

Titel des Gesamtvorhabens

Entwicklung neuer Scheibenelektrodenwerkstoffe für das
Kontaktlichtbogen-trennschleifen (CAMG) durch additive Fertigung und
prototypische Umsetzung der Schneidtechnologie als robuste Variante für
automatisierte Unterwasserschneidaufgaben beim Rückbau
kerntechnischer Anlagen

Akronym

- CAMGproFit -

Förderzeitraum: 01.06.2021 – 31.08.2024

Förderkennzeichen: 15S9430A und 15S9430B

Abschlussbericht

Teil I

Kurzbericht

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Projekträger: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH

Förderrichtlinie: FORKA – Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen

Bereits in der Planungsphase des Rückbaus von Kernkraftwerken ist eine Bewertung und Festlegung der Trenntechniken auf Basis der aktuell gültigen und bestehenden Kenntnisse zum Stand der Technik erforderlich. Dies erfolgt vor dem Hintergrund, dass potenzielle Störungen des Rückbauprozesses antizipiert und adäquat adressiert werden können. Daher sind absolut robuste und sicher durchführbare Technologien erforderlich, welche als Alternativverfahren nebeneinander in einer Art Werkzeugkasten der Rückbautechnologien angeordnet sind. Thermische Trennverfahren wie das Contact Arc Metal Grinding (CAMG) sind hier aufgrund des geringen Manipulationsaufwandes durch ein rückstellkraftarmes Arbeiten besonders interessant. Diese Technologie konnte bisher lediglich in der manuellen Anwendung mit Tauchern einen Technology Readiness Level (TRL) von acht aufweisen. Beim fernhantierten Einsatz, wie er im Kernkraftwerk notwendig wäre, konnte der TRL maximal mit vier angegeben werden. Hierbei stellten der Verschleiß der Elektrode und die Stromübertragung zwei maßgebende Herausforderungen dar, welche im Rahmen dieses Projektes adressiert werden sollen.

In der Prozesstechnologie CAMG finden bislang Ströme bis zu einer Stärke von 3000 A Anwendung. Im Rahmen dessen entstehen hohe Energiedichten, welche auf eine rotierende Welle übertragen werden müssen. Taktile Optionen sind nicht anwendbar und die bisherige Nutzung des toxischen Quecksilbers ist aus arbeitssicherheitstechnischer Sicht ebenfalls nicht mehr möglich. Aus diesem Grund wurde die Arbeitshypothese aufgestellt, dass im Rahmen einer Prototypenentwicklung ein Flüssigmetallstromübertrager auf der Basis eines Galliumwerkstoffes entwickelt werden kann, um das Gefährdungspotenzial zu reduzieren.

Die zweite signifikante Herausforderung stellte der rasche Verschleiß der Scheibenelektroden dar, welcher sich nachteilig auf die Prozessstabilität sowie sämtliche ökonomischen Aspekte auswirkte. Bisherige Ansätze, verschleißbeständigere Werkstoffe mittels Löt- oder WIG-Schweißen einzubringen, führten nicht zum gewünschten Erfolg. Aus diesem Grund sollte mit der additiven Fertigung eine Möglichkeit geschaffen werden, mit anwendungsorientierten und zielgerichteten Werkstoffsystemen neue Scheibenelektroden zu fertigen. Der Einsatz ermöglicht ein schnelles Screening von Werkstoffen sowohl in Form von Draht als auch Pulver. Der Verschleiß bestimmt hauptsächlich die ökonomische Perspektive des Prozesses und hat damit maßgeblichen Einfluss auf den industriellen Einsatz. Das übergeordnete Ziel des Projektes bestand somit in der Entwicklung von einsatzbereiten Optionen für Verfahren und Scheibenelektroden der CAMG-Technologie, um das Portfolio an thermischen Trennverfahren für den Rückbau zu erweitern.

Im Rahmen der Untersuchungen in Komplex A wurde der Fokus auf den Verschleiß der Elektrode gelegt. Zu Beginn des Projektes wurde das Lasersystem für die additive Fertigung aufgebaut. Gleichzeitig wurden das Anforderungsprofil sowie potenzielle Werkstoffsysteme anhand einer umfassenden Literaturrecherche identifiziert. Zu den untersuchten Werkstoffen zählten neben Kupferlegierungen mit hoher elektrischer Leitfähigkeit insbesondere harte, verschleißfeste Legierungen. Erstmals ermöglichte die additive Fertigung mittels Laserauftragschweißens den Einsatz pulverbasierter Werkstoffe und Verbundwerkstoffe. Zu Beginn der Untersuchungen standen die Schweißbarkeit sowie die Charakterisierung der

ausgewählten Werkstoffe im Fokus. Bei spröden Werkstoffen war eine Vorwärmung erforderlich, um die entsprechenden Proben und Elektroden zu erzeugen. Die Ergebnisse der Lebensdaueruntersuchungen der Elektroden legten nahe, dass die elektrische Leitfähigkeit, entgegen der Annahme in der Literatur, nur eine untergeordnete Rolle für den Elektrodenwerkstoff spielt. Insbesondere harte Materialien auf der Basis von Eisen und Nickel erwiesen sich als überaus erfolgreich. Die Elektrode mit der höchsten Lebensdauer war ein Partikelverbundwerkstoff aus einer mit Wolframschmelzkarbid verstärkten Kupferlegierung. Die Ergebnisse legen nahe, dass der Ansatz, auch die Verarbeitung pulverbasierter Werkstoffe zu ermöglichen, einen signifikanten Fortschritt hinsichtlich der Lebensdauer von Elektroden darstellt. In der abschließenden ökonomischen Betrachtung wird ersichtlich, dass die Kosten pro Schnittmeter insbesondere durch den Schweißprozess erhöht sind. Allerdings wurden diverse Ansatzpunkte für eine ökonomische Optimierung diskutiert.

Die in Komplex B durchgeführten Arbeiten hatten primär die Entwicklung eines Prototyps für CAMG-Elektroden mit einem Durchmesser von 450 mm zum Gegenstand. Im ersten Schritt wurde in Kooperation zwischen dem IW und EWN ein detailliertes Lastenheft erstellt, um sowohl den technischen Anforderungen als auch den praktischen Erfordernissen im Rückbau zu genügen und eine spätere Implementierung der Technologie zu ermöglichen. Des Weiteren wurden die Aspekte der Kraftübertragung sowie die Konzeption eines Schnellverschlussystems für den unkomplizierten Elektrodenwechsel berücksichtigt. Ein besonderes Augenmerk galt darüber hinaus der Stromübertragung. Im Rahmen der Evaluierung verschiedener Metalle als Medium im Flüssigmetallstromübertrager hat sich der Galliumwerkstoff Galinstan als besonders geeignet erwiesen. Nach Abschluss der Entwicklungsphase konnte ein Prototyp erfolgreich aufgebaut, getestet und evaluiert werden. Insbesondere vor dem praxisrelevanten Hintergrund einer Steigerung des Elektrodendurchmessers von 220 mm auf 450 mm kann dieser Erfolg als wesentlich erachtet werden.

In Komplex C wurden schließlich alle Ergebnisse zusammengetragen. Neben einer Dokumentation ermöglichte dies eine genaue Gefährdungsbeurteilung der Technologie, welche im Hinblick auf die Genehmigungsfähigkeit von entscheidender Bedeutung ist. Um eine erfolgreiche Genehmigung anzustreben und eine hohe Praxistauglichkeit des CAMG-Verfahrens zu gewährleisten, erfolgte ein ständiger Austausch zwischen den Projektpartnern IW und EWN. Andere Firmen oder Forschungsinstitute waren nicht beteiligt.

Titel des Gesamtvorhabens

Entwicklung neuer Scheibenelektrodenwerkstoffe für das
Kontaktlichtbogentrennschleifen (CAMG) durch additive Fertigung und
prototypische Umsetzung der Schneidtechnologie als robuste Variante für
automatisierte Unterwasserschneidaufgaben beim Rückbau
kerntechnischer Anlagen

Akronym

- CAMGproFit -

Förderzeitraum: 01.06.2021 – 31.08.2024

Förderkennzeichen: 15S9430A und 15S9430B

Abschlussbericht

Teil II

Abschlussbericht

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

Projekträger: Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH

Förderrichtlinie: FORKA – Forschung für den Rückbau kerntechnischer Anlagen

Inhaltsverzeichnis

1 Komplex A: Scheibenverschleiß	1
1.1 Arbeitspaket A/1: Roboterbasiertes Laserschweißsystem	1
1.2 Arbeitspaket A/2: Literaturrecherche	2
1.3 Arbeitspaket A/3: Additiv gefertigte 3D-Strukturen.....	3
1.4 Arbeitspaket A/4: Modellversuch	7
1.5 Arbeitspaket A/5: Herstellung Scheibenelektroden	8
1.6 Arbeitspaket A/6: Verschleißuntersuchungen	11
1.7 Arbeitspaket A/7: Werkstofffranking	15
1.8 Arbeitspaket A/8: Ökonomische Betrachtung	16
2 Komplex B: CAMG-Schneidgerät	19
2.1 Arbeitspaket B/1: Lastenheft	19
2.2 Arbeitspaket B/2: Einzelkomponenten der Kraftübertragung	25
2.3 Arbeitspaket B/3: Einzelkomponenten der Stromübertragung	30
2.4 Arbeitspaket B/4: Schnellverschlussystem.....	36
2.5 Arbeitspaket B/5: Aufbau und Inbetriebnahme des Prototyps.....	39
2.6 Arbeitspaket B/6: Experimentelle Untersuchungen zur Evaluierung des Prototypens.	41
2.7 Arbeitspaket B/7: Experimentelle Untersuchungen zum Schneidverhalten der Scheiben aus Komplex A.....	44
2.8 Arbeitspaket B/8: Ökonomische Betrachtung	47
3 Komplex C: Zusammenführung Komplex A und B	50
3.1 Arbeitspaket C/1: Gesamtdokumentation	50
3.2 Arbeitspaket C/2: Anwendungsmerkblatt inklusive Gefährdungsbeurteilung	50
3.3 Arbeitspaket C/3: Anwendungsprofil und Genehmigungsfähigkeit.....	51
4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen	54
5 Literaturverzeichnis	55

1 Komplex A: Scheibenverschleiß

Im Folgenden werden detailliert die wissenschaftlichen Ergebnisse aus Komplex A dargestellt. Die Gliederung orientiert sich an den im Antrag dargestellten Arbeitspaketen.

1.1 Arbeitspaket A/1: Roboterbasiertes Laserschweißsystem

Das Ziel des Arbeitspakets bestand in der Realisierung einer Möglichkeit zur Erhöhung des TRL durch die Verwendung einer robotergeführten Laserstrahlschweißanlage. Zu diesem Zweck wurde das Lasersystem ProFocus1000 der Fa. Oscar PLT GmbH zusammen mit einem Robotersystem der Fa. Kuka AG bestehend aus dem 6-Achs-Roboter KR50 und dem zweiachsigen Dreh-Kipp-Tisch DKP400 angeschafft. Der Aufbau der Anlagentechnik umfasst den größten Teil der Arbeiten in diesem Arbeitspaket. Dabei stellte insbesondere die Integration aller Anlagenkomponenten in ein gemeinsames Netzwerk eine Herausforderung dar. Abbildung 1-1 zeigt das einsatzbereite Lasersystem inklusive des zugehörigen Arbeitsplatzes.

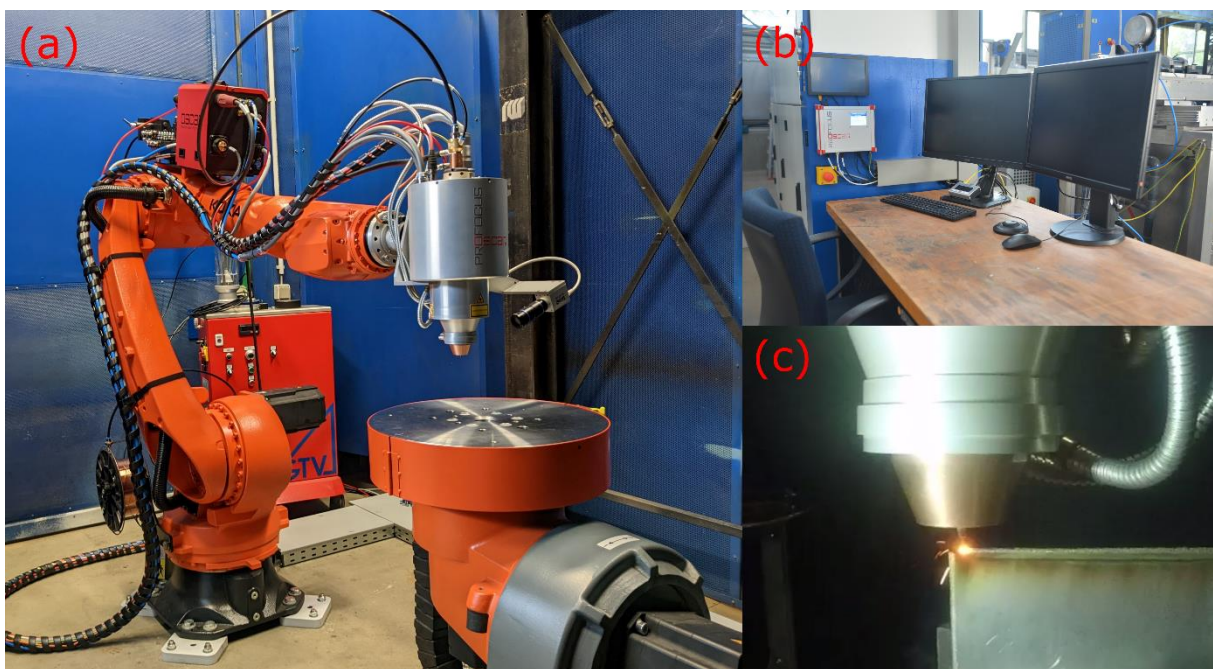


Abbildung 1-1: Robotergeführte Laserstrahlschweißanlage bestehend aus dem Lasersystem ProFocus1000 und einem Acht-Achs-Positioniersystem (a), Arbeitsplatz der Anlage außerhalb der Schutzkabine (b) und Schweißprozess (c)

Im Rahmen der Vorbereitung der Inbetriebnahme des Lasersystems wurde dem Thema Arbeitsschutz eine hohe Bedeutung beigemessen. Dies betrifft nicht nur die Anschaffung eines Saugers für Metallpulver mit der höchsten Sicherheitsstufe H, sondern auch den Laserschutz. Es handelt sich um einen Laser der Klasse 4, der die höchste Laserschutzklasse darstellt und somit die höchsten Anforderungen mit sich bringt. Aus diesem Grund wurden der Projektleiter und der entsprechende wissenschaftliche Mitarbeiter zu Laserschutzbeauftragten weitergebildet und ein externer Gutachter mit dem Schwerpunkt Lasersicherheit hat die Anlage geprüft und abgenommen.

Durch die Teilnahme an Schulungen bei beiden Herstellerfirmen konnten der Umgang mit dem Gesamtsystem erlernt und erste Schweißungen durchgeführt werden. Die wichtigste Erkenntnis bei diesen Versuchen für den weiteren Projektverlauf war der große Einfluss der Roboterprogrammierung auf die Schweißnahtqualität. Die Bahnplanung nimmt insbesondere Einfluss auf das Wärmemanagement im Prozess und somit auch auf Risse, Porosität und Schweißnahtgeometrie der additiv aufgebauten Strukturen. Das verwendbare Intervall für die Laserparameter variiert folglich nicht nur mit den Werkstoffen und der Geometrie, sondern auch mit dem Verfahrensweg des Roboters. In diesem Rahmen wurden die notwendigen Bahnplanungen für die Testkörper und die Scheibenelektroden entworfen.

1.2 Arbeitspaket A/2: Literaturrecherche

Im Rahmen dieses Arbeitspakets erfolgte eine wissenschaftliche Recherche zu den Zielwerkstoffsystemen. Zu diesem Zweck wurden zunächst die notwendigen Randbedingungen des CAMG-Prozesses sowie des Schweißprozesses zusammengetragen. Die Hauptauswahlkriterien für das thermische Unterwasserschneiden basieren auf einer Literaturrecherche und umfassen eine gute elektrische Leitfähigkeit, eine hohe Schmelztemperatur sowie eine Beständigkeit gegen thermischen und mechanischen Verschleiß. Auf Basis dieser Anforderungen werden zumeist elektrisch leitende Werkstoffe wie Aluminium, Messing oder Kupfer sowie Refraktärmetalle wie Molybdän oder Wolfram empfohlen. Darüber hinaus sind besonders vor einem ökonomischen Hintergrund verschiedene Eisenbasiswerkstoffe von Interesse. Neben Gusseisen beziehen sich diese auf Kohlenstoffstähle, Werkzeugstähle oder Chrom-Nickel-Stähle [PEI89], [BAC01], [PHI02], [KRE08]. Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Autoren und Institutionen ist eingeschränkt, da Angaben zur genauen Legierungszusammensetzung der verwendeten Elektrodenwerkstoffe fehlen, zumindest bis in die 1980er Jahre [KAB67], [PEI89]. Des Weiteren divergieren die angewandten Methoden zur Ermittlung des Verschleißes. Philipp quantifiziert den Verschleiß erstmals über eine Relation zur Schnittfuge [PHI02]. Diese Variante weist Schwächen auf und wird daher nicht mehr angewandt [SCH23].

Die Schweißeignung des Werkstoffs stellt darüber hinaus einen entscheidenden Faktor im Prozess des Laserauftragschweißens dar. Hierbei sind Kriterien wie die Rissneigung der Werkstoffe, die Materialaushärtung oder das Kohlenstoffäquivalent bei Stählen von Bedeutung. Diese Parameter sind nicht immer durch den Werkstoff festgelegt und können durch eine gezielte Fertigungsstrategie beeinflusst werden [KAI12], [GUP19], [KUM22].

Die zuvor beschriebenen Anforderungen lassen erkennen, dass eine einzelne Legierung möglicherweise nicht allen Anforderungen gerecht wird. Aus diesem Grund gewinnen Verbundwerkstoffe an Bedeutung. Die Verwendung von WCu stellt die bislang einzige Untersuchung in diese Richtung dar, jedoch wies die verwendete Fertigungstechnik, das Löten, Schwächen im Verbindungsbereich auf [KRE08]. Weitere Untersuchungen sind erforderlich.

1.3 Arbeitspaket A/3: Additiv gefertigte 3D-Strukturen

Für die Herstellung erster dreidimensionaler Strukturen sind die geometrischen Verhältnisse der erzeugten Schweißnähte notwendig. Aus der Literatur ist zu entnehmen, dass die Beobachtungen in Bezug auf die Bahnplanung und das Wärmemanagement aus A/1 zutreffend sind. Daher war es notwendig die verwendeten Werkstoffe zu untersuchen und Möglichkeiten zur Manipulation des Wärmeflusses in die Anlage zu integrieren. Dabei kann mit zusätzlicher Wärmeenergie oder deren gezielter Abführung auf zwei Arten in den Prozess eingegriffen werden. Bei der Kühlung der Proben konnte aufgrund großer konstruktiver Hürden bei der Verwendung eines Dreh-Kipp-Tisches und eines flüssigen Kühlmediums ausschließlich auf eine druckluftbasierte Kühlung zurückgegriffen werden. Mit der Hilfe eines Magnetventils konnte eine flexible Integration in den Prozessablauf realisiert werden. Bei kleineren Strukturen wird die Kühlung allerdings nur in den Schweißpausen verwendet, um eine mögliche Einflussnahme auf die Schutzgasatmosphäre unterhalb des Lasers zu vermeiden. In Abbildung 1-10 ist die Kühlung bei der Fertigung einer CAMG-Elektrode zu sehen.

Die Vorwärmung eines Schweißprozesses kann durch viele verschiedene Varianten realisiert werden. Die Bereitstellung der Energie durch einen Ofen verspricht eine einfache Anwendung und eine gute Durchwärmung der Bauteile auf eine wählbare Temperatur. Im konkreten Fall der verwendeten Laseranlage besteht der Nachteil, dass sich die Handhabung vor dem Hintergrund des zu gewährleistenden Laserschutzes erschwert. Durch die lokalen Gegebenheiten müssen mit dem vorgewärmten Substrat Wege von mehreren Metern zurückgelegt werden. Für die Wege, das Einspannen der Probe, das Verschließen der Laserkammer und das Starten des zugehörigen Roboterprogramms werden je nach Geschwindigkeit und Anwender 50 s bis 80 s benötigt. Dies führt bei der Durchführung durch mehrere Personen zu Unterschieden in der realen Vorwärmtemperatur von bis zu 110 °C. Aus diesem Grund, wurde mit der Induktionserwärmung eine Variante umgesetzt, welche bei bereits geschlossener Laserkammer durchgeführt werden kann. Dies erhöht die Reproduzierbarkeit, da alle Warte- und Zwischenzeiten vom Programmcode des Roboters abhängig sind. Für die Installation des Induktors wurde eine Vorrichtung am Laser montiert. Eine Temperaturüberwachung erfolgte mit einer Wärmebildkamera (siehe Abbildung 1-2). Durch die Leistung und die Verfahrgeschwindigkeit konnte der Wärmeeintrag auf den Werkstoff angepasst werden.

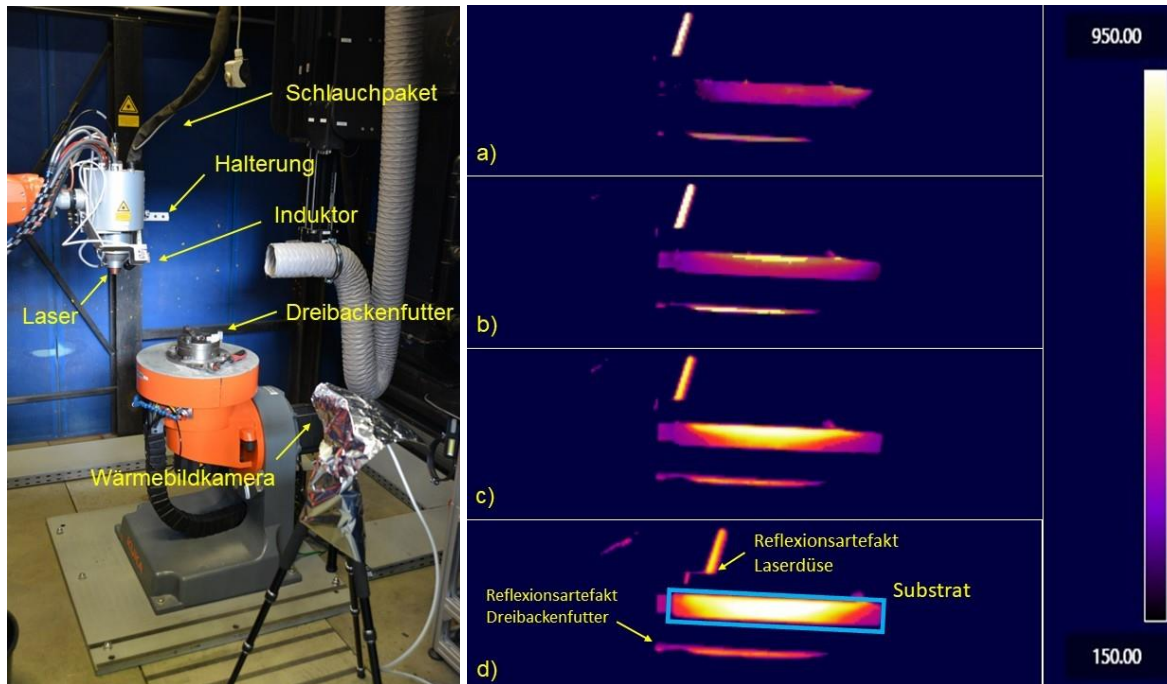


Abbildung 1-2: Versuchsaufbau zur Verwendung eines Induktors (links) und verschiedene Stufen der Aufwärmung des Substrates (rechts)

Die Untersuchungen der Werkstoffe werden in Tabelle 1-1 und Abbildung 1-3 beispielhaft für den Kobaltbasiswerkstoff Stellite 694 (CoCr28WNi) dargestellt. Aus den Daten ist deutlich zu erkennen, dass die Schweißgeschwindigkeit und die Laserleistung einen signifikanten Einfluss auf die Geometrie der Schweißnaht haben. Eine erhöhte Laserleistung führt zu einer breiteren Naht und eine erhöhte Schweißgeschwindigkeit reduziert Breite und Höhe.

