

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

zur Fördermaßnahme Maritimes Forschungsprogramm

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines
Beschlusses des Deutschen Bundestages.



Zuwendungsempfänger:

AMT GmbH

Förderkennzeichen:

03SX576B

Verbundprojekt: MARIOW - Kooperative Erarbeitung einer wegweisenden, KI-gestützten Unterwasserschweißtechnologie geführt durch ein remote operated vehicle

Vorhaben: Entwicklung einer automatisierten Unterwasserschweiß-Technologie

Laufzeit des Vorhabens:

01.01.2022 - 30.09.2025

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Ziel dieses Vorhabens war die Entwicklung einer vollständig automatisierten Unterwasserschweißtechnologie, die alle Vorgaben zur sicherheitstechnischen Eignung zum nassen Unterwasserschweißen nach VBG-15 erfüllt.

Dazu sollte im Projekt ein kompakter, vollmechanisierter FCAW-Brenner mit Drahtvorschub entwickelt werden, sodass die Schweißtechnologie von einem ROV geführt und automatisiert durchgeführt werden kann. Für dieses System sollte eine miniaturisierte, unterwassergeeignete Stromquelle entwickelt werden, die auf dem ROV positioniert werden kann. Für einen kontinuierlichen Schweißprozess und eine lange Betriebsdauer sollte ein präzises Drahtförderungssystem mit Kapselung und adaptiver Druckluftbeaufschlagung entwickelt werden.

Weiterhin sollte ein Schweißdatenerfassungssystem inkl. Sensoren und Schnittstellen für die Weitergabe der Daten an ein KI-Modul entwickelt werden, welches den Schweißprozess steuert und durch maschinelles Lernen kontinuierlich verbessert.

Das neue Unterwasser-Schweißmodul sollte in Praxisversuchen im Becken und unter Realbedingungen erprobt und so weiterentwickelt werden, dass ein robuster, automatisierter Unterwasserschweißprozess gewährleistet werden kann.

Zusammenfassung der Vorhabenziele:

1. Entwicklung der Komponenten des UW-Schweißmoduls:
 - Funktionsfähiger UW-FCAW-Brenner
 - miniaturisierte Stromquelle
 - Drahtförderungssystem mit Kapselung
2. Automatisierung des Fülldrahtschweißens als robuster UW-Schweißprozess
3. Aufbau eines Schweißdatenerfassungssystems
4. Modul zum Vor- und Nachwärmen der Schweißnaht
5. Aufbau und Praxiserprobung des gesamten Schweißmoduls

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

AMT ist spezialisiert auf schweißtechnische Nischenprodukte sowie kundenspezifische Systemlösungen im Bereich der Schweiß-, Schneid- und Stromquellentechnik mit über 60 Jahren Erfahrung in der Schweißbranche.

Neben schweißtechnischen Standardanlagen liegen die AMT-Schwerpunkte in Entwicklung und Bau der Gerätetechnik zum nassen Unterwasser-Schweißen, Plasma-MSG-Schweißen, Hyperbarem-Schweißen, MSG-Impulsschweißen und innovativen Stromquellen.

Die technologische Grundlage für das durchgeführte Projekt ist der bei AMT entwickelte Demonstrator eines UW-Handschweißbrenners, aufgrund dessen innovativen Prinzips des kontinuierlichen Fülldrahtschweißens erstmals ein automatisierbarer Unterwasserschweißprozess möglich wurde.

Die Durchführung des Schweißprozesses erfolgt über einen Fülldrahtlichtbogenschweißprozess mit selbstschützendem Fülldraht (englisch: Self Shielded Flux Cored Arc Welding, FCAW-S), einer Sonderform des Metall-Schutzgas-Schweißens (MIG/MAG), welcher erstmals eine Automatisierung und beliebig lange Schweißnähte mit hoher Güte ermöglicht.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Weltweit ist es trotz des großen Bedarfs noch nicht gelungen, ein automatisiertes System zum Unterwasserschweißen zu entwickeln. Daher war für die Umsetzung des ambitionierten Vorhabens eine hohe Interdisziplinarität mit der Vernetzung von vier Forschungseinrichtungen und drei Industriepartnern erforderlich, wobei jedes Teilvorhaben einen eigenen hohen innovativen Anteil aufwies.

