblen Wasserstoffs im Vergleich zum E-Handschweißen deutlich reduziert ist (Abbildung 3-32). Bei den genannten Prozessen lag der diffusible Wasserstoffgehalt bei etwa 20 ml / 100 g Schweißgut, während er beim klassischen E-Handschweißen bei etwa 70 – 90 ml / 100 g Schweißgut liegt.

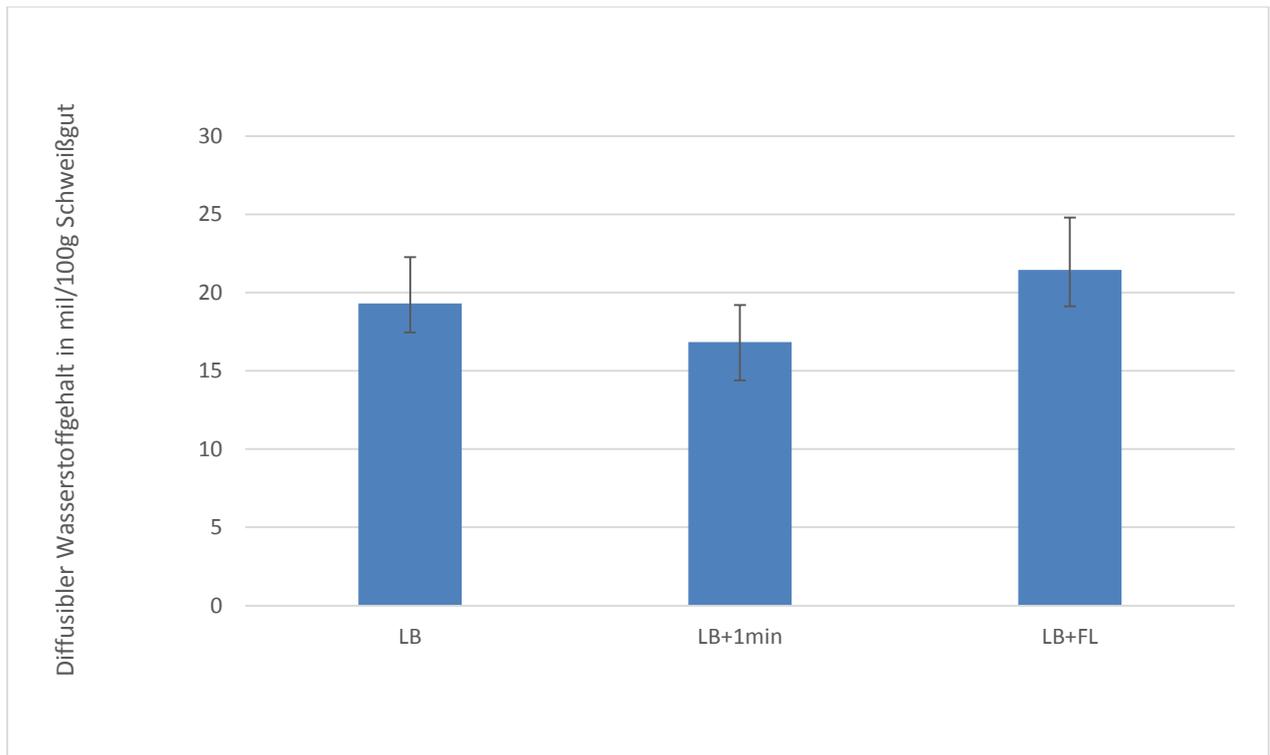


Abbildung 3-32: Diffusibler Wasserstoffgehalt im Schweißgut
 Schweißparameter: $V_v = 0,30$ m/min, $V_{\text{Draht}} = 6,8$ mm/s,
 Maschineneinstellung 3 / 4

3.6 Prozessevaluierung

Die manuellen Schweißversuche fanden in Zusammenarbeit mit der Fa. Tauchmayer GmbH statt. Zur Prozessevaluierung wurden folgende Schweißparameter eingestellt.