Tabelle 1-1: Die geometrischen Maße einer Schweißnaht in Abhängigkeit von Laserleistung P , Schweißgeschwindigkeit v und Pulvermassenstrom \dot{m}

P [W]	v [mm/s]	\dot{m} [g/min]	Breite [μm]	σ_{Breite} [%]	Höhe [μm]	$\sigma_{\text{Höhe}}$ [μm]
900	15	13	1357	1,28	415	6,47
1000	10	8	1563	2,60	554	4,89
1000	10	18	1523	2,98	713	21,33
800	10	18	1346	6,83	695	24,67
800	10	8	1393	2,01	545	7,47
1000	20	8	1365	1,25	334	8,34
1000	20	18	1348	1,49	331	5,14
800	20	8	1234	2,39	349	7,14
800	20	18	1234	1,72	329	4,64



Abbildung 1-3: Darstellung der Schweißnähte aus Tabelle 1-1

Für die Fertigung von CAMG-Elektroden müssen additive Strukturen mit einer Höhe von etwa 10 mm gefertigt werden. Basierend auf den bereits beschriebenen Erkenntnissen wurde die Bahnplanung durchgeführt, welche sich nicht unbedingt aus den einzelnen Schweißnähten hochrechnen lässt. Als Beleg hierfür soll Abbildung 1-4a dienen, bei der die Daten für Baustahl entsprechend hochgerechnet wurden. Der Hintergrund liegt hier an der höhenabhängigen Wärmeabfuhr im Prozess, die eine veränderte Zwischenlagentemperatur während des Prozesses erzeugt.

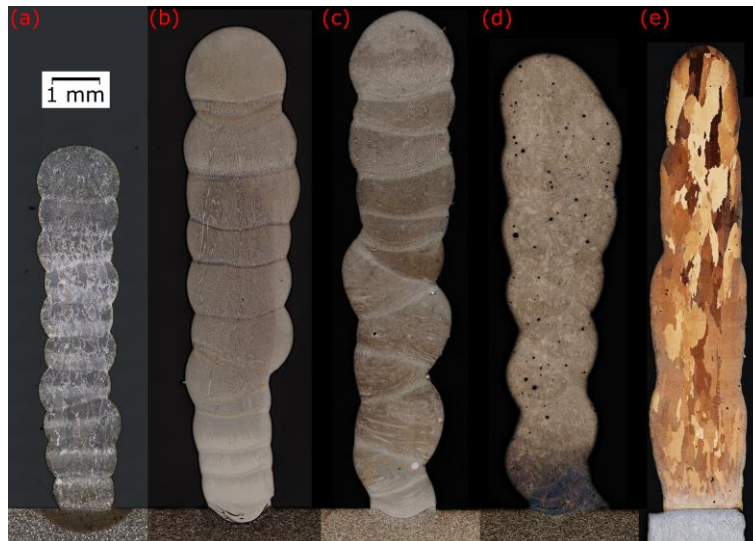


Abbildung 1-4: Additiv gefertigte Wände aus G3Si1 (a), CoCr28Wni (b), CoMo28Cr (c), NiCr8Si (d) und CuSi3 (e) mit werkstoffspezifischen Ätzungen

Basierend auf den in A/2 erarbeiteten Anforderungen an den Werkstoff werden neben den Eisenbasiswerkstoffen weitere Werkstoffsysteme untersucht. Dazu gehören Kupferbasislegierungen, die aufgrund der hohen elektrischen und thermischen Leitfähigkeit von Interesse sind. Im Rahmen dieses Projektes wurden die Legierungen CuSi3, CuAl7 und CuAg1 untersucht. Aufgrund der stärksten Ähnlichkeit zu reinem Kupfer, besitzt CuAg1 die besten Eigenschaften im Bereich der elektrischen und thermischen Leitfähigkeit. Die Herausforderung bestand hier in der Fertigung des Werkstoffs. In Abbildung 1-5 sind erste Schweißnähte mit diesem Werkstoff zu sehen. Diese weisen nicht nur erhebliche ästhetische Mängel auf, sondern entsprechen nicht den qualitativen Anforderungen. Zwar ist die Fertigung von bis zu zwei Lagen mit erweiterten Schweißmethoden wie einer entsprechenden Vorwärmung möglich, jedoch reichen die Möglichkeiten im Prozess nicht aus, eine 10 mm hohe Wand zu schweißen. Hintergrund ist die zu geringe Wärmeenergie im Prozess. Zurückzuführen ist dies auf die hohe thermische Leitfähigkeit der Legierung, eine verhältnismäßig geringe Leistung des Lasersystems (1000 W) und die für Kupfer ungeeignete Wellenlänge im Infrarotbereich. Von den Laserstrahlen werden dort nur etwa drei Prozent der Energie absorbiert. Die Beobachtungen deuten darauf hin, dass die thermische Leitfähigkeit eine entscheidende Variable ist, da das Verfahren bei den anderen untersuchten Kupferlegierungen auch ohne Vorwärmung erfolgreich funktioniert (siehe beispielhaft Abbildung 1-4e). Vor dem Hintergrund der Anwendung im CAMG-Prozess ist dies eine nicht

zufriedenstellende Erkenntnis, da hier möglichst hohe Werte für die thermische Leitfähigkeit gefordert sind.



Abbildung 1-5: Schweißnähte aus CuAg1 mit ungenügender Qualität

Vor dem Hintergrund des guten Verschleißverhaltens und der Warmfestigkeit ist die Anwendung von Nickel- und Kobaltbasislegierungen interessant. Die größte Herausforderung dieser Werkstoffgruppen besteht im spröden Werkstoffverhalten und der geringen Haftfestigkeit auf dem Substrat aus Baustahl. Im Gegensatz zur beschriebenen Kupferlegierung ist die Vorwärmung des Substrates hier eine mögliche Lösung des Systems, da die mangelnde Qualität mit großen Eigenspannungen und thermischen Spannungsgradienten eine andere Ursache hat. Jeweils eine Wand mit und ohne Vorwärmung ist in Abbildung 1-6 abgebildet. Neben der dargestellten Legierung CoCr28WNi wurden auch die Legierungen CoMo28Cr und NiCr8Si untersucht. Die Legierungen beinhalten diverse Nickel- und Chromboride, Chromkarbide und hochschmelzende Legierungselemente wie Molybdän und Wolfram und erfüllen damit die Anforderungen aus A/2 in Bezug auf eine hohe mechanische und thermische Belastbarkeit.

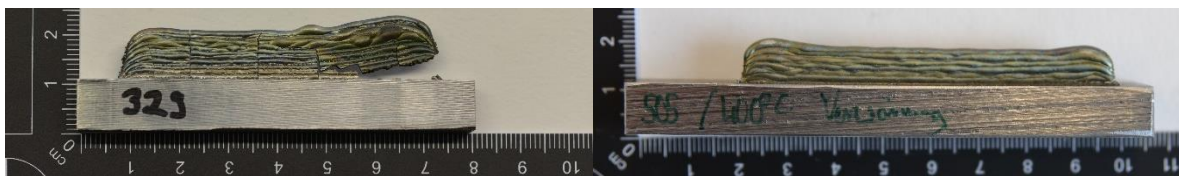


Abbildung 1-6: Wände aus CoCr28WNi mit ungenügender Qualität (links) und mit guter Nahtqualität nach einer Vorwärmung von 400 °C (rechts)

Aufgrund der Ergebnisse in Arbeitspaket A/2 werden neben geeigneten Legierungen hinaus ebenfalls Verbundwerkstoffe betrachtet. Dazu wurden verschiedene Konzepte beispielsweise in Form von Teilchen-, Faser-, oder Schichtverbundwerkstoffen entwickelt. Praktische Versuche erfolgten an drei ausgewählten Konzepten, welche in Abbildung 1-7 dargestellt sind. Um den Matrixwerkstoff zu verstärken, kann ein Verstärkungsstoff in Teilchen- oder Faserform eingebracht werden. Liegen sowohl Matrix- als auch Verstärkungsstoff in Pulverform vor, ist eine Verarbeitung mittels des Laserauftragschweißens möglich. Bei der Verwendung von Fasern ist die Fertigung einer Wand nur schwer möglich, da Ausbeulungen und damit geometrische Veränderungen auftreten. Der Schichtverbundwerkstoff beinhaltet ein elektrisch leitfähiges Material in der Mitte, welches von einem verschleißbeständigen Werkstoff geschützt wird. Bei der Fertigung sind die in den vorherigen Absätzen beschriebenen Herausforderungen in Bezug auf die Leitfähigkeit und des spröden Werkstoffverhaltens zu beachten.



Abbildung 1-7: Realisierung von Verbundkonzepten mit einem Teilchenverbundwerkstoff aus CuSi_3 und WSC (links), Faserverbundwerkstoff aus CuSi_3 und C-Fasern (mitte) und Schichtverbundwerkstoff aus CuAl_7 und $\text{CoCr}_2\text{8W}_2\text{Ni}$ (rechts)

1.4 Arbeitspaket A/4: Modellversuch

Zur Simulation der vorherrschenden thermochemischen Randbedingungen im CAMG-Prozess wurde ein Modellexperiment entworfen. Ziel war die Untersuchung der Reaktion der Werkstoffe auf einen Lichtbogen, um erste Aussagen zu den anwendungsrelevanten Eigenschaften bereits vor den Schneidversuchen treffen zu können. Zur Herstellung der Versuchskörper wurden mittels Drahterodieren ca. 300 mm lange stabförmige Elektroden aus planaren 3D-Strukturen gefertigt. Im Rahmen des Modellversuchs wurden diese angeschliffen und in die automatische Abschweißvorrichtung zum Unterwasserschweißen von Stabelektroden eingespannt, welche am UWTH entwickelt worden ist. Im Rahmen des Modellversuchs wurde ein Schweißstromkreis gebildet und ein Lichtbogen gegenüber dem zu schneidenden Stahlwerkstoff gezündet. Der deutlich sichtbare Verzug der Elektroden ist im Rahmen dieses Versuches nicht relevant, da ein Regelkreis integriert ist, der einen möglichst gleichmäßigen Lichtbogen halten soll und seine Geschwindigkeit entsprechend anpasst.

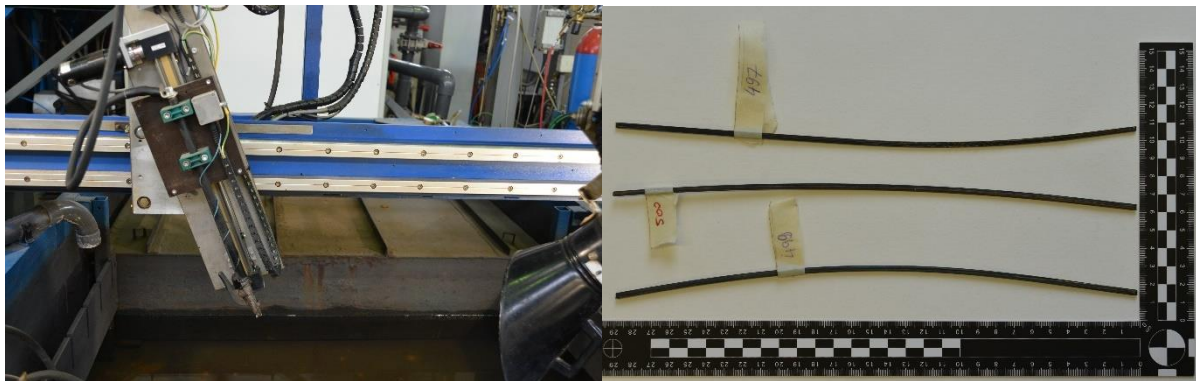


Abbildung 1-8: Abschweißvorrichtung am UWTH (links) und additiv gefertigte Elektroden aus 16MnCr5

Ogleich das Experiment technisch erfolgreich durchgeführt wurde und Ergebnisse lieferte, erwies sich die Relevanz der gewonnenen Erkenntnisse im Nachhinein als begrenzt. Die visuelle Bewertung des Versuchs und die aufgenommenen Daten in Form von Schweißstrom und Lichtbogenspannung lieferten nur geringe zusätzliche Informationen zum bestehenden Wissensstand. Des Weiteren wurde bei der retrospektiven Bewertung der zeitlichen Dimension des Modellversuchs festgestellt, dass die einzelnen Vorbereitungsschritte keine signifikante Zeitersparnis gegenüber der Durchführung des realen CAMG-Versuches darstellen. Sowohl das Wasserstrahlschneiden zur Einbringung von Schlitzen in die Elektrode als auch das Drahterodieren zur Herstellung der Stabelektroden erfordern ein weiteres Fertigungsverfahren nach dem Schweißprozess. Der eigentliche Modellversuch im Anschluss ist dadurch gekennzeichnet, dass bei der Verwendung von Werkstoffen, welche bisher am Institut nicht als Schweißelektrode eingesetzt wurden, Prozessparameter für die Abschweißvorrichtung zu finden sind. Dies betrifft beispielsweise Legierungen auf der Basis von Kobalt und Kupfer oder alle untersuchten Optionen von Verbundwerkstoffen. Der aktuelle Zeitpunkt lässt keine Aussage über den Nutzen zu, da die entsprechende Identifikation von Parameterintervallen direkt mit der Scheibenelektrode beim CAMG-Prozess vorgenommen werden kann.

Eine detaillierte Analyse der Methodik und der zu erwartenden Ergebnisse legt nahe, dass die Fragestellung des Experiments möglicherweise zu eng gefasst war und die Erwartungen hinsichtlich der Zeitreduktion zu hoch waren, um bedeutende wissenschaftliche Erkenntnisse in einer im Vergleich zum ursprünglichen Prozess optimierten Zeit zu erzielen. Zukünftige Untersuchungen sollten daher eine breitere oder anders ausgerichtete Perspektive einnehmen und auf andere wichtige Parameter der Elektrode abzielen.

1.5 Arbeitspaket A/5: Herstellung Scheibenelektroden

Das in Arbeitspaket A/1 entworfene Programm zur Bahnplanung erwies sich vor dem Hintergrund der Ergebnisse aus Arbeitspunkte A/2 und A/3 als fehlerhaft, da die Anforderungen sich abhängig von den Prozessparametern veränderten. Einfachstes Beispiel für diesen Aspekt ist die veränderte Geometrie der Schweißnaht abhängig vom verwendeten Werkstoff und der eingebrachten Wärmeenergie. So sind die Anzahl der Schweißnähte und der Winkel zwischen Laser und Substrat für jeden Elektrodenwerkstoff individuell einzustellen.

Die gesamte Prozesskette der Scheibenherstellung ist in Abbildung 1-9 dargestellt. Im ersten Schritt wird ein Rohling aus kosteneffizientem Baustahl per Wasserstrahltechnologie ausgeschnitten. Im Anschluss erfolgt der laserbasierte Schweißprozess. Für den Ausgleich thermischer Spannungen werden zum Abschluss noch Dehnungsfugen eingebracht. Diese haben darüber hinaus ebenfalls Einfluss auf die Strömungsbedingungen innerhalb der Schnittfuge.

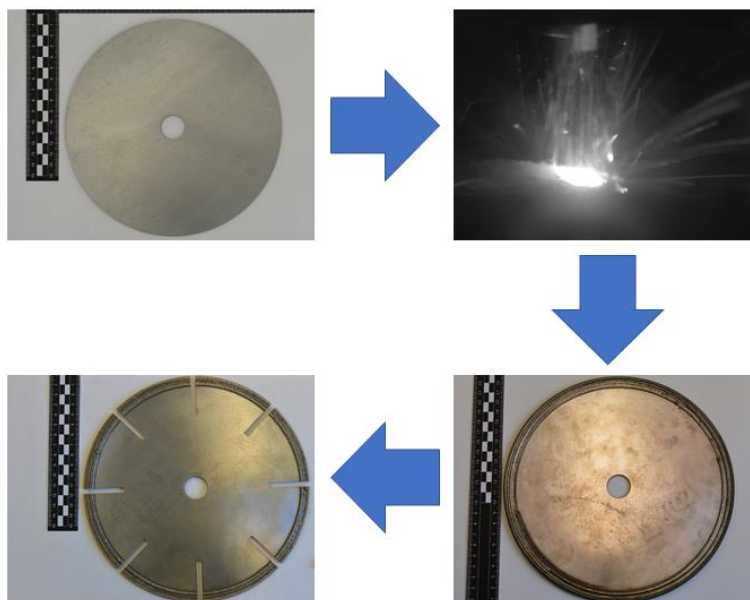


Abbildung 1-9: Prozesskette der CAMG-Scheibe beginnend beim Rohling, dem anschließenden Schweißprozess und der finalen Bearbeitung mittels Wasserstrahlschneidens am Beispiel einer Elektrode aus S355JR + CoMo28Cr

In Abbildung 1-10 ist die im Rahmen des Projektes entwickelte Halterung dargestellt. Diese ermöglicht das Schweißen auf der Umfangsfläche des Grundkörpers, während der gegenüberliegende Bereich mittels Druckluft gekühlt wird. Aufgrund von ungleichmäßiger Wärmeeinbringung, der entsprechenden Abkühlung oder Volumenveränderungen können Spannungen durch den Schweißprozess entstehen, die zu Verzug bei der Fertigung führen. Die Scheibenelektrode ist durch ihre geringe Wandstärke von 2,5 mm und ihren verhältnismäßig großen Durchmesser mit 220 mm beziehungsweise 450 mm anfällig dafür. Bei den kleineren Scheiben ergeben sich hier Abweichungen von bis zu 5,5 mm beziehungsweise 3,2 mm zwischen dem inneren Loch und dem äußeren Umfang, wenn die Scheibe auf einer flachen Fläche liegt. Eine nicht ebene Elektrode führt unweigerlich zu einer größeren Schnittfuge. Dies resultiert in einem höheren Energieverbrauch pro Schnittmeter und einem höheren Verschleiß durch die veränderte Lage in der Schnittfuge.

Es wurden Versuche mit einer veränderten Bahnplanung und einer Luftkühlung durchgeführt, die keinen wesentlichen Erfolg brachten. Zur Vermeidung von Verzug wurde daraufhin eine Spannvorrichtung entwickelt, bei der die Elektrode zwischen zwei 15 mm starken Stahlplatten eingeklemmt wird und nur wenige Millimeter am Umfang für den Schweißprozess frei liegen. Durch die gespeicherte Wärmeenergie der Platten wird eine kontrollierte Abkühlung der Elektrode gewährleistet, was sich insbesondere bei der Verarbeitung härter, aber spröder

Materialien als vorteilhaft erwiesen hat. Die Entfernung der Scheibenelektrode aus der Halterung erfolgt somit erst nach vollständigem Abkühlen.

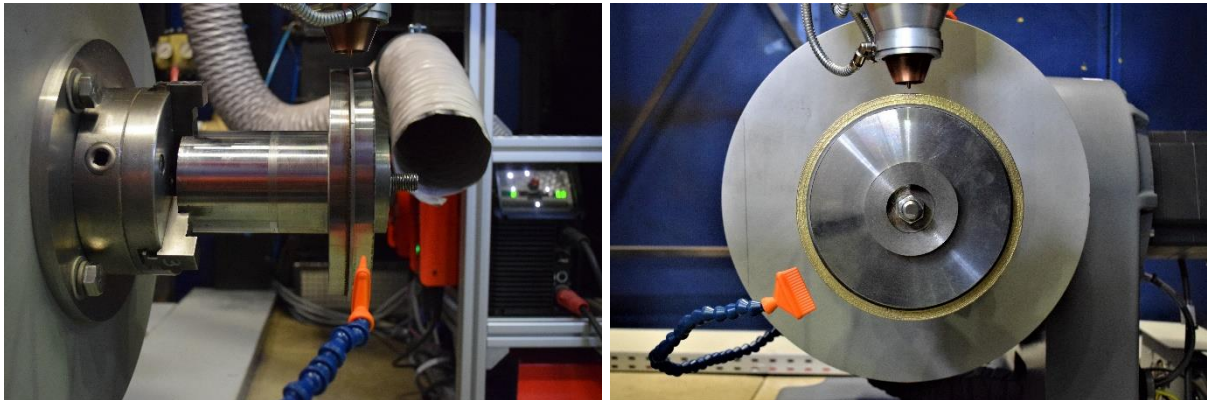


Abbildung 1-10: Aufbau des additiven Fertigungsprozesses inklusive Druckluftkühlung (KSS-Schlauch) für einen Durchmesser von 220 mm mit einem eingespannten Grundkörper (links) und einer Scheibenelektrode mit additiv gefertigtem Funktionsbereich aus CuAl7 (rechts)

Des Weiteren wurde eine Charakterisierung der Versuchskörper hinsichtlich der Härte durchgeführt. In diesem Zusammenhang sei darauf verwiesen, dass sich eine Probe in drei Bereiche einteilen lässt. Der erste Bereich umfasst den nicht behandelten Grundkörper aus Baustahl. Im Anschluss folgt die Wärmeinflusszone, welche eine erhöhte Härte im Vergleich zum Grundkörper aufweist. Dies resultiert bei weicheren Materialien in einem Härtepeak. Im Anschluss erfolgt die Applikation des Zusatzwerkstoffs. Die untersuchten Kupferlegierungen weisen mit Werten von durchschnittlich 90 HV_{0,1} die geringsten Härten auf. Höhere Durchschnittswerte werden beispielsweise von Kobaltbasislegierungen (beispielsweise CoMo28Cr, 626 HV_{0,1}) und Nickelbasislegierungen (beispielsweise NiCr8Si3B, 485 HV_{0,1}) erreicht. Auch kohlenstoffreiche Stähle (beispielsweise 100Cr6, 697 HV_{0,1}) weisen höhere Durchschnittswerte auf. Bei einigen Werkstoffen ist darüber hinaus eine vierte Zone erkennbar. Diese bezieht sich auf die letzte Schweißnaht, welche nicht mehr durch eine Wärmebehandlung durch den Schweißprozess darüberliegender Schweißnähte beeinflusst wurde. Ein beispielhafter Härteverlauf einer Elektrode mit dem Zusatzwerkstoff CuSi3 ist in Abbildung 1-11 dargestellt.

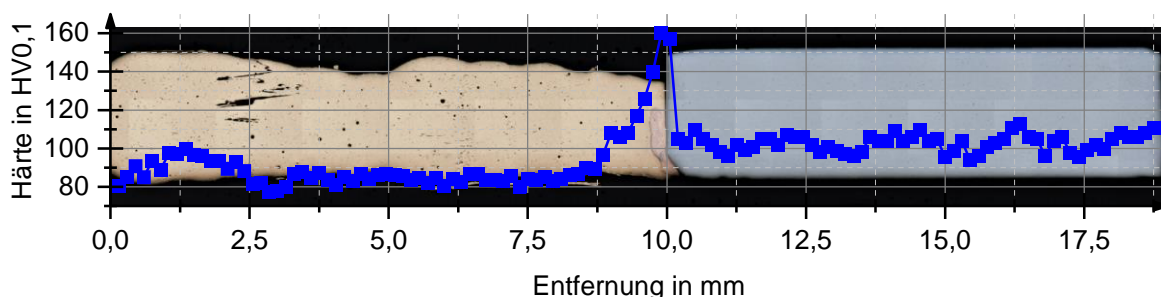


Abbildung 1-11: Härteverlaufes eines gefertigten Versuchskörpers mit dem Zusatzwerkstoff CuSi3 (links) und dem Substrat (rechts)

1.6 Arbeitspaket A/6: Verschleißuntersuchungen

Das Ziel dieses Arbeitspakets war die nähere Untersuchung des Verschleißverhaltens der Elektroden. In Abbildung 1-12 ist die erreichte Schnittlänge ausgewählter Werkstoffe bei einem 10 mm starken Werkstück aus Baustahl dargestellt. Die rote Linie stellt dabei einen Elektrodendurchmesser von 200 mm und damit die festgelegte Verschleißgrenze dar. Ab diesem Punkt ist der Zusatzwerkstoff vollkommen abgetragen. Die Ergebnisse werden in Relation zu einer planparallelen Elektrode aus Baustahl gesetzt, welche nicht geschweißt wurde. Sie stellt den ökonomisch günstigsten Fall dar. Es zeigt sich, dass die kupferbasierten Legierungen bereits nach weniger als einem Meter keinen Zusatzwerkstoff mehr aufgewiesen haben. Aufgrund des Zusatzwerkstoffs und des zusätzlichen Fertigungsschritts kann festgestellt werden, dass alle geschweißten Elektroden mit einer geringeren Schnittleistung als die Referenzelektrode aus ökonomischen Gründen verworfen werden müssen. Bessere Resultate weisen untersuchte Werkstoffsysteme wie kohlenstoffreiche Stähle, härtbare Legierungen und Teilchenverbundwerkstoffe mit hochschmelzenden Partikeln auf. Dieses Ergebnis deutet darauf hin, dass die Härte des Materials eine wichtigere Rolle in den Anforderungen spielt als bislang angenommen. Die höchste Schnittlänge (14.400 mm) wurde dabei von der Elektrode mit einem Zusatzwerkstoff aus einer Mischung aus CuSi3 und WSC im Verhältnis 35/65 Massenprozent erreicht (siehe Abbildung 1-13).