Wegen der hohen Verzahnung der einzelnen Aufgabenbereiche und Ziele war eine genaue Termin- und Kompetenzabstimmung mit den Projektpartnern durch regelmäßige Treffen erforderlich.

Die AMT GmbH war für die Realisierung von Projektziel 1 „Automatisierung des innovativen Fülldrahtschweißens als robuster UW-Schweißprozess“ verantwortlich. Das Teilprojekt wurde in nachfolgenden Arbeitspaketen durchgeführt:

AP 2.1 Automatisierung des UW-Fülldrahtschweißens

AP 2.2 Drahtvorschubsystem für das Fülldrahtschweißen

AP 2.3 Entwicklung Stromquelle

AP 2.4 Entwicklung des UW-Maschinenbrenners

AP 2.5 Schweißdatenerfassungssystem

AP 2.6 Vor- und Nachwärmen des Schweißbereichs

AP 2.7 Optimierung des Schweiß-Systems in Praxisversuchen

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Stand der Technik: Unterwasserschweißen

Ein Großteil maritimer Strukturen besteht aus metallischen Werkstoffen, deren Instandhaltung vor allem Schweißarbeiten unter Wasser erfordern. Beispiele dieser Arbeiten sind Bau und Instandhaltung von Hafenanlagen, Wasserstraßen, Unterwasserpipelines, Schleusenanlagen, Talsperren, Wasserkraftwerken, Offshore Plattformen, Schiffsbau sowie Bergungsmaßnahmen.

Beim Unterwasserschweißen wird zwischen zwei Verfahren unterschieden: Beim trockenen hyperbaren Verfahren wird mit Hilfe spezieller Tauchkammern oder –glocken der Bereich um die Schweißarbeiten mit Hilfe von Druckluft trockengelegt. Zum Schweißen von Pipelines arbeiten beispielsweise ganze Teams von Schweißern in großen Kammern. Die Schweißer arbeiten hier in mehreren Schichten, da sie nach jedem Einsatz in Druckkammern unter nachlassendem Druck bis zu einer Woche wieder dekomprimiert werden müssen. Dies ist mit einem hohen Sicherheitsrisiko, großem Planungsaufwand und enormen Kosten verbunden.

Daher wird der Großteil der Schweißarbeiten im „nassen“ Verfahren durchgeführt, wobei die Schweißarbeiten von einem Unterwasserschweißer erfolgen. Hierbei hat das Wasser einen direkten Einfluss auf den Schweißprozess.

Herausforderungen des nassen Unterwasserschweißens

Das nasse Unterwasserschweißen erfolgt üblicherweise durch manuelles Lichtbogenhandschweißen mit speziellen, umhüllten Stabelektroden und Gleichstrom. Durch den Lichtbogen wird das unmittelbar umgebende Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff gespalten. Der Wasserstoff dringt während des Schweißprozesses in das Schweißgut und die Wärmeeinflusszone ein und verursacht Poren und wasserstoff-induzierte Risse. Der freiwerdende Sauerstoff kann zu einem stärkeren Abbrand einzelner Legierungselemente führen. Diese Effekte können sich in mehrerer Hinsicht negativ auf die Schweißqualität auswirken. Problematisch ist beispielsweise die Wasserstoffeinbringung, die Werkstoffe spröde und anfällig gegenüber Kaltrissbildung macht.

Aufgrund des manuellen Verfahrens sind die Reproduzierbarkeit und Nahtqualität stark von den Kenntnissen des Tauchers abhängig und die Produktivität des einzelnen Schweißers ist aufgrund seiner extremen Belastung limitiert. Zudem gibt es weltweit wenige tausend hochqualifizierte Unterwasserschweißer, die die erforderliche Erfahrung mitbringen.