Tabelle 3-10: Schweißparameter bei manuellen Versuchsschweißungen

Parameter	Wert
Spannung	28 V
Strom	160 A
Maschineneinstellung	2 / 11
Drahtvorschub	4,5 mm /s

Die Tiefe des Wasserbeckens beträgt max. 4 m. Abzüglich Schweißstisch und Überschwappreserven am Beckenrand ergibt sich eine Schweißtiefe von ca. 3 m.

Die Handhabung des UW-MIG Brenners ist einer Anwendung an Luft ähnlich. Zu Beginn wird der Brenner an der Zündstelle positioniert und der Schweißlichtbogen gezündet, (Abbildung 3-33).



Abbildung 3-33: Prozessevaluierung; Schweißtaucher beim Ansetzen des UW-MIG Brenners, Schweißposition: PB

Nach dem Zündvorgang wird der Brenner in Horizontalposition entlang der Kehle des T-Stoßes geführt. Das ausströmende Argon schützt hierbei Schweißgut vor der Umgebung, vermindert aber zugleich eine gute Prozessbeobachtung seitens des Schweißtauchers.



Abbildung 3-34: Prozessevaluierung: Laufender UW-MIG Prozess, Schweißposition: PB

Die Untersuchungen zeigen, dass die Gleichmäßigkeit der sich ausbildenden Schweißnaht und die Menge an Unregelmäßigkeiten (z.B. Poren) sehr stark von der Führung des UW-MIG Brenners abhängt. Löst sich die schützende Argon-Gasblase von der Prozesszone durch ein zu starkes Verkippen des Brenners, so brennt der Lichtbogen „frei“ im Wasser. Der Prozess wird instabil und die Schweißnaht stark Poren behaftet, Abbildung 3-35.



Abbildung 3-35: Manuelle UW-MIG Schweißnaht, Wassertiefe: 3m

4 Gegenüberstellung der Zielsetzungen und der Ergebnisse des Forschungsvorhabens

4.1 Verwendung der Zuwendung

Forschungsstelle 1: Institut für Werkstoffkunde

24 PM Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Beschäftigungsgrad 1

22,6 PM Anlagentechniker, Beschäftigungsgrad 1

24 PM studentische Hilfskräfte, Beschäftigungsgrad 0,51

4.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Für eine erfolgreiche Kombination des Autogenprozesses und des Lichtbogenprozesses ist eine Modifikation eines autogenen Maschinenschneidbrenners notwendig, so dass der Drahtvorschub durch den Schneidsauerstoffzugang erfolgen konnte.

Die Integration in die Druckkammer (AP1) ermöglicht tiefenabhängige Untersuchungen. Der steigende Wasserdruck führt zur Einschnürung des Lichtbogens und muss entsprechend kompensiert werden. Des Weiteren ist mit einer Strömungs- und Druckänderung in Abhängigkeit der Wassertiefe zu rechnen, so dass hier die Integration des Prozesses in eine Druckkammer notwendig ist, um den Hybridprozess für unterschiedliche Wassertiefen zu evaluieren.

Die AP 2-5 lieferten Randbedingungen für einen stabilen Unterwasserschweißprozess, während die in den AP 6-8 die Eigenschaften der erzeugten Schweißnähte untersucht wurden. Im AP 10 wurde der im Labormaßstab entwickelte und untersuchte Schweißprozess in eine realitätsnahe Umgebung überführt und durch Schweißtaucher der Firma Tauchmayer GmbH evaluiert.

Die Praxistauglichkeit des Verfahrens konnte mit angemessenem Aufwand realitätsnah nachgewiesen werden.

