

Weiterentwicklung von Verfahren zur Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. (FH) Guido Kremer
geboren am 16.01.1969 in Hückeswagen

2008

1. Referent:

Prof. Dr.-Ing. Friedrich-Wilhelm Bach

2. Referent:

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens

Vorsitzender der Prüfungskommission:

Prof. Dr.-Ing. Eduard Reithmeier

Tag der Promotion: 28. Mai 2008

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkstoffkunde (IW) der Leibniz Universität Hannover.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Fr.-W. Bach, Direktor des Instituts für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover, möchte ich besonders danken; nicht nur für die Anregung und fachliche Unterstützung der Arbeit, sondern auch für das mir entgegengebrachte große Vertrauen, das mich während meiner Tätigkeit begleitet hat.

Mein herzlicher Dank gilt meinen Kollegen am Institut für Werkstoffkunde. Ohne die tatkräftige Unterstützung von Klaus und Lars hätte das Versuchsprogramm deutlich kleiner ausfallen müssen. Durch die gewissenhafte und fleißige Arbeit der Kollegen aus der Werkstatt konnten aus meinen Konstruktionen und Entwürfen echte Bauteile werden. Meinen wissenschaftlichen Kollegen danke ich für die gute Zusammenarbeit sowie für die herzliche und konstruktive Arbeitsatmosphäre.

Ein ganz besonderer Dank an Matthias Zeug. Ohne seine Unterstützung und Motivation wäre mein Schritt aus der Industrie „zurück“ an die Hochschule nicht möglich gewesen.

Die Forschungsarbeiten erfolgten im Rahmen zwei durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderter Vorhaben. Für die finanzielle Unterstützung sei an dieser Stelle gedankt.

Der Firma Kjellberg Finsterwalde Elektroden und Maschinen GmbH danke ich für die zur Verfügung gestellten Schweißstromquellen sowie für die fachliche Unterstützung.

Ich widme diese Arbeit meiner Frau Iris, meinem Sohn Finn und meiner Tochter Malin die immer an mich geglaubt und mich stets unterstützt haben.

Hannover, im Mai 2008

Guido Kremer

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen.....	IV
1 Einleitung.....	1
2 Stand von Wissenschaft und Technik	4
2.1 Einteilung der abtragenden Fertigungsverfahren.....	4
2.1.1 Abtragen durch Plasma.....	5
2.1.2 Abtragen durch Funkenerosion	8
2.1.3 Abtragen durch Lichtbogenentladung.....	10
2.2 Elektrokontaktbearbeitung	10
2.2.1 Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen (Contact-Arc-Metal-Grinding, CAMG).....	22
2.2.2 Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (Contact-Arc-Metal-Cutting, CAMC)	25
2.2.3 Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bohren (Contact-Arc-Metal-Drilling, CAMD).....	27
2.3 Emissionen bei der Elektrokontaktbearbeitung.....	28
3 Zielsetzung	30
4 Anlagen und Gerätetechnik.....	32
4.1 Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen (CAMG)	32
4.1.1 Ausgangslage CAMG	32
4.1.2 Weiterentwicklung CAMG	33
4.1.2.1 Auslegung des Antriebs	35
4.1.2.2 Stromübertragung	38
4.1.2.3 Antriebswelle.....	47
4.1.2.4 Elektrodenentwicklung	49
4.1.2.5 Handgeführtes CAMG an Atmosphäre	51
4.2 Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (CAMC)	53
4.2.1 Ausgangslage CAMC	53
4.2.2 Weiterentwicklung CAMC.....	55
4.2.2.1 Maschinengeführtes CAMC-Werkzeug.....	55
4.2.2.2 Handgeführtes CAMC-Werkzeug	56
5 Experimenteller Teil.....	58

5.1	Schneiduntersuchungen	
	Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen (CAMG)	58
5.1.1	Einfluss der Werkzeugelektroden	59
5.1.2	Einfluss der Schneidstromquellencharakteristik.....	63
5.1.3	Prozessstabilität.....	68
5.1.3.1	Gleichlauf und Gegenlauf.....	68
5.1.3.2	Polung	68
5.1.3.3	Einfluss der Drehzahl	70
5.1.4	Elektrodenverschleiß	70
5.1.5	Handgeführtes CAMG an Atmosphäre	75
5.2	Schneiduntersuchungen	
	Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (CAMC).....	77
5.2.1	Einfluss der Schneidstromquelle.....	77
5.2.2	Einfluss der Spülströmung	79
5.2.3	Elektrodenverschleiß	82
5.2.4	Prozessregelung	85
5.2.5	Handgeführtes CAMC.....	86
5.3	Emissionsuntersuchungen CAMG und CAMC	89
5.3.1	Messverfahren zur Hydrossolemission	89
5.3.2	Messverfahren zur Sedimentanalyse.....	90
5.3.3	Emissionsuntersuchungen.....	90
6	Zusammenfassung und Ausblick	95
7	Literaturverzeichnis	98
8	Lebenslauf	103

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
γ	%	relativer Elektrodenverschleiß
A	m ²	Elektrodenfläche
a	mm	Abstand Rotationsachse/Werkstückoberfläche
A _K	m ²	Kontaktfläche
b _{wz}	mm	Breite der Werkzeugelektrode
C _m	-	Reibwert
d	mm	Rohrwandstärke
dl	Vs	Änderung des magn. Flusses
dt	s	infinitesimales Zeitintervall
D	mm	Werkzeugelektroden Durchmesser
E	V/m	Elektrisches Feld
e _H	mg/kg	spez. Hydrosolmission
H	mm	Werkstückdicke
h	h	Stunden
I ₀	A	Mindestarbeitsstrom
I _A	A	Arbeitsstromstärke
I _{Amax}	A	maximaler Arbeitsstrom
I _{Amittel}	A	mittlerer Arbeitsstrom
i _e	A	Entladestrom
I _m	A	Messstrom
J	A/mm ²	Arbeitsstromdichte
J _{min}	A/mm ²	Mindestarbeitsstromdichte
k	-	künstliche Sandrauigkeit
k _H	mg/l	Hydrosolkonzentration
L	H	Induktivität

l_k	mm	Kontaktlinienlänge
l_{LB}	mm	Lichtbogenlänge
M	Nm	Reibmoment
$m_{Hges.}$	kg	Masse der Hydrosole
$m_{Sges.}$	kg	Masse des Schnittfugenvolumens
P	kW	Antriebsleistung
P_{mittel}	W	mittlere Leistung
P_S	W	Schneidleistung
P_v	W	Verlustleistung
R	m	Scheibenradius
R_a	μm	Mittenrauwert
R_{E1}	Ω	Widerstand Elektrode 1
R_{E2}	Ω	Widerstand Elektrode 2
$R_{ges.}$	Ω	ges. Widerstand
R_{Hg}	Ω	Widerstand Hg (Quecksilber)
R_{P1}	Ω	Widerstand Grenzfläche 1
R_{P2}	Ω	Widerstand Grenzfläche 2
S	mm	Schnitttiefe
s	m^2	Kontaktfläche
s_L	μm	Funkenspaltweite
t_e	μs	Entladedauer
u_0	V	Leerlaufspannung
U_A	V	Arbeitsspannung
U_{ind}	V	induzierte Spannung
V	m^3/h	Spülstrom
V_B	l	Volumen des Versuchsbeckens
v_u	m/s	Umfangsgeschwindigkeit
v_v	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
v_{vmax}	m/min	maximale Vorschubgeschwindigkeit
v_w	kg/h	Abtragsraten
w	m	Schnittfugenbreite

W	kWh/kg	spez. Energiebedarf der Elektrokontaktbearbeitung
W_e	mJ	Entladeenergie pro Entladung
ω	1/s	Winkelgeschwindigkeit
ΔA	m ²	Elektrodenflächendifferenz
$\Delta R_{P_{ges.}}$	Ω	gesamte Phasenübergangswiderstandsdifferenz
o_P	Ωm^2	spez. Phasenübergangswiderstand
ρ	kg/m ³	Dichte

Abkürzungen

AC	Wechselstrom (Alternating Current)
AGW	Arbeitsplatzgrenzwert
CAMC	Contact-Arc-Metal-Cutting (Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden)
CAMD	Contact-Arc-Metal-Drilling (Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bohren)
CAMG	Contact-Arc-Metal-Grinding (Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen)
CFC	karbonfaserverstärkter Kohlenstoff
DC	Gleichstrom (Direct Current)
EKB	Elektrokontaktbearbeitung
ECT	Elektrochemisches (anodisches) Trennen
ECCT	Elektrochemisch-Elektroerosives Trennen
EKAT	Elektrokontaktersives-Abrasives Trennen
LET	Lichtbogenerosives Trennen
AMT	Anodenmechanisches Trennen
EKT	Elektrokontaktersives Trennen
FET	Funkenerosives Trennen
JAERI	Japan Atomic Energy Research Institute
JPDR	Japan Power Demonstration Reactor
KKW	Kernkraftwerk
MZFR	Mehrzweckforschungsreaktor Karlsruhe
WAIS	Wasserabrasiv-Injektorstrahlschneiden

NVEBW	Nonvakuum-Elektronenstrahl-Schweißanlage
WASS	Wasserabrasiv-Suspensionsstrahlschneiden
WCu	Wolframkupfer
WEZ	Wärmeeinflusszone
WIG	Wolfram-Inertgas
WWER	Wasser-Wasser-Energie-Reaktor

Abstract

Das Ziel dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung von Verfahren zur Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung. Hierbei werden speziell die Schneidverfahren Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen (CAMG, Contact-Arc-Metal-Grinding) sowie das Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (CAMC, Contact-Arc-Metal-Cutting) behandelt. Bisher wurden bei diesen Verfahren sehr hohe Prozessströme von mehreren kA benötigt, der Elektrodenverschleiß war hoch, die Schnittqualität und Prozessstabilität waren unzureichend. Die insbesondere in der Sowjetunion, aber auch in westlichen Industrienationen, vereinzelt aufgebauten Anlagen werden daher nicht mehr betrieben.

Die Schneidverfahren CAMG und CAMC bieten jedoch zum Trennen von dickwandigen und geometrisch komplexen Werkstücken unter Wasser ein großes Potenzial. Solche Schneidaufgaben finden sich insbesondere beim Rückbau von Kernkraftwerkskomponenten im Bereich des Reaktordruckbehälters. Alternative Schneidverfahren erreichen hier zum Teil ihre Leistungsgrenze.

Aufbauend auf dem Stand der Technik wurden zunächst neue Werkzeuge konzipiert, konstruiert und Prototypen gefertigt. Bei den folgenden praktischen Schneiduntersuchungen wurde mit Hilfe der Analyse der Strom- und Spannungsverläufe ein besseres Verständnis für die Vorgänge in den Prozessen entwickelt.

Das verbesserte Prozessverständnis ermöglichte eine systematische Weiterentwicklung der Verfahren. Insbesondere konnten die Prozessströme signifikant reduziert werden und hierdurch der Elektrodenverschleiß erheblich verringert werden. Die erreichte Stabilisierung der Prozesse erlaubt nun zudem eine vereinfachte Automatisierung der Verfahren.

Für das CAMC-Verfahren wurden die Ergebnisse dieser Arbeit bereits für eine praktische Anwendung beim Rückbau des Mehrzweckforschungsreaktor Karlsruhe (MZFR) eingesetzt und somit die Leistungsfähigkeit dieser Schneidtechnik unter Beweis gestellt.

Schlagworte: Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen, Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden, Schneidtechnik

Abstract

The aim of this work is the further development of the contact arc metal machining process. Particularly the Contact-Arc-Metal-Grinding (CAMG) as well as the Contact-Arc-Metal-Cutting (CAMC) methods will be discussed. Until now for these processes very high electric currents of up to several kA were used, the electrode wear was high and the cutting quality and process stability were insufficient. Therefore the few machines, which were build especially in the Soviet Union but as well in the western industrialised countries, are not used anymore.

However, the cutting processes CAMG and CAMC offer a big capability for submerged separations of thick-walled and geometrical complex work pieces. Thus separation jobs can be found in particular in decommissioning purposes of nuclear power plants in the area of the reactor pressure vessel. Alternative cutting methods are reaching here their upper limit.

Firstly a new tool was planned, designed and a prototype was produced build on the state of the art. By the following cutting performance experiments the understanding of the processes were enhanced by an analysis of the current and voltage characteristics.

The better understanding of the processes makes a systematic further development of the technique possible. In particular the electrode wear could be decreased significantly by the minimisation of the current flow. Furthermore the reached stabilisation of the process allowed the usage of a simplified automation for the process.

In case of the CAMC-process the results of this work could be already used in a practical application for deconstruction purposes at the Mehrzweckforschungsreaktor Karlsruhe (MZFR) and could prove therewith the efficiency of this cutting technology.

Keywords: Contact-Arc-Metal-Grinding, Contact-Arc-Metal-Cutting, cutting technology

1 Einleitung

Beim Rückbau von kerntechnischen Anlagen ist die Zerlegung von radiologisch kontaminierten oder aktivierten Großkomponenten eine der komplexesten und schwierigsten Aufgaben. Neben einer Vielzahl von logistischen und sicherheitstechnischen Besonderheiten, die beim Rückbau kerntechnischer Anlagen zu beachten sind, sind die Anforderungen an die hier zum Einsatz kommenden Zerlegetechniken hoch. Hierbei gilt es als oberste Prämisse die Strahlungsexposition der Bedienmannschaft zu minimieren. Dies erfordert den Einsatz von fernhantierten Werkzeugen. Um die gute strahlungsabsorbierende Wirkung des Wassers zu nutzen werden die Arbeiten bei stark aktivierten Komponenten, zudem oftmals unter Wasserabdeckung durchgeführt.

Bei den in der Fertigungstechnik üblichen spanenden Trennverfahren, wie z.B. Bandsägen, Kreissägen oder auch das Trennschleifen, treten aufgrund der mechanischen Wechselwirkung zwischen den Schneiden und dem Werkstückmaterial hohen Prozesskräften auf. Darüber hinaus erfordern diese Verfahren eine hohe Führungsgenauigkeit des Werkzeuges und stellen daher hohe Anforderungen an die Führungsmaschinen. Aus diesem Grund verursachen diese Verfahren einen großen Aufwand, wenn die Zerlegung von Komponenten in deren Einbausituation erfolgen soll. Mechanische Verfahren, wie z.B. das Nippeln, lassen sich bei metallischen Bauteilen relativ einfach fernhantiert einsetzen. Bei Materialstärken ab ca. 12 mm stoßen solche Verfahren jedoch an ihre Leistungsgrenzen.

Die thermischen Schneidverfahren wie das Plasmaschneiden sowie das autogene Brennschneiden (hier nur für ferritische Stähle) weisen nur geringe Rückstellkräfte auf und lassen sich daher mit vergleichsweise einfachen Manipulatorsystemen fernhantiert handhaben. Beide Verfahren eignen sich auch für größere Materialstärken. Abhängig vom Werkstoff oder bei komplexen und mehrwandigen Strukturen erreichen jedoch auch diese Schneidverfahren ihre Leistungsgrenzen.

Das Wasserabrasiv-Injektorstrahlschneiden (WAIS) und das Wasserabrasiv-suspensionsstrahlschneiden (WASS) werden zum Trennen von nahezu allen Werkstoffen bzw. Werkstoffverbunden verwendet. Auch komplexe und dickwandige Strukturen lassen sich mit diesen Verfahren trennen. Die zum Schneiden benötigte und zu entsorgende Mischung aus Wasser und Abrasivmittel schränken dessen Einsatz jedoch ein.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass eine Vielzahl von Trenntechniken zur Verfügung stehen, die alle ihre spezifischen Vor- und Nachteile aufweisen. Für den Rückbau kerntechnischer Anlagen fehlen jedoch teilweise einfache, zuverlässige und kostengünstige Verfahren. Das gilt insbesondere dann, wenn Trennaufgaben unter Wasser, fernhantiert, an komplexen und/oder dickwandigen Komponenten aus metallischen Werkstoffen zu lösen sind.

Das Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen (CAMG Contact-Arc-Metal-Grinding) sowie das Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (CAMC Contact-Arc-Metal-Cutting) bieten das Potenzial, für die beschriebenen Anwendungen, die verfügbare Werkzeugpalette sinnvoll zu ergänzen.

Beide Verfahren sind Schneidverfahren für den Unterwassereinsatz, die sich nach DIN 8580 [DIN80] und 8590 [DIN90] der Gruppe der thermisch abtragenden Fertigungsverfahren durch elektrische Gasentladung zuordnen lassen. Der Materialabtrag erfolgt durch die thermische Wirkung von zwischen Werkstück und einer Werkzeugelektrode brennenden Lichtbögen. Die Lichtbögen schmelzen und verdampfen hierbei das Werkstückmaterial punktuell. Das entstehende Material wird durch eine geeignete Spülströmung aus dem Arbeitsbereich entfernt.

Beim CAMG-Verfahren wird eine scheibenförmige Werkzeugelektrode in Rotation versetzt. Durch die Reibung zwischen Elektrode und Wasser entsteht eine Strömung, welche die Spülung des Arbeitsbereiches bewirkt. Ähnlich wie bei dem Kreisägeverfahren entsteht auf diese Weise eine Schnittfuge. Der Materialabtrag erfolgt hierbei jedoch ausschließlich aufgrund der thermischen Wirkung des brennenden Lichtbogens und nicht durch Zerspanen.

Beim CAMC-Verfahren wird eine plattenförmige Elektrode verwendet. Eine Spülung des Arbeitsbereiches wird über externe Pumpen realisiert. Ähnlich wie beim Heißdrahtschneiden von Kunststoffen arbeitet sich die Elektrode durch das Material. Das Material wird hierbei jedoch nicht nur aufgeschmolzen, sondern durch die Spülung aus der Schnittfuge abtransportiert.

Im Vergleich zu spanenden Schneidverfahren zeichnen sich thermischen Schneidverfahren durch geringe Reaktionskräfte zwischen Werkstück und Werkzeug aus. Dies erlaubt eine deutlich einfachere (weniger steife und massive) Konstruktion des für eine Schneidaufgabe benötigten Handhabungssystems. Insbesondere bei Vorort-Zerlegungen, wie dies z.B. beim Rückbau kerntechnischer Anlagen notwendig wird, kann der Aufwand zum Erreichen der notwendigen Steifigkeit für das Handhabungssystem so erheblich reduziert werden.

Ein weiterer Vorteil ergibt sich aus der Unempfindlichkeit des Prozesses gegenüber dem Umgebungsdruck. Dieser ist bei Schneidarbeiten unter Wasser, aufgrund des hydrostatischen Druckes der Wassersäule erhöht. Die thermischen Schneidverfahren, autogenes Brennschneiden und Plasmaschneiden, reagieren hierauf prozessbedingt empfindlich. Hieraus resultiert schon bei geringen Wassertiefen ein signifikanter Leistungsverlust hinsichtlich der erreichbaren Schnitttiefe [Koc89] [Ver99]. Die Verfahren CAMG und CAMC sind hingegen, aufgrund des geringen Abstandes zwischen Elektrode und Werkstück, unempfindlich gegenüber dem Umgebungsdruck [Ver05].

Schon seit den 1950er Jahren [Dav57] wird auf dem Gebiet der Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung Entwicklungsarbeit geleistet. Bisher ist es jedoch nicht gelungen, hinreichend zufriedenstellende CAMC- und CAMG-Prozesse zu realisieren. Bei ho-

hem Anlagenaufwand ist der Elektrodenverschleiß hoch und die Prozessstabilität gering. Ein automatisierter Betrieb ist schwer und nur bei relativ einfachen und dünnwandigen Bauteilen möglich. Hier liegt die Hauptmotivation dieser Arbeit. Durch Erlangen des Verständnisses der ablaufenden physikalischen- und technischen Zusammenhänge, sowie durch Anpassung der Prozessparameter und durch Veränderungen der Anlagentechnik sollen die Verfahren CAMC und CAMG robuster, prozesssicherer und leistungsfähiger werden.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

2.1 Einteilung der abtragenden Fertigungsverfahren

Die Elektrokontaktbearbeitung ist ein abtragendes Fertigungsverfahren. Nach DIN 8580 [DIN80] werden die abtragenden Fertigungsverfahren der Hauptgruppe Trennen zugeordnet und sind dadurch gekennzeichnet, dass sie Stoffteilchen von einem festen Körper auf nichtmechanischem Wege abtragen. In Bild 2.1 ist die Untergliederung der abtragenden Verfahren nach DIN 8580 dargestellt. Die Elektrokontaktbearbeitung lässt sich nach der hier getroffenen Einteilung der Untergruppe „Abtragen durch elektrische Gasentladung“ zuordnen. Allen Verfahren dieser Gruppe ist gemein, dass die für den Trennprozess benötigte thermische Energie aus einer elektrischen Gasentladung gewonnen wird. Bei Gasentladungen fließt ein elektrischer Strom durch ein gasförmiges Medium. Stark vereinfacht lassen sich die hierbei auftretenden Vorgänge wie folgt beschreiben:

Die von einer Stromquelle erzeugte Potentialdifferenz zwischen zwei Elektroden, bewirkt ein elektrisches Feld E im Gasraum. Damit ein elektrischer Strom fließen kann, ist es notwendig, dass in diesem Gasraum frei bewegliche Ladungsträger vorhanden sind. Hierzu muss das im Normalzustand neutrale Gas ionisiert werden. Eine Ionisation kann hierbei auf unterschiedliche Weise ausgelöst werden. Bei der Ionisation durch Strahlung werden Elektronen durch Stoßionisation aus ihrer Bindung „herausgeschlagen“. Bei der Feldionisation werden die Elektronen aufgrund eines ausreichend starken elektrischen Feldes aus ihrer Bindung gelöst. Unter gewissen Bedingungen ist es auch möglich, dass sich Ladungsträger aus den Oberflächen der Elektrode lösen. Hierbei können aus der negativen Kathode nur Elektronen und aus der positiven Anode nur positive Kationen ausgelöst werden. Befinden sich im Elektrodenzwischenraum ausreichend Ladungsträger, so kann durch deren Bewegungen ein elektrischer Strom fließen. Hierbei werden die Elektronen an der Anode absorbiert und die Kationen werden an der Kathode neutralisiert. Diesen elektrisch leitfähigen Zustand des Gases bezeichnet man als Plasma. Der Begriff Plasma geht auf Irving Langmuir (1928) zurück. Der Plasmazustand wird auch als vierter Aggregatzustand bezeichnet. „Nach Langmuir handelt es sich bei Plasma um ein hochionisiertes Gas. In dem die Trägerkonzentration so groß ist, dass gegenüber dem neutralen oder nur schwach ionisierten Gas besonders, auf Wechselwirkung der Ionen, Elektronen, angeregten Atome und Strahlungsquanten beruhende Eigenschaften auftreten. Das Plasma muss als Gemisch von Neutralgas, Elektronengas, Ionengas, Gas aus angeregten Atomen sowie Lichtquantengas aufgefasst werden.“

In Abhängigkeit des Umgebungsdruckes werden Plasmen in Niederdruck- ($p < 1,33 \times 10^2 \text{ Pa}$), Mitteldruck- ($p < 1,33 \times 10^4 \text{ Pa}$) und Hochdruckplasmen ($p > 1,33 \times 10^4 \text{ Pa}$) eingeteilt. Von Bedeutung für abtragende Fertigungsverfahren ist nur das Hochdruckplasma, welches durch eine hohe Ladungsträgerdichte von

10^{20} m^{-3} gekennzeichnet ist [Mie74]. Das Hochdruckplasma im thermodynamischen Gleichgewicht wird als „Thermisches Plasma“ bezeichnet.

Durch Kollisionen der Ladungsträger untereinander und durch das Auftreffen der Ladungsträger an Kathode und Anode wird thermische Energie frei. Abhängig von der Zusammensetzung des Gases, dem herrschenden Umgebungsdruck sowie von Strom und Spannung in der Lichtbogensäule, treten hier Temperaturen von 5.000 K – 16.000 K auf [Sch85]. Die abtragenden Verfahren mittels elektrischer Gasentladung nutzen alle die hierbei freiwerdende Wärmeenergie. Im Detail unterscheiden sich die Wirkmechanismen jedoch deutlich voneinander. Daher wird eine weitere Unterteilung in „Abtragen mittels Plasma“, „Abtragen mittels Funken“ und „Abtragen mittels Lichtbogen“ vorgenommen [DIN90]. Die Unterschiede dieser Verfahrensgruppe werden in den folgenden Kapiteln erläutert.

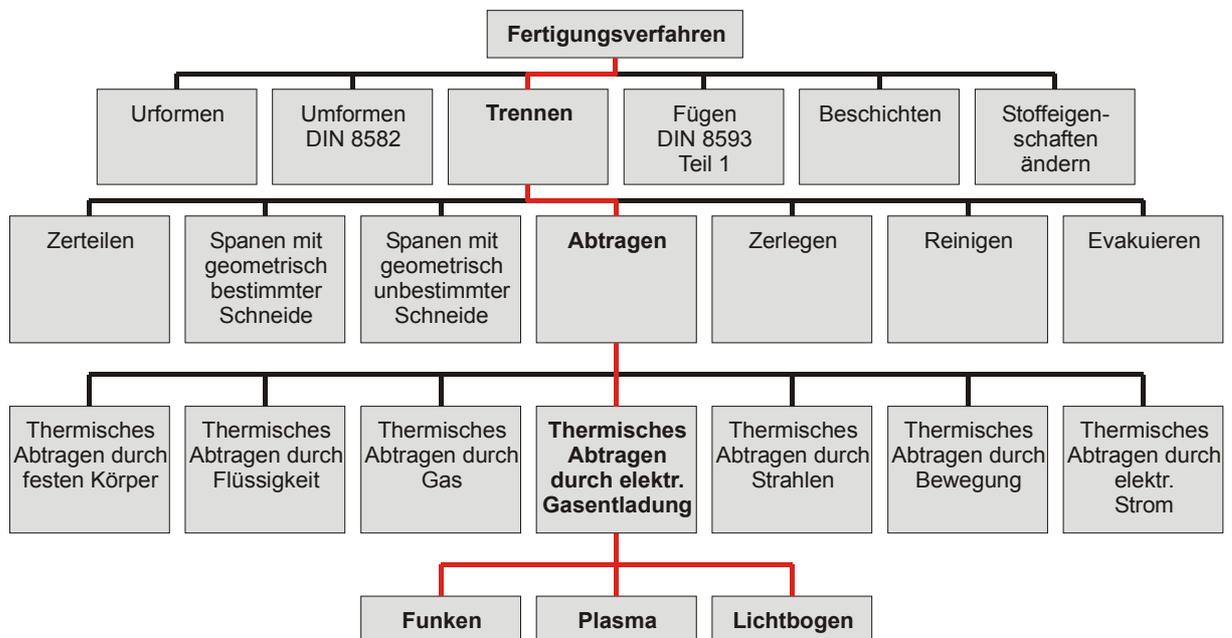


Bild 2.1: Unterteilung der Abtragenden Fertigungsverfahren nach DIN 8580 und DIN 8590

2.1.1 Abtragen durch Plasma

Grundvoraussetzung einer jeden Gasentladung ist die elektrische Leitfähigkeit des Gases zwischen den Elektroden und somit ein Plasmazustand des Gases. Ein Plasmazustand tritt bei allen abtragenden Fertigungsverfahren durch elektrische Gasentladung auf. Die Bezeichnung „Abtragen durch Plasma“ ist insofern irreführend. Geprägt ist diese Begrifflichkeit von dem Fertigungsverfahren Plasmaschneiden. Dieses Verfahren wird auch als Plasmaschmelzschneiden bezeichnet. Bei thermischen Fertigungsverfahren wird mit dem Begriff Plasma eine Sonderform der Gasentladung bzw. des Lichtbogens bezeichnet. Hier wird von Plasma gesprochen,

wenn ein Lichtbogen eingeschnürt und somit in seiner Energiedichte erhöht wird. Diese Einschnürung erfolgt bei dem Plasmaschneiden wie auch beim Plasmaschweißen (kein Fertigungsverfahren der Gruppe Trennen) durch eine gekühlte Düse und den Pincheffekt. In Bild 2.2 ist der Unterschied zwischen einem frei brennenden Lichtbogen (hier WIG-Lichtbogen) und einem eingeschnürten Lichtbogen (Plasmalichtbogen) sowie die unterschiedliche Gestaltung der Brenner dargestellt. Die räumliche Konzentration des Lichtbogens führt zu einer deutlich höheren Energiedichte und somit zu einer höheren Temperatur sowie zu einer besseren Lagestabilität [Rug93]. Bei den meisten Anwendungen des Plasmaschneidens wird mit einem, zwischen einer Elektrode (Kathode) und dem Werkstück (Anode), übertragenem Gleichstromlichtbogen gearbeitet. Über den Druck und die Zusammensetzung des zugeführten Gases (Plasmagas) kann der Lichtbogen in seinen Eigenschaften stark beeinflusst werden. So verändern sich die Wärmeleitungseigenschaften und die Konvektion der Wärme aus dem Lichtbogenbereich in die Umgebung deutlich. Eine weitere Einschnürung der Lichtbogensäule kann durch die seitliche rotations-symmetrische Eindüsung von Zusatzgas erfolgen. Hierzu eignen sich insbesondere Gase, die eine gute Wärmeleitfähigkeit und ein hohes Ionisationspotential aufweisen (z.B. Helium oder Argon/Wasserstoff-Gemische) [Dil06].

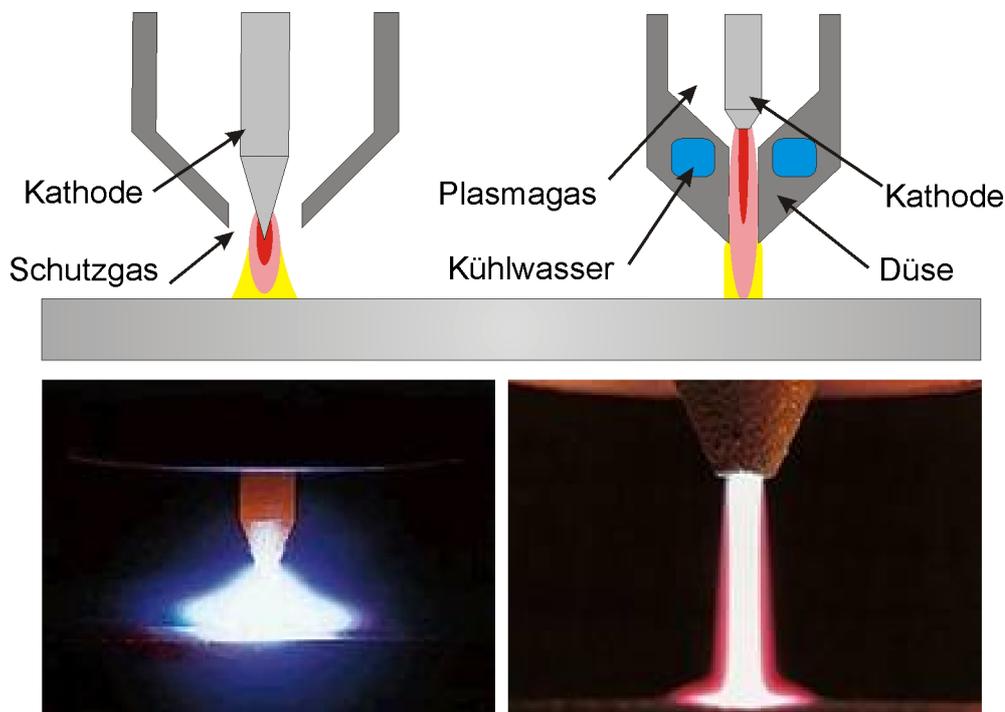


Bild 2.2: WIG-Schweißbrenner und -Lichtbogen (links), Plasma-Schweißbrenner und -Lichtbogen (rechts) im Vergleich (Bildquelle: Knautz GmbH)

Aufgrund der Kombination aus hoher Temperatur (eingeschnürter Lichtbogen) und kinetischer Energie (Plasmagasströmung) wird das Werkstückmaterial nicht nur aufgeschmolzen, wie z.B. beim WIG-Lichtbogen, sondern aus der Prozesszone

gespült. Der so erzeugte Materialabtrag ermöglicht ein Schneiden des Werkstücks. Diese Sonderform des Lichtbogens wird umgangssprachlich auch als Plasmastrahl bezeichnet, obwohl es sich im physikalischen Sinne nicht um einen Strahl handelt.

In Bild 2.3 sind die einzelnen Prozessphasen des Plasmaschneidens schematisch dargestellt. Die Zündung des Plasmalichtbogens erfolgt üblicherweise durch eine angelegte hochfrequente AC-Hochspannung zwischen Düse und Kathode. Das so erzeugte elektrische Wechselfeld bewirkt eine Vorionisation des Gases im Zwischenraum. Nach erfolgtem Durchschlag ist der Gasraum zwischen Kathode und Düse ionisiert, wodurch sich ein Lichtbogen (Pilotlichtbogen) aufbauen kann. Um ein Durchzünden des Lichtbogens auf das Werkstück zu ermöglichen, ist der Stromkreis des Pilotlichtbogens durch einen Widerstand erhöht. Infolge der Strömung des zugeführten Plasmagases, wird ionisiertes Gas durch die Düse in Richtung des Werkstückes befördert. Hierdurch kann der Lichtbogen von der Düse auf das Werkstück überspringen. Sobald die Gerätesteuerung einen Stromfluss über das Werkstück registriert, wird die Düse potentialfrei geschaltet und der Lichtbogen brennt zwischen Elektrode und Werkstück [Rug93] [Sch85]. Je nach Schneidanwendung und eingesetzter Anlagentechnik wird der Arbeitsstrom im Bereich von ca. 20 – 900 A konstant geregelt. Die Arbeitsspannungen liegen hierbei, abhängig von der zu schneidenden Materialstärke, dem Arbeitsabstand, dem Umgebungsmedium und der Gaszusammensetzung, im Bereich von 110 – 280 V [Bac06a]. Da bei dieser Betriebsweise ein Lichtbogen zwischen Werkstück und Kathode brennt, spricht man in diesem Zusammenhang auch vom „Plasmaschneiden mit übertragenem Lichtbogen“

Beim „Plasmaschneiden mit nicht übertragenem Lichtbogen“ brennt der Lichtbogen zwischen der Kathode und der Brennerdüse. Anders als bei der zuvor beschriebenen Variante, bei der dieser Betriebszustand nur in der Startphase auftritt, wird dieser hier beibehalten. Das zugeführte Plasmagas wird im Düsenkanal vom Lichtbogen aufgeheizt, teilweise dissoziiert und ionisiert, und verlässt die Düse als heißer Gasstrom. Dieser Gasstrom wird auch als „Plasmaflamme“ bezeichnet. Mit diesem Verfahren lassen sich Werkstoffe schneiden, die nicht elektrisch leitfähig sind (z.B. Kunststoffe und Textilien). Aufgrund der hohen thermischen Belastung der Düse sind die umsetzbaren Leistungen auf ca. 3 kW begrenzt [Rug93].

Das Plasmaschneiden mit übertragenem Lichtbogen wurde bereits in den fünfziger Jahren zur industriellen Anwendung gebracht. Verwendung fand dieses Verfahren zunächst hauptsächlich beim Schneiden von nicht brennschneidbaren Materialien, wie hochlegiertem Stahl, Kupfer oder Aluminium [Mat97]. Durch eine kontinuierliche Weiterentwicklung konnte die Schneidleistung und Schnittqualität stetig erhöht werden. Der Einsatz neuartiger Kathoden aus Hafnium ermöglichte die Verwendung von Sauerstoff und Luft als Plasmagas. Dies führte besonders im Schiffbau zu einer signifikanten Steigerung der Produktivität. Bei brennschneidbaren Werkstoffen ersetzt diese Technik, bis zu einer Materialstärke von ca. 40 – 80 mm, zunehmend das autogene Brennschneiden. Bei der neusten Generation von Plasmaschneidbrennern

konkurriert das Verfahren im Dünoblechbereich mit den bisher dominierenden Laserschneidverfahren [Kri06].

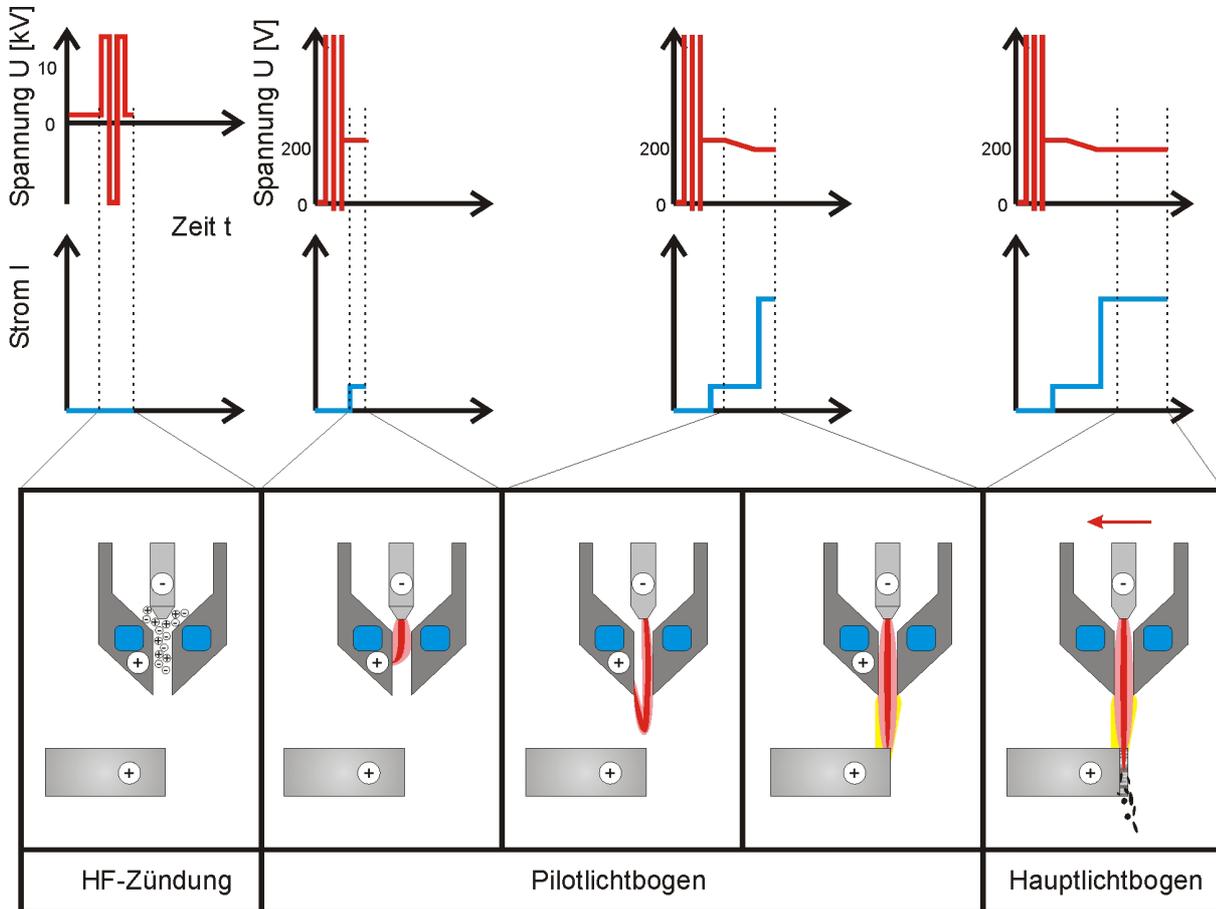


Bild 2.3: Schematische Darstellung der physikalischen Vorgänge beim Plasmaschneiden

2.1.2 Abtragen durch Funkenerosion

Die funkenerosive Bearbeitung, auch EDM (Electrical Discharge Machining) genannt, basiert auf der Funkenentladung zwischen einer elektrisch leitenden Elektrode (Werkzeug) und einem ebenfalls elektrisch leitenden Werkstück. Entwickelt wurde dieses Bearbeitungsverfahren 1945 von dem Ehepaar B.R. und N.I. Lazarenko. Bei Untersuchungen zur Reduzierung der elektroerosiven Schädigung von Schaltkontakten, wurden diese auf die materialabtragende Wirkung von Funkenentladungen aufmerksam und entwickelten die erste Maschine zur funkenerosiven Materialbearbeitung. Der damals zur Erzeugung und Steuerung der Entladungen entwickelte Funkengenerator wird als Lazarenko-Kreis bezeichnet. Das Prinzip wird noch heute in verbesserter Form in einigen Anwendungen verwendet [Dor01]. Eine industrielle Anwendung fand das Funkenerodieren erst 1954 [Wit97]. Diese Technologie wurde seither stetig weiterentwickelt und ist aus den heutigen Fertigungsprozessen, vor

allem im Werkzeug- und Formenbau sowie zur Bearbeitung von harten Werkstoffen, nicht mehr weg zu denken.

Bei dem EDM Verfahren findet die Bearbeitung in einem wasser- oder ölbasierten dielektrischen flüssigen Medium statt. Hierbei wird eine Elektrode im Abstand der Funkenspaltweite s_L (5 – 400 μm) zu einem Werkstück positioniert. Durch eine zwischen Elektrode und Werkstück angelegte Leerlaufspannung u_0 (60 – 300 V, DC) wird bei Überschreitung der Durchschlagsspannung (abhängig vom Arbeitsabstand und den Eigenschaften des Arbeitsmediums) eine Gasentladung initiiert. Über geeignete Regelungstechnik wird der Entladestrom i_e und die Entladedauer t_e geregelt. Abhängig von der angestrebten Abtragsgeschwindigkeit und der gewünschten Oberflächengüte wird der Entladestrom i_e im Bereich von 1 – 300 A und die Entladedauer t_e im Bereich von 0,5 – 2000 μs eingestellt [Klo06].

In Bild 2.4 sind die einzelnen Prozessphasen der funkenerosiven Bearbeitung schematisch dargestellt. Zunächst wird der Arbeitszwischenraum durch Anlegen einer hohen Leerlaufspannung ionisiert. Diese Ionisation erfolgt bevorzugt an Rauheitsspitzen, da hier die elektrische Feldstärke am größten ist. Nach der so initiierten elektrischen Entladung brennt ein Lichtbogen zwischen Elektrode und Werkstück. Aufgrund der hohen Energiedichte an den Fußpunkten des Lichtbogens, werden das Werkstück- und auch das Elektrodenmaterial örtlich aufgeschmolzen und zum Teil verdampft. Im dielektrischen Medium bildet sich gleichzeitig eine Gaskaverne aus. Durch Abschalten der Spannung wird die Entladung aktiv gestoppt und es kommt zu einer Implosion die Gaskaverne. Die kinetische Energie dieser Implosion zerstäubt das schmelzflüssige Material in feine Partikel und lässt es im Arbeitsmedium erstarren. Durch eine Spülströmung im Arbeitsspalt werden die Materialpartikel aus der Bearbeitungszone heraustransportiert.

