

DVS-BERICHTE

DVS Studie

**Entstehung von Schweißrauch beim
Metallschutzgasschweißen**



Entwickeln Sie mit uns die Fügetechnik weiter

Im Netzwerk des DVS treffen sich Experten aus Forschung, Technik und Bildung. Sie alle haben das Ziel, die Fügetechnik in ihren unterschiedlichen Ausrichtungen weiterzuentwickeln.

Sie möchten sich im Ausschuss für Technik einbringen?

Als DVS-Firmenmitglied haben Sie Zugang zu den knapp 200 Arbeitsgruppen des Ausschusses für Technik (Aft). Hier ist Ihr Wissen und Engagement gefragt. Gleichzeitig profitieren Sie von dem Know-how der Kollegen und sind Teil des DVS-Netzwerkes.

Freuen Sie sich auf den Erfahrungsaustausch mit Schweißern, Schweißfachingenieuren oder Schweißaufsichtspersonen und nutzen Sie die Kontaktmöglichkeiten zu Unternehmen, Wissenschaftlern und Ingenieuren.

Sie möchten sich in der Forschungsvereinigung des DVS engagieren?

Durch die DVS-Firmenmitgliedschaft ergeben sich für Sie als Unternehmen alle Möglichkeiten, die Aktivitäten der Forschungsvereinigung zu begleiten, aktiv zu unterstützen und von den Forschungsergebnissen zu profitieren.

Ihre Vorteile bei der Forschungsvereinigung:

- Treten Sie in den direkten Dialog mit der Wissenschaft.
- Initiieren und gestalten Sie Forschungsprojekte.
- Begleiten Sie Projekte unmittelbar.
- Profitieren Sie von Forschungsergebnissen aus erster Hand und setzen Sie diese in Ihrem Unternehmen um.

Und es gibt noch weitere Vorteile als DVS-Firmenmitglied:

- Mitarbeit in nationalen und internationalen Fachgruppen und Gremien des DVS
- Kostenloser und uneingeschränkter Zugang zum technischen DVS-Regelwerk mit seinen gut 500 Merkblättern und Richtlinien unter www.dvs-regelwerk.de
- Zugriff auf die Lehrmedien und Ausbilderleitfäden für die firmeninterne, nicht-kommerzielle Nutzung
- Zertifizierungsmöglichkeiten für Personal, Verfahren, Werkstoffe und Systeme
- Sonderkonditionen für die Teilnahme an DVS-Veranstaltungen
- Rabatte auf Produkte der DVS Media GmbH
- Kostenlose Mitgliederzeitschrift DVS-Magazin



Sie haben Fragen zur Mitgliedschaft?

Die Antworten darauf gibt der DVS-Mitgliederservice:

- per Telefon von montags bis donnerstags 8.00 Uhr bis 16.00 Uhr, freitags 8.00 Uhr bis 13.00 Uhr unter T +49 211 1591-168/-169/-170
- per E-Mail unter: mitglieder@dvs-hg.de

DVS Studie

Entstehung von Schweißrauch beim Metallschutzgasschweißen

Studie im Auftrag der Forschungsvereinigung
Schweißen und verwandte Verfahren des DVS e.V. mit
Unterstützung der Berufsgenossenschaft Holz und
Metall



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.dnb.de>

DVS-Berichte Band 377

ISBN: 978-3-96144-171-6 (Print)

ISBN: 978-3-96144-172-3 (E-Book)

Alle Rechte, einschließlich Übersetzungsrecht, vorbehalten. Nachdruck und Vervielfältigung dieses Bandes oder von Teilen desselben nur mit Genehmigung der DVS Media GmbH, Düsseldorf.

Printed as manuscript.

All rights, also for translation, are reserved. The reproduction of this volume or of parts of it only with approval of the DVS Media GmbH, Düsseldorf.

© DVS Media GmbH, Düsseldorf 2021

Druck/Printing: WIRmachenDRUCK GmbH, Backnang

Vorwort

Entstehung von Schweißrauch beim Metallschutzgasschweißen

Orientierung bedeutet zu wissen, wo wir stehen und welche Wege möglich und zielführend sind. Die vorliegende Literaturstudie zur Entstehung von Schweißrauch beim Metallschutzgasschweißen leistet auf dem wichtigen Gebiet des Arbeitsschutzes in der Schweißtechnik einen entscheidenden Beitrag dazu. Sie wurde durch die Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V. des DVS, kurz: DVS Forschung, mit Unterstützung der Berufsgenossenschaft Holz und Metall beauftragt.

Die Studie wertet nationale und internationale Literatur zum Thema aus und stellt den derzeitigen Kenntnisstand dar. Denn: Was wir wissen, ist, dass bei jeder Schweißaufgabe für den Metallschutzgasschweißenden und sein Umfeld Gefährdungen durch Schweißrauche entstehen – unabhängig von Werkstoff und Art der Aufgabe. Was wir bisher jedoch nicht oder nur unzureichend kannten, war der aktuelle Status Quo.

In einer Bestandsaufnahme trägt deshalb die vorliegende Studie zusammen, an welchen Stellen die Literatur Hinweise zur Freisetzung von Schweißrauch beim Metallschutzgasschweißen gibt oder welche Mechanismen für die Entstehung von Schweißrauch sorgen. Darüber hinaus stellt sie dar, welchen Einfluss prozesstechnische oder werkstoffbedingte Faktoren auf die Emissionen haben und sorgt so für mehr Wissen und mehr Transparenz in dem facettenreichen Feld des Arbeitsschutzes.

Mit diesem Wissen können nun Themenfelder geclustert, bestehende Forschungsprojekte unter neuen Gesichtspunkten analysiert und daraus weiterer Bedarf für erfolgversprechende Forschungsprojekte abgeleitet werden.

Eine zentrale Aufgabe der DVS Forschung ist es u. a., Transferleistungen zu erbringen, Orientierung zu bieten und über zukunftsweisende Themen in den Füge- Trenn- und Beschichtungstechniken umfassend zu informieren.

Dipl.-Ing. Jens Jerzembeck
Geschäftsführer
Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e. V.

Entstehung von Schweißrauch beim Metallschutzgasschweißen

Studie im Auftrag der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren des DVS e.V.

Mit Unterstützung der Berufsgenossenschaft Holz und Metall.

Erstellt von

Benjamin Ebert, Marek Simon, Samuel Mann, Rahul Sharma, Uwe Reisgen

Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der RWTH Aachen, 2022



Inhalt

1	Einleitung	6
	Aktueller Handlungsbedarf	6
	Grundlagen des MSG Schweißens.....	6
	Rahmenbedingungen und Schutzmaßnahmen	9
	Exposition	14
	Gesundheitliche Auswirkungen	17
2	Schweißrauchfreisetzung beim Metallschutzgasschweißen	20
	Einordnung der wesentlichen Randbedingungen für die Freisetzung von Schweißrauch ...	20
	Charakterisierung typischer Schweißrauchemissionen	21
3	Mechanismen der Schweißrauchentstehung	24
	Physikalische Zusammenhänge und Lichtbogenphänomene.....	24
	Schweißrauchpartikelbildung	28
4	Prozesstechnische Einflussfaktoren.....	31
	Allgemeiner Zusammenhang zwischen Lichtbogenparametern und Einstellgrößen.....	31
5	Werkstoffbedingte Einflussfaktoren (Grundwerkstoff / Draht / Gas).....	39
	Auswirkung des Grundwerkstoffes und der Schweißzusätze (Massivdraht/Fülldraht).....	39
	Auswirkung der Schutzgase	44
6	Forschungsbedarf	49
	Literaturangaben.....	52

Abbildungen

Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Risikobereichen und Maßnahmen [12]	11
Abbildung 2: Lüftungsarten (Quelle: Kemper) [14]	12
Abbildung 3: Rangfolge der Schutzmaßnahme bei schweißtechnischen Arbeiten modifiziert nach [15].....	13
Abbildung 4: Einflussfaktoren auf die Exposition [25]	16
Abbildung 5: Größe von partikelförmigen Gefahrstoffen [5]	17
Abbildung 6: Leistung und Leistungsdichte entlang der Lichtbogenstrecke [1]	20
Abbildung 7: Emissionsgruppen nach TRGS 528 (modifiziert) [5]	22
Abbildung 8: Schematische Abbildung des Entstehungsprozesses vom Metaldampf zum Schweißrauch modifiziert nach [78].....	28
Abbildung 9: Schematische Darstellung der physikalischen Zusammenhänge der Schweißrauchentstehung	29
Abbildung 10: Abhängigkeit zwischen mittlerer Spannung und Rauchemissionsrate [85]	32
Abbildung 11: Einfluss der Dynamikeinstellung auf die Rauchemissionsrate und resultierende Unterschiede in Prozesskenngrößen [92].....	34
Abbildung 12: Lichtbogenlänge für charakteristische Spannungsbereiche [85]	36
Abbildung 13: Rauchemissionsrate in Abhängigkeit des Schutzgases für den coldArc Prozess im Vgl. zum konv. KLB modifiziert nach [39]	38
Abbildung 14: Rauchemissionsrate in Abhängigkeit des Schweißstromes für den CMT-Prozess modifiziert nach [98]	38
Abbildung 15: Rauchemissionsrate für unlegierte und hochlegierte Massivdrahtelektroden sowie für einen hochlegierten Fülldraht modifiziert nach [101]	39
Abbildung 16: Rauchemissionsrate hochlegierter Fülldrähte in Abhängigkeit des Füllungstyps [103]	40
Abbildung 17: Chemische Zusammensetzung in Massenprozent für unlegierte und hochlegierte Massivdrahtelektroden sowie für einen hochlegierten Fülldraht und einen hochlegierten manganhaltigen Fülldraht für verschiedene Lichtbogenarten modifiziert nach [19]	42
Abbildung 18: Vergleich der Rauchemissionsrate (E) von AlSi5 und AlMg4,5Mn für verschiedene Prozessarten und Leistungen [102].....	43
Abbildung 19: Einfluss der Zinkschicht auf die Rauchemissionsrate (E) bei verschiedenen Leistungen [102].....	44
Abbildung 20: Ausbildung des Lichtbogens bei Argon und CO ₂ [1]	45
Abbildung 21: Schweißrauchemissionsrate (FER) in Abhängigkeit des Leistungsbereich und verschiedener Schutzgase modifiziert nach [106]	46

Abkürzungen

A-Staub	Alveolengängiger Staub
AC	Wechselstrom (Alternating Current)
AfAMed	Ausschuss für Arbeitsmedizin
AGS	Ausschuss für Gefahrstoffe
AGW	Arbeitsplatzgrenzwerte
ASGW	Allgemeine Staubgrenzwerte
BMAS	Bundeministerium für Arbeit und Soziales
CMT	Cold Metal Transfer
COPD	Chronisch Obstruktive Lungenerkrankung (Chronic Obstructive Pulmonary Disease)
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
E-Staub	Einatembarer Staub
FER	Fume emission rate (Rauchemissionsrate)
FFR	Fume formation rate (Rauchemissionsrate) = FER
GMBi	Gemeinsames Ministerialblatt
MAG	Metallaktivgasschweißen
MIG	Metallinertgasschweißen
MSG	Metallschutzgasschweißen
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
STOP	Substitution – Technische Schutzmaßnahmen – Organisatorische Maßnahmen – Persönliche Maßnahmen
STT	Surface Tension Transfer
TEM	Transmissionselektronenmikroskop
TRGS	Technische Regeln für Gefahrstoffe
UV	Ultraviolette Strahlung
VDI	Verband deutscher Ingenieure e.V.
WIG	Wolframinertgasschweißen

Vorwort

Ziel dieser Studie ist es, den Kenntnisstand zur Entstehung von Schweißrauch beim Metallschutzgasschweißen auf Basis einer Auswertung nationaler und internationaler Literatur zu beschreiben.

Hierbei stehen neben den physikalischen Randbedingungen insbesondere die vielfältigen Einflussfaktoren im Mittelpunkt.

Die Studie leistet einen Beitrag zur besseren Implementierung von Arbeitsschutzmaßnahmen in der schweißtechnischen Fertigung. Die Studie dient als Informationsschrift und Nachschlagewerk. Die bekannten Informationen, insbesondere zu den prozesstechnischen Einflussfaktoren, wurden zusammenfassend dargestellt.

Neben wissenschaftlichen Erkenntnissen über die langfristigen gesundheitlichen Auswirkungen von Schweißrauch hat auch die Anpassung gesetzlicher Regelungen und Grenzwerte zu einem Handlungsbedarf für Unternehmen und Anwender geführt. Die Studie soll als Ausgangspunkt für zukünftige Forschung dienen, bei der neben der Klärung grundlegender Mechanismen insbesondere technologische Lösungen für die Verringerung von Schweißrauchemission und -exposition im Mittelpunkt stehen.

Aachen, im Januar 2022

Die Autoren

1 Einleitung

Aktueller Handlungsbedarf

Ergebnisse von Expositionsstudien in Laborumgebungen, sowie im betrieblichen Umfeld deuten darauf hin, dass allein mit den bislang überwiegend eingesetzten und propagierten Maßnahmen (Erfassung von Schweißrauch, Raumlüftung, Persönliche Schutzausrüstung) keine ausreichende Schutzwirkung des Schweißpersonals erreicht wird [40]. Grenzwerte für die Exposition mit Mangan und A-Staub wurden in einer Studie im betrieblichen Umfeld trotz Schutzmaßnahmen häufig überschritten [41].

Der Handlungsbedarf nimmt hier nicht zuletzt durch neuere wissenschaftliche Erkenntnisse hinsichtlich der gesundheitlichen Auswirkung von Schweißrauch zu. So hat das zuständige Gremium der Vereinten Nationen IARC (International Agency for Research on Cancer) 2018 die Einstufung von Schweißrauch in die Stufe 1 (karzinogen für Menschen) auf Basis der Studienlage vorgenommen.

Insbesondere hinsichtlich der primär zu prüfenden Schutzmaßnahme „Substitution“ soll im Rahmen der Studie behandelt werden, ob und an welcher Stelle bereits ausreichend Erkenntnisse vorhanden sind bzw. an welcher Stelle Forschungsbedarf besteht. Da die Auswahl eines bestimmten Schweißverfahrens in der Regel technologisch bedingt ist, besteht vor allem bei der Substitution von Prozessvarianten bzw. den elektrischen Schweißparametern und den Schweißzusätzen Reduktionspotential.[42]. Im Folgenden werden deshalb zunächst Grundlagen und Zusammenhänge der Emissionsentstehung beim Metallschutzgasschweißen anhand des derzeitigen Standes der Forschung dargestellt. Auf Basis dieser Bestandsaufnahme ist eine Identifikation von Wissenslücken möglich.

Grundlagen des MSG Schweißens

Das Metallschutzgasschweißen (MSG-Schweißen) zählt in den industriellen Fertigungsbereichen der Metallverarbeitung zu den wirtschaftlich bedeutendsten Fügeverfahren und zeichnet sich durch eine universelle Einsetzbarkeit, hohe Abschmelzleistungen und hohe realisierbare Schweißgeschwindigkeiten aus. Aufgrund dieser Flexibilität und Wirtschaftlichkeit spielt das MSG-Schweißen eine herausragende Rolle für die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie. Für eine Vielzahl von schmelzschweißgeeigneten metallischen Werkstoffen können werkstoff- und anwendungsgerechte Prozessparameter gefunden und anspruchsvolle Fügeaufgaben erfüllt werden.

Als Wärmequelle beim MSG-Schweißen dient der Lichtbogen, der zwischen einer kontinuierlich geförderten, abschmelzenden Drahtelektrode und dem Grundwerkstoff brennt. Der Lichtbogen ist verantwortlich für die Aufschmelzung des Grundwerkstoffes sowie die Abschmelzung des Schweißzusatzes (Drahtelektrode) und ermöglicht somit den Werkstoffübergang in Form von Tropfenablösungen in das Schmelzbad. Dieser Prozess findet unter einem Schutzgasmantel statt, um die Schweißstelle vor dem schädlichen Einfluss der Atmosphäre zu schützen. [1, 2]

Je nach verwendetem Schutzgas wird zwischen Metall-Inertgas-Schweißen (MIG) und Metall-Aktivgas-Schweißen (MAG) unterschieden. Die Auswahl des geeigneten Schutzgases (inert oder aktiv) ist, wie auch die Wahl des Schweißzusatzes, abhängig von dem zu verschweißenden Grundwerkstoff. Das MIG-Schweißen wird für das Verarbeiten von Nichteisen-Metallen und austenitischen hochlegierten Stählen verwendet. Das MAG-Schweißen kommt in der Regel bei unlegierten, legierten und ferritischen Chrom-Nickel-Stählen zum Einsatz. [2]

Bei der Nutzung eines Lichtbogens als thermisches Werkzeug werden Emissionen freigesetzt, die in der Fertigungsumgebung auf dort tätiges Personal einwirken. Diese verfahrensbedingten Emissionen treten in Form von optischer Strahlung, Schall und Schweißrauch auf und stellen eine gesundheitliche Gefährdung für die Beschäftigten dar, sofern keine entsprechenden Schutzmaßnahmen ergriffen werden. [1]

Der Schweißrauch besteht aus gas- und partikelförmigen Stoffen (Gasen, Stäuben), wobei die Art und Menge dieser gebildeten Gefahrstoffe abhängig von den Werkstoffen und eingesetzten Schweißverfahren ist. Die chemische Zusammensetzung der Aerosole ist dabei maßgeblich von der chemischen Zusammensetzung der eingesetzten Werkstoffe abhängig, während das angewendete Verfahren und die gewählten Schweißparameter vorwiegend die Menge des entstehenden Schweißrauches beeinflussen. [3, 4] Eine detaillierte Diskussion der prozesstechnischen Einflussfaktoren erfolgt in den Kapiteln 3-5, insbesondere in Kapitel 4. Die werkstoffbedingten Einflussfaktoren werden in Kapitel 5 behandelt.

Bei einer ganzheitlichen Betrachtung der Schweißrauchthematik ist eine Unterscheidung zwischen der Schweißrauchemission und der Schweißrauchexposition von entscheidender Bedeutung. Die Schweißrauchemission ist die Art und Menge Schweißrauch, die ein bestimmter Schweißprozess emittiert. Sie wird als Schweißrauchmasse pro Zeit angegeben. Die Schweißrauchexposition bezeichnet die Art und Menge Schweißrauch, der ein Mensch ausgesetzt ist.

Diese wird in der Regel als mittlere Massenkonzentration (Masse pro Luftvolumen) über diesen Zeitraum angegeben.

Die Beziehung zwischen Schweißrauchemission und Schweißrauchexposition ist extrem komplex, da neben prozessspezifischen Einflussgrößen auch arbeitsplatzspezifische Faktoren hinzukommen, die zum Teil sehr schwer beschreibbar sind, sich schnell ändern können (bspw. Körperposition oder Luftströmungen) und für jeden Arbeitsplatz individuell zu bewerten sind. Darüber hinaus sind bei der Betrachtung der Exposition auch die eingesetzten Schutzmaßnahmen sowie die Hintergrundbelastung, erzeugt durch Schweißrauchakkumulation oder andere partikelemittierende Prozesse, relevant. Die Schweißrauchexposition wird an anderer Stelle in diesem Kapitel detaillierter behandelt. [5]

Das Gefährdungspotential für das schweißtechnische Personal ist letztendlich abhängig von der Schweißrauchexposition, die entsprechend der Schweißrauchemission messtechnisch erfasst werden kann. Mit Hilfe dieser Expositionsmessungen und einer Bestimmung der Schweißrauchzusammensetzung kann ein Abgleich mit den bestehenden Grenzwerten durchgeführt werden und die vom Gesetzgeber geforderte Gefährdungsbeurteilung und Wirksamkeitsprüfung unterstützt werden.

Rahmenbedingungen und Schutzmaßnahmen

In diesem Abschnitt wird ein kompakter Einblick in die gesetzlichen Rahmenbedingungen und grundsätzlichen Möglichkeiten zur Vermeidung von Schweißrauchexposition gegeben. Die detaillierte Vorgehensweise ist den entsprechenden aufgeführten Dokumenten und weiterer Literatur zu entnehmen.

Aus dem Arbeitsschutzgesetz [6] ergibt sich für den Arbeitgeber eine Schutzpflicht gegenüber den Beschäftigten. Diese Schutzpflichten sind für Gefahrstoffe wie Schweißrauch in der Gefahrstoffverordnung [7] formuliert. Für den schweißtechnischen Bereich wird die Gefahrstoffverordnung sowie die Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge [8] durch die „Technischen Regeln für Gefahrstoffe (TRGS) 528 – Schweißtechnische Arbeiten“ konkretisiert [5], die punktuell auf weitere TRGS spezifischer Themengebiete (z.B. Arbeitsplatzgrenzwerte) zurückgreift. Die TRGS geben allgemein den Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Arbeitshygiene sowie sonstige gesicherte wissenschaftliche Erkenntnisse für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen wider und werden vom Ausschuss für Gefahrstoffe (AGS), ggf. unter Beteiligung des Ausschusses für Arbeitsmedizin (AfAMed) aufgestellt und vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS) im Gemeinsamen Ministerialblatt (GMBI) bekannt gegeben.

Die Gefahrstoffverordnung gibt vor, dass der Arbeitgeber eine Tätigkeit mit Gefahrstoffen erst aufnehmen lassen darf, nachdem eine Gefährdungsbeurteilung durchgeführt und die erforderlichen Schutzmaßnahmen ergriffen worden sind. Bei Einhaltung der Technischen Regeln kann der Arbeitgeber insoweit davon ausgehen, dass die entsprechenden Anforderungen der Verordnung erfüllt sind [5] (sog. „Vermutungswirkung“). Organisation, Struktur, Vorgehen und wesentliche Inhalte einer Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen sind in der TRGS 400 „Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen“ [9] beschrieben. Im Rahmen der Gefährdungsbeurteilung sind grundsätzlich alle Expositionswege (oral, dermal, inhalativ) zu berücksichtigen, bei schweißtechnischen Arbeiten ist dabei hauptsächlich die inhalative Exposition zu bewerten.

Die Ermittlung und Beurteilung der Konzentrationen gefährlicher Stoffe in der Luft in Arbeitsbereichen erfolgt nach der TRGS 402 „Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition“ [10]. Als Hilfe zur Umsetzung existiert eine vom AGS herausgegebene Liste „Bewertung von Verfahren zur messtechnischen Ermittlung von Gefahrstoffen in der Luft am Arbeitsplatz“, die eine Übersicht von empfohlenen Messverfahren für Arbeitsplatzmessungen enthält. Bei der Beurteilung der Konzentrationen gefährlicher Stoffe sind

die TRGS 900 [11] „Arbeitsplatzgrenzwerte“ bzw. für krebserzeugende Stoffe die TRGS 910 [12] zu berücksichtigen.