Für eine fehlerfreie Schweißnaht müssen Lichtbogen und Schmelzbad genau im Auge behalten und angepasst werden. Dies ist im trüben Wasser, bei Dunkelheit und einem mit Schwebeteilchen und Atemblasen beeinträchtigten Sichtfeld eine große Herausforderung. Durch den Tauchschweiß-Helm und ggf. durch Gefahrstoffanzüge, wie sie beispielsweise bei Arbeiten an einem Atomkraftwerk eingesetzt werden, ist die Sicht und Bewegungsfreiheit zusätzlich eingeschränkt.

Weiterhin müssen Tauchschweißer ihre Umgebung aufmerksamer im Auge behalten als Schweißer an Land, da unter Wasser zusätzlich eine Reihe von sicherheitsrelevanten Aspekten auftreten, die einen Unterwassereinsatz über vier Stunden faktisch unmöglich machen. Zu nennen sind Wasserströmungen, Differenzdruck sowie Position der Schweiß-Erdungsleitung zur Vermeidung eines elektrischen Schlags.

Vor dem Hintergrund dieser großen Herausforderungen beim Unterwasserschweißen ist eine langjährige Ausbildung und praktische Erfahrung Grundvoraussetzung zur sicheren und effizienten Ausübung des Unterwasserschweißens. Hinzu kommen aufgrund der großen

körperlichen und geistigen Belastung hohe gesundheitliche Auflagen, die eine langjährige Ausübung des Berufs einschränken. In Deutschland gibt es ca. 50 Tauchfirmen mit durchschnittlich 7 DNV-GL-zertifizierten Schweißtauchern. Kommt es mittelfristig zum erwarteten sprunghaften Anstieg des Instandhaltungsaufwandes aufgrund des aktuellen Ausbaus der offshore Windparks und maritimen Infrastruktur, könnte dieser mit der aktuellen Taucherkapazität nicht bedient und aufgrund der langen Ausbildung (Ausbildung zum Berufstaucher, Zertifikat „Unterwasserschweißer“ nach ISO 15618-1, mehrjährige Berufspraxis bis qualitativ hochwertige Schweißnähte unter Wasser erreicht werden) nur sehr zeitverzögert angepasst werden. Der dabei entstehende Instandhaltungsstau hätte erhebliche Auswirkungen auf die Sicherheit der offshore Strukturen und auch ein hohes Gefährdungspotential der Natur, insbesondere durch Leckagen ölfördernder Pipelines. Daher besteht ein dringlicher Bedarf nach einer skalierbaren und reproduzierbaren Unterwasserschweiß-Technologie, welche Arbeitssicherheit für den Menschen gewährleistet, die Qualität von Unterwasser-Schweißnähten steigert und mit den wachsenden Anforderungen an Einsatzgebiete und Produktivität Schritt halten kann.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des MARIOW-Projektes bestand eine enge Zusammenarbeit der Projektpartner, insbesondere im letzten Projektjahr mit dem Aufbau des Gesamtsystems und der Durchführung der Schweißversuche.

Aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems war eine regelmäßige Abstimmung der Teilentwicklungen erforderlich, um ein reibungsloses Zusammenarbeiten der Komponenten zu gewährleisten.

Neben dieser grundsätzlichen Kooperation im Konsortium bestand eine intensivere Zusammenarbeit mit dem Institut IWA der TH Köln und der Firma Unterwasserkrause.

Die Zusammenarbeit mit dem IWA umfasste Synergieeffekte und Abstimmungen bei der Entwicklung der wesentlichen Bauteile des Schweißsystems wie dem vollmechanisierten FCAW-Brenner, Drahtvorschubgerät und Aufhängung.

Mit dem Tauchunternehmen Unterwasserkrause wurden gemeinsam die neuen Komponenten aus Endanwendersicht getestet und das automatisierte Schweißverfahren zunächst mit einem Handschweißgerät im Hafenbecken unter Realbedingungen erprobt.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Im Vorhaben erfolgte bei der AMT GmbH die Bearbeitung von folgenden Arbeitspaketen:

AP 2.1 Automatisierung des UW-Fülldrahtschweißens

Zur Automatisierung des UW-Fülldrahtschweißens wurden speziell für das Vorhaben angepasste UW-Fülldrähte entwickelt. Die Zusammensetzung ist entscheidend für die Robustheit des Schweißprozesses und die Qualität der Schweißnaht, insbesondere in größeren Tiefen. Die Rezeptur wurde anhand der Anforderungen im Projekt weiterentwickelt, wobei vor allem mehr Plasmabildner zu Erzeugung der Schutzgasblase für den Lichtbogen, insbesondere für größere Tiefen, ergänzt wurde. Zudem wurde der Querschnitt des Fülldrahts vergrößert, um den Anteil an Additiven zu erhöhen.