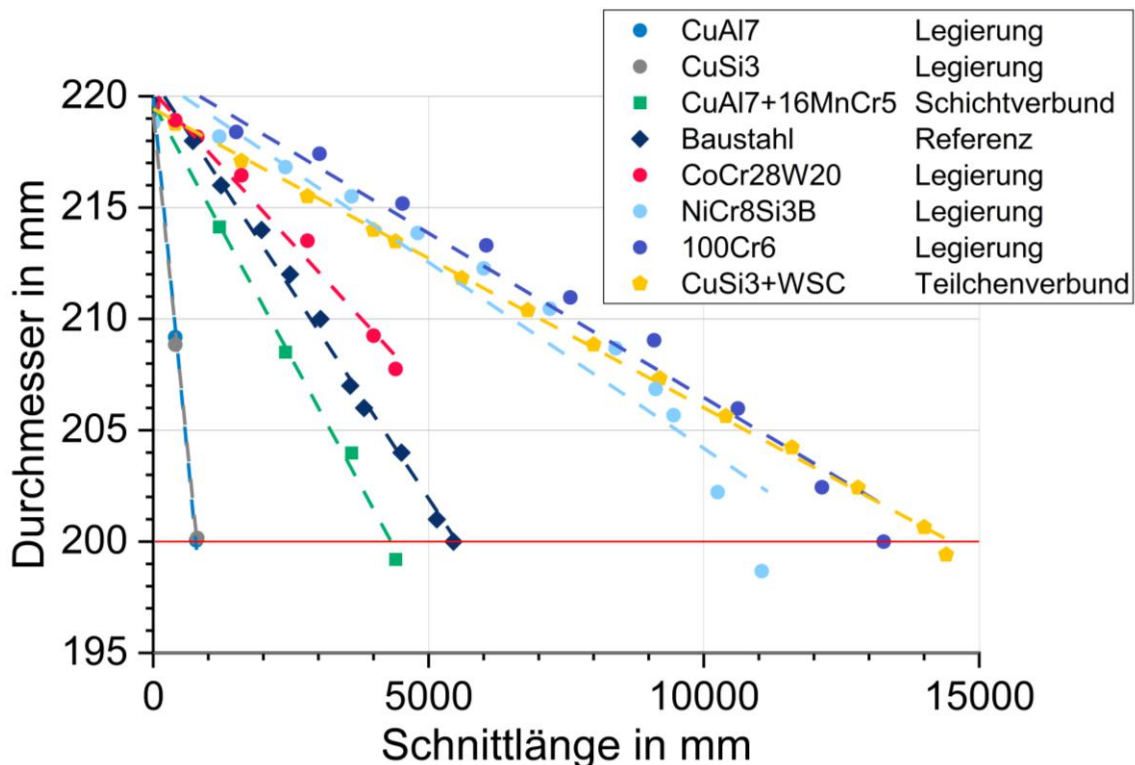


Abbildung 1-12: Erreichte Schnittlänge ausgewählter Werkstoffe bei einem 10 mm starken Werkstück aus Baustahl

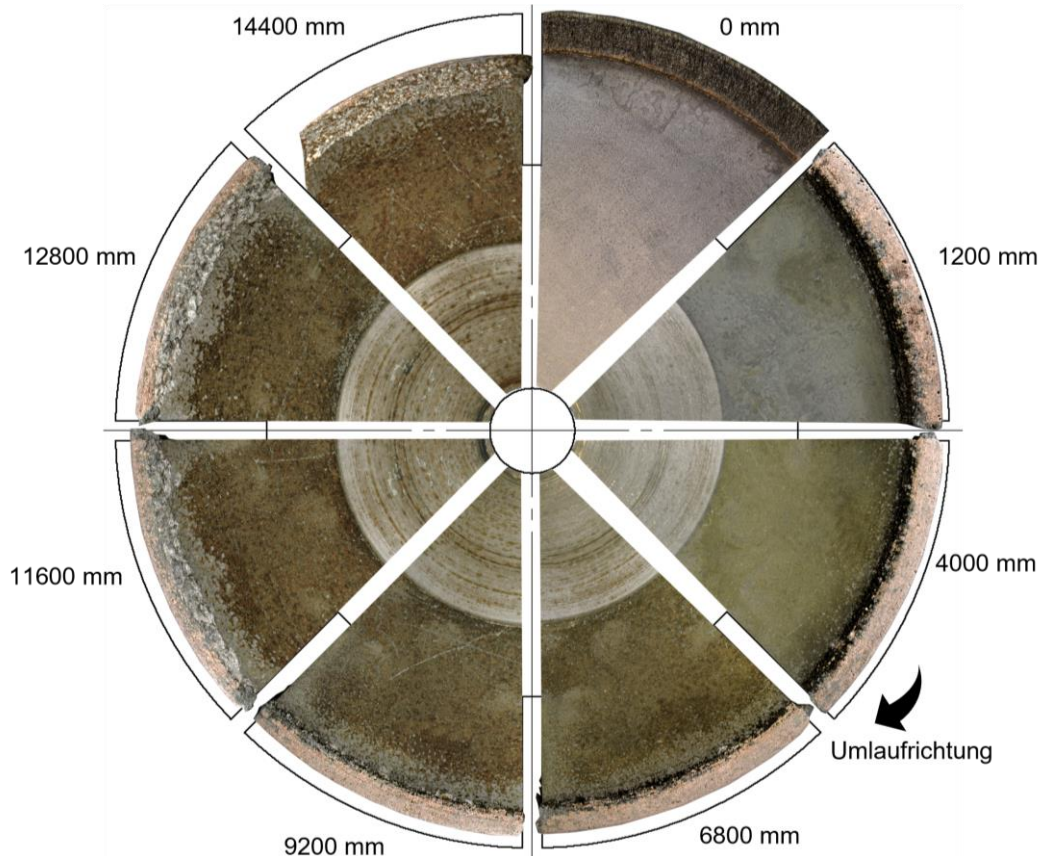


Abbildung 1-13: Verschleißentwicklung der Elektrode mit Segmenten aus CuSi₃ mit integriertem WSC

Durch die geringe Aufmischung beim Laserauftragschweißen ergeben sich bei den Schweißproben scharfe, sichtbare Abgrenzungen zwischen dem Zusatzwerkstoff und dem Substrat. Erkennbar ist dies in Abbildung 1-4 und Abbildung 1-7. Eine Besonderheit stellt hier die Verwendung des Verbundwerkstoffes aus CuSi₃ und WSC dar. Bei den Untersuchungen konnten im Zusatzwerkstoff Bereiche mit deutlichem Eisengehalt festgestellt werden. Dabei handelt es sich offensichtlich um eine Aufmischung mit der Stahlschmelze, mutmaßlich durch den Aufprall noch nicht geschmolzener WSC-Partikel. Dieses Phänomen begrenzt sich auf einen Bereich von einigen 100 µm von der Grenzfläche entfernt. Abbildung 1-14 zeigt den entsprechenden Bereich. Für eine nähere Betrachtung stellt Abbildung 1-15 eine EDX Aufnahme solch eines Bereiches dar. Der erhöhte Eisengehalt ist dabei deutlich zu erkennen. Aufgrund der guten Schnittleistung der Elektrode liegt es nahe, dass diese Beobachtung keinen oder nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf den CAMG-Prozess besitzen. Dies geht mit der Beobachtung einher, dass die Härte der ausschlaggebende Faktor für den Elektrodenwerkstoff ist. Dieser Parameter wird durch das Phänomen mit der Ausnahme eines grenzflächennahen Bereiches nicht beeinflusst.

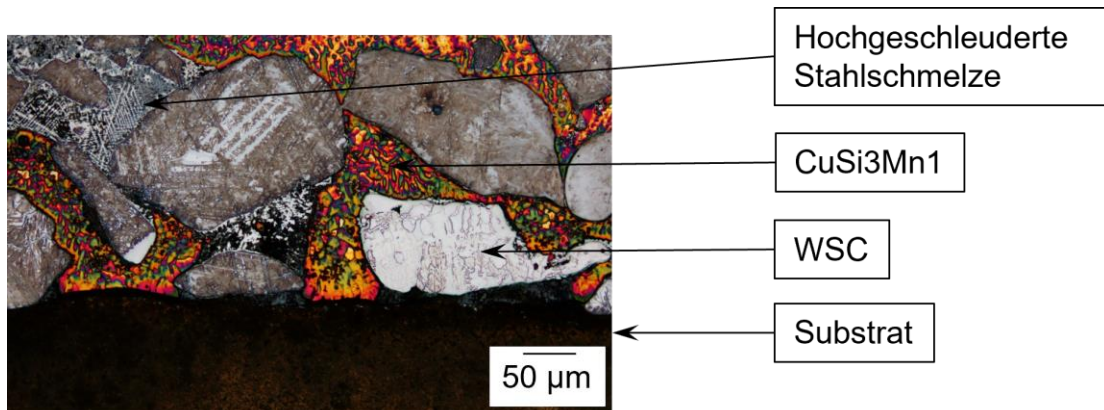


Abbildung 1-14: Mit zwei Prozentiger alk. HNO_3 - sowie Klemm III-Lösung geätzter Übergangsbereich zwischen dem Teilchenverbund aus CuSi_3 und WSC und dem Substratmaterial

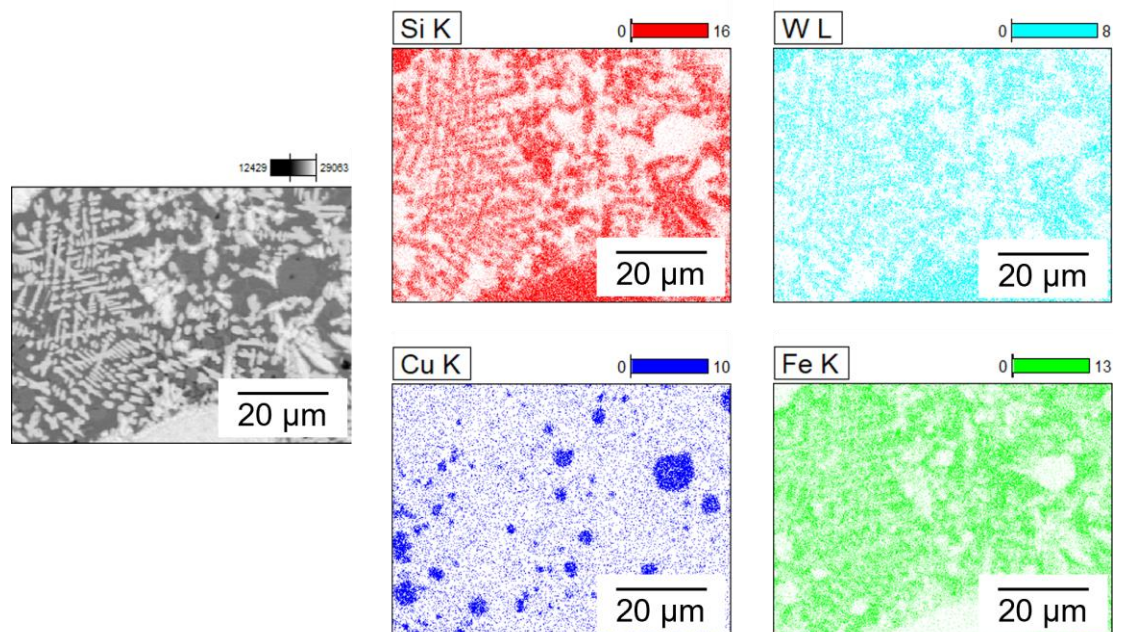


Abbildung 1-15: Mittels EDX durchgeführter Flächenscan zur Abschätzung der Elementverteilung im Bereich der hochgeschleuderten Stahlschmelze. In Abbildung 1-16 und Abbildung 1-17 sind Scheibenelektroden nahe des Verschleißkriteriums dargestellt. Dabei handelt es sich um die Elektroden mit dem Zusatzwerkstoff CuSi_3 und dem Verbundwerkstoff aus CuSi_3 und WSC. Es ist sichtbar, dass bestimmte Bereiche während des Aufenthaltes in der Schnittfuge schmelzflüssig waren und sich im Anschluss wieder an der Scheibenelektrode abgelagert haben. In Abbildung 1-16 ist dies durch die veränderte Gefügestruktur und die auffällige Geometrie des näher betrachteten Bereiches sichtbar. Abbildung 1-17 zeigt einen Querschliff des restlichen Segmentverbundwerkstoffes. Hierbei ist ein Riss mit einer Breite von bis zu $100\ \mu\text{m}$ quer durch den gesamten aufgetragenen Werkstoff zu erkennen. Von diesem gehen weitere Risse orthogonal ab, die hauptsächlich die WSC-Partikel durchschneiden. Das zeigt, dass diese Partikel nicht aufgeschmolzen sind, sondern durch die Hochtemperaturbelastung gebrochen sind. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass ein Großteil des verbliebenden Werkstoffes auf dem Substrat nicht die

verwendete Kupferlegierung darstellt. Analog zur beobachteten Aufbauschneide ist zu vermuten, dass es sich hier um den Baustahl aus dem Werkstück handelt.

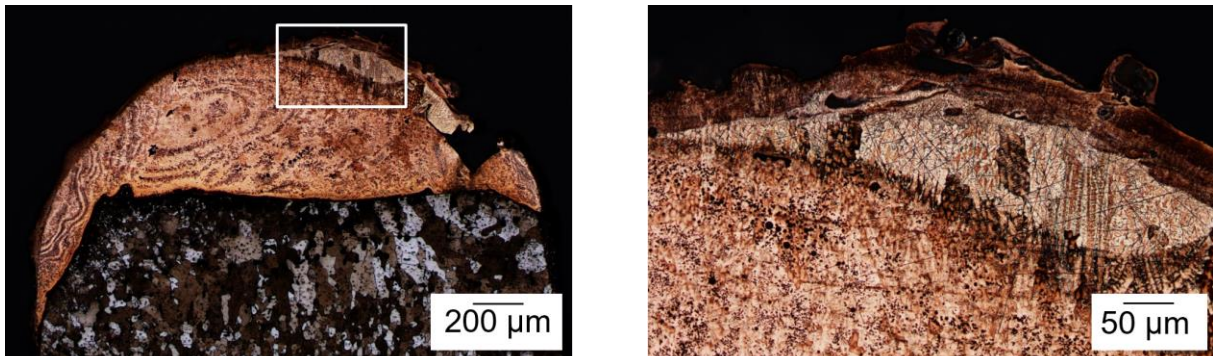


Abbildung 1-16: Mit zweiprozentiger alk. HNO_3 - und Cu m5-Lösung geätzter Rest an CuSi_3 auf der Grundscheibe nach dem CAMG-Schneidprozess in verschiedener Vergrößerung

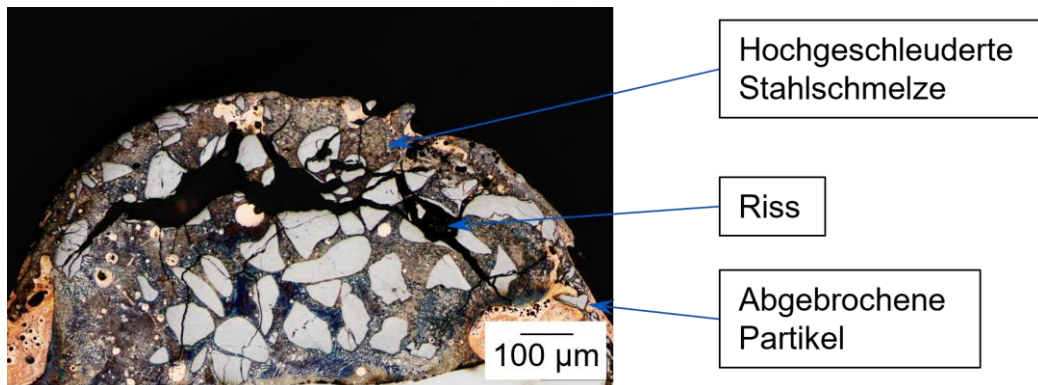


Abbildung 1-17: Mit zweiprozentiger alk. HNO_3 -Lösung geätzter Schliff der Elektrode mit aufgeschweißtem CuSi_3 und integriertem WSC nach Erreichen des Verschleißkriteriums

Bei lichtbogenbasierten Prozessen sind die Strom- und Spannungswerte wichtige Prozessparameter. Hier können in-situ Beobachtungen getroffen werden, sofern bekannte Muster auftreten. An diesem Punkt wird das Nachfolgeprojekt AutArc ansetzen, um ein tieferes Verständnis der Prozessparameter zu entwickeln. In Abbildung 1-18 ist die Häufigkeitsverteilung der Spannungswerte zweier verschiedener Schnitte dargestellt. Im Gegensatz zu Abbildung 1-9 wurden strömungstechnisch optimierte, geschwungene Schlitze verwendet. Aufgrund des schnelleren Verschleißes der spitz zulaufenden Bereiche kam es zu einer optisch und akustisch wahrnehmbaren Vibration. Die roten Spannungswerte zeigen den deutlichen Einfluss dieser Vibration innerhalb der Prozesszone. Dies geht ebenfalls mit einer Reduktion der für den Schnitt zur Verfügung stehenden Leistung einher. Während im Referenzschnitt eine Leistung von 22,0 kW gemessen wurde, betrug diese während der Vibration lediglich 15,7 kW.

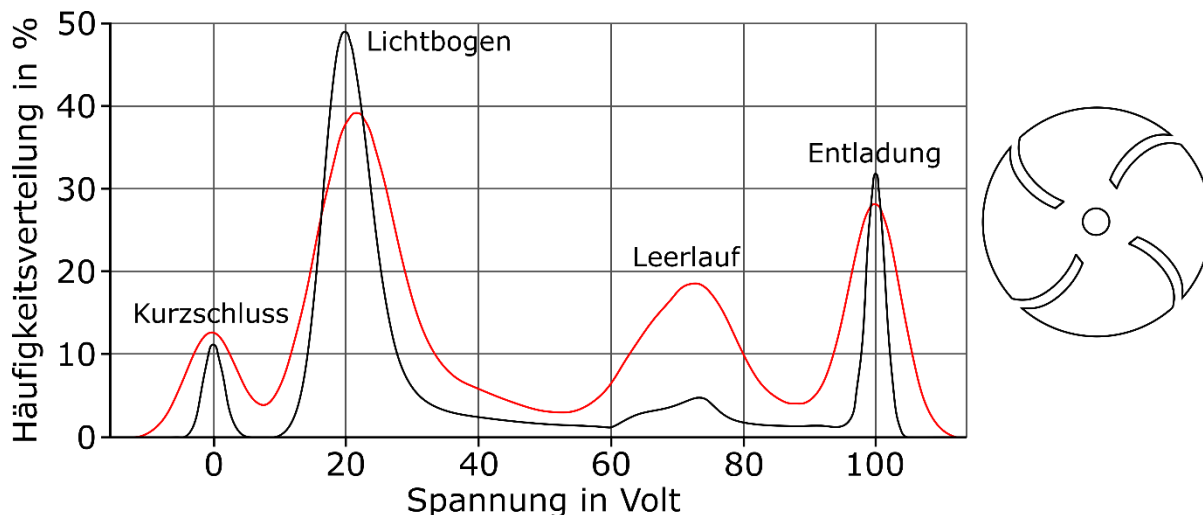


Abbildung 1-18: Spannungssignal des CAMG-Prozesses ohne (schwarz) und mit Vibrations (rot) inklusive der verwendeten Schlitzgeometrie

1.7 Arbeitspaket A/7: Werkstofffranking

Auf Basis der bisherigen Ergebnisse kann ein Ranking der Elektrodenwerkstoffe beim CAMG-Prozess erstellt werden. Dabei ist zu beachten, dass dies lediglich auf Werkstoffgruppenebene erfolgen kann, da eine detaillierte Analyse jeder einzelnen Legierung mit praktischen Versuchen nicht möglich ist. In Zukunft könnten softwarebasierte Methoden der Materialentwicklung Abhilfe schaffen. Die Anforderungen an die Werkstoffe können dem Arbeitspaket A/2 entnommen werden. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Arbeitspaket A/6 lässt sich ableiten, dass sich die mechanischen, thermischen und elektrischen Anforderungen in der Schnittleistung der Elektroden widerspiegeln. Aus dieser Perspektive befinden sich Kupferlegierungen am Ende des Rankings. Ebenfalls können kohlenstoffarme Stähle und die untersuchten Kobaltlegierungen im unteren Bereich des Rankings eingeordnet werden. Im oberen Bereich hingegen finden sich warmfeste Nickellegierungen, kohlenstoffreiche Stähle und Verbundwerkstoffe mit hochschmelzenden Partikeln. Da die chemische Beständigkeit sowie das Korrosions- oder Reaktionsverhalten für die kurzen Beobachtungszeiträume und die zu erwartende Prozessumgebung vernachlässigt werden können, müssen andere Faktoren herangezogen werden. In vergleichbaren Klassifikationen werden darüber hinaus die Verarbeitbarkeit, Kosten, Verfügbarkeit und Nachhaltigkeit als weitere Faktoren herangezogen. Der letzte Punkt bezieht sich in der Regel auf die Fähigkeit zum Recycling des Werkstoffs. Da im vorliegenden Fall eine Endlagerung der aktivierten Werkstoffe vorgesehen ist, kann dieser Punkt vernachlässigt werden. Für die Herstellung der Elektroden ist die Schweißbarkeit der Werkstoffe von großer Bedeutung. Hochfeste und harte Materialien zeigen in der Regel sprödes Materialverhalten und weisen hohe Eigenspannungen auf, was die Schweißbarkeit erheblich beeinträchtigt. Die in den vorangehenden Arbeitspaketen beschriebenen Methoden der Vorwärmung erlauben es, Werkstoffe, die gemeinhin als nicht schweißbar gelten, dennoch zu verarbeiten. Dies trifft insbesondere auf hochfesten Stahl und Nickelbasislegierungen zu. Bei Verbundwerkstoffen mit hochschmelzenden Partikeln ist die Eignung abhängig von der Matrix. Bei der Verwendung

von Kupfer treten keine Schwierigkeiten auf. Erst bei einem zu hohen Gehalt an WSC (größer 75 m%) können Beeinträchtigungen auftreten. Bei der Betrachtung der Verfügbarkeit und der Kosten weisen Stähle einen entscheidenden Vorteil auf. Dies ist auf die hohe Verfügbarkeit sowie die Preise auf dem Weltmarkt zurückzuführen.

Zusammenfassend lassen sich die drei Werkstoffgruppen Verbundwerkstoffe mit hochschmelzenden Partikeln, Nickelbasislegierungen und kohlenstoffreiche Stähle als geeignet einstufen. Die genaue Unterteilung ist von der Perspektive des Betrachters abhängig. Aus akademischer Sicht haben sich die Verbundwerkstoffe bisher am besten verhalten, da sie die höchste Lebensdauer erreicht haben. Aus industrieller Perspektive lassen sich die kohlenstoffreichen Stähle am Besten bewerten, da sie eine hohe Lebensdauer aufweisen und Vorteile in Bezug auf Verfügbarkeit und Kosten bieten. Die hier getätigten Aussagen gelten ausschließlich für die untersuchten Legierungen. Es ist nicht auszuschließen, dass sich das Ranking bei einer Optimierung der Legierungszusammensetzungen aller untersuchten Werkstoffe ändern könnte. Aufgrund der hohen Anzahl an notwendigen Versuchen erscheint eine Evaluierung basierend auf simulativen Methoden als einzige Möglichkeit, die durch praktische Versuche am Ende verifiziert werden muss.