5 Wirtschaftliche Bedeutung des Forschungsvorhabens für kleine und mittlere Unternehmen

Die Entwicklung eines Hybridschweißprozesses für die Unterwasseranwendung ändert in vielfältiger Weise die Möglichkeiten bei der Sanierung, bzw. Reparatur von Wasserbauwerken sowohl im Binnen-, als auch im Off- bzw. Near-Shore Bereich. Die Entwicklung und Vermarktung der schweißtechnischen Ausrüstung für diese Anwendung erfolgt in KMU, sodass hier mit neuen Produkten ein bestehendes Geschäftsfeld erweitert oder ganz neu aufgebaut werden kann. Für die Planungsarbeiten bedeutet die Entwicklung des neuen Schweißverfahrens auch hinsichtlich der sich ändernden Materialgüten eine verlässliche Kalkulationsbasis für Sanierungskonzepte und Reparaturplanungen. Den größten Effekt sollte diese Entwicklung aber für die KMU sein, welche als Tauchunternehmen die Schweißarbeiten durchführen. Da das Verfahren das kontinuierliche Schweißen ermöglicht und einen integrierten Vor-, bzw. Nachwärmvorgang beinhaltet, können Schweißarbeiten zukünftig wesentlich schneller und einfacher realisiert werden. Dies ermöglicht ein wirtschaftliches Ausführen von Schweißarbeiten, sodass auch die Anwendungsbreite der UW-Schweißung erweitert wird.

6 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

6.1 Bereits durchgeführte Transfermaßnahmen

	Ziel	Rahmen	Datum/Zeitraum
Maßnahme A: Öffentlichkeitsarbeit durch Beschreibung des Projektes	Informationsbereitstellung über die laufenden Forschungsarbeiten	A1 Veröffentlichung des Projektrahmens und Zielstellung auf der Internetseite beider Forschungsstellen	seit Januar 2015
Maßnahme B: Information und Weiterbildung der Unternehmen des PbA	Beratung und aktive Unterstützung innerhalb des Forschungsvorhabens	B1 Informationsweitergabe für individuelle Fragestellungen zum Projekt	seit Januar 2015
Maßnahme C: Projektbegleitender Ausschuss (PbA)	Transfer und Diskussion von Zwischenergebnissen bzgl. des Forschungsstandes	C1 Vorstellung des Projektes und Diskussion der geplanten Arbeiten und der bisher erzielten Ergebnisse C2 Vorstellung der bisher erzielten Ergebnisse und Diskussion der weiteren Vorgehensweise C3 Vorstellung der bisher erzielten Ergebnisse und Diskussion der weiteren Vorgehensweise C4 Vorstellung der bisher erzielten Ergebnisse und Diskussion der weiteren Vorgehensweise	1. Sitzung PA 08.09.2015 2. Sitzung PA 02.12.2016 3. Sitzung PA 28.03.2017 3. Sitzung PA 21.09.2017
Maßnahme D: Demonstrations-schnitte unter Wasser bei Institutsführungen, Lehr- und öffentlichen Veranstaltungen	Breite internationale Streuung des Forschungsvorhabens und dessen Ergebnisse	D1 Demonstrationsschweißungen im Versuchsbecken am UWTH	Seit Juli 2016

6.2 Weitere geplante Transfermaßnahmen

	Ziel	Rahmen	Datum/Zeitraum
Maßnahme E: Weiterbildung/Transfer in die Wirtschaft über Fachveranstaltungen	Weiterbildung von Mitarbeitern aus kmU ohne eigene Forschungskapazitäten	F1 Individuelle Vorträge am Institut für Werkstoffkunde auf Anfrage	Ab April 2018
		F2 Schulung von potentiellen Anwendern der Wirtschaft	Ab April 2018
Maßnahme F: Wissenschaftliche Publikation	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	G1 Beiträge in ausgewiesenen Fachzeitschriften sowie internationalen Magazinen	Ab April 2018
Maßnahme G: Akademische Lehre	Lehre nach dem Stand von Wissenschaft und Technik	H1 Übernahme ausgewählter Ergebnisse in die akademische Lehre der Leibniz Universität Hannover	Ab April 2018

6.3 Realisierbarkeit der Umsetzung in der Wirtschaft

Die Projektergebnisse zeigen ein differenziertes Bild bzgl. der Realisierbarkeit der Umsetzung in der Wirtschaft. Eine Realisierbarkeit eines Hybridprozesses aus einer autogenen Flamme und einem Lichtbogen in einer Prozesszone ist aufgrund sich gegenseitig negativ beeinflussender Prozessparameter insofern nicht möglich, da eine manuelle Umsetzung durch Taucher nicht die gewünschte und erforderliche Schweißnahtqualität erreicht.

