

Einflüsse relevanter Randbedingungen auf die Schweißrauchexposition – Vergleich eines praxisnahen Experiments mit realen Arbeitsplätzen

M. Lehnert, A. Lotz, S. Schlatter, W. Zschiesche, T. von der Heyden, R. Van Gelder, D. Taeger, T. Behrens, K. Pitzke*, T. Brüning*

ZUSAMMENFASSUNG Das Metallaktivgas- und Metallinertgas-Schweißen ist mit Gesundheitsrisiken durch einatembare Gefahrstoffe verbunden. Die individuelle Exposition wird von relevanten Randbedingungen am Arbeitsplatz bestimmt. Hier wurden Ergebnisse von Expositionsmessungen am Schweißer bei Werkstattversuchen (InterWeld-Pilotstudie) mit Ergebnissen aus vergleichbaren Gefahrstoffmessungen an realen Arbeitsplätzen (Weldox-Studien) verglichen. Effekte einzelner Determinanten wurden in multiplen Regressionsmodellen geschätzt. Beide Messreihen wurden hinsichtlich der Richtung und Größe dieser Effekte miteinander verglichen. Die Einflüsse von Blechdicke, Mangangehalt des Schweißdrahts und Anwendung einer lokalen Absaugung wiesen bei Werkstattversuchen und an realen Arbeitsplätzen im Hinblick auf die Auswirkungen der Gefahrstoffkonzentrationen jeweils in dieselbe Richtung. Der Einsatz einer lokalen Absaugung führte im Experiment zu einer mittleren Reduktion der Manganexposition auf 11 % verglichen mit Schweißversuchen ohne Absaugung. An realen Arbeitsplätzen war lokale Absaugung noch mit einer mittleren Reduktion auf 27 % der Exposition gegenüber Mangan beim Schweißen ohne Absaugung verbunden. Bei Verwendung eines Schweißdrahts mit einem Mangangehalt zwischen 7 und 10,5 % wurden im Mittel etwa drei- bis viermal höhere Mangankonzentrationen im Atembereich des Schweißers gemessen als beim Verschweißen von Draht mit einem für Baustahl üblichen Mangangehalt von unter 3 %. Die Verarbeitung von 10 mm dicken Blechen führte bei den experimentellen Schweißungen (InterWeld-Pilotstudie) im Mittel zu vierfach höheren Schweißrauch- und Manganexpositionen als die Verarbeitung von Blechen mit Dicken von 2 und 3 mm. Hingegen konnte an realen Arbeitsplätzen der Weldox-Studien nur ein geringer Einfluss der Blechdicke beobachtet werden. Um Vergleichbarkeit bei Expositionsmessungen an verschiedenen Arbeitsplätzen oder zu unterschiedlichen Zeitpunkten am selben Arbeitsplatz zu ermöglichen, erscheint eine zweckmäßige Erweiterung der Dokumentation relevanter Randbedingungen für zukünftige Gefahrstoffmessungen unverzichtbar (z. B. Lichtbogenbrenndauer, Stromstärke, Spannung).

1 Einleitung

Das Fügen von Metallen durch Schweißen ist ein unverzichtbares Verfahren in fast allen metallverarbeitenden Branchen. Es wird geschätzt, dass weltweit etwa 11 Mio. Menschen als Schweißer oder Schweißerin (im Weiteren als Schweißer bezeichnet)

Effects of process determinants on exposure to welding fumes – comparison of a practical experiment with real workplaces

ABSTRACT Metal active gas and metal inert gas welding are associated with health risks from inhalable hazardous substances. Individual exposure is determined by relevant boundary conditions at the workplace. Here, results of exposure measurements on welders during workshop tests (InterWeld pilot study) are compared with results from comparable hazardous substance measurements at real workplaces (Weldox studies). Effects of particular determinants were estimated in multivariable statistical models. Both series of measurements were compared with respect to the direction and magnitude of these effects. The influences of plate thickness, manganese content of the welding wire and the use of a local extraction system were found to be in the same direction in workshop tests and at real workplaces. The use of a local extraction system led to an average reduction in manganese (Mn) exposure of 11 % in the experiment compared with welding tests without extraction. At real workplaces, local extraction was still associated with a mean reduction of over two thirds of the Mn exposure without extraction. When using a welding wire with a manganese content of between 7 % and 10.5 %, manganese concentrations in the welder's breathing zone were about 3 to 4 times higher on average than when welding wire with a manganese content of less than 3 %, which is common for mild steel welding. In the experiments, the processing of 10-mm-thick sheets resulted in an average of four times higher welding fume and manganese exposures than the processing of sheets with thicknesses of 2 and 3 mm. On the other hand, at real workplaces of the Weldox studies, no influence of the sheet thickness was observed. In order to enable comparability in exposure measurements at different workplaces or at different times at the same workplace, the additional documentation of relevant boundary conditions appears to be needed for future exposure measurements (e. g. arc time, current, voltage).

beschäftigt sind. Weitere 110 Mio. Beschäftigte wenden gelegentlich Schweißtechniken an [1]. In Deutschland wird die Zahl der Beschäftigten, die regelmäßig gegenüber Schweißrauchen und -gasen exponiert sind, auf etwa 350 000 geschätzt [2].

* Lead Principal Investigator (PI)

Beim Schweißen entstehen Rauche, die beim Einatmen potenziell gesundheitsschädlich sind. So gibt es verschiedene Krankheitsbilder, die infolge einer inhalativen Belastung mit Schweißrauchen entstehen und unter bestimmten Voraussetzungen als Berufskrankheit anerkannt werden können. Die Belastung der Atemwege durch Schweißrauche kann zu einer obstruktiven Atemwegserkrankung führen, unter anderem zur chronisch obstruktiven Lungenerkrankung (COPD) mit der Berufskrankheitennummer (BK-Nr.) 4302.