1.8 Arbeitspaket A/8: Ökonomische Betrachtung

Für die Anwendung des CAMG-Verfahrens im Rückbau ist die ökonomische Betrachtung des Verfahrens von großer Wichtigkeit. Aus diesem Grund wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner in Arbeitspaket A/8 der erste Ansatz des Kostenmodells weiterentwickelt. Dabei profitierte das Modell von beiden Seiten durch die vertiefte Prozesskenntnis und die praktischen Erfahrungen in der Anwendung. Insgesamt konnte die Zielgröße Kosten pro Schnittmeter identifiziert werden, welche abhängig von der zu trennenden Dicke ist. In diesem Bericht werden die Daten für ein Werkstück mit der Dicke 10 mm dargestellt. Grundlegende Eingangsgrößen sind die Personalkosten, die Materialkosten für die Grundscheiben und den Zusatzwerkstoff und die Prozesskosten für das Laserauftragschweißen und das Wasserstrahlschneiden. Insgesamt werden folgende Formeln für die Fertigungskosten K_F , die Materialkosten K_M und die Gesamtkosten K verwendet:

$$K_{F_{\text{Wasserstrahl}}} = \frac{\text{Elektrodenanzahl} * \text{Konturlänge [mm]}}{\text{Schnittgeschwindigkeit} \left[\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right]} \quad \text{Gl. 1}$$

$$* (\text{Stundensatz Techniker} + \text{Stundensatz Maschine}) \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right]$$

$$K_{F_{\text{Schweißen}}} = \frac{\text{Elektrodenanzahl} * \text{Schweißnahtlänge [mm]}}{\text{Schweißgeschwindigkeit} \left[\frac{\text{mm}}{\text{h}} \right]} \quad \text{Gl. 2}$$

$$* (\text{Stundensatz Techniker} + \text{Stundensatz Maschine}) \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right]$$

$$+ \text{Vorwärmzeit [h]}$$

$$* (\text{Stundensatz Techniker} + \text{Stundensatz Maschine}) \left[\frac{\text{€}}{\text{h}} \right]$$

$$K_{M_{\text{Grundkörper}}} = \text{Materialpreis} \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right] * \text{Plattengewicht [kg]} \quad \text{Gl. 3}$$

$$K_{M_{Pulver}} = \text{Materialpreis} \left[\frac{\text{€}}{\text{kg}} \right] * \frac{\text{geschweißtes Gewicht [kg]}}{\text{Ausnutzungsgrad Pulver}} \quad \text{Gl. 4}$$

$$K_S = \frac{K_F + K_M \text{ [€]}}{\text{Elektrodenanzahl} * \text{Schnittmeter [m]}} \quad \text{Gl. 5}$$

Die im Folgenden angegebenen Werte basieren auf dem aktuellen Arbeitgeberbrutto nach TV L sowie den verfügbaren Marktpreisen im Sommer 2024. Insbesondere letztere unterliegen den Schwankungen des globalen Marktpreises und sind daher volatil. Die errechneten Materialpreise müssen vor diesem Hintergrund als Anhaltswert betrachtet werden. Die für die Fertigung aller Elektroden erforderlichen Rohlinge werden mit einem Stückpreis von 3,65 € für das Material und 4,91 € für die Fertigung berechnet. Das Konfektionieren der Scheibenelektroden lässt sich mit 4,78 € pro Stück berechnen. Erst durch das Einbringen der Schlitze sind die Elektroden einsatzbereit. Der hohe Preis ist insbesondere auf die kostenintensive Schneidtechnologie des Wasserstrahlschneidens zurückzuführen. Hier besteht Einsparpotential durch die Verwendung anderer Technologien wie Plasmaschneiden oder Laserschneiden. Der Hauptanteil ist das Schweißen der Scheibe, welches etwa 90 bis 120 Minuten pro Elektrode bei der Verwendung des Laserauftragschweißens benötigt. Hintergrund ist die geringe Abschmelzrate und die dadurch entstehende feine Schweißnaht, die es notwendig macht drei Nähte nebeneinander und mindestens 14 Ebenen zu schweißen. Die reine Schweißzeit beträgt etwa 53 Minuten. Hinzu kommen Wartezeiten aus thermischen Gründen und aus Instandhaltungstechnischen Gründen. Dies ergibt Fertigungskosten von 43,94 € pro Elektrode. Dazu kommen noch die Materialkosten des Zusatzwerkstoffes. Diese sind zusammen mit den schnittmeterbezogenen Gesamtkosten K_S Tabelle 1-2 zu entnehmen.

Tabelle 1-2: Ökonomische Betrachtung ausgewählter Elektrodenwerkstoffe

Zusatzwerkstoff	Form	K_M [€]	K_S [€/m]
CuSi3	Pulver	27,41	101,30
CuSi3	Draht	13,47	83,87
CuAl7	Draht	14,62	85,30
CoCr28W20	Pulver	34,48	12,12
NiCr8Si3B	Pulver	19,70	6,64
100Cr6	Pulver	32,71	6,51
CuSi3+WSC (35/65 m%)	Pulver	33,69	6,06
CuSi3+WSC (25/75 m%)	Pulver	32,87	6,27
CuSi3+WSC (15/85 m%)	Pulver	32,53	10,51

Die hohen Kosten pro Meter sind insbesondere auf die hohen Kosten durch den Schweißprozess zurückzuführen. Eine Reduktion der Kosten durch die Etablierung einer Kleinserienfertigung und durch eine Prozessoptimierung vor dem Hintergrund ökonomischer

Kennwerte ist zu erwarten. Bei erhöhten Prozessgeschwindigkeiten im Schweißen und Wasserstrahlschneiden (Annahme Verdopplung) und reduzierten Einkaufspreisen durch größere Bestellungen (Annahme 20%) sind bei Schnittlängen im Bereich von 15 m Kosten von etwa 2,70 €/m bei Pulvern und 2,40 €/m bei Drähten zu erwarten. Vergleichbar zu den Ergebnissen aus Arbeitspaket A/7 ist es auch hier die Perspektive entscheidend. Aus akademischer Sicht besteht weiterhin Forschungsbedarf an Verbundlösungen für die Werkstoffsysteme. Der laserbasierte Prozess ist die einzige Möglichkeit der Fertigung. Aus industrieller Perspektive und einer ausschließlichen Konzentration auf den Faktor Kosten pro Schnittmeter sind andere Schweißverfahren hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit zu evaluieren.

2 Komplex B: CAMG-Schneidgerät

2.1 Arbeitspaket B/1: Lastenheft

Um eine praxisnahe und anwendungsgerechte Konstruktion der Schneideinrichtung zu gewährleisten, wurde die Firma EWN Entsorgungswerk für Nuklearanlagen GmbH in die Erstellung des Lastenheftes mit einbezogen. Diese Zusammenarbeit erfolgte sowohl unterstützend als auch beratend, um die Manipulationsmöglichkeiten und Anforderungen im Rückbauprozess detailliert zu erörtern. Es wurden Gespräche mit technisch informierten Mitarbeitern von EWN geführt. Die gewonnenen Informationen dienen als Grundlage zur Ableitung der Randbedingungen für das Pflichten- und Lastenheft (siehe Tabelle 2-1). Basierend auf den gesammelten Informationen wurden die Zielgrößen wie Materialdicke, Bauteilgeometrien und Manipulationsraum konkretisiert. Ein abschließendes Meeting wurde durchgeführt, um das erstellte Lastenheft zu präsentieren und zu diskutieren. Das Lastenheft wurde in einzelne Baugruppen gegliedert, um die wesentlichen Funktionen des Geräts durchdacht und hinsichtlich der wesentlichen Randbedingungen umzusetzen.

Um die Randbedingungen allgemein zu halten und die Anzahl der möglichen Lösungen nicht durch zu spezifische Vorgaben einzuschränken, wird zunächst nur das grundlegende Prinzip beschrieben. Das Gerät hat die Aufgabe, Energie zu leiten und gleichzeitig umzuwandeln, um eine Drehbewegung einer Scheibe zu erzeugen. An dieser Scheibe muss zudem ein hoher Strom anliegen, der in der Lage ist, einen Lichtbogen zu erzeugen, welcher die Metalloberfläche des Werkstückes aufschmilzt. Die durch die Drehbewegung der Scheibe erzeugte Spülströmung beschleunigt das geschmolzene Material aus dem Verbund und erzeugt somit einen Trennschnitt. Das Gerät muss zudem über Bedienelemente verfügen, um die Energien steuern zu können.

Kriterien und Randbedingungen

- Zielgrößen: Die folgenden Kriterien müssen auf jeden Fall beim Konstruieren des CAMG-Gerätes erfüllt und berücksichtigt werden. Für den Unterwassereinsatz muss das Gehäuse wasserdicht ausgeführt werden. Die Sicherheitsbestimmungen aus dem Merkblatt DVS 1814 für Geräte und Anlagen müssen eingehalten werden. Dabei muss auch der Elektrodenstrom vom Getriebe und Gehäuse getrennt sein. Die Produktgestaltung muss so erfolgen, dass eine einfache Mechanisierung unter Wasser möglich ist und bodennah getrennt werden kann. Der Trennschnitt muss rückstellkraftfrei mit Hilfe einer Führung durchgeführt werden. Die Stromübertragung mit der Obergrenze von 4000 A wird nicht über ein Hg-Modul erfolgen. Die Scheibenelektrode muss eine Umfangsgeschwindigkeit von ca. 23 m/s erreichen.
- Wunschriterien: Wünsche sollten nach Möglichkeit berücksichtigt werden. Zu prüfen ist hierbei, ob der Mehraufwand zulässig ist. Es sollte Temperatursensoren am Stromübertragungsmodul und am Getriebe angebracht werden, sowie ein Feuchtigkeitsmesser innerhalb des Gehäuses, um im Falle einer zu hohen Temperatur oder beim Wassereintritt eine automatische Notabschaltung zu ermöglichen. Über eine

Anzeige oder ein Signal sollte visualisiert werden, ob die Temperatur zu hoch ist oder ob, Wasser eingetreten ist. Hierbei könnte auch eine Anzeige oder ein Signal angebracht werden, die einen Kurzschluss zw. Gehäuse und stromführenden Part anzeigen können.

Funktionen und Grundprinzipien

Das CAMG-Gerät besteht aus mehreren Teilsystemen. Im Nachfolgenden wird näher auf die Teilfunktionen der Module sowie auf das Gesamtgerät als Ganzes eingegangen.

- Gesamtgerät: Das Gerät muss verschiedene Funktionen erfüllen um den sicheren Umgang gewährleisten zu können und um das Gerät gegen Zerstörung durch falsche Bedienung zu schützen. Die Drehzahl und Drehrichtung wird außerhalb des Betriebs einstellbar sein. Der Elektrodenstrom muss ein- und abschaltbar sein. Eine schnelle Auswechselbarkeit der Scheibenelektrode ist wichtig und das Stromübertragungsmodul muss austauschbar sein, sowie einfach zugänglich für Wartungsarbeiten. Für den Unterwassereinsatz ist die Ausführung des Gehäuses mit den Dichtungen und Anbauten wasserdicht für Tiefen von mindestens 20 Meter zu konzipieren. Hierbei muss die stromführende Welle gegenüber dem Gehäuse abgedichtet sein. Das Gerät soll möglichst klein in seinen Abmessungen sein. Der Elektrodenstrom darf an der Werkzeugscheibe und auf keinem Fall an dem Gehäuse oder am Antrieb anliegen.

Es ist ein Stromübertragungsmodul zu konzipieren, das den Elektrodenstrom auf die Scheibe weiterleitet. Dabei wird der Strom über die elektrodentragende Welle geleitet. So müssen alle in Kontakt stehenden Bauteile elektrisch isoliert werden, um zu verhindern, dass der Elektrodenstrom am Antrieb anliegt und diesen zerstören kann. Die Lagerung dieser Welle im Gehäuse muss ebenfalls isolierend sein. Um die Werkzeugelektrode schnell wechseln zu können, muss eine Aufnahme konzipiert werden, die diesen Vorgang mit wenigen Handgriffen ermöglicht. Es ist darauf zu achten, dass möglichst wenig Teile auf der Unterseite der Scheibe verbaut werden, weil somit das bodennahe Trennen nicht mehr durchführbar ist.

- Gehäuse: Das Gehäuse muss so konzipiert werden, dass es den hohen Ansprüchen beim Unterwasserbearbeiten standhält. Das Gehäuse muss das Stromübertragungsmodul und das Getriebe vor dem Kontakt mit Wasser schützen und dabei dem Druck, der in den jeweiligen Tiefen herrscht, standhalten. Es muss stabil sein, um die auftretenden Momente durch den Antrieb aufzunehmen, ohne sich zu verformen. Die Oberfläche darf den elektrischen Strom nicht leiten. Wartungen und Reparaturen der Module müssen durchführbar sein. Das Gehäuse muss seinen Beitrag zur Bedienerfreundlichkeit und einfacher Handhabung leisten. Das Gehäuse muss dekontaminierbar sein.
- Antrieb: In der Leistungsparameterevaluation konnte festgestellt werden, dass sich eine Umfangsgeschwindigkeit von ca. 23 m/s als ideal darstellt. Um möglicherweise auf spätere Entwicklungen an der Elektrode zu reagieren zu können, muss der Antrieb über das Getriebe am Abtrieb auf eine Drehzahl von $n = 1000$ bis 3000 1/min an der Elektrode einstellbar sein. Verschiedene Möglichkeiten zum Ausführen des Antriebs werden untersucht und beim Konzipieren gegeneinander abgewogen und ausgewählt. Die

Antriebsleistung muss groß genug sein, um ein Festfahren zu verhindern. Der größte Leistungsbedarf resultiert aus den Reibungsverlusten der Strömung an der Oberfläche der Scheibenelektrode, wobei die Wechselwirkung zwischen Elektrode und Werkstück nur eine untergeordnete Rolle spielen.

- **Getriebe:** Das Getriebe überträgt die kinetische Energie an die Elektrode. Dabei muss die Welle I vom Schneidstrom isoliert sein, der auf Welle II anliegt. Die Übersetzung wird so gewählt, dass am Abrieb eine Drehzahl von 1000 bis 3000 1/min möglich ist.
- **Elektrodentragende Welle:** Für diese Welle wird das passende Material ausgewählt und dimensioniert, um den verwendeten Strom zu führen und die Joulesche Wärme gering zu halten. Gleichzeitig muss sie genügend Festigkeit besitzen, um das Drehmoment zu übertragen. Die Welle wird eine Spannvorrichtung für die Werkzeugelektrode besitzen und isolierend gegenüber dem Gehäuse gelagert sein.
- **Lagerung und Dichtungen:** Um zu verhindern, dass der Strom von der Welle auf das Gehäuse übertragen wird, werden isolierende Lager eingesetzt. Die Welle wird mit einer Dichtung versehen, um das Eindringen von Umgebungswasser zu verhindern.
- **Strom-/Drehzahlübertragungsmodul:** Obwohl sich ein Stromübertragungsmodul auf Quecksilberbasis während der Grundlagenuntersuchungen bewährt hat, ist Quecksilber aufgrund seiner toxischen Wirkung in diesem Gerät nicht zulässig. Stattdessen werden alternative flüssig Metalle untersucht, die eine Übertragung von elektrischem Strom bis zu 6000 A und eine Betriebsdrehzahl von 3000 1/min realisieren können.
- **Scheibenelektrode:** Als Werkzeugelektrode wird eine Baustahlscheibe mit aufgeschweißtem Schneidwerkstoff (\varnothing 450 mm) verwendet.
- **Führung:** Die Führung ist notwendig, um unter schwierigen Bedingungen, wie schlechten Sichtverhältnissen, unterschiedliche Geometrien mit gleichmäßiger Eindringtiefe abzufahren. Das Verkippen um die x- und y-Achse muss verhindert werden und somit das Verkanten der Werkzeugelektrode, wodurch der Trennprozess unterbrochen werden könnte. Die Führung muss es ermöglichen, verschiedene Geometrien präzise abzufahren.
- **Mensch-Produkt-Interaktion:** Um wirtschaftliche Schnitte zu erreichen, ist eine gute Handhabung des Geräts erforderlich. Die Grundmaße und das Gewicht des Geräts sind entscheidend für die Handhabung.

Tabelle 2-1: Lastenheft für die CAMG-Technikumsanlage

Nr.	F/W	Anforderungen	Mindest-Erfüllung	SOLL-Erfüllung	Ideal-Erfüllung	Zeichen [Einheit]
Physikalisch-Technische Funktion vom Gesamtgerät						
A01	F	Wasserdichtigkeit in Tiefen von	20	30	60	h_w [m]
A02	F	Zu trennende Materialien	100	150	200	d [mm]
A03	F	Spannungsversorgung aller Komponenten	45	65	75	U [V]
A04	F	Trennung Elektrodenstrom von Antrieb u. Gehäuse				
A05	F	Rückstellkraftfrei				
A06	F	Gesamtgewicht	60	100	150	m [kg]
A07	F	Gesamtlänge	500	1000	1200	L [mm]
A08	F	Gesamtbreite	250	450	500	B [mm]
A09	F	Gesamttiefe	250	450	500	H [mm]
A10	F	Temp. innerhalb des Gerätes	≤ 90	50	35	T [°C]
A11	W	Temperatursensoren an Getriebe und Stromübertragungsmodul				
A12	W	Automatische Abschaltung bei zu hoher Temperatur				
A13	F	Automatische Abschaltung bei Festfahren der Elektrode				
A14	W	Feuchtigkeitssensor				
Gehäuse						
B01	F	Material			Kunststoff isoliertes Metall	

Nr.	F/W	Anforderungen	Mindest-Erfüllung	SOLL-Erfüllung	Ideal-Erfüllung	Zeichen [Einheit]
B02	W	Wartungsfrei				
Antrieb						
C01	F	Antriebsleistung	2500	4000	6000	P_A [W]
C02	F	Rotierend, Drehsinn einstellbar				
C03	F	Notstopp, Auskuppeln				
Getriebe						
D01	F	Drehzahl am Abtrieb	2000	1500 -2500	1000 3000	n [1/min]
				Einstellbar über Antrieb		
Wellen						
E01	F	Arbeitsstrom übertragen	2000	4000	6000	I_A [A]
E02	F	Wärmemenge	≤ 10	8,6	2	Q [W/cm]
E03	F	Moment übertragen	30	40	50	M [Nm]
E04	F	Spannvorrichtung zum Auswechseln der Elektrode				
E05	F	Anordnung der Wellen				
Lagerung						
F01	F	Abtriebswelle isolierend gelagert				
Stromübertragungs-modul						
G01	F	Arbeitsstrom	2000	4000	6000	I_A [A]
G02	F	Arbeitsspannung	≤ 65	≤ 65	≤ 65	U_A [V]
G03	F	Drehzahl	2000	2500	3000	n [1/min]
G04	F	1x Übertragungsweg DC				

Nr.	F/W	Anforderungen	Mindest-Erfüllung	SOLL-Erfüllung	Ideal-Erfüllung	Zeichen [Einheit]
G05	F	Gesamtlänge	≤200	160	120	[mm]
G06	F	Durchmesser	≤150	120	80	[mm]
G07	W	Gute Auswechselbarkeit				
G08	F	Standzeit	25	50	100	[h]
Werkzeugelektrode						
H01	F	Schnittlängen	5	10	30	[m]
H02	F	Durchmesser	450			[mm]
H03	F	Geschlitzt				
H04	W	Segmente				
H05	F	Spülströmung erzeugen				
Führung						
I01	F	Fernhantiert				
Mensch-Produkt-Beziehungen						
J01	F	bedienungsfreundlich				
J02	F	Wartung	2	1	keine	Jahr
J03	F	Einfache Handhabung				
J04	F	Totmantaster 3-Stufig				
J05	F	Ein/Aus Elektrodenumdrehung				
J06	F	Ein/Aus Elektrodenstroms				
J07	F	Einstellen der Elektrodendrehzahl				
J08	F	Einstellen des Drehsinns				

Nr.	F/W	Anforderungen	Mindest-Erfüllung	SOLL-Erfüllung	Ideal-Erfüllung	Zeichen [Einheit]
J09	F	Anbringen von Sicherheitshinweisen				
J10	W	Anzeige: Temperatur, Kurzschluss, Wassereintritt				
Sicherheit						
		Schweißstromquelle				
K01	F	Bis 75 V Leerlaufspannung				
K02	F	S Zeichen				
K03	F	Keine Wechselspannung				
K04	F	Anordnung über Wasser				
K05	F	Fernbetätigtem Schalter				
K06	F	Schalterstellung deutlich erkennbar				
K07	F	Abschalteinrichtung sofort betätigbar				

Ergebnisse

- Klar definierte Anforderungen: Durch die Zusammenarbeit mit EWN konnten die Anforderungen an die Schneideinrichtung präzise definiert werden.
- Konkrete Zielgrößen: Die Zielgrößen wie Materialdicke, Bauteilgeometrien und Manipulationsraum wurden konkretisiert, was einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung des TRL leistete.
- Strukturiertes Lastenheft: Das erstellte Lastenheft wurde in Baugruppen formuliert, sodass die wesentlichen Funktionen des Geräts klar durchdacht und umgesetzt werden konnten.

2.2 Arbeitspaket B/2: Einzelkomponenten der Kraftübertragung

In diesem Arbeitspaket wurde der Kraftübertragungsstrang zur Scheibenrotation für die Schneideinrichtung ausgelegt. Durch die richtige Dimensionierung des Kraft/Drehzahlverhältnisses wird die Leistungsfähigkeit der Schneideinrichtung sichergestellt.

Die ersten Schritte beinhalteten die umfassende Analyse des Kraft/Drehzahlverhältnisses. Antrieb, Welle, Kupplung und ggf. Getriebe wurden in enger Abstimmung mit der Firma EWN entworfen, um eine möglichst platzsparende und einachsige Ausführung zu erreichen.

Für den Antrieb wird ein Axialkolben-Wassermotor verwendet, der ein maximales Antriebsmoment von 25 Nm und eine maximale Antriebsleistung von 32 kW erreicht. Das Axialkolbenprinzip ermöglicht eine leichte und kompakte Bauweise. Wasser dient dabei sowohl als Antriebsmedium als auch als Schmiermittel für die beweglichen Teile. Die Drehzahl des Hydraulikmotors kann über eine Frequenzumrichtung der Pumpeneinheit stufenlos zwischen 300 und 3000 1/min eingestellt werden. Der Zusammenhang zwischen der Schneidleistung (P_S) und der Arbeitsstromdichte (J) für das UW-Elektrokontakttrennen ist in Abbildung 2-1 für Arbeitsspannungen von 40 bis 65 V dargestellt.

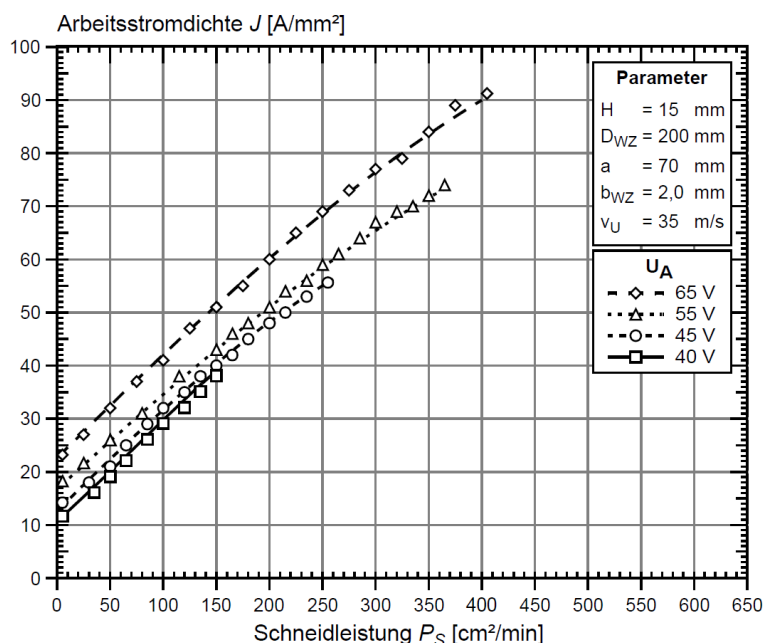


Abbildung 2-1: Zusammenhang zwischen der Schneidleistung und der Arbeitsstromdichte [PHI02]

Ausgehend von Mindestarbeitsstromdichten zwischen 12 A/mm² bei 40 V und 23 A/mm² bei 65 V steigen die Arbeitsstromdichten mit zunehmender Schneidleistung nahezu linear an [PHI02]. Die Schneidleistung wird durch das Arbeitsspannungsniveau der Schneidstromquelle begrenzt. Bei einer Arbeitsspannung von 40 V und einer Schneidleistung von über 150 cm²/min führt der geringe Abstand der Werkzeugelektrode zum Werkstück zu einem Kurzschluss, der den Trennvorgang stoppt. Mit einer Arbeitsspannung von 65 V kann hingegen eine etwa 2,5-fach höhere Schneidleistung erreicht werden, da die entstehenden Kurzlichtbögen stabiler sind und eine höhere Energiedichte aufweisen, wodurch sie auch bei Schneidleistungen über 150 cm²/min sicher freibrennen können. Aufgrund der Konstantspannungscharakteristik der verwendeten Stromquelle tritt zudem der Effekt der inneren Regelung auf: Bei Verkürzung des Lichtbogens oder Verringerung der Lichtbogenlänge steigt der Arbeitsstrom stark an. Die steigende Stromdichte erhöht die Wärmeleistung und somit die Abschmelzgeschwindigkeit, wodurch sich die Lichtbogenlänge bei konstantem Vorschub vergrößert und die Wärmeleistung sinkt. Die Abhängigkeit der

maximal einstellbaren Vorschubgeschwindigkeit vom Abstand (a) zwischen der Werkzeugrotationsachse und der Werkstückoberfläche sowie der Kontaktlinienlänge ist anhand von Stichprobenergebnissen für einen Blechdickenbereich von 12 bis 40 mm und eine Arbeitsspannung (U_A) von 65 V mit einem Elektrodendurchmesser von 200 mm in Abbildung 2-2 dargestellt. Die maximal einstellbare Vorschubgeschwindigkeit entspricht der Trenngeschwindigkeit. Aufgrund der maximalen Vorschubgeschwindigkeit von 4000 mm/min der Anlage können bei einer Arbeitsspannung von 65 V keine sinnvollen Trenngeschwindigkeitsuntersuchungen an dünneren Blechen durchgeführt werden.