Die Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) in der TRGS 900 sind so konzipiert, dass bei ihrer Einhaltung im Allgemeinen keine akuten oder chronisch schädlichen Wirkungen zu erwarten sind. Der allgemeine Staubgrenzwert (ASGW) gilt für lösliche bzw. unlösliche Stäube, die nicht anderweitig reguliert sind. Im Hinblick auf Schweißrauch gilt dies insbesondere für Aluminiumoxid, Eisenoxide und Magnesiumoxid. Schweißrauche gelten insgesamt als schwer löslich. Der allgemeine Staubgrenzwert unterscheidet zwischen der einatembaren (E-Staubfraktion) und der alveolengängigen Staubfraktion (A-Staubfraktion), deren aktuelle Grenzwerte 10 mg/m^3 für die einatembare und $1,25 \text{ mg/m}^3$ für die alveolengängige (lungengängige) Staubfraktion betragen. Eine Vielzahl von Gefahrstoffen in den Schweißrauchpartikeln (z.B. Kupferoxid, Manganoxid, Zinkoxid) bzw. in den entstehenden Schweißgasen (z.B. Ozon, Stickstoffoxide, Kohlenmonoxide), die beim Schmelzschweißen metallischer Werkstoffe typischerweise entstehen, können im menschlichen Organismus eine toxische Wirkung entfalten, sodass eine Betrachtung des allgemeinen Staubgrenzwertes nicht ausreichend ist. Für diese Gefahrstoffe gelten die stoffspezifischen Arbeitsplatzgrenzwerte der TRGS 900, bei denen es sich um Schichtmittelwerte handelt, die in Hinblick auf eine achtstündige Exposition an 5 Tagen pro Woche über die Lebensarbeitszeit festgelegt sind. Expositionsspitzen, die den Schichtmittelwert überschreiten, werden mit Hilfe von Kurzzeitwerten beurteilt.

Erzeugen die Gefahrstoffe zusätzlich kanzerogene Wirkung (z.B. Nickeloxide, Chrom(VI)-Verbindungen), so müssen zusätzlich die risikobezogenen Beurteilungsmaßstäbe der TRGS 910 eingehalten werden. Dafür werden im Risikokzept eine Akzeptanz- und eine Toleranzkonzentration für krebserzeugende Gefahrstoffe definiert, aus denen drei Risikobereiche (niedriger, mittlerer und hoher Risikobereich) resultieren (Abbildung 1). Ziel dieses Konzeptes ist es, Expositionen unterhalb der Akzeptanzkonzentration zu erreichen. Je höher die Konzentration der Gefahrstoffe am Arbeitsplatz ist, desto höher ist auch die Notwendigkeit zusätzlicher betrieblicher Risikominderungsmaßnahmen.

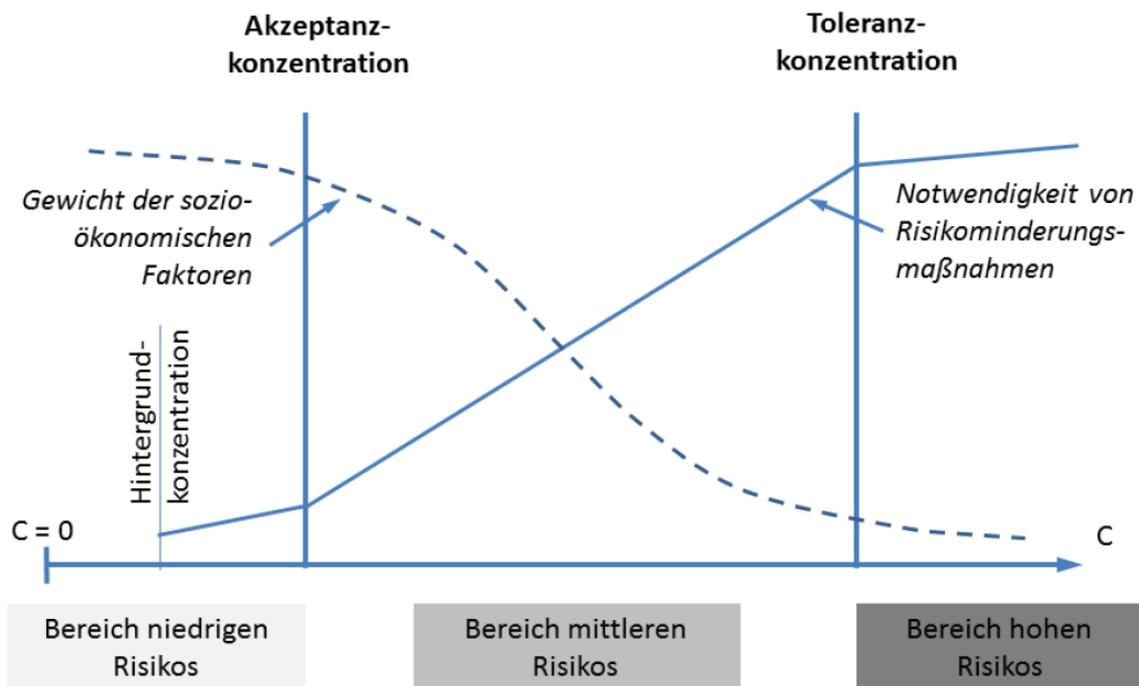


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Risikobereichen und Maßnahmen [12]

Grundsätzliche Schutzmaßnahmen für den Umgang mit Gefahrstoffen sind in der TRGS 500 [13] beschrieben. Es gilt das STOP-Prinzip (Substitution, Technische Schutzmaßnahmen, Organisatorische Schutzmaßnahmen, Persönliche Schutzmaßnahmen), das in der TRGS 528 für schweißtechnische Arbeiten zu folgenden Punkten konkretisiert ist:

1. Substitutionsprüfung
2. Lüftungstechnische und bauliche Maßnahmen
3. Organisatorische und hygienische Maßnahmen
4. Persönliche Schutzmaßnahmen

Diese Maßnahmen sind auf Basis der Gefährdungsbeurteilung nach der Gefahrstoffverordnung in der aufgeführten Rangfolge zu berücksichtigen. Die Maßnahmen sind so auszulegen, dass mindestens die Arbeitsplatzgrenzwerte eingehalten werden. Ist dies nicht der Fall, ist eine Kombination von Maßnahmen zu ergreifen (z.B. Absaugung an der Entstehungsstelle und Atemschutz für die schweißende Person).

Die erste Schutzmaßnahme ist nach dem Minimierungsgebot der Gefahrstoffverordnung die Substitutionsprüfung. Dabei ist zu prüfen, ob alternative Fügeverfahren, alternative Schweißverfahren bzw. Verfahrensvarianten (siehe auch Kapitel 4) und alternative Werkstoffe eingesetzt werden können.

Als lüftungstechnische und bauliche Maßnahmen versteht man zum einen baulich-technische Maßnahmen, die die Ausbreitung der Gefahrstoffe über den Arbeitsbereich hinaus verhindern sollen und zum anderen lüftungstechnische Maßnahmen, die unter Beachtung der beim Schweißen entstehenden Thermik die Exposition für Beschäftigte verhindern sollen. Zu letzterem zählt die Absaugung des Schweißrauches im Entstehungsbereich, die in der Norm DIN EN ISO 21904 „Einrichtungen zum Erfassen und Abscheiden von Schweißrauch“ beschrieben wird und sich in die brennerintegrierte Absaugung, die Hochvakuumabsaugung, die Niedervakuumabsaugung und Absaughauben unterteilen lässt (Abbildung 2).

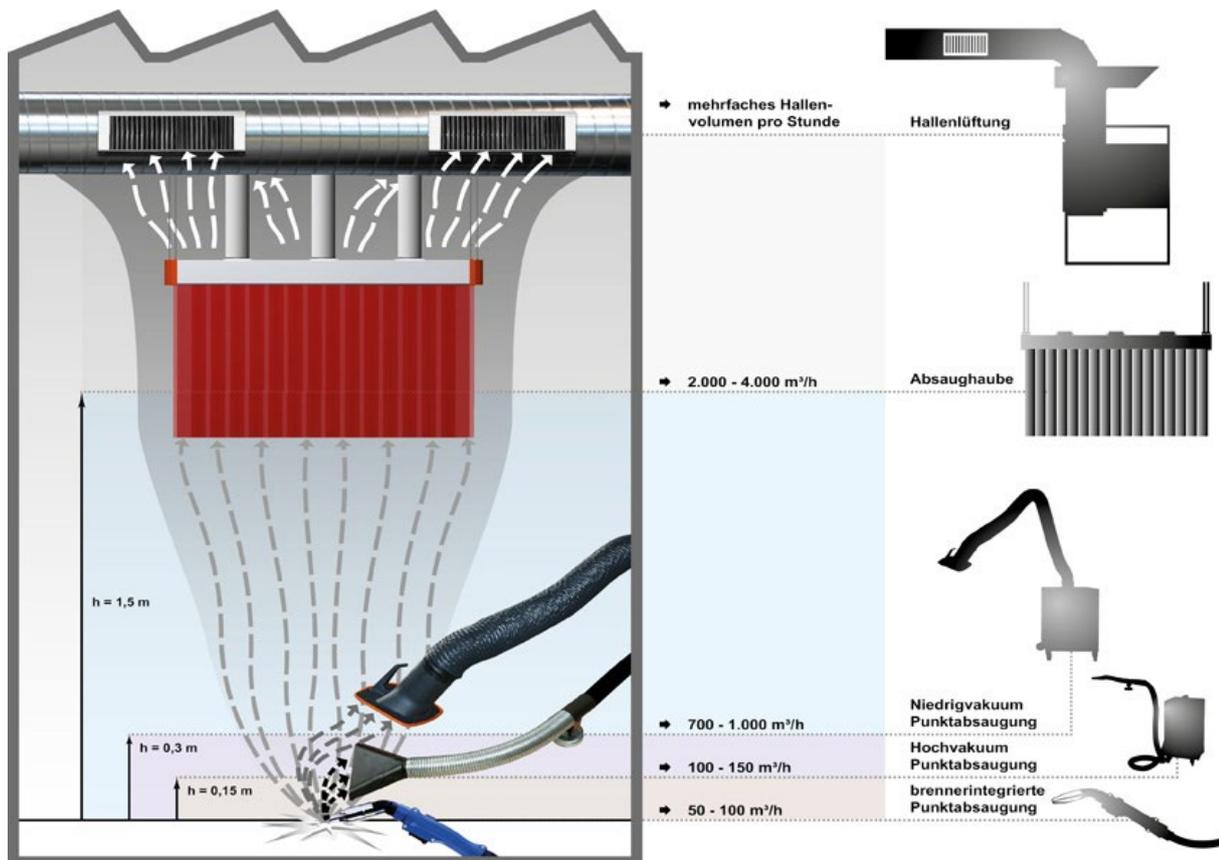


Abbildung 2: Lüftungsarten (Quelle: Kemper) [14]

Die Raumlüftung als lüftungstechnische Maßnahme wird unterstützend zu den anderen Maßnahmen eingesetzt und kann grundsätzlich in Schichtlüftung und Mischlüftung unterschieden werden. Bei diesen Verfahren erfolgt die Erfassung der Gefahrstoffe eher zufällig. Berechnungsgrundlagen zur Auslegung von Hallenlüftungen sind u.a. in der VDI/DVS Richtlinie 6005 – „Gefahrstoffe und Lüftungstechnik beim Schweißen“ zu finden. [14]

Organisatorische und hygienische Schutzmaßnahmen betreffen hauptsächlich Vorschriften zur Überprüfung der Anlagen, Arbeitsabläufen sowie Reinigung von Arbeitsbereichen und Maßnahmen gegen die Verschleppung von Gefahrstoffen.

Falls die vorherig genannten Schutzmaßnahmen nicht ausreichend sind oder deren Umsetzung technisch nicht möglich ist, müssen geeignete Atemschutzgeräte (i.d.R. fremdbelüftete Schweißhelme) eingesetzt werden. Dies ist allerdings das letzte Mittel, da nur die Person geschützt wird, die die persönliche Schutzausrüstung trägt. Abbildung 3 zeigt die typische Rangfolge der Schutzmaßnahmen bei schweißtechnischen Arbeiten.

	Schutzziel	Schutzmaßnahme	Wirksamkeit
1	vermeiden von Emissionen	Gestaltung des Verfahrens	 kollektiv wirksamste Lösung
2	Erfassen der Emissionen	Erfassung an der Emissionsstelle	
3	Austausch von Raumluft	Raumlüftung	
4	Atemschutz	Anwendung persönlicher Schutzausrüstung (Atemschutz)	

¹ PSA: Persönliche Schutzausrüstung

Abbildung 3: Rangfolge der Schutzmaßnahme bei schweißtechnischen Arbeiten modifiziert nach [15]

Bei einer Fügeaufgabe ist heute eine Substitution von MSG-Schweißprozessen oftmals technisch und wirtschaftlich nicht direkt möglich, sodass im nächsten Schritt die Erfassung der Emissionen erfolgt. Dabei ist in der Regel mindestens eine Absaugung im Entstehungsbereich erforderlich, die bei Verfahren mit sehr hoher Schweißrauchemissionen erforderlichenfalls durch weitere Schutzmaßnahmen ergänzt werden muss, um die schweißende Person und auch andere Beschäftigte wirksam zu schützen. [5] Beim manuellen MSG-Schweißen werden deshalb oft punktförmige Hochvakuumabsaugungen oder noch öfter Niedervakuumabsaugungen eingesetzt, die von Hand nachgeführt werden müssen [14]. In Anwendungen, in denen eine hohe Mobilität erforderlich ist oder beengte räumliche Verhältnisse anzutreffen sind, werden häufig auch Absaugbrenner und/oder fremdbelüftete Schweißhelme eingesetzt.

Den häufig genutzten punktförmigen Hochvakuumabsaugungen und Niedervakuumabsaugungen wird in diversen Untersuchungen bei korrekter Positionierung der Absaughaube und adäquatem Volumenstrom eine gute Wirksamkeit bei der Reduktion der Schweißrauchexposition zugesprochen [16 bis 19]. Absaugbrenner konnten auch dank weiterer Untersuchungen [20 bis 22] in den letzten Jahren deutlich verbessert werden und bewirken bei richtiger Handhabung ebenfalls eine wirksame Reduktion der Exposition [23, 24]. Brennerintegrierte Absaugungen haben dabei den Vorteil, dass im Gegensatz zu anderen Absaugverfahren keine Notwendigkeit der Nachführung besteht und ein geringerer Absaugvolumenstrom benötigt wird.

Exposition

Die Schweißrauchexposition bezeichnet die Art und Menge an Schweißrauch, der ein Mensch ausgesetzt ist, und stellt eine wesentliche Größe zur Beurteilung des Gefährdungspotentials und der Wirksamkeitsüberprüfung von Schutzmaßnahmen dar. Neben der Schweißrauchexposition kann schweißtechnisches Personal auch durch Nebenarbeiten wie Schleifen oder Trennen gegenüber gefährlichen Partikeln exponiert sein, sodass diese Verfahren im Rahmen der TRGS 528 bei den schweißtechnischen Arbeiten mitberücksichtigt werden.

Bei Expositionsmessungen ist zwischen Staub- und Gasmessungen zu unterscheiden. Bei partikelförmigen Schweißrauchemissionen wird in der Regel eine Luftprobe angesaugt und die darin enthaltenen Partikel auf einem Filter abgeschieden. Dabei muss jedoch sichergestellt sein, dass nur Partikel der gewünschten Staubfraktion (siehe Kapitel 1) erfasst werden. Neben dieser gravimetrischen Methode existieren noch weitere Messverfahren, um die Massenkonzentration zu bestimmen, wie optische Messverfahren. Bei Gasmessungen werden vorzugsweise direktanzeigende Gasmessgeräte verwendet, die die Konzentration des gewünschten Gases selektiv messen und unterschiedliche physikalische Messprinzipien nutzen. [5]

Ein Expositionsrisiko besteht nicht nur für die Arbeitskraft, die den Schweißprozess ausführt, sondern auch für in der Nachbarschaft befindliche Personen oder Personen, die sich in der gleichen Arbeitsumgebung aufhalten (sog. Bystander). Aus diesem Grund beschränkt sich das Expositionsrisiko nicht nur auf manuelle Schweißverfahren, sondern besteht auch an Arbeitsplätzen im Bereich vollmechanisierter Schweißeinrichtungen. Die Exposition von schweißtechnischem Personal ist grundsätzlich schwer abzuschätzen, da diese nicht nur von den Eigenschaften des Schweißprozesses und absaugtechnischen Maßnahmen, sondern maßgeblich von den räumlichen Gegebenheiten sowie Lüftungsverhältnissen und weiteren Randbedingungen, wie Position der thermischen Säule oder der Hintergrundbelastung, abhängt. Viele dieser äußeren Randbedingungen unterliegen einer kontinuierlichen Änderung, sodass allgemeingültige Aussagen oder Vorhersagen zur Exposition nur äußerst schwer getroffen werden können. [5]

Beginnend vom Entstehungsort des Schweißrauches durch Metallverdampfung im Lichtbogen ist der MSG-Schweißprozess selbst mit seiner spezifischen Schweißrauchemission der erste Einflussfaktor auf die Exposition (detaillierte Betrachtung in Kapitel 3 bis Kapitel 5). Die nächste wesentliche Beeinflussung der Exposition erfolgt über eine brennerintegrierte Absaugung, so-

fern eingesetzt. Steigt der Schweißrauch innerhalb der thermischen Säule aus der Prozesszone auf, so erreicht er in Abhängigkeit lokaler Luftströmungen weitere Absaugelemente (je nach Einsatz und Positionierung) oder bereits das Gesichtsfeld der schweißenden Person. An dieser Stelle besteht, je nach persönlicher Schutzausrüstung und Körperhaltung zur thermischen Säule bzw. Rauchsäule, eine gewisse Exposition. Wird der Schweißrauch nicht durch weitere Absaugelemente erfasst, verbreitet er sich in Abhängigkeit verschiedener Eigenschaften der thermischen Säule (z.B. Ausprägung und Strömungseffekte), des Schweißrauches selbst (z.B. Partikelgröße) und arbeitsplatzspezifischen Faktoren, wie örtlicher Geometrie oder Luftströmungen, weiter im Raum. Je nach Ausprägung dieser Eigenschaften und Effekte können dabei weitere Personen gefährdet werden. Ferner kann der Schweißrauch akkumulieren, so dass er als Hintergrundbelastung ein permanentes Risiko für alle Personen in dem Arbeitsumfeld darstellt. Die hierfür entscheidende Gegenmaßnahme stellt die Lüftung des Arbeitsplatzes dar, die für einen Luftaustausch sorgt und die Gefahrstoffe abtransportiert. In der Regel wird dies durch eine Hallenlüftung gewährleistet, die durch Luftströmungen bereits zuvor Einfluss auf die örtliche Verteilung der Partikel und damit die Exposition nehmen kann. Bei schweißtechnischen Arbeiten in Zwangshaltung oder in engen Räumen bzw. Bereichen mit geringem Luftaustausch ist aufgrund der Position zur thermischen Säule bzw. der Gefahr der Schweißrauchakkumulation mit hohen bis sehr hohen Expositionen zu rechnen. [5]

Es existiert eine Vielzahl von Studien, die Expositionsmessungen in verschiedenen Industriezweigen für eine große Anzahl an Werkstoffen und Schweißprozessen betrachten. Allerdings sind diese Untersuchungen aufgrund der hochgradig arbeitsplatzspezifischen Einflussfaktoren, die sich zudem sehr schwer quantifizieren lassen, in der Regel nicht allgemeingültig. Es gibt dennoch Ansätze, wie in [25], die den qualitativen Einfluss einzelner Aspekte der komplexen Beziehungen darstellen. Konkret wurde in dieser Untersuchung die Bedeutung der Kopf- bzw. Körperposition und der Positionierung des Absaugelementes auf die Exposition mit ultrafeinen Partikeln hervorgehoben (Abbildung 4).

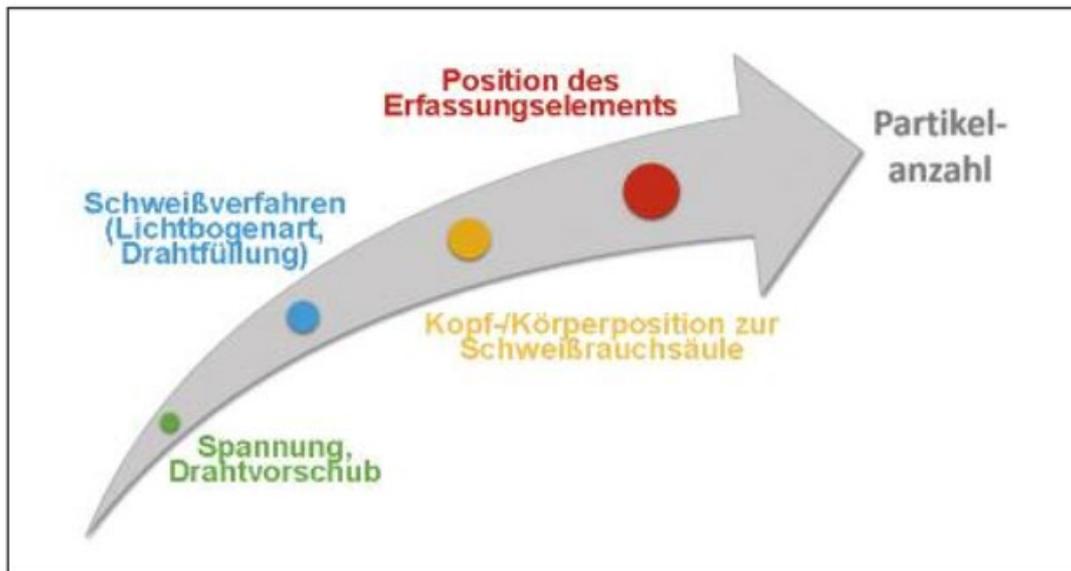


Abbildung 4: Einflussfaktoren auf die Exposition [25]

In [19] wird durch standardisierte Versuchsbedingungen im Labor und durch Ausblendung der Hintergrundbelastung versucht, die spezifische Exposition für unterschiedliche Schweißprozesse an verschiedenen Messpunkten im Raum zu bestimmen. Dabei deutet sich ein Einfluss der Prozessleistung auf die Ausprägung und Stabilität der thermischen Säule an, so dass u. U. auch bei emissionsärmeren Prozessen, wie dem Kurzlichtbogenprozess, höhere Expositionen entstehen können, die schweißende und beistehende Personen gefährden können. Obwohl die emissionsreicheren Sprühlichtbögen durchgehend niedrigere Expositionswerte zeigen, relativiert dieses Erkenntnis jedoch nicht die Bedeutung der Rauchemissionsrate eines Prozesses. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass emissionsreiche Prozesse in der Praxis häufig durch indirekte Exposition aufgrund von Schweißrauchakkumulation und nicht ausreichender Lüftung zu einer Gefährdung der Beschäftigten führen, zumal insbesondere nachführbedürftige Absaugsysteme nie die Gesamtheit der Schweißrauchemissionen erfassen.

Insgesamt wird die Exposition durch eine große Anzahl von Faktoren bestimmt, die sich sehr schnell ändern können, teilweise sehr schwer quantifizierbar und stark arbeitsplatzspezifisch sind. Aus diesem Grund ist zum einen eine individuelle Betrachtung des Arbeitsplatzes und zum anderen, insbesondere bei der Verarbeitung von Werkstoffen kritischer chemischer Zusammensetzung, häufig eine Kombination von Schutzmaßnahmen erforderlich, um gefährliche Konzentrationen von Gefahrstoffen zu vermeiden.