Da die Brenndauer des Lichtbogens nur kurz und die übertragenen Ströme gering sind, spricht man hier von Funkenentladungen. Durch eine periodische Wiederholung dieses Vorgangs mit einer Entladefrequenz f_e von ca. 10 - 80 kHz erfolgt ein kontinuierlicher Materialabtrag.

Durch Einstellen der Entladeenergie pro Entladung W_e (0,1 – 1000 mJ) kann die Oberflächenqualität (R_a 0,5 – 10 μm), die Tiefe der beeinflussten Randzone sowie die Abtragsraten v_w ($4 \cdot 10^{-6}$ bis 1.4 kg/h) in einem weiten Bereich variiert werden. Hauptsächlich kommt das EDM-Verfahren in Senk- und Drahterodiermaschinen zur Anwendung. Eine deutliche Erweiterung der Anwendungsmöglichkeiten erschließt die sogenannte Planetärerosion. Hierbei wird der Senkbewegung eine translatorische Bewegung in der Ebene überlagert. Dadurch lassen sich, ähnlich wie beim Fräsen, Hinterschneidungen und andere komplexe Geometrien erzeugen. Die Vielseitigkeit des Verfahrens begründet den Einsatz im Werkzeug- und Formenbau. Die vergleichsweise geringe Bearbeitungsgeschwindigkeit steht allerdings einer Anwendung in der Großserie entgegen. [Klo06]

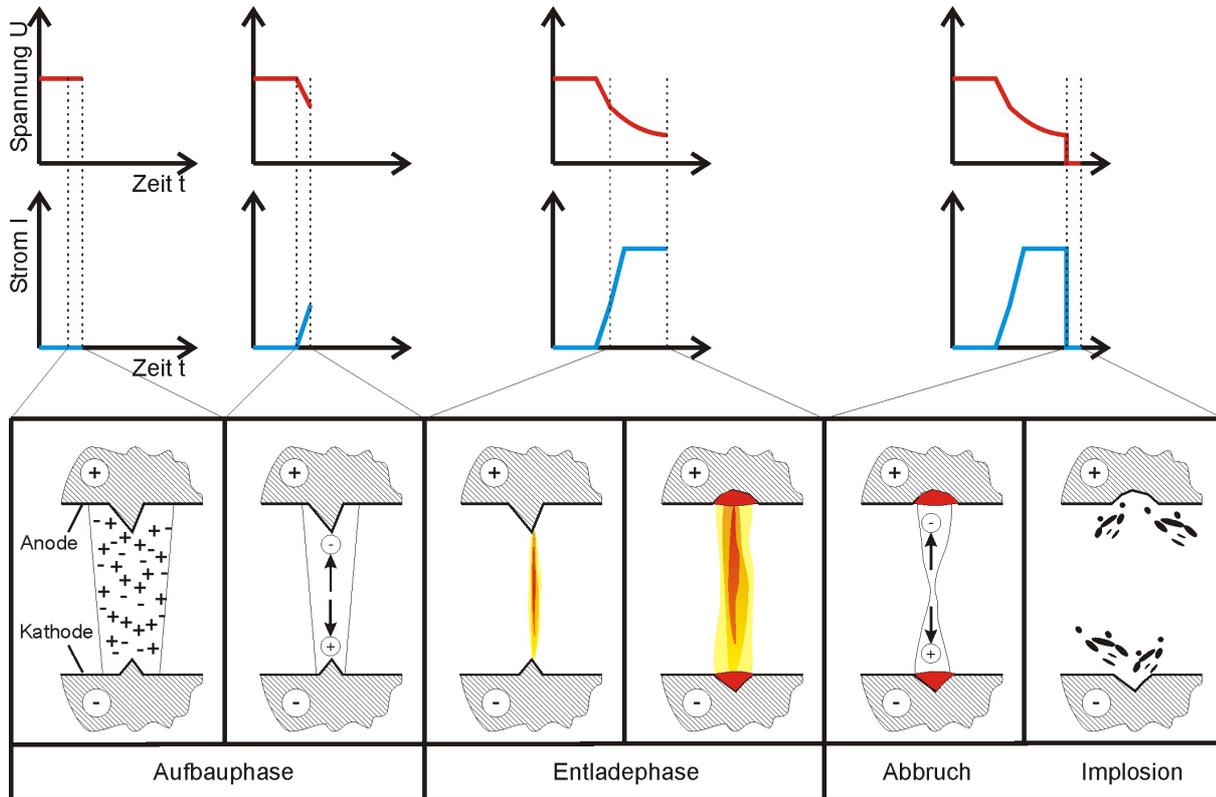


Bild 2.4: Schematische Darstellung der physikalischen Vorgänge bei der funkenerosiven Bearbeitung

2.1.3 Abtragen durch Lichtbogenentladung

Den Gruppen „Abtragen durch Plasma“ und „Abtragen durch Funkenerosion“ können Bearbeitungsverfahren zugeordnet werden, die sich in der Fertigungstechnik etabliert haben. Beim „Abtragen durch Lichtbogenentladung“ verhält sich dies anders. Die in dieser Arbeit behandelte Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung kann jedoch dieser Verfahrensgruppe zugeordnet werden. Die geometrische Anordnung von Elektrode und Werkstück sowie die Abtragsmöglichkeiten (Senken, Schneiden usw.) sind ähnlich wie bei der funkenerosiven Bearbeitung. Die physikalischen Vorgänge im Prozess unterscheiden sich jedoch von der EDM-Bearbeitung. Die unterschiedlichen Verfahrensvarianten sowie die Wirkmechanismen der Elektrokontaktbearbeitung werden in den folgenden Kapiteln detailliert dargestellt.

2.2 Elektrokontaktbearbeitung

Die Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung ist bis heute nur vereinzelt zur industriellen Anwendung gekommen obwohl bereits in den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts, insbesondere in der ehemaligen Sowjetunion, umfangreiche Entwicklungsarbeit geleistet wurde. Davidov [Dav57] legte bereits 1957 die Begrifflichkeiten fest und traf eine Einteilung der elektrischen Bearbeitungsverfahren. Die Mehrzahl der späteren Veröffentlichungen greift auf diese Vorschläge zurück. Die heutige Bezeichnung

Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung leitet sich von der hier eingeführten Bezeichnung EKB (Elektrokontaktbearbeitung) ab. Davidov teilt die elektrischen Bearbeitungsmethoden in die Grundformen elektromechanische, elektroerosive, elektroerosiv-chemische und elektrochemische Methoden ein. Darüber hinaus teilt er die Verfahren hinsichtlich ihrer „Impulsgenerierung“ und somit nach der Art der Initiierung der elektrischen Entladung ein. Bei der EKB wird der elektrische Kontakt zwischen der verschleißenden Elektrode und dem Werkstück durch direkten mechanischen Kontakt erzeugt. Davidov bezeichnet dies als „mechanische Generierung von elektrischer Entladung“. Hieraus leitet sich auch die Bezeichnung des Verfahrens ab. Abhängig von den Eigenschaften der verwendeten Stromquellen, sowie den Wechselwirkungen zwischen Elektrode und Werkstück, ergeben sich verschiedene Verfahrensvarianten. Allen gemeinsam ist, dass nach dem elektrischen Kontakt infolge Joulescher Erwärmung oder infolge eines Lichtbogens Werkstückmaterial aufgeschmolzen und/oder verdampft wird. Dieses Material wird dann auf unterschiedliche Weise aus der Wirkzone entfernt, wodurch ein Materialabtrag erfolgt. Hierbei kann der Prozess kontinuierlich, also impulsfrei, ablaufen, oder mit stochastisch ablaufenden Unterbrechungen des elektrischen Kontaktes bzw. des Stromflusses. In [Dav57] werden diese Unterschiede der Verfahrensvarianten beschrieben. Die elektrothermischen Vorgänge an der Kontaktstelle werden in drei physikalische Wirkmechanismen unterschieden, die Joulesche Erwärmung, die Kombination aus Joulescher Erwärmung und Lichtbogenerwärmung sowie die reine Erwärmung durch einen Lichtbogen. Abhängig von den verwendeten elektrischen Parametern teilt [Dav57] die Elektrokontaktbearbeitung in die im Bild 2.5 dargestellten vier Grundformen ein.

In Tabelle 2.1 sind die zu den einzelnen Grundformen gehörenden Parameter, mögliche Anwendungsfelder, die erzielbaren Abtragsraten sowie die Energieeffizienz der EKB mit rotierender Elektrode dargestellt.

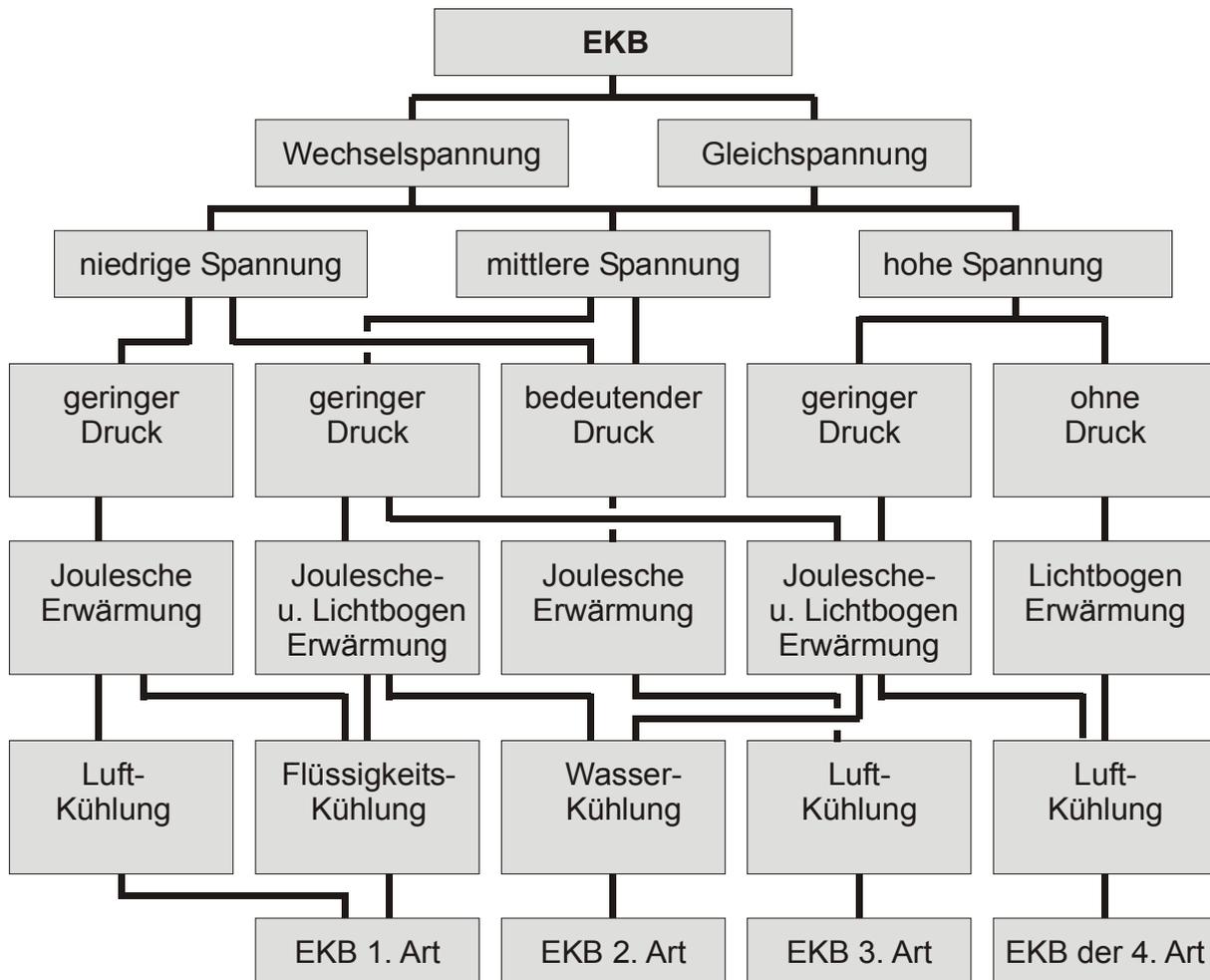


Bild 2.5: Grundformen elektromechanische, elektroerosive, elektroerosiv-chemische und elektrochemische Methoden

Tabelle 2.1: Technische Charakterisierung der Elektrokontaktbearbeitung nach Davidov [Dav57]

Bearbeitungsart (Anwendungen)	Spannung [V]	Strom [A]	Abtrags- rate [mm ³ /min]	spez. Energiebe- darf [kWh/kg]	Medium
1. Art					
(Schleifen von Platten aus Titan, Manganstählen und Legierungen mit Nickelcarbiden)	7-9 (AC)	300	0,06	12	Luft
	24 (DC)	80	0,08	18	Öl
(Trennen von Baustahl)	24 (DC)	200	1,3	7,4	Öl
2. Art					
(Schleifen von Kugeln aus z.B. hochlegiertem Chromstahl)	30 (AC)	5000	7	10	Wasser
(Schleifen von Schiffschrauben aus z.B. Bronze)	36 (DC)	1000	14,2	1,85	Wasser
3. Art					
(Schleifen von z.B. Chrom-Nickel-Titan-Legierung)	30 (AC)	2800	3,6	20	Luft
4. Art					
(Schleifen von z.B. Chrom-Nickel-Titan-Legierung)	21 (AC)	15000	80	1,5	Luft

Die in dieser Arbeit behandelte Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung (CAMX) lässt sich der EKB der 4. Art (geringer Druck, hohe Spannung) zuordnen, obwohl mit Gleichstrom-Schweißstromquellen und dem Medium Wasser gearbeitet wird. Die hierbei auftretenden Prozessphasen sind in Bild 2.6 schematisch dargestellt. Die mit ca. 35 – 60 V DC vergleichsweise geringe Potentialdifferenz zwischen Elektrode und Werkstück verhindert eine berührungslose Entladung. Erst bei einem mechanischen

Kontakt zwischen Elektrode und Werkstück kommt es zu einem Stromfluss in Form eines Kurzschlusses. Die hierbei auftretenden hohen Stromdichten, führen zu einer lokalen Erhitzung der Kontaktstelle und in deren Folge zum Zünden eines zwischen Elektrode und Werkstück brennenden Lichtbogens. Durch die thermische Energie des Lichtbogens werden Werkstück- und Elektrodenmaterial aufgeschmolzen und verdampft. Eine Spülströmung, je nach Verfahrensvariante unterschiedlich erzeugt, fördert das aufgeschmolzene Material aus dem Arbeitsspalt. Ebenfalls abhängig von der Verfahrensvariante und den gewählten Prozessparametern kommt es dann aus unterschiedlichen Gründen zum selbstständigen Erlöschen des Lichtbogens. Durch eine kontinuierliche Vorschubbewegung der Elektrode wird dann erneut ein Materialkontakt hervorgerufen, so dass sich die beschriebenen Vorgänge entsprechend diskontinuierlich wiederholen.

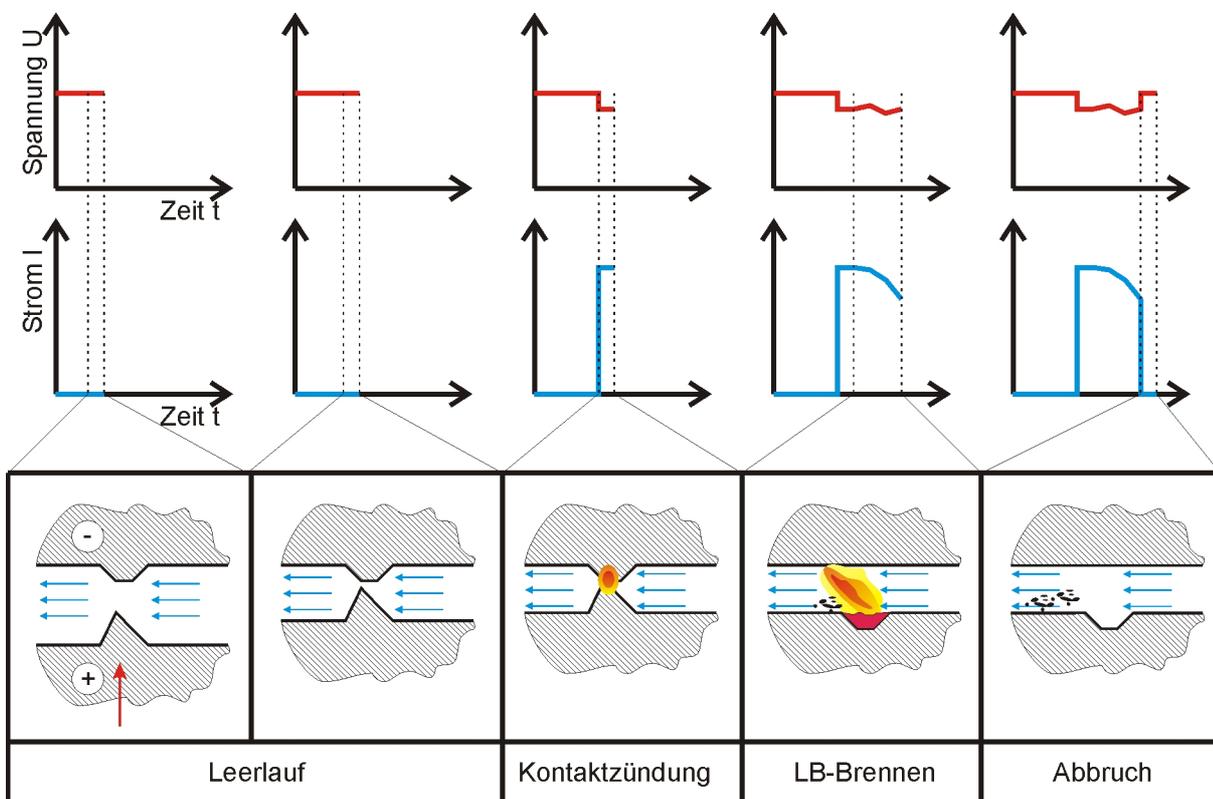


Bild 2.6: Schematische Darstellung der physikalischen Vorgänge bei der Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung

Aufgrund des Leistungspotentials der Elektrokontaktbearbeitung mit rotierender Elektrode empfahl Davidov bereits 1957 die Weiterentwicklung und den Einsatz des Verfahrens in der Massenfertigung. Livschiz [Liv59] berichtet 1959 von einer frühen industriellen Anwendung dieses Verfahrens zur Beseitigung von 10 -12 mm dicken schadhafte Schichten an Gussblöcken mit Abmessungen von 1300 x 480 x 480 mm. Hier wurde mit Wechselstrom und einer Spannung von $U = 25-35 \text{ V}$ gearbeitet. Die verwendete Werkzeugelektrode aus Baustahl wurde mit

einer Umfangsgeschwindigkeit von 40 m/s betrieben und mit Druckluft gekühlt. Es wird hier von einer sehr effizienten Bearbeitung insbesondere von Werkstoffen mit einer geringen thermischen Leitfähigkeit und einem hohen spez. elektrischem Widerstand berichtet. Der Werkzeugelektrodenverschleiß γ wird als zu vernachlässigend bewertet. Konkrete Angaben nach der üblichen Verschleißdefinition (siehe Gleichung 2.1) werden nicht gemacht.

$$\gamma = \frac{\text{Volumenverlust des Werkzeuges (Verschleiß)}}{\text{Volumenverlust des Werkstücks (Abtrag)}} \cdot 100\% \quad (2.1)$$

Davidov gibt 1966 erstmals Konstruktionsrichtlinien für den Bau von EKB-Maschinen mit rotierender Elektrode [Dav66a]. Hier wird für die EKB die Verwendung von Wechselstromquellen mit einer Spannung von 21 - 36 V AC (EKB Art 4) empfohlen. Der Materialabtrag aus der Wirkzone zwischen Elektrode und Werkstück wird hierbei hauptsächlich auf die hohen Stromanstiegsgeschwindigkeiten zurückgeführt. Zur Unterstützung des Materialabtrags wird der Einsatz von Druckluft empfohlen. Auf die besondere technische Herausforderung, die Arbeitsströme im Bereich von mehreren kA auf die drehende Werkzeugelektrode zu übertragen, wird ebenfalls eingegangen. Empfohlen wird die Stromübertragung mit Kohlebürsten auf einen entsprechend gestalteten Kontaktring aus Kadmium-Bronze. Hierbei wird für die auftretenden mechanischen- und elektrischen Verluste eine auf die Kontaktringflächen bezogene maximale spezifische Belastung von 100 W/dm² (1W/cm²) angegeben und eine Kühlung mittels Luft oder Wasser empfohlen.

Davidov berichtet 1966 [Dav66b] von Untersuchungen zur Anwendung der EKB mit „Elektrodenoberflächen, die nur die Vorschubbewegung ausführen“. Diese neue Verfahrensvariante wird hier als Stoßen bezeichnet. Berichtet wird in dieser Veröffentlichung über Anwendungen dieses Verfahrens beim Säubern von Gussteilen und der Herstellung von Einsenkungen und Löchern in Stahlteile. Berichtet wird von zwei Versuchsanordnungen. Zum Einen wurde eine verschleißende Kohlelektrode verwendet, zum Anderen wurden zwei Werkstücke zum gegenseitigen Materialabtrag eingesetzt. Durchgeführt wurden diese Untersuchungen an Atmosphäre. Das Spülen der Abtragsfläche erfolgte durch Pressluft. Unter der Verwendung von Wechselstromquellen wird hier, bei Spannungen im Bereich von 12 – 22,8 V DC, von einem guten Aufschmelzen und Abtransport der Schmelze berichtet. Die Lichtbögen zünden durch Kontakt und verlöschen selbstständig. Bei höheren Spannungen wird von der Ausbildung von stationären Lichtbögen berichtet, die zu einer Erhöhung der Oberflächenrauheit führen. Die auftretenden Prozessströme lagen im Bereich von 3000 – 3700 A. Beim Abtragen mit Kohlelektroden wurden Abtragsleistungen von 10 – 20 kg/h, bei einem spezifischen Energieverbrauch von 2,3 - 3,3 kWh/kg, erreicht. Bei dem gegenseitigen Materialabtrag liegen die Abtragsleistungen bei 15 - 38 kg/h und der spezifische Energieverbrauch bei 0,9 - 1,5 kWh/kg.

Nachdem sich die sowjetischen Wissenschaftler zunächst um die Steigerung der Leistungsfähigkeit und um praktische Anwendungen der EKB bemühten, wurden ab Ende der 60er Jahre auch umfangreiche Untersuchungen zu den physikalischen Vorgängen im Prozess durchgeführt. So untersuchte z.B. [Mil69] 1969 die U/I-Kennlinie des Prozesses an Luft näher. Hierbei wird berichtet, dass die Lichtbogen-spannung sich für die Mehrzahl der Anwendungen durch die Gleichung (2.2)

$$U_{lb} = 27,5 + 0,032 \cdot L_{LB} \quad (2.2)$$

berechnen lässt. Es wird davon ausgegangen, dass die Summe von Anoden- und Kathodenfallspannung unabhängig vom Prozessstrom konstant ist und 27,5 V beträgt. Bei gemessenen Lichtbogenlängen l_{LB} von 0,25 – 1,5 mm werden die in Tabelle 2.2 aufgeführten Gradienten angegeben.

Tabelle 2.2: Stromabhängige Spannungsgradienten in der Lichtbogensäule der EKB an Atmosphäre nach [Mil69]

Strom	Gradient
290 A	15 V/mm
385 A	20 V/mm
440 A	23 V/mm

Der Anstieg der Lichtbogen-spannung mit steigendem Prozessstrom wird auf eine Veränderung der Gradienten des Potentials in der Bogensäule und einer Veränderung der Bogensäule zurückgeführt. Zu einem anderen Ergebnis kommt Rajabov [Raj83]. Die beim EKB (Art 4) im Arbeitsmedium Wasser auftretenden Lichtbögen werden hier als Kurzlichtbögen beschrieben, die mit einer „quasistationären Nieder-spannungsfunkenentladung bei minimaler Spannung“ in dem nur ca. 0,02 – 0,03 mm Spalt zwischen Elektrode und Werkstück brennen. Aufgrund der geringen Länge des Lichtbogens wird hier davon ausgegangen, dass die Lichtbogensäule quasi nicht existiert.

Parallel zu den umfangreichen Bemühungen die Vorgänge bei der EKB mathematisch zu beschreiben, wurde die Leistungsfähigkeit der in der ehemaligen Sowjetunion betriebenen Anlagen immer größer. So berichtet Saizev [Sai82] von Prozessparametern im Bereich von 60 – 750 kVA mit Wechselstrom und von 65 – 150 kVA mit Gleichstrom. Die erreichten Abtragsraten werden mit 20 – 70 kg/h und kurzzeitig sogar bis zu 160 kg/h angegeben. Im Vergleich zum Bandsägen konnte die Arbeitsproduktivität durch die Verwendung der EKB zum Trennen von Rohren somit um das 5 – 10 fache gesteigert werden [Vol85]

Semjonov [Sem83] beschreibt die Wanderbewegung des Lichtbogens im Spalt zwischen Elektrode und Werkstück, bei dem Umgebungsmedium Luft und Wechselstrombetrieb. Nach Auswertung von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen, unterscheidet der Autor hier in sechs Stadien der Lichtbogenentladung, die in Tabelle 2.3 aufgeführt sind:

Tabelle 2.3: Stadien der Lichtbogenentladung bei der EKB nach [Sem83],
 $v_u = 43 \text{ m/s}$, $D = 570 \text{ mm}$, $v_v = 2 \text{ mm/s}$, Medium Luft, $S = 40 \text{ mm}$

Stadium	Vorgänge	Dauer [ms]
1	Entstehung und Beginn der Lichtbogenentladung; lokalisierte Lichtquelle ist relativ dunkel	1
2	weitere Entwicklung der Lichtbogenentladung; Auftauchen einer Fackel aus dem mittleren Teil des Lichtbogens und Beginn des Auswurfes der Metallteilchen	0,6 - 1
3	heller Lichtbogen, Vergrößerung der Fackel	1
4	analog zu 3. Stadium bei einkanaliger Entladung; In einer Reihe von Fällen erscheinen 2 Entladungen gleichzeitig. Jede von ihnen kann als Teil einer gesamten Mehrkanallichtbogenentladung betrachtet werden, da die Existenz jedes der Kanäle die Entwicklung des Prozesses des Brennens der anderen Lichtbogenkanäle bedingt. Wenn die Stromstärke im Kanal wieder abnimmt, beginnt die Entladung intensiver zu wachsen. Dieses wird dadurch erklärt, dass die Gesamtstromstärke im elektrischen Kreis im Ergebnis nicht nur durch den Widerstand der Lichtbogenentladung bestimmt wird, sondern auch durch den Widerstand des Stromkreises der Anlage.	1
5	Verlöschen der Lichtbogenentladung, was an der Verringerung der Helligkeit des Lichtbogens erkennbar ist	1 – 1,5
6	Pause zwischen den Lichtbogenentladungen; In deren Verlauf Deionisierung des Zwischenelektrodenraumes Verlagerung des erwärmten und ionisierten Metaldampfs der Elektrode, Annäherung der Elektrode, so dass sich wieder die Bedingungen für das Entstehen der Lichtbogensäule herausbilden	4 - 5,5

Bei der Zeit für eine Spannungshalbperiode von 10 ms (50 Hz) beträgt demnach die Zeit der Lichtbogenentladung 4,6 – 5,5 ms und die Zeit für die Pausen 4 – 5,5 ms. Bemerkenswert an diesen Untersuchungen ist zum Einen, dass hier die gleichzeitige

Existenz von mehreren Lichtbögen beschrieben wird, die zum Teil ineinander übergehen, zum Teil aber auch die einzelnen Stadien getrennt voneinander durchlaufen. Darüber hinaus werden am Austritt der Werkzeugelektrode Verlängerungen der Lichtbögen bis zu 20 – 26 mm beobachtet. Der Autor berichtet auch über Berechnungen der elektromagnetischen Kräfte, die durch den Stromfluss im Lichtbogen hervorgerufen werden. Hierbei kommt er zu dem Schluss, dass sich durch geschickte Positionierung der elektrischen Anschlüsse die elektromagnetischen Kräfte zur Steigerung des Materialaustrags aus der Bearbeitungszone nutzen lassen könnten (Dieser Effekt ist auch in der Schweißtechnik bekannt und wird als „Blaswirkung“ bezeichnet). In [Sem84] wird nachgewiesen, dass durch die elektromagnetischen Kräfte auch die Bewegungsgeschwindigkeit des Lichtbogens in der Schnittfuge beeinflusst werden kann. Durch die Veränderung der hieraus resultierenden Kontaktzeit des Lichtbogenfußpunktes mit dem Werkstück kann die Breite der Wärmeeinflusszone (WEZ) des zu bearbeiteten Materials reduziert werden.

Während zunächst nur von EKB-Maschinen berichtet wurde die aus umgebauten Werkzeugmaschinen bestanden, schreibt Velikij [Vel85] von in Serie produzierten Karussell-Elektrokontakt-Drehmaschinen. Mit diesen Maschinen wurden insbesondere Oberflächen an rotationssymmetrischen Teilen aus Titanlegierungen bearbeitet. Es kamen scheiben- und tassenförmige Elektroden mit einem Durchmesser von bis zu 170 mm zum Einsatz. Der Verschleiß der 170 mm Werkzeugelektrode wird mit 5 % angegeben. Bei der Bearbeitung von Innenbohrungen mit 90 mm Werkzeugelektroden liegt dieser bei 20%. Zur Kühlung der Elektrode wird dem an Atmosphäre ablaufendem Prozess Wasser zugegeben. Bei Gleichstrom mit einer Spannung von 24 – 32 V und Arbeitsströmen von bis zu 3500 A wurden hier Abtragsleistungen von 1 – 1,5 cm³/s erreicht.

Bis ca. 1975 stammen die Veröffentlichungen zur EKB fast ausschließlich aus der ehemaligen Sowjetunion. Später beschäftigten sich auch Wissenschaftler in der ehemaligen DDR und in den USA mit dieser Technik. Peitzsch gibt 1989 einen umfangreichen Überblick über die hier als „nichtkonventionelle (elektrisch abtragende) Trennverfahren“ [Pei89] bezeichneten Fertigungsverfahren. Er fasst sowohl die in der Sowjetunion als auch die in der DDR erarbeiteten Erkenntnisse umfassend zusammen und unterscheidet die elektrisch abtragenden Trennverfahren in die beiden Gruppen elektroerosives Abtragen und elektrochemisches Abtragen bzw. deren Kombination. Für eine rotierende Scheibenelektrode und für eine umlaufende Bandelektrode unterteilt er diese in die folgenden Verfahren:

a) auf einem einzigen Wirkprinzip beruhende Trennverfahren

- Funkenerosives Trennen (FET)
- Lichtbogenerosives Trennen (LET)
- Elektrochemisches (anodisches) Trennen (ECT)

b) auf modifizierten Wirkprinzipien beruhende Trennverfahren

- Elektrokontakterosives Trennen (EKT)

c) auf mehreren kombinierten Wirkprinzipien beruhende Trennverfahren

- Anodenmechanisches Trennen (AMT)
- Elektrochemisch-Elektroerosives Trennen (ECCT)
- Elektrokontakterosives-Abrasives Trennen (EKAT)

Die „Bewegung zwischen Werkstück und Trennscheibe beim Trennen“ werden in die Formen Kippschnitt, Kappschnitt, Fahrschnitt, Schwimmschnitt sowie Drehschnitt eingeteilt und deren Produktivität für unterschiedliche Schnittaufgaben bewertet. Die hydrodynamischen Verhältnisse im Trennbereich werden eingehend beschrieben. Es erfolgt sowohl eine Einteilung der Arbeitsmedien (Flüssigkeiten und Gase), als auch eine Unterscheidung der Art der Medienzufuhr (durch die Werkzeugelektrode oder von Außen). Zur Berechnung der hydrodynamischen Wechselwirkungen zwischen dem Arbeitsmedium und der Werkzeugelektrode greift er auf die aus der Strömungslehre bekannten Lösungsansätze zurück. Die elektrischen Größen an der rotierenden Scheibenelektrode werden sehr ausführlich betrachtet. Insbesondere berechnet Peitzsch Potential-, Feldstärke-, Stromdichte- und Leistungsdichteverteilungen in der Elektrode sowie deren elektrischen Widerstand und überprüft die Ergebnisse zum Teil experimentell. Ebenso geht er auf die Vorgänge beim elektrochemischen Metallabtrag näher ein.

Die Wirkmechanismen bei den Trennverfahren FET, LET und EKT werden hier als „die gezielte Metallabnahme einer dünnen Oberflächenschicht infolge räumlicher Wärmequellen, welche Schmelz- und/oder Verdampfungsvorgänge in den Elektrodenflächen verursacht“ [Pei89] beschrieben.

Die konstruktiven Besonderheiten einer „Maschine zum elektrisch abtragenden Trennen“ werden beschrieben. Es wird sowohl auf die thermische Belastung der zur Stromübertragung verwendeten Kohlebürstenübertrager, als auch auf die geeignete Gestaltung der Werkzeugelektroden eingegangen. Ebenso werden eine Vielzahl von Elektrodentypen aus unterschiedlichen Werkstoffen und variiertes geometrischer Gestaltung vorgestellt. Der praxisbezogene Teil beschäftigt sich insbesondere mit der Eignung und Leistungsfähigkeit der Verfahren für das Trennen. Hierbei wird besonders auf das Trennen von Wolfram-Rundmaterial mit einem Durchmesser von bis zu 30 mm sowie von Rohren aus korrosions- und säurebeständigem Stahl mit einem Durchmesser von bis zu 32 mm eingegangen. Der bei dieser Anwendung auftretende Elektrodenverschleiß wird, abhängig vom Werkstoff, mit Werten zwischen 30% und 300% angegeben. Bezüglich der notwendigen Prozessströme stellt

Peitzsch fest, dass bei 6 mm Schnitttiefe eine Stromreduktion durch eine Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit erreicht werden kann. Dies ermöglicht den Einsatz von Gleichstromschweißquellen mit ca. 1000 A.

Schulze [Sch93] berichtet von einer praktischen Anwendung des „Elektrokontakttrennens“ an Atmosphäre zum Trennen von Stahlseilen. Neben der hohen Schneidleistung wird das auftretende Verschweißen der einzelnen Drahtseillitzen durch den Trennprozess als besonders vorteilhaft hervorgehoben. Hierdurch kann bei Stahlseilen ein Aufspleißen der Seile verhindert werden. Um dies zu erreichen, muss die Elektrodenbreite (aufgeschmolzene Materialmenge) so eingestellt werden, dass ausreichend Material zum Verschweißen der Litze zur Verfügung steht. Bei zu breiten Elektroden wird das Material nicht durch die Elektrode aus der Schnittfuge gefördert, sondern verbleibt an den Drahtenden. Bei geeigneter Parameterwahl kann der Prozess so eingestellt werden, dass an der Elektrode anhaftendes Werkstückmaterial den Elektrodenverschleiß weitestgehend kompensieren kann. Der auftretende Elektrodenverschleiß wird im Mittel mit ca. 1% angegeben. Als weiterer Vorteil des Verfahrens wird hervorgehoben, dass elektrisch nicht leitende Komponenten im zu trennenden Werkstück kein Ausschlusskriterium für das Verfahren darstellen. In gewissen Grenzen können derartige Werkstückbestandteile mit den Elektroden mechanisch abgetragen werden.

Pyatunin [Pya90] berichtet 1990 erstmals über eine Anwendung des EKB in kerntechnischen Anlagen. Als wesentliche Vorteile des Verfahrens gegenüber konventionellen Schneidverfahren werden die hohe Schneidleistung und der universelle Einsatz unter Wasser sowie an Atmosphäre hervorgehoben. Im Forschungsreaktor IRT des Kurtschatov-Instituts für Atomenergie wurde das „Elektrokontaktschneiden“ (ähnlich CAMC) beim Austausch eines Reaktortanks aus Aluminium verwendet. Hier wurden zwei Rohre aus Aluminium ($D = 220 \text{ mm}$, $s = 32 \text{ mm}$; $D = 780 \text{ mm}$, Rohrwandstärke $d = \text{k.A.}$) geschnitten. Die hierbei auftretenden Probleme mit instabilen Lichtbögen werden auf die schlechte Leitfähigkeit des sich bildenden Al_2O_3 zurückgeführt.

In weit größerem Umfang kam die EKB bei der Bergung des beschädigten Thermischen Schildes in Block 1 des KKW WWER-210 in Nowoworonesh zum Einsatz. Um Anschlagpunkte zur Bergung einzubringen, wurden in 30 – 60 mm starkem Material (der Werkstoff ist der Veröffentlichung leider nicht zu entnehmen) Schnitte mit einer Gesamtlänge von 50 m erzeugt. Diese Anwendung erfolgte unter Wasser. Über eine Spülung der Elektroden wird hierbei nicht berichtet. Durch einen Hinweis, auf den Austausch des Wassers im Reaktorbehälter nach den Schneidarbeiten, wird die erhebliche Wasserverschmutzung durch das Verfahren angedeutet [Pya90].

In den USA wurde die EKB mit rotierender Elektrode unter der Bezeichnung „arc saw“ publiziert und 1985 patentiert [Pat85]. Hier wird das Potential dieser Technik zum Schneiden von Werkstücken mit großen Wandstärken beschrieben. Das U.S. Department of Energy bewertet dieses Verfahren 1994 [N.N.94] als geeignetes Verfahren für Schneidaufgaben beim Rückbau kerntechnischer Anlagen, insbesondere

für Werkstückdicken von > 100 mm. Allerdings wird darauf hingewiesen, dass keine geeignete Anlagentechnik verfügbar ist. Eine entsprechende Anwendung findet die „arc saw“ erstmals im japanischen Versuchsatomkraftwerk „Japan Power Demonstration Reactor“. Das von dem Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) entwickelte System ist in Bild 2.7 dargestellt. Der Durchmesser der verwendeten Elektroden betrug 1000 mm. Gearbeitet wurde mit Gleichstrom und Arbeitsströmen von 20 – 40 kA. Zum Schneiden von 73 bis 260 mm plattiertem Stahl mit einer Gesamtschnittlänge von ca. 100 m wurden 24 Elektroden benötigt [Yok90] [NN97] [Nie97].



Bild 2.7: „arc saw cutting system“ Entwickelt und eingesetzt im japanischen Versuchsatomkraftwerk JPDR „Japan Power Demonstration Reactor“ [NN99]

Mit Ausnahme der Arbeiten am Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover werden zurzeit keine Untersuchungen zur EKB durchgeführt. Ebenso findet diese Verfahrensgruppe keine industrielle Anwendung mehr. Die ehemals in der Sowjetunion betriebenen Anlagen werden nicht mehr verwendet. Die letzte bekannte Veröffentlichung zu dieser Verfahrensgruppe ist aus dem Jahre 2002 [Smi02]. Hier berichtet Smirnow über eigene Simulationsergebnisse zur Temperaturverteilung im Lichtbogen sowie zum Wärmeübergang in das Werkstück und die Elektrode. Wegen mangelnder Verfügbarkeit einer entsprechenden Anlage konnten diese Ergebnisse nicht mit praktischen Schneiduntersuchungen abgeglichen werden.

Wissenschaftler des Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover beschäftigen sich hingegen seit Mitte der 80er Jahre kontinuierlich mit der EKB. Das Hauptaugenmerk der Aktivitäten galt stets einer praxisnahen Weiterentwicklung und Qualifizierung von Anwendungen für den Rückbau von kerntechnischen Anlagen. Der Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten lag hierbei vorwiegend auf dem Unterwassereinsatz dieser Verfahren. Geprägt wurde der Begriff der Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung, wobei die verschiedenen Verfahrensvarianten unter der Bezeichnung CAMX zusammengefasst wurden. CAM steht für Contact-Arc-Metal und X

als Platzhalter für die jeweilige Variante. Es haben sich folgende Bezeichnungen etabliert.

- | | |
|--|-----------------------------------|
| • Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen | Contact-Arc-Metal-Grinding (CAMG) |
| • Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden | Contact-Arc-Metal-Cutting (CAMC) |
| • Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bohren | Contact-Arc-Metal-Drilling (CAMD) |

Die Begriffe „Trennschleifen“, „Schneiden“ und „Bohren“ umschreiben hierbei die Eingriffsverhältnisse der Elektrode im Werkstück. Der Materialabtrag erfolgt jedoch thermisch, so dass diese Bezeichnungen nicht mit den in der DIN 8580 definierten Begriffen „Schleifen“, „Schneiden“ und „Bohren“ übereinstimmen. In den nachfolgenden Kapiteln werden diese einzelnen Verfahrensvarianten vorgestellt und beschrieben.

2.2.1 Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen (Contact-Arc-Metal-Grinding, CAMG)

Beim Contact-Arc-Metal-Grinding wird mit einer schnell drehenden scheibenförmigen Elektrode gearbeitet. Diese tritt an ihrer Umfangsfläche mit dem Werkstück in Wechselwirkung. Die geometrische Anordnung von Werkzeug und Werkstück entspricht dem Trennschleifen, woraus sich auch die Bezeichnung Grinding (engl. Schleifen) ableitet. In Bild 2.8 ist das Prinzip des Contact-Arc-Metal-Grinding schematisch dargestellt. Die mit einem geeigneten Antrieb versehene Werkzeugelektrode wird über einen Schweißgleichrichter mit Spannung versorgt. Durch die Rotation der Elektrode und deren Reibung in dem sie umgebenden Wasser entsteht eine Spülströmung. Der bei Kontakt zwischen Elektrode und Werkstück zündende Lichtbogen schmilzt das Werkstückmaterial oberflächennah auf. Die so entstehende schmelzflüssige Phase wird von der Wasserströmung aus der Wirkzone herausgespült. Ähnlich dem Trennschleifen entsteht auf diese Weise eine Schnittfuge. Der Materialabtrag erfolgt jedoch ausschließlich aufgrund der thermischen Wirkung des brennenden Lichtbogens und nicht durch mechanisches Zerspanen.