Weiterhin zeigen die Ergebnisse, dass eine örtliche Trennung der beiden Prozesse eine sehr gute Realisierbarkeit durch die betreffenden KmU aufweist. Das entwickelte Schlacke freie, kontinuierliche UW-Schweißverfahren erhöht in hohem Maße die Wirtschaftlichkeit, da zum einen weniger Ansatzstellen vorhanden sind und zum

anderen die Länge der Schweißnaht nicht mehr durch die endliche Länge des Schweißzusatzwerkstoffes festgelegt ist. Eine Validierung im Wasserbecken am Institut für Werkstoffkunde konnte die technische Umsetzbarkeit direkt mit einem Unternehmen der möglichen Zielgruppe der Tauchfirmen aufzeigen. Die für den Einsatz notwendigen Gerätschaften (MSG-Schweißgerät und UW-Autogenbrenner) sind bei den Unternehmen der Schweißtaucherbranche in der Regel vorhanden und können ohne Umrüstung für den Einsatzzweck verwendet werden.

6.4 Zusammenstellung der im Projektrahmen veröffentlichten Arbeiten

Geplant:

- Beitrag im DVS Geschäftsbericht 2018 wurde eingereicht
- Artikel in der Zeitschrift Schweißen und Schneiden, DVS Media GmbH

7 Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 18.708 N der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

8 Literaturverzeichnis

- [1] W. Kielczynski, K. Lesinski, T. Piatkowski: Technologies and equipment for underwater welding and cutting; Welding International; 1994, 8(4), pp 257-261
 - [2] M. Rowe, S.Lui: Recent developments in underwater wet welding; Science and Technology of Welding and Joining, 2001, Vol. 6; No. 6, pp 387-396
 - [3] DIN 2302:2005-03 Schweißzusätze - Schweißzusätze für das Nassschweißen unter Überdruck von unlegierten Stählen und Feinkornstählen - Abnahmebedingungen für die Prüfung und Qualifizierung von Schweißzusätzen für das Nassschweißen unter Überdruck
 - [4] DVS Merkblatt 1814: „Gefahren durch elektrischen Strom beim nassen Unterwasserlichtbogenschweißen und notwendige Schutzmaßnahmen“; DVS 12/1993
 - [5] J. H. Hamkens: Unterwassernassschweißen mit selbstschützenden Fülldrahtelektroden, Dissertation LU Hannover; VDI Verlag; Reihe 2; 242; 1991
 - [6] V. A. Kononenko: Technologies of underwater wet welding and cutting; Kiev-Ukraine; E.O. Paton Institute; ISBN 966-8872-03-7
 - [7] P. Szelagowski: Unterwasserschweißen – Stand und Entwicklungstendenzen; Schweißen & Schneiden; Vol. 43 (1991) Heft 2/91 S. 89-93
 - [8] S. Ibarra, S. Liu; D.L. Olson: Underwater wet welding of steel; Welding Research Council, WRC – Bulletin 401; may 1995; ISSN 0043-2326
 - [9] R. Bucurel, G. Hlfika: Laser Beam Welding Process Automates Underwater Repairs; WELDING JOURNAL; Jan 2010; pp. 47-49
 - [10] J.H. Nixon: Under Water Reapair Technology; Abington Publishing; 2000; ISBN 1 85573 239 4
-

