

Schlussbericht

zu dem IGF-Vorhaben

Emissionsarmes MSG-Heißdrahtschweißen - Reduzierung gefährlicher Schweißrauche
durch die partielle Trennung von Lichtbogen und Zusatzwerkstoff

der Forschungsstelle

TU Dresden, Institut für Fertigungstechnik / Professur Fügetechnik und Montage

Das IGF-Vorhaben 18.179 B der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte
Verfahren e.V. des DVS wurde über die



im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

vom

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Dresden, 04.08.2016

Ort, Datum

Name und Unterschrift des Projektleiters der TU Dresden

Abschlussbericht

Titel: Emissionsarmes MSG-Heißdrahtschweißen - Reduzierung gefährlicher Schweißrauche durch die partielle Trennung von Lichtbogen und Zusatzwerkstoff

IGF-Nr.: 18.179 B

Forschungsstelle: Technische Universität Dresden
Institut für Fertigungstechnik
Professur Fügetechnik und Montage
01062 Dresden

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel

Projektbearbeiter: Dipl.-Ing. A. Heinitz
Dr.-Ing. S. Rose
Dipl.-Ing. S. Jäckel
Dipl.-Ing. M. Hertel

Laufzeit: 01.05.2014 – 30.04.2016

Das IGF-Vorhaben Nr.: 18.179 B / DVS-Nr.: Q6.019 der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Für die finanzielle Unterstützung unseres Vorhabens bedanken wir uns.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	5
2	Technische und wirtschaftliche Problemstellung.....	7
3	Stand von Technik und Forschung.....	8
3.1	Schweißrauche	8
3.2	Messung von Schweißrauchemissionen	10
3.3	Verringerung von Schweißrauchemissionen	12
4	Zielstellung	16
5	Methodische Vorgehensweise	18
6	Ergebnisse.....	22
6.1	Einfluss der technologischen Parameter	22
6.2	Konzepte zur Werkstoffeinbringung am Beispiel eines 1.4301	29
6.3	Anwendungsbeispiel und Prozessvergleich.....	34
7	Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse für KMU	44
7.1	Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse.....	44
7.2	Industrielle Anwendung der Forschungsergebnisse	44
8	Erläuterung zur Kostenaufteilung.....	46
8.1	Erläuterungen zum Personaleinsatz.....	46
8.2	Erläuterungen zu Geräteanschaffung.....	46
8.3	Erläuterungen zu Ausgaben für Leistungen Dritter	46
9	Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen	47
10	Projektbegleitender Ausschuss	50
	Quellenverzeichnis.....	51
	Abbildungsverzeichnis	55
	Tabellenverzeichnis	59

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

Abkürzung	Benennung
AC	Wechselstrom (alternating current)
BGI	Berufsgenossenschaft - Information
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie
ILB	Impulslichtbogen
ICP-OES	Optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MAG	Metall-Aktivgas(-Schweißen)
MIG	Metall-Inertgas(-Schweißen)
MSG	Metall-Schutzgas(-Schweißen)
Ni	Nickel
SLB	Sprühlichtbogen
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
WIG	Wolfram-Inertgas(-Schweißen)

1 Zusammenfassung

Das Ziel des Vorhabens war eine signifikante Reduzierung gesundheitsgefährdender Schweißrauchkomponenten beim MSG-Schweißen. Im Unterschied zu bisherigen Forschungsansätzen in der Schweißtechnik sollte die Gefährdung der Mitarbeiter direkt bei ihrer Entstehung und nicht, wie heute üblich, durch nachgelagerte Schutzmaßnahmen minimiert werden. Im Rahmen des Vorhabens wurde hierfür ein neuartiger Ansatz systematisch untersucht, welcher auf einer partiell lichtbogenlosen Werkstoffeinbringung durch einen Zusatzdraht basiert. Durch Auslagerung aller kritischen Bestandteile wie z. B. Chrom und Nickel aus dem lichtbogentragenden in den lichtbogenlosen Draht kann sowohl die Schweißrauchemission als auch deren Toxizität maßgeblich verringert werden. Auf Grundlage des gewählten Ansatzes kann den steigenden Anforderungen des Arbeitsschutzes bei gleichzeitiger Erhaltung der Wirtschaftlichkeit des MSG-Verfahrens entsprochen werden.

Die Untersuchungen haben ergeben, dass die chemische Zusammensetzung des beim MSG-Zusatzdrahtschweißen entstehenden Schweißrauches unabhängig von den untersuchten technologischen Parametern des Zusatzdrahtes ist. Im Hinblick auf die Abschmelzleistung, die Prozessstabilität sowie die Durchmischung der Legierungselemente im Schmelzbad wird der Einsatz eines Zusatzheizdrahtes (AC-Modus) mit einem Abstand von 0 mm zur Lichtbogenachse empfohlen. Durch eine Wechselstrombelastung des Zusatzheizdrahtes können die Vorteile einer erhöhten Abschmelzleistung (gleiche Polung beider Drähte) und einer erhöhten Prozessstabilität (gegensätzliche Polung beider Drähte) miteinander kombiniert werden.

Im Rahmen eines Prozessvergleiches am Beispiel eines X5CrNi18-10 konnte festgestellt werden, dass der Einsatz eines Zusatzfülldrahtprozesses mit der größten Gesamtemissionsmenge und der höchsten Emissionsrate korreliert. Sowohl die Gesamtemissionsmenge als auch die Emissionsrate sind bei Verwendung des vorgestellten Zusatzmassivdrahtprozesses vergleichbar mit einem konventionellen MSG-Prozess. Im Hinblick auf die chemische Zusammensetzung ergeben sich bei beiden Zusatzdrahtprozessen deutlich verringerte prozentuale Chrom- und Nickelanteile im Schweißrauch, wobei der Zusatzfülldrahtprozess aufgrund der nicht gänzlich zu vermeidenden Oxidation von Fülldrahtbestandteilen leicht erhöhte Konzentrationen beider toxischen Elemente aufweist. Die absolut emittierte Menge an Chrom- und Nickel pro Bauteilschweißung nahm vom konventionellen MSG-Prozess über den Zusatzfülldraht- hin zum Zusatzmassivdrahtprozess ab. Im Vergleich zum konventionellen MSG-Prozess konnte durch die Auslagerung von gesundheitsgefährlichen Elementen in einen Zusatzmassivdrahtes eine Reduzierung sowohl des Chrom- als auch des Nickelanteils

im Schweißrauch um ca. 95 % realisiert werden. Erste Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass die Verwendung eines Zusatzfülldrahtes zu den höchsten und die Anwendung eines Zusatzmassivdrahtes zu den niedrigsten Chrom(VI)-Emissionen führt, wobei weiterführende Untersuchungen von den Autoren als zielführend und notwendig erachtet werden.

Neben der Bewertung des Gefährdungspotentials der entstehenden Schweißrauche konnte durch die Analysen der Verbindungseigenschaften gezeigt werden, dass die Verwendung eines Zusatzfülldrahtes eine unzureichende Durchmischung bedingt und damit weiterführend die Heißrissneigung im Wurzelbereich signifikant erhöht. Es resultiert eine Abnahme der Korrosionsbeständigkeit als auch der Bauteilfestigkeit. Die Durchmischung kann durch die Anwendung eines Zusatzmassivdrahtes signifikant verbessert werden, was zu vergleichbaren Verbindungs- und Bauteileigenschaften wie bei der Verwendung eines konventionellen MSG-Prozesses führt.

Es kann zusammenfassend festgestellt werden, dass durch die Anwendung von Zusatzmassivdrähten das Gefährdungspotenzial des Schweißrauches beim MSG-Schweißen des austenitischen korrosionsbeständigen Stahls X5CrNi18-10 signifikant reduziert werden kann. Für eine praxisnahe Umsetzung des Prozesses ist es zwingend erforderlich, alle gesundheitsgefährlichen Drahtbestandteile durch einen Zusatzmassivdraht zuzuführen, wobei kein derzeit kommerziell verfügbarer Zusatzdraht die an die chemische Zusammensetzung gestellten Anforderungen erfüllt. Auf Grundlage der Ergebnisse sind im Folgenden Zusatzmassivdrähte mit entsprechend hohen prozentualen Anteilen an Chrom und Nickel zu konzipieren und zu fertigen.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht.

2 Technische und wirtschaftliche Problemstellung

Der Anlass des Forschungsvorhabens leitet sich aus der Forderung nach emissionsarmen Fertigungsprozessen ab. MSG-Schweißverfahren sind die wichtigsten thermischen Fügeverfahren und nehmen eine herausragende Stellung in der Industrie ein. Ein stetig wachsendes Problem für den Einsatz und die Akzeptanz von MSG-Verfahren im Allgemeinen stellt die hohe Emissivität vor allem an Schweißrauchen dar. Die Bereitschaft, diese Verfahren einzusetzen, wird geringer. Die Ursachen hierfür sind hauptsächlich in den potentiellen Gesundheitsgefährdungen und den „dreckigen“ Arbeits- und Umgebungsbedingungen zu sehen. Nur wenn es gelingt, die Entstehung gesundheitsgefährdender Schweißrauche signifikant zu reduzieren, ist zu erwarten, dass die hoch produktiven MSG-Verfahren auch zukünftig zum Schweißen aller Werkstoffgruppen eingesetzt werden können und dürfen.

Die Reduzierung der Emissionsbelastungen durch Schweißrauch stellt dabei eine der wichtigsten Aufgaben zukünftiger Prozessentwicklung dar und betrifft nicht nur die Schweißer und Bediener sondern alle Mitarbeiter (Bedien-, Transport-, Büropersonal). Bisher beschränken sich die Schutzmaßnahmen meist darauf, die Schweißrauche mit einer statischen Arbeitsplatzabsaugung zu entfernen. Die Wirksamkeit solcher Absaugungen variiert allerdings besonders in Abhängigkeit der Schweißposition und Schweißerposition deutlich. Die individuelle Belastung des schweißtechnischen Personals als auch anderer exponierter Mitarbeiter (z. B. Transport- und Verwaltungspersonal) ist folglich nicht sichergestellt.

Bislang fehlt die Kopplung zwischen den Anforderungen des Arbeitsschutzes und der Verfahrensweiterentwicklung. Es ist notwendig, die Emissionsentstehung direkt prozessimmanent zu reduzieren.

3 Stand von Technik und Forschung

3.1 Schweißrauche

Beim Schweißen werden Emissionen in Form von Strahlung, Lärm, Gasen und Schweißrauch frei. Schweißrauche sind Stoffgemische aus Gasen und festen Partikeln (Aerosole), denen hohe Gefährdungsklassen zugeordnet sind [1] [2] [3]. Bei den festen Partikeln handelt es sich meist um Metalloxide, die sich als Einzelpartikel, Ketten und Agglomerate ausbilden können. Abbildung 3.1 zeigt eine Detailaufnahme der vielfältigen Ausbildungen der Partikel bzw. Partikelgruppen im Schweißrauch.

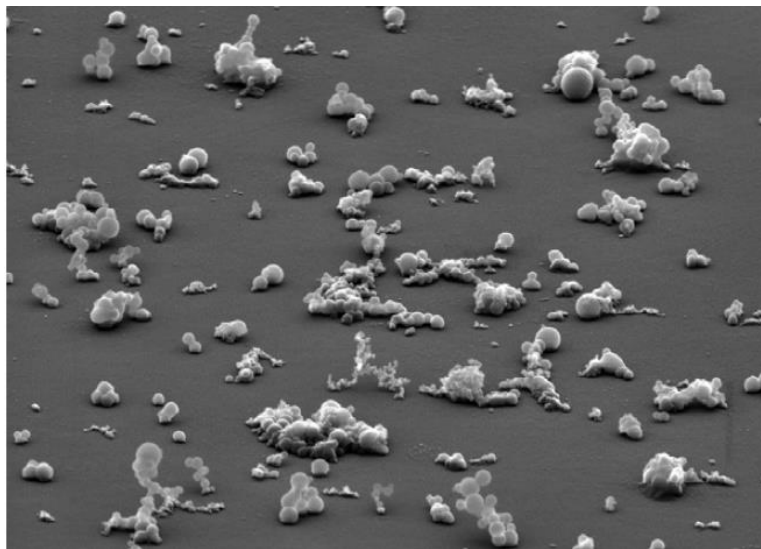


Abbildung 3.1: Detailaufnahme von emittierten Partikeln eines MAG-Prozesses [4]

Das Gefährdungspotential von Stäuben (Aerosolen) ist zusammensetzungsabhängig [3]. Besonders kritische chemische Elemente bzw. Zusammensetzungen für schweißtechnische Anwendungen sind Nickeloxid, Chrom(VI)-Verbindungen sowie Manganoxid. Chrom und Nickel sind die wichtigsten Legierungsbestandteile der meisten nicht rostenden Stähle, z. B. 1.4301 (18 % Cr, 10 % Ni). Mangan gilt als toxisch und steht im Verdacht, Parkinsonerkrankungen zu verursachen. Mangan findet sich als Desoxidationsmittel in nahezu jedem Schweißzusatzwerkstoff (auch in Baustahl). Nickeloxide und Chrom(VI)-Verbindungen gelten als krebserzeugend.

Der allgemeine Staubgrenzwert für die alveolengängige Fraktion (A) und die einatembare Fraktion (E) beträgt nach TRGS 900 bei MIG/MAG-Verfahren 3 mg/m^3 bzw. 10 mg/m^3 [5]. Die Größenverhältnisse der Stäube sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Für diese Größenfrak-

tionen werden vom Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS) Arbeitsplatzgrenzwerte in Form einer maximal zulässigen Konzentration (angegeben in mg/m^3) festgelegt. Diese Grenzwerte gelten allerdings nicht für erbgutverändernde, krebserzeugende, fibrogene, allergisierende oder sonstige toxische Stäube.

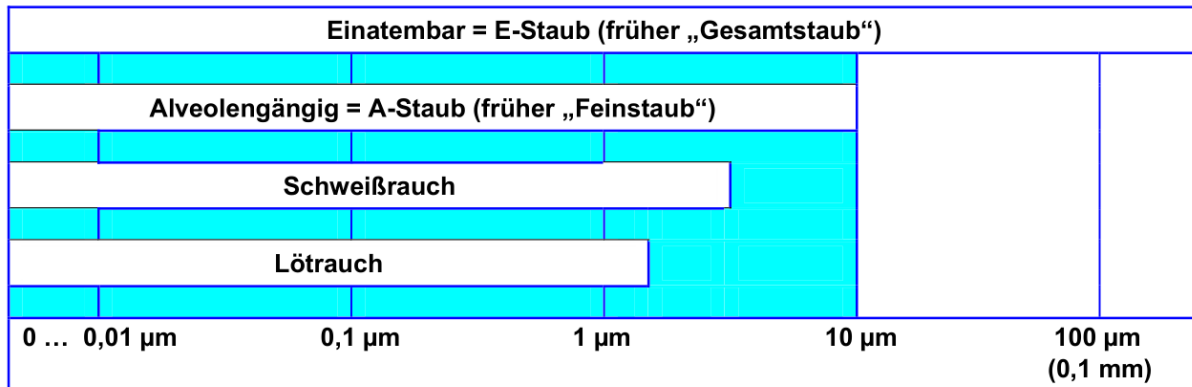


Abbildung 3.2: Einteilung der Partikelgrößen von Stäuben und Rauchen nach [2]

In der Vergangenheit wurden nahezu alle Schweiß- und Schneidprozesse hinsichtlich ihrer Schweißrauchemissivität untersucht und verglichen, z. B. [6] [7] [8] [9]. Die Emissionsmessungen zeigen, dass fast alle Schweiß- und Schneidverfahren die Grenzwerte bzw. die empfohlenen Werte überschreiten [1] [6] [10].

Die Gefährdungsklassen von MSG-Verfahren hinsichtlich der Emissionsraten wurden sowohl für atemwegsbelastende als auch für toxische und krebserzeugende Stoffe durchgängig als hoch (bzw. bei Fülldrähten sogar als sehr hoch) beurteilt. Ultrafeine Partikel sind aufgrund ihrer größeren Oberfläche toxischer als feine Partikel bei gleicher Dosis [11].

In der TRGS 900 [5] werden zwar keine expliziten Grenzwerte für Nickeloxid, Chrom(VI)-Verbindungen und Manganoxide genannt, allerdings soll nach TRGS 528 [2] eine Beurteilung nach Stand der Technik erfolgen. Nach diesem kann beim Schweißen hochlegierter Stähle eine Exposition von Chrom(VI) von $0,02 \text{ mg}/\text{m}^3$ (E) und von Nickeloxid von $0,1 \text{ mg}/\text{m}^3$ (E) erreicht werden. Dies zeigt, wie deutlich die allgemeinen Staubgrenzwerte bei schweißtechnisch relevanten Substanzen in Zukunft unterschritten werden müssen.

Von Racette et al. [12] wurden Untersuchungen zu Parkinsonerkrankung von Berufsschweißern im Vergleich zu zwei Kontrollgruppen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Schweißern die Möglichkeit einer Parkinsonerkrankung etwa 15 Jahre früher besteht als bei den Kontrollpersonen. Bekannt ist, dass Lungenkrebs durch Cr(VI) ausgelöst werden kann, dessen Freisetzung beim Lichtbogenschweißen von CrNi-Stählen bislang nicht verhin-

dert werden kann. 2005 wurden in Deutschland zehn Lungenkrebsfälle als Berufskrankheiten anerkannt, davon waren zwei Betroffene als Schweißer tätig [13]. Im Jahr 2006 waren es neun Lungenkrebsfälle, wovon ebenfalls zwei Schweißer betroffen waren. Die Wirkungsmechanismen werden auf den mutagenen Charakter von Cr(VI) zurückgeführt, die eine Veränderung des Erbgutes sowie eine Schädigung der Reparaturmechanismen der DNA zur Folge haben können. Der Anteil des krebserzeugenden Chrom(VI) [3] am gesamten Chrom im Schweißrauch liegt bei bis zu 90% [14]. Die verbleibenden Chrom-Anteile (meist zweiwertig) sind für die Gesundheit vergleichsweise unbedenklich. Besonders das MIG-Schweißen von CrNi-Legierungen ist aufgrund der hohen Anteile an Chrom und Nickel als sehr kritisch einzustufen. Bei der auch von KMU häufig eingesetzten Legierung 1.4301 sind 18 % Chrom und 10 % Nickel enthalten.

Eine gesonderte Betrachtung der Legierungselemente bezüglich der Emissionen, z. B. in Form der Leitkomponenten, wie sie in [10] vorgeschlagen wird, wird ab einem Legierungsanteil von Chrom von 5 % empfohlen. Eine besondere Gefährdung durch Chrom(VI)-Verbindungen wird dem MAG-Schweißen mit hochlegierten Fülldrähten laut FA-Informationsblatt 036 zugesprochen [15]. Im Allgemeinen stellt aber v. a. die Emission von Nickeloxid beim MSG-Schweißen hochlegierter Stähle ein Problem dar, wohingegen die hohe Emission von Chrom(VI)-Verbindungen v. a. beim E-Handschiessen entsteht.

Beim MSG-Schweißen treten erheblich höhere Oberflächenkonzentrationen als beim Lichtbogenhandschiessen auf [11]. Diese hohen Partikel-Oberflächenkonzentrationen werden für inflammatorische (entzündliche) Prozesse verantwortlich gemacht [11]. Zink als Beschichtung ist ebenfalls als toxisch eingestuft, allerdings sind die erlaubten Grenzwerte an Zinkoxid vergleichsweise hoch. Tabelle 3.1 zeigt eine gekürzte Übersicht der Einordnung in der Schweißtechnik besonders relevanten Gefahrstoffe.

Tabelle 3.1: Einordnung relevanter Schweißrauchbestandteile nach [3]

Art der Belastung	Beispiele
atemwegs- und lungenbelastend	Eisenoxide, Aluminiumoxid
toxisch oder toxisch-irritativ	Fluoride, Manganoxid, Kupferoxid
krebserzeugend	Nickeloxide, Chrom(VI)-Verbindungen

3.2 Messung von Schweißrauchemissionen

Umfangreiche Untersuchungen zu Schweißrauchemissionen wurden in Deutschland v. a. in Aachen [1] [7] [8], Chemnitz [6] und Dresden [16] durchgeführt. International sind Untersu-

chungen aus den USA [17], Portugal [18] und Australien [19] [20] zu nennen. Allerdings konzentrierten sich die bisherigen Arbeiten fast ausnahmslos auf Verfahrensvergleiche bzw. Emissionsmessungen bei variierten Randbedingungen. Die gezielte Entwicklung emissionsarmer Verfahren standen bislang nicht im Fokus der Betrachtungen.

Die Bestimmung der Schweißrauchmenge erfolgt meist nach DIN EN ISO 15011 [21] in einer Rauchkammer (Fume Box), Abbildung 3.3 links. Durch Differenzwägung der Filter vor und nach dem Schweißen wird die Schweißrauchemissionsrate massebasiert bestimmt. Dabei wird entweder der komplette Schweißrauch [22] oder ein Teil des Rauches mit einer oder mehreren Sonden erfasst [6] [23]. Vorteilhaft an der Erfassung des Gesamtrauches ist, dass sich keine Unsicherheiten durch den Ort der Erfassung ergeben, da die Schweißrauchemissionen örtlich sehr stark differieren können.