Eisen- oder Eisenoxidpartikel können das Atmungssystem belasten und die Lungenfunktion beeinträchtigen [3]. So kann eine inhalative Exposition gegenüber eisenoxidhaltigen Schweißrauchen die Entwicklung einer Lungenfibrose (Siderofibrose) auslösen. Eine Anerkennung als Berufskrankheit (BK-Nr. 4115 Lungenfibrose bei Schweißern) erfolgte in Deutschland zwischen 2019 und 2021 bei 26 Erkrankungsfällen [4]. Die Aufnahme hoher Mengen von Mangan (Mn) über die Atemwege wird mit dem Auftreten von neurologischen Störungen ähnlich der Parkinsonkrankheit in Verbindung gebracht [5–7]. „Erkrankungen durch Mangan und seine Verbindungen“ wurde als BK-Nr. 1105 bereits im Jahr 1964 in die Liste der Berufskrankheiten aufgenommen. Nachdem mehrere Jahre keine BK-Nr. 1105 anerkannt worden war, weist die Berufskrankheitenstatistik zwischen 2019 und 2021 fünf Erkrankungen als anerkannte Berufskrankheiten aus [4]. Bei zwei Fällen konnte eine kausale Verbindung zu Schweiß Tätigkeiten hergestellt werden.

Berufskrankheiten durch eine inhalative Exposition gegenüber den Metallen Chrom (BK-Nr. 1103), Nickel (BK-Nr. 4109) oder Cadmium (BK-Nr. 1104) können durch Schweiß Tätigkeiten verursacht sein. Sechswertiges Chrom (CrVI) und oxidische Nickelverbindungen, die in Schweißrauch auftreten können, sind als krebserzeugend eingestuft [3, 8]. Bei spezifischen Expositionen könnten weitere Erkrankungen aus der Liste der Berufskrankheiten berücksichtigt werden. Im Jahr 2018 hat die Internationale Agentur für Krebsforschung (IARC) Schweißrauch generell – also unabhängig von seiner stofflichen Zusammensetzung – als humankarzinogen bewertet [1].

Für schweißtechnische Arbeiten sind vor diesem Hintergrund in Deutschland verschiedene Arbeitsplatzgrenzwerte (AGW) sowie Beurteilungsmaßstäbe zu beachten. Im Jahr 2015 erfolgte die Absenkung des AGW für alveolengängiges Mn (MnA) auf $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ [9]. Um Atemwegserkrankungen vorzubeugen, hat der Verordnungsgeber 2014 einen AGW für unspezifischen alveolengängigen Staub (A-Fraktion) von $1,25 \text{ mg}/\text{m}^3$ festgelegt, der auch für Schweißrauch gilt [10, 11]. Weitere Grenzwerte wurden für Gesamtchrom ($2 \text{ mg}/\text{m}^3$ als AGW) und für CrVI ($1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Beurteilungsmaßstab nach der Technischen Regel für Gefahrstoffe (TRGS) 910 [12]) in der einatembaren Partikelfraktion (E-Fraktion) sowie für krebserzeugende Nickelverbindungen ($6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ als Akzeptanz- und Toleranzkonzentration nach TRGS 910 [12]) in der A-Fraktion festgelegt. Der AGW für Nickel in der E-Fraktion beträgt $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (TRGS 900) [10].

In der Expositionsdatenbank MEGA (Messdaten zur Exposition gegenüber Gefahrstoffen am Arbeitsplatz) des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) wurden von 1983 bis 2016 zahlreiche Ergebnisse von Arbeitsplatzmessungen zu Schweißrauchen dokumentiert. Für die E-Fraktion liegen diesbezüglich 15 371 Werte vor, für die

A-Fraktion sind es 9 161 Werte. Hier zeigt sich, dass die Schweißrauchkonzentrationen im Atembereich des Schweißers trotz geeigneter technischer Schutzmaßnahmen häufig über den heute geltenden Grenzwerten von $1,25 \text{ mg}/\text{m}^3$ für die A-Fraktion und $10 \text{ mg}/\text{m}^3$ für die E-Fraktion lagen [13]. Ähnliche Beobachtungen wurden auch in früheren Forschungsprojekten gemacht. So lagen die damals gemessenen Konzentrationen an 65 % der untersuchten Arbeitsplätze über dem heutigen AGW für MnA ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$) [14]. Das Metallaktivgas- und Metallinertgasschweißen (MAG/MIG) ist in der Stahlindustrie weit verbreitet und für hohe Rauchemissionsraten von bis zu $12 \text{ mg}/\text{s}$ bekannt [15], wobei die Spannweite je nach Schweißstrom und Nahtführung stark variiert. So kann energiearmes Schutzgasschweißen Emissionsraten von nur $1 \text{ mg}/\text{s}$ aufweisen. Bereits in Prüfstandversuchen zeigte sich, dass die Exposition des Schweißers nur bedingt von der Emissionsrate des Schweißprozesses abhängig ist, sondern auch thermische und aerodynamische Phänomene einen wesentlichen Einfluss haben [16]. Mindernde Effekte bestimmter moderner Prozessvarianten und aktueller Schutzmaßnahmen auf die Exposition wurden jüngst in Dummy-Experimenten bewertet [17]. Jedoch besteht eine gewisse Unsicherheit hinsichtlich der Übertragbarkeit auf reale Arbeitsplätze.

In einem aktuell laufenden InterWeld-Projekt wird im Auftrag der Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM) die expositionsminimierende Wirkung technischer Maßnahmen und Prozessparameter beim MAG/MIG-Handschiessen an industriellen Arbeitsplätzen im Sinne einer begleitenden Evaluation von Interventionen untersucht. Vorab erfolgten orientierende Expositionsmessungen unter experimentellen Bedingungen (InterWeld-Pilotstudie). Dafür wurden standardisierte Schweiß Tätigkeiten in einer Schweißkabine in der mechanischen Werkstatt des IFA ausgeführt und dabei expositionsminimierende Einflüsse relevanter Randbedingungen (Determinanten) untersucht. Die Effekte der untersuchten Determinanten wurden mittels statistischer Methoden geschätzt [18].

Zudem waren in Felduntersuchungen in zwei Querschnittuntersuchungen Gefahrstoffkonzentrationen bei Schweißern ermittelt worden (Weldox-Studien). In der ersten Weldox-Studie wurden 243 Schweißer in 23 metallverarbeitenden Unternehmen verschiedener Branchen in Deutschland untersucht. Bereits hier untersuchte man Effekte von Arbeitsplatzfaktoren auf die Exposition eines Schweißers quantitativ [19]. In einem dieser Unternehmen wurde anschließend die Wirkung eines Pakets von Maßnahmen zur Expositionsminimierung untersucht [20].