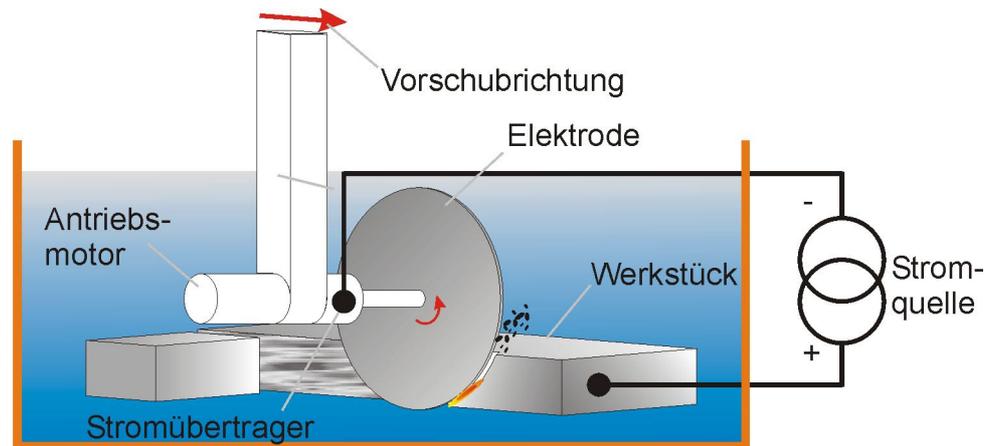


Bild 2.8: Schematische Darstellung des CAMG-Verfahrens

Das CAMG-Verfahren entspricht der bereits erwähnten Verfahrensvariante „arc saw“ [Pat85]. Für einen effektiven Trennprozess ist eine hohe Umfangsgeschwindigkeit der Werkzeugelektrode und damit ein entsprechend leistungsfähiger Antrieb notwendig. Die Übertragung der hohen Prozessströme auf die Antriebswelle erfordert entsprechende Stromübertrager. Hieraus resultierten bisher stets anlagentechnisch aufwendige Geräte. Philipp [Phi01] baute erstmals ein kleines und dennoch leistungsfähiges CAMG-Werkzeug (Bild 2.9). Hierbei verwendete er zur Übertragung des Arbeitsstroms auf die Antriebswelle erstmals Quecksilber, wodurch der Bauraum für die stromübertragenden Komponenten signifikant reduziert werden konnte. Als Antrieb kam ein Wasserhydraulikmotor zum Einsatz, der eine im Vergleich zu Elektromotoren deutlich höhere Leistungsdichte aufweist. Philipp zielte mit seiner Konstruktion und den von ihm durchgeführten Untersuchungen hauptsächlich auf eine Anwendung als Schneidverfahren im Plattenzuschnitt bis zu einer Materialstärke von 20 mm ab. Entsprechend ausführlich werden die erreichbaren Schnittfugen- und Oberflächenqualitäten, sowie die WEZ ermittelt.

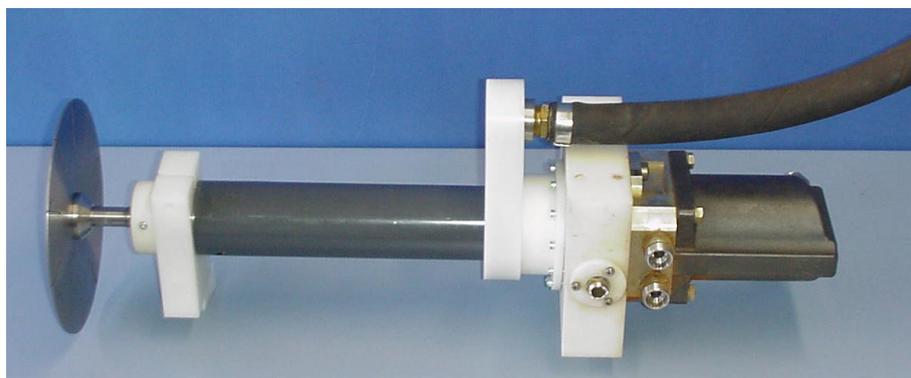


Bild 2.9: CAMG-Werkzeug aus [Phi01], $D=200\text{ mm}$, $v_u=40\text{ m/s}$, $P=7\text{ kW}$, $I_{Amax}=6000\text{ A}$

Wie auch in früheren Untersuchungen [Dav57], [Pat85], ermittelt auch Philipp einen, für einen stabilen Bearbeitungsprozess notwendigen, Mindestbetrag für die Arbeitsstromdichte J .

Die Arbeitsstromdichte bezieht er auf die Kontaktfläche A_K zwischen Elektrode und Werkstück, die sich aus der Werkzeugelektrodenbreite b_{WZ} und der Kontaktlinienlänge L_K ergibt (siehe Gleichung 2.3). Abhängig von der gewählten Prozessspannung liegen diese Werte zwischen 12 A/mm² (40 Volt) und bei 23 A/mm² (65 Volt) (siehe Bild 2.10).

$$J = \frac{I_A}{A_K} = \frac{I_A}{L_K \cdot b_{WZ}} \quad (2.3)$$

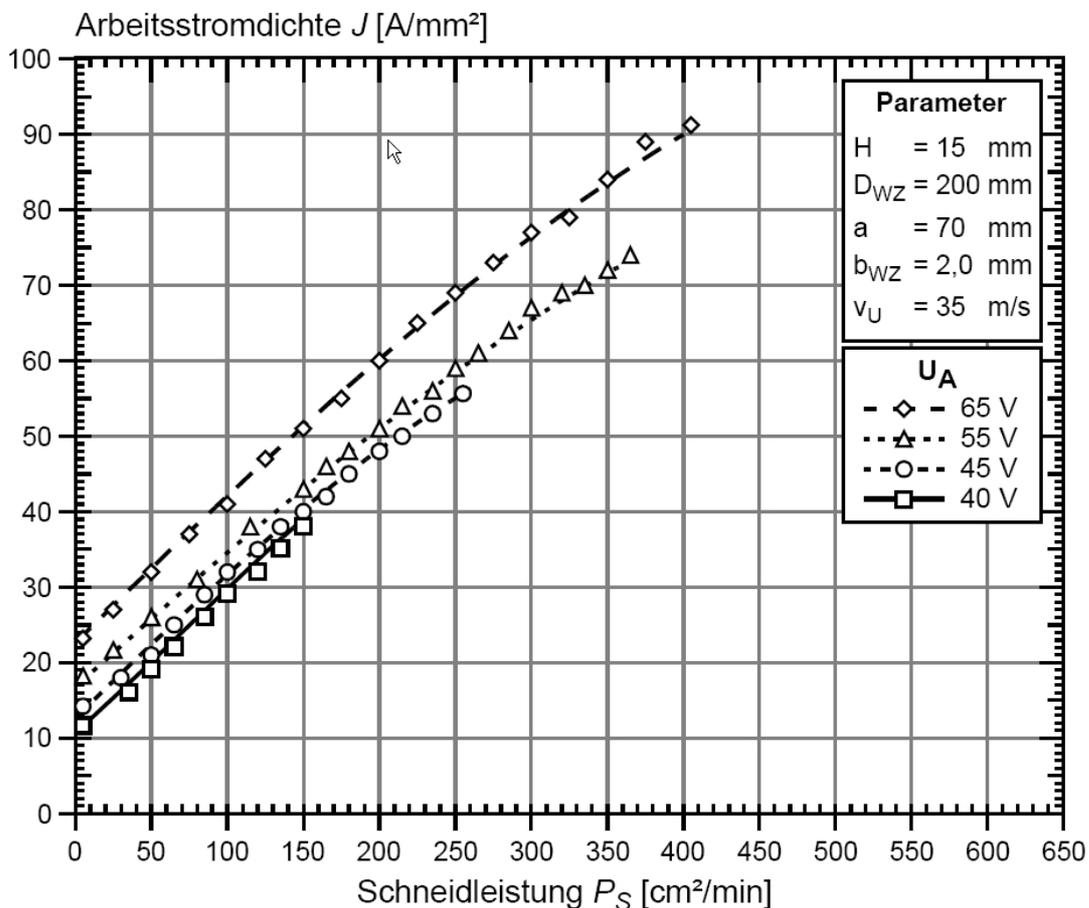


Bild 2.10 Abhängigkeit von Schneidleistung und Arbeitsstromdichte [Phi01]

Ähnliche Ergebnisse werden im United States Patent 4,510,368 [Pat85] vorgestellt. Zur Berechnung des Mindeststromes I_0 wird die folgende Gleichung vorgeschlagen:

$$I_0 = a \cdot s \cdot 10^6 \quad (2.4)$$

$$s = w \cdot L_K \quad (2.5)$$

Der Mindestarbeitsstrom wird auf die Stirnfläche der Schnittfuge bezogen, die sich aus der Fugenbreite A und der Kontaktlinienlänge ergibt. Für den Faktor a werden Werte von 2 bis 16 A/mm² angegeben, ohne hier näher auf die entsprechenden Randbedingungen (z.B. Arbeitsspannung) einzugehen. Zum Schneiden von Werkstücken mit Materialstärken von bis zu 200 mm werden notwendige Stromstärken von bis zu 15.000 A angegeben. Für Schnitte bis 750 mm werden Stromquellen mit Arbeitsströmen von 30.000 A empfohlen. Diese, auf verschiedenen Untersuchungen basierenden Werte, decken sich mit den bereits vorgestellten Versuchsergebnissen im JPDR [Yok90] [NN97].

Im Blechdickenbereich bis zu 20 mm erreicht Philipp mit dem von ihm entwickelten Werkzeug, Schneidgeschwindigkeiten die über denen konventioneller Systeme liegen ($H = 15\text{mm} / v_v = 4 \text{ m/min}$; $H = 20\text{mm} / v_v = 2,5 \text{ m/min}$). Die durchgeführten Verschleißuntersuchungen ergeben parameterabhängige Verschleißwerte im Bereich von 6 – 12%. Es wurde deutlich, dass zum Elektrodenverschleiß in starkem Maße die zwischen den Elektrodenseitenflächen und der Schnittfuge brennenden Lichtbögen beitragen.

Zur Vermeidung dieser Nebenlichtbögen wurden von Bach [Bac01] untersucht, ob sich diese durch eine elektrisch isolierende Beschichtung der Elektrodenseitenflächen vermeiden lassen. Die hier untersuchten thermisch gespritzten keramischen Isolationsschichten eignen sich jedoch nicht.

Insgesamt muss festgestellt werden, dass das CAMG-Verfahren sowohl im Labormaßstab als auch in praktischen Anwendungen funktioniert. Die erreichten Verschleißwerte, die geringe Prozessstabilität sowie der große apparative Aufwand stehen jedoch bisher einer breiten praktischen Anwendung entgegen.

2.2.2 Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (Contact-Arc-Metal-Cutting, CAMC)

Bei dem Contact-Arc-Metal-Cutting erinnert die geometrische Anordnung von Elektrode und Werkstück an das „zerteilende Trennen“ [DIN80] mit einem Messer, woraus sich die Bezeichnung Cutting (engl. Schneiden) ableitet. In Bild 2.11 ist das Prinzip des Verfahrens schematisch dargestellt. Eine planparallele plattenförmige Elektrode wird über einen Schweißgleichrichter mit Spannung versorgt. Über rechts und links der Elektrode angebrachte Spüldüsen wird eine Wasserströmung entlang der Elektrode erzeugt. Der bei Kontakt zwischen Elektrode und Werkstück zündende Lichtbogen schmilzt das Werkstückmaterial oberflächennah auf. Die so entstehende

Schmelze wird von der Wasserströmung nach unten aus der Schnittfuge herausgespült. Ähnlich dem Heißdrahtschneiden von Kunststoffen arbeitet sich die Elektrode durch das Material. Dieses wird jedoch nicht, wie beim Heißdrahtschneiden, nur aufgeschmolzen, sondern durch die Spülung aus der Schnittfuge abtransportiert.

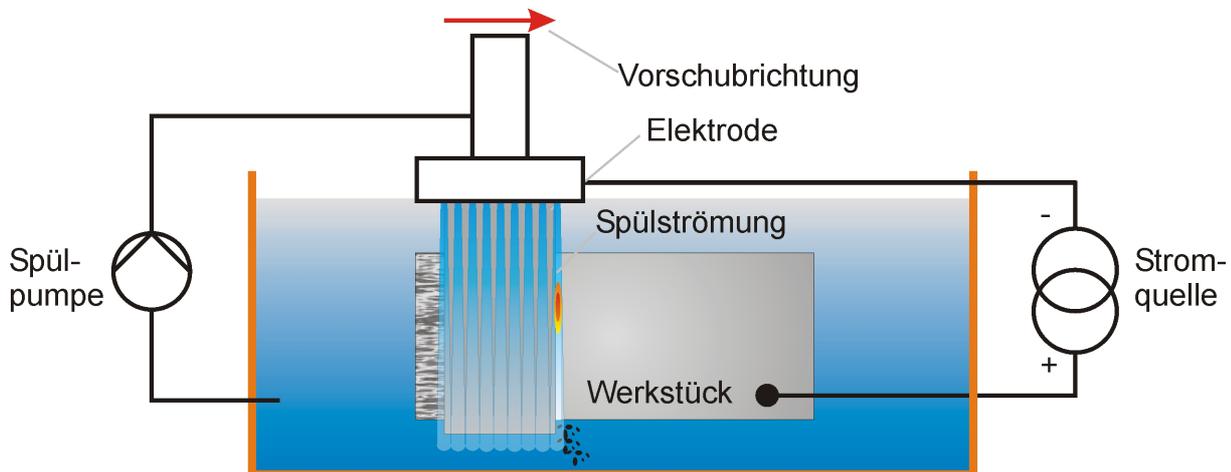


Bild 2.11: Schematische Darstellung des CAMC-Verfahrens

Wie beim CAMG-Verfahren, wurde auch das CAMC-Verfahren bisher ausschließlich mit unregelmäßigem Schweißstromquellen (AC und DC) mit Nennströmen von 2000 – 4000 A betrieben. Die entwickelten Elektrodenhalter unterscheiden sich hauptsächlich hinsichtlich der Klemmmechanismen für die Werkzeugelektrode. Hierbei standen das einfache und möglicherweise fernmanipulierte Wechseln der Elektrode im Vordergrund des Interesses. In Bild 2.12 ist der für Zerlegearbeiten im KKW-Lubmin entwickelte Elektrodenhalter exemplarisch dargestellt [Schr97]. Trotz unterschiedlicher Varianten der Spüldüsen wurden hier kleine Querschnitte für die Spülwasserversorgung gewählt. Bei Spüldrücken von 1 – 1,5 MPa lagen die Volumenströme bei ca. 2 – 5 m³/h. Die mit diesem Werkzeug geschnittenen Bauteile hatten eine Materialstärke von bis zu 160 mm [Schr97].

Mit anderen Werkzeugen wurden Bauteile mit Materialstärken von bis zu 300 mm getrennt. Die erreichten Schneidgeschwindigkeiten lagen im Bereich von 1 mm/min (H = 250 mm) bis 200 mm/min (H = 20 mm) [Bach98]. Der auftretende Elektrodenverschleiß hängt in starkem Maße von der Materialstärke des zu schneidenden Werkstückes ab und liegt im Bereich von 10 - 30% [Bach92] [Bach97]. Allerdings muss festgestellt werden, dass mit der bisher verwendeten Anlagentechnik, ab Materialstärken von ca. 40 mm, keine reproduzierbaren und prozesssicheren Schnitte möglich sind. So treten häufig Dauerkurzschlüsse auf, die zu Überlastungen und zum Abschalten der Stromquellen führen. Darüber hinaus neigen die Elektroden dazu sich in der Schnittfuge zu verklemmen. Hieraus resultiert eine mechanische Belastung der Elektroden. Um ein Brechen der Elektrode zu vermeiden, wurde daher

faserverstärkter Graphit als Elektrodenwerkstoff verwendet, der im Vergleich zu reinen Graphitelektroden eine deutlich höhere mechanische Festigkeit aufweist.

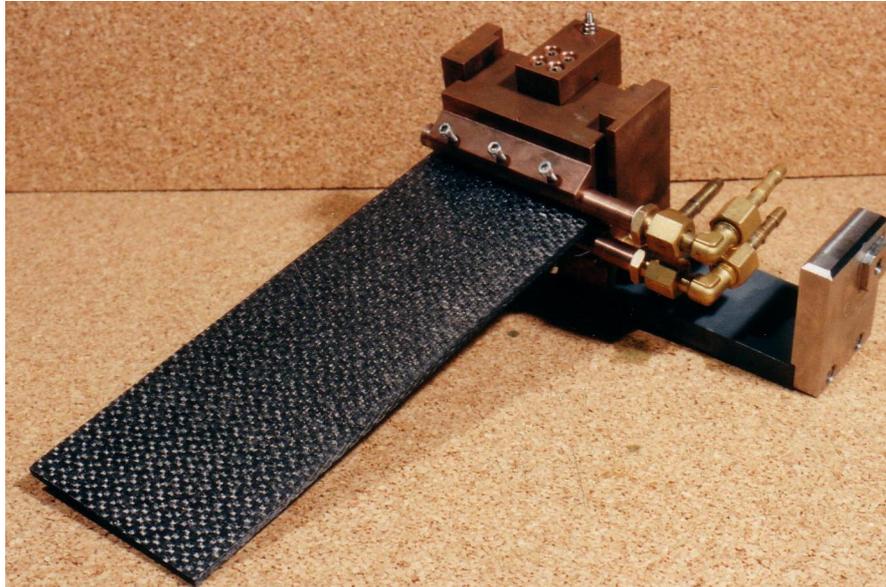


Bild 2.12: CAMC-Elektrodenhalter für Zerlegearbeiten im KKW-Lubmin

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das CAMC-Verfahren für Werkstückdicken im Bereiche von bis 20 – 40 mm zuverlässig funktioniert. Aufgrund der mäßigen Schneidgeschwindigkeit, des hohen Verschleißes und der auf den Unterwassereinsatz beschränkten Anwendung, ist es klassischen Schneidtechniken jedoch unterlegen. Das Potential des Verfahrens zum Schneiden von dickwandigen und/oder mehrwandigen Bauteilen konnte aufgrund der geringen Prozessstabilität und des hohen Elektrodenverschleißes bei derartigen Anwendungen bisher nicht genutzt werden.

2.2.3 Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bohren (Contact-Arc-Metal-Drilling, CAMD)

Das CAMD-Verfahren wurde entwickelt, um Anschlagpunkte in Bauteilen aus austenitischen Komponenten in kerntechnischen Anlagen zu erzeugen [Bra97]. Später wurde untersucht, ob sich das Verfahren eignet, um die Wandstärke von massiven Stahlkomponenten zu minimieren [Bac99]. In Bild 2.13 ist das Prinzip des CAMD schematisch dargestellt. Eine stabförmige Elektrode mit beliebiger Querschnittsform (rund, rechteckig, oval usw.) wird über einen Schweißgleichrichter mit Spannung versorgt. Im Zwischenraum zwischen Elektroden und Werkstück wird eine Strömungsbewegung, über in die Stabelektrode eingebrachte Spülkanäle, erzeugt. Der bei Kontakt zwischen Elektrode und Werkstück zündende Lichtbogen schmilzt das Werkstückmaterial oberflächennah auf. Die entstehende Schmelze wird von der

Wasserströmung aus dem entstehenden Bohrloch herausgespült. Ähnlich dem Senkerodieren arbeitet sich die Elektrode so durch das Material.

Anders als die Verfahren CAMG und CAMC, wird das CAMD-Verfahren in dieser Arbeit nicht behandelt. Daher wird auch an dieser Stelle nicht näher auf diese Verfahrensvariante eingegangen.

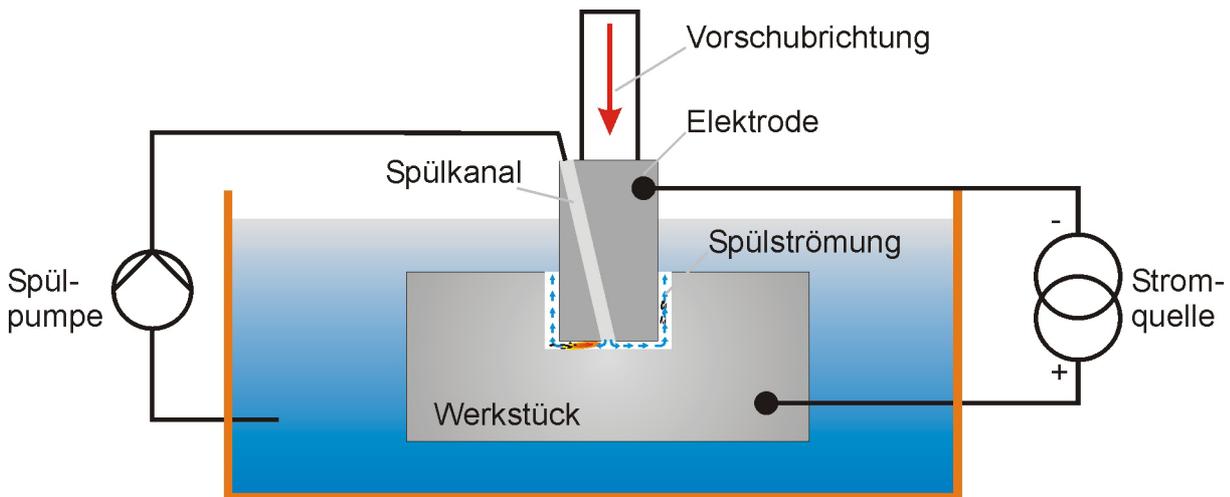


Bild 2.13: Schematische Darstellung des CAMD-Verfahrens

2.3 Emissionen bei der Elektrokontaktbearbeitung

Die thermischen Schneidverfahren beruhen auf einer räumlich begrenzten hohen Erhitzung des Werkstückes und hieraus resultierenden Schmelz-, Verbrennungs- und Verdampfungsvorgängen. Die auftretenden chemischen Reaktionen, Kondensationsvorgänge und das Zerstäuben der Schmelze führen zu vergleichsweise hohen Emissionen in Form von Gasen, Aerosolen und Stäuben. Bei der hier behandelten Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung wird die Menge der freigesetzten Aerosole aufgrund des Unterwassereinsatzes signifikant reduziert. Das Wasser wirkt in starkem Maße reinigend. Während größere Partikel schnell absinken und sich in Form von Sedimenten am Boden ablagern, bleiben kleine Partikel lange in Schwebelage. Die so entstehende Suspension führt zu einer starken Sichtbeeinträchtigung im Wasser.

Aufgrund der nur sehr eingeschränkten Anwendung der Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung wurden nur wenige Untersuchungen zum Emissionsverhalten dieser Verfahrensgruppe durchgeführt. Lediglich Priesmeyer [Pri97] vergleicht 1997 die Emissionen der thermischen Schneidverfahren Plasmaschneiden, autogenes Brennschneiden, Lichtbogen-Wasserstrahl-Drahtschneiden, CAMD und CAMC im Unterwassereinsatz. Er ermittelt die Mengen und Größenverteilungen der entstehenden Sedimente, Hydrosole und Aerosole sowie Konzentration der Gase NO , NO_x , CO und H_2 in dem entstehenden bzw. freigesetzten Gasgemisch. Demnach ist der Anteil der Sedimente mit 93,4% am größten. Aufgrund der beschriebenen reinigenden

Wirkung des Wassers, fällt der Anteil an Aerosolen mit 0,04% sehr klein aus. Der Anteil der im Wasser als Hydrosole verweilenden Schnittfugenmasse ist mit 6,6% entsprechend groß. Dieser große Anteil ist für elektrothermische Schneidverfahren üblich und erklärt die starke Wassertrübung.

Die entstehenden Prozessgase wurden bei unterschiedlichen Parametern ermittelt. Bei einer Schneidstromstärke von 4000 A, einer Werkstückdicke von 50 mm und einer Vorschubgeschwindigkeit von 400 mm/min konnte die Entstehung von 25,7 l/min CO und 39,7 l/min H₂ nachgewiesen werden. Die H₂ Bildung resultiert aus den elektrolytischen Vorgängen aufgrund der Potentialdifferenz zwischen Werkstück und Elektrode und aus den im Lichtbogen auftretenden Dissoziationsvorgängen des Wassers. Die CO-Emissionen entstehen durch Oxidationsvorgänge an der Graphit-elektrode.

Parallel zu der hier vorliegenden Arbeit, untersuchte Petersen [Pet05] die Aerosolbildung des CAMC unter Verwendung geregelter Stromquellen. Diese Untersuchungen ergeben, dass die geänderten Prozessbedingungen nur einen geringen Einfluss auf das Emissionsverhalten haben. Es tritt lediglich eine Verschiebung des Maximalwertes um eine Größenklasse von 0,35 µm auf 0,18 µm auf. Der Anteil der Aerosole an den Gesamtemissionen liegt bei 0,046% und bestätigt somit die Untersuchungen von Priesmeyer [Pri97].

3 Zielsetzung

Beim Rückbau von kerntechnischen Anlagen sind die zu lösenden Schneidaufgaben oftmals komplex. Dies gilt insbesondere bei der Zerlegung von Einbauten im Reaktordruckbehälter. Aufgrund der durch den Betrieb des Kraftwerkes aktivierten Werkstoffe ist die Strahlungsintensität hier sehr hoch. Aus diesem Grund werden die Rückbaumaßnahmen in der Regel fernbedient durchgeführt werden. Um die gute strahlungsabsorbierende Wirkung des Wassers zu nutzen, werden diese häufig unter Wasserabdeckung durchgeführt. Weiter erschwerend kommt hinzu, dass die zu schneidenden Bauteile häufig dick- und/oder mehrwandig sind und zum Teil aus einer Kombination unterschiedlicher Werkstoffe bestehen. Mit konventionellen Schneidtechnologien sind diese Aufgaben nicht immer oder nur mit großem Aufwand zu lösen. Die beiden Verfahrensvarianten der Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung CAMG und CAMC eignen sich potentiell für solche Schneidaufgaben unter Wasser. Die physikalische Voraussetzung ist hierbei lediglich die elektrische Leitfähigkeit der zu schneidenden Werkstoffe. Bisher ist es allerdings nicht gelungen, dieses Potential zu nutzen. Die durchgeführten Untersuchungen sowie erste praktische Schneidanwendungen lieferten, bei großem anlagentechnischem Aufwand, nur unbefriedigende Ergebnisse. Bei unzureichender Prozessstabilität war der Elektrodenverschleiß groß und die erreichte Schnittlänge somit klein.

Das Ziel dieser Arbeit ist, neben dem wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn, die Weiterentwicklung der Schneidverfahren CAMG und CAMC, um deren Leistungspotential insbesondere für Schneidanwendungen im Rückbau von kerntechnischen Anlagen zu nutzen. Unter Berücksichtigung der bisherigen Erfahrungen werden zunächst Anforderungsprofile für die Werkzeuge entwickelt. Anhand dieser Anforderungen erfolgt dann die Konstruktion und Fertigung verbesserter CAMG- und CAMC-Werkzeuge. Die Gestaltung dieser Werkzeuge soll praxisnah erfolgen, um mit geringem Entwicklungsaufwand kurzfristig eine industrielle Anwendung zu ermöglichen. Gleichzeitig müssen die Werkzeuge im Laborbetrieb Untersuchungen in einem weiten Parameterfeld erlauben.

Durch praktische Schneiduntersuchungen mit Strom- und Spannungsanalysen wird ein besseres Verständnis für die Vorgänge in den Prozessen erarbeitet. Mit Hilfe dieser Ergebnisse erfolgt die Entwicklung und praktische Umsetzung von Ansätzen zur Vermeidung der bisherigen Mängel (starker Elektrodenverschleiß, geringe Prozessstabilität und hohe Prozessströme).

Wie auch bei anderen thermisch abtragenden Verfahren treten auch bei der Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung vergleichsweise hohe Emissionen auf. Für einen praktischen Einsatz der Verfahren ist es, insbesondere bei Arbeiten an radiologisch belasteten Anlagen, wichtig über Auslegungsdaten für die notwendige Wasserraufbereitung zu verfügen. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit das Emissionsverhalten der Verfahren CAMG und CAMC hinsichtlich der entstehende Hydrossole und Sedimente bestimmt.

Neben der angestrebten Weiterentwicklung der Verfahren CAMG und CAMC gilt es neue potentielle Anwendungsmöglichkeiten zu finden. Hierzu werden geeignete Laboraufbauten entwickelt und praktische Schneiduntersuchungen durchgeführt, die die grundsätzliche Machbarkeit überprüft und das Entwicklungspotential bewertet.

4 Anlagen und Gerätetechnik

4.1 Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen (CAMG)

4.1.1 Ausgangslage CAMG

Die bisherigen Entwicklungen bei der Elektrokontaktbearbeitung [Phi01] haben gezeigt, dass neben der Anpassung der Parameter ein ganz wesentlicher Teil des Entwicklungsaufwandes in der Konstruktion des Werkzeuges liegen muss. Nur bei einer anwendungsorientierten, zuverlässigen und leistungsstarken Konstruktion können die Ergebnisse der Untersuchungen kurzfristig in eine praktische Anwendung überführt werden.

Unter Berücksichtigung der bisherigen Kenntnisse über das CAMG-Verfahren und den sich aus den Anforderungen des Rückbaus von kerntechnischen Anlagen ergebenden Randbedingungen, gilt es daher ein CAMG-Werkzeug zu entwickeln, welches den nachfolgend aufgeführten Anforderungen gerecht wird.

- Trennen komplexer, dickwandiger metallischer Strukturen
Als Minimalziel wurden 70 mm angesetzt. Die Konstruktion des Werkzeuges soll jedoch so erfolgen, dass Schnitte bis 150 mm möglich sind.
- Umfangsgeschwindigkeit der Werkzeugelektrode von 30 - 40 m/s
Diese hohe Umfangsgeschwindigkeit wird für einen verschleißreduzierten Betrieb empfohlen [Pei89] [Phi01].
- Prozessströme bis 6.000 A
6.000 A entspricht der maximalen Arbeitsstromstärke, die mit den zur Verfügung stehenden Schweißstromquellen bereitgestellt werden kann. Kurzfristig auftretende Kurzschlussströme von bis zu 12.000 A müssen ebenfalls beherrscht werden.
- Einsatz in Wassertiefen bis 15 m
Diese Anforderung ergibt sich aus den potentiellen Einsatz Tiefen in Reaktordruckbehältern deutscher Kernkraftwerke.
- geringes Gewicht und geringe Baugröße
Je kleiner und leichter ein Werkzeug gestaltet ist, desto einfacher lässt sich dieses mit Manipulatoren fernhantiert in Rückbauprojekten einsetzen.
- Erhöhung der Elektrodenstandzeit
Die bisherigen Verschleißwerte von ca. 15 – 20% [Phi01], führen zu nicht praxisrelevanten Standzeiten.
- Entwicklung einer Elektroden-Schnellspanvorrichtung

Eine Schnellspannmöglichkeit ist notwendig um bei einem Elektrodenwechsel per Hand die Strahlenbelastung des Personals gering zu halten (kurze Aufenthaltszeit), bzw. um einen fernhantierten Elektrodenwechsel zu ermöglichen. Im Fall eines unbeabsichtigten, aber nicht auszuschließenden Verklemmens und /oder Verschweißens der Werkzeugelektrode in der Schnittfuge erlaubt diese zudem das Bergen des Werkzeuges.

- Erhöhung der Antriebsleistung

Die Forderungen nach einem ausreichend großen Elektrodendurchmesser und einer hohen Umfangsgeschwindigkeit bedingen einen ausreichend dimensionierten Antrieb.

4.1.2 Weiterentwicklung CAMG

Unter Berücksichtigung der im vorherigen Kapitel formulierten Anforderungen wurde zunächst ein entsprechendes Werkzeugkonzept entwickelt. In Bild 4.1 ist das 3-D Modell der Werkzeugkonstruktion dargestellt. Die Auswahl einer geeigneten Antriebseinheit sowie die Gestaltung der Stromübertragung und der Antriebswelle mit Schnellspannsystem stellten hierbei besondere Anforderungen, die es konstruktiv zu berücksichtigen galt.

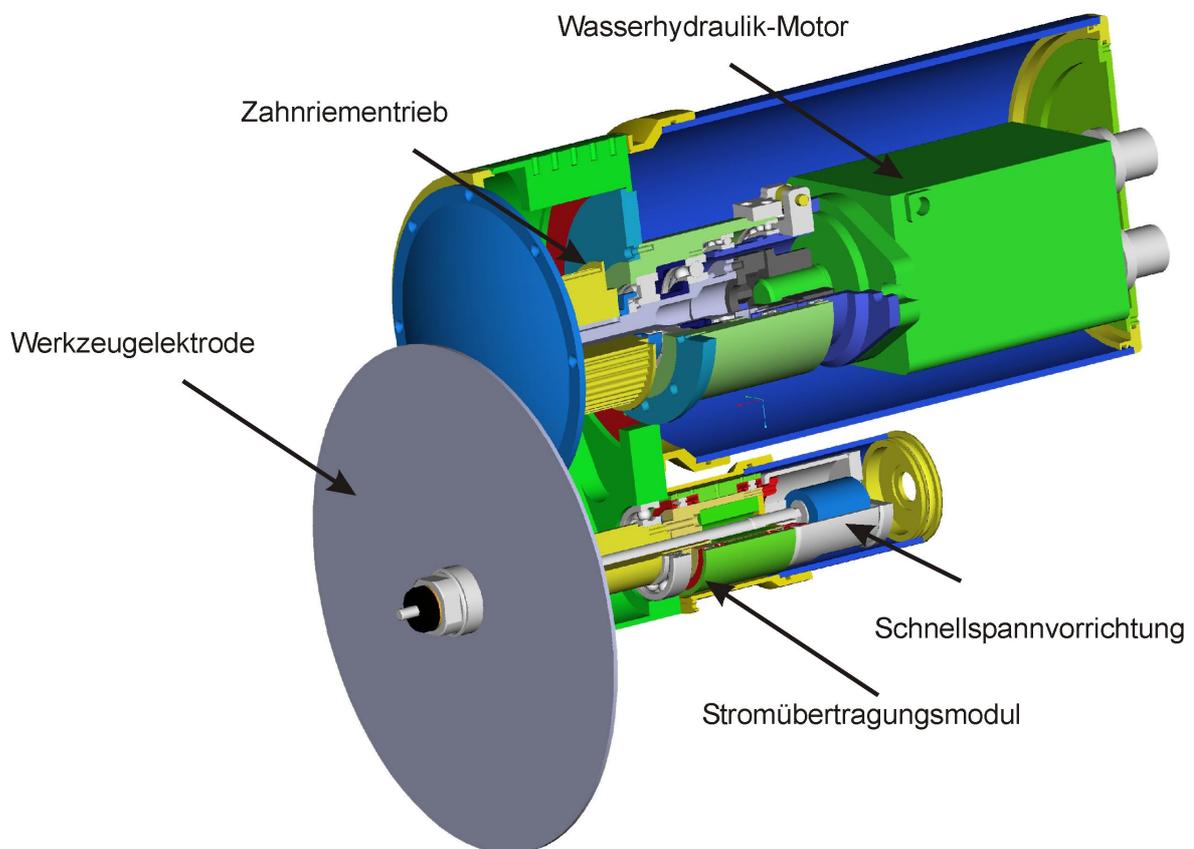


Bild 4.1: 3-D CAD-Model des entwickelten CAMG-Werkzeug

Auf der Grundlage dieses Konzeptes und der anschließenden Konstruktion wurde ein Prototyp dieses CAMG-Werkzeuges gebaut. Der Prototyp sowie das zur Energieversorgung des Antriebsmotors verwendete Hydraulikaggregat, sind in Bild 4.2 dargestellt. Die wichtigsten technischen Daten dieses Systems sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.



Bild 4.2: Wasserhydraulikaggregat (links), CAMG-Werkzeug (rechts)

Tabelle 4.1: Technische Daten CAMG-Werkzeug.

Parameter:	Wert:
Antriebsleistung	30 kW
Drehzahl	400 -1800 1/min
Umfangsgeschwindigkeit	max. 42 m/s (D= 450 mm)
Elektrodendurchmesser	max. 450 mm
Schnitttiefe	max. 155 mm
Arbeitsstrom	max. 6.000 A (Dauerbetrieb)
Arbeitsspannung	max. 70 V
Gewicht	55 kg
mögliche Wassertiefe	max. 20 m

Mit diesem System wurden die Grundlagen geschaffen, um die geplanten Untersuchungen durchzuführen. Die ausreichend dimensionierte Antriebsleistung, eine mögliche Schnitttiefe von bis zu 155 mm sowie die Möglichkeit hohe Prozessströme zu übertragen, erlauben Untersuchungen in einem weiten Parameterbereich. Auf die Besonderheiten der Konstruktion sowie auf die erarbeiteten Lösungen wird in den nachfolgenden Kapiteln näher eingegangen.

4.1.2.1 Auslegung des Antriebs

Anders als bei mechanischen Schneidverfahren sind die Reaktionskräfte zwischen der Elektrode und dem Werkstück gering, da, abgesehen von dem zum Zünden des Lichtbögen notwendigen Kontaktes, der Prozess berührungslos ablaufen kann. Zur Auslegung der benötigten Antriebsleistung für die Werkzeugelektrode spielt der Leistungsbedarf für die Wechselwirkung von Elektrode und Werkstück daher nur eine untergeordnete Rolle. Der größte Leistungsbedarf resultiert aus den Strömungsverlusten der Werkzeugelektrode mit dem Umgebungsmedium Wasser. Um den Leistungsbedarf abschätzen zu können, erfolgte zunächst die Berechnung der Reibungsverluste der Werkzeugelektrode. Hierzu wurde die in [Boh91] hergeleitete Berechnung für die Reibungsverluste einer in ruhendem Medium frei rotierenden Scheibe verwendet.

$$P_v = M \cdot \omega \quad (4.1)$$

$$M = c_m \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \omega^2 \cdot R^5 \quad (4.2)$$

$$P_v = c_m \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \omega^3 \cdot R^5 \quad (4.3)$$

Man erkennt, dass sowohl die hohe Umfangsgeschwindigkeit ω als auch der Scheibendurchmesser R aufgrund der Exponenten einen sehr hohen Einfluss auf die Antriebsleistung haben. Der Reibkoeffizient c_m lässt sich, in dem zu betrachtenden Reynolds-Zahlbereich von $Re > 2 \cdot 10^6$, nach Gleichung 4.4 berechnen:

$$c_m = \frac{0,69}{\left(1,12 + \lg \frac{R}{k}\right)^{2,5}} \quad (4.4)$$

Bei konstantem Scheibendurchmesser ist c_m somit ausschließlich eine Funktion der künstlichen Sandrauigkeit k . Setzt man diese auf einen realistischen Wert von 0,15, ergibt sich ein konstanter Reibbeiwert von $\approx 0,02$.

In Bild 4.3 ist die sich aus der oben dargestellten Berechnung ergebende Reibleistung in Abhängigkeit der Elektrodenumfangsgeschwindigkeit für mehrere Elektrodendurchmesser dargestellt.

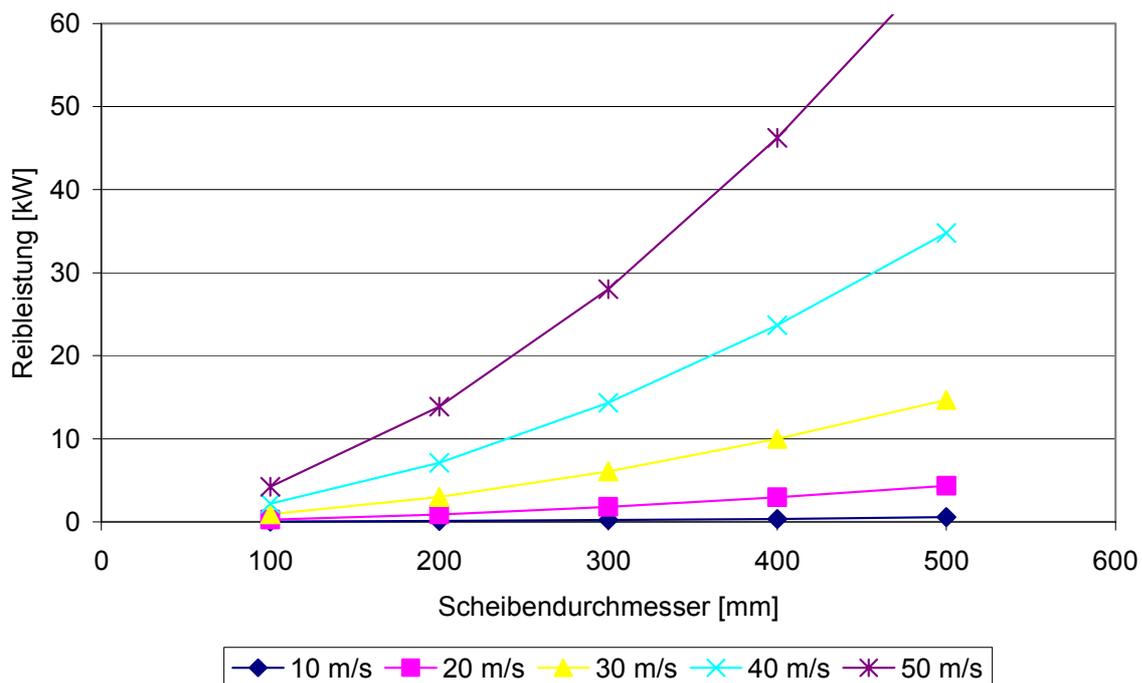


Bild 4.3: Reibleistung einer in ruhendem Wasser drehenden Scheibe als Funktion der Umfangsgeschwindigkeit für mehrere Scheibendurchmesser, (Sandrauigkeit $k = 0,15$); Berechnung nach [Boh91]

Es ist die exponentielle Abhängigkeit der Reibungsverluste vom Scheibendurchmesser zu erkennen. Um die Verlustleistung und somit die notwendige Antriebsleistung klein zu halten, sollte die Werkzeugelektrode demnach einen möglichst kleinen Außendurchmesser aufweisen. Dies steht im Widerspruch zu der angestrebten hohen Einschnitttiefe. Um hier einen Kompromiss zu finden, muss der Abstand zwischen Werkzeuggehäuse und Abtriebswelle klein ausgeführt werden. Nur so kann auch der Elektrodendurchmesser entsprechend reduziert werden.

Um bei der Auswahl der Komponenten und der Konstruktion eine Ausgangsbasis zu haben, wurde der Elektrodendurchmesser auf 450 mm festgelegt. Nach der oben vorgestellten Berechnung ergeben sich hieraus Reibungsverluste der Scheibe von ca. 28 kW. Unter Berücksichtigung von zusätzlichen Reibungsverlusten in den Lagern, den Dichtungen und dem Getriebe, sowie prozessbedingte Reibungsverluste

z.B. durch Kontakt und den besonderen Strömungsverhältnissen im Schneidspalt, wurde die notwendige Antriebsleistung auf 30 kW festgelegt. Bei dem gewählten Elektrodendurchmesser von 450 mm und einer angestrebten Umfangsgeschwindigkeit von 40 m/s ergibt sich eine erforderliche Abtriebsdrehzahl von 1.700 1/min. Um auch Schnittuntersuchungen mit geringeren Umfangsgeschwindigkeiten durchführen zu können, wird eine stufenlose Drehzahlregelung im Bereich von ca. 600 – 1.700 1/min vorgesehen.