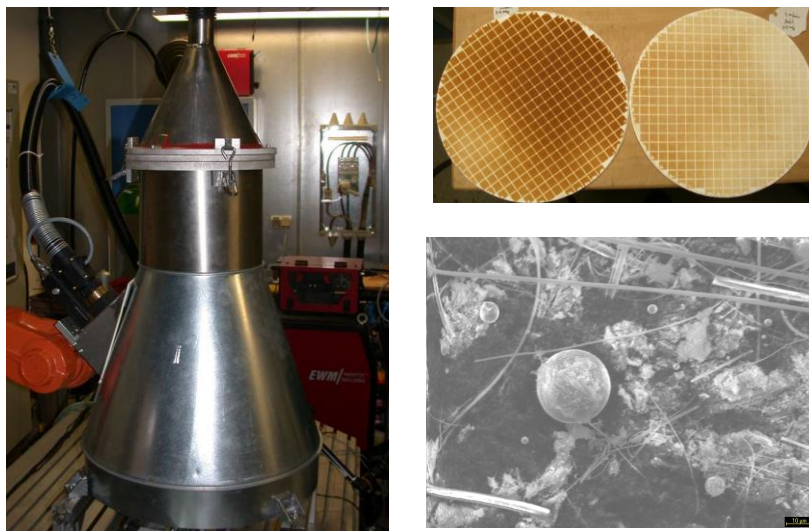


Abbildung 3.3: Schweißrauchkammer der Forschungsstelle TU Dresden nach DIN EN ISO 15011 [22] (links), Filter (rechts oben) und Partikelstruktur (rechts unten)

Durch EDX-Analysen können die Bestandteile auf Targets bestimmt werden [24]. Durch die Herstellung wässriger Lösungen können mittels Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) auch Aussagen zur quantitativen Verteilung der Elemente im Schweißrauch getroffen werden [25]. Ein alternatives Verfahren ist die optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP-OES).

Die massebasierte Schweißrauchemission liegt nach BGI 593 für MSG-Verfahren bei 2 bis 12 mg/s [26]. [7] nennt für MAG-Verfahren mit Massivdraht Emissionsraten zwischen 6 mg/s und 25 mg/s. Andere Quellen nennen Emissionsraten von weniger als 1 mg/s [19] bis 180 mg/s [6]. Die Schweißrauchemission ist zeitlich und örtlich sehr ungleichmäßig, wobei die Ursachen bislang nicht geklärt sind.

3.3 Verringerung von Schweißrauchemissionen

Aus der derzeitigen hohen prozesseitigen Emissivität leitet sich für MSG-Verfahren ein dringender Handlungsbedarf ab. Durch Absaugungen allein werden zukünftige Anforderungen an die maximale Schweißrauchkonzentration in der Luft kaum noch zu erreichen sein, zumal bei chrom- und nickelhaltigen Werkstoffen eine Lufrückführung nicht zulässig ist. Weiterhin widersprechen die bisherigen Ansätze, v. a. mit Absaugungen den Gefährdungen beim MSG-Schweißen zu begegnen, dem Primat des Arbeitsschutzes (STOP-Prinzip: Substitution, Technische, Organisatorische, Persönliche Schutzmaßnahmen). Das STOP-Prinzip sieht für die Reihenfolge einer Gefährdungsbekämpfung vor, zunächst die Entstehung bzw. die Ursachen von Gefährdungen zu beseitigen bzw. zu minimieren. Diesem Prinzip wird in der Schweißtechnik bislang nicht ausreichend entsprochen.

Bisherige Untersuchungen verschiedener MSG-Prozesse zeigen, dass Impulslichtbögen vergleichsweise geringe Schweißrauchemissionen verursachen [6]. Impulslichtbögen werden daher bspw. in der TRGS 528 explizit empfohlen. In der Praxis sind die Einsatzmöglichkeiten von Impulslichtbögen aber insbesondere beim Einsatz im Dünnblechbereich eingeschränkt, da die mittlere Leistung und damit die Wärmeeinbringung ins Bauteil vergleichsweise hoch ist. Neuere Untersuchungen an energiereduzierten Kurzlichtbögen (z. B. EWM coldArc) zeigen, dass mit diesen kurzschlussbehafteten Prozessen Emissionsraten auf dem Niveau von Impulslichtbögen erreicht werden können [6] [8], Abbildung 3.4. Allerdings ist der Einsatzbereich aufgrund der geringeren Abschmelzleistung im Vergleich zu Impuls- und Sprühlichtbogenprozessen auch bei dickeren Blechen aus wirtschaftlichen Gründen begrenzt.

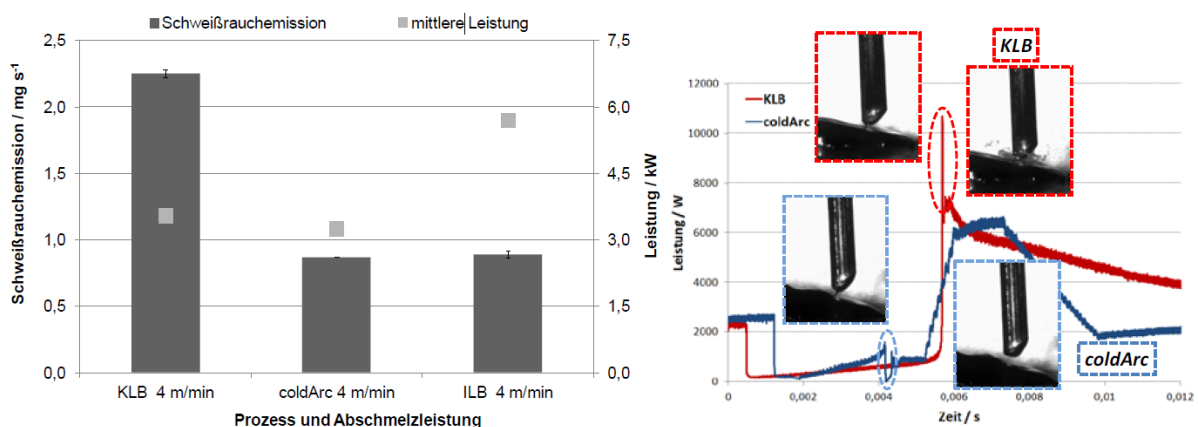


Abbildung 3.4: links: Emissionsvergleich zwischen konventionellem und energiereduziertem Kurzlichtbogen (coldArc) sowie einem Impulslichtbogen, rechts: Leistungen im Moment der Kurzschlussauflösung beim Kurzlichtbogen und coldArc [22]

Weitere wichtige Erkenntnisse ergeben sich aus früheren Untersuchungen zum Einfluss der Prozessstabilität auf die Emissivität. Die Untersuchungen zeigen, dass vor allem instabile MSG-Prozesse zu hohen Schweißrauchemissionen führen [22]. Stabile Schweißprozesse mit geringen Prozessschwankungen emittieren deutlich weniger Schweißrauch [22]. Durch die Stabilisierung von MSG-Prozessen kann folglich auch ein Beitrag zur Emissionsreduzierung geleistet werden. Ein Beispiel hierzu sind Instabilitäten beim MIG-Aluminiumschweißen mit hochmagnesiumhaltigen Zusatzdrähten. Für Stahl ist hier Mangan zu nennen, das eine deutlich geringere Schmelztemperatur und einen höheren Dampfdruck als Eisen ausweist.

Als alternatives Lichtbogenverfahren zu MSG-Verfahren bietet sich das WIG-Verfahren an, welches im Vergleich deutlich emissionsärmer ist. WIG-Verfahren werden bezüglich der Emissionsraten niedrige oder mittlere Gefährdungsklassen zugeordnet [2]. Bezüglich der Exposition von Nickeloxid beim Schweißen hochlegierter Stähle können beispielsweise Werte von 0,01 mg/m³ erreicht werden, was eine Größenordnung unter den von MSG-Verfahren realisierbaren Werten liegt. WIG-Verfahren erreichen allerdings nur vergleichsweise geringe Abschmelzleistungen und können unter wirtschaftlichen Anforderungen in den meisten Fällen nicht mit MSG-Verfahren konkurrieren.

Ein Ansatz für eine Prozessweiterentwicklung ist das WIG-Verfahren mit Heißdraht. Durch den Einsatz von Heißdrahttechnik kann dabei der große Nachteil des WIG-Verfahrens hinsichtlich der begrenzten Abschmelzleistung reduziert werden. Dabei zeigen neue Umsetzungen auch das Potential des Einsatzes im manuellen Bereich [27]. Im Vergleich zum MSG-Schweißen bleibt allerdings zu beachten, dass sich der Energieeintrag und folglich auch die Einbrandverhältnisse des WIG-Heißdrahtschweißens maßgeblich von denen des MSG-Schweißens unterscheiden, sodass insbesondere bei dickeren Blechen keine wirtschaftliche Alternative zu MSG-Verfahren besteht.

Es erscheint sinnvoll und zielführend, die Erkenntnisse aus WIG-Untersuchungen hinsichtlich der realisierbaren lichtbogenlosen Abschmelzleistungen auf MSG-Verfahren zu übertragen und zu überprüfen, da mit dieser Methode eine partielle Trennung von Lichtbogen und Zusatzwerkstoffeinbringung möglich ist und Verdampfungen reduziert werden können. Wissenschaftliche Untersuchungen zum MSG-Schweißen hinsichtlich einer emissionsorientierten (partiellen) Trennung von Lichtbogen und Zusatzwerkstoff sind nicht bekannt. Allerdings spiegelt eine Reihe von Patenten die grundsätzliche Möglichkeit und die Potentiale der Verwendung von Zusatzdraht auch bei MSG-Verfahren wieder. Der Schutz dieser relevanten Patente ist abgelaufen.

Bereits 1962 wurde ein Verfahren zum MSG-Auftragschweißen mit Zusatzdraht von Siemens patentiert [28]. Ziel der Erfindung ist es, einen gleichmäßigen Auftrag zu erreichen und den Einbrand auf weniger als 5 % der Auftraghöhe zu minimieren. Hierzu wurde ein pendelnder Brenner und ein zusätzlicher Kaltdraht vorgeschlagen. Im Patent wird postuliert, dass die Drähte des Lichtbogenprozesses und des Kaltdrahtes bei gleichem Durchmesser gleich abgeschmolzen werden können. Es wird erläutert, dass dünne Drähte aufgrund des größeren Oberflächen-Volumenverhältnisses besser abgeschmolzen werden können.

Speziell zum schnellen Schweißen wurde in Japan 1990 ein MSG-Verfahren patentiert [29]. Der Fokus des Patents liegt auf dem Schweißen von Aluminium, insbesondere um Risse und Poren zu vermeiden. Die Bezeichnung MIG im Patenttitel ist dabei irreführend, da auch Schweißungen von Stahl mit 100 % CO₂ im Patent erläutert werden. Es wird Heißdraht verwendet und der Zusatzdraht wird parallel zum Lichtbogendraht zugeführt. In der Patentschrift wird von deutlich geringeren Schmelzbadtemperaturen berichtet. Im Rahmen des Patents wurde insbesondere die Anordnung der Drähte im Brenner geschützt. Die Autoren beschreiben weiterhin, dass die mechanischen Eigenschaften der Schweißnähte durch den Heißdrahtprozess nicht negativ beeinflusst werden. Ein weiteres Patent zur Verwendung von Heißdraht beim MSG-Schweißen wurde 1973 von Messer Griesheim angemeldet [30]. Dabei geht es ebenfalls um die Erhöhung der Abschmelzleistung und die Reduzierung des Wärmeeintrags ins Bauteil. Anwendung soll die Erfindung vor allem beim Fülllagenschweißen wärmeempfindlicher Werkstoffe finden.

Weitere Untersuchungen zum MSG-Schweißen mit zusätzlichen Drähten beschäftigten sich mit der Stabilisierung von Tandemprozessen durch eine Trennung der beiden Lichtbögen mittels Draht [31]. Eigene stichprobenhafte Vorstudien der Forschungsstelle an Tandemschweißungen mit Zusatzdraht bestätigen diese Ergebnisse [32]. Im Rahmen dieser Vorstudie wurden allerdings keine unterschiedlichen Drahtzusammensetzungen erprobt und keine Emissionsuntersuchungen durchgeführt. Vielversprechende Ansätze bezüglich einer gleichmäßigen Durchmischung bei Einsatz eines MSG-Prozesses mit einem Zusatzdraht unterschiedlicher Zusammensetzung konnten an der TU Dresden im Rahmen der Sächsische Exzellenzinitiative im Spitzentechnologiecluster ECEMP an Aluminium erbracht werden. Dabei wurde festgestellt, dass mit Heißdraht ausreichend Zusatzwerkstoff abgeschmolzen werden kann, um auch höhere Mengen an Legierungselemente ohne Lichtbogen zuzuführen. Hierzu war eine Gleichverteilung der Elemente im Schmelzbad Voraussetzung. Zur Überprüfung der Verteilung wurden EDX-Analysen von Querschliffen aus Schweißproben mit Aluminiumgrundwerkstoff, Aluminiumlichtbogendrahtelektrode und Magnesiumzusatzdraht durchgeführt. Abbildung 3.5 zeigt, dass sich bei passender Parametereinstellung eine nahe-

zu vollständig homogene Durchmischungen von Magnesium und Aluminium einstellt. Die Potentiale hinsichtlich einer Emissionsreduzierung wurden im Rahmen des Projektes nicht verfolgt.

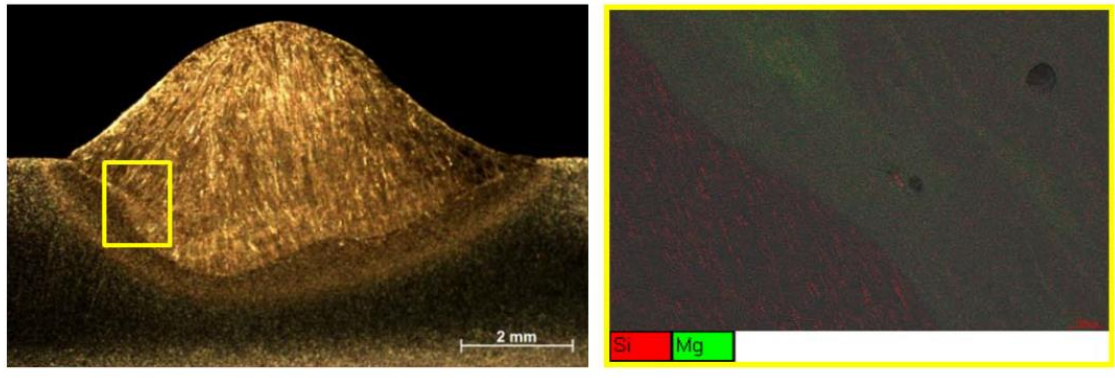


Abbildung 3.5: links: Probe mit magnesiumfreien Aluminiumgrund- und magnesiumhaltigem Zusatzwerkstoff AZ61A (Mg-Anteil ca. 90%), rechts: EDX-Scan mit homogener Verteilung

Bei MSG-Verfahren werden ca. 95 % der Schweißrauche durch die Verdampfung der Drahtelektrode bedingt [2]. Numerische Untersuchungen [33] [34] haben ergeben, dass die Verdampfung der Drahtelektrode weniger durch die konvektive Wärmeeinbringung aus dem „heißeren“ Lichtbogen in die „kältere“ Drahtelektrode sondern vielmehr durch den konzentrierten Lichtbogenansatz an der Drahtelektrode und die daraus resultierende hohe Wärmestromdichte im Fallgebiet bedingt wird. Beim MSG-Spühlichtbogenschweißen (Drahtelektrode: G3Si1, Durchmesser 1,2 mm, mittlere Stromstärke: 350 A, Schutzgas: Argon) ergaben numerische Berechnungen, dass ca. 70 % der Wärmeeinbringung durch Elektronenabsorption, 23 % durch Widerstandserwärmung und nur ca. 5 % durch Konvektion bedingt werden [33]. Folglich werden die hohen Wärmestromdichten an der Drahtelektrode weniger durch den umhüllenden „heißen“ Lichtbogen bedingt, sondern vielmehr durch den Ladungsträgertransfer am Lichtbogenansatz. Die Bilanzierung der Wärmeströme beim MSG-Schweißen verdeutlicht, warum Zusatzkalt- als auch Zusatzheißdrähte ohne Lichtbogenansatz, wie sie z. B. beim WIG-Schweißen eingesetzt werden, deutlich geringere Verdampfungsraten aufweisen auch wenn der Zusatzdraht in den Lichtbogen geführt wird.

Bisher wurden beim MSG-Schweißen gleichartige Zusatzdrähte eingesetzt und die Möglichkeit der Reduzierung von Schweißrauchemissionen nicht betrachtet. Umfassende prozesstechnische und metallurgische Untersuchungen unter dem Blickwinkel einer emissionsseitigen Optimierung eines MSG-Heißdrahtprozesses fehlen.

4 Zielstellung

Ziel des Vorhabens ist die Reduzierung gesundheitsgefährdender Schweißrauchkomponenten beim MSG-Schweißen. Hierzu soll ein emissionsarmer MSG-Heißdrahtschweißprozess entwickelt und an hochlegierten CrNi-Stählen erprobt werden. Ziel ist die signifikante Reduzierung von Schweißrauch und speziell dessen potentiell gefährlicher Bestandteile. Der Prozess bietet weiterhin das Potential, die gesundheitsgefährdenden Substanzen auch als Fülldraht ohne Verdampfungen am Lichtbogenansatz oder im Lichtbogen direkt ins Schmelzbad einzubringen. Die Legierungsbildung erfolgt anschließend im Schmelzbad. Mit dem neuen Verfahren soll außerdem eine hohe Schweißnahtqualität sowie hohe Abschmelzleistungen und Vorschubgeschwindigkeiten erreicht werden.

Im Folgenden werden dazu die Vorteile des MSG-Heißdrahtschweißens gegenüber dem konventionellen MSG-Schweißen hinsichtlich einer absoluten Reduzierung der Schweißrauchentstehung und der Reduzierung gesundheitsgefährdender Schweißrauchkomponenten nachgewiesen. Potentiell gefährliche Legierungselemente wie Chrom und Nickel sollen mittels eines Heißdrahtes mit veränderter Zusammensetzung und nicht über den lichtbogenträgenden Draht eingebracht werden. In Abbildung 4.1 ist der konventionelle MSG-Schweißprozess sowie der zu entwickelnde MSG-Heißdrahtschweißprozess schematisch dargestellt.

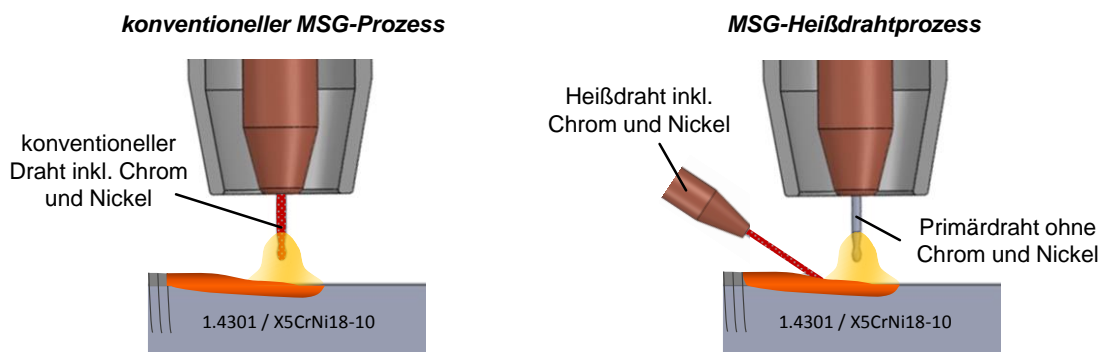


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des MSG-Heißdrahtprozesses (rechts) im Vergleich zum konventionellen MSG-Prozess (links) am Beispiel eines hochlegierten Werkstoffs

Dabei wird die Tatsache ausgenutzt, dass die Schweißrauchentstehung bei MSG-Prozessen weniger von der konvektiven Wärmeeinbringung aus dem Lichtbogen in den Draht, sondern vielmehr durch den konzentrierten Lichtbogenansatz an der Drahtelektrode und den daraus resultierenden hohen Wärmestromdichten im Fallgebiet bedingt wird. Durch den Einsatz der Heißdrahttechnologie kann der Lichtbogenansatz und damit die hohe Wärmestromdichte am

Zusatzdraht vermieden und somit die Metallverdampfung des Zusatzdrahtes verringert werden.