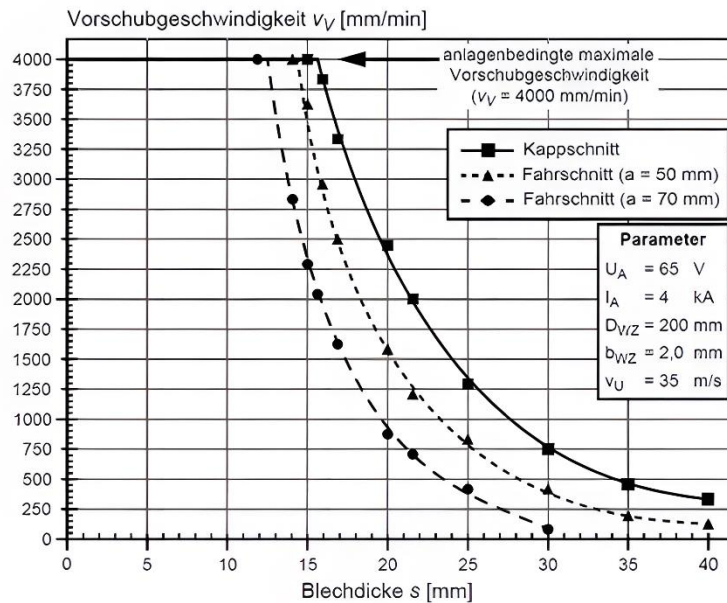


Abbildung 2-2: Zusammenhang zwischen der Vorschubgeschwindigkeit, dem Abstand zwischen der Werkzeugrotationsachse und der Werkstückoberfläche und der Blechdicke [PHI02]

Ausgehend von einer hohen Geschwindigkeit von 4000 mm/min nimmt die Trenngeschwindigkeit mit zunehmender Blechdicke sowohl im Kappschnitt als auch im Fahrschnitt exponentiell ab. Betrachtet man die relative Änderung der Trenngeschwindigkeit zwischen einem Kappschnitt und einem Fahrschnitt mit einem Abstand von 70 mm, so zeigt sich, dass die relative Abnahme der Trenngeschwindigkeit im Blechdickenbereich von 15 bis 20 mm zwischen 42 und 65 % beträgt. Bei einer Blechdicke von 30 mm liegt diese Abnahme bereits bei 87 %. Dies verdeutlicht den starken Einfluss der geometrischen Eingriffsverhältnisse auf die Trenngeschwindigkeit.

In der Weiterentwicklung wurde die Reibleistung einer drehenden Scheibe in ruhendem Wasser als Funktion der Umfangsgeschwindigkeit für verschiedene Scheibendurchmesser berechnet. Diese Berechnungen wurden an den relevanten Leistungsbereich des zu entwickelnden Gerätes angepasst und grafisch dargestellt (siehe Abbildung 2-3).

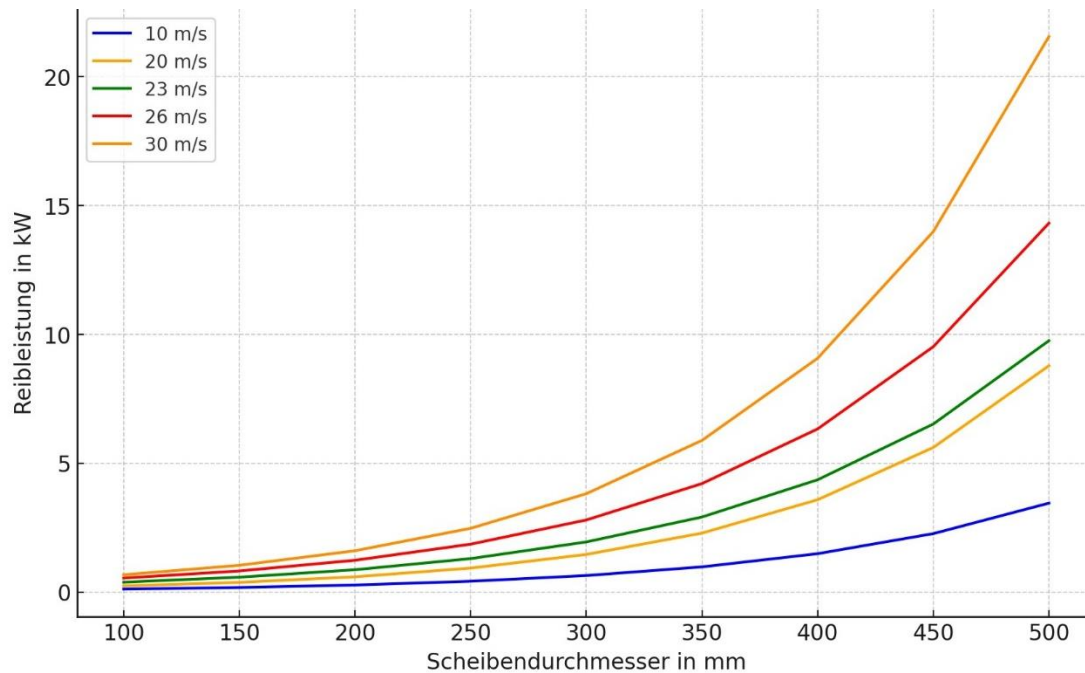


Abbildung 2-3: Reibleistung bei der Rotation von CAMG-Elektroden

Es zeigt sich, dass bei einer Umfangsgeschwindigkeit von 23 m/s und einem Scheibendurchmesser von 450 mm eine Reibleistung von 7 kW erforderlich ist. Unter Berücksichtigung weiterer Reibverluste in Lagern, Dichtungen, Getriebe sowie durch Strömungsverhältnisse im Schneidspalt wird die notwendige Antriebsleistung auf 12 kW festgelegt.

Die Abbildung 2-4 gibt eine Übersicht über die Konstruktion einer CAMG-Anlage in zwei Varianten und die damit verbundenen Herausforderungen. Das Bild zeigt eine schematische Darstellung der Komponenten der CAMG-Anlage, bestehend aus dem Antrieb, der Kupplung, dem Stromübertragungsmodul und der Elektrode. Der gesamte Aufbau der Anlage ist sehr lang, etwa 1000 mm, was zu Platzproblemen führen und die Handhabung der Anlage erschweren kann. Durch die Anordnung der Komponenten in einem Strang wird die Arbeit mit der Anlage zusätzlich erschwert. Dies betrifft vor allem die Bedienung und Wartung, da in der vertikalen Position schwer zugängliche Stellen entstehen können.

Anordnung der Komponenten

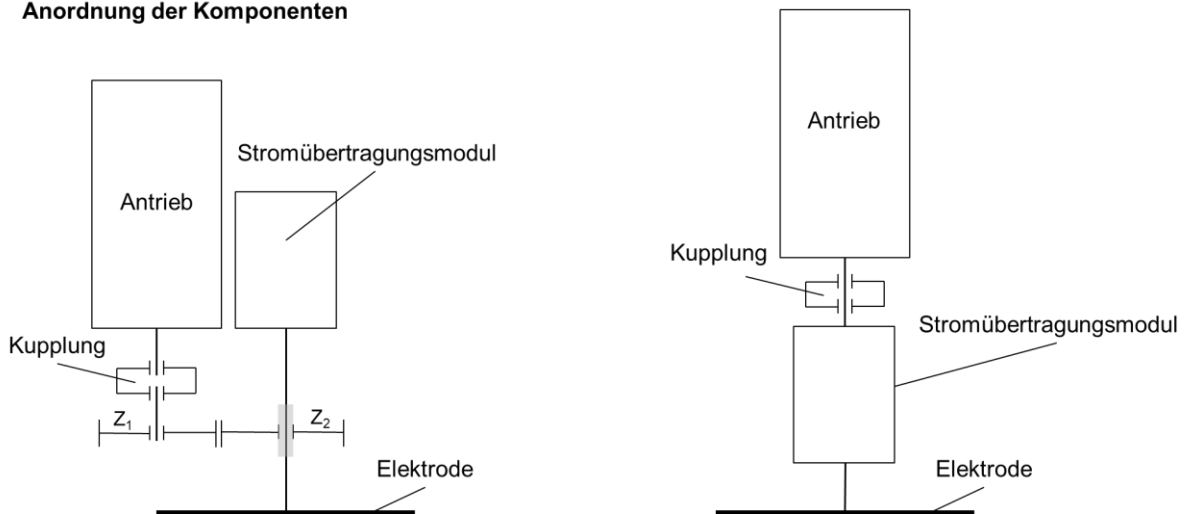


Abbildung 2-4: Schematische Anordnung der Anlagenkomponenten in zwei verschiedenen Varianten

Ein weiteres Problem ist die hohe Last auf der Abtriebswelle, verursacht durch den schweren Antrieb am Ende. Diese Belastung kann zu Verschleiß und möglichen Beschädigungen der Welle führen und somit die Lebensdauer der Anlage verringern. Zudem müssen die Stromanschlüsse seitlich am Stromübertragungsmodul angebracht werden, was die Verkabelung und Installation der Anlage komplizierter macht und zusätzlichen Platz erfordert. Eine Umgestaltung dieser Anordnung könnte die Funktionalität und Wartungsfreundlichkeit der Anlage deutlich verbessern. Der gesamte Aufbau der Anlage wurde auf etwa 500 mm verkürzt. Dies mindert Platzprobleme und erleichtert die Handhabung der Anlage. Durch die seitliche Verbindung von Antrieb und Stromübertragungsmodul wird die Last gleichmäßiger auf die Wellen verteilt. Dies kann den Verschleiß reduzieren und die Lebensdauer der Anlage verlängern.

Die Strom- und Wasseranschlüsse können nun oben am Deckel angebracht werden. Diese Änderung vereinfacht die Verkabelung und Installation der Anlage und erfordert weniger Platz. Allerdings ist das Arbeiten in horizontaler Lage nicht von allen Seiten möglich, was außerdem die Zugänglichkeit und Wartung der Anlage einschränken kann. Auf eine separate Kupplung wird verzichtet, was den Aufbau der Anlage vereinfacht und den Bauraum verkleinert (siehe Abbildung 2-5). Dies führt ebenfalls zu einer Gewichtsreduzierung, was die Handhabung und den Transport der Anlage erleichtert. Anstelle von Zahnrädern wird ein Riementrieb verwendet, was ebenfalls zur Gewichtsreduktion beiträgt. Der Riementrieb hat zudem dämpfende Eigenschaften, die Vibrationen und Stöße absorbieren können. Dies trägt zur Langlebigkeit und Zuverlässigkeit der Anlage bei. Eine Überlastsicherung durch den Riementrieb schützt die Anlage vor Schäden bei unerwarteten Belastungsspitzen. Ein Modell der dritten Variante ist in Abbildung 2-6 dargestellt.

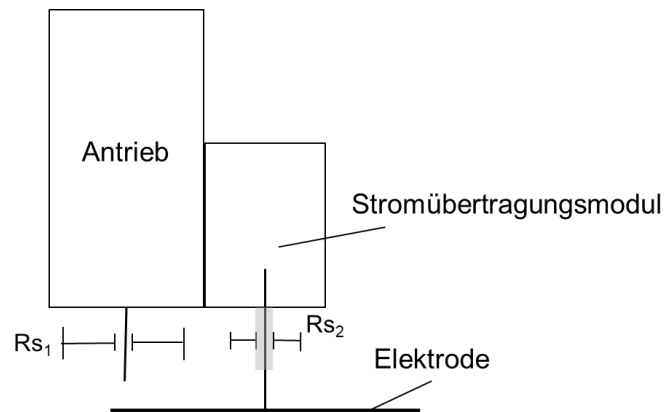


Abbildung 2-5: Dritte Variante der schematischen Anordnung der Anlagenkomponenten

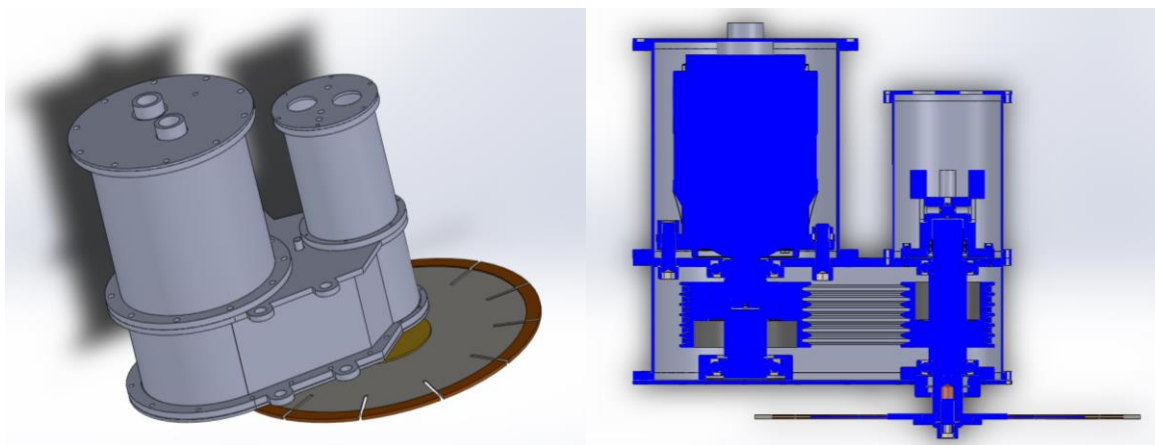


Abbildung 2-6: CAD- Modell der dritten Variante

Ergebnisse

- Durch die präzisen Analysen und die enge Zusammenarbeit mit EWN konnte der Kraftübertragungsstrang effizient und platzsparend dimensioniert werden.
- Die erarbeiteten Grundlagen für die Arbeitspunkte B/3 und B/4 ermöglichten einen reibungslosen Übergang zu diesen Phasen des Projekts.
- Die Auswahl und Beschaffung der notwendigen Komponenten sowie die Fertigung der Sonderbauteile im IW stellten sicher, dass alle Bauteile den spezifischen Anforderungen entsprachen.

2.3 Arbeitspaket B/3: Einzelkomponenten der Stromübertragung

Im Rahmen des Arbeitspakets zur Auslegung, Konstruktion und Aufbau des Stromübertragers konnten die gesetzten Ziele erreicht werden. Der Schwerpunkt dieses Arbeitspaketes lag auf der Entwicklung eines Stromübertragers, der die Energieversorgung an die Schneidscheibe sicherstellen muss. Der Stromübertrager wurde für einen Schneidstrom von bis zu 4000 A ausgelegt und als Flüssigmetallstromübertrager konzipiert.

Ein Dichtungssystem wurde konzipiert, um eine zuverlässige Abdichtung und den Schutz des Stromübertragers zu gewährleisten. Die Integration des Stromübertragers in den

Kraftübertragungsstrang wurde ebenfalls erfolgreich abgeschlossen. Dabei wurden alle Randbedingungen des Belastungsprofils B/2 berücksichtigt, um eine optimale Funktionalität und Sicherheit zu gewährleisten.

Das am UWTH entwickelte Stromübertragungsmodul auf Basis von Quecksilber aus früheren Anlagen erfüllt zwar die Anforderungen, ist der Einsatz zu vermeiden, da die Toxizität des Quecksilbers eine erhebliche Gefahr für Mensch und Umwelt darstellt. Um das erfolgreiche Prinzip der Stromübertragung ohne die Toxizität von Quecksilber zu nutzen, wird ein Material mit ähnlichen Eigenschaften benötigt. Fieldsches Metall, eine Legierung aus Indium, Bismut und Zinn, hat eine Schmelztemperatur von 62°C. Wird das Modul auf diese Temperatur erhitzt, kann der Strom über das flüssige Metall vom Stator auf den Läufer übertragen werden. Da das Gemisch aus drei verschiedenen Elementen besteht, muss die genaue Bestimmung der Leitfähigkeit durch weitere Versuche ermittelt werden.

Eine weitere Möglichkeit zur Nutzung von flüssigem Metall ist die Verwendung von Gallium. Dieses Element hat einen Schmelzpunkt von 29,76°C und einen Siedepunkt von 2403°C. Reines Gallium (Ga) ist für den Menschen nicht toxisch. Der spezifische Widerstand ρ von Gallium ist geringer als der von Quecksilber (siehe Tabelle 2-2)

Tabelle 2-2: Spezifischer Widerstand ausgewählter Stoffe

Material	Temperatur	Widerstand [$10^{-6} \Omega\text{m}$]
Hg	RT	0,96
Ga	RT	0,26
Ga	100 °C	0,27

Bei der Konstruktion ist zu beachten, dass Gallium eine Volumenänderung vom festen zum flüssigen Zustand von 5,907 auf 6,095 g/cm³ aufweist. Das Merkblatt Nr. 1488 aus dem Handbuch der gefährlichen Güter, Transport und Gefahrenklassen klassifiziert Gallium in Klasse 8, Code 10. Das bedeutet, dass Gallium zu den ätzenden Stoffen ohne zusätzliche Gefahren gehört. Stoffe dieser Klasse wirken chemisch auf Haut oder Schleimhäute ein. Daher muss das Stromübertragungsmodul deutlich mit dem entsprechenden Gefahrensymbol gekennzeichnet werden.

Die Kurve in Abbildung 2-7 zeigt, dass die Änderung des spezifischen Widerstandes in Abhängigkeit der Temperatur dp/dT bei 30°C bis zu einem Maximum bei etwa 90°C ansteigt und danach abfällt. Das heißt, dass der Widerstand ab 90°C langsamer ansteigt. Man kann daraus ablesen, dass bis zu der Temperatur von 200 °C eine ungefähre Widerstandszunahme von etwa $20 \cdot 10^3 \mu\Omega\text{cm}/^\circ\text{C}$ besteht. Das Modul wird die Temperatur von 200 °C nicht erreichen, aber als Obergrenze kann dieser Wert zur Berechnung angenommen werden.

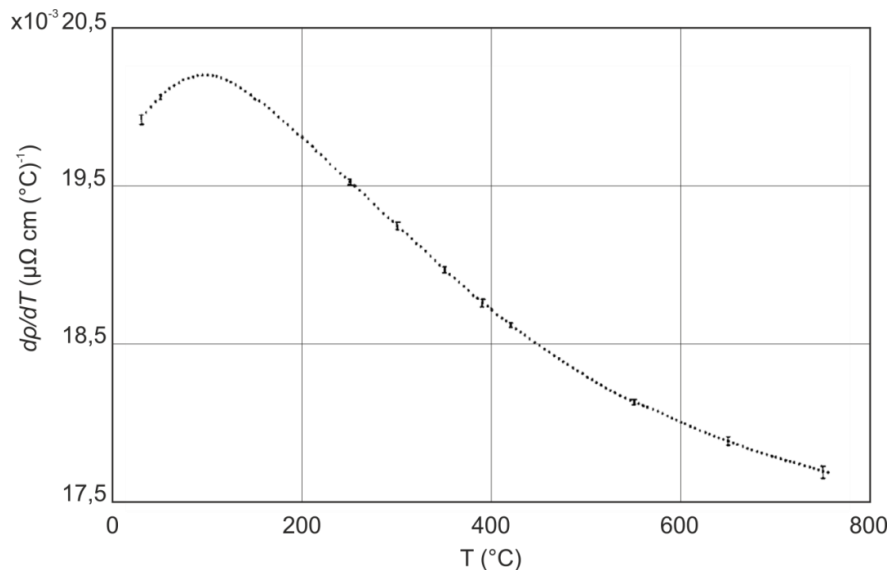


Abbildung 2-7: Temperaturabhängiger elektrischer Widerstand von Gallium

$$\frac{d\rho}{dT} \text{ in } \frac{\Omega m}{^{\circ}C} \text{ ausgedrückt: } 20 \cdot 10^{-3} \frac{\mu\Omega cm}{^{\circ}C} = 0,0002 \cdot 10^{-6} \frac{\Omega m}{^{\circ}C} \quad \text{Gl. (3.3)}$$

Um mit Hilfe des aus dem Diagramm abgelesenen Wertes den spezifischen Widerstand bei 200 °C zu bestimmen, wird eine Integration durchgeführt:

$$\rho_{Ga_1} = \int_{T_S}^{T_{200}} \frac{d\rho}{dT} dT \quad \text{Gl. (3.4)}$$

Das Integral wird nicht analytisch berechnet, sondern mit Hilfe der Obersumme überschlägig bestimmt:

$$\rho_{Ga_1} = \frac{d\rho}{dT} * (T_{200} - T_S) \quad \text{Gl. (3.5)}$$

$$\rho_{Ga_1} = 0,0002 \cdot 10^{-6} \frac{\Omega m}{^{\circ}C} * (200 - 29,78) ^{\circ}C$$

$$\rho_{Ga_1} = 0,034 \cdot 10^{-6} \Omega m$$

$$\rho_{Ga}(200 ^{\circ}C): \rho_{Ga}(T_{200}) = \rho_{Ga}(T_S) + \rho_{Ga_1} \quad \text{Gl. (3.6)}$$

$$\rho_{Ga}(T_{200}) = (0,259 + 0,034) \cdot 10^{-6} \Omega m$$

$$\rho_{Ga}(T_{200}) = 0,293 \cdot 10^{-6} \Omega m$$

Der Wert $\rho_{Ga} = 0,293 \cdot 10^{-6} \Omega m$ wird als maximaler spezifischer Widerstand für weitere Berechnungen angenommen.

Anpassung der notwendigen Übertragungsfläche:

In Voruntersuchungen wurde ermittelt, dass für die konstruktive Auslegung, unter Berücksichtigung eines genügenden Sicherheitsfaktors (Faktor 6,7), eine Stromdichte von 75 A/cm² mit Hg zulässig ist. Bei Gallium vermindert sich der Widerstand um das 3,5-fache, sodass die Stromdichte um das 3,5-fache vergrößert, respektive die Übertragungsfläche verkleinert werden kann.

$$A = \frac{I}{3,5 * J} \quad \text{Gl. (3.7)}$$

$$A = \frac{4000 A}{3,5 * 75 \frac{A}{cm^2}}$$

$$A = 15,24 cm^2$$

Der elektrische Widerstand der Galliumschicht berechnet sich wie folgt:

Der mit Gallium gefüllte Spalt wird die gleiche Dicke von 0,5 mm haben wie die aus der Versuchsanordnung mit Quecksilber. l beschreibt dabei die Dicke der Galliumschicht.

$$R_{Ga} = \rho_{Ga} * \frac{l}{A} \quad \text{Gl. (3.8)}$$

$$R_{Ga} = 0,293 * 10^{-6} \Omega m * \frac{0,5 * 10^{-3} m}{15,24 * 10^{-4} m^2}$$

$$R_{Ga} = 0,0096 * 10^{-6} \Omega$$

Wenn Strom durch einen Widerstand fließt und Spannung daran abfällt, wird elektrische Leistung in Wärmeleistung umgesetzt.

$$P_Q = I^2 * R_{Ga} \quad \text{Gl. (3.9)}$$

$$P_Q = (4000 A)^2 * 0,0096 * 10^{-6} \Omega$$

$$P_Q = 0,154 W$$

Der Strom wird nur über die Mantelfläche geleitet $A = A_M$

Durchmesser der Galliummantelinnenfläche $d = 3 cm$

Berechnung der Höhe der Galliumzylindermantelfläche h_z

Mantelfläche: $A_M = \pi * D * h_z$

$$h_z = \frac{A_M}{\pi * d} \quad \text{Gl. (3.10)}$$

$$h_z = \frac{15,24 cm^2}{\pi * 3 cm}$$

$$h_z = 1,62 cm$$

Berechnung des benötigten Volumens

$$V = h_z * \pi * \frac{(d + 2l)^2 - d^2}{4} \quad \text{Gl. (3.11)}$$

$$V = 16,2 mm * \pi * \frac{(30 mm + 1 mm)^2 - (30 mm)^2}{4}$$

$$V = 775,8 mm^3$$

Berechnung der Masse an flüssigem Gallium

Dichte flüssig: 6,095 g/cm³ bei 29,76°C und 1 bar

$$m = V * \rho \quad \text{Gl. (3.12)}$$

$$m = 7,758 \text{ cm}^3 * 6,095 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

$$m = 47,28 \text{ g}$$

Es sind etwa 47 g Gallium erforderlich. Um das Gallium in den flüssigen Zustand zu überführen, wird eine Vorrichtung benötigt, die Wärme in das Stromübertragungsmodul einbringt. Es genügt, das Modul auf 50 °C aufzuheizen. Die Volumenkontraktion muss kompensiert werden. Wegen der geringen Höhe von nur 1,62 cm ist es möglich, zwei oder mehr dieser Übertragungsmodule übereinander zu konstruieren. Dies hat den Vorteil, dass weniger innere Wärme entsteht, da die Stromdichte geringer wird. Gallium bietet zahlreiche Vorteile für verschiedene Anwendungen, insbesondere aufgrund seiner einzigartigen physikalischen und chemischen Eigenschaften.