- [11] H. J. Fahrenwaldt, V. Schuler, J. Twrdek: Praxiswissen Schweißtechnik; Springer Vieweg Verlag; 5. Aufl. 2014
- [12] M. Hamasaki, Y. Murao: "Underwater gas cutting"; Trans. Japan Welding Society 1978 (2)
- [13] J. Labanowski: Development of under-water welding techniques, Welding International; Vol. 25 No. 12; 12/2011; S. 933-937
- [14] J. Bartzsch: Untersuchungen zu metallurgischen und physikalischen Vorgängen beim Schweißen unter extremen Bedingungen; Habilitation TU Clausthal; 2002
- [15] R. Wernicke: Underwater wet repair welding and strength testing on pipe-patch joints; J. Of Offshore Mechanics and Arctic Engineering; 11/1998; Vol. 120; pp 237-242
- [16] Hassel, T.; Konya, R.; Collmann, P.; Schaumann, P.; Priebe, S.; Deißer, T. A.; Beniyash, A.; Murray, N.; Bach, Fr.-W. (2013): Economical joining of tubular steel towers for wind turbines employing non-vacuum electron beam welding for high-strength steels in comparison with sub-merged arc welding, Welding in the World; online
<http://www.springerlink.com/openurl.asp?genre=article&id=doi:10.1007/s40194-013-0050-6>.
- [17] T. Hassel, V. Hecht-Linowitzki, S.M. Kussike, D. Rehfeldt, Fr.-W. Bach: Systematische Untersuchung zum nassen Lichtbogenschweißen unter Wasser mit umhüllten Stabelektroden; Schweißen & Schneiden 66 (2014) Heft 5
- [18] DIN EN 10248-1: Warmgewalzte Spundbohlen aus unlegierten Stählen – Teil 1: Technische Lieferbedingungen; Deutsche Fassung prEN 10248-1: 2006; Beuth Verlag
- [19] DVS Merkblatt 1813: „Unterwasser – Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Stabelektroden“; 06/1995
-

- [20] P. Szelagowski, S. Ibarra, A. Ohliger, J.F. Dos Santos: The application of “in situ” post weld heat treatment to wet welds; 1992 OMAE – Vol. II-A, Materials Engineering
- [21] Uwer D. und H. Höhne: „Ermittlung angemessener Mindestvorwärmtemperaturen“ Schweißen und Schneiden 43 (1991), Heft 5, S. 282-287. und IIW-Doc. IX-1631-91
- [22] Uwer, D. und H. Wegmann: Anwendung des Kohlenstoffäquivalentes CET zur Berechnung von Mindestvorwärmtemperaturen für das kaltrissichere Schweißen von Baustählen. Jahrbuch Schweißtechnik '96, Deutscher Verband für Schweißtechnik e.V., S. 46-55
- [23] Günter Schulze: Die Metallurgie des Schweißens, Eisenwerkstoffe – Nichteisenmetallische Werkstoffe; 4. Aufl.; Springer Verlag; 2010
- [24] Nachschlagewerk Stahlschlüssel; Stahlschlüssel 2010; (Vers. 6.01.0000); Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH
- [25] Läßle, V.: Wärmebehandlung des Stahls, Verlag Europe Lehrmittel; Haan-Gruiten, 6. Aufl. 2006
- [26] DIN EN ISO 13916: Schweißen – Anleitung zur Messung der Vorwärm-, Zwischenlagen, und Haltetemperatur; Ausgabe 11-1996
- [27] D.J. Keats: Professional diver's manual on wet welding; Abington Publishing; ISBN 1 85573 006 5; 1990
- [28] P. Szelagowski, S. Ibarra, A. Ohliger, J.F. Dos Santos: In-Situ post-weld Heat treatment of wet welds; OTC Offshore Technology Conference Houston, USA; 05/1992
- [29] D. Fydrych, J Labanowski, Grzegorz Rogalski: Weldability of high strength steels in wet welding conditions; POLISH MARITIME RESEARCH 2(78) 2013 Vol 20; pp. 67-73; 10.2478/pomr-2013-0018
-