Bei der Verfahrensentwicklung werden alle metallurgischen, prozesstechnischen und emissionsseitigen Anforderungen an den Schweißprozess überprüft. Insbesondere soll eine Orientierungsunabhängigkeit des Verfahrens erreicht werden. Damit soll geprüft werden, inwieweit auch eine Umsetzung für das manuelle Schweißen möglich ist. Im ersten Schritt ist jedoch eine automatisierte Anwendung vorgesehen.

Zur Erfüllung derzeitiger und zukünftiger Anforderungen des Arbeitsschutzes werden zwei primäre Zielstellungen verfolgt:

1. Eine Reduzierung der verfahrensspezifischen Emissionsrate (Schweißrauchmenge).
2. Eine Reduzierung des Gefährdungspotentials von Schweißrauchen hinsichtlich der chemischen Zusammensetzung durch eine gezielte Verringerung der Chrom- und Nickelanteile im Schweißrauch.

Neben den Primärzielen werden folgende Sekundärziele verfolgt:

3. Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit und damit der Produktivität des Schweißprozesses.
4. Erhöhung der Prozessstabilität durch eine Verringerung der Verdampfung.
5. Reduzierung der Verdampfungsverluste teurer Legierungselemente (z. B. Wolframkarbide) durch Auslagerung in einen Zusatzdraht.

5 Methodische Vorgehensweise

Die Bewertung der Eignung des MSG-Zusatzdrahtschweißens zur Reduzierung des Gefährdungspotentials von Schweißrauchen erfolgte in drei Abschnitten. In Abbildung 5.1 ist diese methodische Vorgehensweise veranschaulicht.

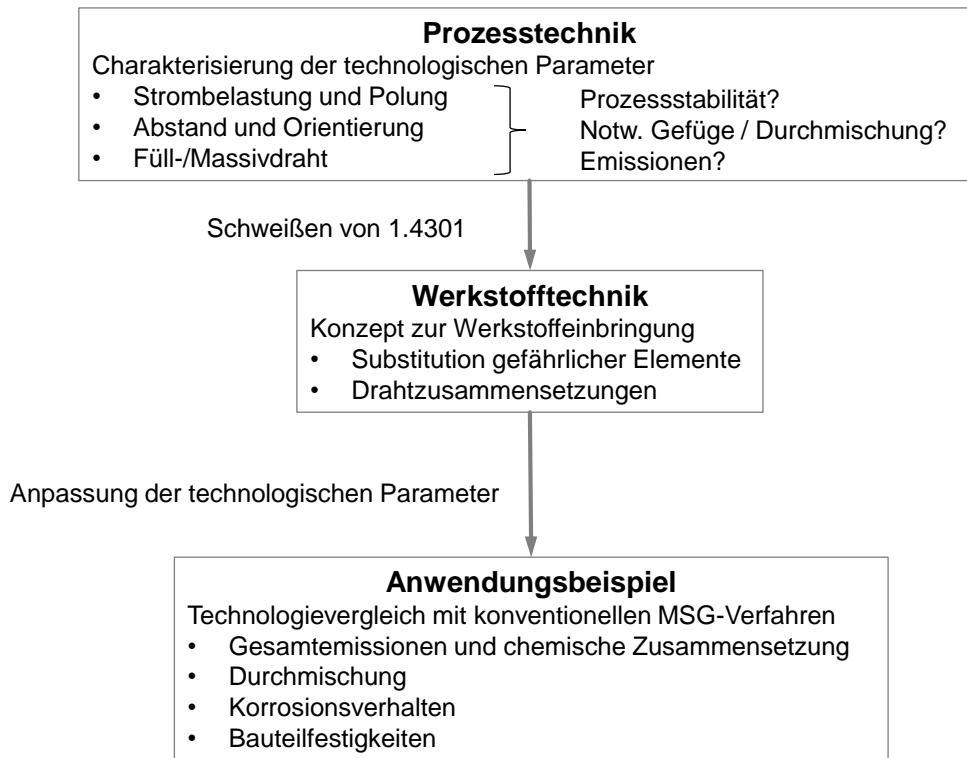


Abbildung 5.1: Methodische Vorgehensweise

Prozesstechnik

Um die Zusatzwerkstoffeinbringung zu untersuchen, wurden die technologischen Parameter des Lichtbogenprozesses und des Heißdrahtes sowie ihre Interaktionen mit dem Schmelzbad systematisch bestimmt. Im Rahmen der Untersuchungen erfolgte zum einen eine Charakterisierung des Einflusses der technologischen Parameter des Zusatzdrahtes auf die Prozessstabilität und die Durchmischung der Elemente im Schweißgut. Ziel der Untersuchung war es, Schweißnähte mit gleichmäßigem und grundwerkstoffähnlichem Gefüge herzustellen. Zum anderen wurde der Einfluss der Prozessparameter auf die Gesamtemission und die chemische Zusammensetzung des Schweißrauches untersucht. In Abbildung 5.2 sind die untersuchten technologischen Parameter sowie die zugrundeliegenden Bewertungsgrößen veranschaulicht.

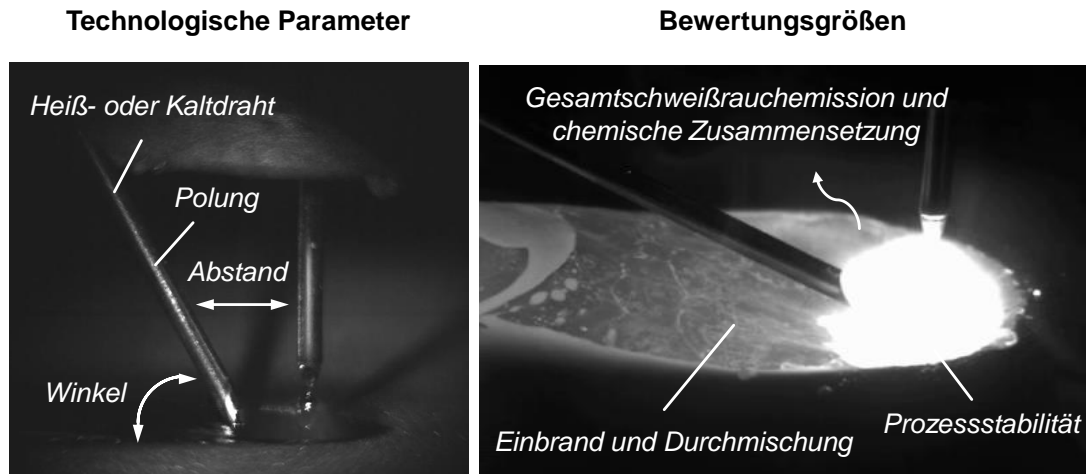


Abbildung 5.2: Untersuchte technologischen Parameter und Bewertungsgrößen

Zur Beurteilung der Schweißrauchemissivität des MSG-Zusatzdrahtprozesses wurde dieser zunächst mit dem konventionellen MSG-Prozess verglichen. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden kommerziell erhältliche Drahtelektroden verwendet – als Drahtelektrode beim konventionellen Prozess (1.4820) und als Primär- (G3Si1) und Sekundärdraht (1.4820) beim MSG-Zusatzdrahtprozess. Im Rahmen der Parameteruntersuchungen wurde als Grundwerkstoff der niedriglegierte Stahl S235JR verwendet, um durch die resultierenden hohen Kontraste die Aussagefähigkeit der Makroschliffe zu verbessern. Mit diesen Untersuchungen wurde die prozessführungsbedingte Emissionsreduzierung (Menge und Zusammensetzung) ohne Anpassung der Drahtzusammensetzung quantifiziert. Die Bewertung der Durchmischung erfolgt auf Grundlage von EDX-Scans, die Charakterisierung der chemischen Zusammensetzung der Schweißrauche durch ICP-OES (optische Emissionsspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma). Letztgenannte Untersuchungen erfolgten bei der akkreditierten SGS Institut Fresenius GmbH in Dresden.

Werkstofftechnik

Im Rahmen des Arbeitspunktes wurden neuartige Konzepte zur Werkstoffeinbringung beim MSG-Schweißen von hochlegierten Stählen entwickelt. Ziel der Untersuchungen war es, alle gesundheitsgefährdenden Elemente aus dem Lichtbogentragenden Draht zu entfernen und mittels Zusatzdraht einzubringen. Die notwendigen (Zusatz-) Drähte wurden eigens für diese Untersuchungen hergestellt. Dafür wurden exemplarische Anpassungen der Zusammensetzungen von Primär- und Sekundärdraht für den austenitischen korrosionsbeständigen Stahl X5CrNi18-10 (Werkstoff-Nr. 1.4301) vorgenommen. Im Rahmen der Untersuchungen wurden exemplarisch die Elemente Nickel und Chrom vom Lichtbogen getrennt eingebracht.

Anwendungsbeispiel

Im Rahmen dieses Arbeitspunktes wurden die zuvor entwickelten Konzepte zur Werkstoffeinbringung an einer praxisnahen Schweißaufgabe überprüft und die damit mögliche Emissionsreduzierung (Menge und Zusammensetzung) und Prozessfähigkeit quantifiziert. Als Fügeaufgabe wurde ein 250 mm langer T-Stoß aus X5CrNi18-10 mit einer Materialstärke von 5 mm und einem Spalt von 1 mm definiert. Das Schweißen erfolgte einseitig und einlagig. Aufgrund der hohen Abschmelzleistungen der MSG-Zusatzdrahtprozesse wurde als Vergleichsgrundlage ein gleiches a -Maß definiert. Aus den Ergebnissen können die Potentiale der einzelnen Prozessänderungen bilanziert und verglichen werden. Hierzu wurden die Durchmischung der Elemente im Schmelzbad, die resultierenden Einbrände und notwendigen Schweißgeschwindigkeiten, die Gefügeausbildungen sowie die entstehenden Schweißrauche und deren Zusammensetzung quantifiziert.

Die entstehenden Schweißrauchemissionen wurden in einer Schweißrauchabsaugkammer nach DIN EN ISO 15011 gesammelt und gewogen sowie mittels ICP-OES hinsichtlich ihrer Zusammensetzung analysiert. Wurde Chrom im Schweißrauch festgestellt, erfolgte ein separater Nachweis von Cr(VI) im Extraktionsverfahren nach Empfehlungen der DIN EN ISO 15011-1 Anhang D. Hierdurch kann festgestellt werden, ob durch die lichtbogenlose Chromeinbringung weniger oder ggf. sogar kein Chrom(VI) im Vergleich zum konventionellen MSG-Prozess entsteht.

Zusätzlich erfolgte eine Bewertung der Verbindungseigenschaften aus metallurgischer und korrosionstechnischer Sicht sowie eine Bewertung der Festigkeiten. Das Korrosionsverhalten wurde durch eine Salzsprühnebelprüfung nach DIN 9227 nach 168 h und 504 h, die Verbindungsfestigkeiten auf Grundlage von DIN 9018 an einem einseitig geschweißten T-Stoß verglichen. Die Ergebnisse sollen den potentiellen Anwendern anschaulich die Möglichkeiten des neuen Prozesses zur Emissionsminderung bei gleichzeitiger Sicherstellung einer hohen Prozessfähigkeit aufzeigen. Neben dem technologischen Nutzen der Ergebnisse erfolgte deshalb auch eine Bewertung der Effizienz und der Produktivität unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten.

Versuchsaufbau

Die Untersuchungen erfolgten an einem Versuchsstand mit einem bewegtem Werkstück und einem stationären Schweißbrenner, welcher in einer Schweißrauchkammer nach DIN EN ISO 15011 positioniert wurde. Im Hinblick auf konstante Versuchsrandbedingungen erfolgte der Einsatz einer gekühlten Kupferplatte als Unterlage. Als Schweißbrenner wurde der wassergekühlte Handbrenner MB 501 D (Abicor Binzel), als Primärstromquelle eine

551 alpha Q (EWM) und als Heißdrahtstromquelle eine tigSpeed continuous drive 45 hotwire (EWM) verwendet. Das Einschalten des Zusatzdrahtantriebes und der Heißdrahtstromquelle erfolgt nach definierter Wartezeit. Bei allen Versuchen wurde der Strom, die Spannung und die Drahtvorschübe zeitaufgelöst überwacht und bei Bedarf mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen überlagert.

6 Ergebnisse

6.1 Einfluss der technologischen Parameter

Im Folgenden wird auf den Einfluss der technologischen Parameter der Zusatzdrahtzuführung auf die Schweißverbindung sowie die chemische Zusammensetzung des emittierten Schweißrauches eingegangen. Als Grundlage für die durchgeführten Untersuchungen dienten die in Tabelle 6.1 dargestellten Referenzparameter.

Tabelle 6.1: Referenzparameter des konventionellen MSG-Prozesses und des Zusatzdraht- Prozesses

	Konventionell	Zusatzdraht	
		Primärdraht	Zusatzdraht
Drahtwerkstoff	1.4820	G3Si1	1.4820
Drahtdurchmesser [mm]	1,2	1,2	1,2
Drahtvorschub [m/min]	10	10	6
Stickout [mm]	15	15	20
Lichtbogenart	ILB	ILB	-
Abstand Zusatzwerkstoff [mm]	-	-	4
Winkel Zusatzwerkstoff [°]	-	-	35
Orientierung Zusatzwerkstoff	-	-	nachlaufend
Strombelastung Heißdraht	-	-	DC EP (100 A)
Schutzgas	M12-ArC-2,5		
Grundwerkstoff	S235		
Schweißgeschwindigkeit [cm/min]	60		

Einfluss der Strombelastung des Zusatzdrahtes

Im Vergleich zum konventionellen MSG-Prozess ergibt sich durch den Zusatzdrahtprozess, sowohl bei Verwendung eines Zusatzkalt- als auch eines Zusatzheißdrahtes, eine signifikante Reduzierung der prozentualen Chrom- als auch Nickelgehalte im Schweißrauch, vgl. Abbildung 6.1. Im Rahmen der Untersuchungen konnten die toxischen bzw. karzinogenen Bestandteile bis zur Nachweisgrenze der Analyseprobe gesenkt werden.

Im Hinblick auf die erreichbare Durchmischung der Legierungselemente im Schmelzbad als auch in Bezug auf die resultierende Einbrandtiefe ergeben sich signifikante Unterschiede in Abhängigkeit der Strombelastung des Zusatzdrahtes. Die Verwendung eines Zusatzkaltdrahtes führt, aufgrund der zusätzlich in das Schmelzbad eingebrachten und nicht erwärmten

Masse, zu einer deutlichen Abnahme der Einbrandtiefe sowie der Durchmischung. Im Hinblick auf das Korrosionsverhalten der resultierenden Schweißverbindung ist die schlechte Durchmischung der Legierungselemente im Schmelzbad als kritisch zu betrachten. Im Vergleich zu einem Zusatzkaltdraht kann durch den Einsatz eines Zusatzheißdrahtes sowohl die Einbrandtiefe gesteigert als auch die Durchmischung im gesamten Nahtbereich signifikant verbessert werden.

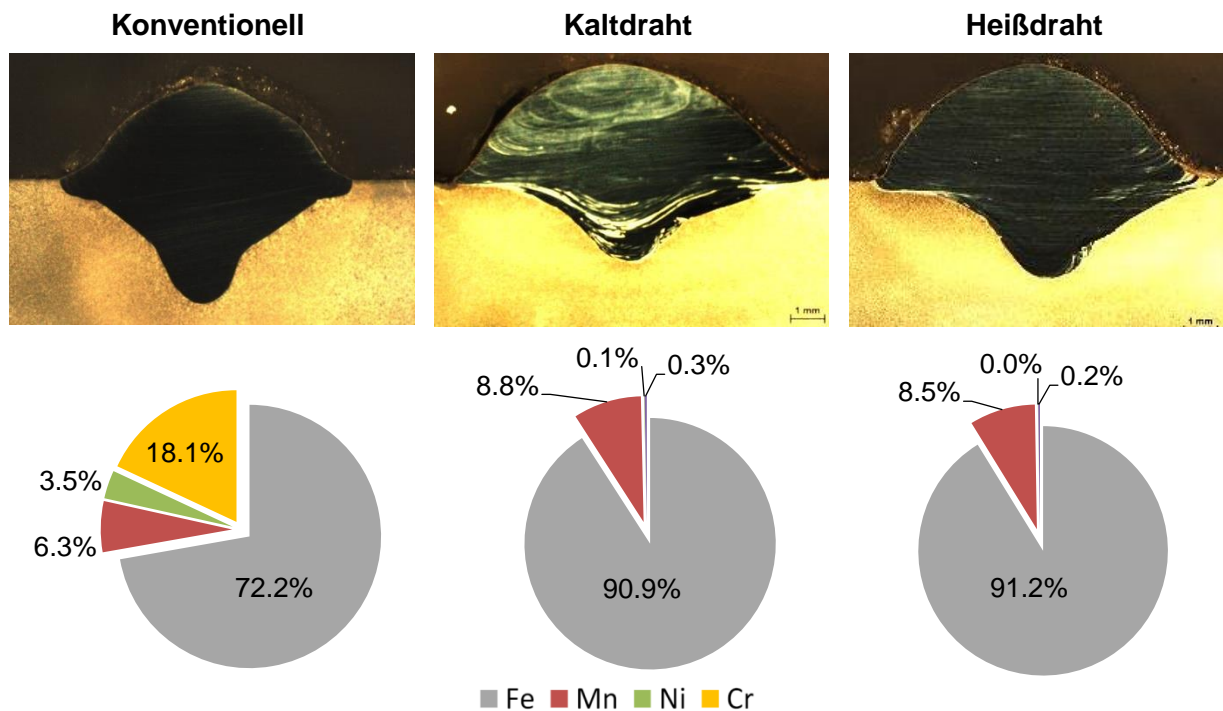


Abbildung 6.1: Durchmischung im Schweißgut und chemische Zusammensetzung des Schweißrauches bei Einsatz eines Zusatzkalt- bzw. Zusatzheißdrahtes im Vergleich zum konventionellen MSG-Prozess (Parameter vgl. Tabelle 6.1)

In Abbildung 6.2 sind die Gewichtsanteile von Chrom im Bereich der Schweißnaht bei Verwendung eines Zusatzkalt- (links) bzw. Zusatzheißdrahtes (rechts) dargestellt. Die Anwendung eines Zusatzkaltdrahtes korreliert mit einer guten Durchmischung im oberen Bereich der Schweißnaht, wobei sich erhebliche Schwankungen des Chromanteils von bis zu 6 % im Bereich der Schweißnahtwurzel ergeben. Als Ursache wird das Aufschmelzen des Zusatzwerkstoffes im unteren Bereich des Schmelzbades gesehen. Durch die Anwendung eines Zusatzheißdrahtes können diese Schwankungen im Gewichtsanteil von Chrom auf max. 1,5 % reduziert werden, was den Schwankungen im Grundwerkstoff entspricht. Ursache ist die zusätzliche ohmsche Vorwärmung des freien Drahtendes, welche zu einem Aufschmelzen des Zusatzwerkstoffes in oberflächennahen Bereichen des Schmelzbades führt. Der eingebrachte Zusatzwerkstoff kann durch die Schmelzbadströmung anschließend gleichmä-

ßiger verteilt werden. Der mittlere Gehalt von Eisen, Chrom, Nickel und Mangan entspricht den analytisch bestimmten Gewichtsanteilen in der Schweißnaht, welche unter Berücksichtigung der drahtspezifischen Abschmelzleistungen, der chemischen Zusammensetzung sowie den Durchmessern beider Drähte bestimmt wurden. Sowohl aus arbeitsschutztechnischer als auch technologischer Sicht wird folglich die Anwendung eines Zusatzheißdrahtes als zielführend erachtet.