- Nicht toxisch: Gallium gilt als nicht toxisch, was es zu einer sichereren Alternative zu anderen Metallen wie Quecksilber macht. Dies ist besonders wichtig in Anwendungen, bei denen Umwelt- und Gesundheitsaspekte von großer Bedeutung sind.
- Siedet und verdampft langsamer: Gallium hat einen höheren Siedepunkt und verdampft langsamer als viele andere Metalle. Dies macht es besonders nützlich in Hochtemperaturanwendungen, bei denen eine stabile und langanhaltende Metallphase benötigt wird.
- Bessere Leitfähigkeit: Die elektrische Leitfähigkeit von Gallium ist gut. Dies macht es ideal für den Einsatz in elektronischen Komponenten und als leitfähiges Material in verschiedenen Technologien.
- Günstiger: Im Vergleich zu anderen seltenen und spezialisierten Metallen ist Gallium relativ günstig. Dies kann zu Kosteneinsparungen in der Produktion und bei der Materialbeschaffung führen.
- Reizende Wirkung auf der Haut möglich: Obwohl Gallium im Allgemeinen als sicher gilt, kann es bei Kontakt mit der Haut reizende Wirkungen hervorrufen. Es ist daher wichtig, bei der Handhabung von Gallium geeignete Schutzmaßnahmen zu treffen.
- Flüssig ab 29,76 °C: Gallium wird bei Temperaturen über 29,76 °C flüssig, was seine Verarbeitung und Anwendung in verschiedenen technologischen Prozessen erleichtert. Diese niedrige Schmelztemperatur macht es besonders nützlich in Legierungen und als Kühlmittel.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Gallium aufgrund seiner nicht toxischen Natur, besseren Leitfähigkeit, Kostenwirksamkeit und einzigartigen physikalischen Eigenschaften eine attraktive Option für viele industrielle und technologische Anwendungen darstellt. Ein weiterer Werkstoff, der für diesen Anwendungsfall in Betracht gezogen werden kann ist Galinstan. Galinstan ist eine Legierung, die aus Gallium (68,5 %), Indium (21,5 %) und Zinn (10 %) besteht. Diese metallische Verbindung ist in den letzten Jahren aufgrund ihrer bemerkenswerten Eigenschaften und Vorteile gegenüber reinem Gallium in verschiedenen technologischen und industriellen Anwendungen zunehmend beliebt geworden.

- **Niedriger Schmelzpunkt:** Galinstan hat einen Schmelzpunkt von -19 °C , was deutlich niedriger als der Schmelzpunkt von reinem Gallium ($29,76\text{ °C}$) ist. Dies bedeutet, dass Galinstan bei Raumtemperatur flüssig ist, während Gallium einen festen Aggregatzustand einnimmt. Diese Eigenschaft macht Galinstan besonders geeignet für Anwendungen, bei denen niedrige Arbeitstemperaturen erforderlich sind.
- **Hohe Wärmeleitfähigkeit:** Galinstan zeichnet sich durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit aus, die es zu einem hervorragenden Kühlmittel in thermischen Managementsystemen macht. Es kann effizient Wärme ableiten und ist daher in der Elektronik- und Computerindustrie als Alternative zu herkömmlichen Kühlmitteln wie Wasser oder Öl attraktiv.
- **Geringe Viskosität:** Die Legierung hat eine geringe Viskosität, was sie in flüssigem Zustand leicht fließend macht. Dies erleichtert die Handhabung und Anwendung in verschiedenen industriellen Prozessen, insbesondere in der Fertigung von Mikrochips und elektronischen Bauteilen.
- **Korrosionsbeständigkeit:** Galinstan zeigt eine ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit, insbesondere gegenüber Luft und vielen chemischen Substanzen. Dies verleiht der Legierung eine längere Lebensdauer und Zuverlässigkeit in Anwendungen, die eine stabile und widerstandsfähige Materialeigenschaft erfordern.
- **Stabilität und Oxidationsbeständigkeit:** Während Gallium zur Bildung von Oxidschichten neigt, die seine Eigenschaften beeinträchtigen können, bleibt Galinstan über längere Zeiträume stabil und zeigt eine geringere Neigung zur Oxidation. Dies macht es für Anwendungen in der Elektronik, wo Oxidbildung problematisch sein kann, besonders wertvoll.
- **Umweltfreundlichkeit:** Galinstan ist im Gegensatz zu einigen anderen Metallen und Legierungen, die giftige Bestandteile enthalten können, weitgehend ungiftig und umweltfreundlich. Dies ermöglicht seine Verwendung in Bereichen, die hohe Sicherheits- und Umweltstandards erfordern, wie beispielsweise in der Medizintechnik.
- **Nicht-toxisch und Biokompatibilität:** Die Legierung ist ungiftig und biokompatibel, was ihre Anwendung in medizinischen Geräten und Implantaten ermöglicht. Im Vergleich zu Gallium, das in reiner Form potenziell gesundheitsschädlich sein kann, bietet Galinstan eine sicherere Alternative.

Für den Stromübertrager wird Galinstan ausgewählt, da es zahlreiche Vorteile bietet. Durch seinen niedrigen Schmelzpunkt von etwa -19 °C bleibt Galinstan bei Raumtemperatur flüssig, was den Einbau einer Heizung unnötig macht. Darüber hinaus zeichnet sich Galinstan durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit, geringe Viskosität und ausgezeichnete Korrosionsbeständigkeit aus. Im Vergleich zu Gallium ist Galinstan stabiler, neigt weniger zur Oxidation und ist umweltfreundlicher sowie biokompatibel.

Abbildung 2-8 zeigt die stromführenden Bauteile. Die Kabel werden mittels Kabelschuhen an den Anschlüssen des Stromübertragers verschraubt. Dieser leitet die Energie über das zuvor

diskutierte Flüssigmetall auf die Welle aus Kupfer. An deren Ende ist die Elektrode befestigt, welche den Stromkreis zum Werkstück schließt.

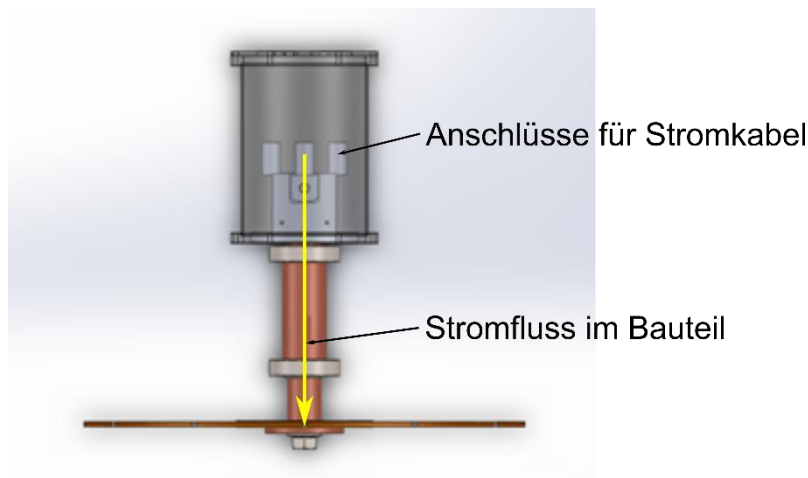


Abbildung 2-8: Ausschnitt aller stromführenden Komponenten aus dem CAD Modell

Ergebnisse

- Der Stromübertrager wurde auf einen maximalen Schneidstrom von 4000 A ausgelegt und als Flüssigmetallstromübertrager mit Galinstan realisiert.
- Untersuchungen zeigten, dass verschiedene Kupferlegierungen im permanenten Kontakt mit Galinstan stabil sind und Diffusionsprozesse kontrolliert werden können.
- Ein effektives Dichtungssystem wurde konzipiert, um eine sichere Integration des Stromübertragers in den Kraftübertragungsstrang zu ermöglichen.

2.4 Arbeitspaket B/4: Schnellverschlussystem

Im Rahmen des Arbeitspakets wurde der Fokus auf die Optimierung des Spannsystems für die Schneidscheiben gelegt, um deren Austausch im Rückbauprozess zu vereinfachen. Ziel war es, die Rüst- und Nebenzeiten zu minimieren und somit die Effizienz im Rückbau zu steigern. Eine umfassende Recherche der am Markt verfügbaren Spannsysteme wurde durchgeführt. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Identifizierung von Systemen, die den Anforderungen des CAMG-Prozesses entsprechen. Die Analyse umfasste sowohl innovative Schnellwechsellösungen als auch etablierte Standardtechniken. Ein Schnellspannsystem für den Elektrodenwechsel in einer Anlage bietet zahlreiche Vorteile, insbesondere für den Mitarbeiter, der diese Aufgabe manuell durchführen muss.

- Zeitersparnis: Ein wesentliches Merkmal eines Schnellspannsystems ist die drastische Reduzierung der Zeit, die für den Wechsel der Elektrode benötigt wird. Im Vergleich zu herkömmlichen Methoden, die oft mehrere Werkzeuge und viele Handgriffe erfordern, ermöglicht ein Schnellspannsystem einen schnellen und unkomplizierten Wechsel, was die Produktivität steigert und Ausfallzeiten minimiert.
- Erhöhte Sicherheit: Das Schnellspannsystem reduziert das Risiko von Verletzungen erheblich. Ein schneller Elektrodenwechsel kann gefährlich sein, da sie oft den Einsatz von Werkzeugen und das Arbeiten in unergonomischen Positionen erfordern. Mit einem

Schnellspannsystem wird der Prozess sicherer, da weniger komplexe Handgriffe notwendig sind und keine schweren Werkzeuge benötigt werden.

- Einfache Handhabung: Ein Schnellspannsystem ist intuitiv und einfach zu bedienen, was weniger Schulungen und Einweisungen erfordert. Auch Mitarbeiter mit geringer technischer Erfahrung können das System problemlos nutzen.
- Verbesserte Präzision: Das System stellt sicher, dass die Elektrode stets korrekt und fest eingespannt ist. Dies verbessert die Präzision und Qualität der Arbeit, da die Elektrode stabil und in der optimalen Position gehalten wird. Fehler durch unzureichend befestigte Elektroden werden somit minimiert.
- Reduzierter Verschleiß: Durch die einfache und sichere Handhabung des Schnellspannsystems wird der Verschleiß an den Elektroden und den Spannmechanismen reduziert. Dies führt zu einer längeren Lebensdauer der Komponenten und senkt die Wartungs- und Ersatzteilkosten.

Zusammengefasst bietet ein Schnellspannsystem (siehe Abbildung 2-9) für den Elektrodenwechsel in einer Anlage erhebliche Vorteile für den Mitarbeiter. Es verbessert die Effizienz, Sicherheit und Ergonomie, was zu einer insgesamt höheren Produktivität führt.

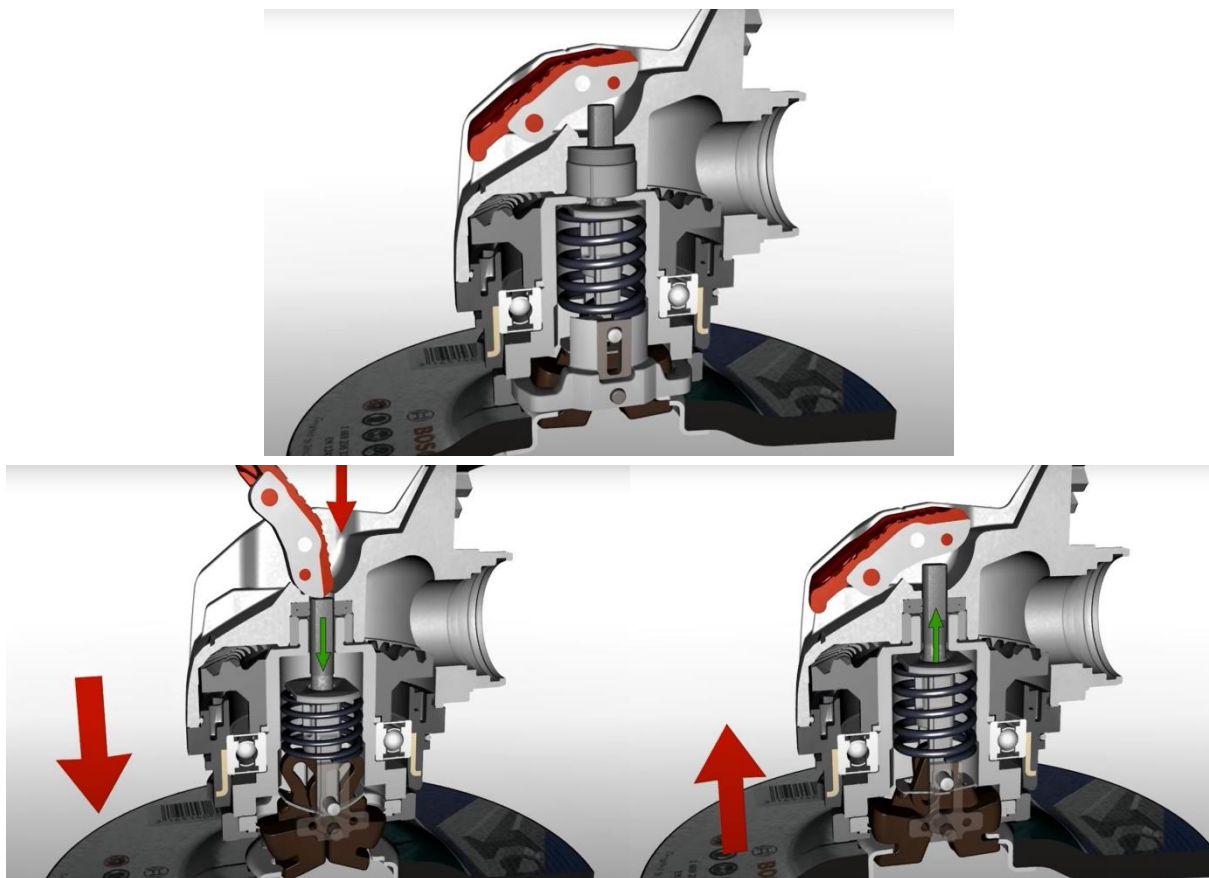


Abbildung 2-9: Schnellspannsystem für Arbeiten mit einer Flex [COR19]

Obwohl Schnellspannsysteme viele Vorteile bieten, gibt es auch einige Nachteile, die berücksichtigt werden sollten:

- **Höhere Anschaffungskosten:** Schnellspannsysteme können in der Anschaffung teurer sein als herkömmliche Spannsysteme. Diese höheren Kosten können durch die eingesparte Zeit und geringere Ausfallzeiten kompensiert werden, müssen aber initial berücksichtigt werden.
- **Komplexität der Mechanik:** Die Mechanik eines Schnellspannsystems ist oft komplexer als die herkömmlichen Systeme. Dies kann zu höheren Wartungsanforderungen und möglichen Ausfallrisiken führen, wenn das System nicht regelmäßig überprüft und gewartet wird. Insbesondere in verschmutzter Umgebung können sich hier Partikel festsetzen.
- **Eingeschränkte Kompatibilität:** Schnellspannsysteme sind möglicherweise nicht mit allen bestehenden Anlagen und Werkzeugen kompatibel. Dies kann zusätzliche Kosten für Anpassungen oder den Austausch von Komponenten zur Folge haben.
- **Anfälligkeit für Verschleiß:** Schnellspannsysteme, die regelmäßig intensiv genutzt werden, können anfälliger für Verschleiß und Beschädigungen sein, insbesondere wenn sie nicht ordnungsgemäß gewartet werden. Dies kann die langfristigen Wartungs- und Reparaturkosten erhöhen.

Zusammengefasst bieten Schnellspannsysteme Vorteile in Bezug auf Effizienz und Sicherheit, dem gegenüber stehen die Nachteile wie höhere Anschaffungskosten, komplexere Mechanik und mögliche Kompatibilitätsprobleme und müssen sorgfältig abgewogen werden. Obwohl Schnellspannsysteme viele Vorteile bieten, kann es in bestimmten Fällen sinnvoll sein, sich gegen deren Einsatz zu entscheiden. Ein wesentlicher technischer Grund ist die notwendige Reduzierung des Durchmessers der stromleitenden Welle in der CAMG-Anlage, die erhebliche Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit und Effizienz des Systems haben kann. Ein Schnellspannsystem erfordert eine Reduzierung des Durchmessers der stromleitenden Welle, um den Schnellspannmechanismus zu integrieren. Diese Verkleinerung kann die Fähigkeit der Welle, elektrischen Strom effizient zu leiten, erheblich beeinträchtigen. Ein kleinerer Durchmesser bedeutet einen höheren elektrischen Widerstand, was zu einer erhöhten Wärmeentwicklung und potenziellen Überhitzung führen kann. Dies kann die Lebensdauer der Welle und des gesamten Systems negativ beeinflussen und die Notwendigkeit häufiger Wartungen und Reparaturen erhöhen. Dies kann dazu führen, dass die Anlage nicht mehr ihre optimale Leistung erreicht, was die Effizienz und Produktivität reduziert. Ein nicht optimaler Stromfluss kann zudem die Qualität des Schneidprozesses beeinträchtigen, was zu ungenauem oder unvollständigem Trennen führen kann. Um den negativen Auswirkungen eines reduzierten Wellendurchmessers entgegenzuwirken, müsste ein größerer Wellendurchmesser gewählt werden. Dies führt zu anderen Problemen wie Platzmangel, Gewichtssteigerung oder die Reduktion der Handhabung. Schnellspannsysteme sind oft komplexer und erfordern eine regelmäßige Wartung, um sicherzustellen, dass alle Komponenten einwandfrei funktionieren. Die Integration eines Schnellspannsystems kann daher die Wartungsanforderungen erhöhen. Für Anlagen, die auf einfache und robuste Lösungen angewiesen sind, ist diese zusätzliche Komplexität unerwünscht. Obwohl Schnellspannsysteme die Wechselzeiten verkürzen und die Effizienz erhöhen können,

müssen die potenziellen Nachteile wie erhöhte Anschaffungskosten, komplexere Mechanik und die Notwendigkeit eines größeren Wellendurchmessers sorgfältig abgewogen werden. In diesem Fall ist eine herkömmliche Lösung mit einer durchgängigen Welle und geringeren Wartungsanforderungen wirtschaftlicher und praktischer.

Ergebnisse:

- Die durchgeführte Marktrecherche und Analyse führten zur Auswahl eines geeigneten Befestigungssystems der Schneidscheibe.
- Die Integration der Technik in den Prototyp verlief erfolgreich und zeigte, dass die Schneidscheiben mit minimalem Aufwand gewechselt werden können.
- Durch die Abstimmungen mit EWN konnte eine klare Strategie für die Befestigung des Gerätes am Manipulator entwickelt werden.

2.5 Arbeitspaket B/5: Aufbau und Inbetriebnahme des Prototyps

Im Arbeitspaket B/5 wurden die Einzelkomponenten für die Anlage gefertigt und zusammengebaut. Durch die intensive Zusammenarbeit konnte die Planung und Entwicklung des Geräts erfolgreich umgesetzt werden und im Rahmen des Projekts zur Entwicklung und Optimierung der CAMG-Schneideinrichtung ein großer Teil beigetragen werden.

Fertigung und Montage der Einzelkomponenten

Die Einzelkomponenten der Schneideinrichtung wurden planmäßig montiert und Tests unterzogen. Die Begleitung durch die Beratung von EWN stellte sicher, dass das System kontinuierlich hinsichtlich seiner Funktionalität und Leistungsfähigkeit überprüft und optimiert wurde. Die Fertigung der selbst entwickelten Bauteile erfolgte in der Werkstatt des UWTH unter Einsatz verschiedener moderner Fertigungstechniken. Die Bauteile wurden durch Drehen, Fräsen, Wasserstrahlschneiden und Schweißen präzise hergestellt.

Für die Gehäusteile wurde nichtrostender Edelstahl verwendet. Der Werkstoff 1.4571 ist ein austenitischer Edelstahl, der sich durch seine hervorragende Korrosionsbeständigkeit und hohe Festigkeit auszeichnet. Er enthält zusätzlich zu den Hauptbestandteilen Chrom und Nickel auch Molybdän und Titan. Das Molybdän erhöht die Beständigkeit gegen Lochfraß und Spaltkorrosion, während das Titan als Stabilisator wirkt und die Sensibilisierung des Materials gegen interkristalline Korrosion verhindert. Aufgrund seiner hohen Beständigkeit gegen aggressive Umgebungen wird 1.4571 häufig in der chemischen Industrie, im Anlagenbau sowie im maritimen Bereich eingesetzt. Zudem eignet sich dieser Edelstahl sehr gut für Anwendungen, bei denen hohe Anforderungen an die Schweißbarkeit gestellt werden. Die Fertigung der Gehäuseteile ist in Abbildung 2-10 dargestellt.

Die stromführenden Teile wie der Stromübertrager (siehe Abbildung 2-10) und die Welle hingegen wurden aus Kupfer gefertigt, das aufgrund seiner exzellenten Leitfähigkeit optimale Voraussetzungen für eine effiziente Stromübertragung bietet. Diese Eigenschaft macht Kupfer ideal für den Einsatz in elektrischen Leitern, Kabeln, Schaltkreisen und anderen Komponenten, bei denen eine effiziente Stromübertragung von entscheidender Bedeutung ist. Darüber

hinaus bietet Kupfer eine gute Wärmeleitfähigkeit, um entstehende Wärme schnell abzuleiten und somit die Überhitzung von Bauteilen zu verhindern. Kupfer ist zudem gut formbar und kann präzise bearbeitet werden, was eine hohe Fertigungsqualität ermöglicht. Seine Korrosionsbeständigkeit und Langlebigkeit sorgen dafür, dass Kupferbauteile selbst unter anspruchsvollen Bedingungen zuverlässig funktionieren.



Abbildung 2-10: Schweißungen für die Gehäuseteile (links), spanende Fertigung des Stromübertragungsmoduls (rechts)

Die Montage konnte entsprechend der drei Module erfolgen. Diese bestehen aus dem Bereich der Antriebseinheit, in dem die Pumpe integriert ist und die Hydraulikleitungen angeschlossen sind. Der Arbeitsstrom wird über Stromkabel in das Stromübertragungsmodul eingebracht. Zur Verbindung der Antriebsachse und der stromführenden Welle wird im dritten Bereich ein Riemenantrieb benutzt. Eine nähere Beschreibung der Bereiche und deren Auslegung befindet sich in den Kapiteln 2.1 bis 2.4. Abbildung 2-11 zeigt das zusammengebaute Gerät.