- [30] E.C.P. Pessoa, A.Q. Bracarense, S. Liu, F. Peres: Study of “re-melt” temper bead and polarity effects on porosity in the under freshwater wet welds; 23rd Int. Conf. on Offshore Mechanics and Arctic Engineering OMAE; Vancouver, Canada; 05/2004
- [31] R.C. de Medeiros, S. Liu: A predictive electrochemical model for weld metal hydrogen pickup in underwater wet welds; J. Of Offshore Mechanics and Arctic Engineering; 11/1998; Vol. 120; pp 243-248
- [32] T. Fukuda et al: Temper-bead weld by underwater laser beam welding; 17th Int. Conf. on Nuclear Engineering, ICONE17; 07/2009; Brüssel, Belgien
- [33] B. Newton: Ambient temperature temperbead welding using the underwater laser beam welding process; ASME 2010 Pressure Vessel & Piping Division /K-PVP Conf.; 07/2010 (PVP2010-26134)
-

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Schematische Darstellung des Gefüges der Schmelzzone (blau) und der Wärmeeinflusszone (gelb) am Beispiel einer Kehlnaht.....	10
Abbildung 1-2:	Unternahtriss an einer hyperbar, nass geschweißten Naht (E-Hand Schweißung) entstanden durch den eingetragenen diffusiblen Wasserstoff, Aufhärtung und innere Spannungen.....	13
Abbildung 1-3:	Ausbildung der Schweißnaht in Abhängigkeit der Umgebung	14
Abbildung 1-4:	Illustration des Einflusses der Abkühlung des Gefüges und der resultierenden und eigenschaftsbildenden Gefügeausbildung für Fe-Basiswerkstoffe (z.B. C45) [25].....	14
Abbildung 1-5:	Graphische Darstellung der Abkühlzeit $t_{8/5}$	15
Abbildung 2-1:	Darstellung der Prozesszone des Autogen-MAG-C-Hybridprozesses für das hyperbar nasse Schweißen	17
Abbildung 3-1:	Innenüberdruckkammer mit angeflanschem Steigrohr.....	19
Abbildung 3-2:	3D-Modell der Innenüberdruckkammer.....	20
Abbildung 3-3:	drylin E Raumportal ohne Zusatzanbauten und Montagehilfen.....	21
Abbildung 3-4:	Brennerhalterung und Winkelstelleinheit.....	21
Abbildung 3-5:	Explosionsansicht der Brennerhalterung und Winkelstelleinheit	22
Abbildung 3-6:	Schnittansicht der Druckkammer und integriertem Achsportal.....	22
Abbildung 3-7:	Eingebautes Achsportal in der Innenüberdruckkammer.....	23
Abbildung 3-8:	Testlauf des Achsportal.....	23
Abbildung 3-9:	Versuchsstand für geringe Wassertiefen	24
Abbildung 3-10:	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für geringe Wassertiefen	25
Abbildung 3-11:	Links Brenner 1, Mitte Brenner 2, Rechts Brenner 3.....	25
Abbildung 3-12:	Außenmischendes Düsensystem ohne (oben) und mit 8unten) Wasservorhang	26
Abbildung 3-13:	Schlierenoptische Untersuchung der Gasströmung	27

Abbildung 3-14: Düsenkonzepte für außenmischende Düsen	28
Abbildung 3-15: Einsatz des außenmischenden Düsensystems mit Wasservorhang beim Unterwasserschweißen	28
Abbildung 3-16: Düsen-Werkstückabstand 10 mm, Schweißspannung 28 V, Schweißstrom 160 A	30
Abbildung 3-17: Düsen-Werkstückabstand 20 mm, Schweißspannung 28 V, Schweißstrom 160 A	30
Abbildung 3-18: Düsen-Werkstückabstand 12 mm, Vorschubgeschwindigkeit a) 0,3 , b) 0,4, c) 0,5, d) 0,8 m/s	31
Abbildung 3-19: Querschliff durch eine UW-A-MAG-C-Schweißnaht (S235 geschweißt mit SG2 Draht d=1,2mm)	32
Abbildung 3-20: Zeitlicher Ablauf der Flammenausbildung unter Wasser mit außenmischender Düse	32
Abbildung 3-21: Kombination aus UW-Handschnidbrenner (li.) und MSG-Prozess (re.)	33
Abbildung 3-22: Querschliff einer Auftragschweißnaht beim UW-MAG Schweißen mit Härteverlauf	35
Abbildung 3-23: Einbrandtiefe und WEZ in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit beim UW-MAG Schweißen	36
Abbildung 3-24: Einbrandtiefe und Tiefe der WEZ in Abhängigkeit des Drahtvorschubes beim UW-MAG Schweißen	37
Abbildung 3-25: Längs getrennte Auftragschweißungen in Abhängigkeit des eingestellten Gasdruckes, Schweißparameter: $V_{\text{Brenner}} = 0,30$ m/min, $V_{\text{Draht}} = 6,8$ mm/s, Stufeneinstellung 3 / 4	42
Abbildung 3-26: Metallografischer Querschliff einer UW-MIG Schweißnaht Schweißparameter: $V_{\text{Brenner}} = 0,30$ m/min, $V_{\text{Draht}} = 6,8$ mm/s, Stufeneinstellung 3 / 4, Gasdruck = 7 bar	42
Abbildung 3-27: Metallografischer Querschliff einer UW-MIG Schweißnaht Schweißparameter: $V_{\text{Brenner}} = 0,30$ m/min, $V_{\text{Draht}} = 6,8$ mm/s, Stufeneinstellung 3 / 4, Gasdruck = 4 bar	43