In der Weldox II-Studie wurden weitere 50 Schweißer aus 14 Betrieben mit besonderer Berücksichtigung der Manganexposition untersucht [21–23].

In der vorliegenden Analyse werden die Expositionen und Effekte von relevanten Randbedingungen am Arbeitsplatz der InterWeld-Pilotstudie mit Daten der Weldox-Studien verglichen, die bereits zwischen 2007 und 2015 an betrieblichen Arbeitsplätzen erhoben wurden. In Abhängigkeit von der Blechdicke, der Werkstofflegierung und dem Vorhandensein einer wirksamen Absaugung an der Entstehungsstelle werden die Expositionshöhen der Schweißer unter experimentellen und betrieblichen Bedingungen miteinander verglichen. Es wird geprüft, ob sich die unter kontrollierten Bedingungen beobachteten Effekte der Determinanten

aus der InterWeld-Pilotstudie in ähnlicher Weise in Messdaten von realen Arbeitsplätzen (Weldox-Studien) bestätigen lassen.

2 Material und Methode

2.1 InterWeld-Pilotstudie

Die InterWeld-Pilotstudie konzentrierte sich auf die Ermittlung der Exposition beim handgeführten Metallschutzgasschweißen (MSG), insbesondere beim MAG/MIG-Schweißen unter standardisierten Bedingungen. Insgesamt wurden 40 Versuche durchgeführt, von denen sich 35 hinsichtlich relevanter Randbedingungen unterschieden: Blechdicke (2, 3 und 10 mm), Chrom-Nickel-(Cr/Ni)-Gehalt des Drahts (Baustahl/CrNi-Stahl), Mn-Gehalt des Drahts (1,5 bis 7,0 %), Erfassung an der Entstehungsstelle (ohne Erfassung, brennerintegrierte Absaugung, nachzuführende Absaughaube), Lichtbogenvariante (konventionell/modifiziert). Grundlegende technische Erklärungen zu Lichtbogenarten finden sich unter anderem im Leitfaden „Schweißen ohne Rauch“ des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) [24].

Die wesentlichen Prozessparameter beim MSG-Schweißen – also Strom, Spannung und Drahtvorschubgeschwindigkeit – stehen in einem komplexen Abhängigkeitsverhältnis zueinander. Moderne, digital gesteuerte Schweißgeräte verfügen über sogenannte Prozessregelvarianten, mit denen gezielt Einfluss auf die Prozessparameter genommen werden kann. Bei der Prozessregelung können verschiedene Zielsetzungen im Vordergrund stehen, zum Beispiel die Verbesserung der Nahtqualität, Minderung des Energieeintrags, Steigerung der Schweißgeschwindigkeit oder auch Reduktion der Rauchemissionen. Abhängig vom Leistungsbereich existieren unterschiedliche Regelvarianten. Derartige Technologien werden von einigen Schweißgeräteherstellern unter verschiedenen Markennamen angeboten.

Ein Berufsschweißer führte systematisch eine Reihe typischer MSG-Schweißaufgaben an einem Musterteil („Bauteil 528“) durch, das speziell für Studien zur Ermittlung der Schweißrauchbelastung entwickelt wurde. Die vorab gehefteten Musterbauteile waren während der Expositionsmessungen in vorgegebener Nahtfolge aus Baustahlblechen (Werkstoffnummer: 1.0050) oder hochlegiertem CrNi-Stahl (Werkstoffnummer: 1.4301, nachfolgend auch Edelstahl) zu schweißen. Für jede Expositionsmessung wurden zwei Musterbauteile beidseitig verschweißt. Die Gesamtlänge der Schweißnähte betrug etwa 8 m und jeder Versuch dauerte etwa eine Stunde. Es wurde eine digital und leistungselektronisch gesteuerte Schweißstromquelle eingesetzt, die ein Schweißen mit modifiziertem Lichtbogen ermöglichte, was zu einem optimierten MAG-Schweißprozess führt sowie die Aufzeichnung des Schweißstroms und der Lichtbogenbrenndauer ermöglichte [18].

Eine gute Nahtqualität und vergleichbare Prozessgeschwindigkeiten wurden gewährleistet. Die Bleche aus Baustahl hatten eine Dicke von 2 und 10 mm, die Bleche aus Edelstahl waren 3 und 10 mm dick. Als Zusatzwerkstoff wurden Massivdrähte mit Durchmessern von 1,0 und 1,2 mm verwendet. Das Schutzgas zum Schweißen von Baustahl bestand aus 82 % Argon und 18 % Kohlendioxid. Beim Schweißen von Edelstahl wurde ein Mischgas aus 97,5 % Argon und 2,5 % Kohlendioxid verwendet.

Der Schweißrauch wurde an der Entstehungsstelle entweder mit einer manuell geführten Absaughaube oder mittels Schweißbrenner mit integrierter Schweißrauchabsaugung erfasst. Die trichterförmige, mit einem Griff ausgestattete Absaughaube war

an einem beweglichen Arm über der Werkbank angebracht. Durch manuelles Nachführen stellte der Schweißer sicher, dass der seitliche Abstand zwischen Haube und Rauchfahne den empfohlenen Maximalabstand von 40 cm nicht überschritt. Die Absaughaube war an eine regelmäßig gewartete Schweißrauchabsaugung angeschlossen, die einen Luftvolumenstrom von 1 100 m³/h erzeugt, woraus sich eine Luftgeschwindigkeit von circa 0,4 m/s im Schweißbereich vor der Haube ergibt. Die Absaugleistung entsprach den Anforderungen des aktuellen Industriestandards nach DIN EN ISO 21904-4 [25]. In anderen Versuchen wurden zwei Typen von Brennern mit integrierter Absaugung verwendet, die mit einem Luftstrom von 55 und 58 m³/h betrieben wurden, sodass eine kontinuierliche Luftgeschwindigkeit zwischen 0,37 und 0,38 m/s in einem Abstand von 20 mm vor der Schweißdüse eingehalten wurde. Die Absaugparameter an beiden Schweißbrennern entsprachen somit den Anforderungen der DIN EN ISO 21904-4.