Gesundheitliche Auswirkungen

Bei schweißtechnischen Arbeiten werden Gefahrstoffe freigesetzt, die aus partikelförmigen oder gasförmigen Komponenten bestehen. Die partikelförmigen Stoffe des Schweißrauches sind eine disperse Verteilung kleinster fester Teilchen in der Luft, die anhand ihrer Größe in einatembare und alveolengängige Fraktionen unterschieden werden können. Die einatembaren Partikel umfassen Partikelgrößen bis über 100 µm und können durch Mund und Nase eingeatmet werden. Von diesen können Partikel mit Durchmessern unterhalb 5 – 10 µm beim Einatmen bis zu den Lungenbläschen (Alveolen) vordringen (A-Staub). Die beim MSG-Schweißen entstehenden partikelförmigen Stoffe besitzen in der Regel einen Durchmesser kleiner als 1 µm (vorwiegend ultrafeine Partikel kleiner als 100 nm) und sind daher grundsätzlich alveolengängig (Abbildung 5). [3 bis 5]

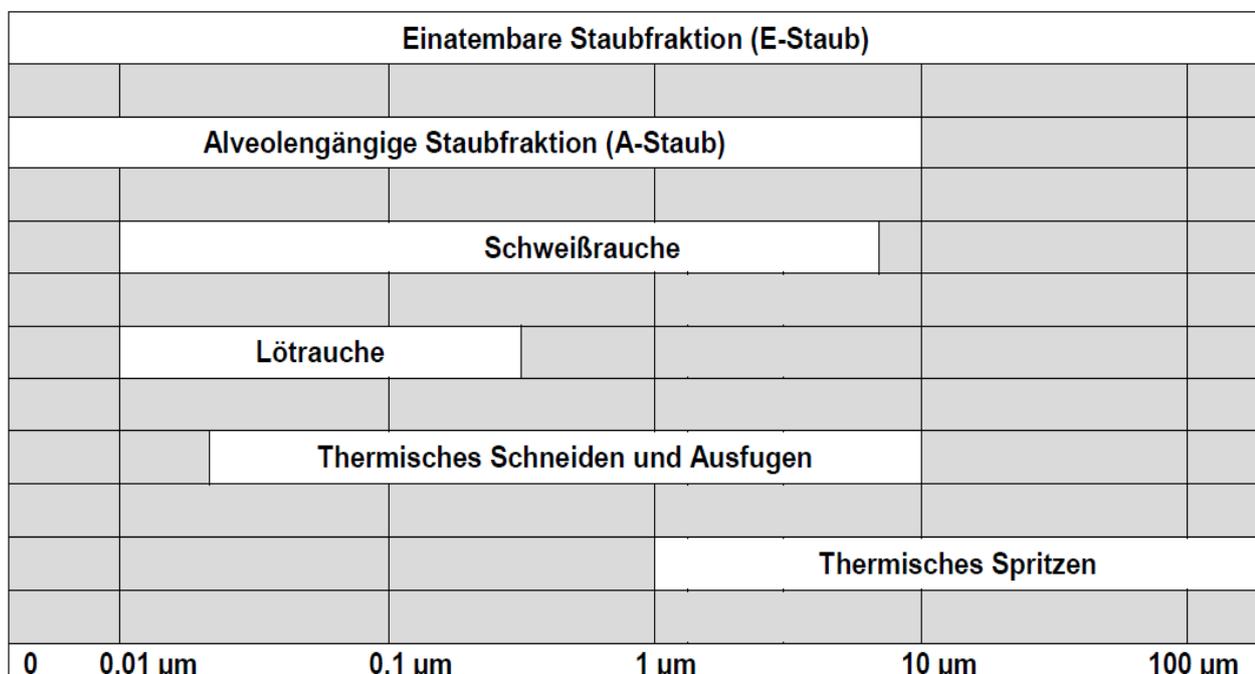


Abbildung 5: Größe von partikelförmigen Gefahrstoffen [5]

Die entstehenden gas- und partikelförmigen Gefahrstoffe lassen sich anhand ihrer gesundheitsschädlichen Wirkung auf den menschlichen Organismus in folgende Gruppen einteilen:

1. **atemweg- und lungenbelastende Stoffe** (z.B. Eisenoxide, Aluminiumoxid)
2. **toxische oder toxisch-irritative Stoffe** (z.B. Fluoride, Manganoxide, Zinkoxid)
3. **krebserzeugende Stoffe** (z.B. Chrom(VI)-Verbindungen, Nickeloxid)

Atemwegs- und lungenbelastende Stoffe, wie insbesondere auch Eisenoxid- oder Aluminiumoxidhaltige Schweißrauche, können bei einer langzeitigen Aufnahme hoher Konzentrationen zu einer Belastung der Atemwege und der Lunge führen, die die Reinigungsmechanismen der Bronchien und des Lungengewebes überfordert und hierdurch eine chronische Entzündung (chronische Bronchitis) verursachen kann. Daraus kann eine obstruktive Atemwegserkrankung, meist in Form einer chronisch obstruktiven Lungenerkrankung (COPD), resultieren. [5, 26, 26]. Die reaktionslose Ablagerung von größtenteils Eisenoxid-haltigen Partikeln im interstitiellen Lungengewebe wird Siderose genannt. In seltenen Fällen kann hieraus nach extremer und langjähriger Einwirkung von Schweißrauchen und Schweißgasen eine Lungengerüsterkrankung („Siderofibrose“) entstehen. Aluminium-haltige Schweißrauche können in seltenen Fällen nach ebenfalls hochgradiger und langjähriger Einwirkung eine Aluminiumstaublunge („Aluminose“) verursachen.

Toxische bzw. chemisch-irritative Stoffe haben eine akute oder chronische Giftwirkung auf den menschlichen Organismus, wenn eine bestimmte Konzentration bzw. Dosis überschritten wird. Es existiert hierbei eine Dosis-Wirkung-Beziehung. Beispiele für toxische Stoffe sind die Gase Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide und Ozon sowie die Metalloxide der Elemente Mangan, Kupfer, Blei und Zink. Insbesondere das Element Mangan, das auch in signifikanter Menge in unlegierten Schweißzusätzen enthalten ist, kann in Form diverser oxidischer Verbindungen reizende Wirkung auf die Atemwege ausüben und zu Lungenentzündungen führen. [26] Einige Studien legen einen Zusammenhang mit Schäden am Nervensystem nahe [27, 28].

Als krebserzeugend (kanzerogen) gelten Stoffe, die bösartige Tumore verursachen können. Gesundheitliche Belastungen mit kanzerogenen Stoffen können auch nach Jahren oder Jahrzehnten zum Ausbruch der Krankheit führen. Es besteht kein Automatismus der Wirkung, aber eine steigende Dosis erhöht das Krebsrisiko, wobei kein als unbedenklich anzusehender Schwellenwert existiert. Krebserzeugende Stoffe beim MSG-Schweißen können insbesondere bei der Verarbeitung hochlegierter chrom- und nickelhaltiger Werkstoffe entstehen. Chrom(VI)-Verbindungen sowie Nickeloxide sind als krebserzeugende Stoffe der Kategorie 1A eingestuft; sie können Karzinome im Bereich der Lunge und der Atemwege verursachen. [5]

Neben der chemischen Zusammensetzung kommt der Partikelmorphologie eine wichtige Bedeutung beim Kontakt mit dem menschlichen Organismus zu, weil sie ein maßgeblicher Faktor für die Aufnahmefähigkeit in die verschiedenen Organe und somit auch für die gesundheitsschädliche Wirkung darstellt. Viele über Jahre durchgeführte Studien legen nahe, dass für die

toxikologische Wirkung von Aerosolpartikeln nicht nur das Partikelmaterial und die Partikelmasse entscheidend sind, sondern auch die Partikelgröße und die Oberflächeneigenschaften. [29 bis 31] Untersuchungen deuten darauf hin, dass die respiratorischen und kardiovaskulären Wirkungen von eingeatmeten Umgebungspartikeln eher mit der gesamten Partikeloberfläche als mit der Partikelmasse in der Lunge korreliert sind [32].

Ultrafeine Partikel werden daher als toxikologisch bedenklicher gesehen als feine oder grobe Partikel. Insbesondere Partikeln kleiner als 50 nm wird dabei großes Schädigungspotential zugemessen, weil sie im Vergleich mit gröberen Partikeln eine hohe Partikeloberfläche pro Masse und gleichzeitig eine hohe Depositionswahrscheinlichkeit aufweisen. [33 bis 35] Darüber hinaus werden diese Partikel von Makrophagen schlecht phagozytiert [33, 36], können aber in verschiedene andere Zellen wie Epithelzellen eindringen [29, 37] und daher toxische oder reizende Stoffe in Gewebe transportieren, die normalerweise nicht Umgebungsaerosolen ausgesetzt sind [38].

Insgesamt deuten die Untersuchungen zu ultrafeinen Partikeln darauf hin, dass eine Translokation von inhalierten ultrafeinen Partikeln aus den Atemwegen in den Blutkreislauf erfolgen kann. Der Wirkungsgrad dieser Translokation hängt dabei wahrscheinlich stark von der Partikelanzahl sowie den chemischen Eigenschaften und Oberflächeneigenschaften ab. Ultrafeine Partikel im Schweißrauch weisen zwar eine hohe Partikelanzahl-Konzentration und eine große Partikeloberfläche auf, besitzen im Vergleich zu den größeren Partikeln jedoch eine geringe Masse-Konzentration. Aufgrund des dargestellten speziellen Schädigungspotentials von ultrafeinen Partikeln wird die derzeit ausschließlich an der Masse-Konzentration orientierte Gefährdungsbeurteilung in der Schweißtechnik z. T. kritisch gesehen [39].

2 Schweißrauchfreisetzung beim Metallschutzgasschweißen

Einordnung der wesentlichen Randbedingungen für die Freisetzung von Schweißrauch

Beim MSG-Schweißen ist eine Energiequelle nötig, die vergleichsweise hohe Ströme bei geringen Spannungen bereitstellen muss, damit das Brennen eines Lichtbogens zwischen der abschmelzenden Drahtelektrode und dem Grundwerkstoff ermöglicht wird. Der Lichtbogen ist ein Plasma, in dem Atome oder Moleküle zumindest teilweise ionisiert sind, sodass das Gas elektrisch leitfähig wird. Die dabei umgesetzte elektrische Leistung wird in Wärmeenergie umgewandelt und wird zum Aufschmelzen der Werkstoffe genutzt. Dabei ist der Leistungsumsatz nicht linear, sondern in der Nähe der Elektroden höher als auf der freien Lichtbogenstrecke (Abbildung 6).

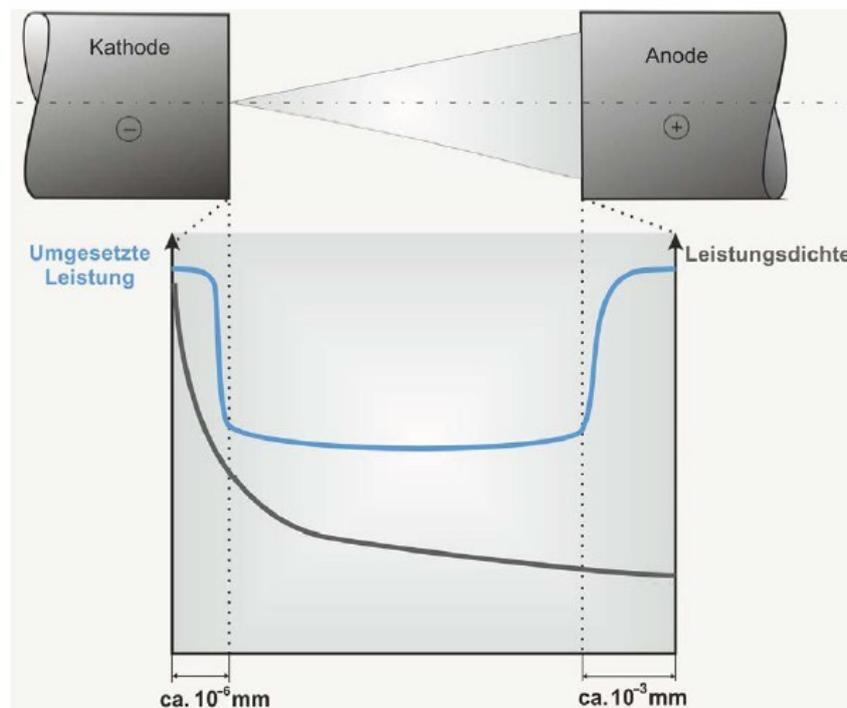


Abbildung 6: Leistung und Leistungsdichte entlang der Lichtbogenstrecke [1]

Dies ist insofern interessant, als sich dadurch je nach Polung sowie diverser weiterer Faktoren (siehe Kapitel 3) ein spezifisches Temperaturprofil im Lichtbogen ergibt, das letztendlich maßgeblichen Einfluss auf die Schweißrauchemission nimmt. Die Temperaturen im Lichtbogen erreichen Werte von bis zu 16500 Kelvin [43] und ermöglichen chemische und physikalische Prozesse wie Verdampfung, Kondensation, Oxidation, Zersetzung, Pyrolyse und Verbrennung. Bei diesen Prozessen entstehen in Abhängigkeit der verwendeten Werkstoffe, Schweißzusätzen, Beschichtungen, Verunreinigungen und Schweißparametern gas- und partikelförmige Gefahrstoffe (Schweißrauche). Der Metalldampf entstammt auch gemäß dem Leistungsumsatz primär

der Schweißdrahtelektrode (bei der typischen positiven Polung der Drahtelektrode), aber auch den Tropfen, die sich ablösen und im Lichtbogen in den aufgeschmolzenen Grundwerkstoff übergehen, sowie dem aufgeschmolzenen Grundwerkstoff selbst. Nachdem der Metaldampf in kältere Bereiche gelangt ist, entstehen die eigentlichen Schweißrauchpartikel in einem Prozess von Übersättigung über Nukleation bis hin zur Koagulation. [1, 44]

Charakterisierung typischer Schweißrauchemissionen

Schweißrauchemissionen lassen sich mit gas- und partikelförmigen Gefahrstoffen in zwei Komponenten aufteilen, die sich in der Messmethodik und zum Teil auch in der Beurteilung unterscheiden. Die Art und die Menge der Schweißrauchemissionen sind sehr stark von dem Schweißverfahren und den Schweißparametern abhängig. Die Messung der Schweißrauchemission ist in der DIN EN ISO 15011-1 – „Laborverfahren zum Sammeln von Rauch und Gasen“ [45] genormt. In der Regel wird der Schweißrauch mit einer Haube vollständig erfasst, die sich stationär über dem Schweißprozess befindet. Im Falle von Gasmessungen befinden sich eine oder mehrere Messsonden in dem definierten Luftstrom und erfassen Konzentrationen in der Einheit ml/m^3 , die mit Hilfe der Luftdurchflussrate in eine Gasemissionsrate in ml/min umgerechnet werden können. Die Menge des partikelförmigen Schweißrauches wird in der Regel gravimetrisch per Differenzwägung von Filtern bestimmt und als Rauchemissionsrate (engl. FER: fume emission rate oder FFR: fume formation rate) in einer Form Masse pro Lichtbogenbrennzeit (Schweißzeit) angegeben. Mit der Filtermethode kann auch Schweißrauch zur weiteren Analyse wie Bestimmung der chemischen Zusammensetzung gesammelt werden.

Die Kenntnis der Rauchemissionsraten und der Zusammensetzung des Schweißrauches kann Arbeitsmedizinern bei einer Bewertung der Exposition von Arbeitnehmern unterstützen. Auf keinen Fall kann auf Basis von Rauchemissionsraten die Exposition eingeschätzt werden (siehe Kapitel 1). Rauchemissionsraten können deswegen nur als vergleichendes Mittel eingesetzt werden. Im vierten Teil der Norm DIN EN ISO 15011-4 [46] wird ein Rauchdatenblatt beschrieben, mit dem für eine spezifische Kombination aus Grundwerkstoff, Schweißzusatz, Schweißparametern sowie weiteren Randbedingungen die Emissionsraten angegeben werden können.

Gasförmige Gefahrstoffe entstehen überwiegend durch chemische Reaktionen im Lichtbogen. Ozon tritt aufgrund der Dissoziation von Sauerstoff ausgelöst von intensiver UV-Strahlung bevorzugt bei stark reflektierenden Materialien wie Aluminium oder CrNi-Stahl und bei Schweißprozessen mit niedriger Rauchemissionsrate auf. Aus diesem Grund können insbesondere das WIG-Schweißen aber auch das MIG-Schweißen kritische Konzentrationen von Ozon erzeugen.

Kohlenstoffmonoxid entsteht durch die Dissoziation von Kohlenstoffdioxid beim Schweißen kohlenstoffdioxidhaltiger Schutzgase (MAG-Schweißen) und darüber hinaus bei jeder Verbrennung mit unzureichender Luftzufuhr. Stickoxide bzw. nitrose Gase werden durch die sogenannte Luftverbrennung erzeugt. Sauerstoff und Stickstoff oxidieren bei Temperaturen über 1000 °C am Rand des Lichtbogens zu Stickstoffmonoxid, das in der Luft bei Raumtemperatur endotherm zu Stickstoffdioxid reagiert. Neben diesen Gasen können beim MSG-Schweißen Gase aus Oberflächenbeschichtungen gegen Korrosion oder aus anderen Beschichtungstypen entstehen. Typische Vertreter dieser Gase sind z.B. Formaldehyd, Blausäure oder Chlorwasserstoff. [26, 44]

Der größte Teil der partikelförmigen Gefahrstoffe im Schweißrauch entsteht aus der Metallverdampfung in der Prozesszone. Dabei entstammen ca. 95% aus dem Schweißzusatz und ca. 5% aus dem Grundwerkstoff. [44] Obwohl die Rauchemissionsrate stark von den Schweißparametern und Randbedingungen abhängig ist, können zumindest die Schweißverfahren und im Falle des MSG-Schweißens verschiedene Verfahrensvarianten grob in Emissionsgruppen (niedrig, mittel, hoch, sehr hoch) eingeordnet werden (Abbildung 7).

Verfahren (beispielhafte Aufzählung)	Emissionsrate¹⁾ (mg/s)	Emissionsgruppe
MIG/MAG (energiearmes Schutzgasschweißen)	1 bis 4	mittel bis hoch
MIG (Massivdraht, Nickel, Nickelbasislegierungen)	2 bis 6	hoch
MIG (Aluminiumwerkstoffe)	0,8 bis 29	niedrig bis sehr hoch
MAG (Massivdraht)	2 bis 12	hoch
MAG (Fülldraht-Schweißen mit Schutzgas)	6 bis > 25	hoch bis sehr hoch
MAG (Fülldraht-Schweißen ohne Schutzgas)	> 25	sehr hoch

1) Erfahrungswerte, die im Einzelfall durch Optimierung der Prozessparameter noch reduziert werden können.

Abbildung 7: Emissionsgruppen nach TRGS 528 (modifiziert) [5]

Eine detailliertere Betrachtung des Einflusses der Schweißparameter auf die Emissionsentstehung erfolgt in Kapitel 4 und 5.

Die partikelförmigen Stoffe liegen in Form von Metalloxidverbindungen vor, dessen chemische Zusammensetzung maßgeblich durch die chemische Zusammensetzung des Grundwerkstoffes

und des Schweißdrahtes bestimmt wird. [47] Bei Stahlwerkstoffen dominiert Fe_3O_4 [48], während bei Aluminiumwerkstoffen Al_2O_3 vorherrscht [49]. In Abhängigkeit der weiteren Komponenten der beteiligten Werkstoffe entstehen weitere Metalloxide, deren Massenanteil jedoch nicht mit den Anteilen in Grundwerkstoff und Schweißdraht korrelieren (detailliertere Betrachtung in Kapitel 5).

Diverse Untersuchungen, wie von [47, 50, 51] haben gezeigt, dass sich neben Primärpartikeln (Einzelpartikel) durch Ausflocken auch Ketten, Agglomerate und Aggregate bilden. Je nach eingesetzten Verfahren, Werkstoff und Schweißparametern variiert die Partikelmenge und -größe und es zeigen sich unterschiedliche Partikelmorphologien mit inhomogener Zusammensetzung. Primärpartikel weisen in der Regel eine Größe von wenigen Nanometern auf und agglomerieren sehr schnell aufgrund einer anfänglich extrem hohen Partikelkonzentration. In Abhängigkeit der Schweißparameter (z.B. Schutzgaszusammensetzung und Werkstoffkombinationen) verläuft die Agglomeration in unterschiedlichen Geschwindigkeiten, sodass in Kombination mit dem Abstand der Messeinrichtung zum Schweißprozess verschiedene Partikelgrößenverteilungen gemessen werden können. Ein Großteil der partikelförmigen Gefahrstoffe liegt bei einer multimodalen Verteilung im Bereich unter 1000 nm. Die typische Partikelanzahl liegt in diesem Partikelgrößenbereich in Abhängigkeit der oben genannten Faktoren im Bereich von 10^5 bis 10^8 Partikel pro cm.

[47, 50, 52 bis 56]

Morphologische Untersuchungen [26, 47, 57] zeigen, dass ein Großteil der Partikel kugelförmig ist und es sich in der Regel um kristalline Strukturen handelt. Dabei zeigen TEM-Aufnahmen (Transmissionselektronenmikroskopie) typischerweise Mischungen von Partikelgrößen mit kugelförmiger und facettierter Morphologie, oft in kettenartigen Strukturen.

Ausschlaggebend für das Schädigungspotential für den menschlichen Organismus sind maßgeblich die Partikelanzahlkonzentration, die spezifische Partikeloberfläche und die chemische Zusammensetzung der Partikel. Eine detailliertere Beschreibung des Schädigungsverhaltens ist in Kapitel 1 zu finden. In der Regel gibt es in jeder Schweißrauchzusammensetzung eine Komponente, die aufgrund der absoluten Menge und des Schädigungspotential die Gefährdungsbewertung dominiert. Diese wird als Leitkomponente bezeichnet und maßgeblich für die Bewertung der Gefährdung verwendet. [5]

3 Mechanismen der Schweißrauchentstehung

Physikalische Zusammenhänge und Lichtbogenphänomene

Schweißrauche sind kleine Partikel auf der Submikrometerskala, welche sich aufgrund ihrer geringen Größe zu Aerosolen entwickeln können und dann beim Einatmen eine gesundheitsgefährdende Wirkung entfalten können. In einigen Arbeiten (z.B. [58]) wurde vorgeschlagen, dass der Rauch zumindest teilweise aus feinen Metallspritzern bestehen könnte. Obwohl es eine Korrelation zwischen Spritzerbildung und Rauchbildung gibt, argumentiert der Autor von [59] dafür, dass die Spritzer gewöhnlich einen relativ großen Durchmesser haben, so dass sie aufgrund ihres Gewichts schneller absinken und daher unwahrscheinlich als Aerosole in der Luft verbleiben. Der Zusammenhang zwischen Spritzerbildung und Rauchbildung wurde auch in [60] untersucht, mit der Schlussfolgerung, dass die Spritzer nicht die maßgebliche Ursache für die Rauchbildung sind, sondern dass sowohl Spritzer als auch Rauchbildung eine gemeinsame Ursache haben, welche mit der Temperatur an der Schmelzoberfläche (von Tropfen, Schmelzbad und im Kurzschluss auch deren Vereinigung) zusammenhängt. [59] folgert daraus, dass es höchst wahrscheinlich ist, dass der überwiegende Anteil des Schweißrauches aus dem Metallampf im Prozess entsteht.