Zur Durchführung von Unterwasser-Schweißversuchen wurde ein Versuchstand aufgebaut, mit dem in einem Glasbecken mittels Linearantrieb maschinelle Schweißnähte erzeugt werden können. Hier erfolgte die grundlegende Auslegung des Schweißprozesses mit Erprobung unterschiedlicher Schweißparameter, Entwicklung unterschiedlicher Regelungskonzepte (wie strom- oder spannungsgeführt) und die Entwicklung eines reproduzierbaren Zündprozesses des Lichtbogens mittels elektrischer Startstrategie.

Darüber hinaus wurden Schweißversuche und Untersuchungen mit unterschiedlichen Fülldrahtquerschnitten (1,3 mm / 1,6 mm / 2,0 mm), Einstellungen und Prozessparametern durchgeführt und ausgewertet. Hierbei lag der Fokus auf einer optimalen Schweißanwendung wie Festigkeit der Naht, Einfluss / Reduzierung des Wasserstoffeintrags, Prozessstabilität, Start- / Endverhalten der Schweißnaht.

Im Arbeitspaket ist es gelungen einen robusten Ausgangsprozess zu entwickeln, welcher alle grundlegenden Prozesse des UW-Schweißens automatisiert. Darüber hinaus wurden unterschiedliche Parametersätze und Erfahrungswerte generiert, welche es erlauben bei den Versuchsreihen mit dem Gesamtsystem schnell auf Problemstellungen zu reagieren und den Prozess auf variierende Umgebungsparameter anzupassen.

AP 2.2 Drahtvorschubsystem für das Fülldrahtschweißen

Die Parameter des speziell angefertigten Fülldrahts mit unterschiedlichen Durchmesser flossen in die gemeinsame Entwicklung des Drahtvorschubsystems für das Fülldrahtschweißen mit dem IWA ein. Es erfolgten Abstimmungen zum Design des Drahtvorschubsystems und die Detailkonstruktion des Gesamtsystems. Der Aufbau eines Unterwasser-Drahtvorschubsystems stellte sich als technisch jedoch sehr herausfordernd dar (siehe Abschlussbericht IWA), weshalb es zeitliche Verzögerungen gab.

Daher wurde parallel zur UW-Drahtförderung bei AMT ein Push-Pull- System entwickelt, bei dem die Drahtförderung ausgehend von der Wasseroberfläche über ein Schlauchpaket zum Brenner erfolgt. Große Herausforderung bei der Drahtförderung über größere Strecken war das Auftreten von Unregelmäßigkeiten wie Ruckeln und Drall. Diese Störgrößen konnten über unterschiedliche Maßnahmen wie mehrere Drahtförderrollen, Optimierung des Anpressdrucks und unterschiedliche Schmiermittel in der Drahtführungsseele minimiert werden.

Mit dem Push-Pull- Schlauchpaket wurden Offshore Schweißversuche in Kiel mit einem handgeführten Prozess mit Tauchern des Projektpartners Unterwasserkrasse durchgeführt. So konnten Probleme wie eine kontinuierliche und ruckelfreie Drahtförderung erkannt und behoben werden.

Mit den Erkenntnissen aus den Schweißversuchen in Kiel wurde ein liegender Drahtvorschub für den Versuchstand am DFKI mit ca. 4 Meter Schlauchpaket und analoger Fernbedienung entwickelt (siehe Abb. 1).