Bauteile aus 2 mm Baustahl wurden mittels Kurzlichtbogen oder in modifizierter Kurzlichtbogentechnik geschweißt. Für elf Versuche mit 2 mm Baustahlblechen lagen vollständige Messdaten vor. Bei neun Versuchen wurden ein Schweißdraht mit einem Mn-Gehalt von höchstens 1,8 % verwendet. In zwei Versuchen wurde ein Draht mit einem Mn-Gehalt von 7,0 % eingesetzt. Der Schweißstrom lag zwischen 66 und 110 Ampere.

Für die Bearbeitung von 3 mm dicken Edelstahlblechen in insgesamt neun Einzelversuchen wurde ein Impulslichtbogen oder eine modifizierte Kurzlichtbogenvariante angewendet. Der 1 mm starke Schweißdraht enthielt 19 % Cr, 9 % Ni und 1,8 % Mn. Der Schweißstrom lag zwischen 75 und 120 Ampere.

Bei 13 Versuchen wurden 10 mm dicke Bleche aus Baustahl mit konventioneller Sprühlichtbogentechnik oder modifiziertem Sprühlichtbogen bearbeitet. Der Mn-Gehalt im Zusatzwerkstoff betrug 1,5 oder 7,0 %. Die Drahtstärke betrug 1,2 mm. Der Schweißstrom lag je nach Schweißaufgabe zwischen 170 und 379 Ampere.

In weiteren sieben Versuchen wurden 10 mm dicke Bleche aus Edelstahl im Impulslichtbogenverfahren und im modifizierten Impulslichtbogenverfahren verschweißt. Die Legierung des Schweißzusatzes enthielt 18,7 % Cr, 8,1 % Ni und 7,0 % Mn. Die Drahtstärke betrug 1,2 mm, der durchschnittliche Schweißstrom lag zwischen 103 und 193 Ampere.

Am Musterbauteil waren in jeder Schweißung jeweils Verbindungsschweißungen – Stegschweißungen (PF), Fallschweißungen (PG), Überkopfschweißungen (PD), Kehlnähte (PB) – sowie Auftragsschweißungen (PA) in vorgegebener Reihenfolge und Nahtlänge auszuführen. Für die Verbindungsschweißungen waren Schweißströme im Bereich von 66 bis 88 Ampere (2 mm Stahlblech) und von 170 bis 179 Ampere (10 mm Blech) voreingestellt. Für die Auftragsschweißungen waren höhere Ströme im Bereich von 90 bis 97 Ampere (2 mm Blech) und 312 bis 383 Ampere (10 mm Blech) programmiert.

Die personengetragenen Probenahmen erfolgten nach den Standards des Messsystems Gefährdungsermittlung der Unfallversicherungsträger (MGU) in Höhe des Atembereichs des Schweißers vor dem Schweißerschutzschild mit Staubprobenahmesystemen der Typen FSP 10 und GSP 10 (Volumenstrom 10 l/min). Mit dem FSP-10-System wurden alveolengängige Partikel gesammelt, um die enthaltenen Metalle Mn, Cr und Ni zu analysieren (DIN EN 481). Das GSP-10-System sammelte einatembare Partikel für die Analyse von CrVI-Konzentrationen. Beide Systeme waren mit Membranfiltern mit 37 mm Durchmes-

ser und einer Porengröße von 8 µm ausgestattet. Die Konzentrationen von Ni, Cr und CrVI wurden nur beim Schweißen von Edelstahl bestimmt.

Die Masse des Schweißrauchs wurde gravimetrisch durch Wiegen der Filter, nach Konditionierung sowie vor und nach der Probenahme bestimmt. Die Konzentrationen wurden unter Berücksichtigung des jeweils gesamten Probenahmevolumens berechnet. Die induktiv gekoppelte Plasmamassenspektrometrie (ICP MS) wurde für die Analyse der Konzentrationen von Mn, Ni und Cr mit einem Spektrometer der Firma PerkinElmer LAS eingesetzt [26-28]. Die Konzentrationen von CrVI wurden mittels UV-Spektroskopie der Fa. Unicam Chromatography, Typ UV2-200, analysiert [29].

2.2 Weldox-Studien

Aus den Weldox-Studien erwiesen sich 95 Gefahrstoffmessungen an MAG/MIG-Schweißarbeitsplätzen für einen Vergleich mit der InterWeld-Laborstudie als geeignet. Details zum Studiendesign und Ergebnissen der Weldox-Studien werden an dieser Stelle nicht ausgeführt und sind den einschlägigen Publikationen zu entnehmen [19].

Die Sammlung von A- und E-Staub in den Weldox-Studien wurde mit den Probenahmesystemen PGP-EA und GSP 3,5 durchgeführt, die jeweils mit einem Volumenstrom von 3,5 l/min betrieben wurden. Die mediane Probenahmedauer betrug 3,2 h (Spanne 2 bis 4 h) [19, 22]. Alle Analysen erfolgten unter Anwendung derselben Methoden, wie für die InterWeld-Pilotstudie beschrieben, ebenfalls in den Laboren des IFA.

Anders als bei InterWeld und Weldox II waren bei der ersten Weldox-Studie die Probenahmesysteme im Schweißerschutzschirm montiert. Die Blechdicken sind für die Weldox-Messungen nicht systematisch dokumentiert. Um dennoch einen Vergleich der Effekte der Blechdicke zwischen beiden Studien herstellen zu können, wurde für die Weldox-Messungen nachträglich anhand des Produktes und der Fotodokumente auf die jeweils verarbeitete Blechdicke geschlossen.

2.3 Statistik

Die Höhe der Exposition gegenüber alveolengängigem Schweißrauch (SrA) und MnA aus den Messungen der InterWeld-Pilotstudie und der Weldox-Studien werden mit Medianen und Quartilen dargestellt. Da bei einem Teil der Messungen des SrA die Nachweisgrenze (LOD) nicht erreicht wurde, erfolgte die Schätzung für die betroffenen Quartile über das im Folgenden beschriebene Bayes'sche Modell [30].