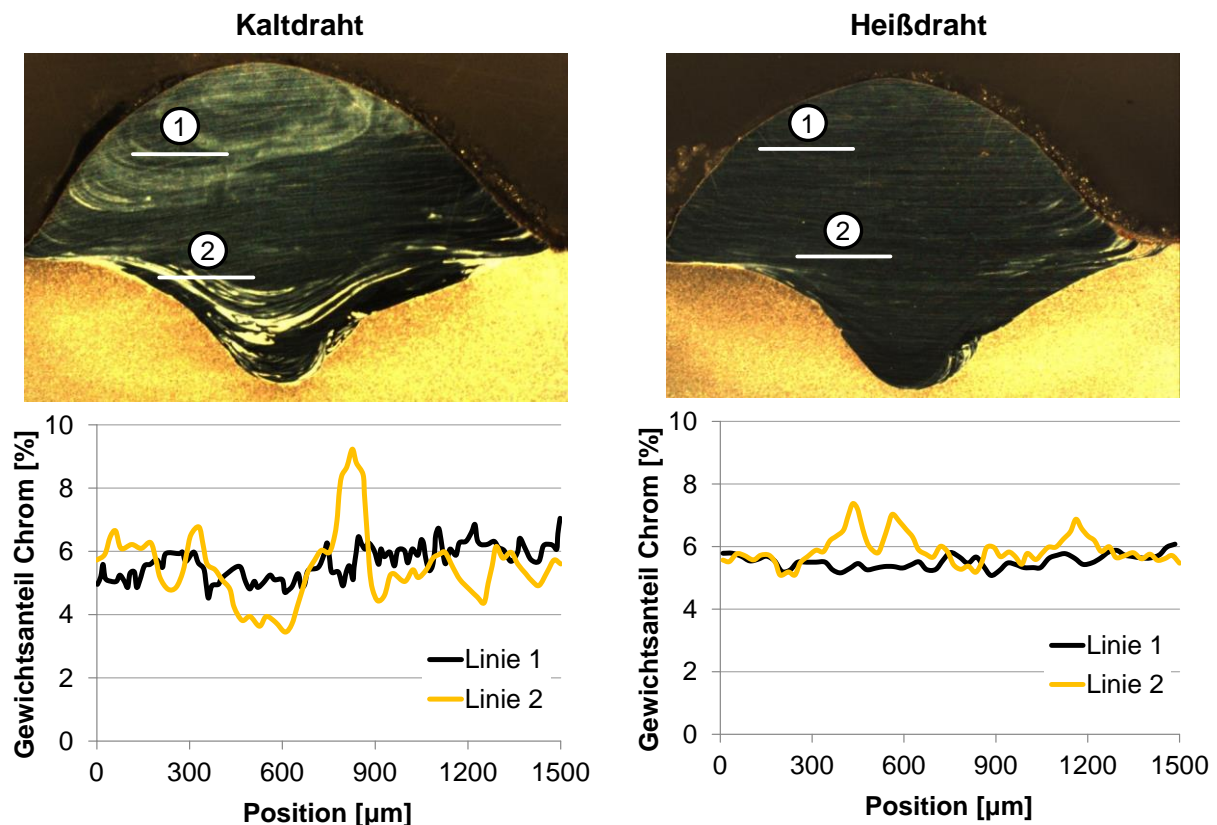


Abbildung 6.2: Prozentuale Gewichtsverteilung von Chrom im Schweißgut bei Verwendung eines Zusatzkalt- (links) bzw. Zusatzheißdrahtes (rechts)

Einfluss der Zusatzheißdrahtpolung

Durch den stromdurchflossenen Heißdraht ergibt sich infolge der magnetischen Wechselwirkungen und der daraus resultierenden Lichtbogenauslenkung eine Prozessbeeinflussung, welche bei der Wahl der Prozessparameter berücksichtigt werden muss. Durch die Polung des Heißdrahtstroms ergibt sich ein entscheidender Einfluss auf den Lichtbogenansatz bzw. die Lichtbogenauslenkung und damit auf die Abschmelzleistung des Zusatzdrahtes sowie die Prozessstabilität, vgl. Abbildung 6.3.

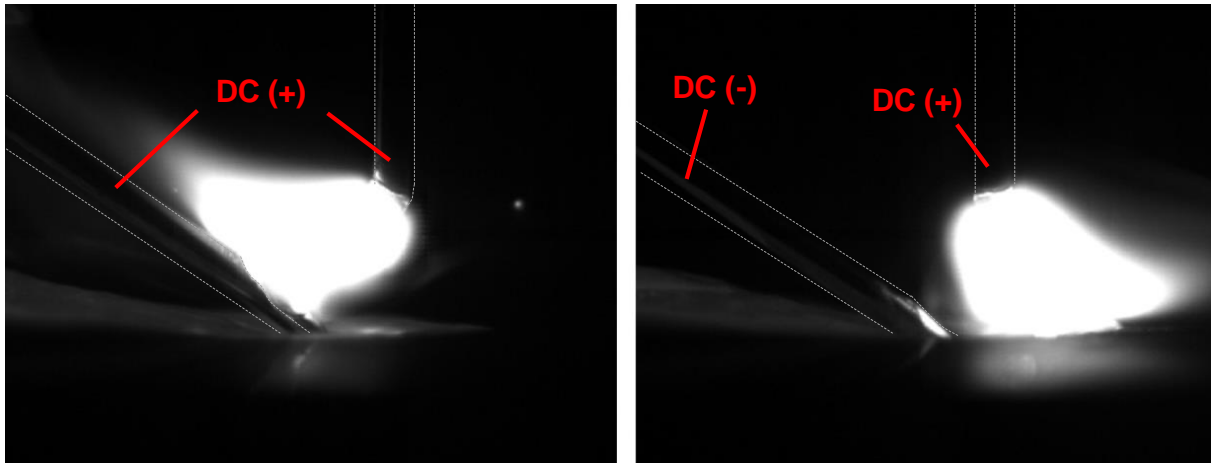


Abbildung 6.3: Einfluss der Polung des Heißdrahtes auf die Auslenkung des Schweißlichtbogens

Aufgrund der resultierenden Magnetfelder führt eine gleiche Polung von lichtbogenführendem und lichtbogenlosem Draht zu einer Auslenkung des Lichtbogens in Richtung des Heißdrahtes, was zu einer erhöhten Wärmeeinbringung und weiterführend zu einer gesteigerten Abschmelzleistung des Zusatzdrahtes führt. Durch die erhöhte Wärmeeinbringung in den Zusatzdraht entstehen Kontaktverluste zwischen dem Heißdraht und der Schmelze, was die Prozessstabilität signifikant reduziert. Zur Steigerung der Prozessstabilität ist einer erhöhten Abschmelzleistung durch einen erhöhten Drahtvorschub des Zusatzdrahtes zu begegnen.

Eine gegensätzliche Polung von lichtbogenführendem und lichtbogenlosem Draht führt zu einer Auslenkung des Lichtbogens entgegen dem Zusatzheißdraht. Aufgrund der geringeren Wärmeeinbringung in den Zusatzheißdraht ergibt sich eine marginale Verringerung der Abschmelzleistung des Zusatzheißdrahtes bei signifikant verbesserter Prozessstabilität (keine Kontaktverluste).

Als vorteilhaft hat sich die Verwendung eines AC-Prozesses mit einer 30 % positiven Halbwelle herausgestellt. Durch eine Wechselstrombelastung des Zusatzheißdrahtes können die Vorteile der erhöhten Abschmelzleistung durch den in Richtung des Zusatzdrahtes ausgelenkten Lichtbogen mit der erhöhten Prozessstabilität durch den entgegengesetzt ausgelenkten Lichtbogen kombiniert werden.

Der Einfluss der Polung des Zusatzheißdrahtes auf die Gesamtverdampfung ist trotz der bei gleicher Polung von lichtbogenlosen und lichtbogenführenden Draht erhöhten Wärmeeinbringung vom Lichtbogen in den Zusatzdraht vernachlässigbar klein. Gegenüber dem konventionellen MSG-Prozess kann durch die Verwendung eines Zusatzheißdrahtes die Ge-

samtverdampfung um ca. 10 % (ILB) bzw. ca. 25 % (SLB) verringert werden. Der Sachverhalt ist in Abbildung 6.4 veranschaulicht.

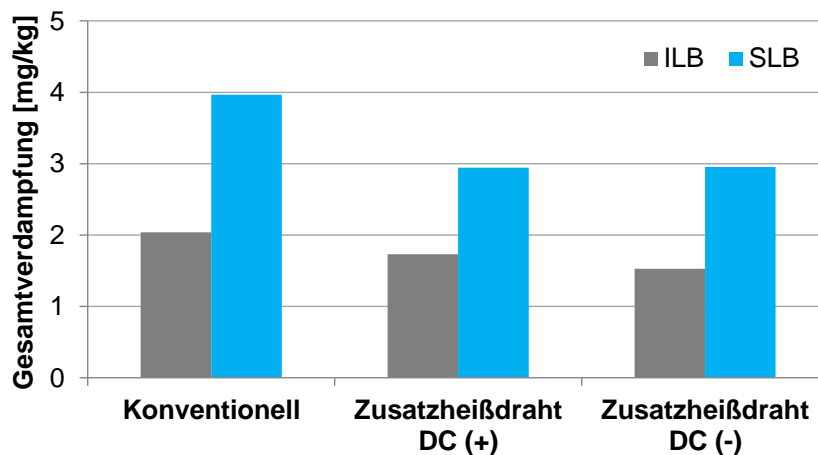


Abbildung 6.4: Gesamtemission eines konventionellen MSG-Prozesses und eines Zusatzheizdrahtprozesse mit gleicher sowie unterschiedlicher Polung vom lichtbogenführenden und lichtbogenlosen Draht für einen Impuls- und einen Sprühlichtbogen

Die Vorteile der Zusatzdrahtprozesse sind sowohl beim Impuls- als auch beim Sprühlichtbogen ersichtlich, wobei die chemische Zusammensetzung des Schweißrauches näherungsweise unabhängig von der Polung des Zusatzheizdrahtes als auch von der Art des Lichtbogens ist, vgl. Abbildung 6.5.

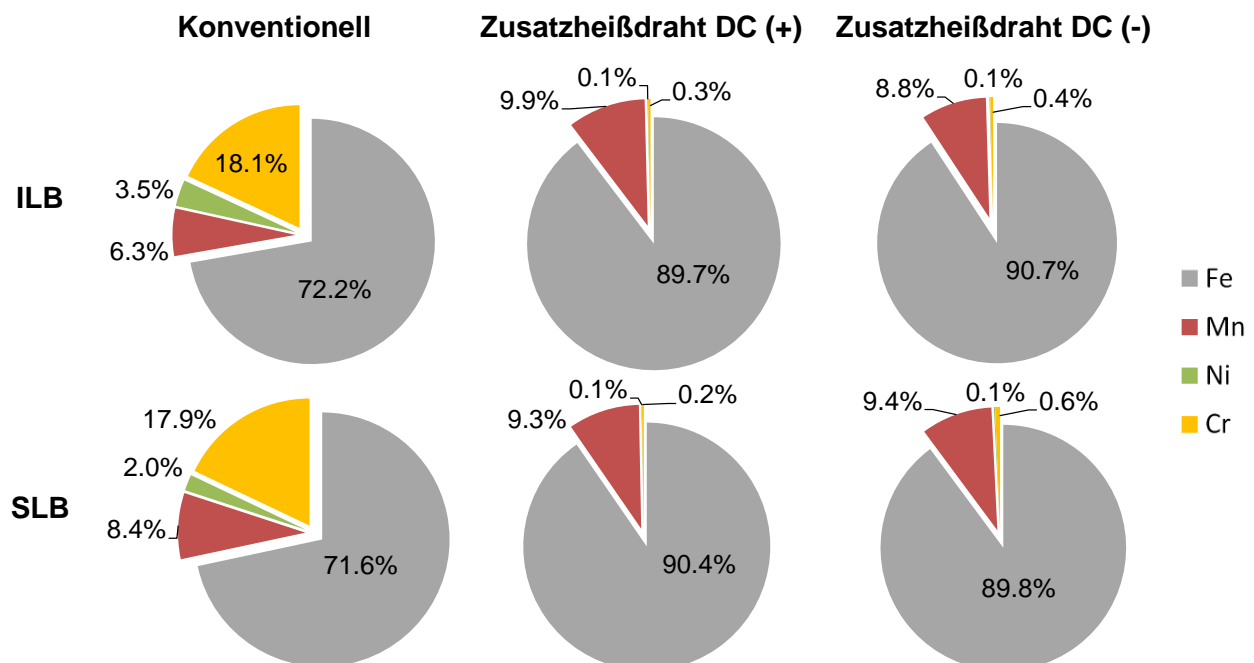


Abbildung 6.5: Zusammensetzung des Schweißrauches eines konventionellen MSG-Prozesses und eines Zusatzheizdrahtprozesse mit gleicher sowie unterschiedlicher Polung vom lichtbogenführenden und lichtbogenlosen Draht

Einfluss des Zusatzdrahtabstandes zur Lichtbogenachse und des Zuführungswinkels

Die durchgeführten Untersuchungen zum Einfluss des Abstandes zwischen der Lichtbogenachse und dem Zusatzdraht sowie dessen Zuführungswinkel erfolgten zuerst mit einem Zusatzkaltdraht, um zum einen die Lichtbogeninteraktion infolge der beschriebenen magnetischen Wechselwirkungen auszuschließen und zum anderen die Sensitivität auf die Durchmischung und Legierungsbildung im Schmelzbad zu erhöhen.

Der Abstand des Zusatzdrahtes zur Lichtbogenachse hat einen signifikanten Einfluss auf die Durchmischung der Legierungselemente im Schmelzbad, vgl. Abbildung 6.6. Bei einem Abstand von 0 mm zwischen der Lichtbogenachse und dem Zusatzkaltdraht kann eine sehr gute Durchmischung der Legierungsbestandteile im Schmelzbad erreicht werden. Mit zunehmendem Abstand des Zusatzdrahtes von der Lichtbogenachse nimmt die Durchmischung im Schmelzbad ab. Durch den Einsatz eines Zusatzheißdrahtes kann diese Abstandssensitivität deutlich verringert und damit die Prozessfähigkeit wesentlich gesteigert werden. So kann auch bei Verwendung eines Abstandes von 4 mm noch eine sehr gute Durchmischung erreicht werden, vgl. Abbildung 6.1 rechts oben. Hinsichtlich der Orientierungsunabhängigkeit sollte jedoch ein geringer Abstand zur Lichtbogenachse angestrebt werden. Dabei kann die Tatsache ausgenutzt werden, dass der Einfluss des Zusatzdrahtabstandes auf die chemische Zusammensetzung des Schweißrauches vernachlässigbar klein ist, vgl. Abbildung 6.1 rechts.

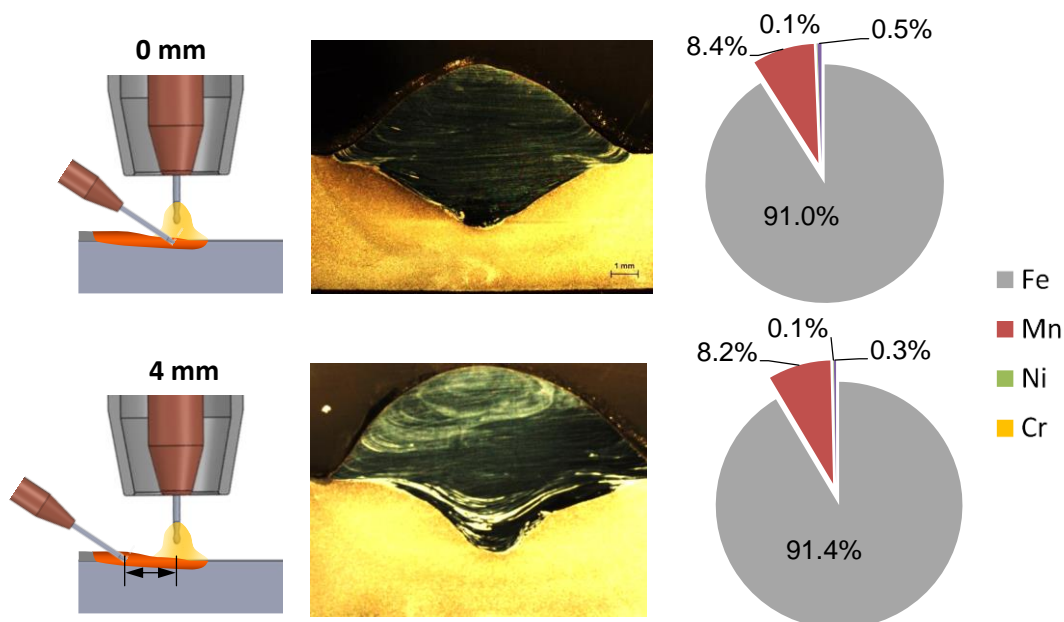


Abbildung 6.6: Darstellung der Zuführung (links), Durchmischung im Schweißgut (mittig) und chemische Zusammensetzung des Schweißrauches (rechts) in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Zusatzdraht und Lichtbogenachse am Beispiel eines Kaltdrahtprozesses

Der Einfluss des Zuführungswinkels (gemessen zwischen der Lichtbogenachse und der Achse des Zusatzdrahtes) wurde mit 35° und 50° untersucht und hat keinen wesentlichen Einfluss sowohl auf den Einbrand, die Nahtgeometrie und die Durchmischung als auch auf die Gesamtemission und Zusammensetzung des Schweißrauches. Der einzige Vorteil bei einer flachen Drahtzuführung besteht in einer höheren Prozessstabilität, da durch höhere Verweilzeiten des Zusatzdrahtes im Schmelzbad der Draht besser aufgeschmolzen wird und eventuelle Variationen in der Drahtvorschubgeschwindigkeit besser ausgeglichen werden können. Als wesentlicher Nachteil ergibt sich eine verschlechterte Zugänglichkeit des Brenners.

Zusammenfassung der Einflussparameter und Übertragung der Erkenntnisse auf eine Schweißverbindungen eines 1.4301

Durch die Verwendung eines Zusatzdrahtprozesses können die prozentualen Anteile von Chrom und Nickel im Schweißrauch signifikant reduziert werden, was zu einer entscheidenden Reduzierung des Gefährdungspotentials des entstehenden Schweißrauches führt. Die chemische Zusammensetzung des entstehenden Schweißrauches ist unabhängig von den untersuchten Einflussparametern. Im Hinblick auf die Abschmelzleistung, die Prozessstabilität sowie die Durchmischung der Legierungselemente im Schmelzbad ist der Einsatz eines Zusatzheizdrahtes (AC-Modus) mit einem Abstand von 0 mm zur Lichtbogenachse zu empfehlen. Durch eine Wechselstrombelastung des Zusatzheizdrahtes können die Vorteile einer erhöhten Abschmelzleistung (gleiche Polung beider Drähte) und einer erhöhten Prozessstabilität (gegensätzliche Polung beider Drähte) miteinander kombiniert werden.

Die beschriebenen Zusammenhänge und Einflussfaktoren beim MSG-Zusatzheizdrahtschweißen sind auf hochlegierte Grundwerkstoffe direkt übertragbar. Abbildung 6.7 veranschaulicht eine Blind- (links) und eine Verbindungsschweißung (rechts) mit einem Grundwerkstoff aus 1.4301. Durch die Anwendung der beschriebenen Heizdrahttechnologie ist auch bei vollständiger Auslagerung der toxischen und karzinogenen Elemente Chrom und Nickel in den Zusatzdraht eine sehr gute Durchmischung der Legierungselemente im Schmelzbad erzielbar. Die prozentualen Anteile der Legierungselemente entsprechen, unter Berücksichtigung der Drahtdurchmesser, der Drahtvorschübe und der chemischen Zusammensetzung der Zusatzdrahtwerkstoffe, den analytisch bestimmten Werten.

Für eine grundwerkstoffgleiche chemische Zusammensetzung der Schweißnaht ist eine Anpassung der chemischen Zusammensetzung der Drähte und eine Überarbeitung des Konzeptes der Werkstoffeinbringung zwingend erforderlich. Auf diesen Sachverhalt wird im folgenden Abschnitt eingegangen.

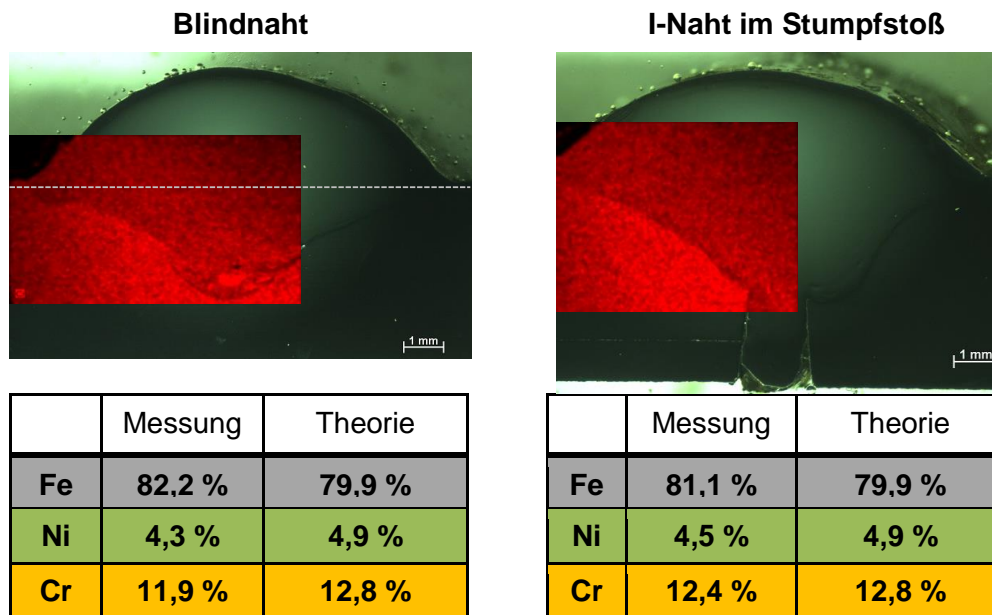


Abbildung 6.7: Vergleich der gemessenen und theoretisch bestimmten prozentualen Anteile an Eisen, Nickel um Chrom beim Fügen von 1.4301 für eine Blindnaht (links) sowie eine I-Naht im Stumpfstoß – Lichtbogentragende Elektrode: G3Si1; Zusatzdraht: 1.4820

6.2 Konzepte zur Werkstoffeinbringung am Beispiel eines 1.4301

Zum Erreichen einer grundwerkstoffgleichen chemischen Zusammensetzung der Schweißnaht ist ein exaktes Abschmelzverhältnis zwischen dem lichtbogenlosen und lichtbogentragenden Draht notwendig. Da die chemische Zusammensetzung des Schweißrauches lediglich durch die Zusammensetzung des lichtbogentragenden Drahtes bestimmt wird, wird für den MSG-Prozess ein zum Schweißen von niedriglegierten Werkstoffen standardmäßig eingesetzter G3Si1-Draht verwendet (Hauptbestandteile: 97,5 % Eisen und 1,5 % Mangan). Für eine grundwerkstoffgleiche Zusammensetzung der Naht ist folglich ein Zusatzdraht sowohl mit einem hohen Chrom- und Nickelgehalt als auch mit einem richtigen Massenverhältnis beider Elemente notwendig.