Abb. 1 Liegender Drahtvorschub für den Versuchstand am DFKI

Mit diesem Drahtvorschub-System wurden die Schweißversuche am Versuchstand am DFKI in Bremen mit den projektspezifischen UW-Fülldrähten mit eigener Formulierung und vergrößertem Durchmesser von 1,2 mm bis 2,0 mm durchgeführt.

AP 2.3 Entwicklung Stromquelle

Im Arbeitspaket erfolgte zunächst die Auslegung und Konstruktion einer kompakten Stromquelle für den Unterwassereinsatz auf dem ROV gemäß Projektplan. Im Projektlauf wurde das Konzept der Stromquelle unter Wasser jedoch aufgrund von Sicherheitsrisiken und Störsignalen überdacht und dann final mit dem Ausscheiden des ROV-Herstellers verworfen.

Beim neuen Konzept bleibt die Stromquelle an der Oberfläche und versorgt den Brenner über eine 400 A Leitung über ein gemeinsames Schlauchpaket zusammen mit der Drahtversorgung.

Es wurde eine für den Unterwasserschweißprozess geeignete Stromquelle entwickelt und mit speziellen Transformatoren und Steuerungsplatinen ausgerüstet (siehe Abb. 2). Es wurden unterschiedliche Überarbeitungen an der Schweißstromquelle für mehr Leistung vorgenommen sowie eine spannungsgeführte Regelung entwickelt.



Abb. 2 In den Versuchstand integrierte Schweißstromquelle

AP 2.4 Entwicklung des UW-Maschinenbrenners

Im Arbeitspaket wurde der Fülldrahtbrenner zur Optimierung des Schweißprozesses konstruiert. Der Brenner wurde konstruktiv auf die entsprechende Schweißaufgabe (Kehlnaht, Überlappstoß oder Stumpfnah) abgestimmt.

Zur Positionierung des Brenners wurde eine Führung konstruiert, wobei durch Kombination der Bewegungen in den drei Translationsachsen der Brenner gemäß der programmierten Reihenfolge bewegt werden kann, um der Schweißlinie zu folgen.

Durch Ausscheiden des ROV-Herstellers während des Projekts wurde das Gesamtkonzept umgestellt und ein Roboterarm eingesetzt, weshalb die Ausrichtung und Positionierung der Brennerspitze über den 6-achsigen Roboterarm erfolgen kann und keine zusätzliche Brenneraufhängung benötigt wird (siehe Abb. 3).

Anhand der Ergebnisse der Versuche wurde das Brennerdesign überarbeitet und die Schutzgasmenge optimiert, sodass eine kegelförmige Gasströmung an der Brennerspitze erreicht werden konnte, welche Vorteile im Schweißprozess und hinsichtlich der Dichtheit bietet.

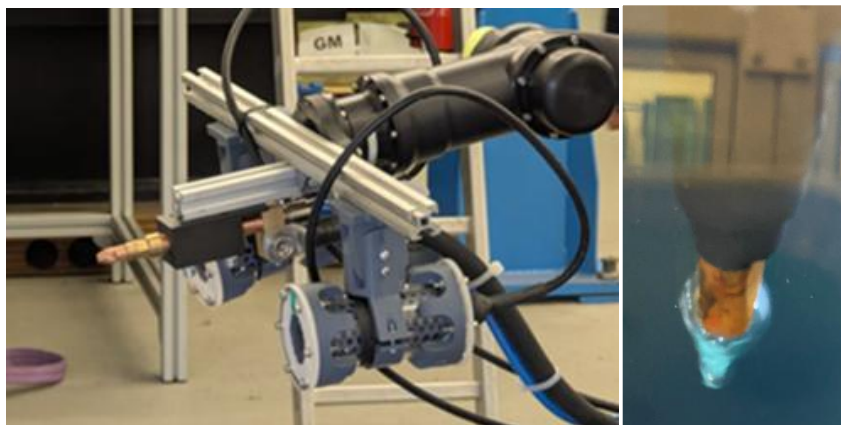


Abb. 3: Links: Fülldrahtbrenner im Roboterarm-geführten Schweißprozess;
Rechts: kegelförmiger Gasaustritt am Brenner

AP 2.5 Schweißdatenerfassungssystem

Ziel des Arbeitspaketes war die Erfassung aller relevanten Daten aus dem Schweißprozess, um diese auszuwerten und in die Schweißstromregelung einfließen zu lassen. Es wurde ein System mit Schweißdatenlogger aufgebaut (siehe Abb. 4) und in den Versuchstand integriert mit dem alle wesentlichen Parameter wie Schweißstrom, Vorschub, Spannung, Pulsweite, etc. während der Versuche aufgenommen werden. Diese wurden ausgewertet und für die Auslegung des Schweißprozesses und der Regelung genutzt.