Die Abbildung zeigt den Zusammenhang zwischen den Expositionsmessungen zu SrA und MnA als Streudiagramm mit Unterscheidung nach Mn-Gehalt des Drahts ($\leq 3\%$ vs. $> 3\%$). Werte unterhalb der Nachweisgrenze sind mit $2/3 \times \text{LOD}$ eingezeichnet und optisch kleiner dargestellt. In der Abbildung sind Regressionsgeraden aus einem Bayes'schen Modell [30], das die Beobachtungen $< \text{LOD}$ berücksichtigt, eingezeichnet:

$$\log(y_{\text{SrA}}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (\log(x_{\text{MnA}})) + \beta_2 \cdot x_{\text{Mn-Gehalt}} + e$$

Die angegebenen Pearson-Korrelationskoeffizienten zwischen SrA und MnA nach Mn-Gehalt sind aus dem Bayes'schen Regressionsmodell [30] geschätzt worden.

Um den Einfluss einzelner Faktoren auf die Exposition zu bewerten und Unterschiede zwischen den Studien zu erkennen, wurden Bayes'sche lineare Regressionsmodelle [30] verwendet mit log-transformierten Expositionsmesswerten (SrA oder MnA) als Zielvariable und folgenden Einflussvariablen:

- Blechdicke ($< 10 \text{ mm}$ vs. $\geq 10 \text{ mm}$),
- Legierung des Zusatzwerkstoffs (Baustahl vs. Chrom-Nickel),
- Mangengehalt des Drahts ($\leq 3\%$ vs. $> 3\%$),
- Lokale Erfassung (keine Absaugung oder nicht wirksame Absaugung vs. Absaugung am Brenner oder Absaughaube; kurz: ohne vs. mit),
- Schweißtechnik (konventionell vs. modifiziert).

Um die Unterschiede zwischen den Studien zu erfassen, wird die Variable Studie (InterWeld-Pilotstudie vs. Weldox I & II) als Einflussfaktor und Wechselwirkungsterm in die Modelle aufgenommen:

$$\begin{aligned} \log(y_{\text{Exposition}}) = & \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{\text{Studie}} + \beta_2 \cdot x_{\text{Blechdicke}} + \beta_3 \\ & \cdot x_{\text{Legierung}} + \beta_4 \cdot x_{\text{Mn-Gehalt}} + \beta_5 \cdot x_{\text{Erfassung}} + \beta_6 \cdot x_{\text{Studie}} \\ & \cdot x_{\text{Blechdicke}} + \beta_7 \cdot x_{\text{Studie}} \cdot x_{\text{Legierung}} + \beta_8 \cdot x_{\text{Studie}} \cdot x_{\text{Mn-Gehalt}} \\ & + \beta_9 \cdot x_{\text{Studie}} \cdot x_{\text{Erfassung}} + \beta_{10} \cdot x_{\text{Schweißtechnik}} + e \end{aligned}$$

Die Variable Schweißtechnik wird als Korrekturfaktor in das Modell aufgenommen, da nur in der InterWeld-Pilotstudie modifizierte Schweißtechniken verwendet wurden. Der Effekt der Lichtbogenvariante auf die Exposition ist in den Ergebnisdarstellungen bestmöglich herausgerechnet worden. Aus den Modellen wurden die mittleren Konzentrationen der interessierenden Effekte geschätzt und mit 95 % Kreditintervallen (KI) angegeben. Um zu prüfen, ob ein Unterschied in den Effektschätzern zwischen den Studien vorliegt, wurde der prozentuale Anteil der Posteriori-Verteilung in der Region der praktischen Äquivalenz (Full ROPE, niedrige Werte deuten auf Unterschiede hin) und die Richtungswahrscheinlichkeit (pd, hohe Werte deuten auf Unterschiede hin) betrachtet [31].

Eine ausführliche Beschreibung aller Modelle, der Testverfahren und eine Auflistung der verwendeten Software findet sich im Anhang.

3 Ergebnisse

3.1 Deskription

Zunächst erfolgt die Darstellung und Beschreibung der gemessenen Expositionen gegenüber SrA (**Tabelle 1**) und MnA (**Tabelle 2**) für beide Messreihen (InterWeld-Pilotprojekt und Weldox I & II), gegliedert nach untersuchter Determinante. Die Gesamtanzahl der jeweils ausgewerteten Messwerte und die Zahl der Messwerte oberhalb der Bestimmungsgrenze sind ebenfalls angegeben.

Der Median der Konzentration von SrA lag bei den 95 Weldox-Messungen etwa vierfach über dem Median bei den 40 experimentellen Schweißversuchen der InterWeld-Pilotstudie (2,00 vs. 0,51 mg/m³, Tabelle 1). Die mittleren Expositionen gegenüber MnA betragen 50 µg/m³ bei den InterWeld-Experimenten und 163 µg/m³ bei den Weldox-Messungen (Tabelle 2). Während die LOD beim Schweißrauch bei etwa 20% der Probenahmen nicht erreicht wurde, konnte die Mangankonzentration im SrA immer ermittelt werden.

Wurde hochlegierter Stahl (CrNi-Stahl) verarbeitet, zeigten sich in beiden Studien im Mittel konsistent geringere Schweiß-

Tabelle 1. Deskription (Median und Quartile) SrA aus der InterWeld-Pilotstudie und den WELDOX-Studien bei Mag/MIG-Schweißen; kursive Zahlen: Schätzwerte aufgrund von Beobachtungen unterhalb der Nachweisgrenze.