Der Verdampfungsprozess einer heißen Metalloberfläche hängt von der Oberflächentemperatur, der Verdampfungsenthalpie (der Energie, die notwendig ist um ein Metallatom aus der Metalloberfläche zu lösen und in die Dampfphase zu überführen) sowie dem Gegendruck ab, gegen den die Metallatome anströmen müssen, um der Oberfläche zu entweichen. Der Verdampfungsprozess lässt zwei gesonderte Zustände unterscheiden: Der erste ist die Verdampfung, in der Oberflächentemperaturen oberhalb des Siedepunktes vorliegen, also ein Sieden eintritt. Hier wird ein sehr starker Massenstrom beobachtet, da sich in diesem Fall eine Strömung aus verdampften Atomen von der Oberfläche weg entwickelt, welche den Massentransport antreibt, siehe [61]. Der zweite Fall liegt vor, wenn die Oberflächentemperatur unterhalb des Siedepunktes liegt. Dabei kann ein Sättigungsdampfdruck angegeben werden, welcher unter der Annahme von Gleichgewichtsbedingungen einen Druck beschreibt, bei dem die Anzahl der aus der Oberfläche austretenden Atome sowie die aus der Umgebung zur Oberfläche zurückkondensierenden Atome im Gleichgewicht sind. Der Sättigungsdampfdruck lässt sich mit Hilfe der Clausius-Clapeyron-Gleichung beschreiben [59].

$$p_s = p_{Umgebung} \cdot e^{\left(\frac{H}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_b} - \frac{1}{T}\right)\right)}$$

T_b stellt hierbei die Siedetemperatur dar, R die universelle Gaskonstante und H die Verdampfungsenthalpie. Der Sättigungsdampfdruck p_s steigt also mit zunehmender Temperatur nahezu exponentiell an.

Obwohl die Prozesse beim MSG-Schweißen sich nur in den seltensten Fällen im Gleichgewicht befinden, liefert dieser Zusammenhang dennoch die Tendenz, dass die Verdampfungsverluste tendenziell exponentiell von der Oberflächentemperatur abhängen. Dennoch sind auch weitere Einflüsse, wie die Strömungs- und Druckbedingungen in unmittelbarer Nähe zur Oberfläche sowie die chemischen Prozesse und Zustände zu beachten. Insbesondere ist bei Werkstoffen mit einem geringen Siedepunkt, wie Aluminium-Magnesium-Legierungen, bereits bei gewöhnlichen Prozessparametern ein Sieden des abschmelzenden Drahtendes zu beobachten [62]. Die Grundlagen zur Bildung von Schweißrauchemissionen als Prozess der Verdampfung, Kondensation und Oxidation im Lichtbogen sind bereits seit längerer Zeit bekannt und in [63] formuliert.

Bei der Betrachtung der relevanten Schmelzeoberflächen wird deutlich, dass das Schmelzbad beim MSG-Schweißen für gewöhnlich eine relativ niedrige Oberflächentemperatur aufweist, wie zahlreiche Experimente belegen (bis 2400 K in [64], bzw. 1700-1800 K in [65] und [66]). Im Gegensatz dazu ist die Oberflächentemperatur am Tropfen je nach Prozessleistung deutlich höher ist (bis 3200 K in [65] und [67], oder auch zw. 2300 K-2800 K [68]). Aufgrund der exponentiellen Abhängigkeit des Sättigungsdampfdruckes von der Oberflächentemperatur, bedeutet dies, dass der überwiegende Anteil des Metaldampfes beim MSG-Prozess am freien Drahtende bzw. am Tropfen entsteht. Dies entspricht auch dem allgemeinen Konsens, in der Schweißphysikforschung [59].

Hierbei konnte z.B. in [58] und [69] gezeigt werden, dass die Rauchemissionsrate bei einem Schweißprozess ohne Kurzschlüsse und bei gleicher Abschmelzleistung relativ von der Tropfengröße abhängt, und zwar so, dass je größer der Tropfen, desto größer auch die Schweißrauchentstehungsrate. Dies liegt darin begründet, dass die Oberflächentemperatur des Tropfens mit zunehmender Tropfengröße an der Stelle der Lichtbogenanbindung steigt. Grund hierfür ist die endliche Wärmeübertragungsrate zwischen dem Schmelzpunkt und dem heißesten Punkt. Eine stärkere Überhitzung führt dann auch zu stärkerer Verdampfung und daher zu Schweißrauchentstehung. Dies ist besonders auffällig in Prozessen, die CO_2 als Schutzgas einsetzen. Hier geschieht die Anbindung sehr konzentriert unterhalb des Tropfens, was eine starke lokale Überhitzung und Verdampfung erzeugt. Im Gegensatz dazu steht ein gepulster Prozess gleicher Abschmelzleistung, bei dem die Tropfen im Puls durch die elektromagnetische Lorentz-

Kraft (Pincheffekt) abgezogen werden können. Dadurch werden die Tropfen einerseits kleiner, und andererseits wird ihnen nicht die Möglichkeit gegeben an der Oberfläche stark zu überhitzen und übermäßig zu verdampfen. Dieses Phänomen wurde auch in [70] experimentell und simulativ untersucht. Auch ist bekannt, dass Kurzschlüsse, bei denen eine Verbindung zwischen Drahtelektrode und Schmelzbad entsteht, zur Schweißrauchentstehung beitragen (empirisch belegt durch [71]). Der Grund dafür ist das explosive Auflösen der schmelzflüssigen Kurzschlussbrücke, bei der aufgrund von hohen Strömen hohe Temperaturen und vermehrt Metall Dampf entstehen, Spritzer ausgeworfen werden und aufgrund der explosiven Dynamik auch Verwirbelungen in der Schutzgasströmung entstehen können. Eine genaue Erklärung dieses Phänomen erfolgt in Kapitel 4.

Neben der Ursache für die Schweißrauchentstehung hat der Metaldampf auch starke Auswirkungen auf den Lichtbogen selbst, bei dem dieser unter anderem die räumliche Struktur der Temperaturverteilung im Plasma beeinflusst [72]. So verursachen bereits geringe Metaldampfanteile im Lichtbogen stark erhöhte Energieverluste durch Strahlungsemission [73], welche darin begründet sind, dass die Ionisierungsenergie von Metallen viel geringer ist als die der in der Regel verwendeten Schutzgase (Ar, He oder CO₂). Dadurch wird eine starke energetische Anregung der Atome und Ionen bereits bei niedrigeren Temperaturen verursacht, welche dann durch Abstrahlung relaxiert und damit die Plasmatemperatur in Bereichen mit Metaldampfanteilen (> 1%) bereits merklich absenkt. Dies geschieht auf einem Niveau, auf welchem die Strahlungsverluste und die für die Ionisierung notwendige Energie ein Gleichgewicht bilden. Mithilfe spektroskopischer Aufnahmen [72] sowie numerischer Simulationen [73] kann ebenfalls gezeigt werden, dass sich der Metaldampf im Zentrum der Plasmasäule konzentriert und im Wesentlichen vom Tropfen bis zum Schmelzbad strömt. Der Metaldampf ist also leichter ionisierbar als das Schutzgas. Auf ihn wirkt die nur auf geladene Teilchen wirkende elektromagnetische Lorentz-Kraft im Mittel stärker als auf das Schutzgas. Da die Lorentz-Kraft beim MSG-Schweißen im Allgemeinen vom Draht zum Schmelzbad und tendenziell von außen nach innen gerichtet ist, konzentrieren sich die Metaldampfteilchen (Ionen und Atome) im Kern der Plasmasäule und diffundieren eher nicht ungerichtet nach außen. Stattdessen strömen sie auf das Schmelzbad zu, wo sie entweder als Ionen an der Kathode kondensieren, oder als Atome über die Schutzgasströmung aus dem Bereich des Schmelzbades heraus transportiert werden. Theoretische Berechnungen [74] gehen davon aus, dass ein überwiegender Anteil des ionisierten Metaldampfes an der Kathode (negativ geladen) kondensiert. Das semi-empirische Modell von [58] ergibt sogar je nach Drahtvorschubgeschwindigkeit eine Kondensationsrate von 16-80 % des gesamten am Tropfen erzeugten Metaldampfes. Dennoch geben die Autoren zu bedenken,

dass noch weitere experimentelle Arbeit notwendig ist, um die Kondensationsrate am Schmelzbad zu bestätigen. Nach Vorliegen solcher Erkenntnisse könnten später auch Wege gesucht werden, die Kondensationsrate am Schmelzbad über einen geeignet eingestellten Schweißprozess zu steigern.

Aus Simulationen des Schweißprozesses können die Temperaturverteilung im Lichtbogen, die Gasströmung sowie daraus folgend die Verteilung des Metaldampfes berechnet werden. Zudem sind auch die Bereiche in denen der Metaldampf in Nanopartikel umgewandelt wird und die Konzentration der Nanopartikel außerhalb des Lichtbogens berechenbar. [43]

Es existieren Simulationen, die Unterschiede bei der Verwendung verschiedener Schutzgase aufzeigen (hier Argon und CO_2) [75]. Aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Wärmeleitfähigkeit dieser beiden Gase entwickelt sich eine unterschiedliche Anbindung des Lichtbogens an der Drahtelektrode bzw. am Tropfen. Bei dem Schutzgas CO_2 ist der Lichtbogen eng unter dem Tropfen eingeschnürt, sodass eine Tropfenablösung erschwert ist (siehe auch Kapitel 5).

Im Falle von Argon findet eine völlige Umschließung des Tropfens durch den Lichtbogen statt. Der Metaldampf wird hier direkt vom Tropfen über den Lichtbogen abwärts geleitet, wo er dann zur Schweißrauchbildung beitragen kann. Im Falle von CO_2 wird jedoch ein großer Teil der Tropfenoberfläche nicht vom Lichtbogen umfasst, sodass auch ein großer Teil des Metaldampfes nie in den Lichtbogen eintritt, sondern bereits am Tropfen Schweißrauch bilden kann. Da dieser Dampf nie auf die Plasmatemperaturen aufgeheizt wurde, ergeben sich geringere Abkühlraten, und in der Folge deutlich größere berechnete Rauchpartikeldurchmesser. Obwohl diese Simulation auf starken Vereinfachungen basiert (z.B. Axialsymmetrie und laminare Strömung) und daher keine quantitativen Aussagen erlaubt, können dennoch qualitative Eindrücke der zugrundeliegenden Zusammenhänge gewonnen werden, die auch experimentell bestätigt wurden. In [76] sind experimentelle Aufnahmen durchgeführt worden, in denen die Konzentration des Metaldampfs beim CO_2 -Schweißen im Gegenlicht deutlich wird.

Zusätzlich hat die Wahl des Schutzgases auch noch einen Einfluss auf die chemische Zusammensetzung und damit auf die Schweißrauchbildung. So kann ein Aktivgasanteil im Schutzgas (z.B. CO_2 oder O_2) zur Bildung von Oxiden führen, welche die Oberflächenspannung der Schmelze oder auch den Sättigungsdampfdruck beeinflussen, und dementsprechend die Schweißrauchbildung beeinflussen können [77]. Ebenso kann die Präsenz von Legierungselementen wie Kohlenstoff, Mangan oder Chrom einen Einfluss auf Entstehung und Morphologie der Schweißrauchpartikel haben. [77]. Eine weitere Diskussion zu dem Einfluss der Schutzgase auf diese Faktoren findet sich in Kapitel 5.

Schweißrauchpartikelbildung

Im Zuge des Prozesses der Schweißrauchpartikelbildung muss der vor allem an der Anode entstehende Metaldampf zunächst seinen ionisierten Zustand verlassen, z.B. durch Strömung in kühlere Bereiche des Lichtbogens, um nicht mehr den elektromagnetischen Kräften zu unterliegen und sich „frei“ im Strömungsfeld der Gasströmung bewegen zu können. Zusätzlich müssen diese Metaldampf-atome aus der warmen Umgebung des Lichtbogens heraustreten und abkühlen, um über einen Prozess von Übersättigung über Nukleation zur Koagulation von Schweißrauchpartikeln zu führen (Abbildung 8).

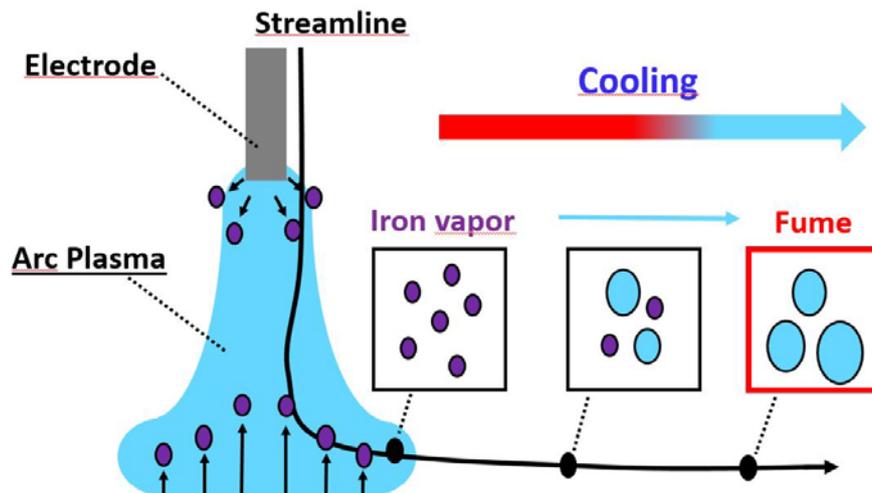


Abbildung 8: Schematische Abbildung des Entstehungsprozesses vom Metaldampf zum Schweißrauch modifiziert nach [78]

Dabei bestimmen Faktoren wie chemische Zusammensetzung [76, 79], Abkühlrate [78, 80] (je schneller abgekühlt wird, desto kleiner sind die Partikel), Ionisierungsgrad/Ladungsübertragung auf die entstehenden Rauchpartikel [78, 81] (negativ geladene Partikel stoßen sich eher ab und koagulieren weniger stark) sowie Fluktuationen im Temperaturfeld des Lichtbogens [82] die Größe und Anzahl der Schweißrauchpartikel.

Andere Untersuchungen zeigen auch einen zeitlichen Zusammenhang, also eine mit der Zeit zunehmende Anzahl größerer Partikel [50], was entsprechend zu einer veränderten Partikelgrößenverteilung abhängig vom Ort der Exposition und den jeweiligen Strömungsverhältnissen führt. Die Größe der Schweißrauchpartikel ist insofern von großer Bedeutung, als das große Partikel zwar viel Masse besitzen und daher starken Einfluss auf massenbasierte Gefährdungsbeurteilung haben, sich allerdings nicht so lange in einem Aerosolzustand befinden und darüber hinaus tendenziell gesundheitlich unbedenklicher sind als vergleichbare feinere Partikel. Eine detaillierte Diskussion dazu findet sich in Kapitel 2.

Zusammenfassend kann der Mechanismus der Schweißrauchentstehung folgendermaßen formuliert werden: Aufgrund einer Erhitzung der Schmelzeoberfläche, durch Lichtbogenanbindung

oder volumetrische Widerstandserwärmung im Kurzschluss entsteht Metalldampf. Dieser Metalldampf wird je nach Strömungsbedingungen durch den Lichtbogenbereich transportiert und erfährt je nach örtlichen Bedingungen eine Abkühlung. Nachfolgend kondensiert er durch Übersättigung und fällt durch Nukleation zu Nanopartikeln aus. Alternativ wird er durch die Strömungsbedingungen zu einer Grenzfläche (Schmelzbad oder Festkörperoberfläche) transportiert und kondensiert dort. Durch die Kondensation leistet er allerdings keinen Beitrag mehr zur Schweißrauchentstehung.

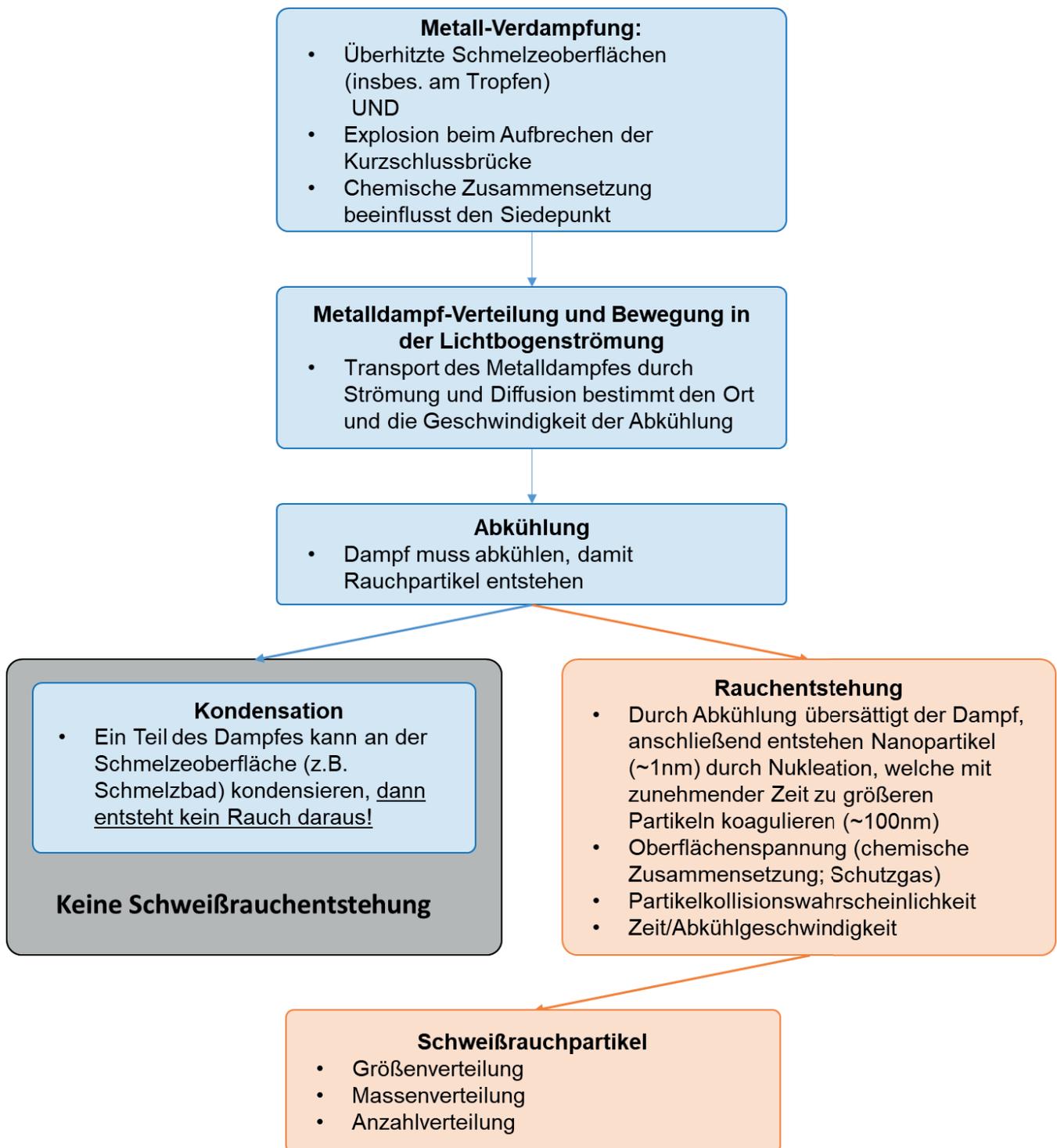


Abbildung 9: Schematische Darstellung der physikalischen Zusammenhänge der Schweißrauchentstehung

Die ausgefallenen Nanopartikel koagulieren dann, je nach Partikelanzahldichte, chemischer Zusammensetzung (u.a. Oberflächenspannung), Strömungsbedingungen und Temperatur zu größeren Partikeln, so dass eine bestimmte Größenverteilung, Massenverteilung und Anzahlverteilung der Schweißrauchpartikel entsteht. Die beschriebenen wesentlichen Zusammenhänge sind in Abbildung 9 als schematische Darstellung veranschaulicht.

4 Prozesstechnische Einflussfaktoren

Allgemeiner Zusammenhang zwischen Lichtbogenparametern und Einstellgrößen

Unter prozesstechnischen Einflussfaktoren wird hier vordergründig der Einfluss der Prozessleistung und des zeitlichen Verlaufs des Schweißstroms und der Schweißspannung diskutiert. Auf Grundlage des transienten Prozessverlaufs lassen sich zunächst der Einfluss des Werkstoffüberganges auf die Schweißrauchemission und ferner der Einfluss spezifischer Eingriffe sogenannter geregelter Prozessvarianten (siehe DVS Merkblatt 0973-1 [83]) diskutieren.

Mit steigender Prozessleistung und in Abhängigkeit der Randbedingungen, wie dem verwendeten Schutzgas, lassen sich verschiedene Arten des Werkstoffüberganges, sogenannte Lichtbogenarten, beobachten. Allgemein lassen sich hinsichtlich der Schweißrauchemission zwei grundlegend verschiedene Vorgänge separieren. Dabei geht der Schweißzusatz zum einen im Kurzschluss in das Schmelzbad über und zum anderen kurzschlussfrei und damit abtropfend im Lichtbogen. Über die zuvor genannten Randbedingungen und Parameter sind die Übergänge fließend (Übergangslichtbogen) und können durch die transiente Steuerung des Schweißstroms und der Schweißspannung in Abhängigkeit der Abschmelzleistung aktiv eingestellt werden.