Abb. 4: Integrierter Schweißdatenlogger am Versuchstand

Darüber hinaus war geplant über eine KI-Schnittstelle die Messdaten des Schweißprozesses an ein KI-Modul zur selbstlernenden Optimierung weiterzugeben.

Da jedoch erst gegen Ende der Projektlaufzeit ein funktionsfähiges Gesamtsystem zum Unterwasserschweißen hergestellt werden konnte, war keine ausreichende Zeit für eine KI-gestützte Optimierung des Schweißprozesses mehr vorhanden.

AP 2.6 Vor- und Nachwärmen des Schweißbereichs

Ein grundlegendes Problem beim UW-Schweißen besteht in einer deutlich schnelleren Abkühlung der Schweißraupe durch den großflächigen Wasserkontakt der Werkstücke. Die höhere Abkühlgeschwindigkeit beeinträchtigt die Güte der resultierenden Schweißnaht.

Um die Güte der Schweißnähte zu steigern, war es Ziel des Arbeitspaketes über konstruktive Machbarkeitsstudien mit Warmwasserdüsen, zweitem Lichtbogen oder dem Einsatz von Induktoren die Schweißnaht zu entspannen.

Da im Projekt zunächst die grundsätzliche automatisierte Herstellung von Schweißnähten realisiert werden musste, war eine tiefergehende Prüfung der erstellten Schweißnähte und Steigerung der Qualität über ein zusätzliches Verfahren nicht mehr möglich.

Es wurde jedoch ein Konzept entworfen, bei dem über eine spezielle Lasertechnik die mechanischen Schweißnähte nachgewärmt und die Härten reduziert werden.

AP 2.7 Optimierung des Schweiß-Systems in Praxisversuchen

Die Optimierung des Schweiß-Systems erfolgte zunächst als handgeführtes System gemeinsam mit dem Projektpartner Unterwasserkruse im Hafenbecken in Kiel. So konnten Komponenten wie der Drahtvorschub bereits unter Realbedingungen getestet werden und die Erkenntnisse in die Entwicklung des automatisierten Gesamtsystems einfließen.

Der Aufbau eines gemeinsamen Gesamtsystems mit den Komponenten aller Partner erfolgte in Bremen beim Projektpartner DFKI. In einem Wasserbecken wurde gemeinschaftlich ein Versuchstand mit Roboterarm, Schweißmodul, Kameratechnik, Lastaufzug etc. eingerichtet und zur Durchführung gemeinsamer Schweißversuche genutzt (siehe Abb. 6). Anhand dieser Versuche wurden Einzelkomponenten überarbeitet und die Schweißprozess-Parameter optimiert.