Determinante	Kategorie	InterWeld A-Fraktion in mg/m ³			Weldox I & II A-Fraktion in mg/m ³		
		N (> LOD)	Median	Q1 bis Q3	N (>LOD)	Median	Q1 bis Q3
	Alle	40 (22)	0,51	0,18 bis 1,63	95 (85)	2,00	1,10 bis 3,87
Blechdicke	2 bis 3 mm (< 10mm)	20 (8)	0,31	0,11 bis 0,54	51 (42)	1,59	0,83 bis 3,46
Blechdicke	10 mm (≥ 10mm)	20 (14)	1,20	0,35 bis 2,09	44 (43)	2,42	1,54 bis 4,13
Legierung (ZWS*)	Baustahl	20 (12)	0,71	0,27 bis 1,92	62 (57)	2,51	1,24 bis 3,88
Legierung (ZWS)	CrNi	20 (10)	0,42	0,15 bis 0,99	28 (23)	1,31	0,62 bis 2,33
Mn-Gehalt (ZWS)	≤ 3 %	29 (16)	0,49	0,15 bis 1,50	91 (81)	2,00	1,10 bis 3,78
Mn-Gehalt (ZWS)	> 3 %	11 (6)	0,72	0,22 bis 1,75	4 (4)	2,79	1,27 bis 4,13
Lokale Erfassung	ohne	11 (10)	1,75	0,54 bis 2,35	75 (71)	2,38	1,51 bis 4,26
Lokale Erfassung	mit	29 (12)	0,31	0,13 bis 0,80	20 (14)	0,78	0,32 bis 1,23
Prozessvarianten	Standard	21 (15)	0,80	0,49 bis 2,00			
Prozessvarianten	Modifiziert	19 (7)	0,25	0,12 bis 1,12			

* ZWS = Zusatzwerkstoff (Schweißdraht)

Tabelle 2. Deskription (Median und Quartile) MnA aus der InterWeld-Pilotstudie und den Wwldox-Studien bei MAG/MIG-Schweißen.

Determinante	Kategorie	InterWeld MnA in mg/m ³			Weldox I & II MnA in mg/m ³		
		N	Median	Q1 bis Q3	N	Median	Q1 bis Q3
	Alle	40	50	9 bis 110	95	163	78 bis 329
Blechdicke	2-3 mm (< 10 mm)	20	9	4 bis 56	51	130	47 bis 300
Blechdicke	10 mm (≥ 10 mm)	20	92	46 bis 180	44	230	130 bis 375
Legierung (ZWS)	Baustahl	20	51	9 bis 103	62	230	97 bis 350
Legierung (ZWS)	CrNi	20	44	11 bis 175	28	129	44 bis 221
Mn-Gehalt (ZWS)	≤ 3 Prozent	29	35	6 bis 73	91	150	63 bis 320
Mn-Gehalt (ZWS)	> 3 Prozent	11	140	35 bis 410	4	802	302 bis 1501
Lokale Erfassung	Ohne	11	210	58 bis 450	75	230	130 bis 380
Lokale Erfassung	Mit	29	22	6 bis 64	20	44	30 bis 105
Prozessvarianten	Standard	21	55	18 bis 140			
Prozessvarianten	Modifiziert	19	32	6 bis 73			

rauchkonzentrationen (InterWeld: 0,42 vs. 0,71 mg/m³; Weldox: 1,31 vs. 2,51 mg/m³) als beim Schweißen von Baustahl sowie geringere MnA-Expositionen (InterWeld; 44 vs. 51 µg/m³; Weldox: 129 vs. 230 µg/m³).

In beiden Messserien resultierten höhere Expositionen gegenüber Schweißrauch aus dem Schweißen dickerer Bleche (≥ 10 mm) gegenüber dem Schweißen dünnerer Bleche (< 10 mm). Die Mediane des A-Staubs betragen beim Schweißen dicker und dünner Bleche 1,20 und 0,31 mg/m³ bei InterWeld

sowie 2,42 und 1,59 mg/m³ in den Weldox-Studien. Für MnA ergaben sich für die Expositionen beim Schweißen dickerer und dünnerer Bleche folgende Mediane: 92 vs. 9 µg/m³ (InterWeld) und 230 vs. 130 µg/m³ (Weldox).

Beim Einsatz von Schweißdraht mit erhöhtem Mn-Gehalt (> 3 %) wurden in beiden Messserien deutlich höhere MnA-Konzentrationen im Atembereich gemessen und betragen in InterWeld beim Schweißen mit hohem Mn-Gehalt 140 µg/m³ und beim Schweißen mit normalem Mn-Gehalt 35 µg/m³ (Weldox:

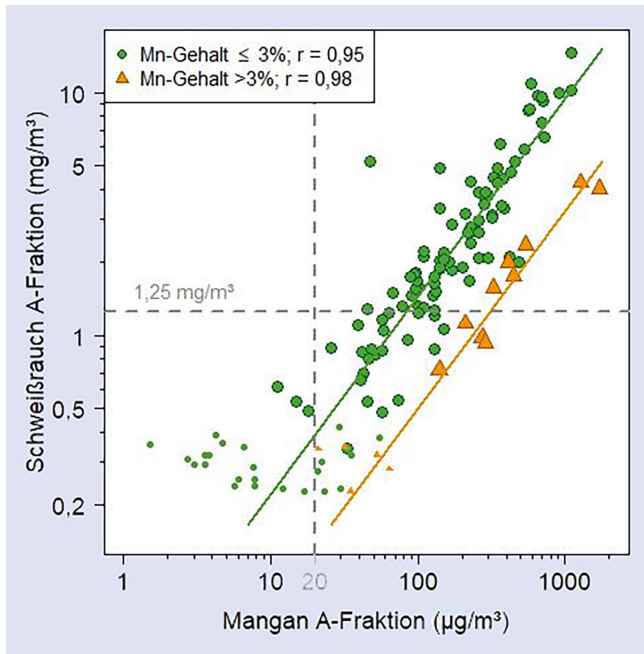


Bild 1. Zusammenhang von MnA und SrA aus 135 Arbeitsplatzmessungen; kleine Symbole: Beobachtungen unterhalb der Nachweisgrenze bei SrA; r: geschätzter Korrelationskoeffizient nach Pearson Grafik: Autoren

802 µg/m³ vs. 150 µg/m³). Beim SrA waren die Unterschiede deutlich geringer. In der InterWeld-Studie lagen die Mediane der Schweißungen mit geringerem und höherem Mn-Gehalt bei 0,49 und 0,72 mg/m³. Bei Weldom waren es mit geringerem und höherem Mn-Gehalt 2,00 und 2,79 mg/m³).

Wurde bei den Werkstattversuchen der Schweißrauch an der Entstehungsstelle abgesaugt, ergab sich für SrA im Mittel eine Konzentration von 0,31 mg/m³. Ohne Absaugung waren es 1,75 mg/m³. Für reale Schweißplätze ohne Absaugung ergab sich eine mittlere Konzentration von 2,38 mg/m³ für SrA. Wurde eine lokale Absaugung wirksam eingesetzt, ergab sich im Atembereich eine mittlere Konzentration von 0,78 mg/m³.