Dabei konnten in mehreren Arbeiten Zusammenhänge zwischen den zuvor erwähnten Lichtbogenarten und der Schweißrauchemission beobachtet werden. Qualitativ ließ sich vielfach ein Anstieg der Schweißrauchemission bei geringer Schweißspannung (Kurzlichtbogen) bis zu einem lokalen Maximum im Übergangslichtbogen beobachten. Mit steigender Spannung ließ sich ein Schweißrauchminimum mit Beginn des vorwiegend kurzschlussfreien, kurzen Sprühlichtbogens beobachten. Dem folgen wiederum mit steigender Spannung höchste Emissionen im langen Sprühlichtbogen (Abbildung 10). [84 bis 86]

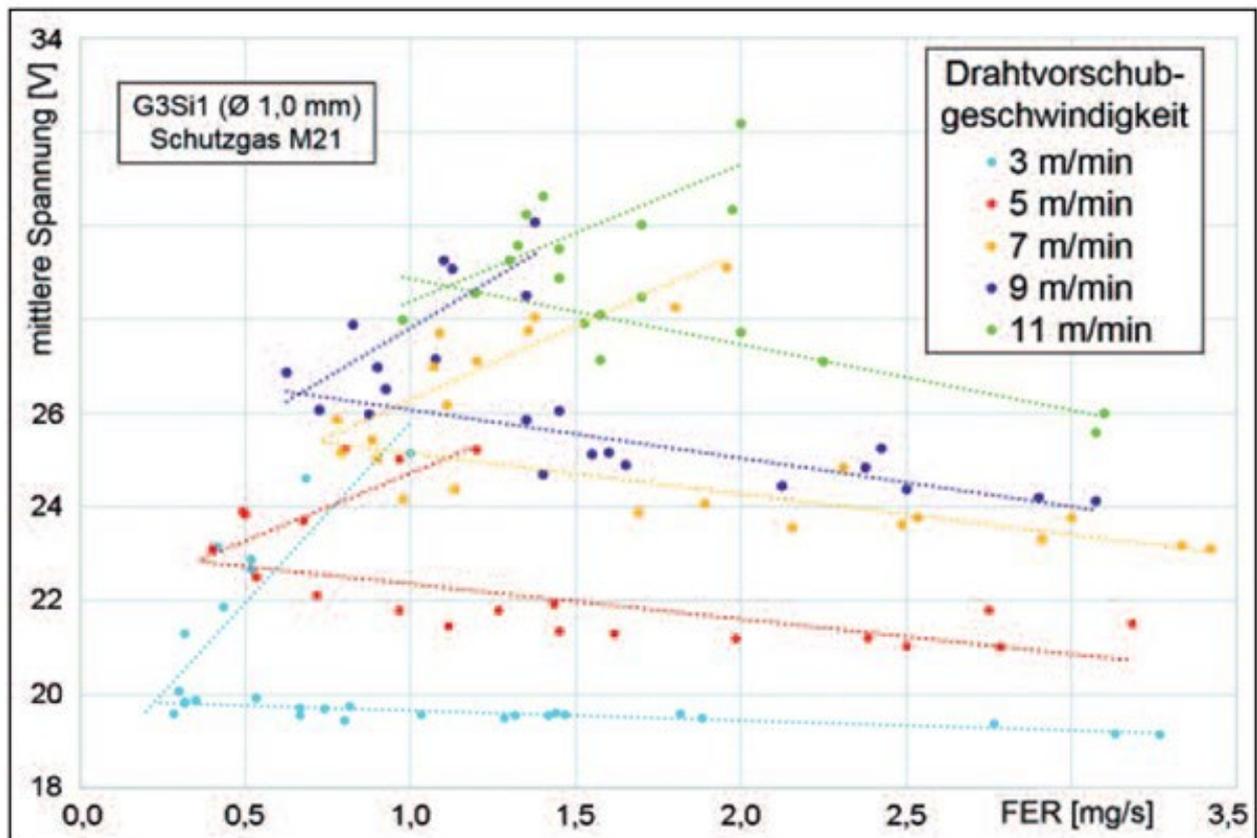


Abbildung 10: Abhängigkeit zwischen mittlerer Spannung und Rauchemissionsrate [85]

Allgemein steigende Rauchemissionsrate wurde mit steigender Schweißspannung zudem von [87] und mit steigendem Schweißstrom von [88] beobachtet.

An dieser Stelle muss jedoch betont werden, dass beim Metallschutzgasschweißen die eingebrachte Prozessleistung, der eigentliche Werkstoffübergang und das umgeschmolzene Drahtvolumen inhärent korrelieren, jedoch gleichzeitig spezifische Einflüsse auf die Schweißrauchemission haben. Diese Einflüsse lassen sich somit nur schwer differenzieren, besonders da sich die Randbedingungen in den betrachteten Arbeiten z.T. deutlich ändern.

Kurzschlussbehafteter Werkstoffübergang (vorwiegend Kurzlichtbogen)

In [58] wird ersichtlich, dass bei einem Werkstoffübergang im Kurzschluss (Verbindung zwischen Drahtelektrode und Schmelzbad) Schweißrauchemissionen entstehen. Der elektrische Widerstand dieser Verbindung ist so gering, dass der Lichtbogen erlischt, da der gesamte Strom über die Verbindung aus flüssigem Metall übertragen wird. Hierbei verursachen die elektromagnetischen Kräfte (Pincheffekt) eine „Einschnürung“ der Metallbrücke, welche umso kraftvoller und damit schneller geschieht, je stärker die Krümmung der Einschnürung und je enger die Brücke ist. Es handelt sich hierbei also um eine selbstverstärkende Instabilität. Zusätzlich

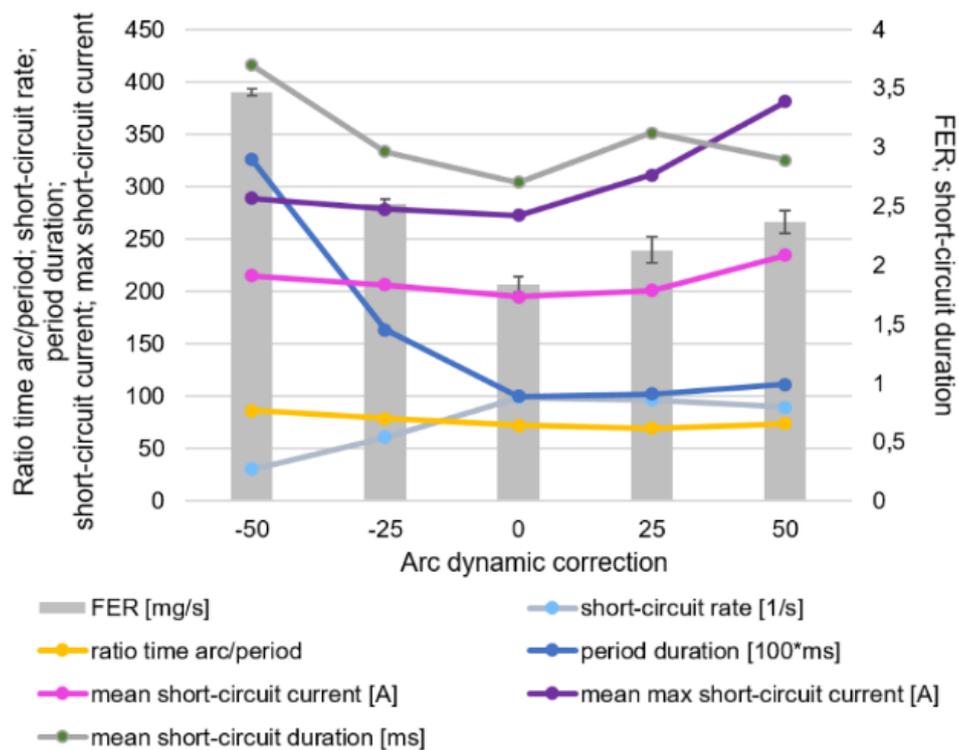
kommt es zu dem Effekt, dass die immer enger werdende Metallbrücke eine immer höhere Stromdichte aufweist, die zu einer immer höheren Erhitzung führt, die wiederum zu einem immer höheren elektrischen Widerstand führt, der wiederum zu einer zusätzlichen Erwärmung führt. Es handelt sich hierbei also auch um einen selbstverstärkenden „Run-away“ Prozess, welcher zu einem Punkt führt, an dem die Metallbrücke derartig eng und heiß ist, dass sie explosionsartig verdampft und der Lichtbogen sich anschließend neu entzündet, vgl. [89, 90]. Dies bewirkt auch Verwirbelungen in der Gasströmung, so dass es zu einer beschleunigten Abkühlung kommt und damit zu kleineren und damit gefährlicheren Rauchpartikelgrößen, siehe auch [70].

Eine Untersuchung in [91] betrachtete einen Kurzlichtbogenprozess und die daraus resultierende Schweißrauchentstehung in Abhängigkeit von der Prozessstabilität für die ein Maßstab definiert wurde als:

$$IV_{sc} = \frac{\sigma_{tsc}}{t_{sc}} + \frac{\sigma_{tarcing}}{t_{tarcing}}$$

Wobei σ_{tsc} die Standardabweichung der mittleren Kurzschlussdauer ist, $\sigma_{tarcing}$ die Standardabweichung der mittleren Lichtbogenphasendauer ist, t_{sc} die mittlere Kurzschlussdauer ist und $t_{tarcing}$ die mittlere Lichtbogenphasendauer ist.

Die Untersuchung konnte keine Abhängigkeit der Schweißrauchentstehung von der Prozessstabilität IV_{sc} feststellen und vermutet daher den Einfluss in Kurzschlussstrom, Tropfendurchmesser vor Ablösung, Lichtbogenlänge und Lichtbogenbrennzeit, in Übereinstimmung mit den in dieser Literaturrecherche vorgefundenen Ergebnissen. Bei steigender Instabilität kann es zwar zu ungünstigeren Konstellationen aus großem Schmelzbad und besonders eruptiver Kurzschlussauflösung kommen, als bei einem stabileren Arbeitspunkt mit geringer Spritzerbildung. Jedoch kann dieser stabilere Arbeitspunkt durch eine höhere Prozessleistung erzielt worden sein, die einen stärkeren Einfluss auf die Rauchemissionsrate hat.



In [92] konnte über eine Veränderung der Einstellgröße „Dynamik“ ein Einfluss auf die Rauchemissionsrate ausgeübt werden. Dabei wurden Prozesskenngrößen (differenzierte Prozessmerkmale) identifiziert, die Aufschluss über die zu erwartende Schweißrauchemission geben können (Abbildung 11). Ein ähnlicher Ansatz erfolgte in [93].

Kurzschlussfreier Werkstoffübergang (vorwiegend Sprühlichtbogen)

Im Gegensatz zum kurzschlussbehafteten Werkstoffübergang stehen bei höherer Prozessleistung andere Entstehungsmechanismen der Rauchemissionsrate im Vordergrund, die höhere Emissionen verursachen können. So konnte [51] bereits anhand weniger Messungen demonstrieren, dass im feintropfigen Sprühlichtbogen bei 30,5 V Schweißspannung eine höhere Rauchemissionsrate messbar ist als bei 20,5 V. Diese Beobachtung führte [51] auf die größere Tropfenoberfläche und damit auf das erhöhte Verdampfungspotential zurück. Im Gegensatz dazu findet man in [58, 69] die Beobachtung, dass kleinere Tropfen mit weniger Schweißrauchemission korreliert ist. Dies zeigt eben deutlich, dass es sehr schwierig ist, einzelne Einflussgrößen zu isolieren, da sie hochlinear miteinander verknüpft sind, so dass oft auch die Dokumentation der genauen experimentellen Randbedingungen nicht ausreicht um die Einflüsse der einzelnen Parameter widerspruchsfrei zu identifizieren.

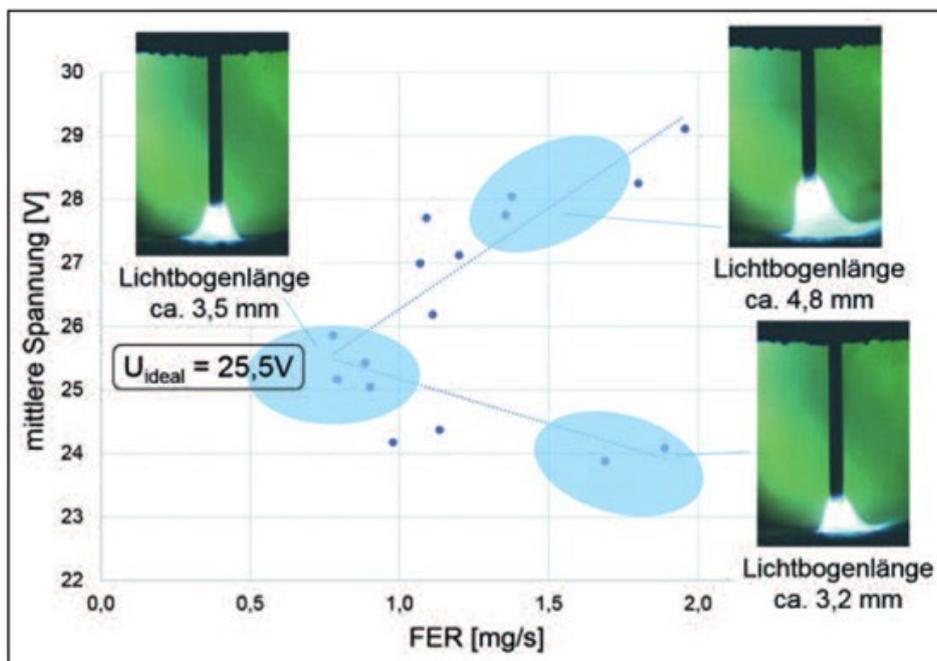
Gesteuerter Werkstoffübergang (vorwiegend Impulslichtbogen)

Die zuvor beschriebenen Arbeiten untersuchten vornehmlich konventionelle Metallschutzgasschweiß-Prozesse auf Grundlage des sogenannten inneren Selbstaugleichs. In ihrer einfachsten Form basieren diese Prozesse auf Schweißgeräten, die durch ihren Aufbau oder Regelung eine nahezu konstante Schweißspannung bereitstellen und damit bei konstanter Drahtvorschubgeschwindigkeit den Schweißprozess stabilisieren. Dieser Effekt beruht darauf, dass im Rahmen des Leistungsvermögens des Schweißgerätes bei geringem Widerstand der Prozesswirkstrecke z.B. bei kurzem Lichtbogen mehr Strom fließt als bei einem langen Lichtbogen mit hohem Widerstand. Die Änderung der Lichtbogenlänge verhält sich somit antiproportional zum Schweißstrom, der in diesem Fall wiederum Einfluss auf die abgeschmolzene Menge des Schweißzusatzes nimmt. Im Falle eines Kurzschlusses bricht der Widerstand der Prozesswirkstrecke auf einen Bruchteil des brennenden Lichtbogens ein, sodass der Strom entsprechend der eingestellten Drossel bzw. Dynamik rapide steigt und den zuvor beschriebenen Aufbruch der Kurzschlussbrücke einleitet. Bei höheren Schweißspannungen im Sprühlichtbogen begünstigen die am Schweißtropfen wirkenden Kräfte, insbesondere die Lorenzkraft, bzw. der sog. „Pinch-Effekt“ den Werkstoffübergang ohne Kurzschlussbildung. Dabei stellt sich ein stationärer und nahezu konstanter Arbeitspunkt aus Schweißstrom und Schweißspannung ein. Demgegenüber lässt sich der Werkstoffübergang nicht zuletzt auf Grundlage aktueller Invertertechnologie der Schweißgeräte auch kontrolliert steuern. Mit dem sogenannten Impulslichtbogen wird die Tropfenablösung durch gezielte, i.d.R. Strom-Impulse, erzwungen. Der Schweißprozess besteht somit aus vordergründig deterministischen Zyklen, in denen sich Phasen mit hohem Schweißstrom und Phasen mit niedrigem Schweißstrom abwechseln. Durch die zeitlich begrenzte Nutzung hoher Ströme kann der Pinch-Effekt somit auch bei grundsätzlich niedrigen Prozessleistungen effizient genutzt werden. Somit können bei niedrigen Drahtvorschüben Kurzschlüsse vermieden werden, die konventionell nur durch hohe Leistungsspitzen aufgelöst werden können. Auch bei höheren Drahtvorschüben kann mit dem Impulslichtbogen die Tropfenablösung deterministisch gesteuert, und das Leistungsniveau im Vergleich zu einem spritzerarmen Sprühlichtbogen gesenkt werden.

Hinzu kommt, dass die für den Pinch-Effekt verantwortliche Lorentz-Kraft quadratisch von der elektrischen Stromdichte abhängt. Somit erzeugen die kurzen Stromimpulse eine für die Prozessleistung überproportionale Kraftwirkung in der Schmelze, so dass es auch zu einer verstärkten Durchmischung also auch einem verstärkten konvektiven Wärmetransport im Tropfen kommen kann. Dies kann eine lokale Überhitzung der Schmelzeoberfläche und damit einhergehende Verdampfung reduzieren.

In mehreren Arbeiten [84, 86, 94] ließ sich somit zeigen, dass der Impulslichtbogen eine grundsätzlich geringere Rauchemissionsrate aufweist als vergleichbare, konventionelle Prozesse.

In Untersuchungen von [85] konnte eine steigende Rauchemissionsrate mit sinkender Schweißspannung beobachtet werden, die zu einer erhöhten Kurzschlussrate führte. Dementsprechend hat auch die Lichtbogenlänge einen Einfluss auf die Schweißrauchentstehung, welche auch in Zusammenhang mit Spannung, Abschmelzleistung und Kurzschlussfrequenz steht [85]. Es konnte beobachtet werden, dass sowohl eine zu große Lichtbogenlänge (also bei im Verhältnis zur Abschmelzleistung zu hoch eingestellter Spannung) als auch eine zu kleine Lichtbogenlänge (also bei im Verhältnis zur Abschmelzleistung zur geringer Spannung) eine erhöhte Schweißrauchentstehung zu beobachten ist (Abbildung 12).



Mit dem Impulslichtbogen lässt sich zudem in Grenzen die Tropfengröße einstellen, die sich positiv auf die Schweißrauchemission auswirken kann. In [95] und [58] konnte modelliert werden, dass kleinere Tropfen mit einer geringeren Rauchemissionsrate assoziiert werden können, was zunächst im Widerspruch zu experimentellen Untersuchungen von [51] steht. In [39] konnte ebenso beobachtet werden, dass ein Prozess mit feiner sprühlichtbogenartiger Tropfenbildung im Impulslichtbogen höhere Rauchemissionsrate verursachte, was mit der vergrößerten Tropfenoberfläche erklärt werden könnte. Eine Modulation mit einer Tropfenablösung pro Puls bei

einem Pulsstrom von 450 A wurde darin als vorteilhaft bewertet [39]. Dabei muss jedoch erwähnt werden, dass die jeweiligen Untersuchungen unterschiedliche Randbedingungen sowie Leistungsbereiche berücksichtigen, die einen allgemeinen Vergleich erschweren. Dies ist wie bereits ein allgemeines Problem der hier diskutierten Untersuchungen, die es bisher nicht erlauben über einzelne, sich teilweise widersprechende Hypothesen hinaus eindeutige Ursache-Wirkungszusammenhänge zu identifizieren.

Geregelter Werkstoffübergang (Vorwiegend geregelte Kurzschlussauflösung)

Neben der zuvor beschriebenen Steuerung des Werkstoffübergangs ist mit modernen Schweißgeräten zudem eine aktive Reaktion auf Prozessereignisse, insbesondere die Kurzschlussauflösung möglich. In diesen Fällen kann durch elektrische Bauteile im Schweißgerät der Schweißstrom kurz vor Kurzschlussauflösung herabgesetzt und damit Leistungsspitzen vermieden werden, die sonst unvermeidbar sind. Weitere Möglichkeiten bieten Schweißgeräte mit Kurzschlussauflösung über den mechanischen Rückzug der Drahtelektrode. Alle Varianten haben gemein, dass der Werkstoffübergang im Kurzschluss stattfindet, jedoch unter deutlich gesenkter Energieeinbringung, die mit einer geringeren Spritzerbildung und häufig deterministischerem Prozessverhalten einhergeht.

In [86] konnte gezeigt werden, dass der sogenannte Surface Tension Transfer® (STT), eine Prozessvariante mit geregelter Kurzschlussauflösung, über weite Leistungsbereiche geringere Rauchemissionsrate erzeugt als konventionelle Schweißprozesse. In [39] konnte ebenso gezeigt werden, dass der sogenannte coldArc® über verschiedene Gasgemische eine geringere Rauchemissionsrate aufwies als konventionelle Kurzlichtbogenprozesse (Abbildung 13). Auch in [39, 96, 97] und [98] konnte gezeigt werden, dass insbesondere der Cold Metal Transfer® (CMT) eine niedrige Rauchemissionsrate verursacht, der hingegen zu den Prozessvarianten mit reversiblen Drahtvorschub gehört. In Abbildung 14 ist sichtbar, dass die Rauchemissionsrate bei niedrigen Schweißströmen ähnlich niedrige Werte erreicht wie der Impulslichtbogen.

Auch in höheren Leistungsbereichen lässt sich mit einer schnellen Reaktion auf Kurzschlusserscheinungen eine Reduktion der Schweißrauchemissionen erzielen. Der sogenannte ForceArc®, ein fast unter der Werkstückoberfläche brennender forciertes Sprühlichtbogen, wird durch die schnelle Reaktion auf Kurzschlusserscheinungen möglich. Bei konventionellen Sprühlichtbögen würden entsprechende Kurzschlusserscheinungen bei vergleichbarer Lichtbogenlänge zu einer explosiven Kurzschlussauflösung und hoher Prozessinstabilität führen. Da der ForceArc® hingegen vornehmlich unter der Werkstückoberfläche brennt, kann vermutet werden, dass diese Variante auch aufgrund der Kondensationsflächen des Werkstücks eine gerin-

gere effektive Schweißrauchemission aufweist [99]. Dieser Erklärungsansatz ist seit Langem prinzipiell bekannt und wird durch Formulierungen aus [100] unterstützt, in denen niedrige Lichtbogenlängen und tiefe Einbrände mit geringen Schweißrauchemissionen in Verbindung gebracht werden.