Die Forderung nach einem möglichst einfachen fernhandtierbaren Einsatz wird dadurch erfüllt, dass ein Werkzeug entwickelt wird, welches bei möglichst kleinen Abmessungen ein entsprechend geringes Gewicht aufweist. Um dies, trotz der vergleichsweise hohen erforderlichen Antriebsleistung, umsetzen zu können, musste dies bei der Auswahl des Antriebskonzeptes besondere Berücksichtigung finden. Grundsätzlich bieten sich für diesen Anwendungsfall sowohl elektrische als auch hydraulische Antriebe an. Der Vergleich der spezifischen Leistung gibt hier eine gute Entscheidungshilfe. Hierbei wird die mechanische Leistung zur Masse ins Verhältnis gesetzt. Elektrische Standardmotoren (Asynchronmotoren) mit Drehzahlen von 1.500 1/min oder 3.000 1/min weisen eine Leistungsdichte von ca. 4,5 – 6,5 kg/kW auf. Schnelldrehende Mittelfrequenz- oder Hochfrequenzmotoren mit Drehzahlen im Bereich von 9.000 – 13.000 1/min liegen hier mit 1 – 1,5 kg/kW deutlich günstiger. Für die hier geforderte Antriebsdrehzahl von 1.700 1/min würde ein entsprechendes Untersetzungsgetriebe notwendig, welches diesen Wert aufgrund des Eigengewichtes verschlechtert. Hydraulische Motoren bieten eine Leistungsdichte von 0,4 – 0,7 kg/kW. Abhängig von dem Motortyp und dem Hersteller liegen die Antriebsdrehzahlen zudem im angestrebten Bereich, wodurch auf ein Getriebe verzichtet werden kann. Allerdings ist der technische Aufwand für Hydraulikantriebe, wegen des notwendigen Hydraulikaggregates und der Versorgungsleistung, insgesamt deutlich höher als bei elektrischen Antrieben. Aufgrund des erheblichen Gewichtsvorteils des Hydraulikmotors ist dieser Mehraufwand in dieser Anwendung jedoch gerechtfertigt. Bei der Verwendung von Öl-Hydrauliksystemen besteht die Gefahr, dass evtl. Undichtigkeiten zu einer Verschmutzung der Umgebung führen. Zudem stellt ein Ölhydrauliksystem eine große Brandlast dar. Mit Rücksicht auf einer späteren Anwendung beim Rückbau von kerntechnischen Anlagen wurde daher auf ein Ölhydrauliksystem verzichtet. Als Alternative kam hier ein Wasserhydrauliksystem zur Anwendung. Wasserhydraulikmotoren sind jedoch bisher nur bis zu einer Leistung von ca. 7 kW auf dem Markt erhältlich. In Absprache mit der Firma Danfoss, wurde für das hier zu entwickelnde Werkzeug eine Axialkolbenpumpe des Typs PAH 80 als Motor eingesetzt. Mit gewissen Einschränkungen die sich aus der Konstruktion dieser Pumpe ergeben, ist der Motorbetrieb möglich. Bei einer Drehzahl von 1800 1/min und einem Drehmoment von 165 Nm leistet dieser Motor 31 kW.

Der bei Wasserhydrauliksystemen übliche maximale Betriebsdruck von 14 MPa führt zu einer, im Vergleich zu Ölhydraulikmotoren, etwas schlechteren Leistungsdichte. Mit 0,66 kg/kW liegt diese jedoch sehr gut und genügt den gestellten Anforderungen

2.10). Ausgehend von der für diese Untersuchungen verfügbaren Anlagentechnik (max. 6.000 A) deutete sich, bei der Verwendung von 4 mm breiten Elektroden, eine maximal zu erreichende Schnitttiefe von ca. 70 mm an.

Um die angestrebten Schnitttiefen zu erreichen, ist demnach damit zu rechnen, dass die maximale Arbeitsstromstärke der verfügbaren Schweißgleichrichter ausgenutzt werden muss. Für die Konstruktion der Stromübertragung ergibt sich eine mittlere Arbeitsstromstärke I_{Amittel} von bis zu 6.000 A. Kurzzeitig ist mit noch deutlich höherer Arbeitsströmen I_{Amax} zu rechnen, da die verwendeten Stromquellen über keine aktive Strombegrenzung verfügen. Im Falle eines Kurzschlusses können so Ströme im Bereich von bis zu 12.000 A fließen. Bis zum Ansprechen der Überlastsicherung müssen somit auch solche Stromstärken sicher beherrscht werden.

Tabelle 4.2: Berechneter Mindestarbeitsstrom in [A] nach [Phi01], $D = 450$ mm, $b_{\text{WZ}} = 4$ mm, bei einem Elektrodenüberstand von 10 mm, I_{K} gemäß Gl. 4.6

Spannung [V]		40	45	55	60
		Mindest- stromdichte [A/mm ²]			
Schnitttiefe [mm]	Kontaktlinienlänge [mm]	12	14	18	23
10	28	1.344	1.568	2.016	2.576
25	59	2.832	3.304	4.248	5.428
50	100	4.848	5.656	7.272	9.292
75	135	6.480	7.560	9.720	12.420
100	165	7.920	9.240	11.880	15.180
125	193	9.264	10.808	13.896	17.756
150	220	10.560	12.320	15.840	20.240

Die Übertragung solch hoher Ströme ist mit Kohlebürstenübertragern zwar technisch möglich, stößt unter den hier gestellten Anforderungen hinsichtlich kleiner Abmessungen und geringem Gewicht jedoch an ihre Grenzen. Bei einer maximalen Stromdichte an den Kontaktflächen der Kohlebürsten von ca. 35 A/cm² [Vol80] ergibt sich zur Übertragung von 6.000 A eine notwendige Übertragungsfläche von ca. 170 cm². Abhängig von der gewählten Größe der Kohlebürste werden somit 50 bis 70 Bürsten benötigt. Die Abmessungen eines solchen Stromübertragers sind groß und die entstehende Abwärme durch I^2R -Verluste in den Kohlebürsten und der Reibung an den

Kontaktflächen erheblich. Für diese Anwendung ist diese Art der Stromübertragung daher nicht geeignet.

Eine Alternative zur Stromübertragung mit Kohlebürsten stellt die Übertragung mittels Quecksilber dar. Diese wurde insbesondere in der Vergangenheit häufig für z.B. Neigungsschalter, prellfreie Relais und für Drehübertragungen in der Messtechnik genutzt. Jedoch zielten diese Anwendungen nicht auf die kompakte Übertragung von hohen Strömen ab. Dies ist wahrscheinlich der Grund, warum in der Literatur zwar der Widerstand von Quecksilber angegeben ist, jedoch so gut wie keine detaillierten Informationen zu den Phasenübergangswiderständen zwischen Quecksilber und anderen festen Metallen zur Verfügung stehen. Sollen, wie in diesem Anwendungsfall, hohe Ströme sicher übertragen werden, ist es jedoch zwingend erforderlich über diese Informationen zu verfügen. Ohne diese ist eine konstruktive Auslegung kaum möglich, da die durch die I^2R -Verluste freiwerdende Wärmemenge an den Phasengrenzflächen nicht abgeschätzt werden kann. Ebenso ist nicht bekannt, welche Stromdichten mit Quecksilber übertragen werden können, bzw. welche Übertragungsfläche vorzusehen ist. Daher wurden Untersuchungen zum Stromübertragungsverhalten von Quecksilber an der Phasengrenzfläche fest/flüssig durchgeführt.

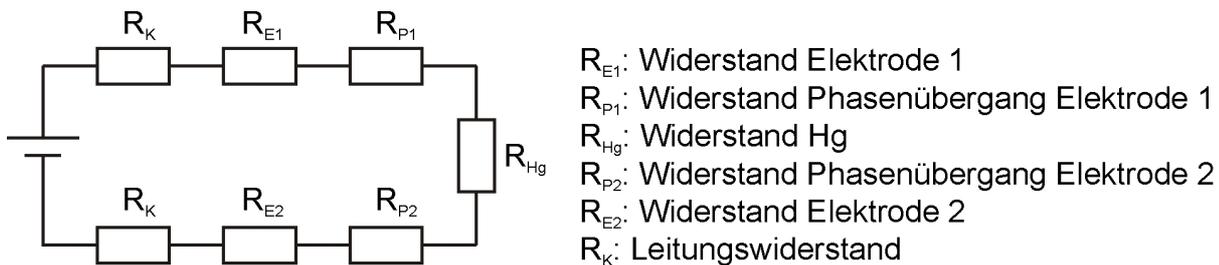


Bild 4.5 Ersatzschaltbild eines über Quecksilber geschlossenen Stromkreises

In Bild 4.5 ist das Ersatzschaltbild eines Stromkreises dargestellt, der über einen Quecksilberkontakt geschlossen wird. Die direkte Bestimmung des Phasenübergangswiderstandes an den Grenzflächen erscheint messtechnisch, wenn überhaupt möglich, sehr aufwendig. Alternativ wurde daher ein vergleichsweise einfacher Messaufbau verwendet. Hierbei wird der Phasenübergangswiderstand nicht direkt gemessen, sondern über dessen Änderung relativ bestimmt.

Hierzu wurde der in Bild 4.6 schematisch dargestellte Versuchsaufbau konzipiert. Bei einem definierten und konstantem Messstrom I_m wird der Spannungsabfall über den Elektroden gemessen. Über diesen Spannungswert lässt sich der entsprechende Widerstand über das Ohmsche Gesetz berechnet werden. Dieser Gesamtwiderstand $R_{ges.}$ setzt sich wie in Gl. 4.7 angegeben zusammen.

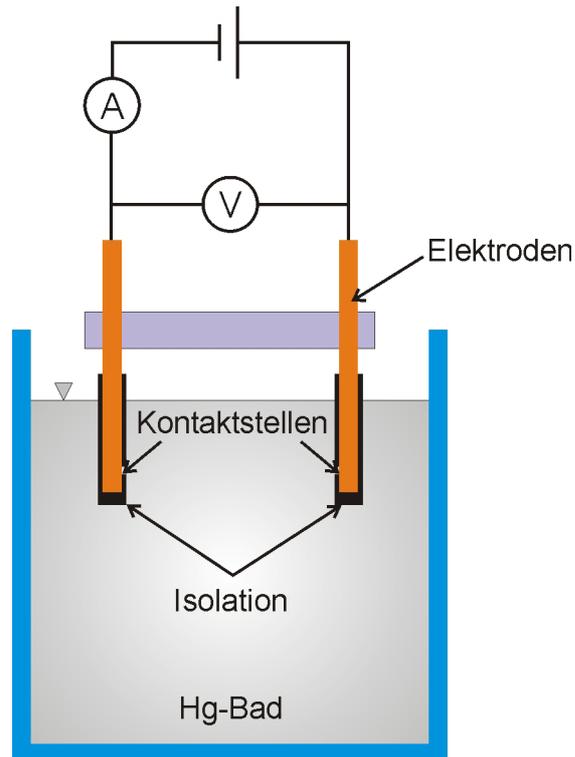


Bild 4.6 Versuchsaufbau zur Bestimmung des Phasenübergangswiderstandes

$$R_{ges.} = R_{E1} + R_{P1} + R_{HG} + R_{P2} + R_{E2} \quad (4.7)$$

Zur Bestimmung der Phasenübergangswiderstände werden zwei Messungen mit unterschiedlichen Kontaktflächen durchgeführt und die Widerstandsdifferenz berechnet.

$$\Delta R_{P_{ges.}} = (R_{E1I} + R_{P1I} + R_{HGI} + R_{P2I} + R_{E2I}) - (R_{E1II} + R_{P1II} + R_{HGII} + R_{P2II} + R_{E2II}) \quad (4.8)$$

Da nur die Kontaktfläche verändert wird gilt:

$$R_{E1I} = R_{E2I} = R_{E1II} = R_{E2II} \quad (4.9)$$

und

$$R_{HGI} = R_{HGII} \quad (4.10)$$

Bei identischen Elektroden kann davon ausgegangen werden, dass die Phasenübergangswiderstände an beiden Elektroden gleich sind. Es gilt also für den Phasenübergangswiderstand einer Elektrode:

$$\Delta R_p = \frac{\Delta R_{ges}}{2} \quad (4.11)$$

Der spezifische Phasenübergangswiderstand lässt sich dann wie folgt berechnen:

$$O_p = \Delta R_p \cdot \Delta A \quad (4.12)$$

Mit diesem spezifischen Wert, lässt sich der Phasenübergangswiderstand beliebiger Kontaktflächen berechnen.

$$R_p = \frac{O_p}{A} \quad (4.13)$$

Erste Versuche, bei denen die Kontaktfläche der Elektroden über die Eintauchtiefe der Elektrode in das Quecksilber-Bad variiert werden sollten, erwiesen sich als ungeeignet. Aufgrund der hohen Oberflächenspannung von Quecksilber tritt hier keine Benetzung der Elektrode auf (Kontaktwinkel $> 90^\circ$). Dies führt dazu, dass die Kontaktfläche der Elektrode nicht bestimmt werden kann. Zudem sammelt sich Quecksilber-Oxid an der Oberfläche des Quecksilber-Bades an. Da weder der Einfluss noch die Menge dieser Oxide hinreichend bekannt sind, lassen sich durch einfaches Eintauchen der Elektroden keine reproduzierbaren Messungen durchführen.

Um die Messungen reproduzierbar und mit einem möglichst geringen Fehler durchführen zu können, wurde der in Bild 4.6 dargestellte Messaufbau konzipiert und realisiert. Hier werden zwei identische Elektroden in ein Quecksilber-Bad eingetaucht. Die Außenflächen dieser Elektroden sind gegen das Quecksilber mit Epoxidharz elektrisch isoliert. Diese Isolierung ist an den Kontaktstellen A unterbrochen. Über die Größe der Kontaktstelle kann die Stromübertragungsfläche festgelegt bzw. variiert werden.

Davon ausgehend, dass der Phasenübergangswiderstand von der Elektrodenbenetzung des Quecksilbers abhängt, wurden beim Lötten geltende Benetzungskriterien auf diese Anwendung übertragen. Hier spielen u.a. folgende Randbedingungen eine wesentliche Rolle:

- Sauberkeit der Elektrodenfläche
- Oxidation der Elektrodenfläche
- Temperatur
- Geometrie (Spaltweite, Ausführung von Ecken oder Radien)
- Metallkombination Elektrode/Quecksilber

Bei der Versuchsdurchführung wurde daher darauf geachtet, dass die ersten vier Einflussfaktoren möglichst konstant bleiben. Der Einfluss der Metallkombination Elektrode/Hg ist Gegenstand dieser Untersuchung und wurde daher bewusst variiert. Hier ist zu beachten, dass sich die meisten Metalle bereits bei Raumtemperatur in

Quecksilber lösen und sich somit eine Legierung (Amalgam) bildet. Es sollte daher untersucht werden, welche der Metalle, die nicht in Quecksilber gelöst werden, den geringsten Phasenübergangswiderstand bilden und ob durch gezielte Werkstoffwahl eine Amalgamschicht auf den Elektroden gebildet wird, die zu einer Verringerung des Phasenübergangswiderstandes führt.

Mit dem beschriebenen Versuchsaufbau wurden Messungen mit den passiven Elektrodenmaterialien Eisen (Stahl S235JR) Chrom und Nickel sowie mit den aktiven Elektrodenmaterialien Gold und Silber durchgeführt. Alle Elektroden wurden hierbei aus S235JR gefertigt und anschließend entsprechend galvanisch beschichtet. Hierbei wurden die in Tabelle 4.3 aufgeführten Schichtsysteme aufgebracht:

Tabelle 4.3: Galvanisch aufgebrachte Schichtsysteme der Versuchselektroden zum Phasenübergangswiderstand

Elektrode	Schichtsystem
Nickelelektrode:	5-8 μm Ni
Chromelektrode:	3-5 μm Ni, 4 μm Cu, 0,3 μm Cr
Goldelektrode:	3-5 μm Ni, 4 μm Cu, 1,5-2,5 μm Au
Silberelektrode:	3-5 μm Ni, 4 μm Cu; 5 μm Ag

Bei den Untersuchungen mit Eisen- und Nickel-Elektroden zeigte sich, dass der Widerstand nicht nur eine Funktion der Kontaktfläche ist. Einen erheblich größeren Einfluss haben hierbei die Kontaktzeit bzw. die in der Kontaktzeit auftretenden Wechselwirkungen an der Grenzfläche. In Bild 4.7 ist ein typischer, über dem Versuchsaufbau gemessener, Widerstandsverlauf ($R_{\text{ges.}}$) dargestellt. Nachdem der Widerstand zunächst etwas ansteigt, fällt dieser innerhalb von einigen Stunden auf ca. 15% des Startwertes ab. Beim Entfernen der Elektrode aus dem Quecksilber-Bad und anschließendem erneuten Tauchen stellt sich der Startwert wieder ein. Auch bei Bewegung der Elektrode im Quecksilber-Bad (spülen der Kontaktfläche), stellt sich erneut der dargestellte Verlauf ein.

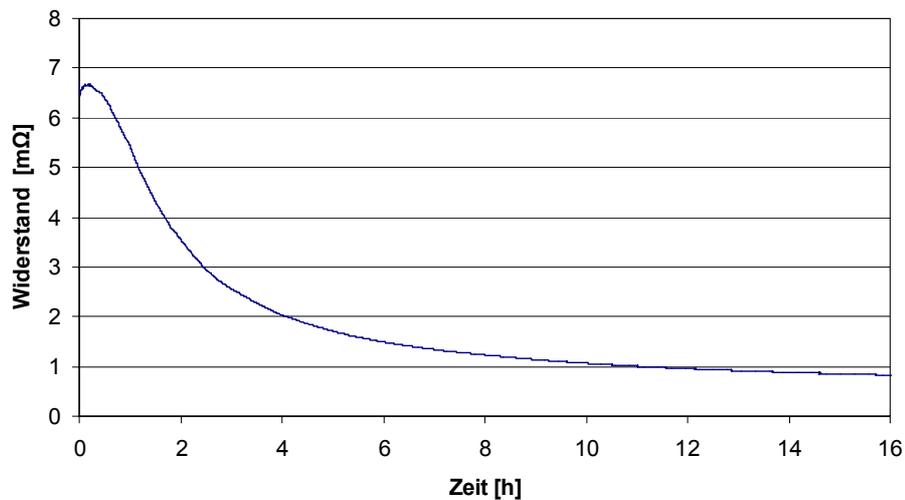


Bild 4.7: Widerstands-Zeitverlauf einer S235JR-Elektrode in Quecksilber

Messungen mit Chrom-Elektroden zeigen andere Effekte. Hier kommt es zu einem zyklischen Anstieg des Widerstandes auf bis zu 350% des Startwertes mit anschließendem schnellem Abfall auf ca. 25% des Startwertes (siehe Bild 4.8). Dieser Vorgang wiederholt sich zyklisch über einige Stunden. Die Amplituden und der Mittelwert nehmen hierbei allmählich ab, bis sich, ähnlich wie bei Eisen- und Nickel-Elektroden, der Widerstand bei ca. 10% des Startwertes einpendelt (siehe Bild 4.9).

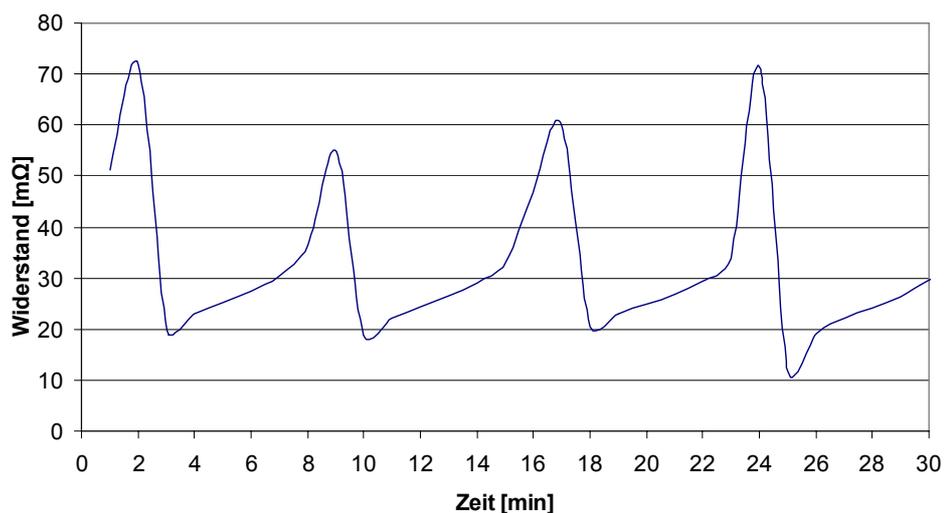


Bild 4.8: Widerstands-Zeitverlauf einer Chrom-Elektrode in Quecksilber (Ausschnitt)

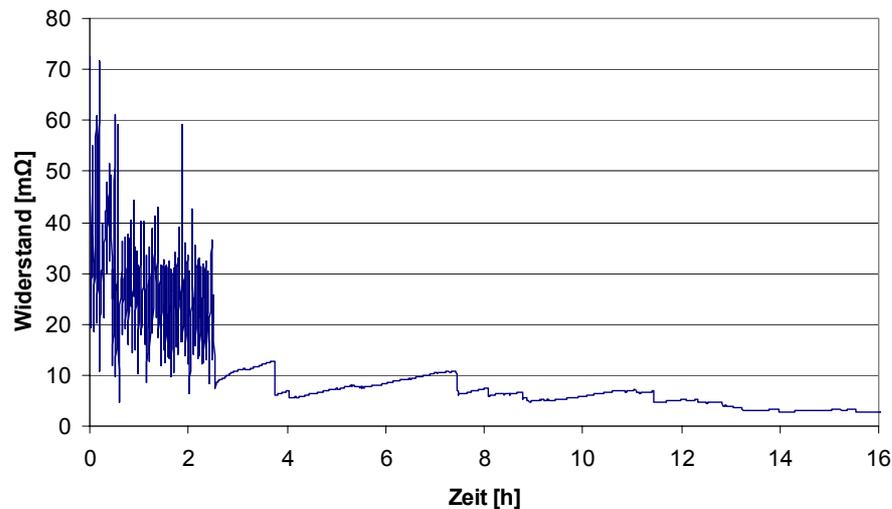


Bild 4.9: Widerstands-Zeitverlauf einer Chrom-Elektrode in Quecksilber (gesamt)

Der Phasenübergangswiderstand R_P ist bei Eisen-, Chrom- und Nickel-Elektroden somit in starkem Maße zeitabhängig. Eine Bestimmung des spezifischen Phasenübergangswiderstandes ρ_P ist daher nicht möglich. Für die Berechnung der auftretenden I^2R -Verluste wäre hier, wenn überhaupt, der Maximalwert von Interesse. Im Rahmen dieser Arbeit wurde darauf verzichtet detaillierte Messreihen zur genauen Bestimmung der Phasenübergangswiderstände von Eisen-, Chrom- und Nickel-Elektroden durchzuführen.

Die beobachtete zeitliche Änderung des Widerstandes entzieht sich einer einfachen Interpretation. Dazu müssen Mikrolegierungsbildung, Oberflächenveränderungen sowie zahlreiche weitere dynamische Effekte intensiv untersucht werden. Es bieten sich damit Hinweise für weitergehende interessante Untersuchungen, insbesondere auf dem Gebiet der Elektrochemie, die aber den Rahmen der hier vorliegenden Arbeit sprengen würden.

Bei den untersuchten Elektrodenwerkstoffen Gold und Silber, die eine Löslichkeit für Quecksilber aufweisen, verhält sich der Phasenübergangswiderstand anders. Hier ändert sich der Widerstand über die Zeit nicht und ist erheblich geringer als der Endwert von Eisen-, Chrom- und Nickel-Elektroden. Zudem bleibt dieser niedrige Wert auch bei einer Bewegung der Elektrode im Quecksilber-Bad bestehen. Für diese Werkstoffe ist die Bestimmung des spezifischen Phasenübergangswiderstandes mit dem oben beschriebenen Messaufbau gut möglich. Die Ergebnisse der Untersuchungen sind die in der Tabelle 4.4 aufgeführten.

Tabelle 4.4: Spezifische Phasenübergangswiderstände

Elektrodenwerkstoff	Spezifischer Phasenübergangswiderstand ρ_p
Quecksilber/Gold	ca. 1,9 m Ω mm ²
Quecksilber/Silber	ca. 2,5 m Ω mm ²
Quecksilber/Stahl	ca. 100 m Ω mm ²

Der große Unterschied im Phasenübergangswiderstand (Faktor 40 bzw. 53) bestätigt die Notwendigkeit der hier durchgeführten Untersuchungen zum Phasenübergangswiderstand. Eine Berechnung und Auslegung von Hochstromübertragern mit Quecksilber ist ohne diese Werte nicht möglich. Um die Bedeutung und die Größenordnung dieser Werte noch einmal zu verdeutlichen, sind in der Tabelle 4.5 die widerstandsäquivalenten Leitungslängen aufgeführt. Hierunter ist die Leitungslänge eines Kupferleiters der Fläche x zu verstehen, die den gleichen Widerstand aufweist wie der Phasenübergangswiderstand an einer Elektrodenkontaktfläche gleicher Fläche. Die an der 2-dimensionalen Kontaktfläche entstehende Wärmemenge entspricht somit der Wärmemenge die in einem Leiter der äquivalenten Leitungslänge freigesetzt wird.

Tabelle 4.5: Widerstandsäquivalente Leitungslängen

Flächenpaarung	spez. Phasenübergangswiderstand ρ_p	äquivalente Leitungslänge:
Hg / Eisenelektrode	≈ 100 m Ω mm ²	5,6 m
Hg / Silberelektrode	2,5 m Ω mm ²	0,140 m
Hg / Goldelektrode	1,9 m Ω mm ²	0,107 m

Für die Konstruktion wurden, aufgrund des geringen Widerstandes und der geringen Löslichkeit in Quecksilber, goldbeschichtete Elektroden verwendet. Die mit Goldelektroden mögliche maximal übertragbare Stromdichte wurde nicht explizit ermittelt. Die bei einer Grenzelastung auftretenden hohen Temperaturen (z.B. durch Funkenbildung) führen zu quecksilberhaltigen Gasen bzw. Rauchgasen. Aufgrund der hohen Toxizität von Quecksilber wurde diese Untersuchungen nicht durchgeführt. Es wurden lediglich die bei den Untersuchungen verwendeten maximalen Stromdichten von 500 A/cm² als maximale nachgewiesene Grenze definiert. Für die konstruktive Auslegung wurde unter Berücksichtigung eines entsprechenden Sicherheitsfaktors mit 75 A/cm² gerechnet. Demnach ergibt sich für einen zu übertragenden Strom von 6.000 A eine notwendige Fläche von ca. 80 cm². Der hieraus resultierende Widerstand von 2,5·E-7 Ω je Grenzfläche führt bei Vollast zu einer abzuführenden Wärmemenge von ca. 18 W. Dieser Wert reduziert sich bei Teillast erheblich (z.B.

1000 A, ca. 0,5 Watt). Um auch die Wärmeentwicklung im Quecksilber durch dessen schlechte elektrische Leitfähigkeit möglichst gering zu halten, wurde eine Quecksilberfüllung mit einer Spaltweite von nur 0,5 mm vorgesehen. Die geringe Spaltweite reduziert zudem die notwendige Quecksilbermenge auf ein Minimum.

Das in Bild 4.10 dargestellte Stromübertragungsmodul ist, auf der Grundlage der hier ermittelten Erkenntnisse zum Phasenübergangswiderstand und der möglichen Stromdichte, konstruiert und gebaut worden. Die Gestaltung ist hier weniger von der notwendigen Übertragungsfläche geprägt, als vielmehr von anderen konstruktiven Randbedingungen (Integration eines Federpaketes), auf die später noch näher eingegangen wird.

Um sicherzustellen, dass der Arbeitsstrom ausschließlich über das Quecksilber übertragen wird und nicht über die verwendeten Kugellager (dies würde zur Zerstörung der Lager führen), wurden Rillenkugellager mit isolierend wirkenden Keramikugeln (Hybridlager) eingesetzt. Zur Vermeidung von thermischer Überlastung ist eine entsprechende Temperaturüberwachung über einen integrierten PT100 Temperaturfühler vorgesehen.

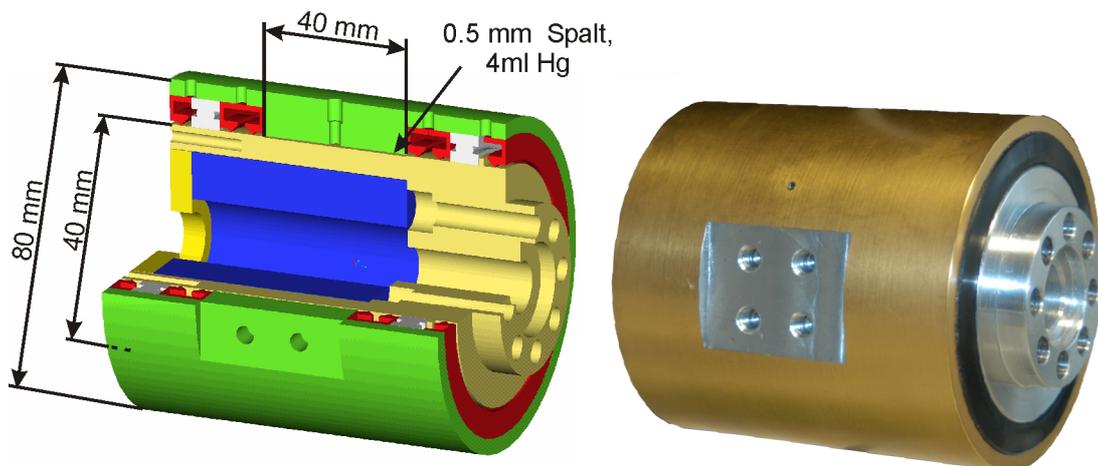


Bild 4.10: Stromübertragungsmodul für ein CAMG-Werkzeug (links schematisch, rechts Prototyp)

4.1.2.3 Antriebswelle

Die Funktionsanforderung an die Antriebswelle ist, neben der Übertragung des Antriebsmomentes, auch die Übertragung des Prozessstroms. Aufgrund der korrosiven Eigenschaften des Umgebungsmediums Wassers muss zudem eine entsprechende Korrosionsbeständigkeit gewährleistet sein. Die hohen zu übertragenden Ströme, bzw. die sich hieraus ergebende Wärmeentwicklung, sind ebenfalls ein ausschlag-

gebendes Auslegungskriterium. Die geforderte Korrosionsbeständigkeit steht hier in einem Widerspruch zu der gewünschten guten elektrischen Leitfähigkeit.

So ist die elektrische Leitfähigkeit von CrNi-Stahl mit ca. $1,1 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$ (ca. 1/60 von Kupfer) vergleichsweise schlecht. Um der Wärmeentwicklung entgegen zu wirken, müssten die Querschnittsflächen entsprechend vergrößert werden. Deutlich wird dies in dem exemplarisch dargestellten Vergleich in Tabelle 4.6. Hier ist der über die Wellenoberfläche abzuführende Wärmestrom durch I^2R -Verluste für unterschiedliche Wellenwerkstoffe und Durchmesser dargestellt. Der Durchmesser von 25 mm entspricht hierbei ungefähr dem Wellendurchmesser, der sich bei konventioneller Auslegung (Drehmoment, Torsion, Biegung usw.) ergeben würde. Zur besseren Interpretierbarkeit der hier dargestellten Werte sei darauf hingewiesen, dass die Wärmestromdichte einer üblichen Herdplatte bei ca. 4 W/cm^2 liegt.

Tabelle 4.6: Entstehende joulesche Wärmemenge und die auf die Oberfläche bezogene Wärmestromdichte, von zylinderförmigen Leitern aus verschiedenen Werkstoffen bei unterschiedlichen Strombelastungen

Wellendurchmesser [mm]	Wellenmaterial	Wärmemenge [W/cm] / Wärmestromdichte [W/cm ²] an der Oberfläche bei	
		4.000 A	6.000 A
25	C60 (1.0601)	32 / 4,1	71 / 9,1
25	CrNi-Stahl (1.4301)	358 / 45	806 / 102
25	Cu (2.0060)	5,8 / 0,8	13 / 1,6
45	CuCoBe (2.1285)	3,8 / 0,26	8,6 / 0,6

Als Konstruktionswerkstoff wurde die Beryllium-Kupfer-Legierung CuCoBe (2.1285) eingesetzt. Dieser Werkstoff verbindet eine gute Korrosionseigenschaft mit einer ausreichenden elektrischen Leitfähigkeit von $0,38 \cdot 10^{-6} \Omega$. Zur Reduzierung des Widerstandes wurde der Wellendurchmesser auf 45 mm erhöht. Um die Antriebswelle elektrisch gegen das Gehäuse zu isolieren, erfolgte die Lagerung, wie bei dem Stromübertragungsmodul, über Hybrid-Lager.

Die geforderte Schnellspannmöglichkeit für die Werkzeugelektrode soll einen schnellen manuellen sowie einen fernmanipulierten Elektrodenwechsel ermöglichen. Im Falle einer, durch Prozessstörungen hervorgerufenen, Verklemmung der Elektrode im zu trennenden Bauteil, soll zudem ein ferngesteuertes Lösen der Elektrode möglich sein. Nur so ist ein sicheres Bergen des Werkzeuges im fernmanipulierten Betrieb zu gewährleisten. Es wird also eine einfache und robuste Spannmöglichkeit benötigt, die neben der Übertragung des Antriebsmoments von ca. 160 Nm auch die hohen Prozessströme übertragen kann und gleichzeitig unempfindlich gegenüber Verschmutzungen ist.

Die auf dem Markt verfügbaren Spannvorrichtungen erfüllen diese Anforderungen nicht. Aus diesem Grund musste auch hier eine entsprechende Lösung entwickelt werden. Verwendet wurde ein Segment-Spanndorn. Die über Gummielemente flexibel miteinander verbundenen Segmente lassen sich durch das Eindrücken eines konischen Innenteils mit einem Kegelwinkel von 6° in radialer Richtung bewegen. Hierdurch ist ein Innenspannen mit einer sehr hohen Rundlaufgenauigkeit möglich. Darüber hinaus steht eine ausreichend große Fläche zur Übertragung der Prozessströme zur Verfügung. Die notwendige Spannkraft wird über ein Federsystem aufgebracht. Dies gewährleistet auch bei einem Ausfall der Energieversorgung ein sicheres Spannen der Elektrode (Fail-Save). Die hierfür notwendigen Spanndorne wurden in Zusammenarbeit mit der Firma Hainbuch entwickelt. Zur Gewährleistung einer ausreichenden elektrischen Leitfähigkeit (geringe Wärmeentwicklung) und einer entsprechenden Korrosionsbeständigkeit, wurden die Spannsegmente aus, dem auch bei der Antriebswelle verwendeten, Werkstoff CuCoBe (2.1285) gefertigt. Die erforderliche Spannkraft von 6 kN wird durch ein Federpaket aufgebracht. Um den zur Stromübertragung erforderlichen Querschnitt durch dieses Federpaket nicht unnötig zu reduzieren, wurde dieses in das Stromübertragungsmodul integriert. Die Kraftübertragung erfolgt über eine Zugstange. Zum Lösen der Spannvorrichtung wird ein 70 MPa Hochdruck-Hydraulikzylinder verwendet. Die Antriebswelle mit Schnellspannvorrichtung ist in Bild 4.11 schematisch dargestellt.

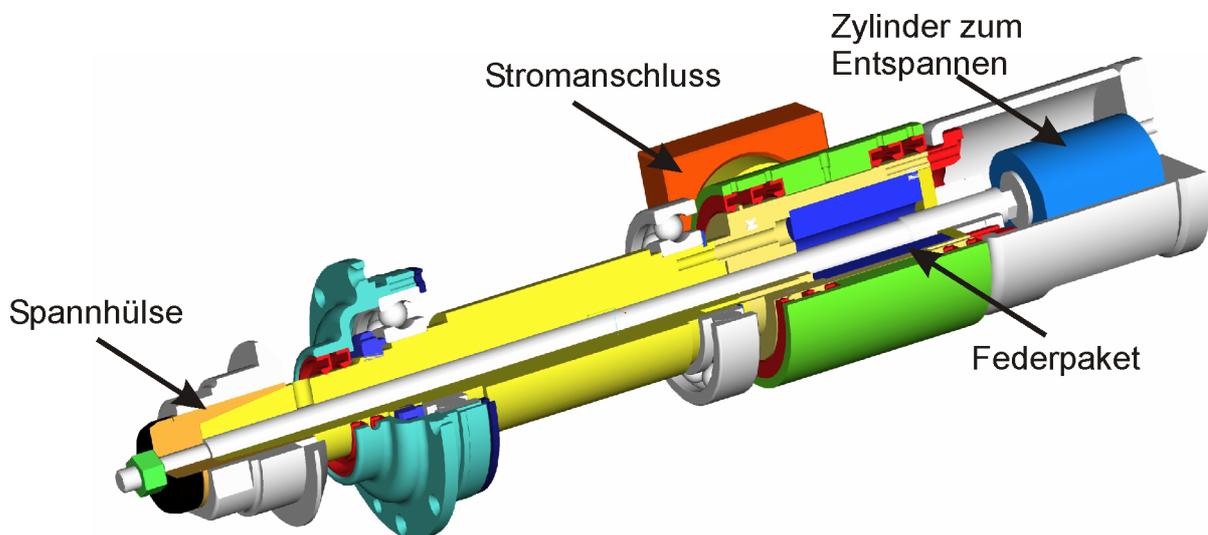


Bild 4.11: 3-D Modell der Antriebswelle mit Schnellspannvorrichtung und Stromübertragungsmodul

4.1.2.4 Elektrodenentwicklung

In der Vergangenheit wurden bei dem CAMG-Verfahren ausschließlich Elektroden mit planparallelen Seitenflächen verwendet. Der Abstand der Elektrodenflächen zur Schnittfugenseitenfläche ist daher gering und liegt, abhängig von der ver-

wendeten Prozessspannung, im Bereich von 0,15 mm bis 0,7 mm [Phi01]. Dies führt dazu, dass die für den Materialabtrag verantwortlichen Lichtbögen nicht nur an der Umfangsfläche zwischen Elektrode und Werkstück brennen, sondern auch an den Seitenflächen zwischen Elektrode und Schnittfuge. Dieser als Nebenlichtbögen bezeichnete Effekt wirkt sich in mehrfacher Hinsicht negativ auf den Prozess aus. Zum einen kommt es zu einer Reduzierung der Energiedichte an der Schneidfront und somit zu einer Verringerung der Schneidgeschwindigkeit. Des Weiteren führt die thermische Belastung an den Seitenflächen zu Thermospannungen, die eine Verformung der Elektrode zur Folge haben. Hervorgerufen durch diese Verformung kommt es zu häufigem oder dauerndem Seitenkontakt der Elektrode in der Schnittfuge. Hierdurch werden Kurzschlüsse verursacht und es zünden und brennen vermehrt Nebenlichtbögen. Hieraus resultiert eine weitere thermisch verursachte Verformung der Elektroden. Im ungünstigsten Fall bewirkt dies einen Dauerkurzschluss, der einen Prozessabbruch zur Folge hat. Darüber hinaus führt diese thermische und mechanische Belastung der Elektrodenseitenfläche zu einem starken seitlichen Verschleiß der Elektrode.

Dieser Energieumsatz an den Seitenflächen der Elektroden könnte für die, in der Literatur beschriebene, erforderliche Mindeststromdichte verantwortlich sein. Um diese Vermutung zu überprüfen, wurden im Rahmen der Untersuchungen zu dieser Arbeit geeignete Konzepte zur Vermeidung der Nebenlichtbögen entwickelt. In Bild 4.12 sind einige der Varianten dargestellt.

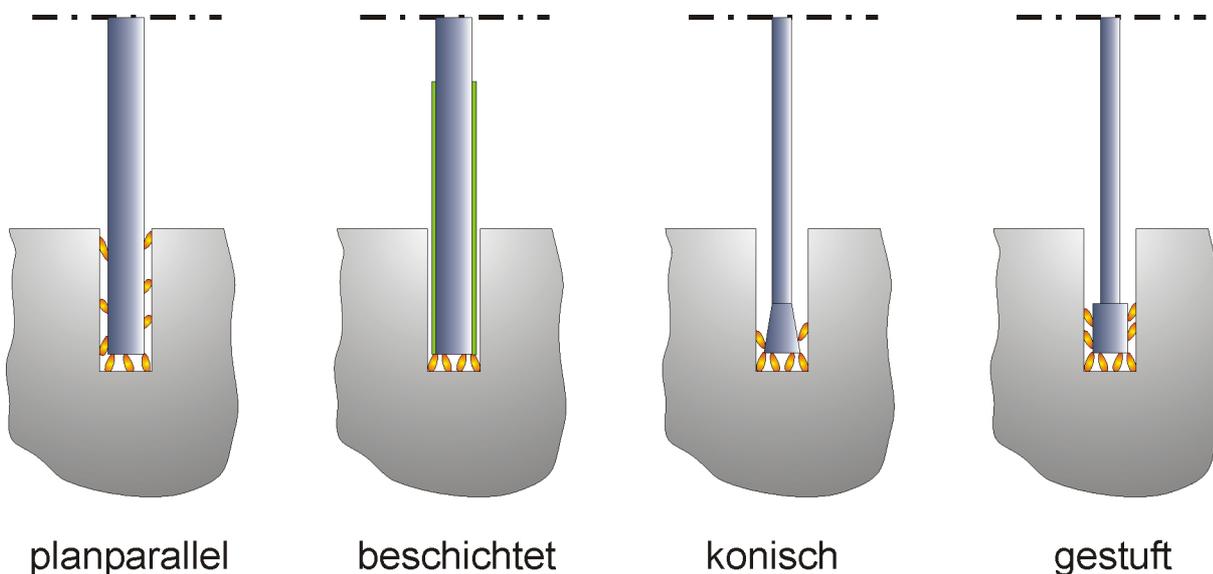


Bild 4.12: Unterschiedliche Konzepte für die geometrische Gestaltung von CAMG-Elektroden

Wie im Stand der Technik erläutert, ist die elektrische Isolation der Elektrodenseitenfläche nicht zielführend. Die in Bild 4.12 mit „konisch“ und „gestuft“ bezeichneten Gestaltungsvarianten werden bei spanenden Werkzeugen verwendet um den not-

wendigen Freischnitt zu erzeugen (hier zumeist als Freiwinkel oder Schränkung bezeichnet). Um bei einem radialen Verschleiß der Elektrode nicht automatisch eine Reduzierung der Schnittfugenbreite zu erhalten, wurde die Variante „gestuft“ favorisiert. Für die Fertigung der Elektroden wurden handelsübliche Stammblätter (430 x 2,0 x 60 mm) für Diamantschleifscheiben aus dem laserschweißbaren Material 25CrMo4 verwendet. Um den Einfluss des Elektrodenwerkstoffes auf den Verschleiß und auf den Prozess zu untersuchen, wurden für die aufgesetzten Segmente unterschiedlichen Materialien verwendet. Um einen Vergleich zu den bisher verwendeten planparallelen Elektroden zu gewährleisten, wurden Segmente aus QStE380 (1.0979) verwendet. Eine zweite Variante mit Segmente aus X4CrNi18-10 (1.4301) beruht auf den in der Literatur angegebenen guten Erfahrungen mit Elektroden aus CrNi-Stahl. Als hochtemperaturbeständige Variante wurden Elektroden mit Segmenten aus WCu-Sinterwerkstoff (80/20) gefertigt. Dieser Werkstoff findet auch bei der funkenerosiven Bearbeitung häufig Verwendung. Der hohe Wolframanteil gewährleistet hierbei eine gute thermische Beständigkeit, wobei der Kupferanteil die elektrische und thermische Leitfähigkeit des Verbundwerkstoffes verbessert. Die Segmente aus 1.0979 und 1.4301 wurden unter Verwendung einer hierfür gefertigten Schweißvorrichtung mit einer NVEBW (Nonvakuum-Elektronenstrahl-Schweißanlage) mit den Stammblättern verschweißt. Die Segmente aus WCu wurden von einer entsprechenden Fachfirma mittels Automaten gelötet. Die Höhe der Segmente betrug jeweils 10 mm. Der Durchmesser der Elektrode lag somit bei 450 mm.