Die mittleren MnA-Expositionen im Experiment (InterWeld) betragen mit lokaler Erfassung 22 µg/m³ und ohne Absaugung 210 µg/m³. An realen Arbeitsplätzen (Weldom) waren es 44 µg/m³ mit Absaugung gegenüber 230 µg/m³ beim Schweißen ohne lokale Erfassung.

Wurden in den experimentellen Schweißversuchen modifizierte Lichtbogenvarianten eingesetzt, zeigten sich im Mittel niedrigere Expositionen als beim Einsatz konventioneller Technik (A-Fraktion: 0,25 vs. 0,80 mg/m³; MnA: 32 vs. 55 µg/m³).

Um den Zusammenhang der gemessenen Expositionen von Schweißrauch und MnA zu zeigen, wurden die Messwerte aus beiden Messreihen gegeneinander aufgetragen (**Bild 1**). Im Gesamt-

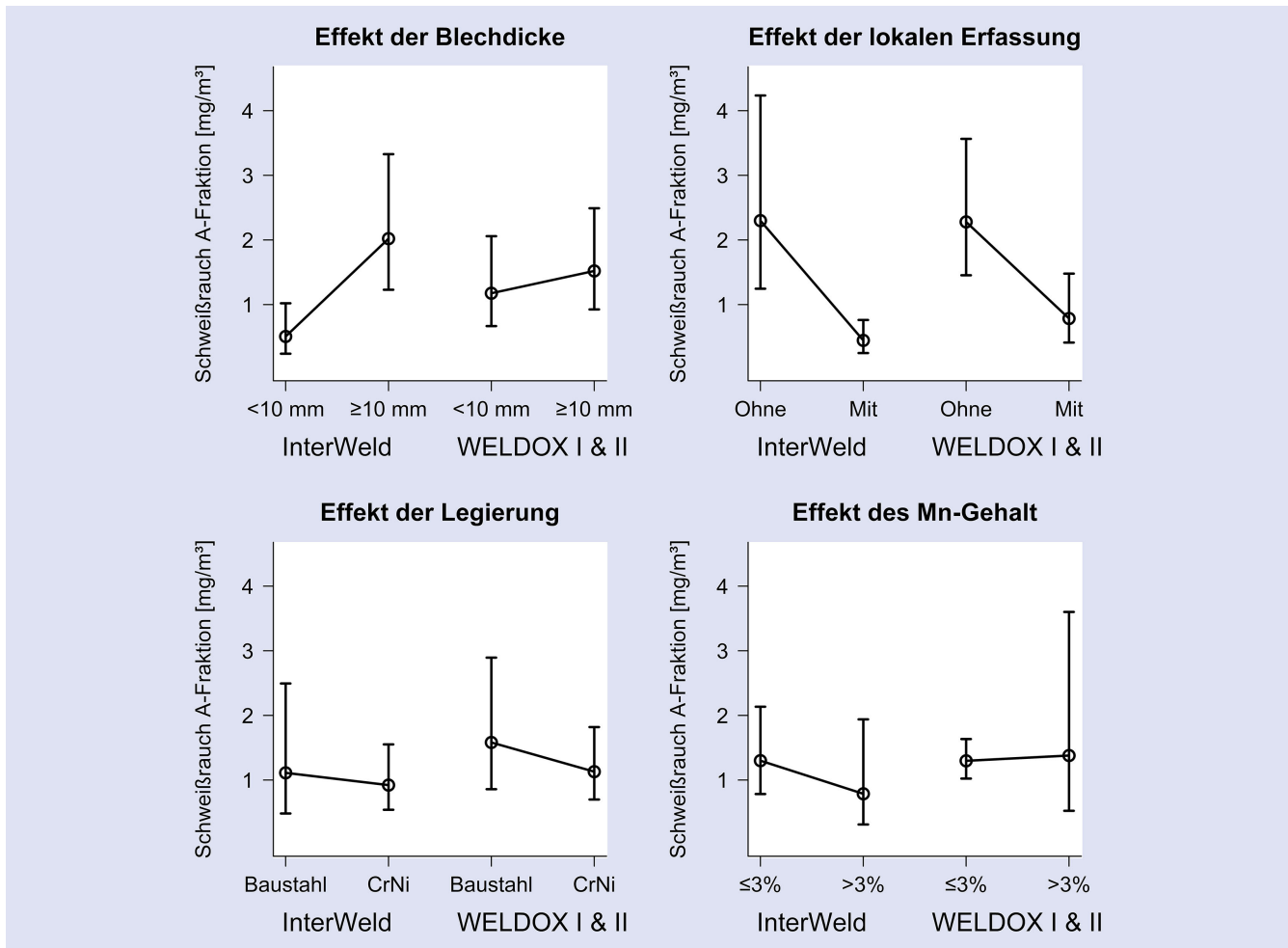


Bild 2. Effekte der relevanten Randbedingungen auf die Exposition gegenüber SrA in der InterWeld-Pilotstudie (N = 40) und den Weldom-Studien (N = 95). Geschätzte mittlere Konzentration der Effekte und 95%-Kreditibilitätsintervalle. Grafik: Autoren