Abbildung 3-28: Skizzierter Aufbau zur Temperaturfeldmessung	44
Abbildung 3-29: Temperaturmessungen ohne Bypass-Sauerstoff	47
Abbildung 3-30: Temperaturmessungen mit Bypass-Sauerstoff	48
Abbildung 3-31: Bruker G4 Phoenix.....	49
Abbildung 3-32: Diffusibler Wasserstoffgehalt im Schweißgut Schweißparameter: V _V = 0,30 m/min, V _{Draht} = 6,8 mm/s, Maschineneinstellung 3 / 4	50
Abbildung 3-33: Prozessevaluierung; Schweißtaucher beim Ansetzen des UW-MIG Brenners, Schweißposition: PB.....	51
Abbildung 3-34: Prozessevaluierung: Laufender UW-MIG Prozess, Schweißposition: PB	52
Abbildung 3-35: Manuelle UW-MIG Schweißnaht, Wassertiefe: 3m	52

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Übersicht über die unter Wasser zur Anwendung kommenden autogenen Brenngase und deren Anbieter.....	8
Tabelle 1-2: Arten und Berechnungsgrundlagen für das Kohlenstoffäquivalent	11
Tabelle 1-3: Berechnung der verschiedenen Kohlenstoffäquivalente anhand der vorliegenden Legierungsbestandteile und die Zusammensetzung der nach DIN EN 10248 definierten Spundwandgütern	11
Tabelle 3-1: Typenbezeichnung und Größen der verwendeten Düsen	29
Tabelle 3-2: Auftragschweißnähte eines UW-MAG Prozesses in Abhängigkeit von Brennvorschubgeschwindigkeit und Drahtvorschubgeschwindigkeit – Teil 1.....	34
Tabelle 3-3: Auftragschweißnähte eines UW-MAG Prozesses in Abhängigkeit von Brennvorschubgeschwindigkeit und Drahtvorschubgeschwindigkeit – Teil 3.....	35
Tabelle 3-4: Auftragschweißnähte eines UW-MIG Prozesses in Abhängigkeit von der Brennvorschubgeschwindigkeit.....	38
Tabelle 3-5: Auftragschweißnähte eines UW-MIG Prozesses in Abhängigkeit vom Drahtvorschub	39
Tabelle 3-6: Auftragschweißnähte eines UW-MIG Prozesses in Abhängigkeit von der Maschineneinstellung	40
Tabelle 3-7: Auftragschweißnähte eines UW-MIG Prozesses in Abhängigkeit vom Drahtvorschub – Iterationsschritt 1	41
Tabelle 3-8: Temperaturmessungen ohne Lichtbogen	45
Tabelle 3-9: Temperaturmessungen mit Lichtbogen	46
Tabelle 3-10: Schweißparameter bei manuellen Versuchsschweißungen	50