Das Abschmelzverhältnis zwischen dem lichtbogenlosen und dem lichtbogenführenden Draht ist, bei gleichem Durchmesser beider Zusatzwerkstoffe, abhängig von der Zusammensetzung des Zusatzheißdrahtes. Geringe Anteile an Chrom- und Nickel im Zusatzheißdraht bedingen ein hohes, hohe Anteile dagegen ein geringes Abschmelzverhältnis zwischen lichtbogenlosem und lichtbogenführendem Draht, vgl. Abbildung 6.8.

Das maximal anwendbare Abschmelzverhältnis wird bestimmt durch die Prozessstabilität. Bei einem zu hohen Drahtvorschub des lichtbogenlosen Drahtes kann, aufgrund der be-

grenzten Stromstärken von kommerziell verfügbaren Heißdrahtstromquellen, der Zusatzdraht nicht vollständig aufgeschmolzen werden. Es resultiert ein Stocken des Zusatzdrahtes am Nahtgrund und weiterführend Prozessinstabilitäten. Das minimal anwendbare Abschmelzverhältnis wird bestimmt durch die Verfügbarkeit von Zusatzwerkstoffen mit entsprechend hohen Gehalten an Chrom und Nickel.

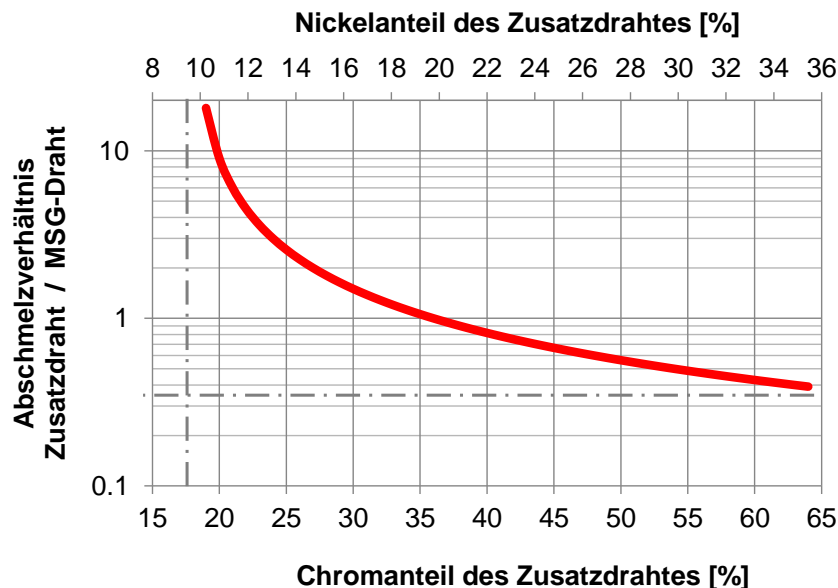


Abbildung 6.8: Analytisch bestimmtes Abschmelzverhältnis zwischen Zusatzdraht und lichtbogenführendem Draht in Abhängigkeit der Chrom- und Nickelanteile im Zusatzdraht zur Erzeugung einer grundwerkstoffgleichen Zusammensetzung eines 1.4301

Bei Verwendung eines Zusatzdrahtes aus 1.4820 kann eine grundwerkstoffgleiche Zusammensetzung der Schweißnaht mit der eingesetzten Gerätetechnik nicht erreicht werden, da das notwendige Abschmelzverhältnis zwischen lichtbogenlosem und lichtbogentragendem Draht zu hoch ist, vgl. Abbildung 6.9. Eine Anpassung der chemischen Zusammensetzung des Zusatzwerkstoffes ist daher zwingend erforderlich. Die theoretische chemische Zusammensetzung der Schmelze kann wie folgt berechnet werden:

$$X_{n,Schmelze} = \frac{\sum X_{i,n} v_i d_i^2}{\sum v_i d_i^2} \quad (6.2.1)$$

In Gleichung (6.2.1) bezeichnet $X_{n,Schmelze}$ den Massenanteil eines chemischen Elementes n in der Schmelze, $X_{i,n}$ den Massenanteil dieses chemischen Elementes im Draht i , v_i die Drahtvorschubgeschwindigkeit und d_i den Durchmesser des Drahtes i .

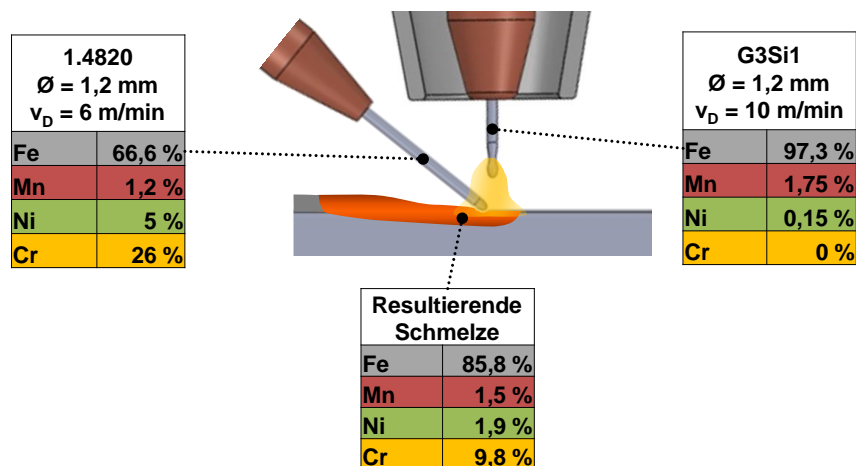


Abbildung 6.9: Prozentuale Anteile der Hauptbestandteile des lichtbogenführenden (G3Si1) und des lichtbogenlosen Drahtes (1.4820) sowie die theoretische Elementverteilung im resultierenden Schmelzbad

Das für die Realisierung einer grundwerkstoffgleichen chemischen Zusammensetzung der Schweißnaht notwendige Verhältnis zwischen Chrom und Nickel ist bei derzeitig kommerziell verfügbaren Massivdrahtelektroden nicht erhältlich. Abbildung 6.10 veranschaulicht eine zielführende Zusammensetzung des Zusatzheißdrahtes und die notwendigen Drahtvorschübe.

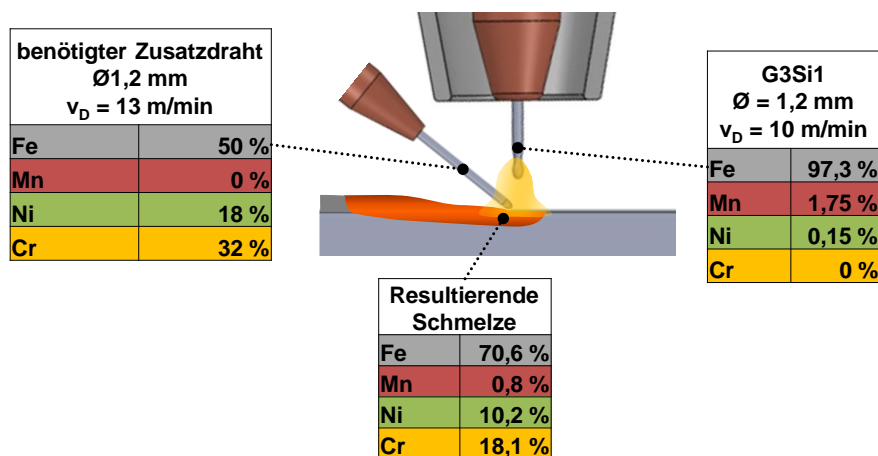


Abbildung 6.10: Chemische Zusammensetzung des benötigten Zusatzdrahtes für das MSG-Zusatzdrahtschweißen

Die notwendige chemische Zusammensetzung des Grundwerkstoffs kann durch die Konzipierung eines neuen Fülldrahtes nach Abbildung 6.11 erreicht werden. Auf Grundlage des konzipierten und eigens dafür hergestellten **Fülldrahtes** konnte das notwendige Abschmelzverhältnis auf 1,4:1 (Verhältnis der Masseinbringung zwischen Zusatzdraht und lichtbogentragendem MSG-Draht) reduziert werden, was eine praxisnahe Umsetzung mit einer kom-

merziell verfügbaren Gerätetechnik erlaubt. Im Hinblick auf die manuelle Anwendbarkeit des Prozesses ergeben sich ähnliche Anforderungen an den Schweißer wie bei vergleichbaren Zusatzdrahtprozessen mit einer nichtabschmelzenden Elektrode.

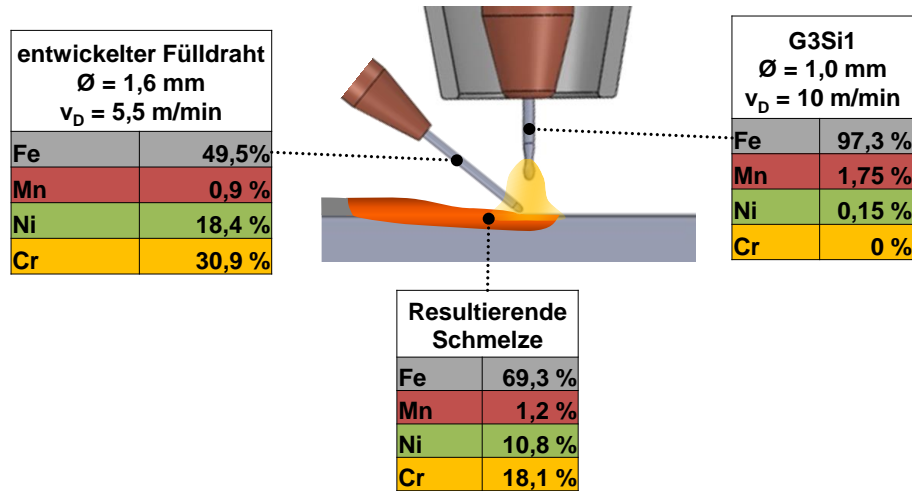


Abbildung 6.11: MSG-Zusatzfülldrahtschweißen - Zusammensetzung des lichtbogenführenden Drahtes, des entwickelten Fülldrahtes und der resultierenden Schmelze

Abbildung 6.12 veranschaulicht die Chrom- und Nickelverteilung in den Nahtflanken anhand von zwei EDX-Scans. Durch die Anwendung des Zusatzfülldrahtprozesses kann eine sehr gute Durchmischung der in den Zusatzdraht ausgelagerten toxischen und karzinogenen Elemente erreicht werden, was im Hinblick auf die Korrosionsbeständigkeit von zentraler Bedeutung ist.

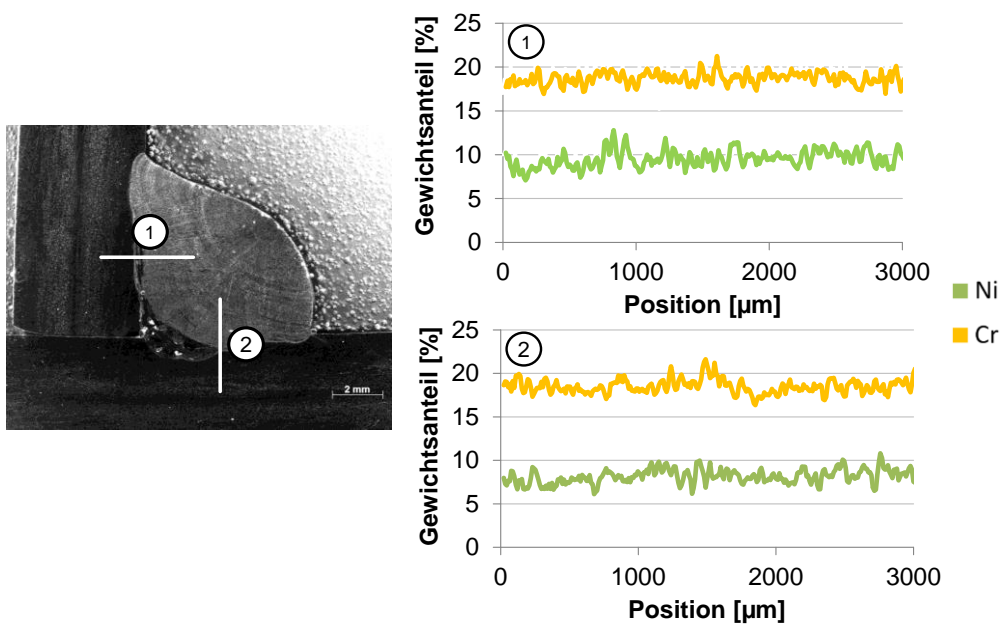


Abbildung 6.12: Verteilung von Chrom und Nickel in der Schweißnaht bei Verwendung des entwickelten Fülldrahtes

Neben der Verwendung eines speziell für diese Anwendung hergestellten Zusatzfülldrahtes, kann eine grundwerkstoffgleiche chemische Zusammensetzung der Schweißnaht auch durch die Verwendung von **zwei handelsüblichen Zusatzmassivdrähten** erreicht werden, vgl. Abbildung 6.13. Als maßgeblicher Vorteil ergibt sich eine Anwendung von kommerziell verfügbaren Zusatzwerkstoffen - einem hochchromhaltigen (1.4337) und einem hochnickelhaltigen Zusatzmassivdraht (1.4889). Die Legierungsbildung erfolgt durch Anpassung aller drei Drahtvorschübe. Unter Berücksichtigung eines Drahtdurchmessers von 1,2 mm für beide Zusatzdrähte kann das Gesamtabschmelzverhältnis auf 1,4:1 reduziert werden. Als maßgeblicher Nachteil muss die zwangsweise notwendige Automatisierung des Zusatzmassivdrahtprozesses genannt werden, da zwei Zusatzdrähte beim Handschweißen nicht beherrschbar sind.

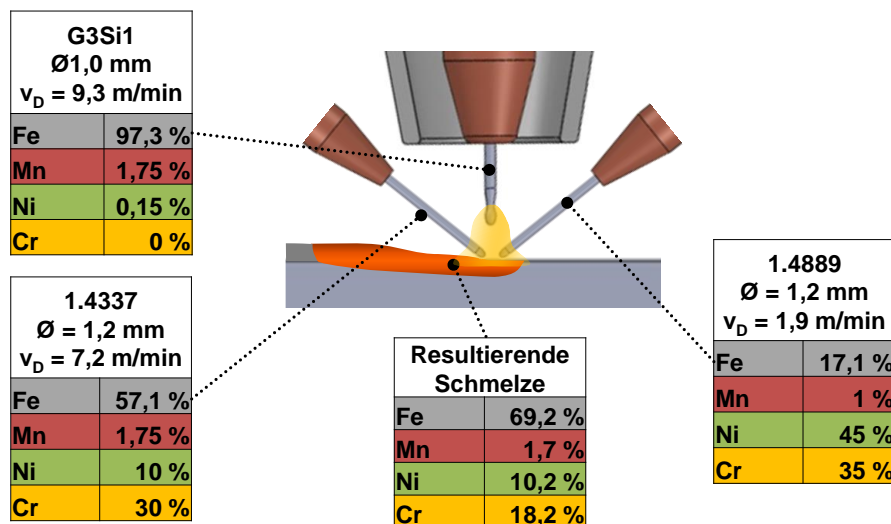


Abbildung 6.13: MSG-Zusatzmassivdrahtschiessen - Zusammensetzung des lichtbogenführenden Drahtes, der lichtbogenlosen Zusatzdrähte und der resultierenden Schmelze

Als Alternative zu den diskutierten Konzepten ist die Verwendung eines **Sinterbandes** möglich. Im Gegensatz zum Fülldraht wird hierbei kein metallischer Mantel benötigt. Die chemische Zusammensetzung des Zusatzwerkstoffes kann frei eingestellt werden, was sehr geringe Abschmelzverhältnisse ermöglicht. Als maßgeblicher Nachteil ergibt sich eine stark individuell angepasste Gerätetechnik sowie die Verwendung von nicht kommerziell verfügbaren Zusatzwerkstoffen. Aus den genannten Gründen wurde das Sinterbandkonzept im Rahmen des Projektes nicht weiter verfolgt. Abbildung 6.14 veranschaulicht eine theoretisch bestimmte Zusammensetzung des Bandes zum Fügen eines 1.4301 sowie die notwendigen Vorschübe des lichtbogentragenden Drahtes und des Sinterbandes.

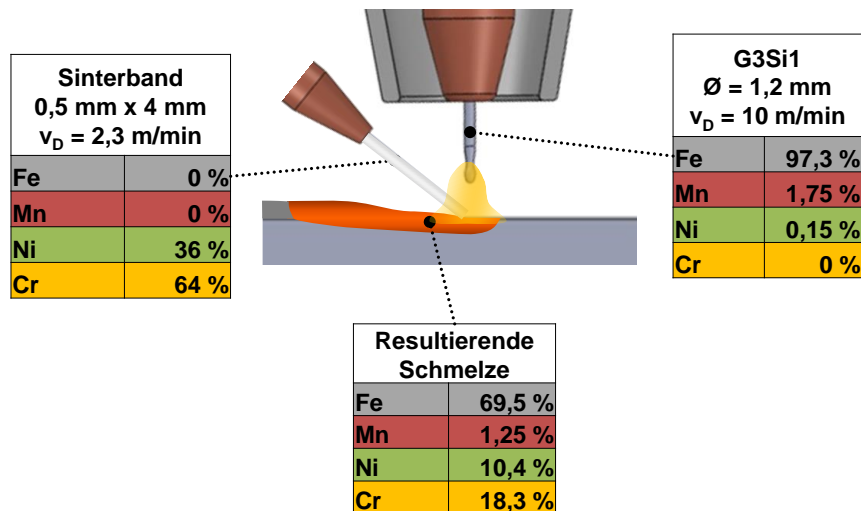


Abbildung 6.14: MSG-Zusatzsinterbandschweißen - Zusammensetzung des lichtbogenführenden Drahtes, des lichtbogenlosen Sinterbandes und der resultierenden Schmelze

6.3 Anwendungsbeispiel und Prozessvergleich

Im Folgenden werden die zuvor diskutierten Konzepte zur Werkstoffeinbringung an einem praxisrelevanten T-Stoß aus 1.4301 mit einem konventionellen MSG-Prozess sowohl hinsichtlich des Gefährdungspotentials der entstehenden Schweißrauche pro Bauteilschweißung als auch hinsichtlich der Eigenschaften der resultierenden Schweißverbindung verglichen. Bewertungsgrundlage bildete eine gleichbleibende Schweißaufgabe für alle drei Prozessvarianten (konstantes a -Maß), wobei die Schweiß- und Drahtvorschubgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der prozessspezifischen Abschmelzleistungen angepasst wurden. Die verwendeten Prozessparameter sind in Tabelle 6.2, Tabelle 6.3 und Tabelle 6.4 dargestellt. Als Schutzgas wurde für alle Versuche M12-ArC-2,5 verwendet.

Tabelle 6.2: Angaben zum konventionellen MSG-Schweißprozess

Drahtwerkstoff	1.4316
Drahtdurchmesser	1,2 mm
Drahtvorschub	9 m/min
Stickout	15 mm
mittlere Stromstärke	300 A
Schweißgeschwindigkeit	0,36 m/min
Schweißzeit	39 s

Tabelle 6.3: Angaben zum Zusatzfülldrahtprozess

	Primärdraht	Zusatzfülldraht
Drahtwerkstoff	G3Si1	Corodur 32-18
Drahtdurchmesser	1,0 mm	1,6 mm
Drahtvorschub	10 m/min	5,5 m/min
Stickout	10 mm	20 mm
mittlere Stromstärke	290 A	200 A (AC Bal 30)
Schweißgeschwindigkeit	0,6 m/min	
Schweißzeit	23,5 s	

Tabelle 6.4: Angaben zum Zusatzmassivdrahtprozess

	Primärdraht	Zusatzmassivdraht 1	Zusatzmassivdraht 2
Drahtwerkstoff	G3Si1	1.4337	1.4889
Drahtdurchmesser	1,0 mm	1,2 mm	1,2 mm
Drahtvorschub	10 m/min	7,2 m/min	1,9 m/min
Stickout	10 mm	20 mm	20 mm
mittlere Stromstärke	290 A	120 A (AC Bal 30)	-
Schweißgeschwindigkeit	0,6 m/min		
Schweißzeit	23,5 s		

Schweißrauchemissionen

Abbildung 6.15 veranschaulicht die Gesamtemissionen pro Bauteilschweißung für beide Zusatzdrahtkonzepte im Vergleich zu einem konventionellen MSG-Prozess.