4.1.2.5 Handgeführtes CAMG an Atmosphäre

Wie bereits in der Zielsetzung dieser Arbeit erläutert, werden auch mögliche neue Anwendungsbereiche für die Kontaktlichtbogenbearbeitung betrachtet. Ein mögliche Anwendung liegt in dem handgeführten Atmosphäreneinsatz des CAMG-Verfahrens. Die hohen Schnittleistungen und die geringen Prozesskräfte des Verfahrens lassen dieses als potentielle Alternative zum konventionellen Winkelschleifer erscheinen. Um hier einen ersten Eindruck zur grundsätzlichen Machbarkeit und dem sich bietendem Potential zu bekommen wurde ein CAMG-Werkzeug-Prototyp für den Atmosphäreneinsatz entwickelt. Um hier den Entwicklungsaufwand effektiv zu gestalten, erfolgte dies auf der Basis eines handelsüblichen Winkelschleifers, der entsprechend umgerüstet wurde.

Aufgrund der prozessspezifisch geringen Reaktionskräfte zwischen Elektrode und Werkstück ist die notwendige Antriebsleistung in dieser Anwendung vergleichsweise gering. Beim konventionellen mechanischen Schleifen muss ausreichend Leistung für den Schleifprozess aufgebracht werden. Die Antriebsleistung handelsüblicher Winkelschleifer ist daher ausreichend und muss nicht angepasst werden. Bei der Umrüstung gilt es daher lediglich eine geeignete Übertragung des Prozessstromes auf die Elektrode, eine elektrische Isolation der Elektrode gegenüber dem Winkelschleifer sowie eine Elektrodenkühlung zu entwickeln.

Die im Rahmen dieser Arbeit erreichten Begrenzungen der Prozessströme, auf die später noch ausführlich eingegangen wird, konnten bei der Gestaltung der Stromübertragung auf die Elektrode genutzt werden. Für den Handbetrieb wurden die Prozessströme auf maximal 150 A festgelegt. Bei einer Arbeitsspannung von ca. 60 V entspricht diese einem maximal möglichen Energieumsatz von ca. 9 kW. Die thermische Leistung ist somit ca. um den Faktor 10 größer als die Antriebsleistung des Winkelschleifers.

Die erarbeiteten Erkenntnisse zur Stromübertragung mittels Quecksilber konnten hier Anwendung finden. Die Gestaltung des Werkzeuges erfolgte entsprechend kompakt. Das entwickelte Stromübertragungsmodul ist in Bild 4.13 als Schnittzeichnung und als Foto dargestellt.

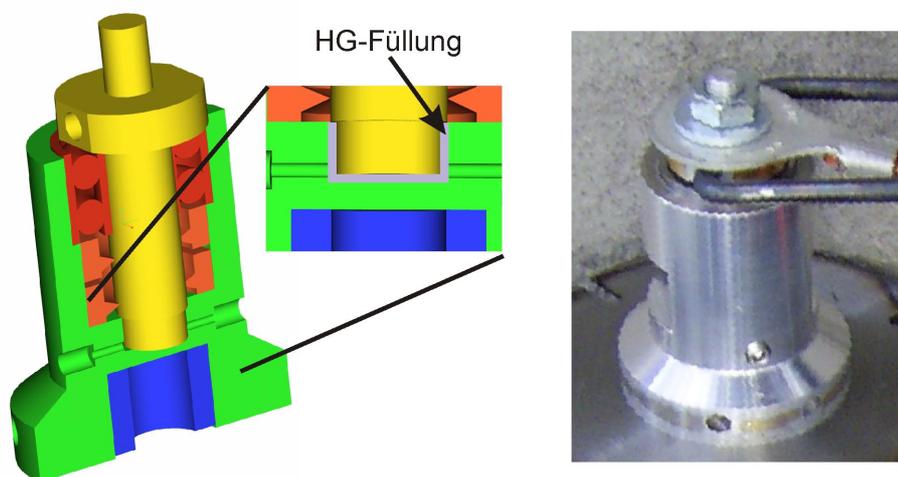


Bild 4.13: Stromübertragungsmodul für CAMG-Atmosphären-Handgerät, CAD-Modell (links), Prototyp (rechts)

Um einen Stromfluss über das Getriebe und eine hieraus resultierende Zerstörung des Winkelschleifergetriebes zu verhindern, erfolgte die Ausführung des Spannflansches zur Elektrodenaufnahme als Isolator. Um einen Stromeintrag über die Antriebswelle zu verhindern, wurde das Spanngewinde im Stromübertragungsmodul ebenfalls aus einem elektrisch isolierenden Kunststoff gefertigt. Die Umrüstung eines konventionellen Winkelschleifers kann auf diese Weise mit nur zwei zusätzlichen Bauteilen erfolgen. In Bild 4.14 ist der umgerüstete Winkelschleifer mit Werkzeug-elektrode und Stromübertragungsmodul dargestellt.

Als Elektroden wurden auch hier handelsübliche Stammblätter für Diamantschleifscheiben aus dem Werkstoff 25CrMo4 verwendet. Auf eine Bestückung dieser Elektroden mit Segmenten wurde verzichtet. Aufgrund der an Atmosphäre geringeren Kühlwirkung des umgebenden Mediums könnten sich Segmente infolge der thermischen Belastung lösen. Wegen der hohen Umfangsgeschwindigkeit der Elektrode geht hiervon ein erhebliches Verletzungsrisiko aus. Um dennoch das Elektrodenma-

terial zu variieren, wurden zum Vergleichen Elektroden aus carbonfaserverstärktem Kohlenstoff (CFC) gefertigt. Dieser Werkstoff verbindet eine, im Vergleich zu Graphit, hohe mechanische Stabilität mit einer guten thermischen Beständigkeit. Mit diesem Werkstoff wurden in der Vergangenheit beim CAMC-Verfahren gute Erfahrungen gemacht.



Bild 4.14: CAMG-Atmosphären-Handgerät

Die üblichen Winkelschleifer für 115 bzw. 125 mm Scheibendurchmesser arbeiten mit Umfangsgeschwindigkeiten von ca. 80 m/s bzw. einer Abtriebsdrehzahl von ca. 13.000 1/min. Um auch mit geringeren Geschwindigkeiten arbeiten zu können, wurde ein Gerät ausgewählt, welches eine stufenlose Drehzahleinstellung erlaubt.

Zur Kühlung der Elektrode wurden Düsenrohre auf beiden Seiten der Elektrode befestigt. Abhängig von den zur Kühlung verwendeten Gasen, kann der Gasvolumenstrom über den Gasdruck und den Düsenquerschnitt in einem weiten Bereich eingestellt werden.

4.2 Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (CAMC)

4.2.1 Ausgangslage CAMC

Die Anforderungen an ein CAMC-Werkzeug sind nicht komplex. Neben einer Spannfunktion für die Elektrode muss eine geeignete Wasserspülung vorgesehen werden. Die bisher entwickelten CAMC-Werkzeuge erfüllen diese Anforderungen. Zu verbessern ist jedoch bei allen Versionen die Begrenzung des Parameterbereiches hinsichtlich des Druckes und/oder des Volumenstromes der Wasserspülung. Verantwortlich hierfür sind die verwendeten geringen Leitungsquerschnitte der Versorgungsleitungen (6 – 15 mm) sowie die geringen Querschnittsflächen der verwendeten Düsen. Die angegebenen hohen Drücke des Spülwassers von bis zu

1,5 MPa [Sch97] resultieren zumeist aus den hohen Druckverlusten in den Zuleitungen und dem Werkzeug und wurden nur zu einem geringen Teil in den Spüldüsen in kinetische Energie umgesetzt. Die Volumenströme waren dementsprechend gering. Gleichwohl wurde in vielen Untersuchungen festgestellt, dass bei der Steigerung der Elektrodenspülung der Elektrodenverschleiß deutlich reduziert werden kann [Bac92] [Bac97] [Bac98].

Eine aus einer Düse unter Wasser austretende Wasserströmung verliert aufgrund der hohen Reibungsverluste im Wasser rasch an Geschwindigkeit und weitet sich auf. Zusätzlich zu den Reibungsverlusten im Wasser gilt es beim CAMC eine intensive Wasserspülung in dem nur ca. 1,5 mm breiten Spalten zwischen Elektrode und Schnittfugenseitenflächen zu realisieren. Die hierbei auftretende Wandreibung erhöht die Reibungsverluste zusätzlich. Zur Steigerung der Spülwirkung ist es daher, insbesondere bei größeren Werkstückdicken (Schnitttiefen), notwendig, vergleichsweise hohe Spüleleistungen zu realisieren.

Um den Einfluss der Spülwirkung auf den Prozess zu untersuchen, musste daher ein neues CAMC-Werkzeug entwickelt werden. Die Hauptanforderungen an ein solches Werkzeug lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Arbeitsströme bis 2000 A

Basierend auf den bisherigen Erkenntnissen muss ein CAMC-Werkzeug für mittlere Arbeitsströme I_{Amittel} von bis zu 2000 A und Arbeitsspannungen U_A von bis zu 70 V geeignet sein.

- Arbeitsdrücke bis 20 bar

Um hohe Strömungsgeschwindigkeiten der Elektrodenspülströmung zu realisieren müssen hohe Spülwasserdrücke möglich sein.

- Spülwasservolumenströme von bis zu 20 m³/h

Um eine möglichst gleichmäßige und intensive Strömung auf der gesamten Elektrodenfläche zu realisieren sind hohe Volumenströme notwendig.

- Austauschbarkeit der Spüldüsen

Um insbesondere im Laborbetrieb die Elektrodenspülung durch Veränderung der Düsengeometrie variieren zu können, sollten die Spüldüsen einfach ausgetauscht werden können.

- Geringe Druckverluste bei hohen Volumenströmen

Um einen möglichst großen Anteil der Pumpenenergie in der Düse in Geschwindigkeit umzusetzen, sollten die Druckverluste in den Zuleitungen und im Werkzeug möglichst gering gehalten werden. Insbesondere sollten an den Spüldüsen keine großen Druckunterschiede auftreten.

- Einfacher Elektrodenwechsel

Mit Blick auf einen praktischen Einsatz des Verfahrens sollte der Elektrodenwechsel einfach und ggf. fernhantiert möglich sein.

4.2.2 Weiterentwicklung CAMC

4.2.2.1 Maschinengeführtes CAMC-Werkzeug

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das in Bild 4.15 dargestellte CAMC-Werkzeug entwickelt. Dieses Werkzeug zeichnet sich dadurch aus, dass die Strom- und Wasserzuführung über die Haltestange erfolgt. Die Übertragung des Spülwassers von der festen Spannbacke in die bewegliche Spannbacke erfolgt intern über eine Buchse, die gleichzeitig Bestandteil der Fixierung der Elektrode ist. Diese Bauform erlaubt es auf Schläuche zum Verbinden der Spannbacken zu verzichten. Zudem ist der Querschnitt der Verbindung groß und die Druckverluste auch bei hohen Volumenströmen entsprechend gering. Die Düsen sind auswechselbar und erlauben so eine einfache Variation der Düsengeometrie durch deren Austausch. Das CAMC-Werkzeug ist für Betriebsdrücke von bis zu 2,5 MPa ausgelegt und gestattet bei moderaten Druckverlusten Volumenströme von bis zu ca. 30 m³/h. Auf eine Auslegung für noch höhere Drücke und Volumenströme wurde mit Rücksicht auf eine spätere praktische Verwertbarkeit der Untersuchungsergebnisse verzichtet.

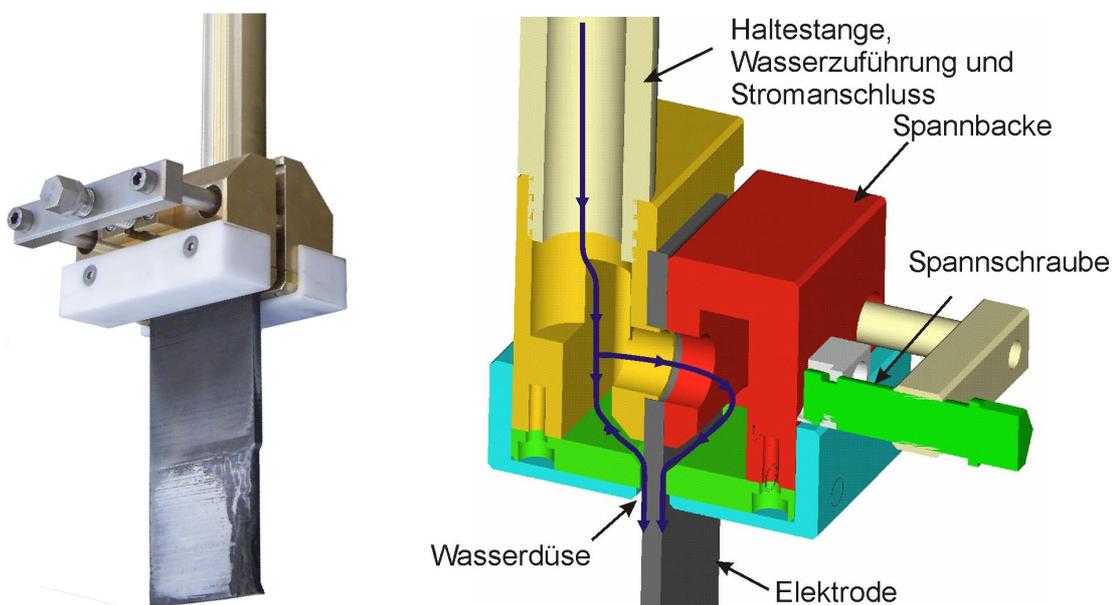


Bild 4.15: CAMC-Werkzeug Prototyp (rechts), CAD-Modell (links),

4.2.2.2 Handgeführtes CAMC-Werkzeug

Die Vorteile, die das CAMC-Verfahren gegenüber anderen Schneidverfahren potentiell bietet, sind nicht nur für den maschinengeführten Betrieb von Interesse. Für handgeführte Schneidaufgaben, wie sie von Tauchern bei Bergungs- und Reparaturarbeiten unter Wasser durchgeführt werden müssen, kann sich das CAMC-Verfahren ebenfalls eignen. Anders als bei den thermischen Schneidverfahren, autogenes Brennschneiden und Plasmaschmelzschneiden, ist der Einfluss des Umgebungsdruckes (Wassertiefe) auf die Schneidleistung des CAMC-Verfahrens nur gering [Bac98].

Im Vergleich zum Unterwasser-Oxy-Arc-Cutting (siehe Bild 4.16), welches das am häufigsten verwendete thermischen Trennverfahren unter Wasser ist, bringt die schwertförmige Schneidelektrode viele Vorteile. Insbesondere, da anders als beim Oxy-Arc-Cutting, die Positionierung der Elektrode bei schlechter Sicht kein Problem darstellt. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher untersucht werden, ob sich das CAMC-Verfahren grundsätzlich für den handgeführten Einsatz unter Wasser eignet und wo die Grenzen und die Entwicklungspotenziale liegen.

Bei der konstruktiven Gestaltung eines Hand-CAMC-Werkzeuges galt es gewisse Widersprüche konzeptionell zu berücksichtigen. So verlangt der Schneidprozess eine ruhige und feinfühliges Führung der Elektrode. Aus den Umgebungsbedingungen ergeben sich jedoch gewisse Störkräfte. So müssen die Reaktionskräfte der Elektrodenspülung sowie die Zugkräfte der Versorgungsleitungen durch deren Eigengewicht und durch evtl. Wasserströmungen aufgenommen werden. Die sich aus dem Unterwassereinsatz ergebenden ergonomischen und technischen Anforderungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- hyperbar-nass
Wassertiefe ≤ 50 m.
- extrem eingeschränkte Sicht
In einer Vielzahl von Anwendungen ist aufgrund der Wassertrübung kein sichtkontrolliertes Arbeiten möglich.
- Strömungskräfte
Wasserströmung mit Kraftwirkung auf den Taucher und auf Zuleitungen.
- Stromzuführung über Kabel
Auslegung für 800 A bei bis zu 65 V.
- Spülwasserzuführung
auftretende Rückstoßkräfte müssen aufgefangen werden.
- Schnellspannmöglichkeit für Elektrode
Elektrodenwechsel am Einsatzort unter Wasser ohne Sicht.

Um diese Anforderungen umzusetzen, wurde, in Zusammenarbeit mit dem Fachbereich Industriedesign der Fachhochschule Hannover, eine Designstudie im Rahmen einer Studienarbeit durchgeführt [Men04]. In Anlehnung an das in dieser Arbeit entworfene Modell wurde ein entsprechendes Handgerät konstruiert und gefertigt. In Bild 4.16 ist ein konventionelles Oxy-Arc-Cutting System und das hier entwickelte CAMC-Handgerät dargestellt.

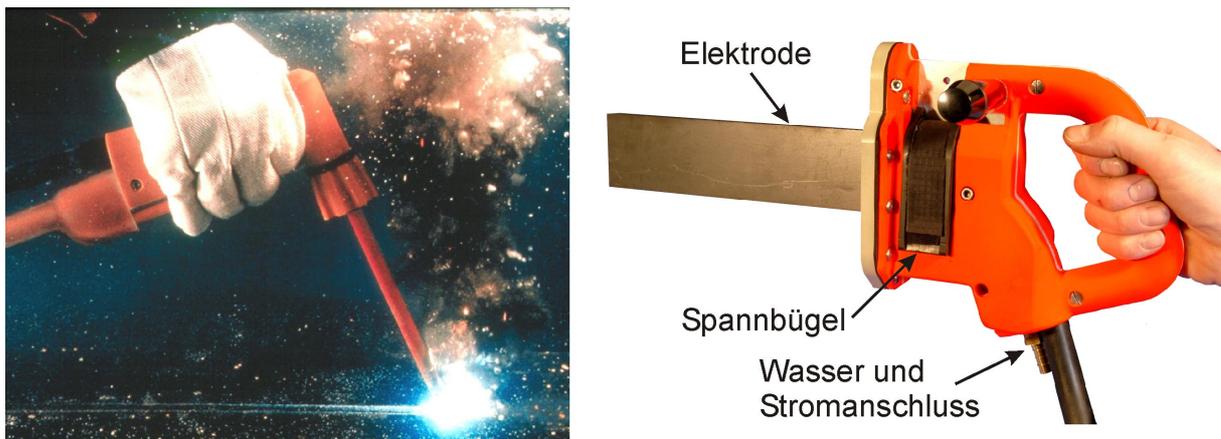


Bild 4.16: Oxy-Arc-Cutting System (links), neu entwickeltes CAMC-Handgerät (rechts)

Dieses Handgerät zeichnet sich dadurch aus, dass die Medienzuführung zentral über den Griffenschaft erfolgt. Die Krafteinleitung der Zuleitungen liegt hierbei zwischen den beiden Griffstellen der Hände. Die Zugkräfte der Versorgungsleitungen können ergonomisch günstig aufgenommen werden. Die Griffmulde des Gerätes ist ausreichend groß ausgeführt um ein Handhaben auch mit dicken Taucherhandschuhen zu ermöglichen. Der Elektrodenwechsel ist über einen Schnellspannmechanismus (schwarzer Hebel) realisiert. Dies ermöglicht auch ohne Sicht einen einfachen und sicheren Elektrodenwechsel. Das Gerät ist für Prozessströme bis 800 A ausgelegt. Mit Rücksicht auf die vom Taucher auszugleichenden Rückstoßkräfte ist eine Spülströmung von ca. 3 m³/h bei Drücken von max. 0,5 MPa vorgesehen.

5 Experimenteller Teil

5.1 Schneiduntersuchungen

Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen (CAMG)

Mit dem neuen CAMG-Werkzeug stand ein leistungsstarkes Gerät zur Durchführung der geplanten Untersuchungen zur Verfügung. Um die Leistungspotentiale des CAMG-Verfahrens beim Dickblechschneiden nutzen zu können, galt es insbesondere die erläuterten Probleme durch die Nebenlichtbögen an den Elektrodenseitenflächen zu lösen. Zunächst wurde daher überprüft, ob mit gestuft ausgeführten Elektroden dieses Ziel erreicht werden kann.

Zur Durchführung der CAMG-Schneidversuche wurde das bereits von Philipp [Phi01] genutzte Schneidbecken verwendet. Es handelt sich hierbei um ein Versuchsbecken mit den Abmessungen $3 \times 1,5 \times 1,5 \text{ m}^3$ (L x B x H) mit einer 3-Achs-Führungsmaschine. Um die geringeren Vorschubgeschwindigkeiten, die aus dem Schneiden erhöhter Wandstärken bzw. Schnitttiefen resultieren, zu realisieren, wurden die Antriebe der Achsen ausgetauscht und das System mit einer Steuerung mit Positions- und Geschwindigkeitsanzeige ausgestattet. Aufgrund der begrenzten Tragfähigkeit der Führungsmaschine wurde das CAMG-Werkzeug fest im Becken montiert und die Werkstücke wurden von dem Führungssystem bewegt (siehe Bild 5.1). Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Schnitte erfolgten hierbei zumeist als Fugenschnitte. Dies geschah vor dem Hintergrund, dass bei Trennschnitten insbesondere im letzten Teil des Schnittes unkontrolliert Bewegungen der nicht gespannten Werkstückseite auftreten. Dies kann zu vereinzelt oder dauerhaftem, Seitenkontakt der Elektrode führen. Die hierbei auftretenden Störungen im Prozess beeinflussen die Messergebnisse. Hervorgerufen werden diese Bewegungen durch die an der Schneidfront thermisch induzierten Schrumpfspannungen, durch die Strömungskräfte sowie durch Schwerkraft. Vermeiden lässt sich die Bewegung nur durch eine entsprechend angepasste Spannvorrichtung. Bei einem Fugenschnitt wird das Werkstück durch den verbleibenden Steg auf Position gehalten. Zudem lässt sich auf diese Weise die Schnittfugenbreite nachträglich besser ermitteln.

Als Schneidstromquelle wurden drei parallel schaltbare Schweißgleichrichter der Firma Dalex Typ CG 2000 mit Konstantspannungscharakteristik, einem Nennstrom von je 2 kA und einer einstellbaren Leerlaufspannung von maximal 69 V DC verwendet. Bei einem Arbeitsstrom von 2.000 A liefern diese eine Arbeitsspannung von 54 V DC. Die maximal zur Verfügung stehende elektrische Leistung beträgt somit $3 \times 108 \text{ kW} = 324 \text{ kW}$.

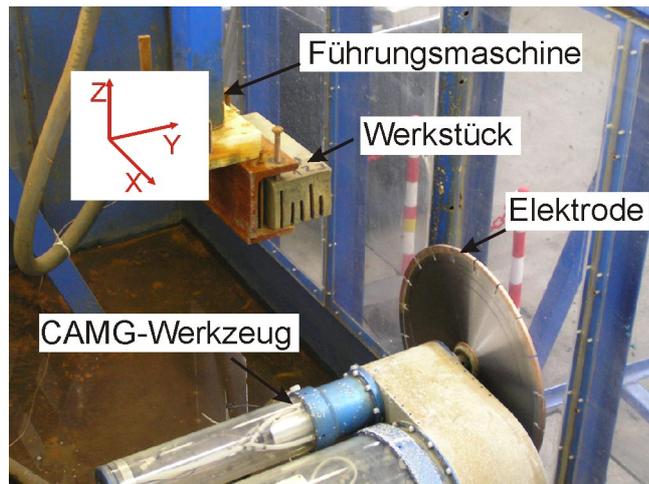


Bild 5.1: CAMG-Versuchsaufbau im Schneidbecken

Um nicht nur die Schneidergebnisse (Elektrodenverschleiß, Schnittfugenbreite usw.) zur Prozessbeurteilung bzw. zum Vergleich heranziehen zu können, wurden bei allen Schnitten der Strom- und Spannungsverlauf mit einer Frequenz von min. 10 kHz aufgezeichnet. Die Analyse dieser Daten erlaubt es, die bei größeren Schnitttiefen bisher weitestgehend unbekanntem Vorgänge beim CAMG-Verfahren zu analysieren und so ein besseres Prozessverständnis zu entwickeln. Zur Erfassung, Aufzeichnung und Analyse dieser Daten wurde ein PC-basiertes Messsystem mit folgender Ausstattung verwendet:

- Messkarte: NI – 6070E, Fa. National Instruments
- Anschlussboard: BNC 2090, Fa. National Instruments
- Stromwandler: Typ LT 4000-S, Fa. LEM
- Messverstärker: Signalverstärker M3VT3BNC, MIVS46BAN, Fa. DIE
- Software: FlexPro, DasyLab

5.1.1 Einfluss der Werkzeugelektroden

Vergleichende Schneiduntersuchungen mit planparallelen und gestuften Elektroden zeigen, dass mit gestuften Elektroden das Brennen von Nebenlichtbögen vermieden werden kann. In Bild 5.2 ist der Unterschied im Verschleißbild der Elektrodenseitenfläche dargestellt. Bei planparallelen Elektroden brennen Lichtbögen auch auf den Seitenflächen des Stammblasses. Bei gestuften Elektroden kann dies vollständig vermieden werden. Die Brennsuren der Lichtbögen konzentrieren sich auf die Elektrodensegmente. Dies verhindert die thermische Belastung der Elektrodenseitenflächen durch direkten Lichtbogenkontakt und somit den thermischen Verzug mit den sich daraus ergebenden Nachteilen.

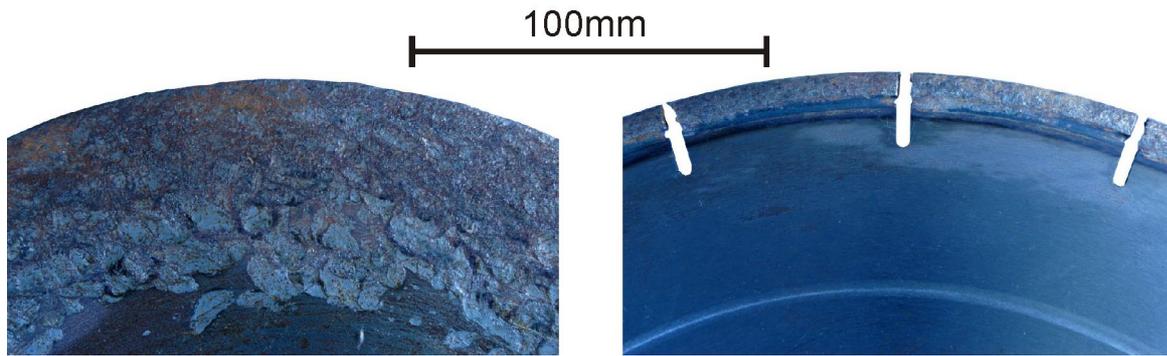


Bild 5.2: Seitenflächen von CAMG-Elektroden nach einem Einsatz, planparallel (links), gestufte Ausführung (rechts)

Diese so erreichte Konzentration der Lichtbogenenergie auf den Bereich der Schneidfront reduziert die Energieverluste an den Seitenflächen und führt so zu einer deutlichen Stabilisierung des Prozesses. Die auftretenden Stromschwankungen sind geringer und ein Klemmen der Elektrode durch deren thermischen Verzug kann auch bei größeren Schnitttiefen vermieden werden.

Im Vergleich zu den bisher verwendeten planparallelen Elektroden wird die Elektrodenbreite b_{WZ} durch die verwendeten Segmente von 2 mm auf 5 mm erhöht. Hieraus resultiert eine entsprechend breitere Schnittfuge. Ausgehend von einem konstanten Freischnitt zwischen Elektrodenseitenfläche und Schnittfugenwandung von ca. 0,5 mm [Phi01] ergibt sich für $b_{WZ} = 2$ mm eine Schnittfugenbreite von 3 mm und für $b_{WZ} = 5$ mm eine Schnittfugenbreite von 6 mm. Bei gleicher Schneidgeschwindigkeit muss somit die doppelte Menge Fugenmaterial aufgeschmolzen werden. Die Energie zum Austragen des Fugenmaterials ist dementsprechend größer.

Die über die Elektrodengeometrie erreichte Reduzierung der Energieverluste führt daher nicht zwangsläufig zu einer Steigerung der möglichen Vorschubgeschwindigkeiten. Um den Einfluss der veränderten Elektrodengeometrie und des vergrößerten Elektrodendurchmessers einordnen zu können, wurden Vergleichsuntersuchungen durchgeführt. Als Referenz dienten hier die von [Phi01] gut dokumentierten Untersuchungen zum Elektrodenverschleiß. In Tabelle 5.1 sind die Parameter einander gegenübergestellt.

Obwohl mit der neuen 5 mm breiten Elektrode doppelt so viel Material aufgeschmolzen werden muss, wird bei vergleichbaren Parametern nur ca. 20% mehr Energie für den Trennschnitt benötigt. Dieser Vergleich bestätigt die Vermutung, dass ein großer Teil der beim CAMG-Schneiden mit planparallelen Elektroden benötigten Energie durch Lichtbögen an den Seitenflächen der Elektroden verloren geht.

Tabelle 5.1: Parameter für Vergleichsschnitt

Parameter	Referenz –Parameter [Phi01]	Vergleichsparameter
Elektrodengeometrie	planparallel	gestuft
Arbeitsspannung U_A	65 V	65 V
Arbeitsstromdichte J	50 A/mm ²	16 A/mm ²
Werkstückhöhe H	20 mm	20 mm
Werkzeugelektroden Durchmesser D	200 mm	450 mm
Breite der Werkzeugelektrode b_{wz}	2 mm	5 mm
Umfangsgeschwindigkeit v_u	35 m/s	35 m/s
Vorschubgeschwindigkeit v_v	750 mm/min	750 mm/min
Schneidleistung P_s	150 cm ² /min	150 cm ² /min
Abstand Rotationsachse / Werkstück- oberfläche a ⁽¹⁾	50 mm ⁽²⁾	175 mm ⁽³⁾
mittlerer Arbeitsstrom $I_{Amittel}$	ca. 2500 A ⁽⁴⁾	ca. 3000 A ⁽⁵⁾

¹⁾ Entspricht in beiden Fällen einem Elektrodenüberstand von 30 mm

²⁾ entspricht einer Kontaktlinienlänge von $l_k = 25,1$ mm

³⁾ entspricht einer Kontaktlinienlänge von $l_k = 35,4$ mm

⁴⁾ berechneter Wert ($J \times l_k \times b_{wz}$)

⁵⁾ Messwert

Ein Vergleich der Arbeitsstromdichte zeigt, dass die bisherige Definition einer Mindestarbeitsstromdichte weniger von den Vorgängen an der Schneidfront, sondern vielmehr von den Verlusten an den Seitenflächen geprägt sein muss. Für eine Arbeitsspannung von 65 V wurde bisher eine Mindestarbeitsstromdichte von 23 A/mm² (Schneidgeschwindigkeit = 0) angegeben. Bei dem hier durchgeführten Vergleichsschnitt beträgt die Arbeitsstromdichte hingegen nur 16 A/mm² bei einer Vorschubgeschwindigkeit von immerhin 750 mm/min. Der geringere Wert für die Arbeitsstromdichte ergibt sich aus den veränderten geometrischen Eingriffsverhältnissen und der breiteren Elektrode.

Schneiduntersuchungen mit Segmenten aus X4CrNi18-10 (1.4301) an einem Werkstück aus gleichem Material, verdeutlichen den Einfluss des Elektrodenmaterials auf den Prozess. So zündet bei dieser Anordnung kein Lichtbogen zwischen Werkstück und Elektrode. Auch bei starkem mechanischen Kontakt (Schleifen) zwischen der sich drehenden Elektrode und dem Werkstück fließen nur geringe Ströme im Bereich von wenigen Ampere. In Bild 5.3 sind die nur geringen Brennschmelzen der Lichtbögen und die mechanischen Schleifspuren gut zu erkennen. Die Effekte, die zu dieser

isolierenden Wirkung führen, wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter untersucht.

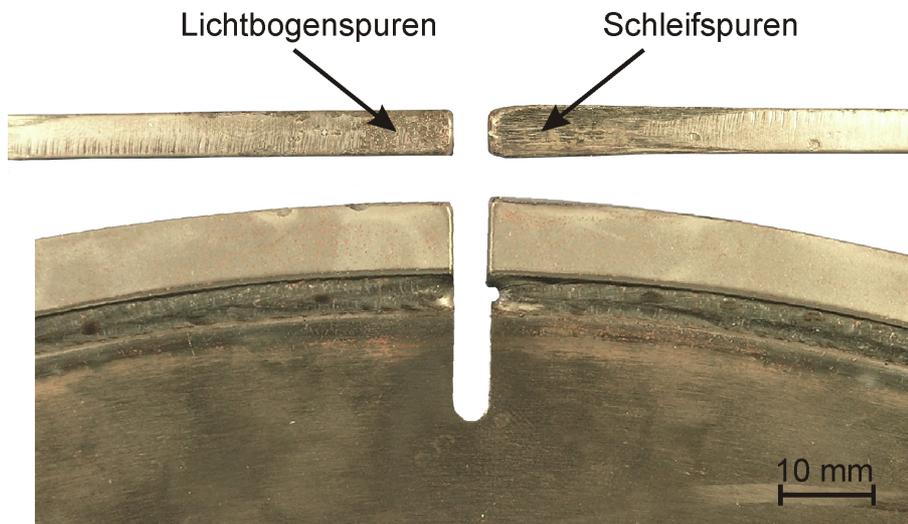


Bild 5.3: Stirn- und Seitenfläche einer CAMG-Elektrode mit Segmenten aus dem Werkstoff 1.4301

Bei dem Elektrodenmaterial QStE380 (1.0979) erreichten die gestuften Elektroden ihre Verschleißgrenze nicht durch die radiale Abnahme des Elektrodendurchmessers, sondern durch seitlichen Verschleiß der Segmente. Der Abstand der Segmentseitenfläche zum Stammblatt nimmt kontinuierlich ab. Ist der Segmentüberstand kleiner als ca. 1,1 mm, was einer Segmentbreite von 4,2 mm entspricht, wandern die Lichtbögen auf die Seitenflächen und es brennen Nebenlichtbögen auf dem Stammblatt. Die Brennsuren der Lichtbögen auf der Stammblattseitenfläche sind in Bild 5.4 links gut zu erkennen. Beim Erreichen dieser Verschleißgrenze führt die thermische Belastung, wie bei planparallelen Elektroden, zum Verzug und den dadurch hervorgerufenen bereits erläuterten unerwünschten Effekten.

Bei Elektroden mit Segmenten aus dem hochschmelzenden Material WCu tritt nahezu kein seitlicher Verschleiß auf. Hier sind an den Seitenflächen auch kaum Brennsuren der Lichtbögen zu erkennen. Mit zunehmender Schneidzeit bilden sich an der Oberfläche der Segmente feine Risse, die vermutlich durch die thermische Wechselbeanspruchung des Werkstoffes hervorgerufen werden. Ein negativer Einfluss dieser Risse konnte nicht festgestellt werden. Aufgrund des bei diesem Elektrodenmaterial vorherrschenden rein radialen Verschleißes bleibt die Schnittfugenbreite über der Schnittlänge konstant. Die Verschleißgrenze der Elektrode ist erreicht, wenn die Segmente eine Resthöhe von ca. 4 mm aufweisen. Bei weiterem Betrieb brechen dann einzelne Segmente teilweise oder vollständig heraus.

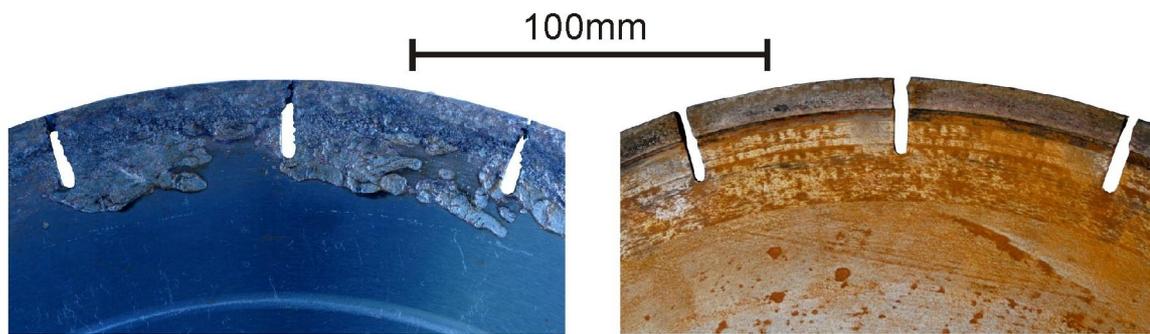


Bild 5.4: Seitenflächen von CAMG-Elektroden nach einem Einsatz, mit Segmenten aus dem Werkstoff QStE380 (links), aus WCu (rechts)

5.1.2 Einfluss der Schneidstromquellencharakteristik

Wie beschrieben, führen die bisher bei dem CAMG-Verfahren üblichen hohen Prozessströme zu einem erheblichen konstruktiven Aufwand. Um Lösungsansätze für einen stromreduzierten Betrieb zu finden, wurde das Prozessverhalten von gestuften Elektroden bei unterschiedlichen Prozessparametern mit Hilfe der Strom- und Spannungsanalyse näher betrachtet.

In Bild 5.5 ist exemplarisch ein typischer Strom- und Spannungsverlauf eines 80 mm tiefen Schnittes am Werkstoff 1.4301 mit WCu Elektroden bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/min dargestellt. Der Prozess verläuft diskontinuierlich. Nach dem Zünden eines Lichtbogens brennt dieser ca. 10 – 50 ms und erlischt anschließend. Aufgrund der elektrischen Leitfähigkeit des Umgebungswassers und dem geringen Spalt zwischen Elektrode und Werkstück fließt anschließend noch ein Leckstrom, der sich im Bereich von ca. 80 A bewegt. Die Stromquelle arbeitet aber im Bereich ihrer Leerlaufspannung. Dies ist gut an der durch den Gleichrichter hervorgerufenen Grundschwankung zu erkennen. Nach dieser kurzen Pause zündet ein neuer Lichtbogen und der Vorgang wiederholt sich. Die auftretenden Maximalströme I_{Amax} bewegen sich im Bereich von 0,5 - 2 kA. Der mittlere Arbeitsstrom $I_{Amittel}$ liegt in diesem Beispiel bei ca. 440 A. Die umgesetzte mittlere Leistung P_{mittel} beträgt ca. 16,5 kW.

In Bild 5.6 ist exemplarisch ein typischer Strom- und Spannungsverlauf unter gleichen Randbedingungen bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 80 mm/min dargestellt. Auch hier kann ein diskontinuierlicher Betrieb beobachtet werden. Allerdings brennt in diesem Fall kontinuierlich ein Lichtbogen, was am schwankenden aber nicht unter ca. 1 kA abfallenden Arbeitsstrom zu erkennen ist. Die auftretenden Maximalströme I_{Amax} liegen im Bereich von 3 – 4 kA auf. Der mittlere Arbeitsstrom $I_{Amittel}$ beträgt ca. 2,3 kA. Die umgesetzte mittlere Leistung P_{mittel} beträgt ca. 65 kW.