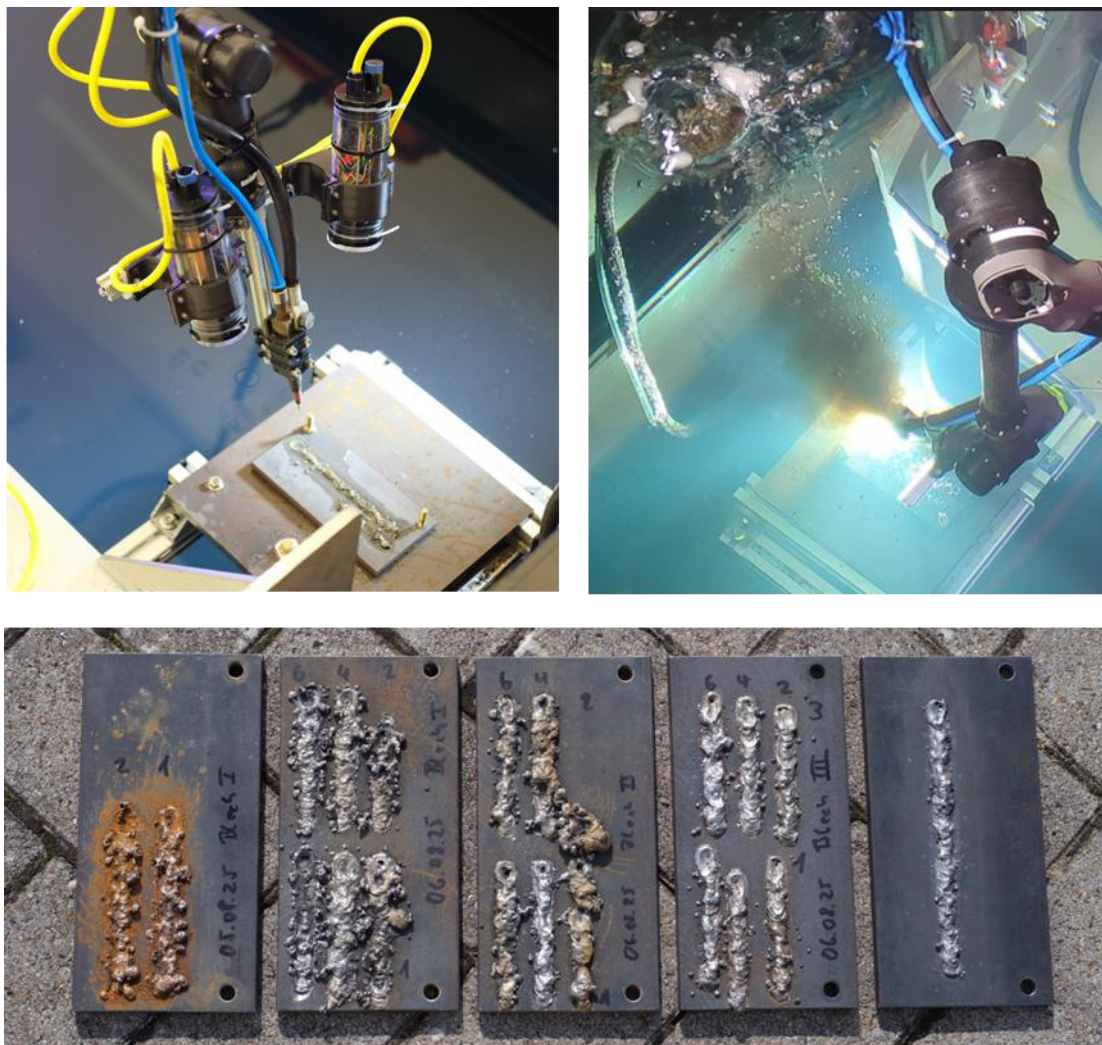


Abbildung 5: Aufgebauter Versuchstand mit integriertem Gesamtsystem aus allen Teilprojekten am Versuchstand im „Schwarzen Wasserbecken“ (ca. 2 m x 2 m x 2 m) des DFKI; Oben: Roboterarm mit installiertem Brenner und Kameratechnik auf Absenkvorrichtung, Unten: iterative Verbesserung der Schweißnähte (hier Ausführung als Auftragsnaht auf 20 cm Metallplatte) durch Optimierung der Prozessparameter in fortlaufenden Schweißversuchen.

Somit ist es unter Laborbedingungen erstmals gelungen, eine vollständig automatisierte Schweißnaht unter Wasser zu erstellen.

Im Projektantrag war es drüber hinaus geplant die abschließenden Schweißversuche im Meer durchzuführen. Jedoch war aufgrund zeitlicher und technischer Verzögerungen eine Übertragung des Verfahrens auf Realbedingungen nicht mehr möglich.