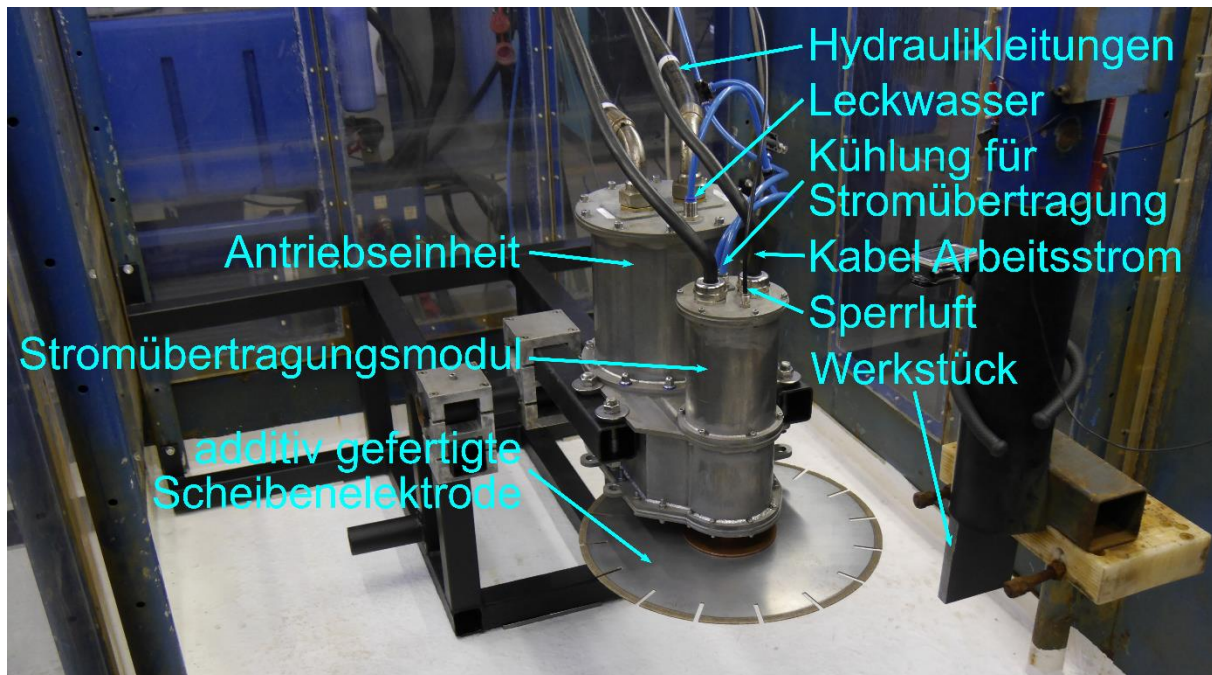


Abbildung 2-11: Montierter Prototyp im Versuchsbecken

Inbetriebnahme und Testphase

Nach der erfolgreichen Montage wurde die CAMG-Schneideinrichtung in einem speziell vorbereiteten Versuchsbecken installiert und in Betrieb genommen. In dieser Phase wurden die wesentlichen Grundfunktionen des Systems umfassend getestet. Dies umfasste insbesondere die Strom- und Kraftübertragung auf die Schneidescheibe sowie die Dichtheit der Flüssigmetalleinheit sowie der Gehäusekomponenten. Alle Tests verliefen erfolgreich und bestätigten die Funktionsfähigkeit des Systems. In Testschritten wurden erste Probeschnitte durchgeführt. Diese Tests zeigten, dass das System auch unter anspruchsvollen Bedingungen zuverlässig arbeitet. Alle gesteckten Ziele, insbesondere die Erreichung einer TRL > 7, wurden erreicht. Die Ergebnisse der Tests und der Optimierungsprozess tragen wesentlich zum Erreichen der übergeordneten Projektziele bei.

2.6 Arbeitspaket B/6: Experimentelle Untersuchungen zur Evaluierung des Prototypens

Der Prototyp wird in diesem Arbeitspaket für Schneidversuche an Mock-ups, die den realen Einsatz in einem Kernkraftwerk darstellen sollen, genutzt. Dazu wurde das Manipulatorsystem in einem Testbecken genutzt. Die Schneidversuche dienen dazu die wichtigsten Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit und Robustheit dieser Technologie zu liefern. Zunächst wurde in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner EWN im Rahmen eines Workshops spezifische Werkstoffe und Bauteilgeometrien definiert, die als Mock-ups dienen sollen. Die Fertigung von 4 Geometrien in Anlehnung an ein Kernmantelsegment, ein UKG-Segment, ein Kassettenkorbsegment und Rohre fand bei EWN statt. Beispiele sind in Abbildung 2-12 dargestellt.



Abbildung 2-12: Mock-ups zur Darstellung von Rohrstücken (links) und Kassettenkorbsegmenten (rechts)

Zur Durchführung der Schneidversuche wurde eine modifizierte UP-Stromquelle mit einer Kapazität von bis zu 1400 A genutzt. Die Wasserversorgung für den Maschinenantrieb wurde über eine Hydraulikeinheit realisiert. Beides befindet sich außerhalb des Beckens und kann manuell eingestellt und bedient werden, was einen individuellen Betrieb und die zuverlässige Durchführung der Tests ermöglichten. Die für die Untersuchungen benötigten Schneidescheiben wurden basierend auf den Erkenntnissen aus dem Komplex A gefertigt.

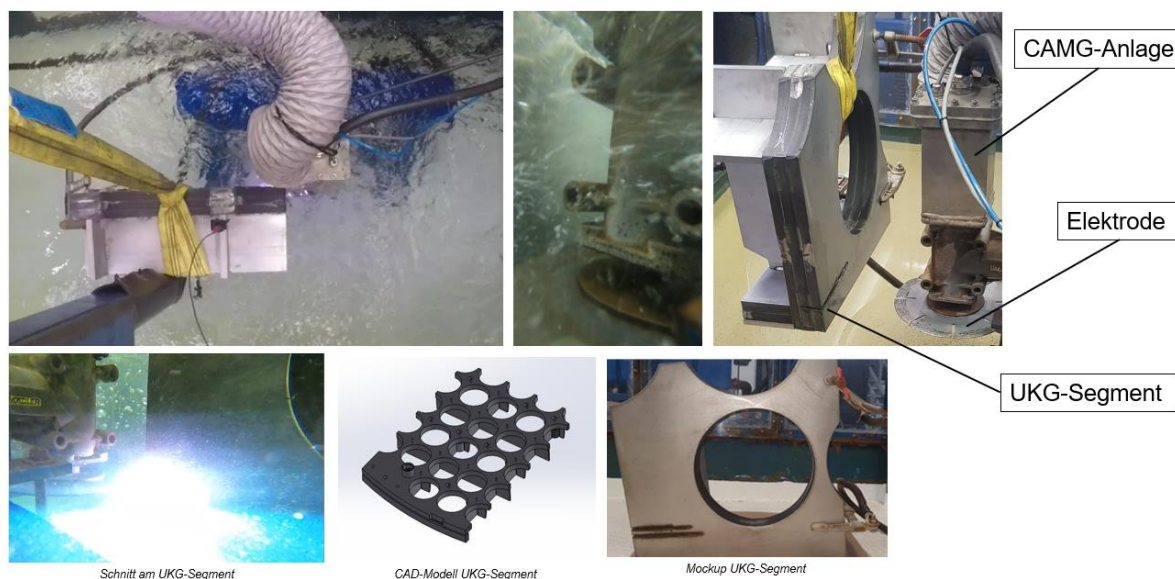


Abbildung 2-13: Trennversuche an Mock-ups

Zum sicheren Trennen von komplizierten Bauteilgeometrien und Werkstoffpaarungen mussten zunächst Parameterstudien durchgeführt werden um die optimale Leistung sowie den Vorschub wählen zu können. Der Vorschub beträgt ca. 200 mm/min und wurde je nach Lichtbogenausbildung vom Mitarbeiter nachgeregelt. Durch die Verwendung einer automatischen Regelung kann der Vorschub gesteigert werden, da über die Strom- und Spannungsmessungen verlässliche Regelparameter erzeugt werden können. Der Prozess und vor allem auftretende Abweichungen wie Nebenlichtbögen und Kurzschlüsse wurden dokumentiert und deren Auswirkungen auf die technischen Komponenten analysiert.

Der Verschleiß an der Elektrode nimmt mit zunehmender Eingriffstiefe durch die Entstehung von Nebenlichtbögen erheblich zu. Diese Nebenlichtbögen führen zu einer verstärkten Abnutzung der Elektrode, was die Effizienz und Lebensdauer des Schneidwerkzeugs negativ beeinflusst. Aus diesem Grund ist es entscheidend, im Randbereich der Elektrode eine Verdickung aufzubringen. Diese Maßnahme hilft, den Verschleiß zu minimieren und die Standzeit der Elektrode zu verlängern. Ebenso ist die Auswahl des richtigen Schneidwerkstoffs von großer Bedeutung, um den Einfluss der Nebenlichtbögen zu reduzieren und optimale Schnittergebnisse zu erzielen (siehe hierzu Komplex A)

Wasserstoff kann bei thermischen Trennverfahren, wie dem Schneiden, Schweißen oder Brennschneiden, hauptsächlich durch die thermische Zersetzung von wasserstoffhaltigen Substanzen entstehen. Beim Erhitzen von Werkstoffen, die Feuchtigkeit enthalten oder sich diese an der Oberfläche befindet, kann Wasserstoff entstehen. Dies geschieht durch Verdampfen des Wassers, welches sich bei hohen Temperaturen in seine Bestandteile, Wasserstoff und Sauerstoff, zersetzt. Dieser Prozess kann insbesondere dann auftreten, wenn Materialien erhitzt werden, die nicht vollständig trocken sind oder wenn sich diese unter Wasser befinden.

Das Messen der Wasserstoffkonzentration am Arbeitsplatz ist von entscheidender Bedeutung, da Wasserstoff ein farb- und geruchloses Gas ist, das in hohen Konzentrationen eine ernsthafte Gefahr darstellen kann. Wasserstoff ist leicht entzündlich und kann, wenn es sich in bestimmten Konzentrationen in der Luft ansammelt, explosive Gemische bilden. Ein unkontrollierter Anstieg der Wasserstoffkonzentration kann daher zu Explosionen oder Bränden führen, die eine unmittelbare Gefahr für das Leben und die Gesundheit der Mitarbeiter darstellen. Um die Sicherheit der Mitarbeiter zu gewährleisten, arbeitet EWN mit dem Messgerät X-am 5000 von Dräger.



Abbildung 2-14:
H2-Messgerät

Das Messgerät X-am 5000 von Dräger wird zur Überwachung der unteren Explosionsgrenze (UEG) von Methan und Wasserstoff eingesetzt. Es ist in der Lage, Methan bis zu einer Konzentration von 4,4 Vol.% und Wasserstoff bis zu 4 Vol.% zuverlässig zu detektieren. Da beide Gase potenziell explosionsgefährlich sind, ist eine sofortige Absaugung notwendig, sobald diese Gase vom Gerät erkannt werden.

Mit diesem Gerät kann die gleiche Messmethode wie im Kraftwerk zur Überwachung der Gaszusammensetzung an der Wasseroberfläche verwendet werden und damit ein realitätsnaher Versuchsaufbau erzeugt werden. Diese erprobte und zuverlässige Messmethode soll in Zukunft bei EWN auch für des CAMG-Verfahrens angewendet werden. Eine Erweiterung der Vorprüfunterlagen zur Zulassung dieses Verfahrens ist daher erforderlich, um die Sicherheit und Effizienz des Messsystems bei der Überwachung von Methan- und Wasserstoffkonzentrationen zu gewährleisten. Diese Erweiterung trägt dazu bei, das Verfahren offiziell zu genehmigen und in den regulären Betrieb zu integrieren und damit den TRL weiter zu steigern.

2.7 Arbeitspaket B/7: Experimentelle Untersuchungen zum Schneidverhalten der Scheiben aus Komplex A

In diesem Arbeitspaket wurden die Ergebnisse des wissenschaftlichen Mitarbeiters aus Komplex A genutzt um Schneiduntersuchungen an der aufgebauten CAMG-Anlage erfolgreich durch zu führen. Ziel dieser Untersuchungen war es, den Technologiereifegrad der Scheiben zu bestimmen. Zu Beginn wurden die Betriebsdaten aus den Arbeitspaketen A/5 bis A/7, die eine fundierte Bewertung der Qualität und Leistungsfähigkeit der additiv hergestellten Schneidstoffe ermöglichen, betrachtet. Diese Daten lieferten wertvolle Erkenntnisse über die Verschleißwirkung an den Scheiben sowie über das Verhalten des ausgetragenen Materials. Insbesondere die Analyse der Materialeigenschaften und der Verschleißerscheinungen im Komplex A war hierbei von zentraler Bedeutung.

Für die neue Anlage, die speziell für das fernhantierte Elektrokontakttrennen entwickelt wurde, wird eine Elektrode mit einem Durchmesser von 450 mm hergestellt. Diese Elektrode ist für Eingriffstiefen von bis zu 150 mm ausgelegt und wurde unter Berücksichtigung der spezifischen Anforderungen an das Trennen von Edelstahl entwickelt. Die Auswahl des geeigneten Werkstoffs erfolgte auf Grundlage der umfassenden Untersuchungen und Erkenntnisse aus den Arbeitspaketen im Komplex A. Der ausgewählte Schneidwerkstoff CuSi3-WSC ist optimal auf die Anforderungen des Trennens der Mock-ups aus Edelstahl abgestimmt und gewährleistet eine hohe Effizienz und Langlebigkeit der Elektrode im Einsatz (siehe Abbildung 2-15). Besonderes Augenmerk wurde auf die Geometrie der Elektrode gelegt, um bei großen Eingriffstiefen die Bildung von Nebenlichtbögen zu vermeiden und diese gezielt lokal zu halten, ist die Elektrode im Bereich des Schneidwerkstoffes mit ca. 3,5 bis 4,5 mm breiter ausgeführt als das Stammblatt. Dies ist entscheidend, um die Qualität des Trennvorgangs zu sichern und unerwünschte Nebenwirkungen, wie unkontrollierte Lichtbögen, zu verhindern. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Gestaltung der Elektrode war die Breite der Schnittfuge. Diese muss so breit sein, dass ein Klemmen der Elektrode während des Trennvorgangs vermieden wird. Gleichzeitig sollte die Schnittfuge möglichst eben sein, um die Angriffsfläche für Nebenlichtbögen zu minimieren und eine saubere, präzise Trennung zu ermöglichen. Insgesamt trägt die additive Fertigung der Elektrode wesentlich dazu bei, die spezifischen Anforderungen des Elektrokontakttrennens von Edelstahl optimal zu erfüllen und die Effizienz sowie die Prozesssicherheit der neuen Anlage zu maximieren.

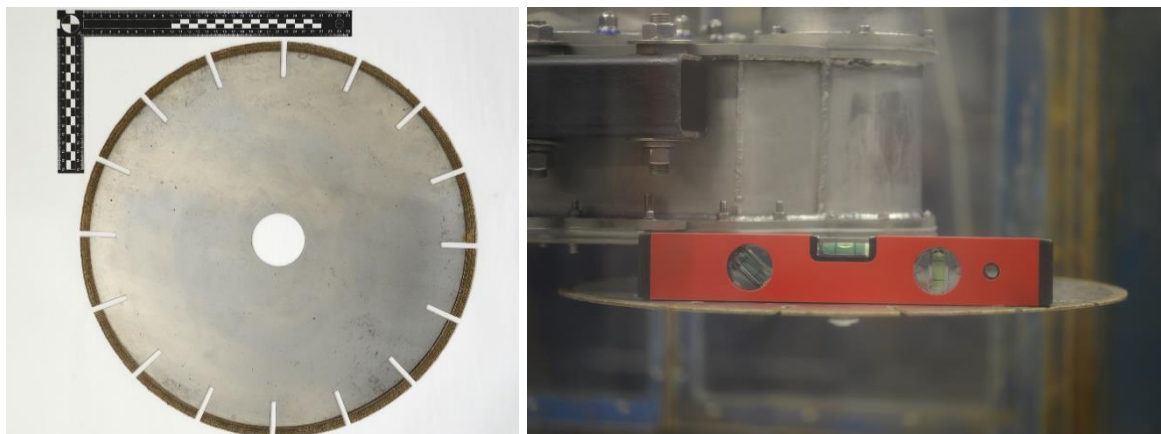


Abbildung 2-15: Elektrode mit 450 mm Durchmesser und mit einem Schneidwerkstoff aus CuSi_3 und WSC (links) sowie deren waagerechte Ausrichtung als wichtiger Teil der Installation (rechts)

Desweiteren wurden in diesem Arbeitspaket die Fugenqualität und der Schneidvorgang selbst intensiv beobachtet und analysiert. Durch diese vertieften Untersuchungen konnten wesentliche Erkenntnisse über die Robustheit und Anwendungsfähigkeit der Schneidstoffe gewonnen werden. Abbildung 2-16 zeigt dabei den Erstkontakt der beiden Pole sowie einen späteren Zeitpunkt des Trennvorgangs dar. Abbildung 2-17 zeigt zwei Schnitte die durch den CAMG-Schneidprozess in ein Mock-up eingebracht wurden. Die Schnittbreite liegt bei ca. 4,5 mm und die Tiefe bei ca. 50 mm. Die Ränder der Schnittfugen sind unregelmäßig und zeigen Anzeichen von Materialablagerungen oder Rückständen, die durch das Erstarren des aufgeschmolzenen Materials entstanden sind. Die Schnitte selbst sind nicht vollständig gleichmäßig, was auf mögliche Schwingungen durch das Tellern der Elektrode im Schneidvorgang hindeuten könnte. Die Oberfläche des Mock-ups um die Schnittfugen herum weißt ebenfalls Spuren des Schneidprozesses durch die Hitzeeinwirkung auf.

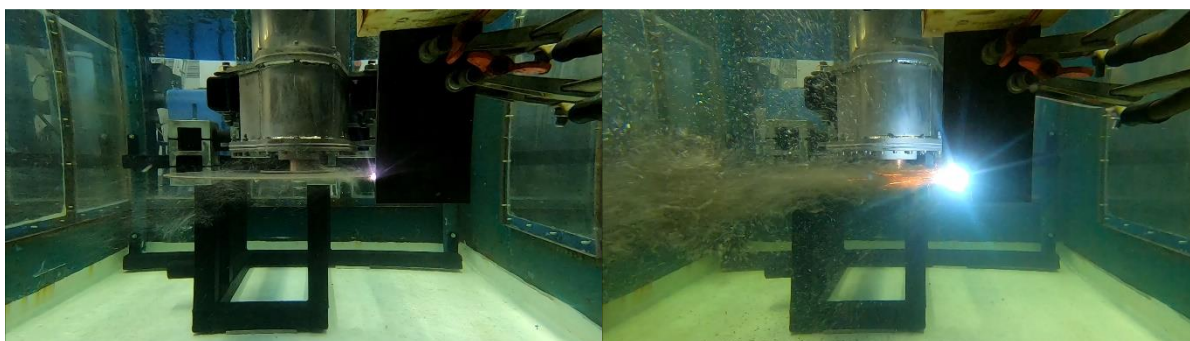


Abbildung 2-16: Erstkontakt von Scheibe und Bauteil (links) sowie der Schneidprozess zu einem späteren Zeitpunkt (rechts)



Abbildung 2-17: Schnittfugen in Mock-ups zur näheren Prozessuntersuchung

Bei der Betrachtung der Schnitte in der Seitenansicht (rechts) ist zusehen, dass die Qualität an den Schnittflächen deutlich besser ist als an der Stelle an der die Elektrode aus dem Werkstück austritt. Durch die Wahl der optimalen Prozessparameter in Bezug zu dem zu trennenden Werkstoff, der Geometrie und dem Schneidwerkstoff der Elektrode können saubere Schnitte erzielt werden. Das gröbere Erscheinungsbild der Schnittfuge an der Austrittskante ist durch das Erstarren des ausgetragenen Materials zu erklären. Die Rotation und das Wasser sorgen für eine hohe Kühlleistung durch die das Material sehr schnell erkalte.

Abschließend wurden die erzielten Ergebnisse genutzt, um den Technologiereifegrad (TRL) der neuen Schneidtechnik zu bewerten. Im Bereich „fernhandiertes CAMG-Schneiden“ konnte der TRL deutlich angehoben werden (siehe Abbildung 2-18). Es konnten klare Aussagen über den aktuellen Stand der Technik und den notwendigen Änderungsbedarf getroffen werden. Die ermittelten Anpassungen wurden in den nächsten Entwicklungsschritten umgesetzt, um die Effizienz und Zuverlässigkeit des Systems weiter zu steigern. Der Elektrodenverschleiß konnte durch die Ergebnisse in Komplex A und den gemeinsamen Test am Prototypen ebenfalls stark gesteigert werden.

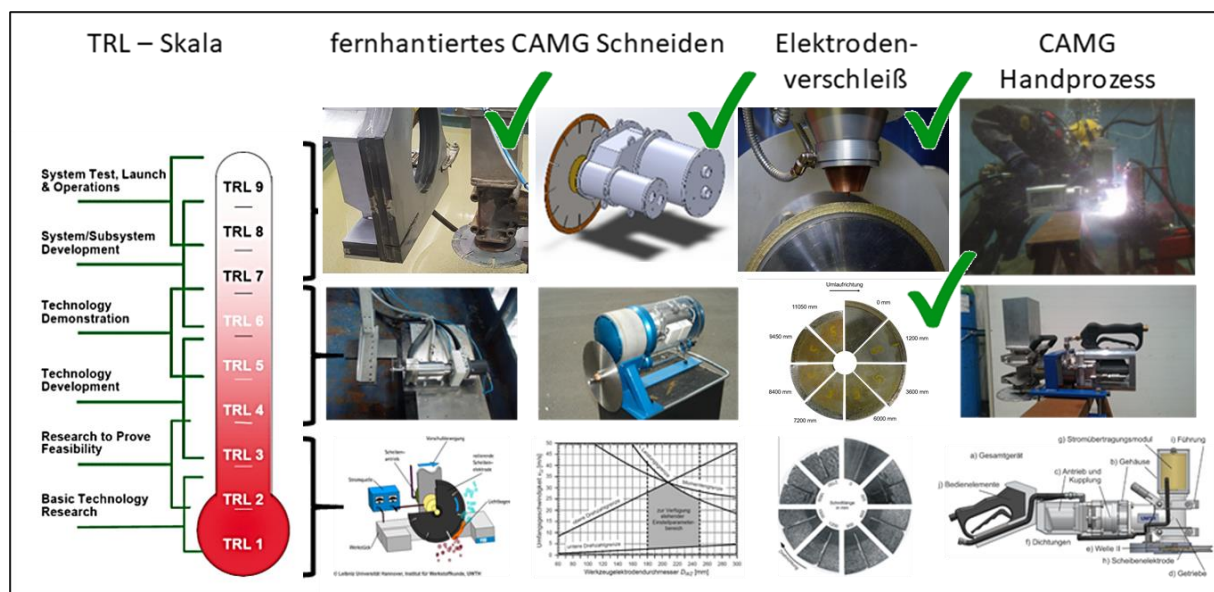


Abbildung 2-18: CAMG innerhalb der TRL-Skala mit den Veränderungen in Bezug auf den Antrag

2.8 Arbeitspaket B/8: Ökonomische Betrachtung

Ein Wirtschaftlichkeitsanalyse für das CAMG-Schneidsystem wurde in diesem Arbeitspaket durchgeführt. Diese Analyse ermöglichte eine detaillierte Kalkulation der entstehenden Kosten und lieferte wertvolle Erkenntnisse für die wirtschaftliche Bewertung des Schneidsystems. Ein zentraler Aspekt der Analyse war die Betrachtung der Investitions- und Herstellungskosten. Hierbei wurden alle preisbildenden Komponenten, einschließlich Zukaufteile, zusammengetragen und in die Kalkulation einbezogen. Durch diese detaillierte Betrachtung könnten Aussagen über die erforderlichen Investitionen getroffen werden. Zusätzlich wurden die peripheren Kosten, wie die Kosten für die Stromquelle, Wasserversorgung und andere notwendige Betriebsmittel, identifiziert und in die Gesamtkostenkalkulation integriert. Diese umfassende Erfassung aller relevanten Kostenpositionen stellt sicher, dass die gesamte finanzielle Belastung des Schneidsystems transparent und nachvollziehbar abgebildet wird.