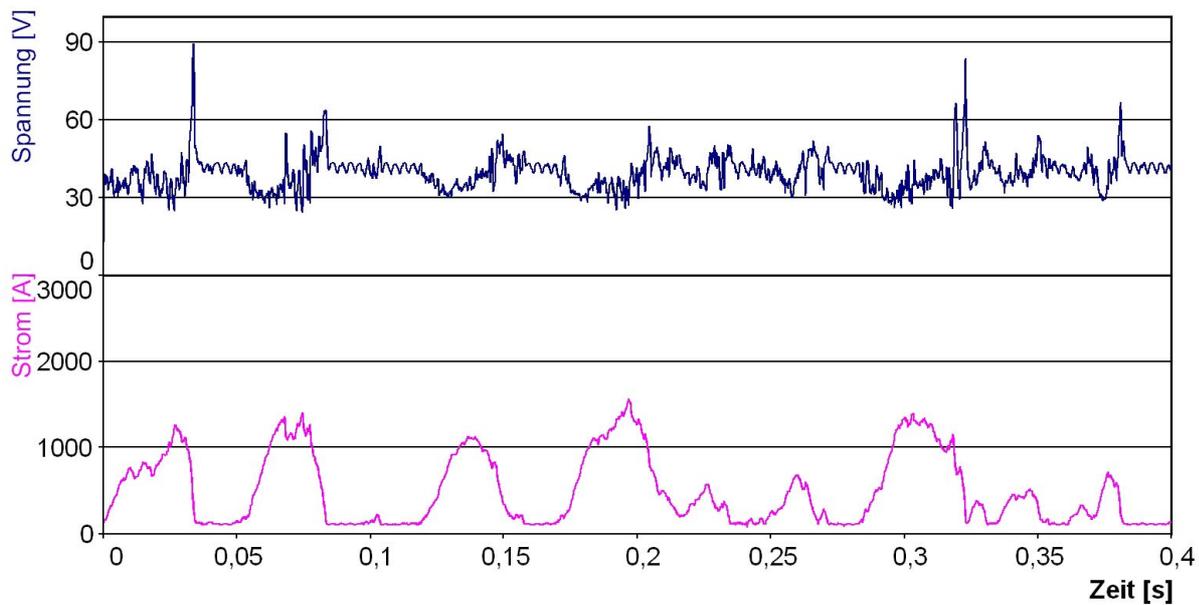


Bild 5.5: Typischer CAMG-Prozessverlauf bei geringer Vorschubgeschwindigkeit $v_v = 10 \text{ mm/min}$ ($H = 80 \text{ mm}$, Werkstoff 1.4301, $I_{\text{Amittel}} = 444 \text{ A}$, Stromquelle Fa. Dalex 3 xTyp CG 2000)

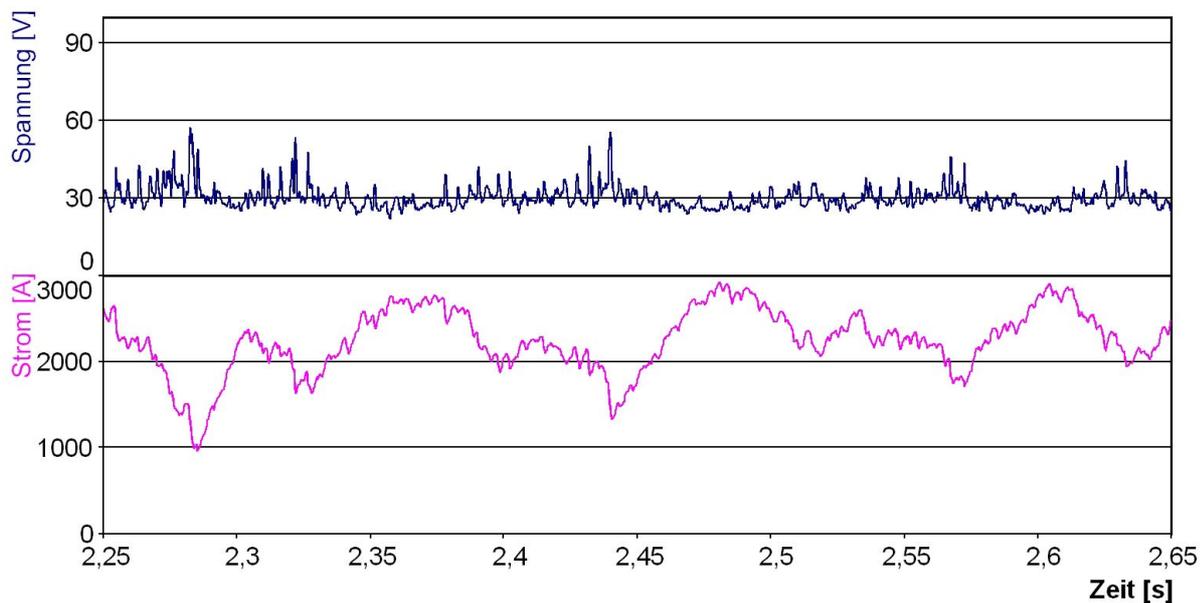


Bild 5.6: Typischer CAMG-Prozessverlauf bei hoher Vorschubgeschwindigkeit $v_v = 80 \text{ mm/min}$ ($H = 80 \text{ mm}$, Werkstoff 1.4301, $I_{\text{Amittel}} = 2330 \text{ A}$, Stromquelle Fa. Dalex 3 xTyp CG 2000)

Mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit steigt somit der Werte des Maximalstroms I_{Amax} . Bei der Darstellung des mittleren Arbeitsstrom I_{Amittel} über der Vorschubgeschwindigkeit v_v (siehe Bild 5.7) ist der linearen Zusammenhang zu erkennen. Diese Abhängigkeit des mittleren Arbeitsstromes erlaubt es, eine der Leistungs-

fähigkeit der Stromquellen angepasste Vorschubgeschwindigkeit auszuwählen. Vorausgesetzt, der auftretenden Maximalstrom I_{Amax} kann von der Stromquelle geliefert werden, kann der mittlere Arbeitsstrom über die Vorschubgeschwindigkeit auf nahezu beliebig kleine Werte reduziert werden.

Nicht möglich ist allerdings eine unbegrenzte Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit. Entsprechende Untersuchungen haben gezeigt, dass ab einer schnitttiefenabhängigen Obergrenze der Schneidprozess abbricht. Diese Grenze kann auch nicht durch eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit der Stromquellen verschoben werden. Offensichtlich können hier die Kurzlichtbögen nicht mehr aufrecht erhalten werden, da der Spalt zwischen Elektrode und Werkstück zu klein wird. Die Elektrode schleift dann über das Werkstück. Der hierbei auftretende Kurzschluss führt zu sehr hohen Prozessströmen. Die in der Schnittfuge freiwerdende thermische Energie reicht jedoch nicht aus, um ein Schneiden zu gewährleisten.

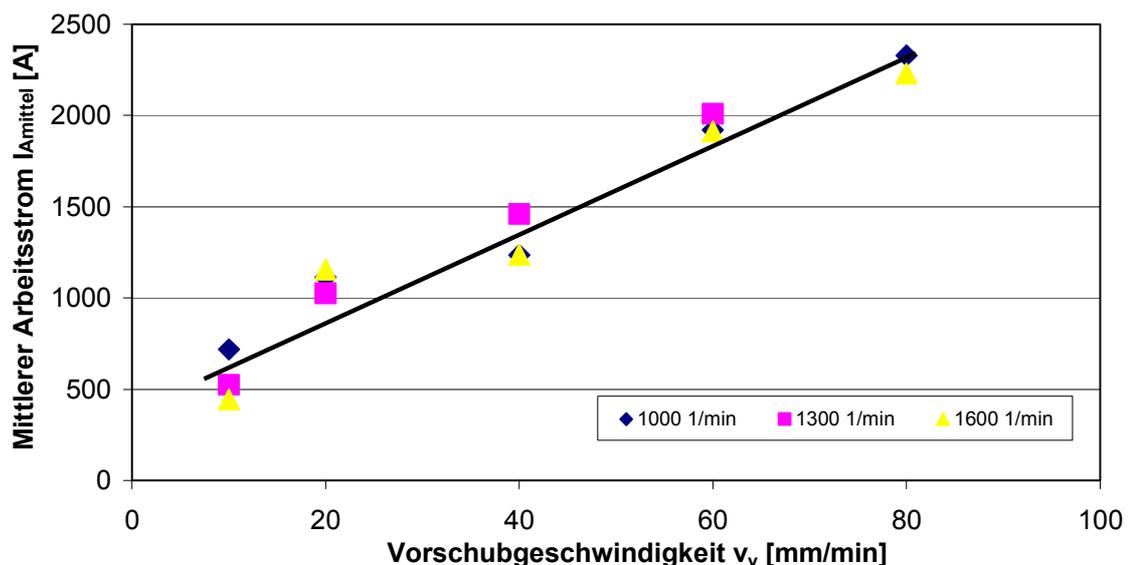


Bild 5.7: Mittelwert des Arbeitsstroms $I_{Amittel}$ in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit v_v bei unterschiedlichen Drehzahlen ($H = 80$ mm, v_v 10 - 80 mm/min, Werkstoff 1.4301)

Die bisherige Annahme, dass zur Aufrechterhaltung eines stabilen CAMG-Prozesses eine Mindeststromdichte an der Schneidfront erforderlich ist, konnte in den hier durchgeführten Untersuchungen mit gestuften Elektroden nicht bestätigt werden. Eine Begrenzung der Schnitttiefe, durch den verfügbaren mittleren Arbeitsstrom der verwendeten Stromquellen ist somit nicht gegeben. Aufgrund dieser Erkenntnisse ist zu erwarten, dass die Schneidleistung weniger von den im Prozess auftretenden Stromspitzen abhängt, sondern vielmehr der Mittelwert und somit die umgesetzte Leistung den ausschlaggebenden Faktor darstellt.

Unklar blieb jedoch, ob für einen stabilen Prozess die auftretenden Stromspitzen von der Stromquelle geliefert werden müssen. Um dies zu überprüfen, wurden Schneiduntersuchungen mit geregelten Stromquellen durchgeführt. Hierzu wurden von der Firma Kjellberg folgende Stromquellen zur Verfügung gestellt.

- Schweißgleichrichter Typ GTH 802
Konstantspannungskennlinie bis 800 A (80% ED) 720 A (100% ED),
Leerlaufspannung 58 V
- Schweißgleichrichter Typ GTF 1402
Konstantspannungskennlinie bis 1.400 A (80% ED) 1200 A (100% ED),
Leerlaufspannung 38 V

In Bild 5.8 ist ein typischer Prozessverlauf eines CAMG-Schnittes mit geregelten Stromquellen dargestellt ($H = 50 \text{ mm}$, $v_v = 10 \text{ mm/min}$, Werkstoff 1.4301). Ähnlich dem in Bild 5.5 dargestellten Verlauf stellt sich ein diskontinuierlicher Stromverlauf ein. Die Brennphasen des Lichtbogens liegen im Bereich von 50 - 100 ms. Die sich anschließenden Pausen betragen 5 - 25 ms. Anders als bei dem unregelmäßigen Betrieb werden die Stromspitzen aufgrund der Stromregelung begrenzt. Der auftretende Maximalstrom I_{Amax} ist abhängig von der an der Stromquelle einstellbaren Grenze. In diesem Beispiel beträgt er ca. 1.000 A. Die umgesetzte Leistung P_{mittel} beträgt ca. 11 kW. Der mittlere Arbeitsstrom $I_{Amittel}$ 465 A.

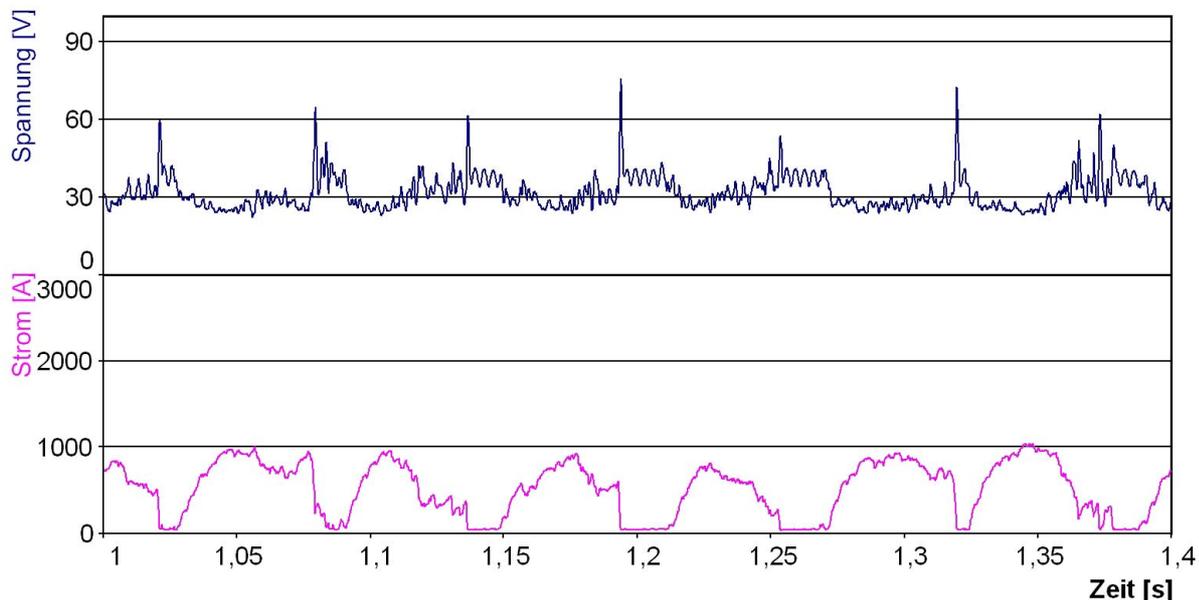


Bild 5.8: Typischer CAMG-Prozessverlauf mit geregelter Stromquelle
($H = 50 \text{ mm}$, $v_v = 10 \text{ mm/min}$, Werkstoff 1.4301, Schweißgleichrichter Typ GTF 1402)

Wird die Schnitttiefe und somit auch die Schneidleistung erhöht, ändert sich das Prozessverhalten. In Bild 5.9 ist ein solcher Prozessverlauf ($H = 80 \text{ mm}$,

$v = 10$ mm/min, Werkstoff 1.4301) dargestellt. Dies entspricht den in Bild 5.5 dargestellten Parametern. Ähnlich dem in Bild 5.6 dargestellten Prozess ($H = 80$ mm, $v = 80$ mm/min, Werkstoff 1.4301) verändert sich dieser dahingehend, dass keine Pausen mehr im Lichtbogenbrennen bzw. im Stromfluss auftreten. Die auftretenden Maximalströme I_{Amax} sind durch die Regelung hier auf ca. 1.200 A begrenzt. Die umgesetzte Leistung liegt bei ca. 16,5 kW. Aufgrund der geringeren Spannung der geregelten Stromquelle ist der mittlere Arbeitsstrom $I_{Amittel}$ mit 720 A etwas höher.

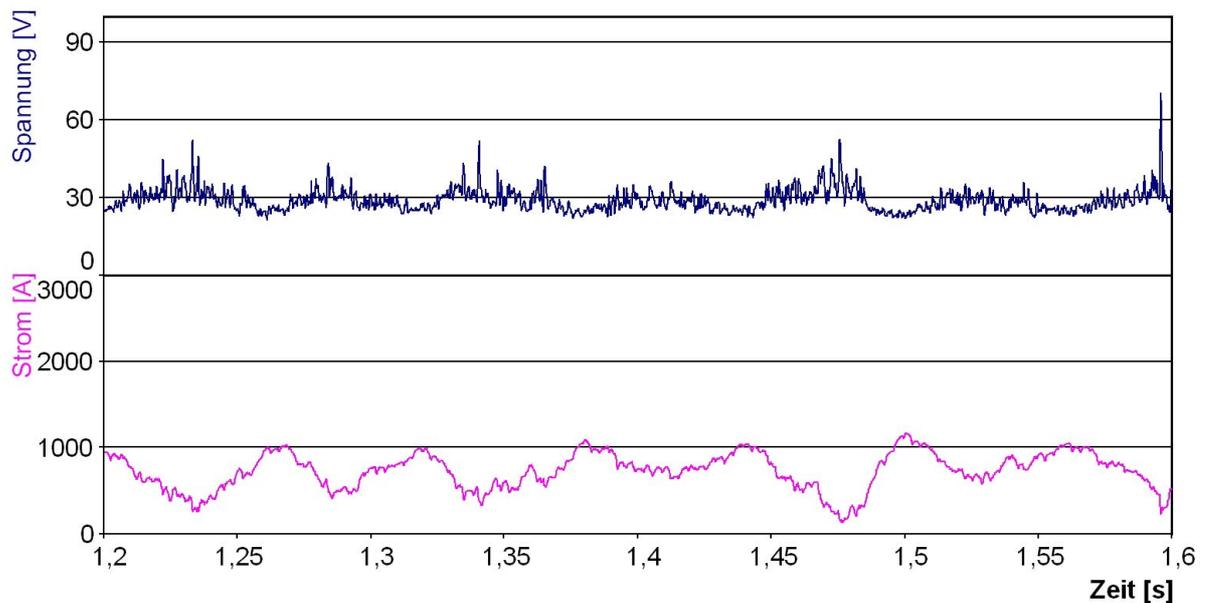


Bild 5.9: Typischer CAMG-Prozessverlauf mit geregelter Stromquelle
($H = 80$ mm, $v_v = 10$ mm/min, Werkstoff 1.4301 Schweißgleichrichter Typ GTF 1402)

Die Untersuchungen zeigen, dass bei sonst vergleichbaren Parametern, der Leistungsbedarf eines CAMG-Schnittes unabhängig von der verwendeten Stromquelle ist. Die bei unregulierten Stromquellen auftretenden Stromspitzen sind für einen stabilen Prozess nicht erforderlich. Auch bei der Verwendung von geregelten Stromquellen bleibt die in Bild 5.7 dargestellte lineare Abhängigkeit des mittleren Arbeitsstroms $I_{Amittel}$ gültig.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass abhängig von dem bereitgestellten Prozessstrom und der gewünschten Schnitttiefe, eine für die verwendete Stromquelle geeignete Vorschubgeschwindigkeit gewählt werden kann. Eine Mindeststromdichte ist nicht erforderlich und die Schnitttiefe ist somit nicht durch die Leistungsfähigkeit der Stromquelle begrenzt.

5.1.3 Prozessstabilität

5.1.3.1 Gleichlauf und Gegenlauf

In der Fertigungstechnik werden die möglichen Relativbewegungen zwischen einem Werkzeug (z.B. Fräser) und dem Werkstück üblicherweise in Gleichlauf und Gegenlauf unterschieden. Beim Gleichlauf sind die Drehrichtung des Fräasers und die Vorschubrichtung gleich. Beim Gegenlauf sind die Drehrichtung des Werkzeuges und die Vorschubbewegung des Werkzeuges entgegen gerichtet. Beim Fräsen ist aus Gründen der Spanbildung und der Werkzeugstandzeit der Gleichlauf zu bevorzugen. Dies setzt allerdings ausreichend steife Werkzeugmaschinen voraus, da die Reaktionskräfte aus dem Fräsprozess tendenziell das Werkzeug auf das Werkstück ziehen. Bei nicht ausreichender Steifigkeit der Maschine kann die zwischen Fräser und Werkstück auftretende Relativbewegung zu Störungen im Fräsprozess führen.

Beim CAMG-Prozess wirken andere Abtragsmechanismen als beim Fräsen. Eine Abhängigkeit des Elektrodenverschleißes von der Laufrichtung konnte bisher nicht nachgewiesen werden. Allerdings gelten hinsichtlich der Anforderungen an die Steifigkeit der Maschine ähnliche Anforderungen wie beim Fräsen. Auch hier neigt die Werkzeugelektrode beim Gleichlauf dazu, sich in das Werkstück hinein zu ziehen. Kann die verwendete Führungsmaschine diese Bewegung, aufgrund mangelnder Steifigkeit, nicht ausreichend begrenzen, kommt es zum flächigen Kontakt zwischen Elektrode und Werkstück und damit zum Kurzschluss. Der Schneidprozess wird in seiner Kontinuität und somit in der Stabilität negativ beeinflusst.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen wurden mit einer Führungsmaschine durchgeführt, die keine ausreichende Steifigkeit für einen stabilen Gleichlaufprozess aufweist. Aus diesem Grund wurden alle Schnitte im Gegenlauf durchgeführt. Eine Bestimmung einer Mindestanforderung hinsichtlich der Steifigkeit konnte nicht erfolgen. Ebenso konnten keine Untersuchungen zu den sich aus der Laufrichtung ergebenden Einflüssen auf den Prozess durchgeführt werden.

Bei einem potentiellen praktischen Einsatz des Verfahrens ist in der Mehrzahl der Fälle davon auszugehen, dass die verfügbaren Führungsmaschinen nicht für den Gleichlaufbetrieb geeignet sein werden. Aus diesem Grund kann grundsätzlich der Gegenlauf als die geeignete Betriebsweise empfohlen werden.

5.1.3.2 Polung

Aus der Schweißtechnik ist bekannt, dass die Polung von Elektrode und Werkstück aufgrund der unterschiedlichen Energieeinbringungen einen erheblichen Einfluss auf die thermische Belastung und den Verschleiß der Elektrode hat. So ist diese an der Anode deutlich größer als an der Kathode. Trotz der durch die hohe Umfangsgeschwindigkeit nur kurzen Kontaktzeit der Elektrode zum Lichtbogen und der guten Elektrodenkühlung durch das Umgebungsmedium Wasser macht sich dieser Effekt

auch hier bei anodischem Betrieb durch einen stärkeren Elektrodenverschleiß bemerkbar. Dies wird in den später dargestellten Untersuchungen deutlich.

Bei der Verwendung von WCu als Elektrodenwerkstoff tritt, bei anodischem Betrieb, eine Kupferverarmung der äußeren Elektrodenschicht auf, die durch elektrolytische Vorgänge hervorgerufen wird. Infolge dieser Kupferverarmung steigt der Kontaktwiderstand zwischen Elektrode und Werkstück erheblich an. Ähnlich wie bei den bereits beschriebenen Effekten bei CrNi-Stahl als Elektrodenwerkstoff wird die Zündung eines Lichtbogens verhindert. Bemerkenswert ist hierbei, dass trotz mechanischem Kontakt (Schleifen) zwischen Elektrode und Werkstück nur sehr geringe Ströme fließen. Erst wenn, aufgrund der Reibungskräfte zwischen Elektrode und Werkstück, die obere Schicht der WCu-Segmente abgeschliffen ist, zünden erneut Lichtbögen (siehe Bild 5.10). Wurde die Vorschubbewegung zuvor nicht unterbrochen, steigen die Prozessströme stark an. Hierbei wird ggf. die Leistungsfähigkeit der Stromquelle überschritten und es kommt infolgedessen zum Prozessabbruch.

Für einen verschleißreduzierten Betrieb des CAMG-Verfahrens sollte daher stets der kathodische Betrieb (Werkzeugelektrode als Kathode) gewählt werden. Darüber hinaus ist zu beobachten, dass bei kathodischem Betrieb der Lichtbogen vornehmlich an der Umfangsfläche der Elektrode brennt. Der seitliche Elektrodenverschleiß kann hierdurch weitestgehend vermieden werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass beim CAMG-Verfahren grundsätzlich der kathodische Betrieb zu wählen ist.

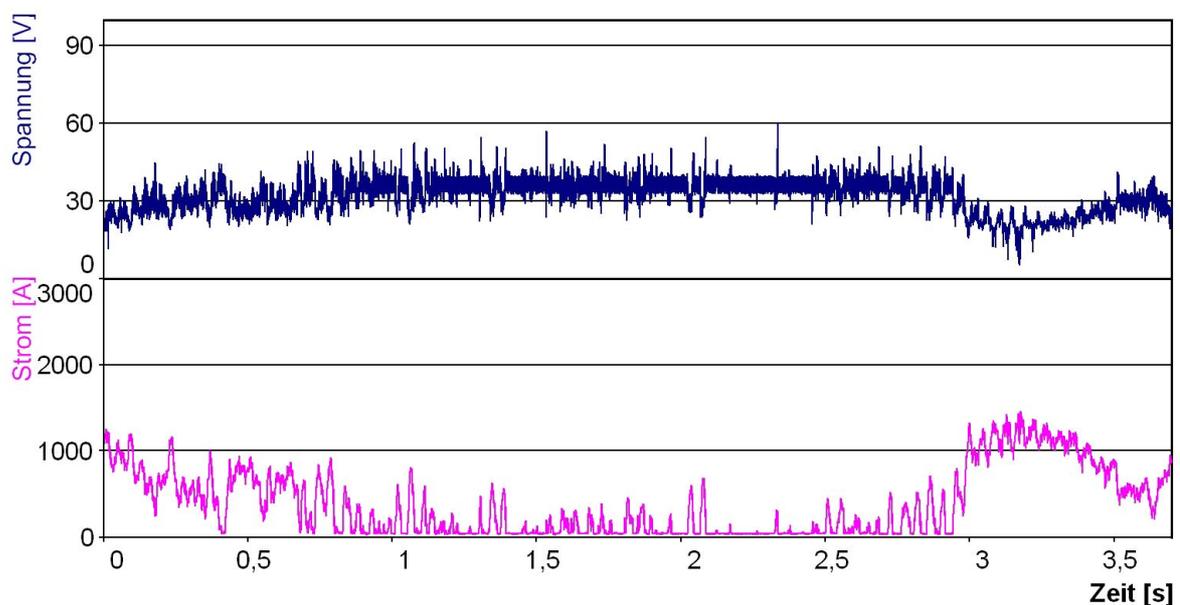


Bild 5.10: Prozessverlauf bei anodischem Betrieb einer WCu-Elektrode, Vorschubgeschwindigkeit $v_V = \text{konst}$; durch Widerstandserhöhung an der Kontaktfläche zwischen Elektrode und Werkstück, wird der Stromfluss unterbrochen, erst nach mechanischem Abtrag der Elektrodenoberfläche zünden erneut Lichtbögen.

5.1.3.3 Einfluss der Drehzahl

Anders als bei spanenden Fertigungsverfahren erfolgt der Materialabtrag bei dem CAMG-Verfahren nicht über die mechanischen Wechselwirkungen zwischen Werkzeug und Werkstück. Hieraus resultieren kleine Prozesskräfte. Ist die Vorschubbewegung der Elektrode idealerweise konstant (keine überlagerten Schwingungen), so sind diese Kräfte zu vernachlässigen. Aufgrund der hohen Reibungsverluste der Werkzeugelektrode im Umgebungsmedium Wasser, treten jedoch hydrodynamische Kräfte auf. Diese Kräfte sind in Betrag und Richtung nicht konstant und können Relativbewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück verursachen. Hieraus resultieren entsprechende Reaktionskräfte und Kurzschlusskontakte, die sich beide negativ auf die Prozessstabilität auswirken.

Auch bei hinreichend steifer Führung können die Strömungsverhältnisse zu Prozessstörungen führen. Dies gilt insbesondere bei asymmetrischen Druck- bzw. Geschwindigkeitsverhältnissen im Umgebungswasser der Elektrode. Durch die Scheibenform ist diese in axialer Richtung wenig steif. Durch deren Verformung kann es zum Verlaufen des Schnittes kommen. Diese Abweichung von der Vorschubbahn des Werkzeuges führt dann unweigerlich zu einem Seitenkontakt der Elektrode, einem hieraus resultierenden Versagen, z.B. durch Ausbrechen von Segmenten, und zum Prozessabbruch.

Durch die in dritter Potenz von der Drehzahl abhängigen Strömungsverluste der Elektrode, nehmen die strömungsbedingten Effekte mit steigender Drehzahl überproportional zu. Aufgrund der über die Elektrodengeometrie erreichten Stabilisierung des CAMG-Prozesses, kann bzw. sollte daher von der in der Literatur empfohlenen hohen Umfangsgeschwindigkeit abgewichen werden. Eine explizite Empfehlung für eine ideale Umfangsgeschwindigkeit konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden. In den nachfolgend erläuterten Verschleißuntersuchungen konnte jedoch festgestellt werden, dass bei dem hier verwendeten Versuchsaufbau, die besten Schneidergebnisse mit einer Elektrodendrehzahl von 1000 1/min (Umfangsgeschwindigkeit ca. 23 m/s) erreicht wurden.

5.1.4 Elektrodenverschleiß

Neben der Entwicklung eines praxisnahen CAMG-Werkzeuges und der Steigerung der möglichen Schnitttiefe, ist die Reduzierung des Elektrodenverschleißes ein wesentliches Ziel dieser Arbeit. Die Basis hierfür wurde in den bereits dargestellten Kapiteln „Einfluss der Werkzeugelektroden“, „Einfluss der Schneidstromquelle“ und „Prozessstabilität“ erarbeitet. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurde systematisch untersucht, wie sich die unterschiedlichen Prozessparameter auf den Elektrodenverschleiß auswirken. Aufgrund der guten Prozessstabilität und des geringeren Verschleißes, der aus dem Einsatz von geregelten Schweißstromquellen resultierte, wurden die Verschleißuntersuchungen mit der geregelten Schweißstromquelle des Typs GTF 1402 durchgeführt. Als Elektroden-Segmentwerkstoff wurde WCu ver-

wendet. Wie auch schon in den vorangegangenen Versuchen wurden alle Schnitte an 300 mm langen Werkstücken aus dem Werkstoff 1.4301 durchgeführt. Um größere Schnittlängen zu untersuchen, wurden entsprechend viele Schnitte durchgeführt. Ebenso wurden alle Schnitte als Fugenschnitt ausgeführt.

Bei den bisher in der Literatur veröffentlichten Angaben zum Elektrodenverschleiß wurde dieser stets als relativer Elektrodenverschleiß γ (siehe Gleichung 2.1) angegeben. Hierbei wird das Verhältnis des Verschleißvolumens der Elektrode zum ausgeprägten Schnittfugenvolumen ins Verhältnis gesetzt. Diese Darstellung des Elektrodenverschleißes berücksichtigt alle auftretenden Verschleißformen. Auf diese Weise wird z.B. auch die sich ggf. ändernde Schnittfugbreite durch einen seitlichen Elektrodenverschleiß berücksichtigt. Für den praktischen Einsatz ist dieser Wert jedoch weniger geeignet, da dessen Bestimmung die Vermessung der Schnittfuge und der Elektrode erfordert. Aus diesem Grund wird in der folgenden Auswertung zusätzlich der Durchmesserverlust der Elektrode angegeben. Dieser Wert kann bei einer praktischen Anwendung einfach bestimmt werden.

Um die Entwicklung des Elektrodenverschleißes über der Schnittlänge zu ermitteln, wurden die Elektroden und die Schnittfugen nach jedem Teilschnitt (jeweils 300 mm Schnittlänge) vermessen. Der radiale und axiale Verschleiß wurde durch Messen von Durchmesser und Elektrodenbreite bestimmt. Um darüber hinaus die Formänderung der Schneidsegmente (Kantenverrundung) zu bestimmen, wurden Silikonabdrücke der Elektrode angefertigt. Durch Ausgießen der so erzeugten Silikonformen mit Kunstharz wurden 1:1 Abgüsse erstellt, die eine anschließende genauere Analyse der Geometrie erlaubten.

Die angestrebte und erreichte Reduzierung des Elektrodenverschleißes führte zu einer entsprechenden Erhöhung der Elektrodenstandzeit. Durch die Reduzierung der Prozessströme wurde gleichzeitig die Schnittleistung und somit die Schneidgeschwindigkeit herabgesetzt. Hieraus ergeben sich Elektrodenstandzeiten von ca. 20 – 30 h. Es ist daher nicht möglich gewesen, die Elektroden bei allen Parametervarianten bis zur Verschleißgrenze zu betreiben. Der Zeit- und Kostenaufwand wäre unverhältnismäßig groß geworden. Sofern möglich, wurden daher jeweils 10 Teilschnitte mit einer sich daraus ergebenden Gesamtschnittlänge von 3 m durchgeführt. Die potentielle Standzeit der Elektrode wurde entsprechend extrapoliert.

Aufgrund der in den vorangegangenen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse erfolgten Festlegungen hinsichtlich Stromquelle, Elektrodenwerkstoff und Elektrodengeometrie. Die für Verschleißuntersuchungen zu variierenden Parameter reduzieren sich daher auf:

- Schnitttiefe H
- Elektrodendrehzahl n
- Elektrodenbreite b_{wz}
- Vorschubgeschwindigkeit v_v

- Polarität

Um den Einfluss dieser Parameter auf den Verschleiß zu identifizieren, wurde, ausgehend von einem Referenzschnitt, jeweils nur ein Parameter verändert. Die Festlegung der Parameter für den Referenzschnitt erfolgte entsprechend den bisherigen Erfahrungen. In Tabelle 5.2 sind die Daten für die durchgeführten Messreihen zusammengestellt. Der jeweils veränderte Parameter ist farblich gekennzeichnet.

Tabelle 5.2: Versuchsparameter Verschleißmessung

Versuch	Schnitttiefe H [mm]	Drehzahl n [1/min]	Elektrodenbreite b_{vz} [mm]	Vorschubgeschwindigkeit v_v [mm/min]	Elektrodenpotential
H1	50	1000	5	10	-
H2	80	1000	5	10	-
H3	50	1000	6	10	-
H4	50	1600	5	10	-
H5	50	1000	5	20	-
H6	50	1300	5	10	+

In Versuch H6 ist zusätzlich zur Polarität die Drehzahl erhöht worden. Dies wurde notwendig, da bei einer Drehzahl von 1000 1/min kein stabiler Prozessverlauf möglich war.

In Bild 5.11 sind die Verschleißwerte in Prozent der Durchmesserabnahme und in Bild 5.12 als relativer Elektrodenverschleiß γ über der Schnittlänge dargestellt. Der geringste Verschleiß tritt bei dem mit H1 bezeichneten Schnitt auf.

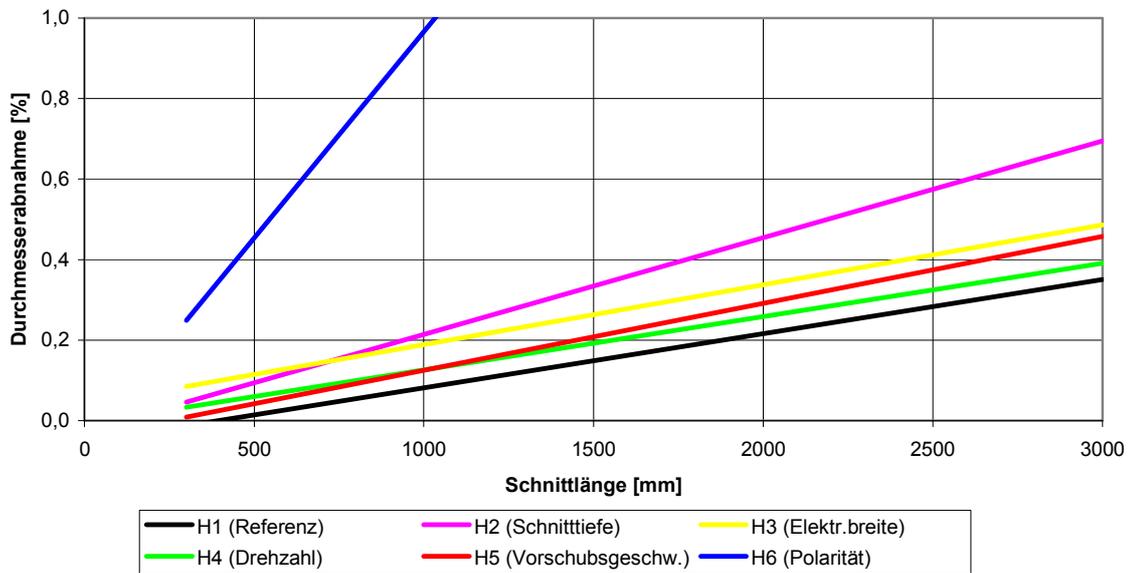


Bild 5.11: Elektrodenverschleiß (Durchmesserabnahme in %) in Abhängigkeit der Schnittlänge

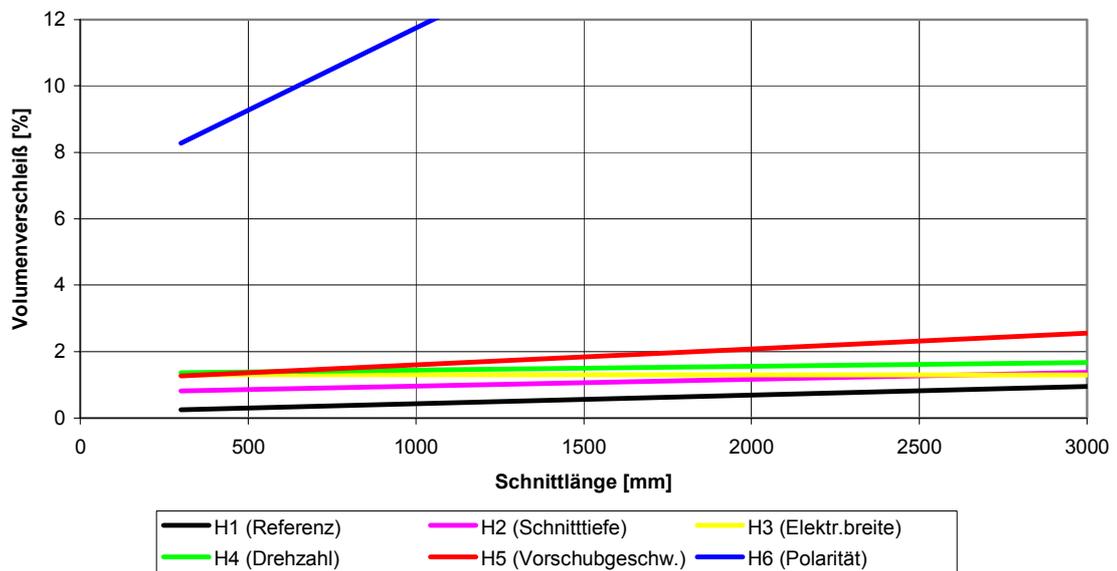


Bild 5.12: Elektrodenverschleiß (Volumenverschleiß in %) in Abhängigkeit der Schnittlänge

Alle variierten Parameter führen zu einem höheren Verschleiß als beim Referenzschnitt H1. Bei der Steigerung der Schnitttiefe ist dieser Anstieg nicht so ausgeprägt, wie dies die Darstellung der Durchmesserabnahme vermuten lässt. Bei gleicher Schnittlänge ist das Volumen des ausgetragenen Schnittfugenmaterials durch die erhöhte Schnitttiefe entsprechend größer. Bei der Darstellung des relativen Volumenverschleißes wird dies deutlich.

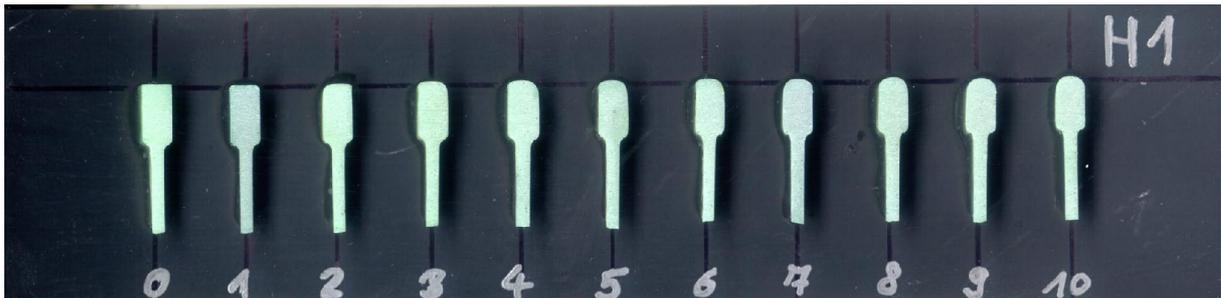
Bei der Verwendung von breiteren Elektrosegmenten tritt ein erhöhter Verschleiß auf. Die Ursache hierfür liegt wahrscheinlich in der um 1 mm breiteren Elektrode, wodurch die Schnittfuge ebenfalls entsprechend breiter wird. Hieraus resultiert ein Anstieg der Schnittleistung von ca. $3,0 \text{ cm}^3/\text{min}$ auf $3,5 \text{ cm}^3/\text{min}$ sowie ein Anstieg der umgesetzten elektrischen Leistung von $10,1 \text{ kW}$ auf $11,9 \text{ kW}$ und einer hiermit einhergehenden höheren thermischen Belastung.

Der Verschleißanstieg bei einer Drehzahlerhöhung ist bemerkenswert. Wie im Stand der Technik erläutert, wurde in der Literatur zur Verschleißreduzierung stets eine möglichst hohe Umfangsgeschwindigkeit empfohlen. Bei der hier gewählten Versuchsanordnung steigt nicht nur der Verschleiß, sondern der Prozess wird, wie bereits erläutert, zudem mit steigender Drehzahl deutlich unruhiger und es treten mechanische Schwingungen auf. Der erhöhte Verschleiß ist daher vermutlich auf vermehrten mechanischen Kontakt zwischen Elektrode und Werkstück zurückzuführen.

Eine Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit führt, bedingt durch die größere umgesetzte elektrische Leistung, ebenfalls zu einem Verschleißanstieg. Zudem ist zu beobachten, dass der Prozess instabiler wird.

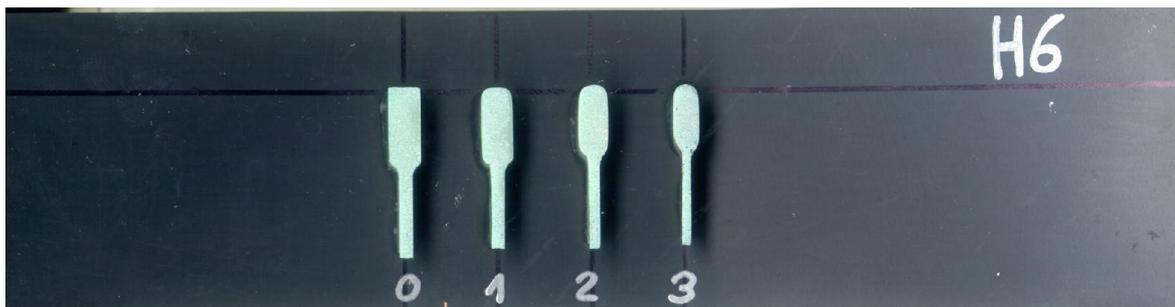
Bei anodischem Betrieb ist der Verschleiß um den Faktor 10 höher als bei kathodischem Betrieb. Wie bereits erläutert, tritt zudem ein starker seitlicher Verschleiß der Elektroden-Segmente auf. Dies verdeutlicht auch der Vergleich der Segmentkonturen zwischen den Schnitten H1 (Referenz H1, Bild 5.13) und H6 (anodisch H6, Bild 5.14). Dargestellt sind hier die Segmentkonturen nach jeweils 300 mm Schnittlänge.

Deutlich zu erkennen ist der bei kathodischem Betrieb nur sehr geringe seitliche Verschleiß. Über eine Schnittlänge von 3000 mm liegt dieser bei lediglich 0,01 mm. Während bei anodischem Betrieb bereits nach 900 mm Schnittlänge ein Seitenverschleiß von 0,8 mm auftritt. Die Verschleißgrenze ist hier bereits erreicht. Die Segmentbreite von 4,2 mm reicht nicht mehr aus, um das Überspringen des Lichtbogens auf die Seitenfläche des Elektrodenstammblasses zu verhindern. Wie erläutert, führt dieses seitliche Brennen von Lichtbögen sehr schnell zu thermischem Verzug der Elektrode und somit zum Abbruch des Schneidprozesses.



Schnitt Nr.	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D [mm]	449,36	449,33	449,28	449,06	448,86	448,77	448,51	448,36	448,15	447,95	447,74
b_{wz} [mm]	4,90	4,90	4,90	4,90	4,90	4,90	4,89	4,89	4,89	4,89	4,89
A [mm ²]	45,75	45,64	45,29	44,76	44,27	43,51	42,62	41,84	41,09	40,19	39,37

Bild 5.13: Segmentkonturveränderung über der Schnittlänge der Schnittreihe H1



Schnitt Nr.	0	1	2	3
D [mm]	455,36	454,29	452,70	451,49
b_{wz} [mm]	5,00	4,95	4,75	4,2
A [mm ²]	63,30	58,32	49,09	51,95

Bild 5.14: Segmentkonturveränderung über der Schnittlänge der Schnittreihe H6

5.1.5 Handgeführtes CAMG an Atmosphäre

Die Untersuchungen zum Schneidverhalten des handgeführten CAMG an Atmosphäre erfolgten mit einem Schweißgleichrichter des Typs GTH 802 bei einem eingestellten Maximalstrom von 150 A. Zunächst wurden verschiedene Möglichkeiten zur Elektrodenkühlung mittels Pressluft und Stickstoff getestet. Diese Untersuchungen zeigten, dass die Elektrodenkühlung zwingend erforderlich ist. Eine ausreichende Kühlung ist sowohl mit Pressluft als auch mit Stickstoff möglich. Bei Stickstoff als

Kühlgas wird der thermisch belastete Außenbereich der Elektrode aufgrund der schützenden Wirkung nicht so stark oxidiert, wie bei Pressluftkühlung. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass bei Prozessströmen bis 150 A mit vergleichsweise geringem Aufwand eine effektive Gaskühlung der Elektrode möglich ist.

Bei den Schneiduntersuchungen wurden zwei grundsätzliche Problematiken des handgeführten Atmosphäreinsatz deutlich. So fehlt im Gegensatz zum Unterwassereinsatz eine ausreichende Spülströmung, um das vom Lichtbogen aufgeschmolzene Material aus der Schnittfuge zu befördern. Alternativ könnte zum Austragen der Schmelze eine zusätzliche Gasspülung genutzt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden entsprechende Untersuchungen jedoch nicht durchgeführt.