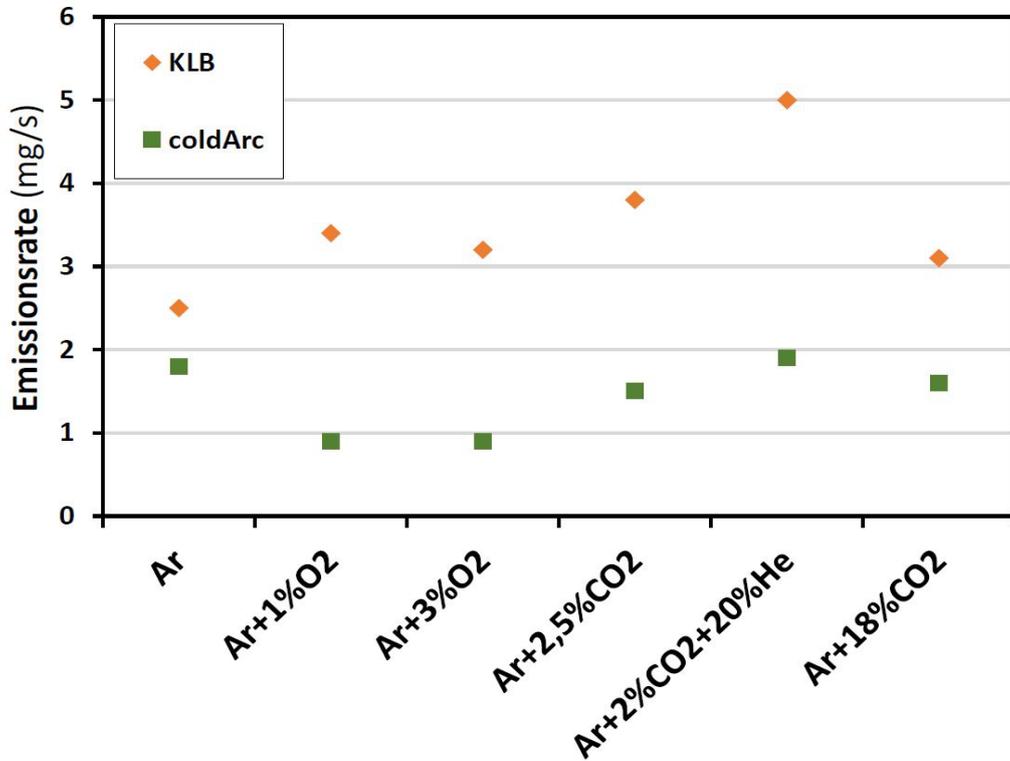


Abbildung 13: Rauchemissionsrate in Abhängigkeit des Schutzgases für den coldArc Prozess im Vgl. zum konv. KLB modifiziert nach [39]

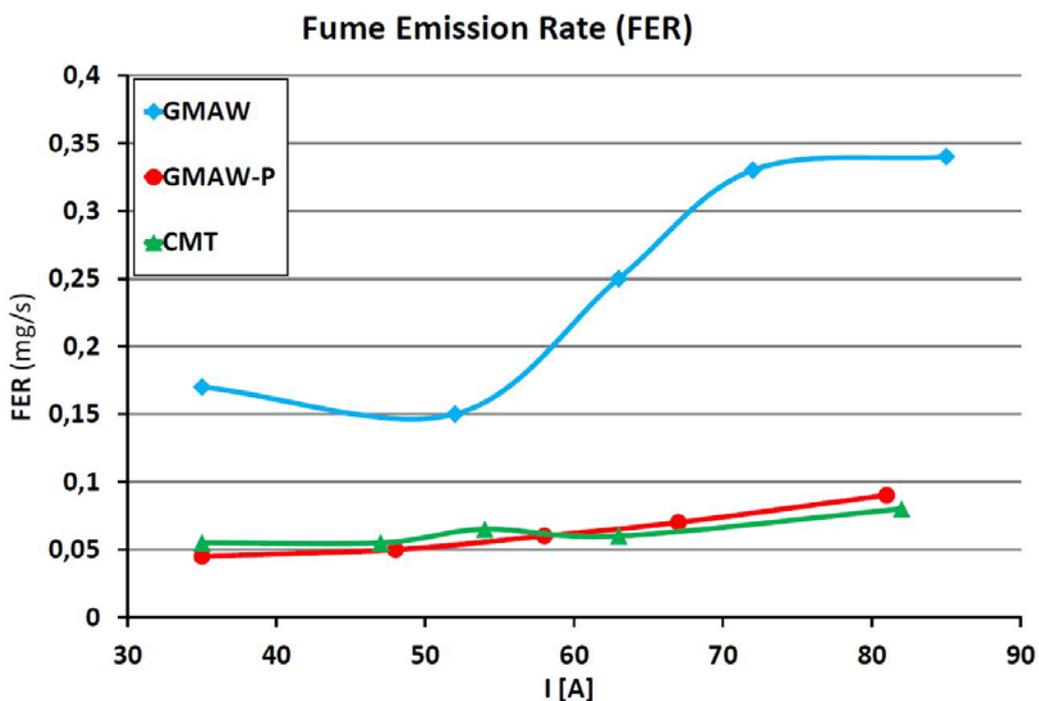


Abbildung 14: Rauchemissionsrate in Abhängigkeit des Schweißstromes für den CMT-Prozess modifiziert nach [98]

5 Werkstoffbedingte Einflussfaktoren (Grundwerkstoff / Draht / Gas)

Auswirkung des Grundwerkstoffes und der Schweißzusätze (Massivdraht/Fülldraht)

Der Grundwerkstoff und die Drahtelektrode als Teil des Schweißzusatzes üben auf unterschiedliche Weise und in verschiedenem Maße Einfluss auf die Schweißrauchemission aus. Dabei besteht allgemeiner Konsens, dass beim MSG-Schweißen ca. 95% der Schweißrauchemission aus dem Schweißzusatz entstammen. [44, 57]

Der Grundwerkstoff bestimmt jedoch mit der schweißtechnischen Fügeaufgabe die Auswahl der Schweißzusätze. Wie in Kapitel 3 und in Teil 2 dieses Kapitels beschrieben, hat insbesondere das Schutzgas vor allem durch Beeinflussung der Einstellparameter der Stromquelle (Kennlinie) und des Werkstoffübergangs einen signifikanten Einfluss auf die Schweißrauchentstehung. Zusammen mit dem Schutzgas beeinflusst auch die chemische Zusammensetzung die benötigte Energie zum Aufschmelzen des Schweißdrahtes bzw. den Arbeitspunkt auf der Kennlinie der Schweißstromquelle. MSG-Schweißungen mit hochlegierten Schweißzusätzen weisen in der Regel niedrigere Schweißrauchemissionen als niedriglegierte Schweißungen identischer Abschmelzleistung auf. In Abbildung 15 sind exemplarisch die Rauchemissionsraten für unlegierte und hochlegierte Massivdrahtelektroden sowie für einen hochlegierten Fülldraht für verschiedene Leistungsbereiche bzw. Lichtbogenarten dargestellt. Mit dem STT-Prozess ist zusätzlich beispielhaft ein spritzerreduzierter Kurzlichtbogen enthalten.

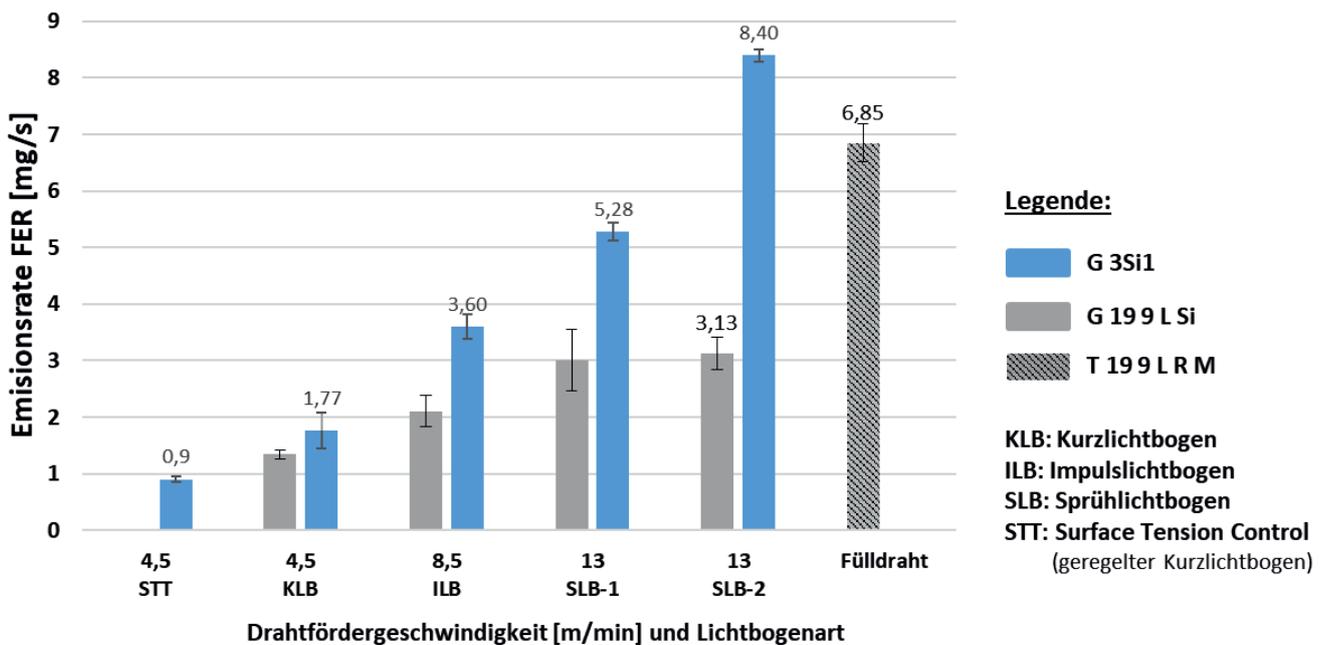


Abbildung 15: Rauchemissionsrate für unlegierte und hochlegierte Massivdrahtelektroden sowie für einen hochlegierten Fülldraht modifiziert nach [101]

Es zeigt sich, dass mit Ausnahme des speziellen STT-Prozesses hochlegierte Schweißzusätze signifikant weniger Schweißrauch emittieren als unlegierte Schweißzusätze. In der Regel sind dafür maßgeblich die unterschiedlichen Schutzgase (hier Ar+18%CO₂ für unlegiert und Ar+2,5%CO₂ für hochlegiert) aus den weiter unten beschriebenen Gründen verantwortlich. Der hochlegierte Rutilfülldraht weist im Vergleich zum hochlegierten Massivdraht eine mehr als doppelt so hohe Rauchemissionsrate auf. Untersuchungen zu Fülldrähten von [102] zeigen für Standard- sowie Impulslichtbogenprozesse eines hochlegierten Rutilfülldraht ebenfalls deutlich höhere Emissionswerte im Vergleich zum Massivdraht. Allerdings muss zwischen den verschiedenen Fülldrahttypen differenziert werden. Der Metallpulverfülldraht weist in diesen Untersuchungen im Vergleich zum Massivdraht für beide Prozessarten sogar geringere Emissionswerte auf. In den Untersuchungen von [103] werden zum Teil konträre Ergebnisse aufgeführt. Hochlegierte Rutil und Metallpulver Fülldrähte emittieren in der Regel weniger und basische Fülldrähte mehr Schweißrauch als der Massivdraht (Abbildung 16). Bei den unlegierten Fülldrähten weist der Rutil Fülldraht ein ähnliches Niveau wie der Massivdraht auf, aber der basische sowie der Metallpulver Fülldraht erzeugen eine höhere Rauchemissionsrate.

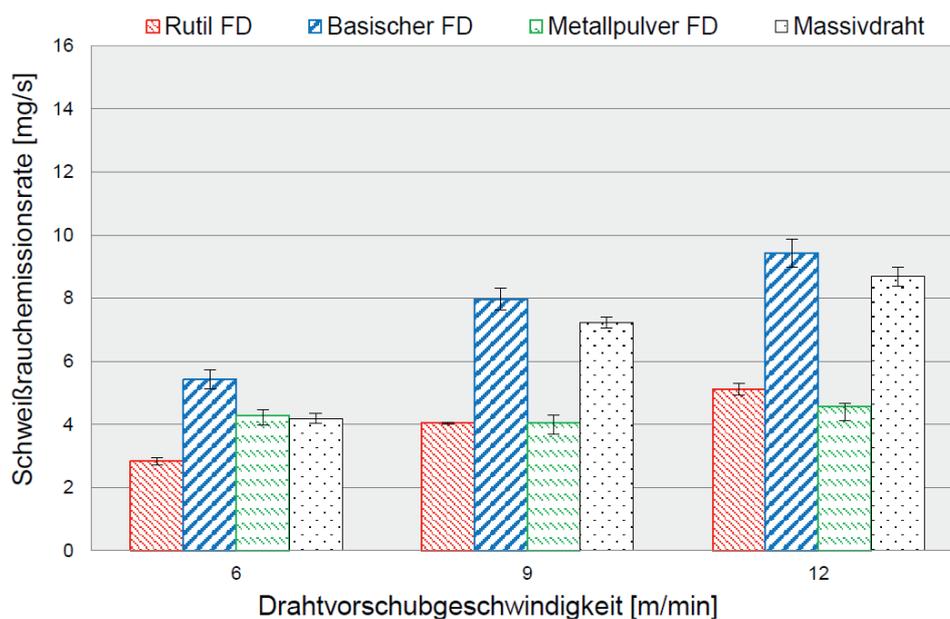


Abbildung 16: Rauchemissionsrate hochlegierter Fülldrähte in Abhängigkeit des Füllungstyps [103]

Sehr hohe Emissionsraten bei schlackebildenden Fülldrähten werden durch weitere Untersuchungen beschrieben [104] und sind in Form von abschätzenden Angaben (Abbildung 7) in die Technischen Regeln für Gefahrstoffe 528 [5] aufgenommen. Insbesondere selbstschützende (schutzgasbildende) Fülldrähte weisen dabei zum Teil um den Faktor 10 erhöhte Rauchemissionsraten auf. Dabei gilt es zusätzlich zu beachten, dass sich gerade bei schutzgas- oder schlackebildenden Fülldrahtelektroden im Allgemeinen bei gleicher Drahtvorschubgeschwindigkeit und

identischem Drahtdurchmesser im Vergleich mit Massivdrahtelektroden geringere Abschmelzleistungen einstellen. Außerdem bewirkt der inhomogene Querschnitt eine inhomogene Stromdichteverteilung und damit einen andersartigen Lichtbogenansatz am Drahtende sowie eine individuelle Charakteristik des Werkstoffübergangs, der die Schweißrauchemissionsbildung beeinflusst. Auch der Drahtdurchmesser allgemein wirkt sich auf die Emissionen aus. Gründe dafür sind unter anderem die höhere Abschmelzleistung und das damit verbundene höhere Leistungsniveau (siehe auch Kapitel 4). [102] Untersuchungen [105] mit Fülldrähten und dem Impulslichtbogenverfahren zeigen, dass bei dem Metallpulverfülldraht durch geeignete Impulsparameter eine drastische Reduktion der Schweißrauchemission erzielt werden kann. Bei den rutil und basisch gefüllten Elektroden konnte hingegen keine Verbesserung im Emissionsverhalten erreicht werden.

Die chemische Zusammensetzung der Schweißrauchpartikel wird maßgeblich durch die chemische Zusammensetzung des Grundwerkstoffes, aber insbesondere des Schweißdrahtes bestimmt. Allerdings besteht in der Regel keine lineare Korrelation zwischen den Gehalten, weil in der Lichtbogenatmosphäre elementspezifisches Oxidationsverhalten vorliegt. [106] Abbildung 17 zeigt exemplarisch die chemische Zusammensetzung in Massenprozent für unlegierte und hochlegierte Massivdrahtelektroden sowie für einen hochlegierten Fülldraht und einen hochlegierten manganhaltigen Fülldraht für verschiedene Leistungsbereiche bzw. Lichtbogenarten [19].

Schweißzusatz	Prozess	Co-Gehalt (%)	Cr-Gehalt (%)	Fe-Gehalt (%)	Mn-Gehalt (%)	Ni-Gehalt (%)
		Durchschnitt	Durchschnitt	Durchschnitt	Durchschnitt	Durchschnitt
unlegierter Draht						
G 3Si1	Kurzlichtbogen	0.0	0.0	55.9	6.3	0.0
G 3Si1	Impulslichtbogen	0.0	0.0	52.2	7.9	
G 3Si1	Sprühlichtbogen	0.0	0.0	53.1	7.2	0.0
G 3Si1	Schweißdraht	-	max. 0,15	Basis	1,5	max. 0,15
hochlegierter Draht						
G19 9 L Si	Kurzlichtbogen	0.1	11.9	37.4	5.4	6.2
G19 9 L Si	Impulslichtbogen	0.1	7.8	24.6	4.9	2.8
G19 9 L Si	Sprühlichtbogen	0.1	9.0	33.9	3.1	5.0
G19 9 L Si	Schweißdraht	-	20.0	Basis	1,7	10.0
hochlegierter Fülldraht und manganhaltiger Draht						
T 19 9 L R M	Sprühlichtbogen	0.0	7.0	13.7	8.9	1.0
T 19 9 L R M	Schweißdraht	-	19,5	Basis	1,62	10.0
G 18 8 Mn	Kurzlichtbogen	0.0	8.7	28.9	19.9	4.0
G 18 8 Mn	Impulslichtbogen	0.0	8.3	19.8	36.3	1.5
G 18 8 Mn	Schweißdraht	-	19.0	Basis	7.0	9.0

Abbildung 17: Chemische Zusammensetzung in Massenprozent für unlegierte und hochlegierte Massivdrahtelektroden sowie für einen hochlegierten Fülldraht und einen hochlegierten manganhaltigen Fülldraht für verschiedene Lichtbogenarten modifiziert nach [19]

Auffällig ist der für alle Schweißdrähte im Vergleich zum Mangangehalt in der Drahtelektrode prozentual deutlich erhöhte Mangangehalt im Schweißrauch, der auch in weiteren Untersuchungen beobachtet wurde [28, 47, 107] und das unterschiedliche Oxidationsverhalten verschiedener Elemente veranschaulicht. Dadurch können insbesondere im Falle von Mangan trotz niedriger Gehalte im unlegierten Schweißdraht Arbeitsplatzgrenzwerte überschritten werden. Untersuchungen von [108] haben gezeigt, dass bei hochlegierten Werkstoffen mit Hilfe einer Auslagerung der kritischen Bestandteile (Chrom, Nickel) in einen lichtbogenlosen Zusatzdraht eine signifikante Reduzierung von gesundheitsgefährdenden Schweißrauchkomponenten erreicht werden kann.

Auch bei den Aluminiumwerkstoffen gibt es in Abhängigkeit des eingesetzten Schweißzusatzes prozessspezifische Unterschiede in der Schweißrauchemission. Laut [102] erzeugen insbesondere Magnesium- und manganhaltige Zusatzwerkstoffe höhere Rauchemissionsraten als silizi-

umhaltige Zusatzwerkstoffe (Abbildung 18). Dabei zeigen sich bei gleicher Abschmelzleistung Unterschiede zwischen den Prozessarten, wobei der Impulslichtbogen bei 8,5 m/min eine deutliche Reduktion aufweist.

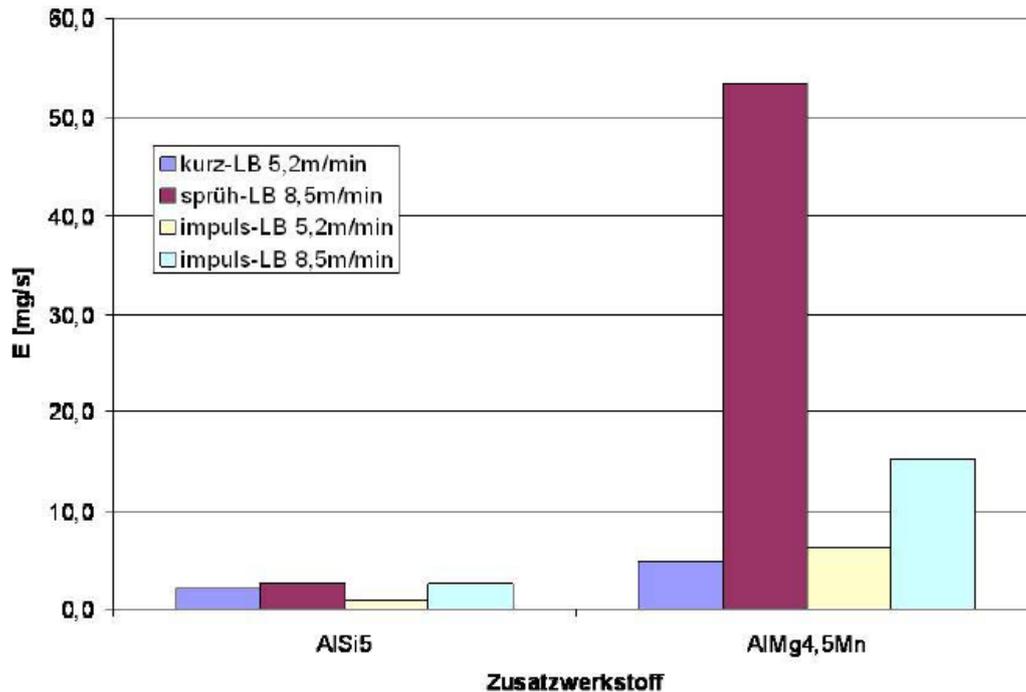


Abbildung 18: Vergleich der Rauchemissionsrate (E) von AlSi5 und AlMg4,5Mn für verschiedene Prozessarten und Leistungen [102]

Diese Ergebnisse werden durch die Untersuchungen von [49] bestätigt. Dort werden ebenfalls bei magnesiumhaltigen Aluminiumschweißzusätzen höhere Rauchemissionsraten festgestellt, die vor allem auf das explosionsartige Verdampfen dieses Elements zurückzuführen ist. Entsprechend kann durch eine Energiereduktion die Magnesiumverdampfung und die Gasblasenexplosionen vermindert werden, sodass bei energieärmeren Impulslichtbögen weniger Schweißrauch entsteht. Dies kann durch den Einsatz von gepulsten Wechselstromschweißen (AC-Pulsschweißen) weiter verstärkt werden, weil damit die Tropfentemperatur weiter gesenkt wird und oben genannte Effekte der Metallverdampfung reduziert werden. Eine weitere Hypothese lautet, dass die am Tropfen verdampften Metallatome nach der Ionisierung positiv geladen sind und damit eine elektrische Anziehung gegen den Tropfen in der AC-Phase erfahren, in der die Drahtelektrode negativ gepolt ist. Dies könnte eine verstärkte Kondensation begünstigen.

Bei Aluminiumwerkstoffen übt - analog zu den Stahlwerkstoffen - der Schweißdraht maßgeblichen Einfluss auf die Schweißrauchentstehung aus und nicht der Grundwerkstoff, wie die Untersuchungen von verschiedenen Grundwerkstoffen und Schweißzusätzen von [49] aufzeigen.

Neben den Grundwerkstoffen und Schweißzusätzen nehmen Beschichtungen und Oberflächenverunreinigungen Einfluss auf die Schweißrauchemission. Dies kann sich in Form einer unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung des Schweißrauches, aber auch durch höhere Emissionsraten aufgrund unterschiedlichem (elementspezifischem) Oxidationsverhalten sowie ungünstiger Einflussnahme auf das Schweißverhalten äußern. In Untersuchungen von [102] konnten bspw. aufgrund einer dickeren Zinkschicht beim Feuerverzinken deutlich höhere Rauchemissionsraten nachgewiesen werden (Abbildung 19).

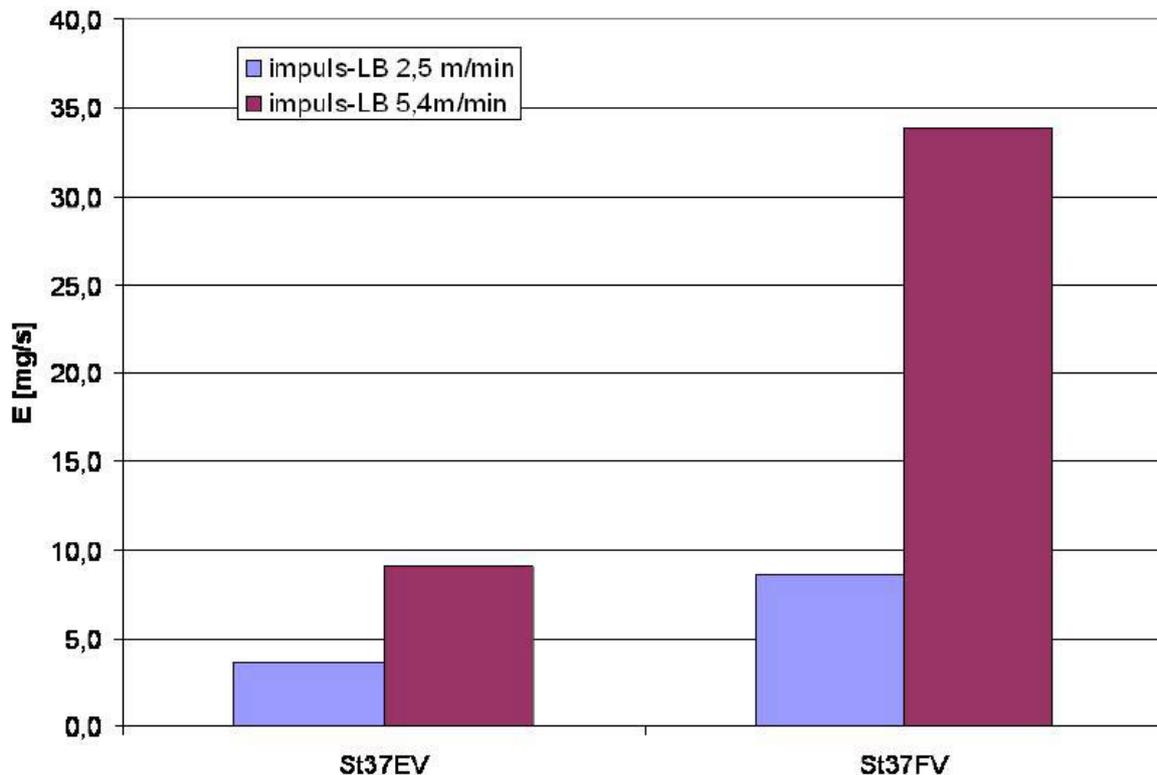


Abbildung 19: Einfluss der Zinkschicht auf die Rauchemissionsrate (E) bei verschiedenen Leistungen [102]

Insgesamt lässt sich festhalten, dass bei Stahlwerkstoffen hochlegierte Schweißdrähte vermutlich hauptsächlich aufgrund der positiven Effekte der niedrigaktiven Schutzgase weniger Schweißrauchemission bilden als niedriglegierte Schweißdrähte gleicher Abschmelzleistung. Allerdings erzeugen insbesondere chrom- und nickelhaltige Schweißzusätze toxische bzw. kanzerogene Partikel im Schweißrauch, sodass die Überschreitung von Grenzwerten und gesundheitliche Auswirkungen wahrscheinlicher sein können. Maßgeblich dafür sind letztlich die Exposition und der Gehalt der einzelnen Komponenten im Schweißrauch.