Die Kosten für die Fertigung einer CAMG-Anlage sind stark von der Produktionsphase abhängig. Während die Herstellung eines Prototyps in der Regel deutlich teurer ist als die Serienfertigung, müssen mehrere Faktoren berücksichtigt werden, die den Preis beeinflussen. Ein wesentlicher Punkt ist der Entwicklungsprozess, der in die Fertigung des Prototyps einfließt. In diesem Prozess kommt es häufig zu Einzelschritt-Fertigungen und notwendiger Nacharbeit, was die Kosten im Vergleich zur späteren Serienproduktion erheblich in die Höhe treibt. Diese zusätzlichen Aufwendungen sind typisch für die Entwicklungsphase, da hier oft Anpassungen und Optimierungen erforderlich sind, um das endgültige Design zu perfektionieren. Die mechanische Fertigung, wie das Drehen, Fräsen und Wasserstrahlschneiden, wurde im UWTH durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass die Kosten für diese Verfahren in einer freien Wirtschaftsumgebung abweichen können. Faktoren wie Maschinenstundensätze, Personal- und Betriebskosten spielen hier eine Rolle und können zu unterschiedlichen Preisen führen. Zudem wurden in der vorliegenden Kostenanalyse die Kosten für Werkzeuge nicht berücksichtigt, was die tatsächlichen Produktionskosten weiter erhöhen würden.

Die größten Kostenpunkte bei der Fertigung der CAMG-Anlage stellen die modifizierte Stromquelle und die Wasser-Hydraulikeinheit dar. Diese Komponenten erfordern spezialisierte Anpassungen und Modifikationen, was ihre Kosten im Vergleich zu standardisierten Lösungen erheblich erhöht. Ein weiterer Faktor sind die Zukaufteile. Da diese in der Prototypenphase oft als Einzelteilbestellungen bezogen werden, liegen ihre Preise deutlich über denjenigen, die in einer Serienproduktion mit größeren Stückzahlen realisierbar wären. Die Beschaffung in kleinen Mengen führt naturgemäß zu höheren Preisen pro Einheit, was die Gesamtkosten für den Prototypen weiter in die Höhe treibt.

Tabelle 2-3: Kosten der Anlagenkomponenten

Bezeichnung	Kosten
Stromquelle	ca. 19.000 €
Hydraulikaggregat	ca. 23.000 €
Antrieb	6.543 €

Riementrieb	179,81 €
Kugellager	163,70 €
Galinstan	53,25 €
Schweißkabel + Stecker + Kabelschuhe + Schraubzwinde	326 €
Hydraulikanschlüsse	63,27 €
Schrauben + Muttern	126,81 €
Dichtungen	43,52 €
Dichtringe + Sicherungsringe	23,26 €
Passfedern + Gewindestangen	22,35 €
Kupfer (Welle + Stromüberträger)	352 €
Edelstahl (Gehäuse)	859,36 €
Stahl (Riemenspanner)	53,60 €
Schweißdraht	125 €

Insgesamt zeigt die Kostenanalyse, dass die Herstellung eines Prototyps deutlich teurer ist als die Serienfertigung, wobei insbesondere die Entwicklungsschritte, die modifizierten Hauptkomponenten und die Einzelteilbestellungen der Zukaufteile maßgeblich zu den hohen Kosten beitragen. Die Stromquelle und die Hydraulikeinheit können auch für andere Anlagen bzw. Verfahren genutzt werden und sind aus diesem Grund in einem Vergleich gesondert zu betrachten. In Abbildung 2-19 ist ein möglicher Aufbau in der Zerlegehalle dargestellt. Zusätzlich zu den bereits erwähnten Kostenpunkten kommen die Kosten für die Elektrode, die in Arbeitspaket A/8 aufgeführt werden. Die Elektrode stellt eine weitere Ausgabenposition dar, da diese je nach Einsatzart schneller erneuert werden muss, da hier maßgeblich Verschleiß auftreten kann. Darüber hinaus fallen auch laufende Kosten für Ersatzteile an, wie beispielsweise das Nachfüllen von Galinstan, das in regelmäßigen Abständen erforderlich ist, um die Funktionsfähigkeit der Anlage zu gewährleisten. Auch Dichtringe und Lager, die einem natürlichen Verschleiß unterliegen, müssen regelmäßig gewartet und ausgetauscht werden. Neben den Anschaffungs- und Betriebskosten dürfen daher auch die Wartungs- und Instandsetzungskosten nicht außer Acht gelassen werden, da sie einen kontinuierlichen finanziellen Aufwand darstellen, der über die gesamte Lebensdauer der Anlage hinweg berücksichtigt werden muss. Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Analyse ist die Abschätzung der Betriebskosten. Hier sind aufgrund der fehlenden Erfahrungswerte keine genauen Werte zu ermitteln. An dieser Stelle sind lediglich Schätzwerte anzunehmen.

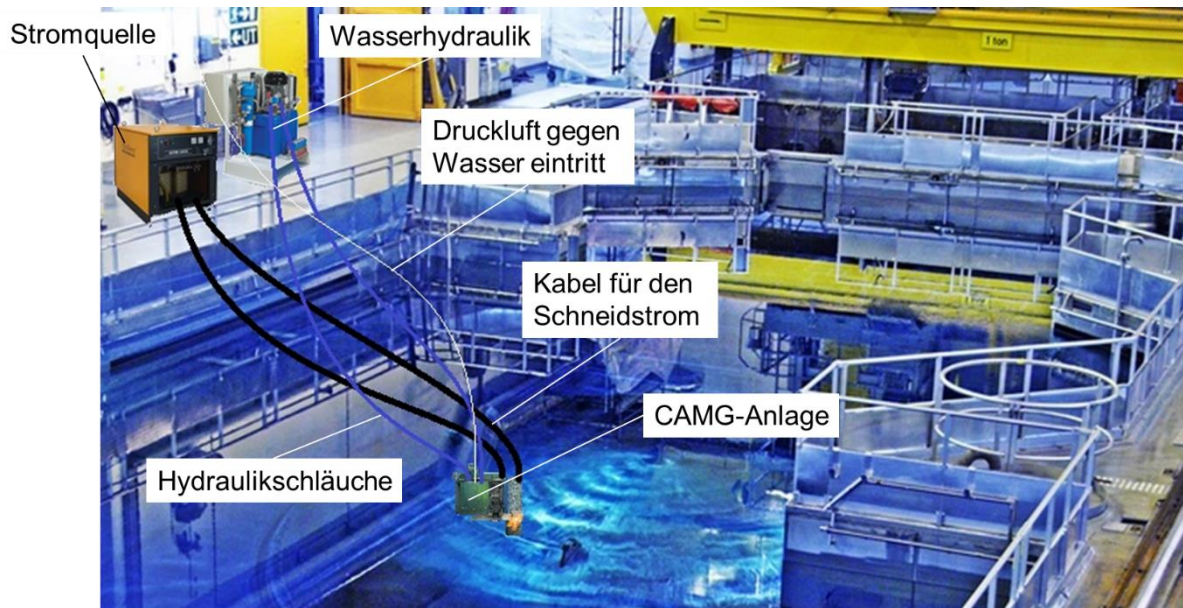


Abbildung 2-19: Schematischer Aufbau der Anlagentechnik im Einsatz

Insgesamt können durch die Wirtschaftlichkeitsanalyse alle relevanten Kostenaspekte erfasst und zum Teil auch detailliert ausgewertet werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse bieten eine solide Grundlage für die weitere Planung und Entscheidungsfindung außerhalb des Projektes. Die Betrachtung aller Kosten stellt einen wichtigen Meilenstein im Projektverlauf dar und unterstützt die langfristige Wirtschaftlichkeit und Effizienz des CAMG-Schneidsystems.

3 Komplex C: Zusammenführung Komplex A und B

3.1 Arbeitspaket C/1: Gesamtdokumentation

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde eine Gesamtdokumentation der Projektinhalte erstellt. Die Dokumentation umfasst detaillierte Informationen zu allen relevanten Aspekten des Projekts und dient als zentrale Ressource für alle zukünftigen Aktivitäten und Nachverfolgungen. Die inhaltlichen Aspekte, die in den Kapiteln zu Komplex A und Komplex B beschrieben werden, sind vollständig in dieser Gesamtdokumentation integriert. Die vorliegenden Kapitel behandeln spezifische technische und organisatorische Details, die für das Verständnis der jeweiligen Komplexe von entscheidender Bedeutung sind. Durch die Einbindung dieser Inhalte in die Gesamtdokumentation wird sichergestellt, dass alle relevanten Informationen an einem Ort zusammengefasst und leicht zugänglich sind.

Darüber hinaus wurden spezifische Dokumentationen und Gebrauchsanweisungen für die beiden Anlagen erstellt. Diese Anleitungen sind besonders wichtig, da sie den praktischen Betrieb und die Wartung der Anlagen unterstützen. Die Dokumentationen enthalten schrittweise Anweisungen, Sicherheitsrichtlinien sowie wichtige Hinweise zur Fehlerbehebung. Sie sind nicht nur für die unmittelbare Nutzung durch das Betriebspersonal von Bedeutung, sondern auch für das langfristige Knowledge Management unerlässlich. Dadurch wird sichergestellt, dass das Wissen über den Betrieb und die Wartung der Anlagen systematisch erfasst und weitergegeben wird.

3.2 Arbeitspaket C/2: Anwendungsmerkblatt inklusive Gefährdungsbeurteilung

Im Rahmen der intensiven Zusammenarbeit mit EWN wurden wesentliche Eckpunkte für die Anlagentechnik des CAMG-Systems entwickelt. Die genannten Eckpunkte sind umfassend in der Dokumentation des Arbeitspakets C/1 dargelegt. Die vorliegende Dokumentation beinhaltet eine detaillierte Behandlung wesentlicher Randbedingungen, darunter die Einsatzmöglichkeiten des Systems, das Leistungsspektrum, die peripheren Anforderungen sowie die technischen Spezifikationen der Schneidscheiben. Die detaillierte Aufbereitung der Informationen gewährleistet, dass das erworbene Wissen nicht nur innerhalb des Projekts, sondern auch darüber hinaus nutzbar bleibt.

Vor Beginn des Projekts wurde für das Handgerät ein Technology Readiness Level (TRL) von maximal Stufe 7 und für die Scheibenelektroden lediglich ein TRL von maximal Stufe 3 ermittelt. Die im Rahmen des Projekts durchgeführten Entwicklungen und Tests führten zu einem signifikanten Fortschritt. Im Unterwassertechnikum (UWTH) wurde für die Scheibenelektroden bereits der TRL 4 erfolgreich umgesetzt. Die weiteren Schritte zur Erreichung der TRL-Stufen 5 und 6 sind fest mit der Eröffnung der Zerlegehalle in Lubmin terminiert. Diese Fortschritte demonstrieren das Potenzial der Technologie, den TRL 7 bei erfolgreichen Tests zu erreichen und im Rahmen des Nachfolgeprojekts AutArc im Bereich bis TRL 8.

Die umfassende Dokumentation und die gezielten Weiterentwicklungen im Rahmen des Projekts schaffen somit alle notwendigen Voraussetzungen, um das erworbene Know-how effektiv zu nutzen und weiterzugeben, was einen entscheidenden Beitrag zur nachhaltigen Technologieförderung leistet.

3.3 Arbeitspaket C/3: Anwendungsprofil und Genehmigungsfähigkeit

In der Schlussbetrachtung erfolgt eine Zusammenfassung der am Markt bestehenden Anwendungsprofile, um die entwickelte Technik im Rückbauprozess als Alternativtechnik zur Intervention beim Ausfall der primären Unterwasserschneidtechniken einzusetzen. Die Vorteile der Technologie liegen insbesondere in ihrer Eignung für dickwandige Materialien und komplexe Strukturen wie Hinterschnitte oder Rohrbündel. Weitere Vorteile sind die geringen Rückstellkräfte, die hohe Schnittgeschwindigkeit sowie die einfache Handhabung. Des Weiteren können weitere Anwendungen im maritimen Bereich in Erwägung gezogen werden, insbesondere im Kontext des Rückbaus maritimer Strukturen.

Des Weiteren wurde die Genehmigungsfähigkeit für den nuklearen Rückbau eingehend erörtert. Im Rahmen dessen wurde eine Vorprüfungsunterlage (VPU) erstellt. Die Unterlage umfasst unter anderem den technischen Aufbau der Geräte sowie die potenziellen Gefahren, die von der Technik ausgehen können, insbesondere bei Dysfunktionen während der Anwendung. Das Ziel, den Anwendern klare Kriterien und überzeugende Argumente an die Hand zu geben, um die sichere Funktionsfähigkeit der Projektentwicklungen darzustellen, konnte erreicht werden. Die umfassende Dokumentation sowie die Erfüllung der Sicherheitsanforderungen gewährleisten, dass die Technik zuverlässig und sicher eingesetzt werden kann, was ihre Akzeptanz und Anwendung in der Praxis fördern kann.

Der Einsatz der CAMG-Technologie erfolgt ausschließlich bei der Unterwasserzerlegung in den Reaktorbereichen des Flutraumbeckens, des Abstellraumes für RDB-Einbauten sowie den temporär eingerichteten Zerlegeplätzen oder, wenn möglich, im BE-Lagerbecken (siehe Abbildung 3-1).

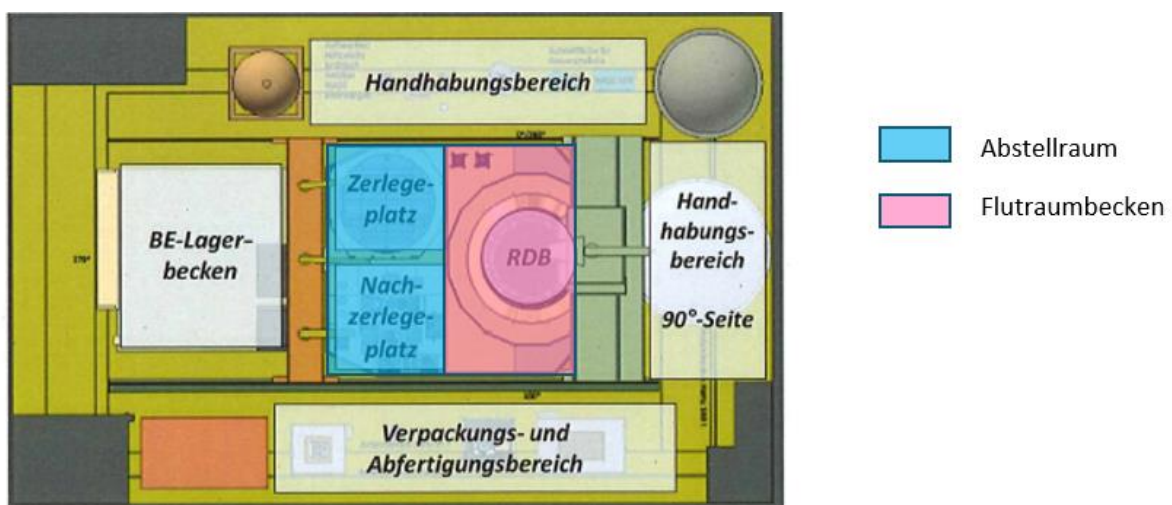


Abbildung 3-1: Raumbereiche einer SWR-Anlage

Das CAMG-Schneidgerät kann dabei für dünnwandige Blechstrukturen von 2 - 15 mm, wie sie z. B. beim Steuerstabführungsrohr vorliegen, aber auch für Materialien mit einer Dicke von bis zu 50 mm, wie sie beim Kernmantel vorliegen, eingesetzt werden. Grundsätzlich ist das CAMG-Schneidgerät für den konstruktiven Einsatz bei der Zerlegung von Reaktorkomponenten gemäß Pflichten- und Lastenheft sehr gut einsetzbar, was durch anlagenspezifische Anwendungen vertieft erprobt werden muss.

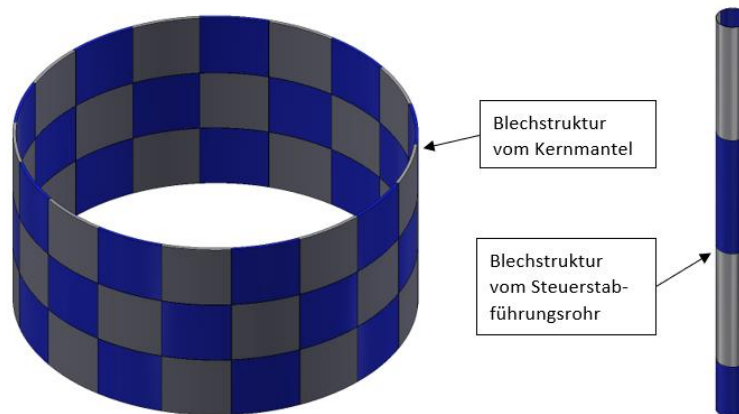


Abbildung 3-2: Zylindrische Blechstrukturen mit Wandstärken von 5 - 45mm

In Abbildung 3-3 wurde eine Komponente von den RDB-Einbauten auf dem Zerlegeplatz im Abstellraum positioniert. Die zylindrischen Blechstrukturen vom Kernmantel befinden sich in der Kernzone des RDB und können somit Aktivierungen von bis zu $8,5 \cdot 10^{13}$ Bq (^{60}Co) aufweisen, was sehr hohe Dosisleistungswerte mit sich bringt. Auf Grund der hohen Aktivitäten bzw. Dosisleistungswerte kann der Bereich der Kernzone nur unter Wasser fernbedient zerlegt werden. An diesen Orten kann CAMG fernhantiert über Stangensysteme bzw. fernbedient mit Unterwasserrobotern ausgeführt werden. Für die Bedienung und Handhabung der komplexen CAMG-Anlagentechnik werden nur speziell ausgebildete Mitarbeiter zugelassen und entsprechend beauftragt. Dieses Fachpersonal unterliegt einer vertiefenden gerätetechnischen Einweisung mit Handhabungsschulungen (Kalkprobung) für den sicheren Umgang und Einsatz des CAMG-Gerätes zur Zerlegung von Reaktorkomponenten. Weiterführende Anforderungen an das qualifizierte Personal ergeben sich aus den Sicherheitsanforderungen des Gesundheits- und Arbeitsschutzes, der Bedienvorschriften sowie der mitgeltenden Unterlagen für den jeweiligen Arbeitsbereich der BAW, GFB und arbeitsplatzbedingte Vorgaben des Strahlenschutzes. Um das Bedienpersonal vor den hohen Dosisleistungswerten zu schützen, muss die zum Einsatz kommende Zerlegetechnik möglichst wartungs- und störungsarm sein.

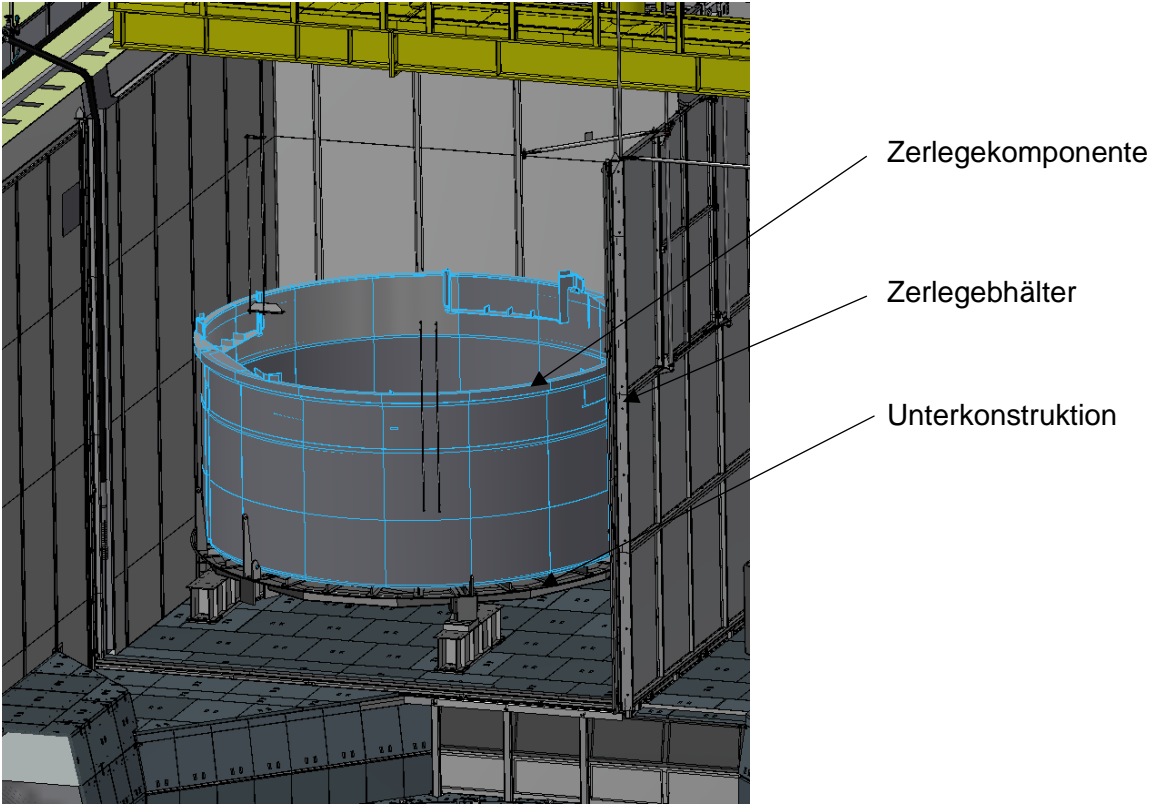


Abbildung 3-3: Komponenten von den RDB-Einbauten auf dem Zerlegplatz positioniert

4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Erfolgte Veröffentlichungen

Schmidt, E.; Mills, C.; Wollermann, T.; Hassel, T. (2023): Anwendung des Elektrokontakttrennens unter Wasser mittels additiv gefertigten Elektroden im kerntechnischen Rückbau. KONTEC, Dresden

Mills, C.; Schmidt, E.; Wollermann, T.; Hassel, T. (2023): In-situ Process Monitoring of Contact Arc Metal Grinding (CAMG) for Underwater Use in Nuclear Decommissioning. International Conference on Nuclear Decommissioning (ICOND), Aachen

Hassel, T.; Schmidt, E.; Mills, C.; Wollermann, T.; Dummann, A. (2023): Entwicklungsschritte des Elektrokontakttrennens (CAMG) unter Wasser für den kerntechnischen Rückbau - aktuelles aus Forschung und Entwicklung. 10. Symposium Stilllegung und Abbau kerntechnischer Anlagen, Laatzen

Mills, C. (2023): Additiv gefertigte Schneidelektroden im kerntechnischen Rückbau. phi – Produktionstechnik Hannover informiert, Newsletter Nr. 45 / 15.10.2024

Geplante Veröffentlichungen

Peer-reviewed Paper in einem Journal zum Thema „Increasing the Service Life of Electrodes for Contact Arc Metal Grinding Using Additively Manufactured Metal Matrix Composites“, eingereicht zur Begutachtung Anfang Januar 2025

Peer-reviewed Paper in einem Journal zum Thema „The Influence of Process Parameters during Laser Metal Deposition on Relevant Characteristics of a Copper Alloy“

5 Literaturverzeichnis

- [BAC01] Bach, F.-W.; Bienia, H.: *Untersuchungen zum Trennen dickwandiger Reaktorbauteile mittels Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifens mit rotierender Elektrode (CAMG)*, Abschlussbericht, Hannover, 2001.
- [COR19] Core77 Inc.: *Bosch's X-Lock System for Quick Angle Grinder Accessory Changes*. <https://www.core77.com/posts/82425/Boschs-X-Lock-System-for-Quick-Angle-Grinder-Accessory-Changes>, Stand: 2019, abgerufen am 01.10.2024.
- [GUP19] Gupta, M.: *3D Printing of Metals*, MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Erscheinungsort nicht ermittelbar, 2019, ISBN: 9783039213412.
- [KAB67] Kabanov, N. S.; Piskunov, A. V.: *Arc Cutting of Ferrous and Non-Ferrous Metals with a Rotating Disc Electrode*, *Automatic Welding* 4 (1967), S. 76–79.
- [KAI12] Kaierle, S.; Barroi, A.; Noelke, C. et al.: *Review on Laser Deposition Welding: From Micro to Macro*, *Physics Procedia* (2012), S. 336–345. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.10.046>.
- [KRE08] Kremer, G.: *Weiterentwicklung von Verfahren zur Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung*, Dissertation, Hannover, 2008.
- [KUM22] Kumar, S.: *Additive Manufacturing Solutions*, Springer International Publishing, Cham, 2022, ISBN: 978-3-030-80782-5. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-80783-2>.
- [PEI89] Peitzsch, L.: *Elektrisch Abtragendes Trennen*, Dissertation, Magdeburg, 1989.
- [PHI02] Philipp, E.: *Beitrag zum Elektrokontakttrennen unter Wasser*, Dissertation, Hannover, 2002.
- [SCH23] Schmidt, E.; Hassel, T.; Maier, H. J.: *Untersuchungen zur Erhöhung der Elektrodenstandzeit beim manuellen Elektrokontakttrennen unter Wasser*, *Schweißen und Schneiden* 9 (2023), S. 682–688.