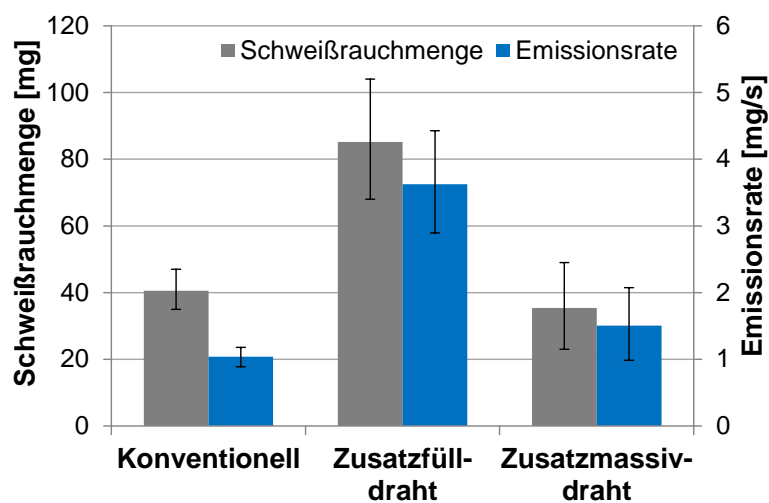


Abbildung 6.15: Emittierte Gesamtschweißrauchmenge sowie zugehörige Emissionsrate der untersuchten MSG-Prozesse

Die Anwendung des Zusatzfülldrahtkonzeptes bedingt eine doppelt so hohe Gesamtemission als auch eine Vervielfachung der Emissionsraten gegenüber dem konventioneller MSG-Prozess. Als Ursache für die stark erhöhte Schweißrauchmenge wird das nicht gänzlich vermeidbare Aufschmelzen der Fülldrahtumhüllung durch den Lichtbogen gesehen. Die freiwerdenden Fülldrahtbestandteile / das Fülldrahtpulver wird durch den Lichtbogen erwärmt, durch den Lichtbogendruck aus dem Prozessbereich herausgeblasen und an der umgebenden Atmosphäre oxidiert. Der beschriebene Zusammenhang lässt sich visuell durch einen Funkenflug beobachten, vgl. Abbildung 6.16. Für eine Reduzierung des Gefährdungspotentials von MSG-Schweißprozessen ist folglich die Anwendung eines Zusatzfülldrahtes nicht geeignet.

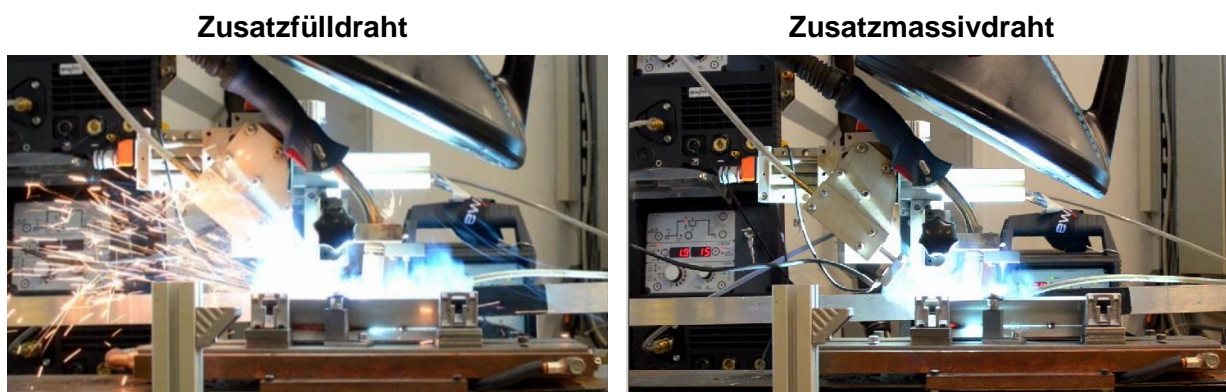


Abbildung 6.16: Funkenflug beim Zusatzfülldrahtschweißen im Vergleich zum Zusatzmassivdrahtschweißen

Die Gesamtemission als auch die Emissionsrate des Zusatzmassivdrahtprozesses ist vergleichbar mit dem des konventionellen Prozesses, wobei der Schweißrauch jedoch im Falle des Zusatzmassivdrahtprozesses deutlich geringere Anteile an Chrom und Nickel im Vergleich zum konventionellen Prozess aufweist, vgl. Abbildung 6.17. Gegenüber dem Zusatzmassivdrahtverfahren ergeben sich bei der Verwendung eines Zusatzfülldrahtes leicht erhöhte Konzentrationen von Chrom und Nickel, wobei die Ursache in der beschriebenen Oxidation von freiwerdenden Fülldrahtpartikeln gesehen wird. Eine weitere Verringerung des Gefährdungspotentials der entstehenden Schweißrauche ist durch die Verwendung eines lichtbogenführenden Drahtes mit einem reduzierten Gehalt an Mangan möglich.

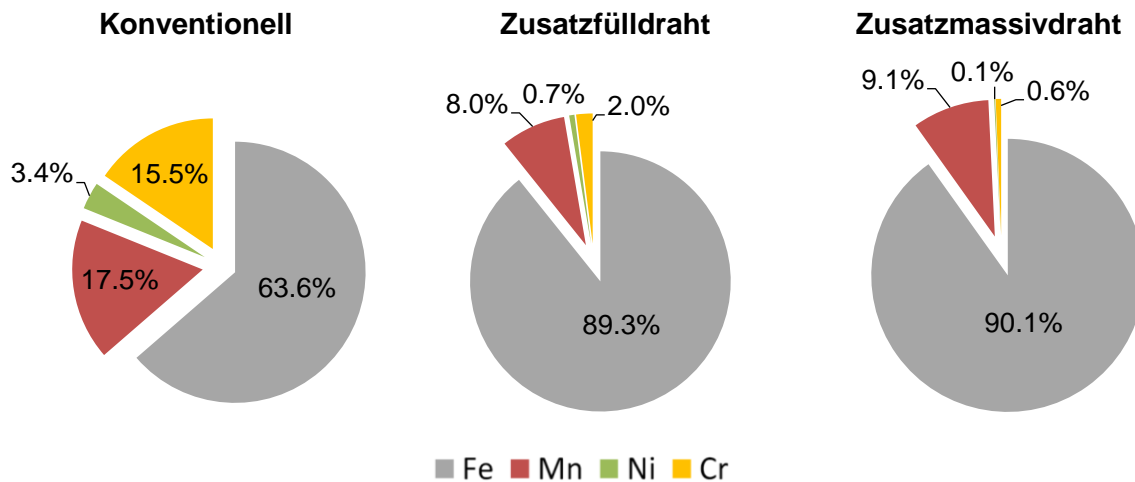


Abbildung 6.17: Chemische Zusammensetzung des Schweißrauches bei Einsatz eines konventionellen MSG-Prozesses im Vergleich zu einem Zusatzfülldraht- bzw. Zusatzmassivdrahtprozess.

In Abbildung 6.18 ist die Gesamtemissionen der toxischen bzw. karzinogenen Elemente Chrom und Nickel zur Einschätzung des Gefährdungspotentials pro Bauteilschweißung dargestellt. Eine Auslagerung der gesundheitsgefährdenden Bestandteile in einen Fülldraht führt zur signifikanten Verringerung der absolut emittierten Chrom- (70%) und Nickelanteile (60%) im Schweißrauch. Das Gefährdungspotential kann durch den Einsatz des beschriebenen Zusatzmassivdrahtkonzeptes weiter reduziert werden. Im Rahmen der Untersuchungen konnte sowohl der Chrom- als auch der Nickelgehalt im Schweißrauch im Vergleich zum konventionellen Prozess um ca. 95% reduziert werden. Aus arbeitsschutztechnischen Gründen ist folglich der Einsatz eines Zusatzmassivdrahtprozesses zu bevorzugen.

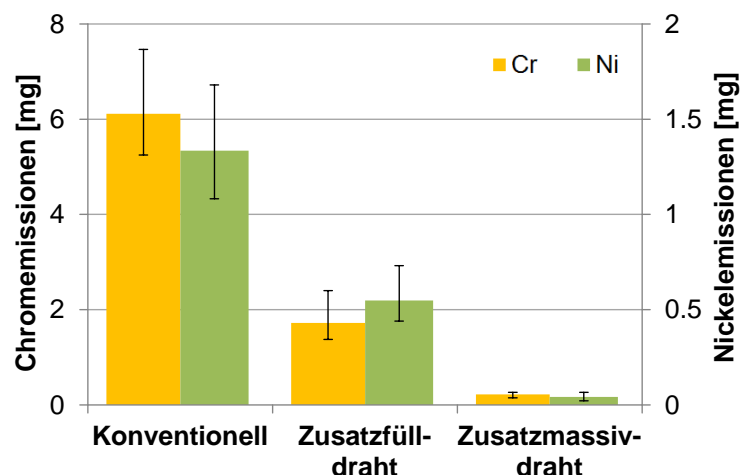


Abbildung 6.18: Emittierte Menge an Chrom und Nickel im Schweißrauch pro Bauteilschweißung bei Verwendung eines konventionellen MSG-Prozesses im Vergleich zu einem MSG-Prozess mit einem Zusatzfüll- sowie zwei Zusatzmassivdrähten

Das Gefährdungspotential des entstehenden Schweißrauches ist nicht nur vom absoluten Gehalt toxischer und karzinogener Elemente abhängig sondern wird, wie z.B. im Falle von Chrom, maßgeblich von der Oxidationsstufe bestimmt - Chrom(III) weist eine geringe toxische Wirkung, Chrom(VI) eine stark toxische und karzinogene Wirkung auf. In Abbildung 6.19 ist die absolut emittierte Menge an Chrom(VI) pro Bauteil für einen konventionellen Prozess im Vergleich zu den untersuchten Zusatzdrahtprozessen dargestellt.

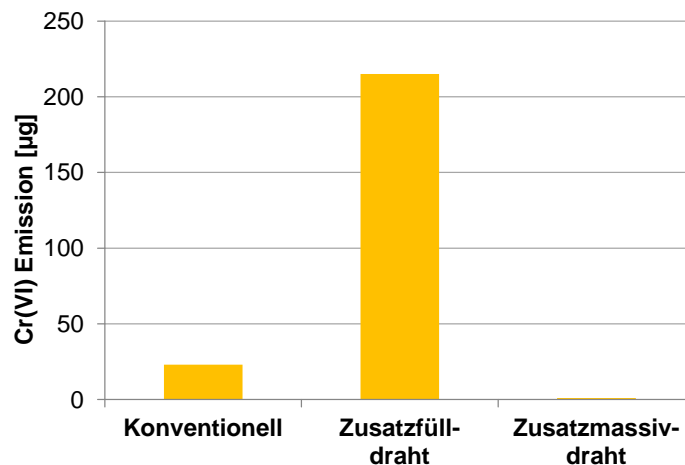


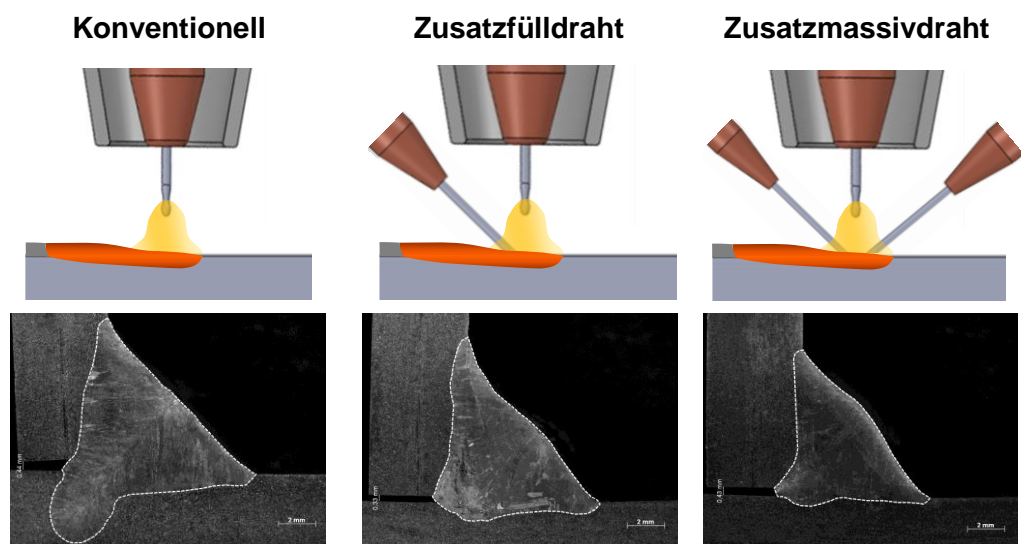
Abbildung 6.19: Chrom(VI)-Emissionen eines konventionellen MSG-Prozesses im Vergleich zu einem MSG-Prozess mit einem Zusatzfüll- sowie zwei Zusatzmassivdrähten

Auf Grundlage der durchgeführten Untersuchungen ist mit 215 µg pro geschweißtem Bauteil dem Zusatzfülldrahtprozess die höchste Emission von Chrom(VI) zuzuordnen. Gegenüber dem konventionellen MSG-Prozess ergibt sich demnach eine 10-fach höhere Belastung des Schweißers durch das entstehende Chrom(VI) trotz einer 70 % geringeren Gesamtchromemissionen. Die Ursache wird in der direkten Verbrennung der Fülldrahtbestandteile gesehen. Für eine aktive Reduzierung des Gefährdungspotentials von Schweißrauch beim Schweißen von hochlegierten Stählen ist demnach der Einsatz eines Zusatzfülldrahtprozesses nicht zielführend.

Durch die Anwendung eines Zusatzmassivdrahtprozesses kann, gegenüber dem konventionellen MSG-Prozess, eine signifikante Reduzierung der emittierten Chrom(VI)-oxide erreicht werden. Die im Rahmen der Untersuchungen bestimmten Chrom(VI)-Anteile im Schweißrauch sind sehr nah an der Nachweis- bzw. Bestimmungsgrenze der Analysemethode. Die Anwendung eines MSG-Zusatzmassivdrahtprozesses ist für eine Reduzierung des Gefährdungspotentials für den Schweißer geeignet. Im Hinblick auf die Schwierigkeiten beim Nachweis von Chrom(VI)-Verbindungen werden weiterführende Untersuchungen jedoch als zielführend erachtet.

Eigenschaften der Schweißverbindungen

Für eine industrielle Anwendung der beschriebenen Konzepte ist neben einer möglichen Reduzierung des Gefährdungspotentials der entstehenden Schweißrauche die Einhaltung der technologischen Anforderungen zwingend erforderlich. Durch prozessspezifische Anpassungen der Schweißparameter wurde für alle Konzepte ein gleiches a-Maß erzielt (Abweichung unter 5 %). Für beide Zusatzdrahtprozesse ergaben sich höhere Abschmelzleistungen und Schweißgeschwindigkeiten, was gegenüber dem konventionellen MSG-Prozess zu einer Senkung der Streckenenergie um 40 % sowohl für den Zusatzfüll- als auch den Zusatzmassivdrahtprozess führt. Bei allen Prozessen wurde eine sichere Anbindung an den Grundwerkstoff erzielt und der theoretische Wurzelpunkt erreicht. In Abbildung 6.20 werden die Prozesse hinsichtlich ihrer wesentlichen Prozesseigenschaften verglichen.



a-Maß [mm]	4,6	4,8	4,6
v_s [cm/min]	0,36	0,6	0,6
L [kg/h]	4,8	8,9	8,3
E_s [kJ/mm]	1,6	1,1	0,9

Abbildung 6.20: A-Maße, Schweißgeschwindigkeit, Abschmelzleistung sowie Streckenenergie eines Zusatzfüll- und Zusatzmassivdrahtprozesses im Vergleich zu einem konventionellen MSG-Prozess

Im Hinblick auf die metallurgische Ausbildung der Schweißnaht wurde bei allen Proben eine vergleichbare Gefügeausbildung (skelettartige Delta-Ferrit-Struktur) erreicht. In der Nahtwurzel wurde durch Anwendung beider Zusatzdrahtprozesse keine vollständige Durchmischung erreicht. Die Verwendung des Zusatzfülldrahtprozesses korreliert mit der schlechtesten Durchmischung der Legierungselemente aller untersuchten Verfahrensvarianten. Weiterhin

wird die Entstehung von Heißrissen im Bereich der Nahtwurzel begünstigt, vgl. Abbildung 6.21.

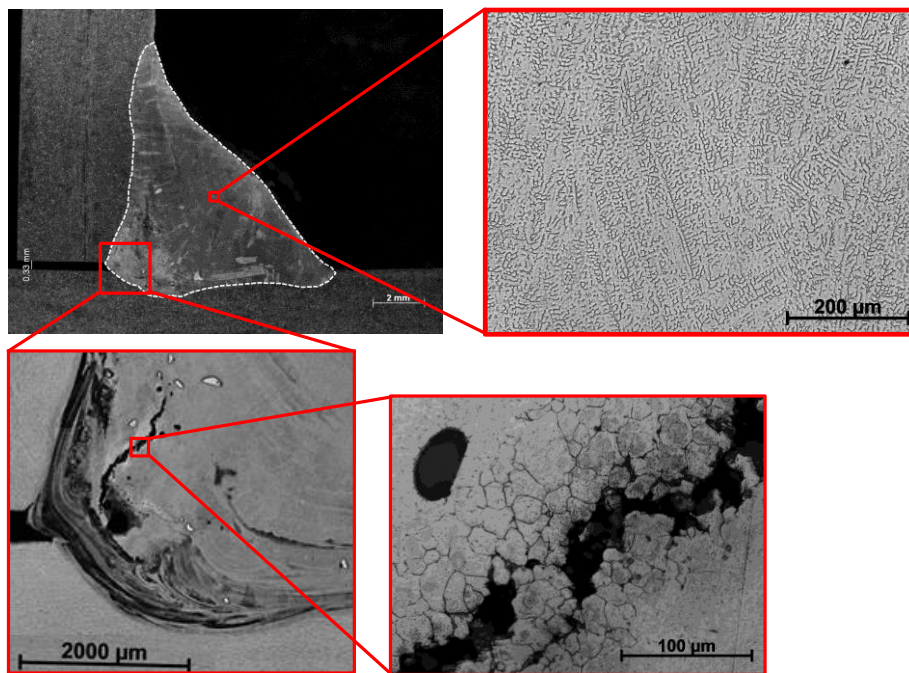


Abbildung 6.21: Metallurgische Beschaffenheit der Schweißverbindung beim Zusatzfülldrahtschweißen

Gegenüber dem Zusatzfülldrahtschweißen kann die Durchmischung im Bereich der Nahtwurzel durch einen Zusatzmassivdrahtprozess signifikant gesteigert werden, wobei dennoch eine vollständige Durchmischung bzw. homogene Verteilung der Elemente in der Schweißnaht nicht erreicht werden konnte. Gegenüber dem Einsatz eines Zusatzfülldrahtes konnte durch die verbesserte Durchmischung der Rissbildung in den Schweißproben vorgebeugt werden. Abbildung 6.22 veranschaulicht die Problematik der ungleichmäßigen Durchmischung anhand der Gewichtsanteile von Chrom und Nickel.