Auswirkung der Schutzgase

Eine Reihe von Untersuchungen hat gezeigt, dass das Schutzgas und insbesondere der Anteil an aktiven Gasen CO₂ und O₂ einen signifikanten Einfluss auf die Art und Menge der Schweiß-

rauchemission haben [39, 54, 57]. Dabei kann in der Regel von einer Reduktion der Schweißrauchemission mit höherem Anteil nicht aktiver Komponenten ausgegangen werden. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Schutzgasen werden auch deshalb hervorgerufen, weil sie je nach Gehalt einzelner Komponenten die Art des Werkstoffübergangs und den Lichtbogenansatz verändern können. So wird generell durch die Wahl des Schutzgases die Oberflächenspannung, die Tropfengeometrie sowie -temperatur, die Ausbildung des Metaldampfplasmas und die Lichtbogenleistung sowie Leistungsumsatz beeinflusst [109]. In der Regel verkleinert sich mit Zunahme von Sauerstoff im Schutzgas das Parameterfenster des Sprühlichtbogens, in dem keine Kurzschlüsse auftreten. Für verschiedene Schutzgase stellen sich bei identischen Schweißparametern unterschiedliche Lichtbogenlängen ein, sodass in der Regel unterschiedliche Synergiekennlinien bei der Parametrierung der Schweißstromquelle eingesetzt werden. Aus diesem Grund ist die Durchführung vergleichender Schweißversuche bei vollständig konstant gehaltenen Schweißparametern nicht möglich.

Die Wärmeleitfähigkeit des Schutzgases ist durch die Anteile der Komponenten bestimmt und ist verantwortlich für den Lichtbogenansatzpunkt an der Drahtelektrode. Dadurch entstehen bei unterschiedlichen Schutzgaszusammensetzungen verschiedene Kräfteverhältnisse, die sich in der Art und Ausprägung des Werkstoffüberganges äußern. [1, 106]

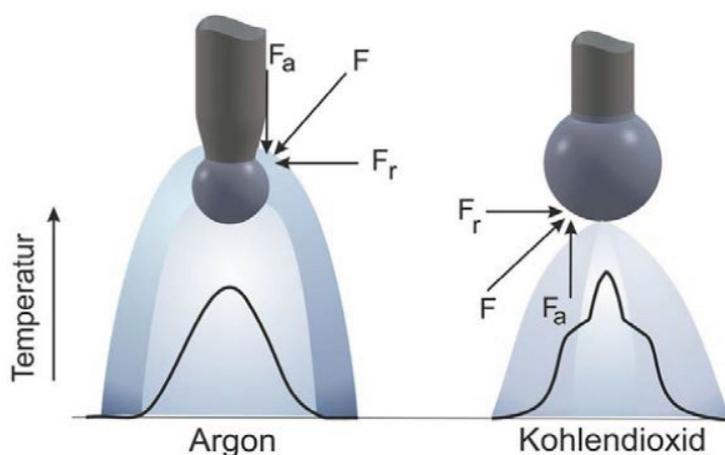


Abbildung 20: Ausbildung des Lichtbogens bei Argon und CO_2 [1]

Der Unterschied ist zwischen reinem Argon und reinem CO_2 besonders deutlich ausgeprägt und die unterschiedliche Anbindung des Lichtbogens sowie der Metaldampfzone qualitativ in Abbildung 20 dargestellt (heller Bereich im Kern des Lichtbogens). Eine detailliertere Betrachtung erfolgt in Kapitel 3. Bei Schutzgasen mit CO_2 entstehen je nach Anteil vertikale Kräfte unterschiedlicher Ausprägung, die der Tropfenablösung entgegenwirken. Dadurch werden die Tropfen tendenziell größer und es treten vermehrt Kurzschlüsse und Spritzer auf. Unter CO_2 zeigt der Lichtbogen insgesamt ein instabileres Verhalten, aus dem höhere Schweißrauchemissionen

resultieren. Die steigenden Emissionen lassen sich jedoch nicht nur auf diese Effekte zurückführen. Da die am Tropfen zugeführte Wärmestromdichte direkt mit der elektrischen Stromdichte zusammenhängt, ist es verständlich, dass eine engere Anbindung mit einer höheren Konzentration der elektrischen und somit der Wärmestromdichte einhergeht. Dies führt bei gleichem Strom zu einer stärkeren lokalen Überhitzung im Fall der „eingeschnürten“ Anbindung (CO₂) und damit auch zu intensiveren Metalldampfbildung, was auch aus experimentellen Beobachtungen hervorgeht [106, 110]. Gleichzeitig beeinflusst die unterschiedliche Anbindung auch die Wirkung der elektromagnetischen Kräfte, so dass im Fall einer „eingeschnürten“ Anbindung (CO₂) der Pinch-Effekt sogar in Gegenrichtung wirkt, also den Tropfen entgegen der Fallrichtung anhebt. Dies wiederum bedeutet reduzierte Strömungen im Tropfen, somit reduzierten konvektiven Wärmetransport und damit auch wieder einen Wärmestau im Bereich der konzentrierten Anbindung und damit stärkere Metalldampfbildung, vgl. [75] und [111].

[106] hat die Schweißrauchemission für einen unlegierten Schweißdraht in 1,2 mm Durchmesser in einem weiten Leistungsbereich bestimmt (Abbildung 21).

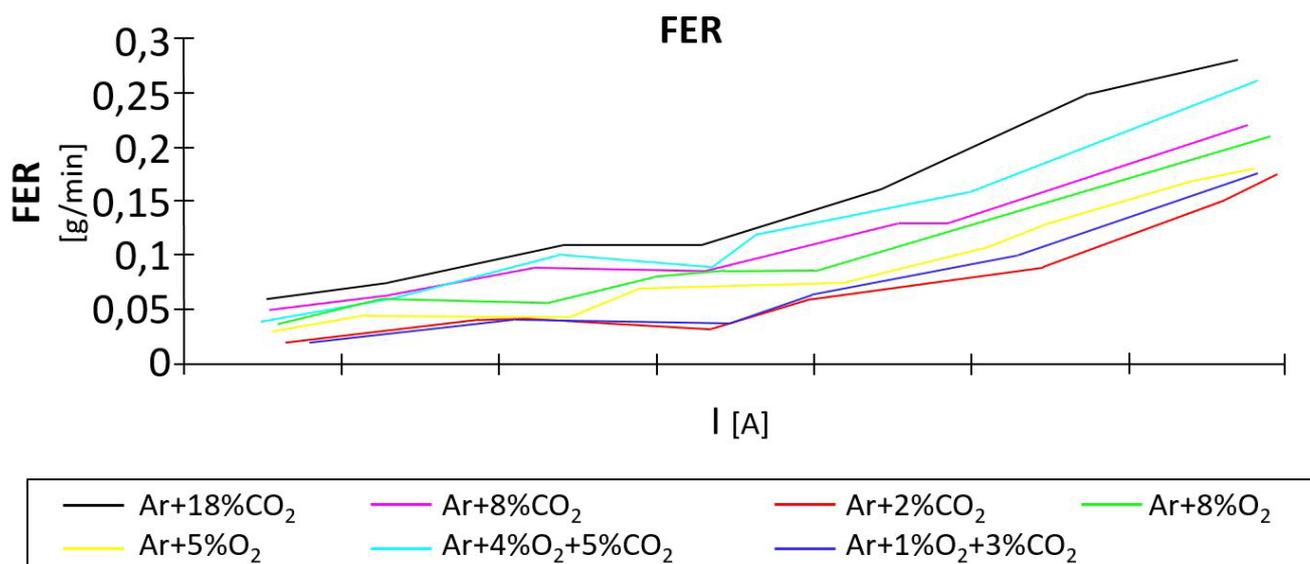


Abbildung 21: Schweißrauchemissionsrate (FER) in Abhängigkeit des Leistungsbereich und verschiedener Schutzgase modifiziert nach [106]

Die niedrigsten Rauchemissionsraten werden mit den Schutzgasen Ar+2%CO₂ und Ar+1%O₂+3%CO₂ erzielt. Die höchsten Emissionen werden mit dem Ar+18%CO₂ erzeugt, dem Schutzgas mit dem höchsten Oxidationspotential. Die Ergebnisse in Form eines Anstiegs der Schweißrauchemission mit dem Aktivgasanteil bzw. dem Oxidationspotential stimmen mit den Resultaten aus [48] und [39] überein, obschon in dieser Untersuchung postuliert wird, dass die Rauchemissionsrate bei CO₂ haltigen Gemischen höher als bei O₂ Gemischen mit identischen Oxidationspotential ist. Dafür werden in diesen und weiteren Untersuchungen hauptsächlich der

Effekt des CO₂ auf den Werkstoffübergang in Form von geringerer Stabilität, größerer Tropfen, länger andauernde Tropfenablösung und höherer Lichtbogentemperaturen verantwortlich gemacht. In [57] wird ein höherer Anteil von Sauerstoff im Schutzgas mit einer generellen Verbesserung der Lichtbogenstabilität und Reduktion der Spannung bzw. Lichtbogenlänge in Verbindung gebracht, sodass gerade bei ternären Gasgemischen eine Verminderung der Schweißrauchemission festgestellt werden kann.

Insgesamt kann nach aktuellem Forschungsstand keine verlässliche Aussage über den alleinigen Einfluss des Oxidationspotentials des Schutzgases auf die Rauchemissionsrate getroffen werden, weil das Schutzgas über mehrere Effekte einen signifikanten Einfluss auf den Werkstoffübergang, die benötigte Lichtbogenleistung und auf die Lichtbogenatmosphäre allgemein ausübt. Als relevante Teileinflüsse kann jedoch die Veränderung des Sättigungsdampfdruckes durch Oxidation der Legierungselemente festgehalten werden. Weiterhin hat die Oxidation nachweislich Einfluss auf die Oberflächenspannung der Schmelze und kann daher auch den Koagulationsprozess und damit auch die Größe der Rauchpartikel beeinflussen. Leider sind die Einflüsse zum einen noch nicht ausreichend erforscht und zum anderen stark miteinander verbunden, so dass eine eindeutige Gewichtung bisher nicht möglich ist.

Hinsichtlich des Einflusses der Schutzgase auf die chemische Zusammensetzung können in den Untersuchungen von [48] und [47] nur geringfügige Unterschiede festgestellt werden. Dies gilt sowohl für die chemische Zusammensetzung bei unterschiedlichen Schutzgasen als auch für die chemische Zusammensetzung bei verschiedenen Partikelgrößen. Die Schutzgaszusammensetzung kann jedoch Einfluss auf die Partikelgrößenverteilung des Schweißrauches nehmen. In Untersuchungen [47, 51, 57] nimmt die durchschnittliche Partikelgröße mit einem höheren Anteil an CO₂ und O₂ leicht zu. Als eine Erklärung dafür dient die Möglichkeit zur früheren Nukleation bei höheren Temperaturen aufgrund einer erhöhten Konzentration von ionisiertem Sauerstoff in der Nähe des Metaldampfes, sodass im Zuge des weiteren Prozesses der Schweißrauchbildung über Kondensation und Koagulation gröbere Partikel entstehen. Die Zunahme der durchschnittlichen Partikelgröße bei einem höheren aktiven Anteil im Schutzgas geht dabei mit der Zunahme der Partikelanzahl im Bereich weniger Nanometer einher.

Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, ist das Gefährdungspotential der Schweißrauchpartikel unter anderem abhängig von der Partikelgröße, sodass hier ein direkter Einfluss des Schutzgases auf die Gesundheitsgefährdung bestehen kann. Insgesamt lässt sich feststellen, dass verschiedene Schutzgaskomponenten hauptsächlich über die Art des Werkstoffüberganges und der Energieeinbringung Einfluss auf die Schweißrauchemission nehmen. Schutzgase mit gerin-

geren aktiven Anteilen weisen in den Untersuchungen in der Regel niedrigere Schweißrauchemissionen auf, erzeugen aber tendenziell auch feinere Partikel.

6 Forschungsbedarf

Es hat sich gezeigt, dass eine Vielzahl von Einflussfaktoren im Lichtbogenbereich auf die Entstehung der Schweißrauchemission wirken, die sich zum Teil gegenseitig beeinflussen und überlagern. Dabei ist es bislang nicht ausreichend möglich eine eindeutige physikalische Erklärung für die unter bestimmten Prozessbedingungen emissionsärmeren Prozesse zu finden oder gar eine Gewichtung der einzelnen Faktoren vorzunehmen. Dies gilt besonders für die geregelten Prozessvarianten mit kürzeren Lichtbögen sowie das Schweißen mit Fülldraht. Ein besseres Verständnis der physikalischen Wirkmechanismen der Emissionsreduktion ist jedoch eine wichtige Grundlage, um unter gezielter Ausnutzung dieser Mechanismen emissionsarme Synergiekennlinien für das MSG-Schweißen zu entwickeln. Demgegenüber ist es jedoch wahrscheinlich bereits zu dem jetzigen Zeitpunkt möglich Synergiekennlinien mit Prozessvarianten zu qualifizieren, die im Vergleich zu konventionellen MSG-Prozessvarianten deutlich weniger Schweißrauch emittieren und gleichzeitig eine ausreichende Schweißnahtqualität bieten. Nicht ausreichend untersucht ist dabei die Rolle des Drahtdurchmessers, der bspw. durch unterschiedliche Tropfenbildung und Stromdichteverteilung andersartige Bedingungen im Lichtbogen sowie während des Werkstoffüberganges erzeugt.

Im Rahmen der Studie ist aufgefallen, dass sowohl hinsichtlich Emissions- als auch Expositionsbestimmungen eine große Zahl an Einzeluntersuchungen existiert, die das Expositions- bzw. Emissionsverhalten nur in spezifischen Prozessbereichen untersucht. Dabei erfolgt häufig keine ausreichende Variation der Prozessparameter und Dokumentation der Randbedingungen, um eine Allgemeingültigkeit oder Übertragbarkeit herstellen zu können. Darüber hinaus unterscheiden sich trotz Normung die Messmethoden zur Bestimmung der Schweißrauchemission sowie der Prozessgrößen, was einen ganzheitlichen Vergleich erschwert.

Im Hinblick darauf ist insbesondere eine systematische Untersuchung der geregelten Prozessvarianten erforderlich, die in Einzelstudien bereits vielversprechende Ergebnisse gezeigt haben. Derzeit ist jedoch unklar, in welchen Prozessbereichen eine Schweißrauchreduktion erfolgt und wie stabil diese bei Änderung von Einstellparametern oder Randbedingungen auftritt. Die bisherige Methodik der Emissionsbestimmung ist jedoch auf den Vergleich weniger Arbeitspunkte einer Kennlinie beschränkt, sodass eine seriöse Vergleichbarkeit der verschiedenen Schweißprozesse unmöglich ist. Deswegen ist es notwendig eine Methodik zu entwickeln, die für die gesamte Kennlinie bzw. den anwenderrelevanten Teil eines Schweißprozesses die Schweißrauchemission hinreichend genau beschreibt und somit auch die Emissionsstabilität darstellen

kann. Nur dann ist es möglich weitere Verbesserungen bei der Emissionsreduktion zu validieren und eine Abschätzung bezüglich der Wirksamkeit in der Praxis zu tätigen.

Besonders bei den Fülldrähten ist der derzeitige Kenntnisstand bezüglich des Emissionsverhaltens verbesserungsbedürftig. Analog zu den geregelten Prozessvarianten existiert kein ausreichendes Wissen wie die Schweißrauchemission von den Prozessparametern und Randbedingungen abhängt oder wie Zusammenhänge positiv für weitere gezielte Entwicklungen zu nutzen sind.

Hinsichtlich der Schweißzusätze besteht ebenfalls Forschungsbedarf. Es bestehen zwar Erkenntnisse zu den Wirkungen einzelner Zusammensetzungen, allerdings ist nicht klar welche Draht-Gas-Kombinationen über einen breiteren Leistungsbereich emissionsarm eingesetzt werden können und mit welcher Emissionsreduktion im Vergleich zu konventionellen Kombinationen zu rechnen ist. Insbesondere die metallurgischen Aspekte müssen dabei im Rahmen einer Bewertung der Schweißnahtqualität betrachtet werden, um eine praxistaugliche Einsatzmöglichkeit zu garantieren. Vor dem Hintergrund der Nutzung alternativer Schutzgase ist auch die Entwicklung neuartiger Grundwerkstoffe oder Draht-Gas Kombinationen zu sehen. Diese könnten sich durch eine spezifische Anpassung der chemischen Zusammensetzung positiv auf die Schweißrauchemission auswirken. Durch die Reduktion des Gehaltes an potentiell toxischen oder kanzerogen wirkenden Elementen könnten bei gleichbleibender Schweißnahtqualität Vorteile bezüglich des Gefährdungspotentials des entstehenden Schweißrauches bestehen.

Bei den Grundwerkstoffen ist der Einfluss von Oberflächenbeschichtungen und von Verunreinigungen nicht ausreichend untersucht. Bei den Beschichtungen ist den aktuellen Entwicklungen sowie der Kombination mit energiearmen Schweißprozessen nicht ausreichend Rechnung getragen und bei den Verunreinigungen ist nicht hinreichend bekannt, wie sich verschiedene Beschichtungen auf die Emissionsrate und die chemische Zusammensetzung der Schweißrauche auswirken.

Zur vergleichenden Bewertung der Effizienz einzelner Maßnahmen hinsichtlich der Reduktion der Schweißrauchemissionen ist entscheidend, dass eine standardisierte Dokumentation der Schweißrandbedingungen erfolgt. Die derzeitige Festlegung zur Ermittlung der Rauchemissionsrate nach DIN EN ISO 15011-1 [45] sowie zur Erstellung der Rauchdatenblätter nach DIN EN ISO 15011-4 [46] weist z.T. Definitionslücken auf, so dass vorliegende Ergebnisse mithilfe von Rauchdatenblättern oftmals nicht nachvollziehbar dokumentiert sind. Dies betrifft insbesondere die Parametrierung der Schweißstromquelle.

Auch hinsichtlich des technischen Fortschrittes ist die Entwicklung neuer Messverfahren bei gleichzeitiger Ausnutzung moderner Datenverarbeitung und Analysemethoden anzustreben. Einerseits betrifft dies Expositionsmessungen, die meist nur mit großer und teurer Messtechnik zu bewältigen sind oder keine hinreichend genauen Auflösungen bieten. Andererseits betrifft dies auch die Emissionsmessungen, die bei jetziger Methodik sehr zeitaufwendig sind und in Teilen auch zu wenige Randbedingungen erfassen. Insbesondere Automatisierungen sind an dieser Stelle wünschenswert, um in adäquater Zeit mit hinreichender Genauigkeit Messungen durchführen zu können.