Darüber hinaus stellte sich die Handführung als problematisch heraus. Durch die Handführung treten der Vorschubbewegung überlagerte ungleichmäßige Bewegungen in und quer zur Vorschubrichtung auf. Hierdurch kommt es häufig zu Kurzschlüssen. Anders als beim klassischen Trennschleifen führt allein der Kontakt von Werkzeug und Werkstück nicht zum Schneiden, da hierfür ein brennender Lichtbogen erforderlich ist. Die beschriebene Problematik wird in der schematischen Darstellung in Bild 5.16 verdeutlicht.

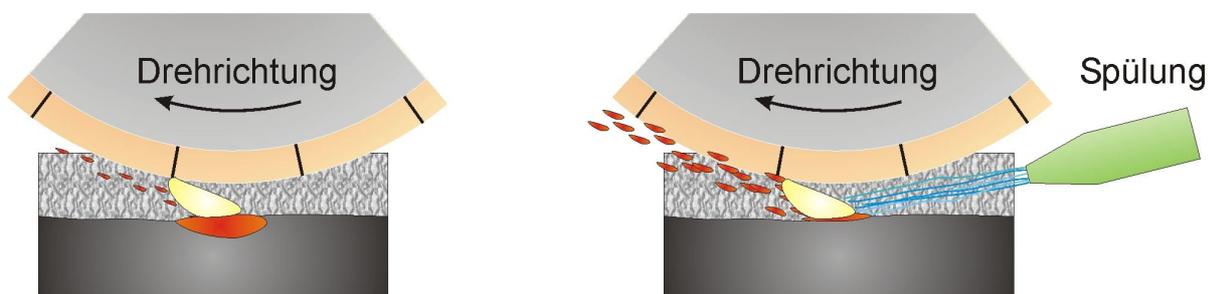


Bild 5.16: Schematische Darstellung des CAMG-Prozess an Atmosphäre ohne Zusatzspülung (links) und mit Zusatzspülung (rechts)

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass ein handgeführter Atmosphäreinsatz des CAMG-Verfahren grundsätzlich möglich ist. Allerdings ist es fraglich, ob die potentiellen Vorteile, die hohe Schnittleistung bei geringem Verschleiß und die kleinen Prozesskräften, im Handbetrieb ausgenutzt werden können. Um hier zu einer abschließenden Bewertung zu gelangen, sind eine weitere Werkzeugentwicklung sowie weiterführende Untersuchungen zum Prozessverhalten im Handbetrieb notwendig.

5.2 Schneiduntersuchungen Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (CAMC)

Die Schneiduntersuchungen wurden in einem Versuchsbecken mit den Abmessungen 1,95 m x 1,5 m x 1,5 m (L x B x H) in einer Wassertiefe von ca. 0,8 m durchgeführt. Für die Führung des Werkzeuges kam eine, auf dem Beckenrand aufgesetzte, 3-Achs-Führungsmaschine zur Anwendung. Die handgeführten Schneiduntersuchungen erfolgten hingegen durch einen Berufstaucher (Helmtaucher) in einer Wassertiefe von ca. 5,5 m. Hierzu wurde ein Versuchbecken mit den Abmessungen von 5,0 m x 10,0 m x 6,0 m (L x B x H) verwendet. Alle Untersuchungen wurden in Trinkwasser durchgeführt.

Um bei den Versuchen für die Elektrodenpülung einen möglichst großen Parameterbereich hinsichtlich Druck und Volumenstrom realisieren zu können, standen folgende Pumpen zur Verfügung:

- 1 x Kreiselpumpe Typ Pedrollo HF6AR
Förderhöhe 18 m, Fördermenge max. 70 m³/h
- 1 x Kreiselpumpe Typ Pedrollo 2Cp32/210A
Förderhöhe 110 m, Fördermenge max. 14 m³/h
- 2 x Kreiselpumpe Typ Hartmann DPLS 4-100
Förderhöhe 95 m, Fördermenge max. 7 m³/h
- 1 x Kreiselpumpe Typ Grundfos SP 30-14
Förderhöhe 160 m, Fördermenge max. 40 m³/h

5.2.1 Einfluss der Schneidstromquelle

Wie beim CAMG-Verfahren wurden in der Vergangenheit auch beim CAMC-Verfahren immer unregelmäßige Schneidstromquellen mit hohen Nennströmen (2000 – 4000 A) verwendet. Der sich hieraus ergebende Strom- und Spannungsverlauf ist in Bild 5.17 exemplarisch dargestellt. Verwendet wurde hier eine Stromquelle des Typs Dalex CG 2000 mit der bereits beschriebenen Charakteristik. Infolge der Vorschubbewegung wird ein Kontakt zwischen Elektrode und dem Werkstück erzeugt. Der hierbei auftretende Kurzschluss führt zu einem entsprechend hohen Stromfluss, der mit fast 3000 A deutlich über dem Nennstrom der Stromquelle liegt. Infolge der hohen umgesetzten Leistung wird die Kurzschlussbrücke aufgebrochen. In dem sehr kleinen Spalt zwischen Elektrode und Werkstück zündet ein Kurzlichtbogen, der zum Aufschmelzen des Materials führt. Anders als beim CAMG-Verfahren, bei dem das schmelzflüssige Material durch die hohe Relativgeschwindigkeit zwischen Elektrode und Werkstück sehr effektiv aus der Schnittfuge gefördert wird, verweilt dieses länger in der Schnittfuge. Die sich hierbei bildenden Tropfen können Kurzschlussbrücken bilden, die immer wieder hohe Stromspitzen hervorrufen. Unter ungünstigen

Schneidbedingungen, z.B. bei hohen Schnitttiefen, kommt es im Schneidprozess daher häufig zu einer Überlastung der Stromquelle und zu hieraus resultierenden Unterbrechungen des Prozesses.

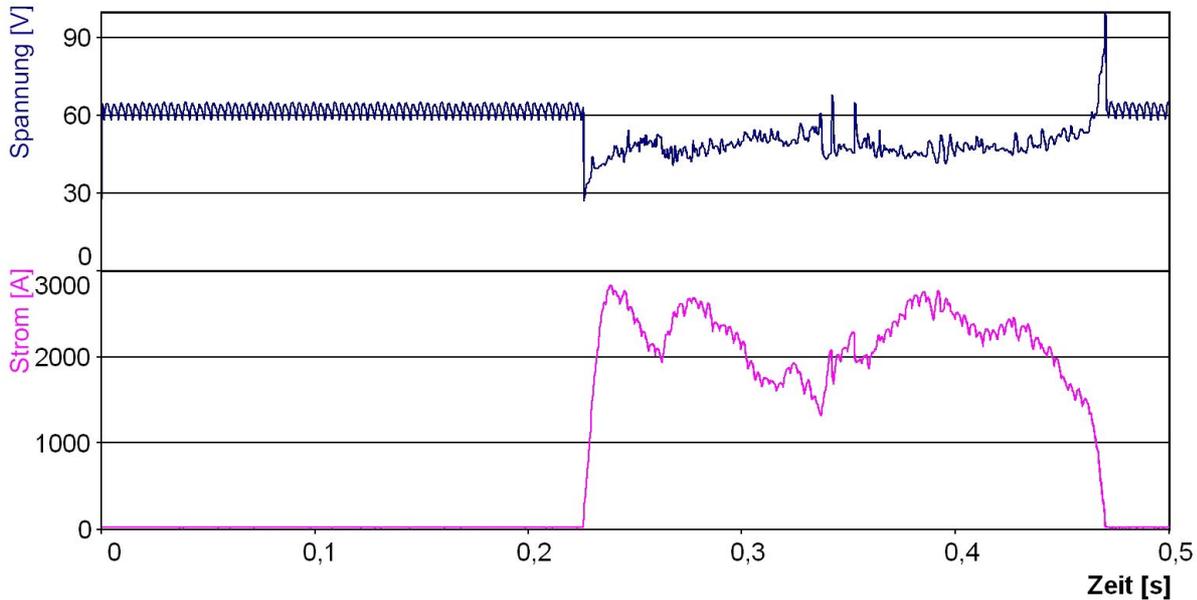


Bild 5.17: Typischer CAMC-Prozessverlauf, mit unregelter Stromquelle
($H = 80$ mm, $v_v = 40$ mm/min, Werkstoff 1.4301, Stromquelle CG 2000)

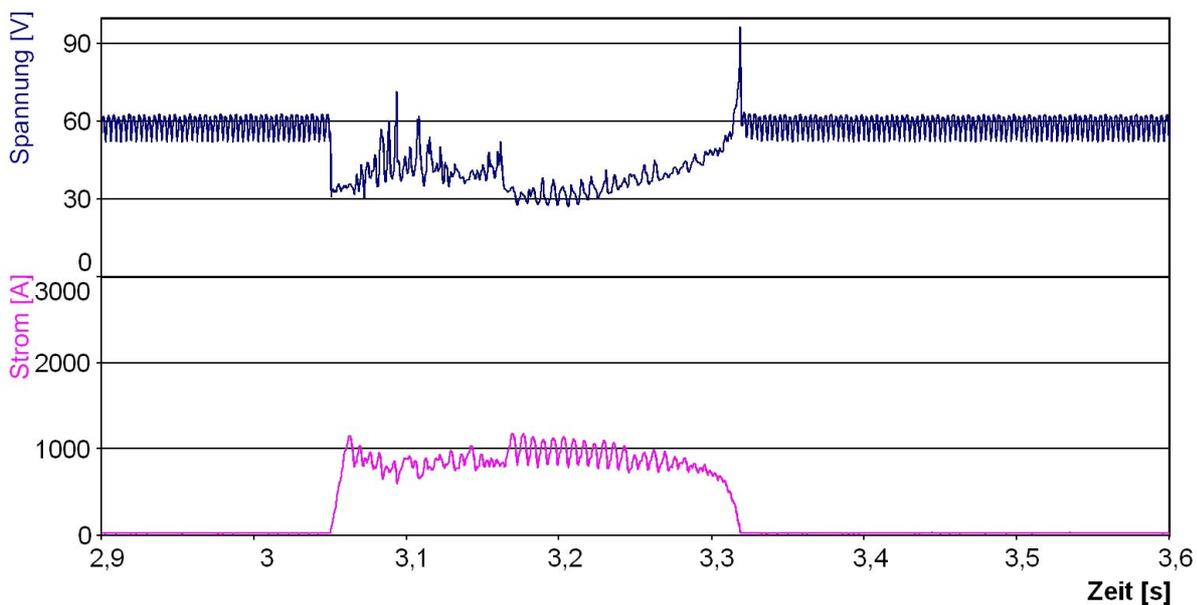


Bild 5.18: Typischer CAMC-Prozessverlauf, mit geregelter Stromquelle ($H = 80$ mm,
 $v_v = 5$ mm/min, Werkstoff 1.4301, Stromquelle GTH 802)

Bei der Verwendung der bereits beim CAMG-Verfahren eingesetzten geregelten Schneidstromquellen verändert sich der Prozessverlauf. In Bild 5.18 ist dieser Unterschied deutlich zu erkennen. Auch hier steigt der Strom nach dem Kontakt zwischen

Elektrode und Werkstück sprunghaft an. Aufgrund der einsetzenden Regelung wird der Strom jedoch auf ca. 800 A begrenzt. Die Stromstärke ist abhängig von den Einstellungen an der Schneidstromquelle. Der nun im Elektrodenzwischenraum brennende Lichtbogen schmilzt bei konstantem Strom kontinuierlich Werkstückmaterial auf. Insgesamt wird der Prozess hierdurch deutlich ruhiger. Kommt es zu Kurzschlüssen durch Schmelztropfen, führen diese nicht zu einer Überlastung der Stromquelle, da diese entsprechend abgeregelt wird.

Es zeigt sich somit, dass auch beim CAMC-Verfahren geregelte Schneidstromquellen verwendet werden können. Sehr hohe Kurzschlussströme, die bei unregulierten Stromquellen auftreten, werden so vermieden. Ebenso lässt sich der mittlere Arbeitsstrom I_{Amittel} reduzieren und es können entsprechend leistungsärmere Stromquellen eingesetzt werden. Reduziert man so die umgesetzte mittlere elektrische Leistung P_{mittel} , so geht dies allerdings mit einer Reduzierung der möglichen maximalen Schneidgeschwindigkeit v_{vmax} einher. Der Zusammenhang zwischen v_{vmax} und P_{mittel} ist direkt proportional.

5.2.2 Einfluss der Spülströmung

Der Einfluss der Spülströmung auf den Elektrodenverschleiß wurde schon früher untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass der Verschleiß mit zunehmender Spülung reduziert werden kann. Als Ursache hierfür wurde die mit einer stärkeren Spülung einhergehende verbesserte Kühlung der Elektrode genannt [Bac04]. Der Einfluss der Spülung auf den Lichtbogen wurde in der Vergangenheit hingegen nicht untersucht. Um diesen Einfluss auf den Prozessverlauf zu ermitteln, wurden auch hier entsprechende Strom- und Spannungsanalysen durchgeführt.

In Bild 5.19 und Bild 5.20 sind die Strom- und Spannungsverläufe von zwei Schneidprozessen für jeweils eine Sekunde dargestellt. Mit Ausnahme der Spülströmung sind die Prozessparameter gleich. Man erkennt deutlich, dass sich die Prozesse grundsätzlich voneinander unterscheiden. Bei einer geringen Spülung ist die Brenndauer des Lichtbogens mit ca. 0,75 s deutlich länger als bei einer intensiven Spülströmung. Hier erlischt der Lichtbogen bereits nach ca. 40 - 60 ms. Nach einer kurzen Pause zündet dieser jedoch erneut.

Die umgesetzte elektrische Leistung in den dargestellten Zeitfenstern von einer 1 s verdeutlicht den Unterschied im Prozessverlauf. So beträgt diese bei geringer Spülströmung ca. 75 kW, bei intensiver Spülung hingegen nur ca. 41 kW. Vergrößert man das betrachtete Zeitfenster (siehe Bild 5.21 und Bild 5.22) so sind die umgesetzten elektrischen Leistungen nahezu gleich, 44,8 kW bei 1,5 m³/h bzw. 45,1 kW bei 6,5 m³/h. Der Unterschied ist darauf zurückzuführen, dass bei geringerer Spülung nach dem hohen Energieumsatz eine, im Vergleich zur starken Spülung, deutlich längere Prozesspause auftritt. Bei intensiver Spülung sind die Pausen kürzer und der Prozess verläuft erheblich gleichmäßiger.

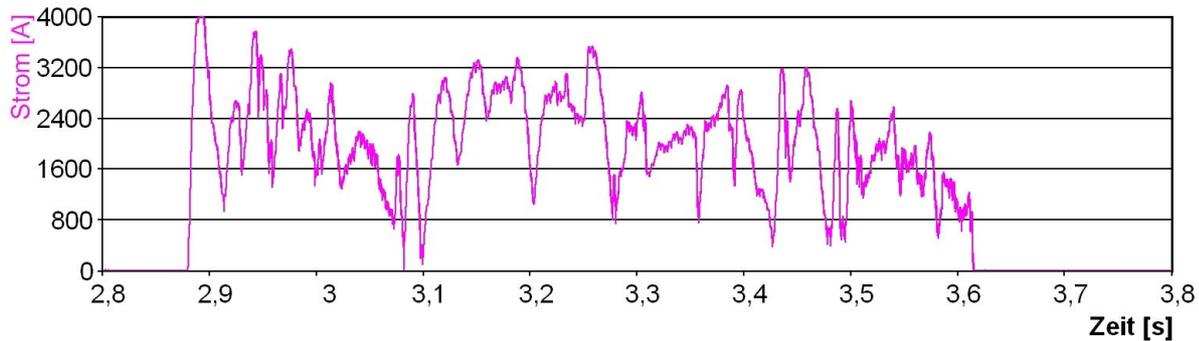


Bild 5.19: Typischer Stromverlauf eines CAMC-Schnittes bei geringer Spülströmung ($V = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 20 \text{ mm}$, $v_v = 250 \text{ mm}/\text{min}$, Werkstoff 1.4301, Stromquelle CG 2000, Zeitausschnitt 1 s)

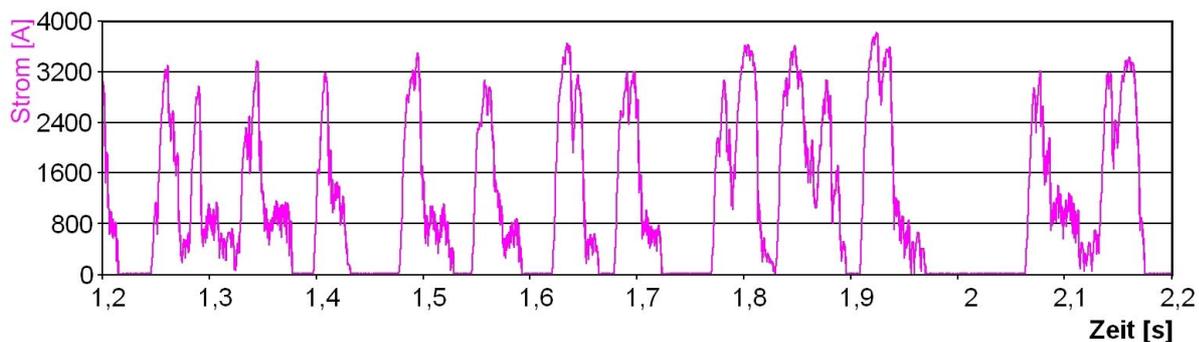


Bild 5.20: Typischer Stromverlauf eines CAMC-Schnittes bei starker Spülströmung ($V = 6,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 20 \text{ mm}$, $v_v = 250 \text{ mm}/\text{min}$, Werkstoff 1.4301, Stromquelle CG 2000, Zeitausschnitt 1 s)

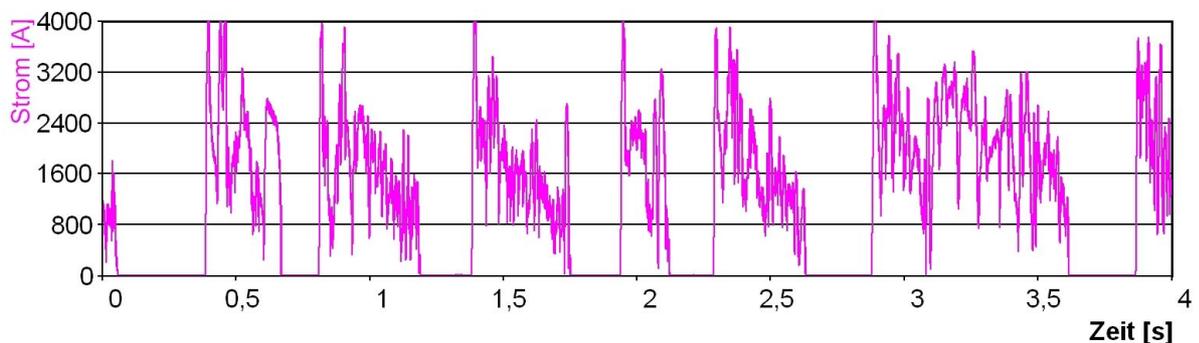


Bild 5.21: Typischer Stromverlauf eines CAMC-Schnittes bei geringer Spülströmung ($V = 1,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 20 \text{ mm}$, $v_v = 250 \text{ mm}/\text{min}$, Werkstoff 1.4301, Stromquelle CG 2000, Zeitausschnitt 4 s)

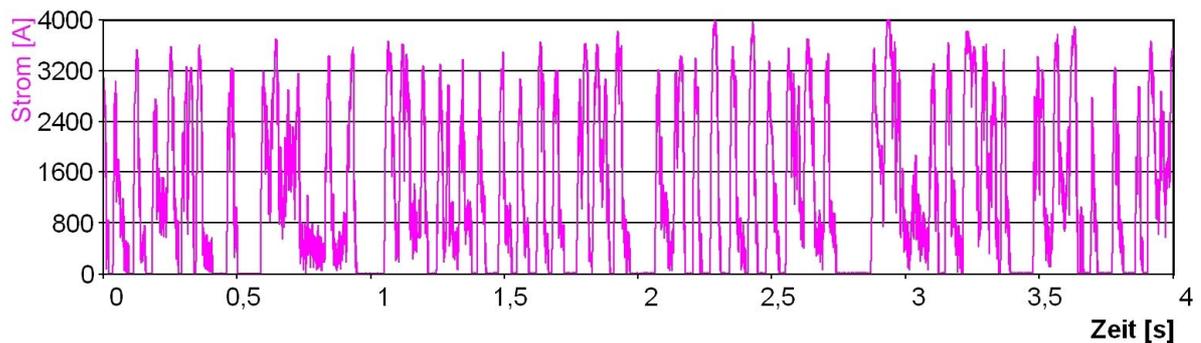


Bild 5.22: Typischer Stromverlauf eines CAMC-Schnittes bei starker Spülströmung ($V = 6,5 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 20 \text{ mm}$, $v_v = 250 \text{ mm}/\text{min}$, Werkstoff 1.4301, Stromquelle CG 2000, Zeitausschnitt 4 s)

Bei der optischen Beobachtung des Prozesses fällt auf, dass sich der Lichtbogen bei intensiverer Spülung schneller in der Schnittfuge zu bewegen scheint. Um den Einfluss der Spülung auf die Bewegungsgeschwindigkeit des Lichtbogens qualitativ abschätzen zu können, wurden Videoaufnahmen vom Prozess erstellt. Hierbei erfolgte die Kamerapositionierung so, dass diese von hinten in die Schnittfuge blickt. Auf diese Weise lassen sich insbesondere beim Anschneiden, die Lichtbogenbewegungen relativ gut beobachten. Einschränkend muss jedoch bemerkt werden, dass aufgrund der hohen Strahlungsintensität der Lichtbögen (Lichtbogenleistungen im Bereich von 20 – 80 kW) ein relativ großer überbelichteter Bereich entsteht. Um trotzdem eine lokale Zuordnung des Lichtbogens zu ermöglichen, wurden die Videoaufnahmen an einem, mit 130 mm Wandstärke relativ dickwandigen, Bauteil durchgeführt. Die Auswertung der Aufnahmen zeigt, dass der Lichtbogen zumeist an der düsennahen Seite zündet und sich dann in den unteren Bereich der Schnittfuge bewegt. Die Geschwindigkeit, mit der diese Bewegung erfolgt, ist hierbei maßgeblich von der Spülungsintensität abhängig. Im düsennahen Bereich variiert diese zwischen 0,2 m/s und 1 m/s. Mit zunehmendem Abstand reduziert sich die Geschwindigkeit. Im unteren Drittel der Schnittfuge verharrt der Lichtbogen dann, insbesondere bei geringer Spülung teilweise sehr lange. Bei intensiver Spülung nimmt zwar die Bewegungsgeschwindigkeit im unteren gegenüber dem oberen Schnittfugenbereich etwas ab, der Lichtbogen wandert jedoch kontinuierlich in Richtung der unteren Schnittfugenkante. Hier reißt dieser dann ab und zündet nach kurzer Pause im oberen Schnittfugenbereich neu.

In Korrelation zur Lichtbogenbrenndauer bzw. zur Spülintensität ergeben sich Unterschiede in der Schnittfugenfläche und dem Elektrodenverschleiß. In Bild 5.23 sind diese Unterschiede dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass bei schlechten Spülverhältnissen die Schmelze zwar zunächst ausgetrieben wird, sich einzelne Schmelzpartikel jedoch im unteren Bereich, an dem von der Schneidfront erzeugten Freischnitt, ablagern. Dort konglomerieren diese und füllen den Zwischenraum aus. Dies kann bei nicht elektrisch leitenden Schlackepartikeln zum Klemmen und ggf. zum Bruch der Elektrode führen. Bei leitfähigen Partikeln zünden Nebenlichtbögen.

Ähnlich wie beim CAMG-Verfahren reduzieren diese die Energiedichte an der Schneidfront und somit die mögliche Schneidgeschwindigkeit. Darüber hinaus tritt hierdurch ein seitlicher Elektrodenverschleiß auf. Bei größeren Partikeln reicht die Leistung der Schneidstromquelle häufig nicht aus, um das Material hinreichend schnell aufzuschmelzen. Hieraus resultieren Dauerkurzschlüsse die eine Überlastung der Schweißstromquelle hervorrufen. Bei ausreichender Spülung wird das gesamte Fugenmaterial aus der Schnittfuge abtransportiert. Die Schnittflächen sind metallisch blank und Nebenlichtbögen werden fast vollständig vermieden.

Neben dem Unterschied in der Schnittfugenfläche, ändert sich auch der Elektrodenverschleiß. So nimmt dieser bei intensiver Spülung nicht nur im Betrag ab, sondern ändert sich grundsätzlich. Die übliche sichelförmige Einkerbung im unteren Bereich der Elektrode (hier brennt der Lichtbogen bei unzureichender Spülung sehr lange) sowie der seitliche Verschleiß lassen sich weitestgehend vermeiden.



Bild 5.23: CAMC-Schnittfugenflächen und –Elektroden bei starker Spülströmung (links) und bei schwacher Spülströmung (rechts)

5.2.3 Elektrodenverschleiß

Aus der Literatur ist bekannt, dass der Elektrodenverschleiß insbesondere durch eine verbesserte Elektrodenspülung reduziert werden kann. Die hier durchgeführten Untersuchungen zeigen jedoch, dass anders als bisher angenommen, die Reduzierung des Elektrodenverschleißes nicht ausschließlich auf eine bessere Kühlung der Elektrode durch das Wasser zurückzuführen ist. Vielmehr ist hierfür die durch die Strömung bewirkte schnellere Lichtbogenbewegung verantwortlich. Diese Bewegung wirkt sich in zweifacher Hinsicht positiv aus. Zum Einen wird die thermische Belastung der Elektrode räumlich verteilt. Zum Anderen ergibt sich, durch den gleichmäßigeren Energieumsatz, eine zeitliche Glättung.

Für einen praktischen Einsatz des CAMC-Verfahrens ist es wichtig, über Anhaltswerte zum Elektrodenverschleiß bzw. zur Elektrodenstandzeit zu verfügen. Das CAMC-Verfahren zeichnet sich nicht durch eine hohe Schneidgeschwindigkeit und gute Schnittflächenqualität aus. Vielmehr ist es für Bauteile mit komplexen Geometrien,

großen Wandstärken und für erschwerte Randbedingungen geeignet. Die einzelnen Schneidaufgaben unterscheiden sich daher stark. Da der Elektrodenverschleiß von den jeweiligen Randbedingungen der Schneidaufgaben abhängt, lassen sich die Ergebnisse von Verschleißuntersuchungen nicht auf die jeweilige Schneidanwendung übertragen. Verschleißwerte müssen daher für jede Schneidanwendung anhand praktischer Untersuchungen ermittelt werden. Der Einfluss der erläuterten Ergebnisse auf den Elektrodenverschleiß soll daher anhand einer praktischen Anwendung verifiziert werden.

Eine Schneidaufgabe, für die im Rahmen der Rückbaumaßnahmen des MZFR (Mehrzweckforschungsreaktor Karlsruhe) eine Lösung gesucht wurde, soll hier als Beispiel dienen. Konkret galt es ein geeignetes Schneidverfahren für den unteren Teil des thermischen Schildes im RDB (Reaktor-Druckbehälter) zu finden. Wie in Bild 5.24 zu erkennen ist, handelt es sich hierbei um ein ringförmiges Bauteil aus korrosionsbeständigem Stahl mit einer Materialstärke von 70 - 130 mm. Es galt dieses, in einer Wassertiefe von 8 m, fernhantiert in 20 Segmente, zu zerlegen. Als besondere Randbedingung war hierbei zu berücksichtigen, dass zwischen der Rückwand des Bauteils und dem RDB nur ein Spalt von 20 mm vorhanden war.

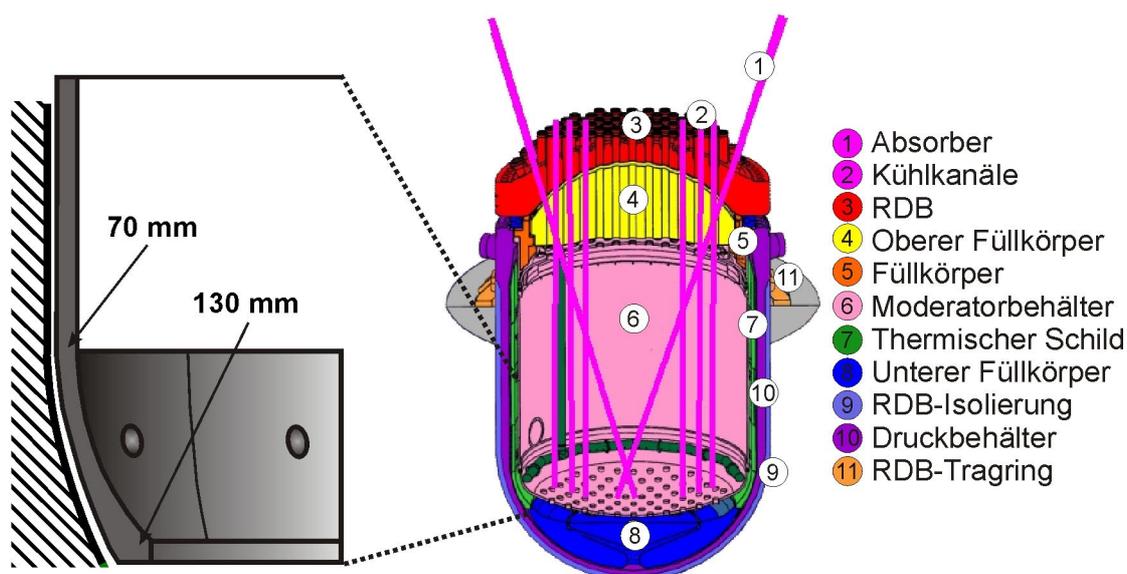


Bild 5.24: Reaktor-Druckbehälter (RDB) und Thermischer Schild des MZFR (Mehrzweckforschungsreaktor Karlsruhe)

Bereits im Jahre 2003 wurde im Rahmen einer Machbarkeitsstudie untersucht, ob sich das CAMC-Verfahren für diese Schneidaufgabe eignen könnte. Mit dem zum damaligen Zeitpunkt vorhandenen Wissen und der zur Verfügung stehenden Gerätetechnik wurden hierzu Verschleißmessungen durchgeführt. Als Stromquelle wurde eine Dalex Typ CG 2000 verwendet. Die Elektrodenpülung erfolgte mit 2,5 m³/h bei 0,15 MPa. Als Elektrodenwerkstoffe wurden CFC (kohlefaserverstärkter Kohlenstoff), Graphit sowie WCu (Wolframkupfer) verwendet. Aufgrund der in dieser Arbeit bereits

beschriebenen Probleme mit Nebenlichtbögen, dem Elektrodenklemmen und den Überlastungen der Stromquelle stellte sich heraus, dass sich das CAMC-Verfahren mit dem damaligen Entwicklungsstand nicht für die Schneidaufgabe eignete. Der Verschleiß der Elektroden lag bei 24%.

Aufgrund der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Untersuchungen und den dabei erreichten Verbesserungen im Prozessverhalten, wurde im Jahr 2005 erneut die Eignung des Verfahrens für die vorgestellte Schneidaufgabe überprüft. Durch die Begrenzung des Schneidstroms auf max. 700 A und einer Steigerung der Spülströmung auf 17 m³/h (1,1 MPa) wurden mit CFC-Elektroden Verschleißwerte von ca. 5% erreicht. Da die beschriebenen Schlackeablagerungen an den Schnittflächen bei dieser Anlagenkonfiguration nicht auftraten konnte ein Klemmen der Elektrode ausgeschlossen werden. Die hiermit einhergehende Reduzierung der mechanischen Belastung der Elektrode, erlaubte es Graphit als Elektrodenmaterial einzusetzen. Hierdurch konnte der Verschleiß auf einen Wert von 2,5% reduziert werden. Somit wurde eine Verbesserung um den Faktor 10 gegenüber den Untersuchungen aus dem Jahre 2003 erreicht.

Nachdem die grundsätzliche Eignung des CAMC-Verfahrens für diese Schneidaufgabe nachgewiesen werden konnte, folgte eine Vielzahl weiterer Untersuchungen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll. Ende 2005 wurde das CAMC-Verfahren erfolgreich bei dem Rückbau des MZFR eingesetzt. Hierdurch wurde die Leistungsfähigkeit in einer praktischen Anwendung unter Beweis gestellt. In Bild 5.25 ist ein erfolgreicher Schnitt an einem Mock-Up (Testwerkstück) mit der hierfür verwendeten Elektrode, sowie eine Fotografie vom Realeinsatz im MZFR dargestellt. Die Details zu diesem Projekt sind [Kre06], [Pre06], [Bac06b] und [Sta06] zu entnehmen.

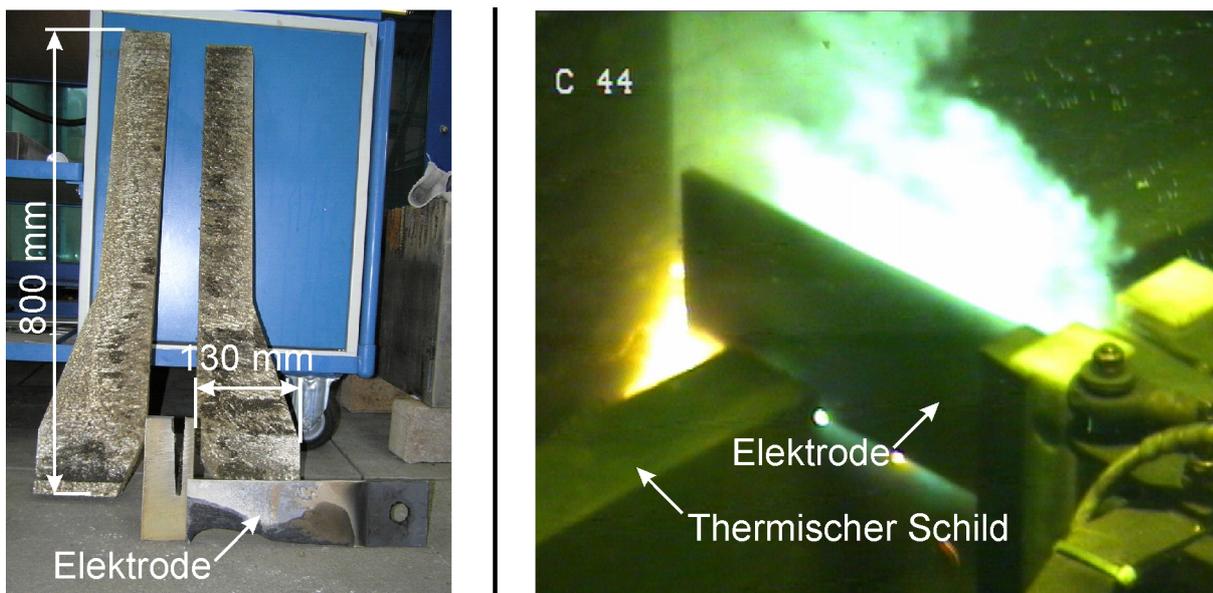


Bild 5.25: CAMC-Schnitt am Mock-Up (links) und im praktischen Einsatz am Thermischen Schild des MZFR (rechts)

5.2.4 Prozessregelung

Aufgrund der beschriebenen Probleme hinsichtlich der Prozessstabilität, konnte in der Vergangenheit nur bedingt eine Prozessregelung realisiert werden. Zumeist wurde daher empirisch eine mögliche Schneidgeschwindigkeit für die jeweilige Schneidaufgabe ermittelt und diese dann fest eingestellt. Bei auftretenden Störungen erfolgte ein Stoppen der Vorschubbewegung. Durch Rückwärtsbewegung der Elektrode und/oder dem Wiedereinschalten der Stromquelle konnte der Schnitt teilweise fortgesetzt werden.

Die erreichte Stabilisierung des Prozesses bildet die Basis für eine gute Automatisierbarkeit. Als Regelgröße eignet sich hierbei die Lichtbogenbrenndauer. Idealerweise liegt diese im Bereich von 20 ms bis 200 ms. Diese kurzen Brenndauern lassen sich wie erwähnt durch Anpassung der Spülströmung erreichen. Bei gegebener und hinreichender Spülung kann die Brenndauer direkt über die Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst werden. In Bild 5.26 ist ein typischer Stromverlauf dargestellt. Zu erkennen sind die stochastischen Schwankungen der Brenndauer und der Pulspausen. Eine Auswertung und Berechnung der mittleren Brenndauer ist mit entsprechenden Auswertungsalgorithmen möglich. Dies erfordert jedoch einen nicht unerheblichen messtechnischen Aufwand. Einfacher ist die Regelung über eine gleitende Mittelwertbildung. Ist die mittlere Brenndauer des Lichtbogens hinreichend kurz, so stellt sich über das Puls/Pause-Verhältnis ein Mittelwert ein, der unterhalb des eingestellten Maximalstroms I_{Amax} liegt. Ideale Schneidbedingungen erreicht man, wenn dieser Mittelwert im Bereich von 50 - 70% des eingestellten Maximalstroms I_{Amax} liegt. Bei dem Überschreiten wird die Vorschubgeschwindigkeit reduziert, bei dem Unterschreiten entsprechend erhöht. Sollte es, z.B. durch ein Zusammenziehen der Schnittfuge, zu Prozessstörungen kommen, so ist die sich ergebende Leistungsreserve der Stromquelle (30 - 50%) hinreichend groß um ein Freibrennen der Elektrode sicherzustellen. Mit dieser einfachen Regelung ist ein geschwindigkeitsoptimierter, stabiler und störungsfreier Betrieb möglich.

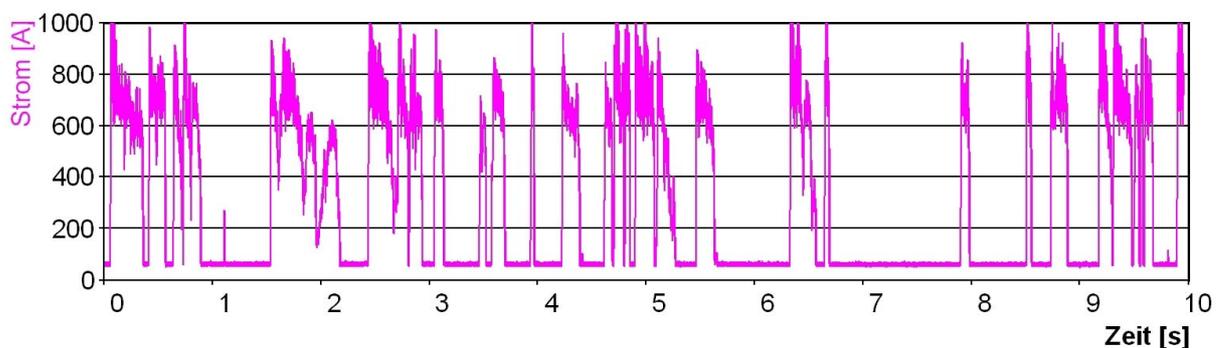


Bild 5.26: Typischer Stromverlauf eines CAMC-Schnittes, bei Verwendung einer geregelten Stromquelle und hinreichender Spülung, (Stromquelle GTH 802, $I_{Amax} = 700A$, $I_{Amittel} = 299 A$)

5.2.5 Handgeführtes CAMC

Beim handgeführten und somit personengebundenen Einsatz von elektrischen Schneidverfahren unter Wasser gilt es in besonderer Weise die Sicherheit des Tauchers zu berücksichtigen. In den Unfallverhütungsvorschriften VBG 15 [VBG93] ist für „Arbeiten unter Wasser mit Personal im Wasser“ vorgeschrieben, dass ausschließlich Gleichstromquellen einzusetzen sind und diese eine Leerlaufspannung von 65 V (Scheitelwert) nicht übersteigen dürfen. Mit einer Leerlaufspannung von 58 V wird dieser Wert von der bereits beschriebenen Stromquelle des Typs GTH 802 eingehalten, die daher auch für die hier durchgeführten Untersuchungen verwendet werden konnte.

Die Schneiduntersuchungen zeigten, dass im handgeführten Betrieb nicht annähernd so stabile Prozessbedingungen geschaffen werden können, wie dies mit Maschinenführung möglich ist. Dies ist insbesondere auf die fehlende „stabile“ Führung der Elektrode zurückzuführen. Eine Handführung erlaubt keine ausreichend konstante Vorschubgeschwindigkeit und ist stets von nicht zu vermeidenden Bewegungen in und quer zur Schneidrichtung überlagert. In diesem Zusammenhang berichteten die mit den Untersuchungen beauftragten Taucher von einer „Anziehungskraft des Werkstückes“. Untersuchungen zu den auftretenden Prozesskräften konnten dieses subjektive Empfinden bestätigen. Obgleich zum Zünden des Lichtbogens ein nahezu kraftfreier Kontakt ausreicht, tritt nach dem Ende des Lichtbogenbrennens eine Kraft in Vorschubrichtung auf. Diese wird durch die implodierende Gasblase zwischen Elektrode und Werkstück hervorgerufen. Die hierbei auftretenden Kräfte liegen, abhängig von der gewählten Stromstärke, zwischen 40 N und 70 N [Ver05].

Ein regelmäßiger Kontakt zwischen Werkstück und Elektrode ist im handgeführten Betrieb daher nicht zu vermeiden. Die hierdurch hervorgerufenen Kurzschlussphasen begrenzen die für das Aufschmelzen des Werkstückmaterials zur Verfügung stehende Energie. Insbesondere beim Trennen von Bauteilen mit größeren Schnittlängen (Blechwandungen etc.) ist der Anteil der Kurzschlüsse so hoch, dass keine sinnvollen Schneidleistungen mehr zu erreichen sind. Eine rein taktile Kontrolle der Elektrode ist hier nicht möglich.

Beim Trennen von Bauteilen mit kurzen Schnittlängen (5 – 25 mm), lassen sich hingegen relativ gute Schnittergebnisse erzeugen. Hierbei wirkt sich die Problematik des Verkantens in der Schnittfuge nicht so gravierend aus. So lassen sich Rohre, Stangen, Stahltrossen und Ketten mit einem Durchmesser bis ca. 30 mm mit dem CAMC-Verfahren effektiv trennen (siehe Bild 5.27). Auftretende Kurzschlüsse können durch regelmäßiges Eintauchen in und Entfernen der Elektrode aus der Schnittfuge unterbrochen werden. Hier kommen die Vorteile der schwertförmigen Elektrode zum Tragen. Im Vergleich zum Schneiden mit stabförmigen Elektroden, wie z.B. dem Oxy-Arc-Cutting, sind die Anforderung an die Positioniergenauigkeit deutlich kleiner und das Werkzeug ist bei schlechter Sicht somit einfacher zu handhaben.