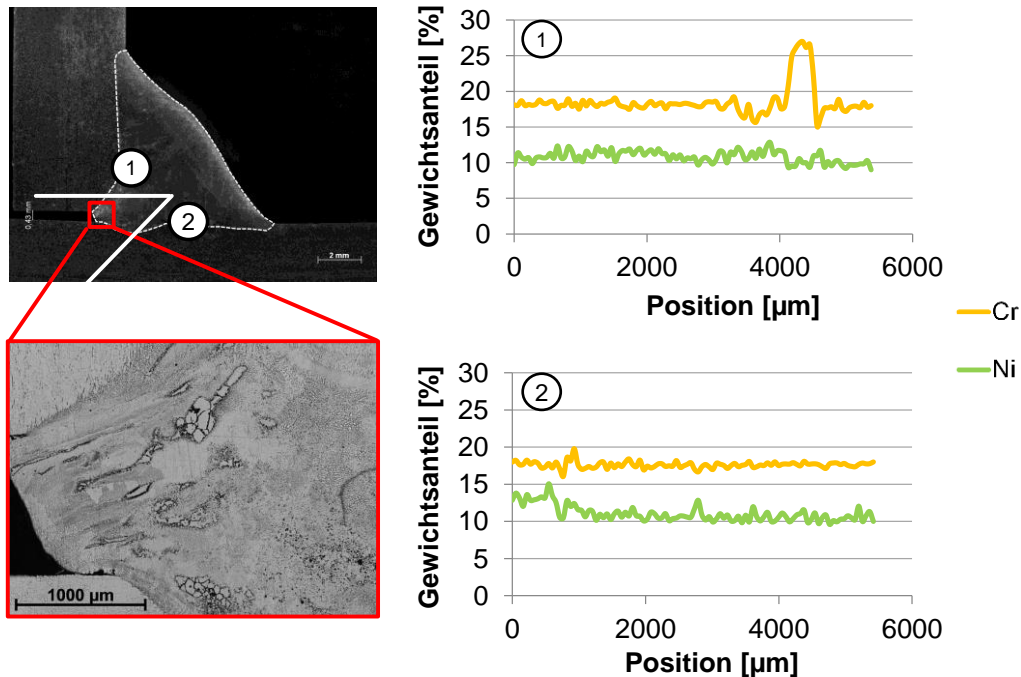


Abbildung 6.22: Metallurgische Beschaffenheit und Durchmischung der Schweißverbindung beim Zusatzmassivdrahtschweißen

Zur Abschätzung der Korrosionsbeständigkeit wurden die Bauteile einem Salzsprühnebeltest mit unterschiedlichen Auslagerungszeiten unterzogen. Dabei konnten keine signifikanten Unterschiede der Oberflächenkorrosion sowohl nach 168 Stunden als auch nach 504 Stunden festgestellt werden, vgl. Abbildung 6.23 links. Lediglich bei einem mit dem Zusatzfülldrahtprozess hergestellten Bauteil zeigte sich eine leichte Oberflächenkorrosion durch einen Spritzer der niedriglegierten lichtbogentragenden Drahtelektrode. Dem entstehenden Nacharbeitsaufwand bezüglich der Entfernung von niedriglegierten Spritzern kann nur durch einen gänzlich spritzerfreien Schweißprozess begegnet werden. In industriellen Anwendungen sind Prozessinstabilitäten und Spritzer häufig jedoch nicht gänzlich zu vermeiden was als maßgeblicher Nachteil aller beschriebenen Zusatzdrahtprozesse gesehen werden muss.

Ein Vergleich der korrosiven Belastung auf der Querschnittsfläche zeigt, dass die Anwendung des konventionellen MSG-Prozesses und des Zusatzmassivdrahtprozesses zu vergleichbaren Ergebnissen führt – Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen konnten keine Korrosionserscheinungen auf der Querschnittsfläche beobachtet werden. Die beschriebenen Chrom- und Nickelschwankungen im Nahtgrund sind für den vorliegenden Fall folglich vernachlässigbar. Demgegenüber resultiert die Anwendung des Zusatzfülldrahtprozesses in einer signifikanten korrosiven Belastung der Schweißnaht, was auf die ungenügende Durchmischung der Legierungselemente in der Schweißnaht zurückzuführen ist, vgl. Abbildung 6.23 rechts.

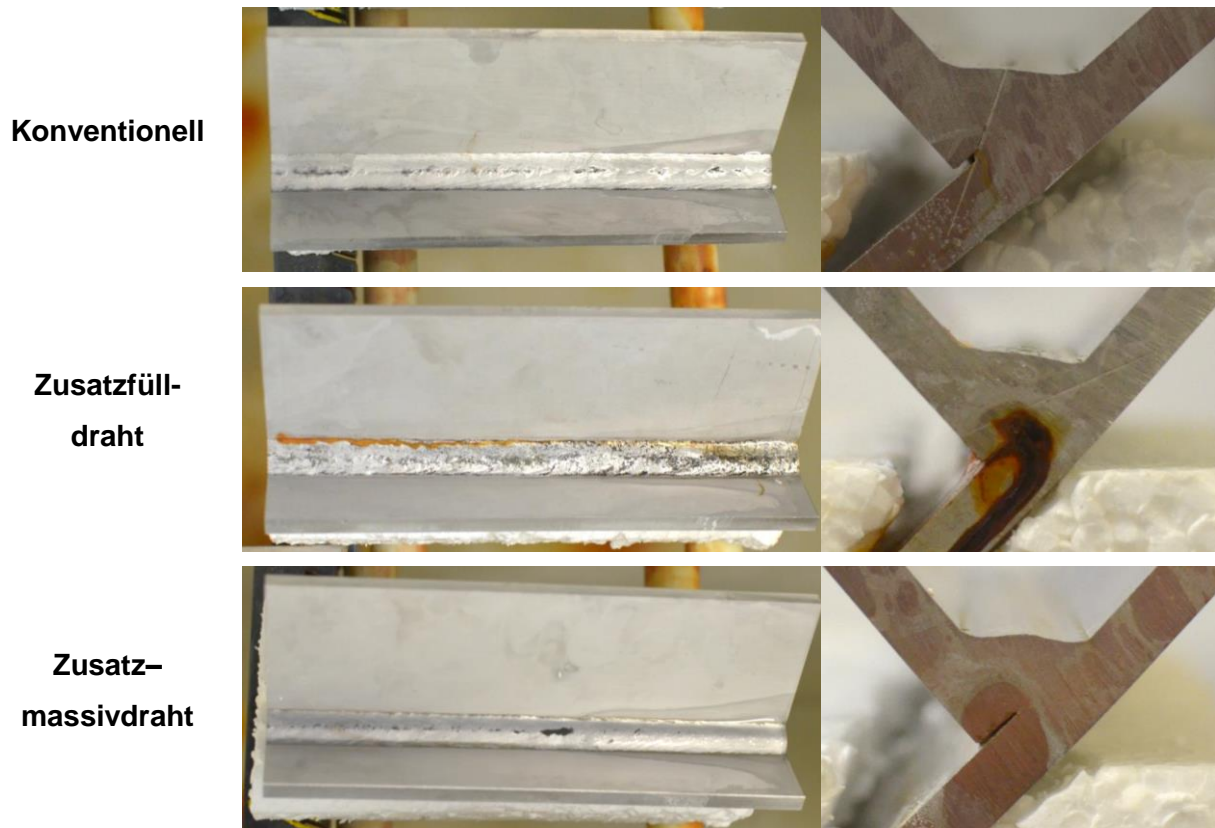


Abbildung 6.23: Korrosiver Angriff auf der Schweißnaht- sowie Querschnittsoberfläche nach 504 h Salzsprühstest

Ergänzend zu den Korrosionsuntersuchungen wurden Zugversuche durchgeführt, um den Einfluss der Prozessführung und den daraus resultierenden Eigenschaften der Schweißverbindungen auf die Bauteilfestigkeit zu quantifizieren. Als Bemessungsgrundlage für die resultierende Zugfestigkeit wurde neben der Nahtlänge zum einem die Soll-Nahtdicke und zum anderen die wirksame Nahtdicke verwendet, vgl. Abbildung 6.24.

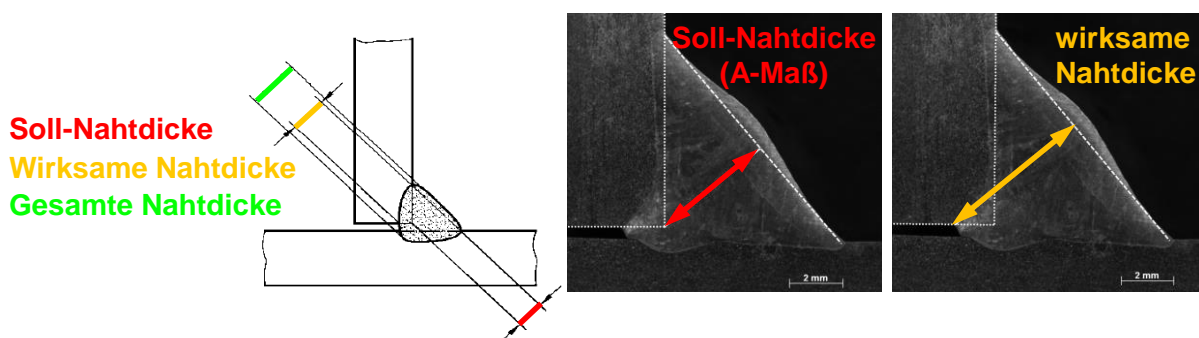


Abbildung 6.24: Soll-Nahtdicke und wirksame Nahtdicke nach DIN EN ISO 17659:2005-09

Der Vergleich der gefügten Bauteile im Zugversuch zeigt, dass die höchsten Bauteilfestigkeiten mit dem konventionellen MSG-Prozess erreicht werden. Ursache für den Festigkeitsab-

fall sind die im Vergleich zu den Zusatzdrahtprozessen deutlich erhöhten Einschweißiefen für den Fall des konventionellen Prozesses, vgl. Abbildung 6.20. Die Einschweißtiefe und weiterführend die Bauteilfestigkeit sinken bei der Verwendung des Zusatzmassivdrahtprozesses leicht ab. Die geringsten Bauteilfestigkeiten werden bei Verwendung des Zusatzfülldrahtprozesses erreicht, wobei als Ursache die unzureichende Durchmischung im Wurzelbereich und die daraus resultierende Bildung von Heißrissen zu sehen ist. Ein signifikanter Einfluss der korrosiven Belastung der Bauteile auf die resultierende Bauteilfestigkeit konnte bei keinem der untersuchten Prozesse festgestellt werden.

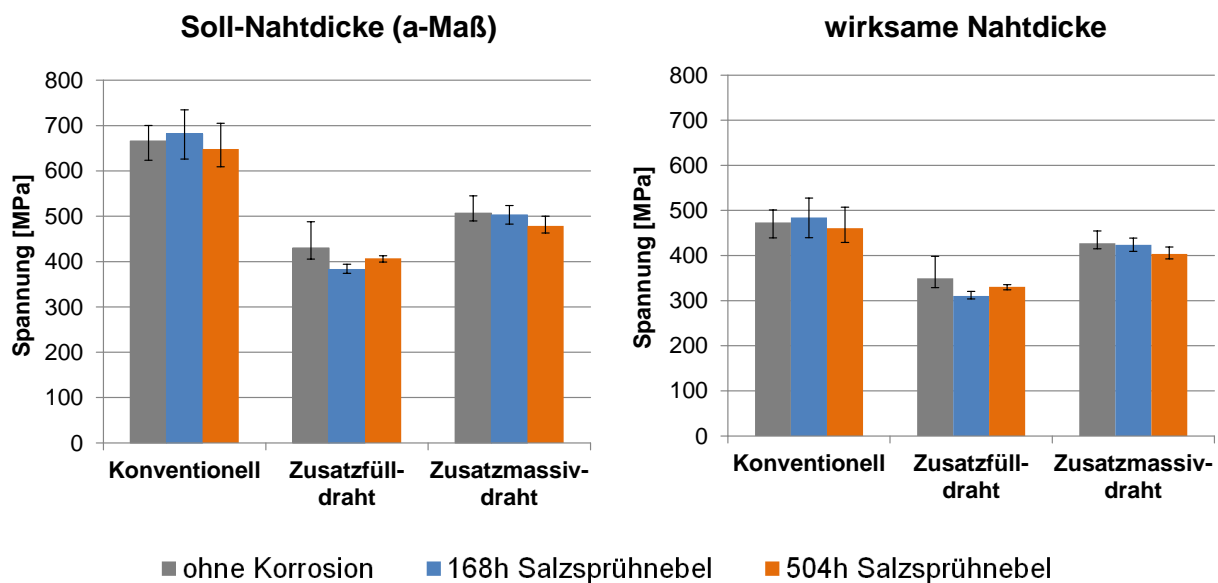


Abbildung 6.25: Resultierende Bauteilfestigkeit unter Zugrundelegung der Soll- (links) bzw. wirksamen Nahtdicke (rechts) ohne sowie mit unterschiedlicher korrosiver Belastung

7 Voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse für KMU

7.1 Innovativer Beitrag der Forschungsergebnisse

Die Ergebnisse dieses Projekts stellen einen neuartigen Ansatz für die Weiterentwicklung und die gezielte Anwendung von MSG-Schweißprozessen dar. Durch den Einsatz von Zusatzdrähten und der Auslagerung gesundheitsgefährdender Bestandteile wie z. B. Chrom und Nickel können die Schweißrauchemissionen und deren Gefährdungspotential maßgeblich verringert und so den steigenden Anforderungen des Arbeitsschutzes bei gleichzeitiger Erhaltung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens entsprochen werden.

Durch die Kombination verschiedener experimenteller Analysemethoden konnte das Verständnis zu den Einflussmöglichkeiten beim MSG-Zusatzdrahtschweißen hochlegierter Werkstoffe analysiert und optimale Parameterbereiche identifiziert werden. Zur Prozessbewertung wurde Hochgeschwindigkeitskinematographie mit zeitsynchronen Stromspannungsmessungen kombiniert. Neben der quantitativen Beurteilung der Nahtoberfläche wurden Makroschliffe und EDX-Untersuchungen zur Bewertung der Durchmischung und Elementverteilung in der Schweißnaht durchgeführt. Die Beurteilung des Gefährdungspotentials erfolgte auf Grundlage von Schweißrauchemissionsmessungen zur Quantifizierung der Prozessemissionen, ICP-OES-Untersuchungen zur Bewertung der Elementverteilung im Schweißrauch sowie durch Anwendung der Ionenchromatographie zur Bestimmung der karzinogenen Cr(VI)-Gehalte im Schweißrauch.

Anhand einer praxisnahen Fügeaufgabe und der Erweiterung der Analysemethoden um Korrosionsuntersuchungen sowie Zugversuche konnte die Praxistauglichkeit des MSG-Heißdrahtschweißprozesses für unterschiedliche Zusatzdrahtkonzepte nachgewiesen und derzeitige Restriktionen benannt werden. Die Ergebnisse tragen so zu einem maßgeblich erhöhten Prozessverständnis von MSG-Heißdrahtschweißverfahren bei, was Anwender unmittelbar befähigt den Prozess trotz der erhöhten Anzahl von Einflussparametern ohne umfangreiche Analysemethoden prozesssicher einzusetzen.

7.2 Industrielle Anwendung der Forschungsergebnisse

Der Anwendungsbereich der angestrebten Ergebnisse ist dem Fachgebiet Produktion und den Wirtschaftszweigen Metallerzeugung und –bearbeitung, Maschinenbau und Fahrzeugbau zuzuordnen. Die industrielle Anwendung der Ergebnisse kann durch alle Anbieter und Anwender des MSG-Schweißens erfolgen – betrifft bisher aber vor allem die automatisierte und mechanisierte Schweißfertigung wie z. B. den Stahl- und Behälterbau, die Verarbeitung

von hochlegierten Stählen, den Geräte- und Anlagenbau, den Fahrzeugbau (Reparaturtechnik) sowie die Hersteller von Lichtbogenschweißanlagen, Schweißbrennern und Zusatzwerkstoffen.

Die Anwender werden durch die Ergebnisse in die Lage versetzt, MSG-Heißdrahtprozesse mit geringerer Schweißrauchemission und maßgeblich verringertem Gefährdungspotential der entstehenden Schweißrauche, geringeren Abbrandverlusten teurer Legierungselemente sowie einem höheren Wirkungsgrad als bisher einzusetzen. Das MSG-Heißdrahtschweißen ist dabei vergleichsweise kostengünstig und effektiv. Es ist keine grundlegende und teure Änderung der Anlagentechnik notwendig. Des Weiteren können bisher genutzte WIG-Heißdrahtanlagen auch für das MSG-Heißdrahtschweißen adaptiert werden. Mit dem MSG-Heißdrahtschweißen können neuartige Drähte, die als lichtbogenführender Draht nicht schweißgeeignet sind, als Sekundärdrähte ohne Lichtbogenbeeinflussung verarbeitet werden.

Durch die Anwendung des MSG- Heißdrahtprozesses kann, ohne die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu beeinträchtigen, den stetig steigenden Anforderungen des Arbeitsschutzes begegnet werden. Zusätzlich können die Kosten infolge von krankheitsbedingten Fehlzeiten durch den Einsatz emissionsärmerer Prozesse ebenfalls reduziert werden. Die positiven Auswirkungen infolge geringerer Gesundheitsbelastungen bei den Schweißern werden sich v. a. langfristig positiv auswirken. Weiterhin profitieren die mittelständischen Hersteller von Schweißequipment durch den Beitrag zur langfristigen Nutzbarkeit der MSG-Lichtbogen-technologie sowie die mittelständischen Hersteller von Zusatzwerkstoffen durch neue Anwendungsmöglichkeiten spezialisierter Zusatzwerkstoffe für die Primär- und Sekundärdrähte. Nur durch die Einhaltung der strengen europäischen Grenzwerte wird es für deutsche KMU überhaupt möglich sein, am internationalen Markt für kostengünstig MSG-geschweißter CrNi-Bauteile teilzunehmen – hierfür bietet der Einsatz des entwickelten MSG-Heißdrahtprozesses einen zielführenden Lösungsansatz .

Durch die verbesserte Energie- und Ressourceneffizienz der neuen Technologien werden Kostenvorteile generiert, die insbesondere bei steigenden Rohstoffkosten die Wettbewerbsfähigkeit deutscher KMU nachhaltig verbessern. Durch die Ausrichtung des Vorhabens auf MSG-Verfahren mit geringen Investitionskosten wurde die Nutzbarkeit der Ergebnisse speziell für KMU sichergestellt. Der voraussichtliche Umsetzungszeitraum wird nicht durch den Prozess, sondern durch die Anwendungen bestimmt. Eine kurzfristige Umsetzung ist für Produkte zu erwarten, welche gegenwärtig in Entwicklung sind und deren Fertigung noch ausgelegt wird.

8 Erläuterung zur Kostenaufteilung

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

8.1 Erläuterungen zum Personaleinsatz

Der wissenschaftliche Mitarbeiter (Summe Personalmonate: 24) übernahm die Planung und Inbetriebnahme der Versuchsstände sowie die Koordination, Vorbereitung und Überwachung der experimentellen Untersuchungen. Der wissenschaftliche Mitarbeiter war für den Aufbau und die Durchführung der Versuche zur Parameterfindung, die metallurgischen Untersuchungen sowie die Auswahl und Anpassung der diagnostischen Methoden an die Versuchsrandbedingungen verantwortlich. Die Untersuchungen wurden vom wissenschaftlichen Mitarbeiter ausgewertet, die Ergebnisse zusammengeführt und federführend die Zwischen- und Abschlussberichte angefertigt.

Der technische Mitarbeiter unterstützte den wissenschaftlichen Mitarbeiter sowohl beim Aufbau der Versuchsstände als auch bei der Durchführung aller experimentellen Untersuchungen und übernahm die Fertigung aller Bauteile. Unter Anleitung des wissenschaftlichen Mitarbeiters führte er den überwiegenden Teil der Emissionsmessungen, die Probenpräparation für die metallurgischen Untersuchungen sowie die Aufbereitung der Proben für nachfolgende EDX- und ICP-OES-Analysen aus. Durch ihn erfolgten die umfassende Dokumentation dieser Versuche und die diskussionsgerechte Aufbereitung der Ergebnisse.

Die studentischen Hilfskräfte unterstützten die Arbeit des technischen Mitarbeiters hinsichtlich der Emissionsmessungen und metallurgischen Untersuchungen. Des Weiteren übernahmen sie Hilfstätigkeiten bei der Aufbereitung und Dokumentation der experimentellen Ergebnisse.

8.2 Erläuterungen zu Geräteanschaffung

Es wurden keine Geräte beschafft.

8.3 Erläuterungen zu Ausgaben für Leistungen Dritter

Für die Quantifizierung der Schweißrauchbestandteilen sowie die Chrom-(VI)-Nachweise bei der SGS Institut Fresenius GmbH in Dresden wurden 21 400 € aufgewendet.

9 Veröffentlichungen und Transfermaßnahmen

Im Rahmen dieses Projektes wurden im Bewilligungszeitraum drei PbA-Sitzungen durchgeführt. Die aktuellen Ergebnisse des Forschungsvorhabens wurden weiterhin im Rahmen der Fachausschusssitzung Q6 der Forschungsvereinigung Schweißen und Schneiden präsentiert und diskutiert. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse des Forschungsprojektes im Rahmen von Vorträgen auf verschiedenen nationalen und internationalen Tagungen und Kongressen vorgestellt. In Form von Workshops für KMU wurden die Ergebnisse ausführlich dargelegt und anwendungsorientiert diskutiert. Ein Überblick über die konkreten Transfermaßnahmen wird in Tabelle 9.1 gegeben.