Literaturangaben

- [1] Reisgen, U. u. Stein, L.: Grundlagen der Fügetechnik. Schweißen, Löten und Kleben. DVS Fachbücher, Band 161. Düsseldorf: DVS Media GmbH 2016
- [2] Trube, S. u. Miklos, E.: Schweißen im Anlagen- und Behälterbau. Vorträge der gleichnamigen Sondertagung in München vom 15.-18. Februar 2005. Basis-Info: MAG/MIG. DVS-Verlag, Düsseldorf 2005
- [3] Goebel, A.: Novellierung der Technischen Regel für Gefahrstoffe „Schweißtechnische Arbeiten“ (TRGS 528). Gefahrstoffe 79 (2019) 04, S. 120–125
- [4] Spiegel-Ciobanu, V. E.: BGI 593 – BG-Information - Schadstoffe beim Schweißen und bei verwandten Verfahren. Berufsgenossenschaft Holz und Metall (2012)
- [5] Ausschuss für Technik im DVS: TRGS 528 - Schweißtechnische Arbeiten (2020)
- [6] Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz: Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit (Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG). 1996
- [7] Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin: Verordnung zum Schutz vor Gefahrstoffen (Gefahrstoffverordnung - GefStoffV). 2010
- [8] Giesen, T.: Die Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge — ArbMedVV —. Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie 59 (2009) 4, S. 119–125
- [9] TRGS 400 - Gefährdungsbeurteilung für Tätigkeiten mit Gefahrstoffen
- [10] TRGS 402 - Ermitteln und Beurteilen der Gefährdungen bei Tätigkeiten mit Gefahrstoffen: Inhalative Exposition
- [11] TRGS 900 - Arbeitsplatzgrenzwerte
- [12] TRGS 910 - Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen
- [13] TRGS 500 - Schutzmaßnahmen
- [14] Schweißen ohne Rauch, Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer, 2012
- [15] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung: DGUV Regel 109-002 „Arbeitsplatzlüftung - Lufttechnische Maßnahmen“ 2020
- [16] Flynn, M. R. u. Susi, P.: Manganese, iron, and total particulate exposures to welders. Journal of occupational and environmental hygiene 7 (2010) 2, S. 115–126
- [17] Flynn, M. R. u. Susi, P.: Local exhaust ventilation for the control of welding fumes in the construction industry--a literature review. The Annals of occupational hygiene 56 (2012) 7, S. 764–776
- [18] Susi, P., Goldberg, M., Barnes, P. u. Stafford, E.: The use of a task-based exposure assessment model (T-BEAM) for assessment of metal fume exposures during welding and thermal cutting. Applied occupational and environmental hygiene 15 (2000) 1, S. 26–38
- [19] Brand, P., Ebert, B., Esser, A. u. Sharma, R.: Direct Exposure of Welders to Welding Fumes and Effect of Fume Extraction Systems Under Controlled Conditions. Journal of Occupational and Environmental Medicine 63 (2021) 6, S. 490–502
- [20] Stark, R.: Strömungstechnische Auslegungskriterien zur Erhöhung der Absaugeffektivität von integrierten Absaugbrennern in Zwangslagen. Abschlussbericht IGF-Nr.: 17.990 N, Technische Universität Berlin. 2016
- [21] Matthes, K.-J.: Optimierung der Schweißraucherfassung an Brennerintegrierten Absauganlagen. Abschlussbericht IGF-Nr.: 14.436 BR, Technische Universität Chemnitz 2007
- [22] Stark, R.: Analyse und Verbesserung eines integrierten Absaugbrenners zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit des Prozesses und zur Verbesserung der Arbeitsbedingungen. Abschlussbericht IGF-Nr.: 16.515 N, Technische Universität Berlin 2011
- [23] Gregory, E. N., Herrschaft, D. C. u. Cole, J. F.: Fume extraction when welding zinc-coated steels. American Industrial Hygiene Association journal 32 (1971) 3, S. 170–173

- [24] Wallace, M., Shulman, S. u. Sheehy, J.: Comparing exposure levels by type of welding operation and evaluating the effectiveness of fume extraction guns. *Applied occupational and environmental hygiene* 16 (2001) 8, S. 771–779
- [25] Spiegel-Ciobanu, V. E. u. Weiß R.: Untersuchung der Exposition von Schweißern gegenüber ultrafeinen Partikeln im Schweißrauch bei Änderung der Schweißparameter und der arbeitsplatzspezifischen Faktoren mithilfe der PIMEX-Methode. *Schweißen und Schneiden* 69 (2017) Heft 5
- [26] Spiegel-Ciobanu, V. E.: Schadstoffe beim Schweißen und bei verwandten Verfahren - Expositionen, Gefährdungen und Schutzmaßnahmenkonzept. 2020
- [27] Lehnert, M., Weiss, T., Pesch, B., Lotz, A., Zilch-Schöneweis, S., Heinze, E., van Gelder, R., Hahn, J.-U. u. Brüning, T.: Reduction in welding fume and metal exposure of stainless steel welders: an example from the WELDOX study. *International archives of occupational and environmental health* 87 (2014) 5, S. 483–492
- [28] Sriram, K., Lin, G. X., Jefferson, A. M., Stone, S., Afshari, A., Keane, M. J., McKinney, W., Jackson, M., Chen, B. T., Schwegler-Berry, D., Cumpston, A., Cumpston, J. L., Roberts, J. R., Frazer, D. G. u. Antonini, J. M.: Modifying welding process parameters can reduce the neurotoxic potential of manganese-containing welding fumes. *Toxicology* 328 (2015), S. 168–178
- [29] Oberdörster, G., Ferin, J., Finkelstein, G., Wade, P. u. Corson, N.: Increased pulmonary toxicity of ultrafine particles? II. Lung lavage studies. *Journal of Aerosol Science* 21 (1990) 3, S. 384–387
- [30] Oberdörster, G., Gelein, R. M., Ferin, J. u. Weiss, B.: Association of particulate air pollution and acute mortality: involvement of ultrafine particles? *Inhalation toxicology* 7 (1995) 1, S. 111–124
- [31] Oberdörster, G., Ferin, J. u. Lehnert, B. E.: Correlation between Particle Size, In Vivo Particle Persistence, and Lung Injury. *Environmental Health Perspectives* 102 (1994), S. 173
- [32] Brown, D. M., Wilson, M. R., MacNee, W., Stone, V. u. Donaldson, K.: Size-dependent pro-inflammatory effects of ultrafine polystyrene particles: a role for surface area and oxidative stress in the enhanced activity of ultrafines. *Toxicology and applied pharmacology* 175 (2001) 3, S. 191–199
- [33] Brown, J. S., Zeman, K. L. u. Bennett, W. D.: Ultrafine particle deposition and clearance in the healthy and obstructed lung. *American journal of respiratory and critical care medicine* 166 (2002) 9, S. 1240–1247
- [34] Möller, W., Felten, K., Sommerer, K., Scheuch, G., Meyer, G., Meyer, P., Häussinger, K. u. Kreyling, W. G.: Deposition, retention, and translocation of ultrafine particles from the central airways and lung periphery. *American journal of respiratory and critical care medicine* 177 (2008) 4, S. 426–432
- [35] Kim, C. S. u. Jaques, P. A.: Total lung deposition of ultrafine particles in elderly subjects during controlled breathing. *Inhalation toxicology* 17 (2005) 7-8, S. 387–399
- [36] Ferin, J.: Pulmonary retention and clearance of particles. *Toxicology Letters* 72 (1994) 1-3, S. 121–125
- [37] Ferin, J., Oberdörster, G. u. Penney, D. P.: Pulmonary retention of ultrafine and fine particles in rats. *American journal of respiratory cell and molecular biology* 6 (1992) 5, S. 535–542
- [38] Limbach, L. K., Grass, R. N. u. Stark, W. J.: Physico-Chemical Differences Between Particle- and Molecule-Derived Toxicity: Can We Make Inherently Safe Nanoparticles? *CHIMIA International Journal for Chemistry* 63 (2009) 1, S. 38–43
- [39] Rose, S.: Entstehung und Reduzierung der Schweißrauchemissionen beim MSG-Schweißen – Ergebnisse des 1. EWM-Awards. *DVS-Berichte, Band 275* (2011)
- [40] Behrens, T., Brüning, T., Lehnert, M., Lotz, A. u. Zschiesche, W.: Gesundheitsschutz beim Schweißen. Aktuelle Herausforderungen. *IPA-Journal* (2020) 01, S. 20–23

- [41] Lehnert, M., Pesch, B., Lotz, A., Pelzer, J., Kendzia, B., Gawrych, K., Heinze, E., van Gelder, R., Punkenburg, E., Weiss, T., Mattenklott, M., Hahn, J.-U., Möhlmann, C., Berges, M., Hartwig, A. u. Brüning, T.: Exposure to inhalable, respirable, and ultrafine particles in welding fume. *The Annals of occupational hygiene* 56 (2012) 5, S. 557–567
- [42] Miklos, E.: REarc welding. von der DVS-Initiative zum nachhaltigen Reduzieren der Expositionen beim Lichtbogenschweißen. *DVS Berichte* (2021) Band 371, S. 130–139
- [43] Boselli, M., Colombo, V., Ghedini, E., Gherardi, M. u. Sanibondi, P.: Two-dimensional time-dependent modelling of fume formation in a pulsed gas metal arc welding process. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46 (2013) 22, S. 224006
- [44] Matthes, K.-J. u. Schneider, W. (Hrsg.): *Schweißtechnik. Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen*; mit 497 Bildern, 95 Tabellen und 21 Tafeln. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag 2012
- [45] DIN EN ISO 15011-1. *Arbeits- und Gesundheitsschutz beim Schweißen und bei verwandten Verfahren - Laborverfahren zum Sammeln von Rauch und Gasen - Teil 1: Bestimmung der Rauchemissionsrate beim Lichtbogenschweißen und Sammeln von Rauch zur Analyse*
- [46] DIN EN ISO 15011-4. *Arbeits- und Gesundheitsschutz beim Schweißen und bei verwandten Verfahren – Laborverfahren zum Sammeln von Rauch und Gasen – Teil 4: Rauchdatenblätter*
- [47] Carpenter, K. R., Monaghan, B. J. u. Norrish, J.: Influence of Shielding Gas on Fume Size Morphology and Particle Composition for Gas Metal Arc Welding. *ISIJ International* 48 (2008) 11, S. 1570–1576
- [48] Carpenter, K. R., Monaghan, B. J. u. Norrish, J.: Analysis of Fume Formation Rate and Fume Particle Composition for Gas Metal Arc Welding (GMAW) of Plain Carbon Steel Using Different Shielding Gas Compositions. *ISIJ International* 49 (2009) 3, S. 416–420
- [49] Tong, H., Nakata, K., Tanaka, M., Ushio, M. u. Mita, T.: Mechanism of welding fume suppression during AC-pulsed MIG welding of Al–Mg alloys. *Welding International* 19 (2005) 7, S. 509–523
- [50] Zimmer, A. T. u. Biswas, P.: Characterization of the aerosols resulting from arc welding processes. *Journal of Aerosol Science* 32 (2001) 8, S. 993–1008
- [51] Zimmer, A. T., Baron, P. A. u. Biswas, P.: The influence of operating parameters on number-weighted aerosol size distribution generated from a gas metal arc welding process. *Journal of Aerosol Science* 33 (2002) 3, S. 519–531
- [52] Zhang, M., Le Jian, Bin, P., Xing, M., Lou, J., Cong, L. u. Zou, H.: Workplace exposure to nanoparticles from gas metal arc welding process. *Journal of Nanoparticle Research* 15 (2013) 11
- [53] Brand, P., Lenz, K., Reisgen, U. u. Kraus, T.: Number size distribution of fine and ultrafine fume particles from various welding processes. *The Annals of occupational hygiene* 57 (2013) 3, S. 305–313
- [54] Carpenter, K., Monaghan, B. u. Norrish, J.: Influence of Shielding Gas on Fume Formation Rate for Gas Metal Arc Welding (GMAW) of Plain Carbon Steel. *ASM Proceedings of the International Conference: Trends in Welding Research* (2009), S. 436–442
- [55] Berlinger, B., Benker, N., Weinbruch, S., L'Vov, B., Ebert, M., Koch, W., Ellingsen, D. G. u. Thomassen, Y.: Physicochemical characterisation of different welding aerosols. *Analytical and bioanalytical chemistry* 399 (2011) 5, S. 1773–1780
- [56] Takahashi, J., Nakashima, H. u. Fujii, N.: Fume particle size distribution and fume generation rate during arc welding of cast iron. *Industrial health* 58 (2020) 4, S. 325–334
- [57] Carpenter, K. R., Monaghan, B. J., Cuiuri, D. u. Norrish, J.: Optimising the welding conditions to determine the influence of shielding gas on fume formation rate and particle size distribution for gas metal arc welding. *Welding in the World* 61 (2017) 3, S. 473–481

- [58] Deam, R. T., Simpson, S. W. u. Haidar, J.: A semi-empirical model of the fume formation from gas metal arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics* 33 (2000) 11, S. 1393–1402
- [59] Murphy, A. B.: The effects of metal vapour in arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics* 43 (2010) 43, S. 434001
- [60] Jenkins, N. T. u. Eagar, T. W.: Fume formation from spatter oxidation during arc welding. *Science and Technology of Welding and Joining* 10 (2005) 5, S. 537–543
- [61] Knight, C. J.: Theoretical Modeling of Rapid Surface Vaporization with Back Pressure. *AIAA Journal* 17 (1979) 5, S. 519–523
- [62] Semenov, I., Krivtsun, I., Demchenko, V., Semenov, A., Reisgen, U., Mokrov, O. u. Zabirow, A.: Modelling of binary alloy (Al–Mg) anode evaporation in arc welding. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering* 20 (2012) 5, S. 55009
- [63] Heile, R. F. u. Hill, D. C.: Particulate Fume Generation in Arc Welding Processes. *Welding Research Supplement* 1975, S. 201–210
- [64] Kozakov, R., Schöpp, H., Gött, G., Sperl, A., Wilhelm, G. u. Uhrlandt, D.: Weld pool temperatures of steel S235 while applying a controlled short-circuit gas metal arc welding process and various shielding gases. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46 (2013) 47, S. 475501
- [65] Siewert, E., Schein, J. u. Forster, G.: Determination of enthalpy, temperature, surface tension and geometry of the material transfer in PGMAW for the system argon–iron. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46 (2013) 22, S. 224008
- [66] Yamazaki, K., Yamamoto, E., Suzuki, K., Koshiishi, F., Tashiro, S., Tanaka, M. u. Nakata, K.: Measurement of surface temperature of weld pools by infrared two colour pyrometry. *Science and Technology of Welding and Joining* 15 (2010) 1, S. 40–47
- [67] Zhang, G., Goett, G. u. Uhrlandt, D.: Study of the anode energy in gas metal arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics* 53 (2020) 39, S. 395202
- [68] Mamat, S. B., Tashiro, S., Tanaka, M. u. Yusoff, M.: Study on factors affecting the droplet temperature in plasma MIG welding process. *Journal of Physics D: Applied Physics* 51 (2018) 13, S. 135206
- [69] Bosworth, M. R. u. Deam, R. T.: Influence of GMAW droplet size on fume formation rate. *Journal of Physics D: Applied Physics* 33 (2000) 20, S. 2605–2610
- [70] Rose, S.: Einfluss des Werstoffübergangs auf das dynamische Prozessverhalten beim Metallschutzgasschweißen. *Dresdner Fügetechnische Berichte Band 24/2013*, Technische Universität Dresden Dissertation. Dresden 2013
- [71] Reisgen, U.: Emissionsminimierung für industriell relevante Metall-Schutzgas-Schweißprozesse unter Einhaltung einer geforderten Nahtqualität. Abschlussbericht IGF-Nr.: 18.333 N, RWTH Aachen. 2012
- [72] Kozakov, R., Gött, G., Schöpp, H., Uhrlandt, D., Schnick, M., Häßler, M., Füssel, U. u. Rose, S.: Spatial structure of the arc in a pulsed GMAW process. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46 (2013) 22, S. 224001
- [73] Schnick, M., Hertel, M., Fuessel, U. u. Uhrlandt, D.: Energy balance in MIG arcs. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46 (2013) 22, S. 224002
- [74] Haidar, J.: An analysis of heat transfer and fume production in gas metal arc welding. III. *Journal of Applied Physics* 85 (1999) 7, S. 3448–3459
- [75] Ogino, Y., Asai, S. u. Hirata, Y.: Visualization of arc plasma and molten wire behavior in CO₂ arc welding process by three-dimensional numerical simulation. *Welding in the World* 64 (2020) 10, S. 1789–1797
- [76] Tashiro, S., Murphy, A. B. u. Tanaka, M.: Numerical simulation of fume formation process in GMA welding. *Welding in the World* 62 (2018) 6, S. 1331–1339

- [77] Sanibondi, P.: Numerical investigation of the effects of iron oxidation reactions on the fume formation mechanism in arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics* 48 (2015) 34, S. 345202
- [78] Shigeta, M., Minami, S. u. Tanaka, M.: Modeling for collective growth of fume primary particles with charge effect in arc welding. *Welding in the World* 62 (2018) 1, S. 203–213
- [79] Vishnyakov, V. I., Kiro, S. A., Oprya, M. V., Shvets, O. I. u. Ennan, A. A.: Nonequilibrium ionization of welding fume plasmas; Effect of potassium additional agent on the particle formation. *Journal of Aerosol Science* 113 (2017), S. 178–188
- [80] Tashiro, S., Matsui, S. u. Tanaka, M.: Numerical Analysis of Influence of Quenching Rate on Coagulation Process in Welding Fume Formation. *QUARTERLY JOURNAL OF THE JAPAN WELDING SOCIETY* 31 (2013) 4, 31s-34s
- [81] Tashiro, S., Murphy, A. B., Matsui, S. u. Tanaka, M.: Numerical analysis of the influence of particle charging on the fume formation process in arc welding. *Journal of Physics D: Applied Physics* 46 (2013) 22, S. 224007
- [82] Shigeta, M., Tanaka, M. u. Ghedini, E.: Numerical Analysis of the Correlation between Arc Plasma Fluctuation and Nanoparticle Growth-Transport under Atmospheric Pressure. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)* 9 (2019) 12
- [83] 2019. *Merkblatt DVS 0973-1 - Übersicht der Prozessregelvarianten des MSG-Schweißens*
- [84] Quimby, B. J. u. Ulrich, G. D.: Fume Formation Rates in Gas Metal Arc Welding A new fume chamber design improves the accuracy of fume generation data, University of New Hampshire Master's thesis 1997
- [85] Reisgen, U., Christ, M. u. Wilms, K.: Ansatz zur Emissionsminimierung beim MSG-Impulslichtbogenschweißen. *Schweissen und Schneiden* 70 (2018) 1-2, S. 48–54
- [86] Costa, L.: Correlation between the welding process and the development of fumes: characterization, analysis and risk management. *Welding International* 28 (2014) 9, S. 700–707
- [87] Hovde, C. A. u. Raynor, P. C.: Effects of voltage and wire feed speed on weld fume characteristics. *Journal of occupational and environmental hygiene* 4 (2007) 12, S. 903–912
- [88] Pires, I., Quintino, L., Miranda, R. M. u. Gomes, J. F. P.: Fume emissions during gas metal arc welding. *Toxicological & Environmental Chemistry* 88 (2006) 3, S. 385–394
- [89] Meneses, L. Y. H., Silva, A. M. A. u. Alfaro, S. C. A.: Modeling and simulation of the metal transfer on GMAW-S process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 41 (2019) 12
- [90] Hashimoto, K., Hirata, Y., Kadota, K. u. Ogino, Y.: Three-dimensional numerical model of short-circuiting transfer in GMAW. *Welding in the World* 64 (2020) 12, S. 2011–2017
- [91] Meneses, V. A. de, Gomes, J. F. P. u. Scotti, A.: The effect of metal transfer stability (spatter) on fume generation, morphology and composition in short-circuit MAG welding. *Journal of Materials Processing Technology* 214 (2014) 7, S. 1388–1397
- [92] Reisgen, U., Sharma, R., Christ, M. u. Mann, S.: Method development of statistical modeling for the description of welding fume emissions in gas metal arc welding using transient process characteristics. *Welding in the World* 64 (2020) 9, S. 1497–1502
- [93] Reisgen, U., Mann, S., Sharma, R., Gött, D. u. Uhrlandt, D.: MSG-Schweißen - Einsatz optischer Sensorik zur Charakterisierung von Prozessstabilität und Schweißrauchemission. In: DVS (Hrsg.): DVS-Berichte, Band 365. DVS Congress. Große Schweißtechnische Tagung. DVS CAMPUS. Vorträge der Online-Veranstaltungen vom 14. bis 18. September 2020. DVS Media GmbH 2020, S. 114–119
- [94] Wallace, M., Landon, D., Song, R. u. Echt, A.: A field evaluation of the effect of pulsed arc welding technique on reducing worker exposures. *Applied occupational and environmental hygiene* 16 (2001) 2, S. 93–97
- [95] P.F. Mendez, N.T. Jenins, T.W. Eagar: Effect of electrode droplet size on evaporation and fume generation in GMAW. *Proceedings of the Gas Metal Arc Welding for the 21st Century Conference, Orlando* (2000)

- [96] Untersuchungen zu Schweißrauchemissionen aus neuen Hochleistungs-Schweiß- und MSG-Lötprozessen, Abschlussbericht IGF-Nr.: 14.438 N, RWTH Aachen, 2007
- [97] Keane, M. J., Siert, A., Chen, B. T. u. Stone, S. G.: Profiling mild steel welding processes to reduce fume emissions and costs in the workplace. *The Annals of occupational hygiene* 58 (2014) 4, S. 403–412
- [98] Pires, I., Quintino, L., Amaral, V. u. Rosado, T.: Reduction of fume and gas emissions using innovative gas metal arc welding variants. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 50 (2010) 5-8, S. 557–567
- [99] Christ, M., Sharma, R. u. Schmidt, K. e. a.: Vergleichende Schweißrauchuntersuchungen zwischen konventionellen und digital geregelten MSG-Schweißprozessen im Pulsmodus. DVS Congress 2019: Große Schweißtechnische Tagung (2019)
- [100] Friedhelm Trösken: Beitrag zur Schweißrauchentstehung bei Lichtbogenschweißverfahren, RWTH Aachen Dissertation 1979
- [101] Reisgen, U., Ebert, B., Sharma, R. u. Brand, P.: Untersuchung der lokalen Schweißrauchexposition an Arbeitsplätzen zum MSG-Schweißen. In: DVS (Hrsg.): DVS-Berichte, Band 357. 40. Assistentenseminar Füge- und Schweißtechnik. Vorträge der gleichnamigen Veranstaltung in Braunlage vom 25. bis 27. September 2019. DVS Media GmbH 2020, S. 98–106
- [102] Matthes, K.-J.: Bewertung der Schweißrauchemissionen bei Anwendung moderner Schutzgasschweißverfahren. Abschlussbericht IGF-Nr.: 14.459 B, Technische Universität Chemnitz (2007)
- [103] Technische Universität Chemnitz: Minimierung der Emissionsraten beim MSG-Schweißen mit Fülldrahtelektroden. Abschlussbericht IGF-Nr.: 17.557 B 2011. 2011
- [104] Jenkins, N. T., Pierce, W. M. u. Eagar, T. W.: Particle size distribution of gas metal and flux cored arc welding fumes. *Welding J* 84 (2005) 10, S. 156–163
- [105] Mayr, P.: Reduzierung der Schweißrauchemissionen beim MSG-Fülldrahtschweißen durch Einsatz von Impulstechnik. Abschlussbericht IGF-Nr.: 19.615 B, TU Chemnitz (2019)
- [106] Pires, I., Quintino, L. u. Miranda, R. M.: Analysis of the influence of shielding gas mixtures on the gas metal arc welding metal transfer modes and fume formation rate. *Materials & Design* 28 (2007) 5, S. 1623–1631
- [107] Castner, H. R.: Fume generation rates for stainless steel, nickel and aluminum alloys. *Welding Journal-Including Welding Research Supplement* 75 (1996) 12, S. 393–401
- [108] Fuessel, U.: Emissionsarmes MSG-Heißdrahtschweißen - Reduzierung gefährlicher Schweißrauche durch die partielle Trennung von Lichtbogen und Zusatzwerkstoff. Abschlussbericht IGF-Nr.: 18.179 B 2016
- [109] Siewert, E.: Experimentelle Analyse des Elektrodenwerkstoffübergangs beim Metallschutzgasschweißen mit gepulstem Schweißstrom, Universität der Bundeswehr München Dissertation 2014
- [110] Fuessel, U.: Numerische und experimentelle Untersuchungen zur gezielten Beeinflussung des Lichtbogens und des Schweißbads beim Schutzgasschweißen durch die Schutzgaseigenschaften und die Schutzgaszusammensetzung. Abschlussbericht IGF-Nr.: 15.774 BR 1, Technische Universität Dresden 2010
- [111] Ogino, Y. u. Hirata, Y.: Numerical simulation of metal transfer in argon gas-shielded GMAW. *Welding in the World* 59 (2015) 4, S. 465–473



Fügetechnik im Fokus

Mit der Broschürenreihe „Im Fokus“ informiert der DVS anhand konkreter Beispiele darüber, wie die technisch-wissenschaftliche Gemeinschaftsarbeit im DVS funktioniert und welche praxisnahen Ergebnisse sie hervorbringt. Vor allem aber lädt der DVS Interessierte dazu ein, sich an den vielfältigen Aktivitäten im Verband aktiv zu beteiligen.

Folgende IM FOKUS-Broschüren sind in Deutsch und Englisch erhältlich:

- Elektronenstrahlschweißen im DVS/Electron Beam Welding in DVS
- Fügen von Kunststoffen/Joining of Plastics
- Hartlöten im DVS/Brazing in DVS
- Laserstrahlschweißen und verwandte Verfahren im DVS/Laser Beam Welding and Allied Processes in DVS
- Lichtbogenschweißen im DVS/Arc Welding in DVS
- Schweißtechnische Qualifizierungen im DVS/Welding Qualification in DVS
- Widerstandsschweißen im DVS/Resistance Welding in DVS

Darüber hinaus ist auch eine Broschüre „Virtuelle Schweißtrainersysteme (VWTS) in der Aus- und Weiterbildung/Virtual Welding Trainer Systems (VWTS) for Training and Further Education“ abrufbar.



Die Broschüren sind online zu bestellen oder zu lesen unter:

www.dvs-home.de/presse-medien

ISBN 978-3-96144-171-6



9 783961 441716

ISSN 0418-9639