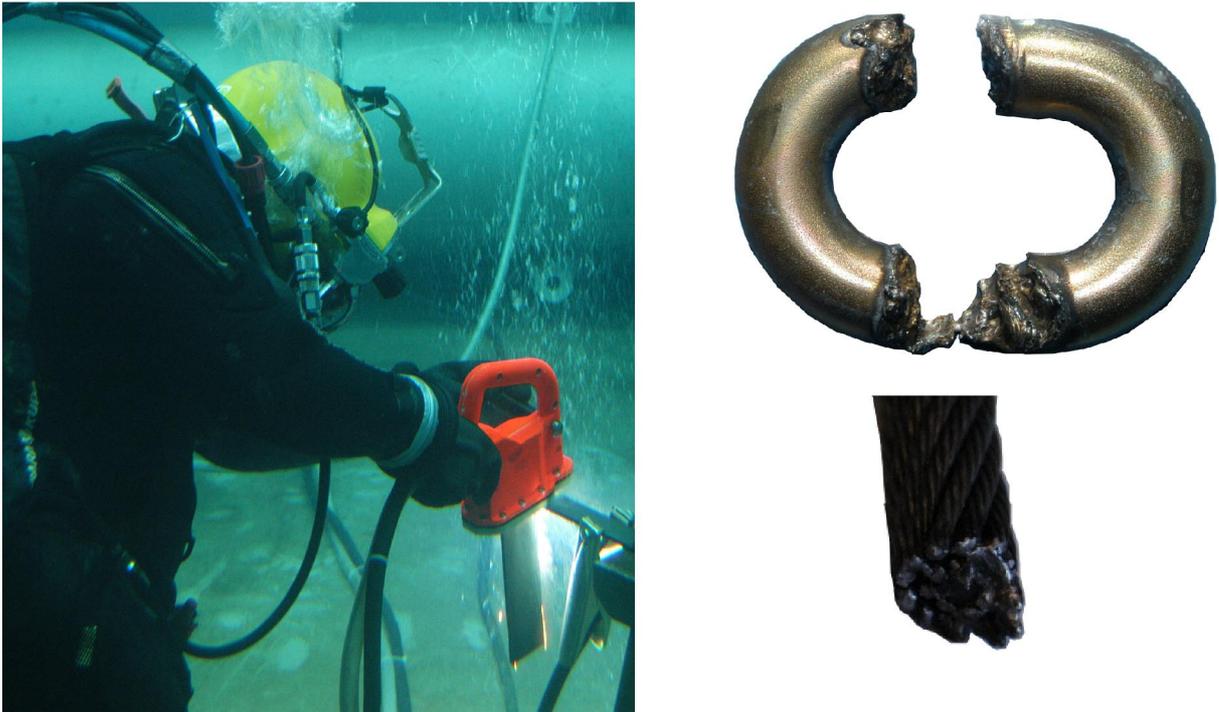


Bild 5.27: CAMC-Handgerät im Einsatz (links), getrennte Stahlkette (Ø16 mm) und Stahlseil (Ø10 mm) (rechts)

Bei den durchgeführten Untersuchungen ist ein Effekt aufgefallen, der bislang keine besondere Beachtung gefunden hat. So treten beim CAMC als auch beim CAMG Spannungsspitzen auf, die über der Leerlaufspannung der jeweils verwendeten Stromquelle liegen. Diese Spannungsspitzen sind z.B. in den Bildern 5.8 und Bild 5.17 zu erkennen. Hervorgerufen werden diese Spannungsspitzen durch Selbstinduktion.

$$U_{ind} = -L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (5.1)$$

Wie aus der Gleichung 5.1 zu entnehmen ist, hängt der Betrag der Spannung von der Gesamtinduktivität des Versuchsaufbaus (Stromquelle und Leitungen) und von der Geschwindigkeit der Stromänderung ab. Obwohl dieser physikalische Effekt bei jedem Schweißprozess auftritt, kommt diesem bei dem CAMC-Prozess mit Personen im Wasser eine besondere Bedeutung zu. Bei üblichen Schweißprozessen reißt der Lichtbogen nicht derart schnell ab. Vielmehr vergrößert sich der Widerstand in der Lichtbogensäule bei größer werdendem Abstand zwischen Elektrode und Werkstück, wodurch eine Reduzierung des Schweißstromes hervorgerufen wird. Diese Abnahme erfolgt jedoch in deutlich größeren Zeitintervallen, so dass die Geschwindigkeitsänderung des magnetischen Flusses erheblich geringer ist und damit nicht so ausgeprägte Spannungsspitzen entstehen. Hervorgerufen durch die, beim CAMC und

CAMG vorhandene und für einen effektiven Prozess notwendige Spülung, kommt es bei beiden Verfahren zu einem schnellen Abriss des Lichtbogens. (Dieser Effekt kann auch beim Plasmaschneiden am Ende des Schnittes beobachtet werden.) Hieraus resultiert eine schnelle Abnahme des Prozessstroms. In Bild 5.17 ist deutlich der zeitliche Zusammenhang zwischen den großen Stromabnahmegeschwindigkeiten und den Spannungsspitzen zu erkennen. Kontrollmessungen mit einem Oszilloskop, wegen der höheren Dynamik, ergaben Spannungsspitzen beim CAMC-Verfahren von bis zu 280 V DC.

Die hier beschriebenen und messtechnisch erfassten Spannungsspitzen decken sich mit dem subjektiven Empfinden der Taucher. Trotz der eingehaltenen Leerlaufspannung von < 65 V und der stets verwendeten Helmtaucherausrüstung machten sich diese Effekte durch ein unangenehmes „Kribbeln“ bemerkbar. Obwohl diese Spannungsspitzen in keiner Vorschrift beschrieben oder begrenzt sind, sollte hier gegen-gesteuert werden, um eine Gefährdung des Tauchpersonals zu vermeiden. Hierzu lassen sich z.B. Varistorschaltungen verwenden.

5.3 Emissionsuntersuchungen CAMG und CAMC

Bei der Auswahl von geeigneten Trenn- und Zerlegeverfahren für Rückbautätigkeiten von radiologisch kontaminierten und aktivierten Anlagen müssen die entstehenden Emissionen besonders beachtet werden. Anders als bei konventionellen Anwendungen, reicht es hier nicht aus die Einhaltung der Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) [Gef07] zu gewährleisten. Vielmehr gilt es einen Kontakt des Bedienpersonals mit den Emissionen möglichst vollständig zu vermeiden. Ebenso ist eine Kontaminationsverschleppung und/oder ggf. eine Rückkontamination zu vermeiden. Neben technischen und wirtschaftlichen Kriterien, wie der Schneidleistung, der Handhabung usw., müssen die notwendigen Maßnahmen für das Auffangen und die Entsorgung der Emissionen in der Bewertung der Verfahren berücksichtigt werden. Dazu sind Kenntnisse über die Art (chemische Zusammensetzung von Aerosolen, Stäuben, Gasen und Hydrosolen) und Menge der Emissionen notwendig.

Bei den hier behandelten Schneidverfahren sind die Aerosolemissionen aufgrund der Anwendung unter Wasser sehr gering und deren Anteil an den Gesamtemissionen bekannt. Informationen über die Menge der entstehenden H_2 und CO Mengen sind ebenfalls hinreichend bekannt. Weniger Informationen sind zu den entstehenden Hydrosolen und Sedimenten, insbesondere unter den geänderten Prozessbedingungen, bekannt. Um einen praktischen Einsatz zu ermöglichen, ist es daher zwingend erforderlich quantitative Informationen zu den spezifischen Emissionen bereitstellen zu können. Aus diesem Grund wurden hier entsprechende Untersuchungen durchgeführt.

5.3.1 Messverfahren zur Hydrosolemission

Zur Ermittlung der Hydrosolemission wurde die Vakuumfiltration angewendet. Hierbei werden die filtrierbaren Stoffe der Wasserprobe auf einem Filter mit einer Porenweite von $< 1 \mu\text{m}$ abgeschieden. Durch das Auswiegen des unbeladenen und des beladenen Filters kann so die Menge der in der Probe enthaltenen Hydrosole bestimmt werden. Über das Volumen der Probe kann dann die Hydrosolkonzentration k_H in mg/l berechnet werden. Setzt man voraus, dass die Hydrosolkonzentration k_H im Versuchsbecken homogen ist, so kann die spez. Hydrosolemission e_H in mg/kg wie folgt berechnet werden.

$$m_{Hges.} = V_B \cdot k_H \quad (5.2)$$

$$e_H = \frac{m_{Hges.}}{m_{Sges.}} \quad (5.3)$$

$$e_H = \frac{V_B \cdot k_H}{m_{S_{ges.}}} \quad (5.4)$$

Die Vorbehandlung der Filter, deren Trocknung und Wiegen, sowie die Vakuumfiltration erfolgte in Anlehnung an ISO 4405 [ISO05]. Verwendet wurden für diese Untersuchungen folgende Geräte bzw. Filter:

- Analysewaage: Elektronische Mikrowaage, Typ Sartorius M3P-000V001, Messbereich 1500 mg, Standardabweichung 2 μg
- Filtrationsgerät: Schleichert&Schuell, Typ GV050/2
- Membranfilter: Schleichert&Schuell, Typ ME 25 Cellulosemischester, 0,2 μm

5.3.2 Messverfahren zur Sedimentanalyse

Zur Ermittlung der Größenverteilung von Sedimenten werden diese üblicherweise trocken gesiebt. In dieser Anwendung, hat sich eine trockene Siebung als ungeeignet herausgestellt. Bei dem Trocknen der Sedimente verklumpen diese aufgrund von Korrosionserscheinungen. Diese Verklumpungen lösen sich beim Sieben nicht auf, so dass eine Größenfraktionierung nicht möglich ist. Besser eignet sich hier eine nasse Siebung. Verwendet wurde folgendes Messsystem:

- Analysesystem: Nasssiebturm Typs WS1, Firma Retsch
- verwendete Siebe: 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 500 μm , 250 μm , 125 μm , 63 μm , 32 μm , 20 μm

Nach dem Siebvorgang wurden die beladenen Siebe in einem Ofen getrocknet, das Siebgut entnommen und die einzelnen Fraktionen ausgewogen.

5.3.3 Emissionsuntersuchungen

Vor und nach jedem Schnitt wurde dem Versuchsbecken eine Wasserprobe entnommen. Von jeder Probe wurden 3 - 5 Filteranalysen durchgeführt. Die Hydrosolkonzentrationen der sauberen Proben lagen im Bereich von 0,1 - 1,0 mg/l. Um für die Auswertung der verunreinigten Proben eine hinreichende Filterbeladung zu erreichen, wurden Hydrosolkonzentrationen von 20 – 30 mg/l angestrebt. Abhängig vom Versuchsaufbau folgt hieraus eine auszutragende Schnittfugenmasse von 1 – 6 kg. Bei guter Wiederholgenauigkeit konnte so die Massenkonzentration der Schwebstoff-

fe und somit die spezifische Hydrosolmission bestimmt werden. Eine Aussage über die Partikelgrößenverteilung der Hydrosol konnte mangels geeigneter Messtechnik nicht getroffen werden.

Alle Emissionsuntersuchungen erfolgten nach folgendem Schema. Zunächst wurde das verwendete Versuchsbecken gründlich gereinigt, um den Einfluss durch fremde Verschmutzung möglichst gering zu halten. Nach dem Aufbau des Versuchs erfolgte die Befüllung des Beckens mit Wasser. Über eine vorhandene Filteranlage wurde dieses im Umlauf einige Stunden gereinigt. Nach dem Abschalten der Filteranlage wurde eine Wasserprobe zum Nullabgleich der Schwebstoffmessung gezogen. Bei weiterhin ausgeschalteter Filteranlage erfolgte die Durchführung der jeweiligen Schnitte. Sowohl beim CAMG- als auch beim CAMC-Verfahren ist hierbei eine hinreichende Verwirbelung des Wassers im Versuchsbecken durch die prozessspezifische Spülung gewährleistet. Unmittelbar nach dem Schnitt wurde erneut eine Wasserprobe gezogen. Durch Vergleich der Wasserproben über die oben beschriebene Vakuumfiltration erfolgte die Bestimmung der entstandenen Schwebstoffkonzentration.

Um die entstandenen Sedimente einer Analyse zu unterziehen, wurde das Wasser des Versuchbeckens, nach einer einstündigen Beruhigung, zunächst teilentleert. Hierzu wurde eine ca. 30 mm über dem Beckenboden installierte Tauchpumpe verwendet. Um Verwirbelungen weitestgehend zu vermeiden, hat die Pumpe nur eine relativ geringen Förderleistung von ca. 2 m³/h. Bei einem Wasserspiegel von ca. 30 mm wurden die Sedimente, in einem der Pumpe entfernten Bereich zusammengefasst. Das restliche Wasser wurde dann durch Absenken der Pumpe weitestgehend entfernt. Um hierbei möglichst keine kleinen Sedimente zu verlieren, wurde das abgepumpte Wasser durch ein Sieb mit einer Maschenweite von 20 µm ausgesiebt. Das verbleibende Wasser/Sediment-Gemisch wurde mit einem Nasssauger vollständig aus dem Versuchsbecken entnommen und unmittelbar einer Nasssiebung zugeführt.

In Bild 5.28 und Bild 5.29 sind die typischen Größenverteilungen der beim CAMC und CAMG entstehenden Sedimente dargestellt. Die Prozentangaben beziehen sich hierbei auf die Sedimentmasse. Die Masse der Hydrosol und Aerosole ist in dieser Darstellung nicht berücksichtigt. Deutlich ist zu erkennen, dass die Partikel der Sedimente beim CAMC tendenziell größer sind als beim CAMG. Bemerkenswert ist auch, dass beim CAMG keine Partikel > 1 mm entstehen.

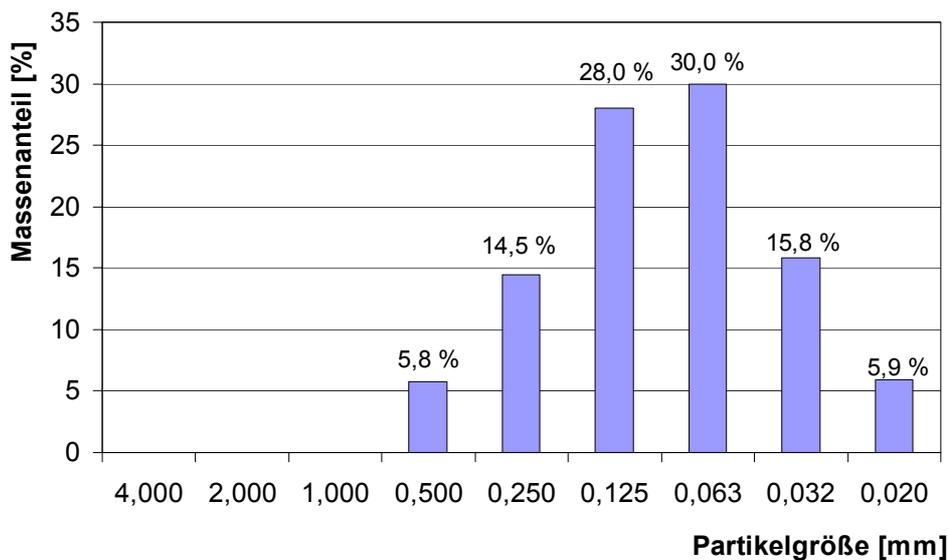


Bild 5.28: Größenverteilung der beim CAMG-Prozess entstehenden Sedimente

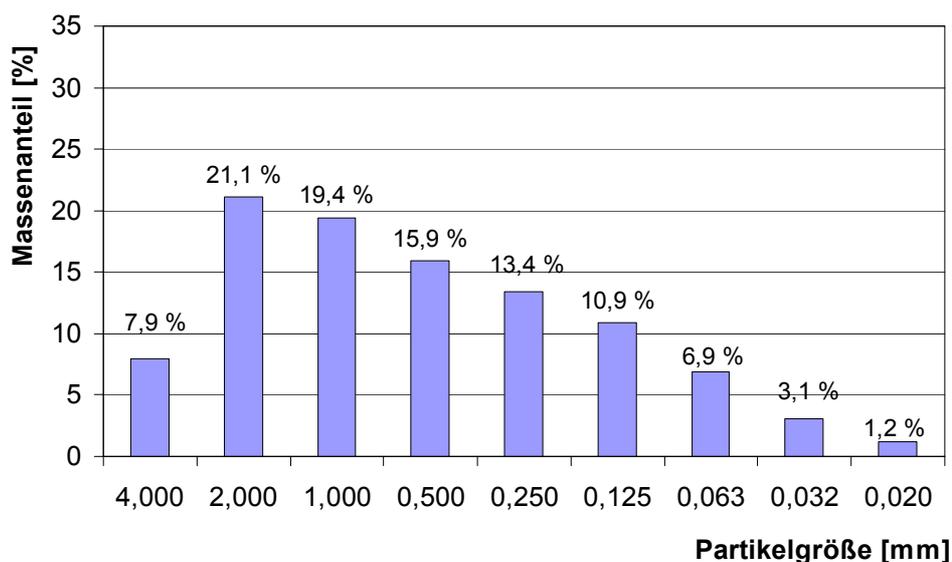


Bild 5.29: Größenverteilung der beim CAMC-Prozess entstehenden Sedimente

Die in Bild 5.30 dargestellten lichtmikroskopischen Aufnahmen der Sedimente zeigen ebenfalls, dass sich die Sedimente vom CAMG und CAMC unterscheiden. Während diese beim CAMC tendenziell kugelförmig sind, ist dies beim CAMG nicht der Fall. Die Unterschiede lassen sich auf die Spülverhältnisse an der Schneidfront zurückführen. So sind diese beim CAMG offensichtlich erheblich effektiver. Hier wird die Schmelze in kleineren Tropfen aus der Schnittfuge abtransportiert (kleinere Partikel). Zudem ist die Geschwindigkeit der Partikel erheblich größer. Die hydrodynamischen Verhältnisse verhindern hier die Bildung von kugelförmigen Tropfen, wie dies beim

CAMC möglich ist. Der beim CAMG ebenfalls größere Wärmeübergang aufgrund der Strömungsverhältnisse lässt die Schmelze dann scharfkantig erstarren.

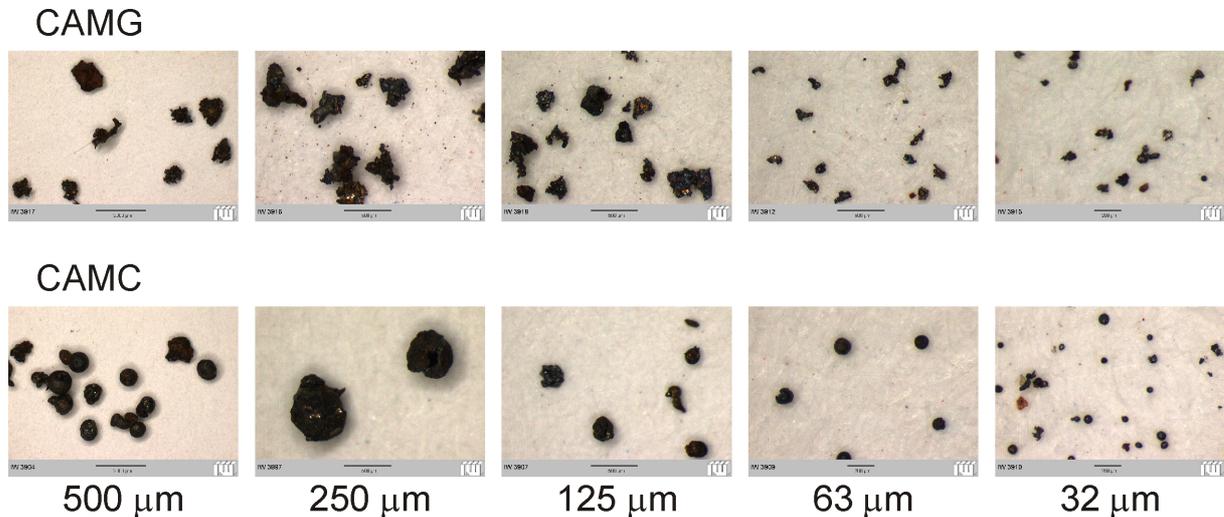


Bild 5.30: Lichtmikroskopische Aufnahmen der Partikel mehrerer Größenfraktionen der Verfahren CAMG und CAMC

Die höhere Strömungsgeschwindigkeit beim CAMG macht sich auch bei den entstehenden Hydrosolen bemerkbar. Die Analyse der Wasserproben zeigt, dass die beim CAMC als Schwebstoffe im Wasser verweilende Partikelmasse bei 6 – 9% (Mittelwert 7%) der ausgetragenen Schnittfugenmasse liegt. Beim CAMG-Prozess ist der Anteil hingegen höher und beträgt 12 – 24% (Mittelwert 19%).

Zur Interpretation der Messwerte muss folgendes angemerkt werden. Die verwendeten Analyseverfahren Filtern und Sieben erfassen den Partikelgrößenbereich zwischen ca. 1 μm und < 20 μm nicht. Diese Lücke im Messbereich entsteht, da Partikel in diesem Größenbereich schnell sedimentieren, sich auf dem Boden absetzen. In den Wasserproben für die Vakuumfiltration sind diese Partikel daher nicht enthalten oder unterrepräsentiert. Bei der Siebanalyse der Sedimente passieren diese Partikel die letzte Siebstufe, mit einer Maschenweite von < 20 μm , ungehindert. Dieser Messfehler könnte für die großen Unterschiede in den ermittelten Hydrosolemissionen verantwortlich sein. So wäre es möglich, dass die beim CAMG auftretende deutlich stärkere Durchmischung des Wassers im Versuchsbecken, mehr Partikel in dem genannten Größenbereich in Schwebelage halten. Dieser bei der Analyse der CAMC Proben verlorene Masseanteil, wurde hier bei der Vakuumfiltration berücksichtigt.

Zusammenfassend kann folgendes festgestellt werden: Eine absolute Bestimmung der Hydrosol- und Sedimentemissionen, konnte aufgrund der beschriebenen Messunsicherheit nicht erfolgen. Für den praktischen Einsatz bzw. für die Planung einer notwendigen Filteranlage sind die Messwerte dennoch aussagekräftig. Auch hier werden Sedimente durch die intensive Strömung im Becken in Schwebelage gehalten.

Für die Wasserfiltration bedeutet dies eine entsprechend höhere Konzentration an Schwebstoffen, die entsprechend zu berücksichtigen ist.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Thema dieser Arbeit ist die Weiterentwicklung von Verfahren zur Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung. Hierbei werden speziell die Schneidverfahren Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifen (CAMG, Contact-Arc-Metal-Grinding) sowie das Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (CAMC, Contact-Arc-Metal-Cutting) behandelt. Diese Fertigungsverfahren lassen sich nach DIN 8580 und DIN 8590 der Gruppe „thermisches Abtragen durch elektrische Gasentladung“ zuordnen. Die Kontakt-Lichtbogen-Metall-Bearbeitung hat sich bisher nicht industriell etablieren können. Die bislang typischen sehr hohen Prozessströme von mehreren kA, erforderten eine aufwendige Anlagentechnik. Der auftretende hohe Elektrodenverschleiß, die schlechte Schnittqualität und die geringe Prozessstabilität rechtfertigen diesen Aufwand nicht. Die insbesondere in der ehemaligen Sowjetunion, aber auch in westlichen Industrienationen, vereinzelt aufgebauten Anlagen werden daher nicht mehr betrieben.

Die Schneidverfahren CAMG und CAMC bietet jedoch zum Trennen von dickwandigen und geometrisch komplexen Werkstücken unter Wasser ein großes Potenzial. Solche Schneidaufgaben finden sich insbesondere beim Rückbau von Kernkraftwerken. Bei der Zerlegung des Reaktordruckbehälters und dessen Einbauten gilt es oftmals dickwandige und komplexe Bauteile aus metallischen Werkstoffen unter Wasser zu zerlegen. Konventionelle Schneidverfahren erreichen hier zum Teil ihre Leistungsgrenze.

Hauptziel dieser Arbeit war es daher, die Schneidverfahren CAMG und CAMC weiter zu entwickeln. Durch die Reduzierung des Elektrodenverschleißes und die Stabilisierung des Prozesses, soll deren Leistungspotenzial für Schneidanwendungen u.a. im kerntechnischen Rückbau nutzbar gemacht werden.

Aufbauend auf den bisherigen Erfahrungen, wurden hierzu zunächst neue Werkzeuge konzeptioniert, konstruiert und Prototypen gefertigt. Bei den folgenden praktischen Schneiduntersuchungen konnte, mit Hilfe der Analyse der Strom- und Spannungsverläufe, ein besseres Verständnis für die Vorgänge in den Prozessen entwickelt werden.

Das verbesserte Prozessverständnis ermöglichte eine systematische Weiterentwicklung der Verfahren. Insbesondere konnten die Prozessströme signifikant reduziert werden. Während bisher mit zunehmender Materialstärke auch leistungsstärkere Stromquellen erforderlich wurden - im japanischen Versuchatomkraftwerk JPDR wurden bei Zerlegearbeiten mit dem CAMG-Verfahren beispielsweise Prozessströme von bis zu 40 kA notwendig - ist es nun möglich, unabhängig von der Materialstärke, mit handelsüblichen geregelten Stromquellen (500 – 1200 A) zu arbeiten. Sowohl beim CAMG- als auch beim CAMC-Verfahren kann, abhängig von der Leistungsfähigkeit der Stromquelle und der zu schneidenden Materialstärke, eine passende Vorschubgeschwindigkeit gewählt werden.

Auch die angestrebte Stabilisierung der Prozesse konnte erreicht werden. Bisher war ein automatisierter Betrieb, aufgrund von häufigen, unregelmäßig auftretenden Störungen im Prozess, kaum möglich. Die erzielte Prozessstabilisierung erlaubt nun eine einfache Automatisierung der Verfahren.

Die Reduzierung der Prozessströme und die erhöhte Prozessstabilität bewirkten auch eine signifikante Verringerung des Elektrodenverschleißes. Beim CAMC-Verfahren konnte eine Reduzierung um den Faktor 10 erreicht werden. Noch bessere Ergebnisse ergeben sich beim CAMG-Verfahren. Hier konnte dieser um mehr als Faktor 30 herabgesetzt werden. Die Standzeit der Schneidelektroden wurde entsprechend vergrößert.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war es, alternative Anwendungen für das CAMG- und CAMC-Verfahren zu suchen und deren Leistungspotential abzuschätzen. Eine bisher nicht betrachtete alternative Anwendung stellt der handgeführte Betrieb der Verfahren dar. Aufgrund der hohen Schneidleistung des CAMG-Verfahrens wurde untersucht, ob sich dieses als Alternative zum konventionellen Winkelschleifen an Atmosphäre eignet. Beim CAMC-Verfahren wurden handgeführt Schneiduntersuchungen unter Wasser durchgeführt. Hierbei sollte beurteilt werden, ob dieses Verfahren eine Alternative zu dem üblichen Unterwasserschneidverfahren Oxi-Arc-Cutting darstellt. In beiden Fällen stellte sich heraus, dass die Handführung und die sich hieraus ergebende mangelnde Führungsgenauigkeit die Leistungsfähigkeit der Verfahren erheblich reduziert.

Durch eine Anwendung der Schneidverfahren im Rückbau von kerntechnischen Anlagen ergeben sich einige Besonderheiten. So gilt es hier die entstehenden Emissionen hinsichtlich ihrer Menge, Art und Ausbreitung besonders zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurden abschließend Untersuchungen zu den entstehenden Sedimenten und Hydrosolen beim Schneiden mit den CAMG- und CAMC-Verfahren durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen erlauben einem Anwender die Auslegung der notwendigen Filteranlagen sowie eine Planung hinsichtlich der Menge und Art der zu entsorgenden Reststoffe.

Während beim handgeführten Atmosphäreneinsatz des CAMG-Verfahren und beim handgeführten UW-Einsatz des CAMC nur ein sehr begrenztes Entwicklungspotential zu sehen ist, konnten die erarbeiteten Ergebnisse beim maschinengeführten CAMC direkt für eine praktische Anwendung beim Rückbau einer kerntechnischen Anlage angewendet werden. Der Einsatz dieses Verfahren bei der Zerlegung von Einbauten im Reaktordruckbehälter des Mehrzweckforschungsreaktors Karlsruhe verlief erfolgreich. Aufgrund der einfachen, robusten und prozesssicheren Gerätetechnik kann dieses Schneidverfahren, ohne weitere Entwicklungsarbeit, auch in anderen Rückbauprojekten eine direkte Anwendung finden. Anwendungen in anderen Bereichen können ebenfalls schnell umgesetzt werden. Insbesondere bei Wartungs- und Rückbaumaßnahmen im steigenden Offshore-Markt liegen wahrscheinlich sinnvolle Anwendungsbereiche.

Auch beim CAMG-Verfahren können die erarbeiteten Ergebnisse direkt für eine praktische Anwendung genutzt werden. Allerdings ist hierfür eine konstruktive Überarbeitung des CAMG-Werkzeuges notwendig. Aufgrund der reduzierten benötigten Antriebsleistung und der geringeren Prozessströme kann hierbei der Geräteaufwand erheblich reduziert werden.

7 Literaturverzeichnis

- [Bac01] Bach, Fr.-W.: Untersuchungen zum Trennen dickwandiger Reaktorbauteile mittels Kontakt-Lichtbogen-Metall-Trennschleifens mit rotierender Elektrode (CAMG). Untersuchungsberichte, Technische Universität Hannover, 2001
- [Bac04] Bach, Fr.-W.; Kremer, G.; Verseemann, R.; Redeker, Ch. F.; Lindemaier, J.: Berechnung des Strömungsfeldes beim Kontakt-Lichtbogen-Metallschneiden unter Wasser. Schweißen und Schneiden 56 (2004) Heft 11, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf, S.586-592
- [Bac06a] Bach, Fr.-W.; Kremer, G.; Rügenapp, T.: Entwicklung und Einsatz von Zerlegwerkzeugen für den Rückbau nuklearer Anlagen. Nachrichten Forschungszentrum Karlsruhe, Jahrgang 38, 3/2006, Seite 147-152
- [Bac06b] Bach, Fr.-W., Kremer, G.: CAMC und CAMG als Schneidtechnik für den Rückbau von Kerntechnischen Anlagen. ICCT 2006 – Internationale Schneidtechnische Tagung 2006, 10.-11. Oktober 2006, Tagungsband, Herausgeber Fr.-W. Bach, IW, S. 146-154, ISBN 3-9806415-7-0
- [Bac92] Bach, Fr.-W.; Priesmeyer, U.; Netuschil, M.: Untersuchungen mit dem Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden an ferritischen und austenitischen Probewerkstücken. Bericht für Siemens-KWU, Universität Hannover, Institut für Werkstoffkunde, Hannover 1992
- [Bac97] Bach, Fr.-W.; Philipp, E.: Qualifizierung des Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneidens zur Schweißnahtvorbereitung. Kleine konstruktive Studienarbeit, Universität Hannover, Hannover 1997
- [Bac98] Bach, Fr.-W.: Betriebsanleitung CAMC-Trenneinrichtung. Universität Dortmund, Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, Dortmund 1998
- [Bac98] Bach, Fr.-W.; J.-H. Perleberg: Jahresbericht 1997 des Teilprojektes B2–Thermisches Schneiden. Sonderforschungsbereich 264, Universität Hannover, April 1998
- [Bac99] Bach, Fr.-W.; Lindemaier, J.; Philipp, E.: Zerlegung dickwandiger Stahlkomponenten mit der Thermischen Bohr- und Senktechnik. Abschlußbericht, BMBF FK 02 S 7625 3, Universität Hannover, 1999
- [Boh91] BOHL, W.: Technische Strömungslehre. Vogel Buchverlag, Würzburg, 1991, ISBN 3-8023-0036-X
- [Bra97] Brauer, T.: Konstruktive Modifikation und Erprobung eines kombinierten Befestigungselementes auf Basis des thermischen Unterwasserbohrens mit CAMD. Diplomarbeit, Universität Hannover, 1997
- [Dav57] Davydov, A.S.: Elektrokontaktbearbeitung von Metallen. Stanki i instrument, (1957) 7, S. 6-9

-
- [Dav66b] Davidov, A.S.: Elektrokontakt-Glätten. Stanki i instrument, (1666)1, S. 10-12
- [Dil06] Dilthey, U.: Fertigungsverfahren 1, Schweiß- und Schneidtechnologien. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 2006, ISBN: 978-3-540-21673-5
- [DIN80] DIN 8580: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. 2003
- [DIN90] DIN 8590: Fertigungsverfahren Abtragen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe. 2003
- [Dor01] Doerpinghaus, T.: Die Geschichte der Draht-Erosion, Wie ein ganz feiner Draht die Welt der Werkzeug- und Formen-Bauer veränderte. 2001
- [Gef07] Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen, Bundesrechtverordnung, 26. Oktober 2007
- [Glu80] Glusberg, E.I.; Kasmina, L.D., Spiridonova, G.B.: Analytische Untersuchungen des Temperaturfeldes einer Einheitsentladung bei der EKB. EOM (1980) 6, S. 61-63
- [Hol58] Electric contacts handbook. Springer, Berlin, 1958
- [ISO05] ISO 4405: Hydraulik fluid power -Fluid contamination- Determination of particulate contamination by the gravimetric method. 1991
- [Klo02] Klocke, F.: Theoretische Modelle zur Funkenerosion : Grundlagenuntersuchungen an elektrischen Entladungen unter flüssigen Dielektrika. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben KI500/23-1, Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen 2002
- [Klo06] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 3, Abtragen, Generieren Lasermaterialbearbeitung. Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg 2007, ISBN: 978-3-540-48954-2
- [Koc89] Koch, K.: Beitrag zur Plasmaschneidtechnologie unter extremen Umgebungsbedingungen. Dissertation, Technische Universität Hannover, 1989
- [Kre06] Kremer, G.: Weiterentwicklung des Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneidens. ABICOR-Innovationspreis 2006
- [Kri06] Krink, V.; Simler, H.; Laurisch, F.: Plasmaschneidtechnologie – Erweiterung wirtschaftlicher Anwendungsgebiete. ICCT 2006 – Internationale Schneidtechnische Tagung 2006, 10.-11. Oktober 2006, Tagungsband, Herausgeber Fr.-W. Bach, IW, S. 146-154, ISBN 3-9806415-7-0
- [Liv59] Livschiz, A.L.; Juchid, M.E.: Das Elektrokontaktverfahren zur Beseitigung schadhafter Schichten an Gussblöcken. Stanki i instrument, (1959) 4, S. 16-18
- [Mat97] Matsuyama, K.: Current status of high tolerance plasma arc cutting in Japan. Welding in the World, Band 39, Nr. 4, S. 165-171, 1997

- [Men04] Mender, A.; Bornemann, B.; Mühlhausen, H.-J.: Designstudie CAMC-Handgerät. Fachhochschule Hannover, 2004
- [Mil69] Miljutkin, V.S; Maslov, J.A.: U/I-Kennlinie des Lichtbogens beim Lichtbogentrennen in Luft. Svarotschnoe proizvodstvo, (1969) 10, S. 36-37
- [Mie74] Mierdel, G.: Was ist Plasma?. Aulis Verlag Deubner & Co KG, 1974
- [Nie97] Niemeyer, N.: Grundlagen elektroerosiver Abtragsverfahren. Seminarvortrag, Universität Hannover, 1993
- [NN94] Y-12 Plant decontamination and decommissioning technology logic diagram for Building. 9201-4. Volume 2: Technology logic diagram, U.S. Department of Energy, 1994 Sep 01,
- [NN97] The Japan Power Demonstration Reactor Decommissioning Program. Nuclear Plant Journal Editorial Archive, July-August 1997
- [NN99] State of the Art Technology for Decontamination and Dismantling of Nuclear Facilities. International Atomic Energy Agency, Wien 1999
- [Pat85] Patent Number 4,510,368 United States Patent. High speed electric arc saw and method of operation same, 1985
- [Pei89] Peitzsch, L.: Elektrisch abtragendes Trennen. Dissertation Technische Universität „Otto von Guericke“ Magdeburg, 1989
- [Pet05] Petersen, M.: Entwicklung und Aufbau eines Aerosolmessstandes. Studienarbeit Universität Hannover, 2005
- [Phi01] Philipp, E.: Beitrag zum Elektrokontakttrennen unter Wasser. Dissertation, Technische Universität Hannover, 2001
- [Pre06] Prechtl, E.; Eisenmann, B.; Süßdorf, W.; Stanke, D.; Bienia, H.; Loeb, A.; Thoma, M.; Bach, Fr.-W.; Kremer, G.; Rümenapp, T.: Erfolgreicher Einsatz des Plasmaschneidverfahrens und der Contact-Arc-Metal-Cutting Zerlegetechnik (CAMC) beim Rückbau des Mehrzweckforschungsreaktors Karlsruhe (MZFR). ICCT 2006 – Internationale Schneidtechnische Tagung 2006, 10.-11. Oktober 2006, Tagungsband, S. 162-169, ISBN 3-9806415-7-0
- [Pri97] Priesmeyer, U.: Thermische Schneidverfahren und Werkstoffreaktionen im Hinblick auf Entstehung von Staub und Aerosolen. Dissertation Universität Hannover, VDI-Bericht Nr. 450 (1997)
- [Pya90] Pyatunin, B. A.; Vainshtein V. V.: Trial Decommission of Nuclear Reactors . Atomnaya Energiya Vol. 69, Nr. 3, pp. 157-160 (1990)
- [Raj83] Rajabov, I.V.: Berechnung des optimalen Arbeitsregimes bei Kurzlichtbögen. EOM (1983)5; S.10-13
- [Rug93] Ruge, J.: Handbuch der Schweißtechnik Band II: Verfahren und Fertigung. Berlin, 1993

-
- [Sai82] Saizev, V.A.: Hochproduktiver Prozess der Elektrokontaktbearbeitung von konusförmigen Metallstücken aus Stahl. Dissertation A Leningrad Polytechnisches Institut, 1982
- [Sch85] Schellhase, M.: Der Schweißlichtbogen – Ein technologisches Werkzeug. DVS, Düsseldorf, 1985
- [Sch93] Schulze, H. P.: Die Elektrokontaktladungsbearbeitung (ECDM)- Ein elektrothermisches Verfahren zur Recyclingvorbereitung. VDI-Bericht Nr. 1021, (1993)
- [Sch97] Schreiber, W.: CAMC-Schneideinheit für die Unterwasser-Zerlegung von WWER-Corebauteilen. Erprobungsbericht EWN-Entwicklungsauftrag, Lubmin/ Hannover, 1997
- [Sem83] Semjonov, V.N.; Fotejev, N.K.: Über die Wanderung der Lichtbogenentladung im Zwischenelektrodenraum bei der Elektrokontaktbearbeitung. EMO (1983) 6, S. 5-10
- [Sem83] Semjonov, V.N.; Fotejev, N.K.: Wirkung des Elektromagnetischen Feldes auf den Prozess des Elektrokontakttrennens. EMO (1983) 6, S. 5-10
- [Sem84] Semjonov, V.N.; Fotejev, N.K.: Die Oberflächenqualität nach dem Elektrokontakttrennen. EMO (1984) 1, S. 5-9
- [Smi02] Smirnow, Y. Y.: Entwicklung einer Anlage für Kontakt-Lichtbogen-Metall-Abtragung und Qualifizierung des Prozesse. Dissertation, Sankt-Petersburg, 2002
- [Sta06] Stanke, D.; Bienia, H.; Loeb, A.; Thoma, M.; Eisenmann, B.; Prechtel, E.; Süßdorf, W.; Kremer, G.; Rügenapp, T.: Contact-Arc-Metal-Cutting (CAMC) Eine junge Schneidtechnologie ist den Kinderschuhen entwachsen – Erfolgreicher Einsatz beim Rückbau des Mehrzweckforschungsreaktors Karlsruhe (MZFR). ATW 51, Jg. (2006) Heft 3 März
- [Thi89] Thilghman, B.C.: Cutting metal by electricity. US Patent No. 416 873, 12.1889
- [VBG93] VBG 15: UVV Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren. Das Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung
- [Vel85] Velikij, V.J.; Vengerenko, E.E.; Gude, I.A.: Universelle Karussell-Elektrokontaktmaschine. EOM (1985)2, S. 74-76
- [Ver05] Verseemann, R.; Haferkamp H.; Kremer, G.: Untersuchungen zum handgeführten Kontakt-Lichtbogen-Metall-Schneiden (CAMC) von technischen Unterwasserstrukturen. DFG-Zwischenbericht, Geschäftszeichen: SCHR 640/4-1, Hannover 2005

- [Ver99] Verseemann, R.: Beitrag zum automatisierten autogenen Brennscheiden unter Wasser. Dissertation, Technische Universität Hannover, VDI-Bericht Nr. 513 (1999)
- [Vol80] Volkmann, W.: Kohlebürsten – Untersuchungsergebnisse Erfahrungen Empfehlungen aus den Laboratorien der Schunk & Ebe GmbH. Brühlsche Universitätsdruckerei, Gießen, 1980
- [Vol85] Volosatov, V.A.: Fortschrittliche Technologien der Metallbearbeitung. Erfahrungen Leningrader Betriebe, Lenisdat, 1985
- [Wit97] Witzak, M. P.: Verbesserung der Prozeßführungssysteme für funkenerosive Senkanlagen unter Einbeziehung von Fuzzy-Technologien. Dissertation Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg 1997
- [Yok90] Yokota, M.; Ishikawa, H.: Underwater arc saw gets to work on the vessel at Japan`s JPDR. nuclear engineering international, 9.1990

8 Lebenslauf

Persönliche Daten:

Name: Guido Kremer
Adresse: Über dem Dorfe 16
30989 Gehrden
Geburtstag, -ort: 16.1.1969, Hückeswagen
Familienstand: verheiratet, zwei Kinder

Schulbildung:

1975 – 1979 Grundschule Hackenberg, Remscheid
1979 – 1985 GHS Hackenberg, Remscheid
1991 – 1992 Gewerbliche Schulen der Stadt Remscheid (FOS)

Ausbildung:

1985 – 1989 Berufsausbildung zum Werkzeugmacher
Ed. Scharwächter GmbH, Remscheid
1993 – 1996 Studium Maschinenbau
Fachhochschule Flensburg
Studienschwerpunkt: Energietechnik/Maschinentechnik

Tätigkeiten:

1989 – 1991 Tätigkeit als Werkzeugmacher
Ed. Scharwächter GmbH, Remscheid
1996 – 1999 Entwicklungsingenieur
Energiewerkstatt GmbH, Hannover
1999 – 2002 Leitender Ingenieur
Energiewerkstatt GmbH, Hannover
2002 – 2005 Wissenschaftlicher Mitarbeiter
Institut für Werkstoffkunde der Universität Hannover
seit 2005 Bereichsleiter am Institut für Werkstoffkunde,
Leiter des Unterwassertechnikum
Institut für Werkstoffkunde der Leibniz Universität Hannover