Tabelle 9.1: Transfermaßnahmen im Bearbeitungszeitraum

	Ziel	Rahmen	Datum / Zeitraum
Maßnahme A Projektbegleitender Ausschuss	Diskussion der Forschungsergebnisse / Wissenstransfer in die Industrie	3 PbA-Sitzungen (A1-A3) A1: Vorstellung des Projektes und Diskussion der geplanten Arbeiten A2: Vorstellung der Zwischenergebnisse A3: Abschlusspräsentation und Diskussion aller Ergebnisse	A1: 24.07.2014 (Dresden) A2: 27.01.2015 (Dresden) A3: 22.10.2015 (Dresden)
Maßnahme B Transfer der Projektergebnisse über den FA Q6 bzw. die Arbeitsgruppe V 2.4	Information über das laufende Forschungsprojekt, Wissenstransfer in die Industrie	B1: Vorstellung der erzielten Ergebnisse und Diskussion des weiteren Vorgehens	B1: 18.11.2014 B1: 29.04.2015 B1: 03.11.2015 B1: 27.04.2016
Maßnahme C Internetseiten des Instituts und des DVS	Information über die Existenz und den Stand des Projektes	C1: Internetplattform informiert über Projektziele, erreichte Teilziele und stellt Ansprechpartner zur Verfügung	C1: Vortragsunterlagen auf der Internetseite des DVS
Maßnahme D Fachvorträge auf Konferenzen	Information interessierter Firmen, Ergebnistransfer in die Praxis	D1: GST / DVS Congress D2: IIW Assembly D3: Institutsseminare	D1: 16.09.2015 (Nürnberg) D2: 30.06.2015 (Helsinki) D3: Seminar für Industrievertreter (11.11.2014 und 10.12.2015)

Maßnahme F Veröffentlichung	Interesse an der Technologie wecken und über neue Möglichkeiten aufklären, Ergebnistransfer in die Praxis	F1: Fachzeitschrift "Schweißen und Schneiden" F2: Fachzeitschrift "Praktiker"	F1: geplant Ende 2016 / Anfang 2017 F2: geplant Ende 2016 / Anfang 2017
Maßnahme G Aus- und Weiterbildung	Ausbildung und Qualifizierung von Studierenden, Ergebnistransfer in die Praxis	G1: Integration in die Vorlesung "Schweißverfahren" G3: Vergabe und Bachelor- und Diplomarbeiten	G1: SS 2016 G3: Bewilligungszeitraum
Maßnahme H	Erstellung von Anwenderempfehlungen und mit FA des DVS sowie den BGs	H1: Vorbereitung zur Überarbeitung der TRGS 528	H1: Bewilligungszeitraum
Maßnahme I Zusatzinformationen & Beratung	Information interessierter Unternehmen	I1: Weitergabe von prozess- und werkstofftechnischen Empfehlungen	I1: Bewilligungszeitraum
Maßnahme J Berichterstattung	Information interessierter Unternehmen	J1: Zwischenberichte J2: Abschlussbericht	J1: 31.03.2015 und 31.03.2016 J2: 31.10.2016

Tabelle 9.2: Geplante Transfermaßnahmen

Ziel	Form	Datum / Zeitraum
Transfer und Diskussion der Ergebnisse in Wissenschaft und Wirtschaft	Veröffentlichung - Zeitschrift „Schweißen und Schneiden“	Ende 2016 / Anfang 2017
	Eingereichter Vortrag und Veröffentlichung zum DVS-Congress 2016 in Leipzig	07/2016

Übersicht über die Veröffentlichungen:

A. Heinitz, S. Rose, U. Füssel: *Emissionsarmes MSG-Heißdrahtschweißen – Reduzierung gefährlicher Schweißrauch durch die partielle Trennung von Lichtbogen und Zusatzwerkstoff*. Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik, Magdeburg, 2014.

A. Heinitz, S. Rose, U. Füssel: *Reduzierung des Gefährdungspotentials von MSG-Schweißrauchen durch Einsatz von Zusatzdraht*. DVS-Berichte Bd. 315, DVS Congress, S. 345-350, 2015.

A. Heinitz, S. Rose, U. Füssel: *Using Hot-Wire GMAW with different filler wire composites for reducing the hazardous substances in welding fumes*. 68th Annual Assembly & International Conference of the International Institute of Welding Commission XII – Arc Welding Processes and Production Systems, Helsinki, 2015.

Geplante Veröffentlichungen

S. Jäckel, A. Heinitz, M. Hertel, U. Füssel: *Reduzieren von Gefahrstoffen beim MSG-Schweißen durch den Einsatz legierungsangepasster Zusatzheizdrähte*. DVS Congress, Leipzig, 2016

S. Jäckel, A. Heinitz, M. Hertel, U. Füssel: *Emissionsarmes MSG-Heißdrahtschweißen – Reduzierung gefährlicher Schweißrauche durch die partielle Trennung von Lichtbogen und Zusatzwerkstoff* (Voraussichtlich Ende 2016 / Anfang 2017)

Einschätzung zur Realisierbarkeit des vorgeschlagenen und aktualisierten Transferkonzepts

Mit den genannten Transfermaßnahmen wurde und wird weiterhin sichergestellt, dass die im Rahmen des Forschungsvorhabens erzielten Ergebnisse in vollem Umfang der Wirtschaft und allen Anwendern durch Veröffentlichungen sowie Vorträge diskriminierungsfrei zur Verfügung stehen. Die Forschungsstelle steht als Ansprechpartner auch nach Projektabschluss zu Verfügung.

10 Projektbegleitender Ausschuss

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

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

Alexander Binzel Schweisstechnik GmbH
Kiesacker
35418 Buseck

Oscar PLT GmbH
Kiesacker
35418 Buseck

Lorch Schweißtechnik GmbH
Im Anwänder 24
71549 Auenwald

Kjellberg Finsterwalde
Leipziger Str. 82
03238 Finsterwalde

AUDI AG
NSU-Straße 1
74148 Neckarsulm

MTU Aero Engines AG München
Dachauer Str. 665
80995 München

Benteler Automobiltechnik
An der Talle 27-31
33102 Paderborn

PALFINGER Platforms GmbH
Äußere Bautzner Str. 47
02708 Löbau

Boockmann Engineering GmbH
Eckartspfad
97708 Bad Bocklet

Bautz Gesellschaft mbH
Amboßweg 15
38229 Salzgitter

Ingenieurbüro Joachim Baum
Windelsbleicher Str. 10
33647 Bielefeld

Hochschule Ulm
Prittwitzstr. 10
89075 Ulm

Quellenverzeichnis

- [1] V. E. Spiegel-Ciobanu: *Die Entstehung von ultrafeinen Partikeln beim Schweißen und verwandten Verfahren*. Dissertation RWTH Aachen, 2010.
- [2] TRGS 528 - Technische Regeln für Gefahrstoffe - Schweißtechnische Arbeiten. Ausschuss für Gefahrstoffe - BAuA, 2009.
- [3] BGI 593 - *Schadstoffe beim Schweißen*. Berufsgenossenschaft Holz und Metall, November 2012.
- [4] S. Plitzko, U. Gernert. Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) - *Messung und Analyse ultrafeiner Partikel (Nanopartikel)*. Abruf 02/2013. http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Gefahrstoffe/Nanotechnologie/pdf/Vortrag-03.pdf?__blob=publicationFile&v=3
- [5] TRGS 900 - Arbeitsplatzgrenzwerte. Ausschuss für Gefahrstoffe - BAuA, 2010.
- [6] IGF 14.459 B - *Bewertung von Schweißrauchemissionen bei Anwendung moderner Schutzgasschweißverfahren*. TU Chemnitz, 2007.
- [7] F. Eichhorn, F. Trösken, T. Oldenburg: *Untersuchungen der Entstehung gesundheitsgefährdender Schweißrauche beim Lichtbogenhandschweißen und Schutzgasschweißen*. RWTH Aachen, 1981.
- [8] IGF 14.438 N - *Untersuchungen zu Schweißrauchemissionen aus neuen Hochleistungs-Schweiß- und MSG-Lötprozessen*. RWTH Aachen, 2008.
- [9] B. J. Quimby, G. D. Ulrich: *Fume Formation Rates in Gas Metal Arc Welding*. Welding Journal, S. 142-149, 1999.
- [10] V. E. Spiegel-Ciobanu: *Schadstoffe beim Schweißen: Ergebnisse betrieblicher Untersuchungen und Bewertung der Gefährdung*. DVS-Berichte Band 209. Nürnberg, 2000, S. 106-112.
- [11] T. Kraus: *Ultrafeine Partikel in Schweißrauchen – wissenschaftliche Erkenntnisse und Ausblick für die Praxis*. Fachvortrag 3. Arbeitsschutzkolloquium für Handwerk und Industrie, SLV Duisburg, 2011.

- [12] B. A. Racette, L. McGee–Minnich, S. M. Moerlein, J. W. Mink, T. O. Videen: *Welding-related parkinsonism - Clinical features, treatment, and pathophysiology*. *Neurology*, Bd. 56, Nr. 8, S. 8-13, 2001.
- [13] B. Pesch, T. Weiss, R. van Gelder, T. Brüning: *Chrom und seine Verbindungen am Arbeitsplatz - Literaturstudie untersucht Exposition und Risiken*. BGFA-Info 03/08, S. 20-23, 2008.
- [14] BGI 855 - *Schweißtechnische Arbeiten mit chrom- und nickellegierten Zusatz- und Grundwerkstoffen*. Hannover: Berufsgenossenschaft Holz und Metall. 2011.
- [15] Fachausschuss-Informationblatt Nr. 036 - *Chrom(VI)-Verbindungen bzw. Nickeloxide beim Schweißen und verwandten Verfahren - Schutzmaßnahmen am Arbeitsplatz*. DG UV, Fachausschuss Metall- und Oberflächenbehandlungen Fachausschuss-Informationblatt Nr. 036, 2008.
- [16] S. Rose: *Ansätze zur Entstehung und Reduzierung von Schweißrauchemissionen beim MSG-Schweißen unter Berücksichtigung neuer Verfahrensvarianten*. *Schweißen und Schneiden*, Bd. 64, Nr. 4, S. 188-195, 2012.
- [17] N. T. Jenkins: *Chemistry of airborne particles from metallurgical processing*. Dissertation Massachusetts Institute of Technology, 2003.
- [18] I. Pires, L. Quintino, R. M. Miranda, J. P. Gomes: *Fume emissions during Gas Metal Arc Welding*. *Toxicological and Environmental Chemistry*, Bd. 88, Nr. 3, S. 385-394, 2006.
- [19] M. R. Bosworth, R. T. Deam: *Influence of GMAW droplet size on fume formation rate*. *Journal of Physics D: Applied Physics*, Bd. 33, S. 2605-2610, 2000.
- [20] K. R. Carpenter, B. J. Monaghan, J. Norrish: *Influence of Shielding Gas on Fume Formation Rates for Gas Metal Arc Welding (GMAW) of Plain Carbon Steel*. *Trends in Welding Research, Proceedings of the 8th International Conference*, 2009, S. 436-442.
- [21] DIN EN ISO 15011 *Arbeits- und Gesundheitsschutz beim Schweißen und bei verwandten Verfahren - Laborverfahren zum Sammeln von Rauch und Gasen*. Berlin: Beuth Verlag, 2011.
- [22] S. Rose: *Entstehung und Reduzierung der Schweißrauchemissionen beim MSG-Schweißen*. Abschlusskolloquium „Lichtbogenschweißen - Physik und Werkzeug“, Große Schweißtechnische Tagung, Hamburg, 2011, S. 599-606.

- [23] IGF 14.994 N - *Nanoskalige Partikel am Arbeitsplatz*. RWTH Aachen, SLV Duisburg, 2009.
- [24] S. Rose, M. Szczesny: *Ansätze zur Emissionsreduzierung beim MSG-Impulsschweißen*. Große Schweißtechnische Tagung, Hamburg, 2010.
- [25] U. Reisgen, S. Olschok, K. Lenz, V. E. Spiegel-Ciobanu: *Ermittlung von Schweißbrauchdaten und Partikelkenngößen bei verzinkten Werkstoffen*. Schweißen und Schneiden, Bd. 64, Nr. 12, S. 788-796, 2012.
- [26] BGI 593 - *Schadstoffe beim Schweißen*. Köln: Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro, 2007.
- [27] Firmenschrift EWM Hightec Welding GmbH: *Manuelles WIG-Heißdraht-Schweißsystem – 100 Prozent schneller*. Abruff 02/2013.
<http://liveadmin.ewm.de/cms/8101/de/index.html>
- [28] W. Rößner, G. Schaller, E. Ulrich: *Verfahren zum maschinellen Lichtbogen-Auftragschweißen von Metallen mit abschmelzender Elektrode*. Patent 23 33 516, 03.03.1962.
- [29] H. Miyauchi, Y. Nakahara, J. Nakata, H. Takano: *Verfahren und Vorrichtung zum Lichtbogenschweißen mit einer schmelzbaren Elektrode*. Patent DE 69108273 T2, 21.02. 1990.
- [30] H.-H. Kaempny, W. Ruckdeschel: *Schutzgasschweißen*. Patent 2363456, 20.12.1973.
- [31] H. Arita, T. Miromoto, S. Nagaoka, T. Nakano: *Development of advanced 3-electrode MAG high-speed horizontal fillet welding process*. Welding in the World, Bd. 53, Nr. 5/5, 2009.
- [32] M. Hübner, S. Rose, D. Springhetti, M. Schnick, U. Füssel: *MSG-Tandemschweißen mit Zusatzdraht zur Minderung des Abbrandes von Legierungselementen und gleichzeitiger Erhöhung der Abschmelzeffizienz*. DVS Congress - Große Schweißtechnische Tagung, Bd. 286, S. 329-334, 2012.
- [33] M. Hertel, J. Niese, S. Rose, M. Häßler, U. Füssel, D. Uhrlandt: *Experimentelle und numerische Untersuchung zum Einfluss der Schutzgaszusammensetzung auf den MSG-Sprühlichtbogenprozess*. Schweißen und Schneiden, Band 66, S. 514-522, 2014.

- [34] M. Hertel, S. Rose, U. Füssel: “Numerical simulation of arc and droplet transfer in pulsed GMAW of mild steel in argon” *Welding in the World*, Volume 60, Issue 5, pp 1055–1061, 2016.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1:	Detailaufnahme von emittierten Partikeln eines MAG-Prozesses [4]	8
Abbildung 3.2:	Einteilung der Partikelgrößen von Stäuben und Rauchen nach [2]	9
Abbildung 3.3:	Schweißrauchkammer der Forschungsstelle TU Dresden nach DIN EN ISO 15011 [22] (links), Filter (rechts oben) und Partikelstruktur (rechts unten)	11
Abbildung 3.4:	links: Emissionsvergleich zwischen konventionellem und energiereduziertem Kurzlichtbogen (coldArc) sowie einem Impulslichtbogen, rechts: Leistungen im Moment der Kurzschlussauflösung beim Kurzlichtbogen und coldArc [22]	12
Abbildung 3.5:	links: Probe mit magnesiumfreien Aluminiumgrund- und magnesiumhaltigem Zusatzwerkstoff AZ61A (Mg-Anteil ca. 90%), rechts: EDX-Scan mit homogener Verteilung	15
Abbildung 4.1:	Schematische Darstellung des MSG-Heißdrahtprozesses (rechts) im Vergleich zum konventionellen MSG-Prozess (links) am Beispiel eines hochlegierten Werkstoffs	16
Abbildung 5.1:	Methodische Vorgehensweise	18
Abbildung 5.2:	Untersuchte technologischen Parameter und Bewertungsgrößen	19
Abbildung 6.1:	Durchmischung im Schweißgut und chemische Zusammensetzung des Schweißrauches bei Einsatz eines Zusatzkalt- bzw. Zusatzheißdrahtes im Vergleich zum konventionellen MSG-Prozess (Parameter vgl. Tabelle 6.1)	23
Abbildung 6.2:	Prozentuale Gewichtsverteilung von Chrom im Schweißgut bei Verwendung eines Zusatzkalt- (links) bzw. Zusatzheißdrahtes (rechts)	24
Abbildung 6.3:	Einfluss der Polung des Heißdrahtes auf die Auslenkung des Schweißlichtbogens	25
Abbildung 6.4:	Gesamtemission eines konventionellen MSG-Prozesses und eines Zusatzheißdrahtprozesse mit gleicher sowie unterschiedlicher Polung vom	

	lichtbogenführenden und lichtbogenlosen Draht für einen Impuls- und einen Sprühlichtbogen.....	26
Abbildung 6.5:	Zusammensetzung des Schweißrauches eines konventionellen MSG-Prozesses und eines Zusatzheizdrahtprozesse mit gleicher sowie unterschiedlicher Polung vom lichtbogenführenden und lichtbogenlosen Draht.....	26
Abbildung 6.6:	Darstellung der Zuführung (links), Durchmischung im Schweißgut (mittig) und chemische Zusammensetzung des Schweißrauches (rechts) in Abhängigkeit des Abstandes zwischen Zusatzdraht und Lichtbogenachse am Beispiel eines Kaltdrahtprozesses.....	27
Abbildung 6.7:	Vergleich der gemessenen und theoretisch bestimmten prozentualen Anteile an Eisen, Nickel um Chrom beim Fügen von 1.4301 für eine Blindnaht (links) sowie eine I-Naht im Stumpfstoß – Lichtbogentragende Elektrode: G3Si1; Zusatzdraht: 1.4820.....	29
Abbildung 6.8:	Analytisch bestimmtes Abschmelzverhältnis zwischen Zusatzdraht und lichtbogenführendem Draht in Abhängigkeit der Chrom- und Nickelanteile im Zusatzdraht zur Erzeugung einer grundwerkstoffgleichen Zusammensetzung eines 1.4301	30
Abbildung 6.9:	Prozentuale Anteile der Hauptbestandteile des lichtbogenführenden (G3Si1) und des lichtbogenlosen Drahtes (1.4820) sowie die theoretische Elementverteilung im resultierenden Schmelzbad	31
Abbildung 6.10:	Chemische Zusammensetzung des benötigten Zusatzdrahtes für das MSG-Zusatzdrahtschweißen	31
Abbildung 6.11:	MSG-Zusatzfülldrahtschweißen - Zusammensetzung des lichtbogenführenden Drahtes, des entwickelten Fülldrahtes und der resultierenden Schmelze.....	32
Abbildung 6.12:	Verteilung von Chrom und Nickel in der Schweißnaht bei Verwendung des entwickelten Fülldrahtes.....	32
Abbildung 6.13:	MSG-Zusatzmassivdrahtschweißen - Zusammensetzung des lichtbogenführenden Drahtes, der lichtbogenlosen Zusatzdrähte und der resultierenden Schmelze.....	33

Abbildung 6.14: MSG-Zusatzsinterbandschweißen - Zusammensetzung des lichtbogenführenden Drahtes, des lichtbogenlosen Sinterbandes und der resultierenden Schmelze.....	34
Abbildung 6.15: Emittierte Gesamtschweißrauchmenge sowie zugehörige Emissionsrate der untersuchten MSG-Prozesse	35
Abbildung 6.16: Funkenflug beim Zusatzfülldrahtschweißen im Vergleich zum Zusatzmassivdrahtschweißen	36
Abbildung 6.17: Chemische Zusammensetzung des Schweißrauches bei Einsatz eines konventionellen MSG-Prozesses im Vergleich zu einem Zusatzfülldraht- bzw. Zusatzmassivdrahtprozess.	37
Abbildung 6.18: Emittierte Menge an Chrom und Nickel im Schweißrauch pro Bauteilschweißung bei Verwendung eines konventionellen MSG-Prozesses im Vergleich zu einem MSG-Prozess mit einem Zusatzfüll- sowie zwei Zusatzmassivdrähten.....	37
Abbildung 6.19: Chrom(VI)-Emissionen eines konventionellen MSG-Prozesses im Vergleich zu einem MSG-Prozess mit einem Zusatzfüll- sowie zwei Zusatzmassivdrähten.....	38
Abbildung 6.20: A-Maße, Schweißgeschwindigkeit, Abschmelzleistung sowie Streckenenergie eines Zusatzfüll- und Zusatzmassivdrahtprozesses im Vergleich zu einem konventionellen MSG-Prozess	39
Abbildung 6.21: Metallurgische Beschaffenheit der Schweißverbindung beim Zusatzfülldrahtschweißen.....	40
Abbildung 6.22: Metallurgische Beschaffenheit und Durchmischung der Schweißverbindung beim Zusatzmassivdrahtschweißen	41
Abbildung 6.23: Korrosiver Angriff auf der Schweißnaht- sowie Querschnittsoberfläche nach 504 h Salzsprühtest	42
Abbildung 6.24: Soll-Nahtdicke und wirksame Nahtdicke nach DIN EN ISO 17659:2005-09	42

Abbildung 6.25: Resultierende Bauteilfestigkeit unter Zugrundelegung der Soll- (links) bzw. wirksamen Nahtdicke (rechts) ohne sowie mit unterschiedlicher korrosiver Belastung.....	43
---	----

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1:	Einordnung relevanter Schweißrauchbestandteile nach [3]	10
Tabelle 6.1:	Referenzparameter des konventionellen MSG-Prozesses und des Zusatzdraht- Prozesses.....	22
Tabelle 6.2:	Angaben zum konventionellen MSG-Schweißprozess.....	34
Tabelle 6.3:	Angaben zum Zusatzfülldrahtprozess	35
Tabelle 6.4:	Angaben zum Zusatzmassivdrahtprozess	35
Tabelle 9.1:	Transfermaßnahmen im Bearbeitungszeitraum	47
Tabelle 9.2:	Geplante Transfermaßnahmen.....	48