Fazit:

- AP 1 – AP 5 wurden weitestgehend vollständig gemäß dem Arbeitsplan bearbeitet
- In AP 6 wurde ein Konzept zu Steigerung der Güte der Schweißnaht mittels Lasertechnik entworfen, dieses jedoch aufgrund mangelnder Zeit und zur Verfügung stehender Mittel nicht mehr realisiert.
- In AP 7 erfolgten wie geplant die Erprobung der Einzelkomponenten im Hafenbecken und die Versuchsreihen im Becken am DFKI. Eine Übertragung des Verfahrens auf Realbedingungen im Meer konnte zeitlich nicht mehr realisiert werden.
- Im MARIOW-Projekt ist der *Proof-of-Concept* für das automatisierte Unterwasserschweißen gelungen. Mit dem entwickelten Gesamtsystem konnte die Herstellung der weltweit ersten maschinell erzeugten UW-Schweißnaht realisiert werden.

2. Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigste Kostenposition zur Durchführung des Projektes waren die Personalkosten. In geringem Umfang sind zudem Kosten für Material und Reisen angefallen. Die detaillierten Kosten, die während des Projektverlaufs entstanden sind, können dem separat erstellten Verwendungsnachweis entnommen werden.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten waren für das Erreichen der definierten wissenschaftlich-technischen Ziele notwendig und fachlich geboten. Sämtliche Arbeitsschritte orientierten sich am im Förderantrag beschriebenen Vorgehen und wurden inhaltlich wie zeitlich angemessen umgesetzt. Die eingesetzten personellen und sachlichen Ressourcen standen in einem wirtschaftlichen Verhältnis zur Komplexität der Aufgaben und ermöglichten eine effiziente Bearbeitung der wesentlichen Entwicklungs- und Validierungsarbeiten. Durch die systematische Planung, kontinuierliche Ergebnisevaluierung und Anpassung einzelner Maßnahmen wurde sichergestellt, dass die wesentlichen Projektziele unter wirtschaftlicher Verwendung der Mittel erreicht wurden.

4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Projektergebnisse sind ein Meilenstein im Gebiet der Unterwasserschweißtechnologie.

Das Gesamtsystem soll im Anschluss an das MARIOW-Projekt unter Realbedingungen im Meer getestet und optimiert werden. Anschließend soll das System konsequent in Richtung eines marktfähigen Produkts weiterentwickelt werden, wobei die neuartige UW-Schweißtechnologie in ein robustes praxistaugliches Verfahren überführt wird.

Nach einer Reifungsphase der Technologie im Einsatz beim Projektpartner Unterwasserkrasse soll das System mittelfristig an weitere Unterwassertauchbetriebe und Hafenbetreiber vermarktet werden. Aufgrund der erwarteten Alleinstellungsmerkmale der Technologie sind die wirtschaftlichen Aussichten als besonders hoch einzuschätzen.

Darüber hinaus bietet die im Projekt entwickelte UW-Schweißtechnologie ein hohes Potential für weitere Forschungs- und Entwicklungsprojekte, sowohl für die Weiterentwicklung der Technologie, Integration neuer Komponenten und Funktionalitäten sowie die Erschließung neuer Einsatzgebiete.

5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordene Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Uns sind keine Veröffentlichungen bekannt, in denen andere Stellen große Fortschritte gegenüber dem Zeitpunkt der Antragsstellung bezüglich einer automatisierten Technologie zum Unterwasserschweißen beschreiben.

6. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Ergebnisse des Teilprojekts von AMT umfassen vor allem schützenswerte technologische Aspekte. Daher sind für diese Komponenten keine eigenen Veröffentlichungen geplant, um den technologischen Vorsprung zu wahren.

Zur Vorstellung des neuen Verfahrens wurde im Konsortium ein Video erstellt, welches über den Youtube-Kanal des DFKI veröffentlicht wurde.

(<https://www.youtube.com/watch?v=221SeqYM-WM>)

Darüber hinaus sind im Konsortium gemeinschaftliche Veröffentlichungen zum Verfahren geplant, wie die Vorstellung eines Papers auf der AIM 2026 in Genua oder auf der Oceans Conference sowie auf Fachtagungen der Meerestechnik und Schweißtechnik.