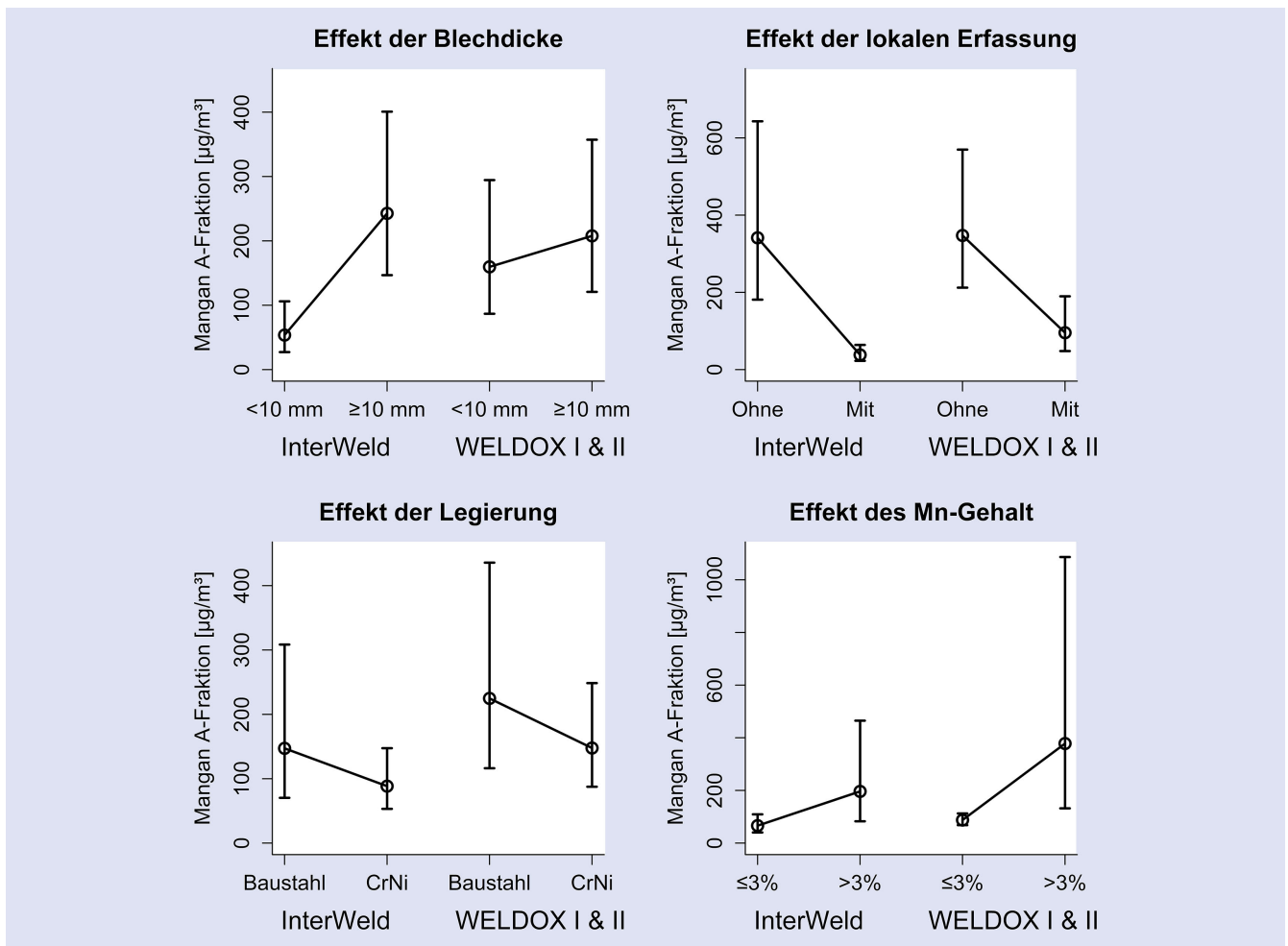


Bild 3. Effekte der relevanten Randbedingungen auf die Exposition gegenüber Mangan (A-Fraktion) in der InterWeld-Pilotstudie (N = 40) und den Weldox-Studien (N = 95). Geschätzte mittlere Konzentration der Effekte und 95%-Kredibilitätsintervalle. Grafik: Autoren

kollektiv von 135 Beobachtungen zeigte sich eine hohe Korrelation zwischen SrA und MnA. Bei der Verarbeitung von Draht mit geringem ($\leq 3\%$) und höherem Mangengehalt ($> 3\%$) ergaben sich Korrelationskoeffizienten nach Pearson von 0,95 und 0,98.

3.2 Analytik/Modellierung

Abschließend werden nun die Effekte der untersuchten Determinanten für beide Studien geschätzt und miteinander verglichen. Der jeweils für eine Determinante geschätzte Effekt wird für beide Studien (InterWeld-Pilotstudie vs. Weldox) gegenübergestellt. **Bild 2** visualisiert die Effekte auf die alveolengängige Schweißrauch-Exposition, **Bild 3** die Effekte auf die MnA-Exposition. Weitere Angaben finden sich in **Tabelle 3**.

Sie zeigt Schätzungen für die Einflüsse relevanter Randbedingungen auf die Exposition mit SrA und der Konzentration von MnA im multivariablen Modell (Bayesian) und Ergebnisse einer Prüfung auf Übereinstimmung dieser Effekte in den Messserien InterWeld und Weldox.

Für die Verarbeitung von dicken Blechen (≥ 10 mm) ergaben sich im Vergleich zur Bearbeitung von dünnen Blechen (< 10 mm) Effekte auf die Exposition gegenüber Schweißrauch um den Faktor 3,98 bei InterWeld und 1,29 bei Weldox. Die Effekte der Blechdicke auf MnA waren 4,52 und 1,30.

Eine wirksame Erfassung an der Entstehungsstelle reduzierte die Schweißrauchexposition bei InterWeld um den Faktor 0,19 und um 0,34 bei Weldox. Die Exposition gegenüber MnA wurde sogar um die Faktoren 0,11 und 0,27 reduziert.

Der Mn-Gehalt des Schweißdrahts wirkte sich in beiden Messserien auf die Manganexposition aus. Im Vergleich zu geringem Mn-Gehalt (bis 3%) steigerte die Verarbeitung von Schweißdrähten mit höherem Mn-Gehalt (mehr als 3%) die Manganexposition im Atembereich um den Faktor 2,96 beim Experiment (InterWeld) und um den Faktor 4,31 an gewerblichen Arbeitsplätzen (Weldox). Der Unterschied zwischen beiden Faktoren wird als statistisch unsicher bewertet. Auf die SrA-Exposition wirkte sich der Mn-Gehalt nur gering aus.

Die Verarbeitung von CrNi-Legierungen wirkte sich in den beiden Messserien sowohl auf SrA als auch auf MnA tendenziell expositionsminierend aus. Die Effekte waren aber innerhalb der anzunehmenden zufälligen Schwankungen und es war kein Unterschied in den Effekten nachweisbar.

4 Diskussion

Die Expositionen, die aus den Messungen bei den Werkstattversuchen abgeleitet wurden, lagen deutlich unterhalb der Expositionen an realen Arbeitsplätzen. Im Fokus standen Einflüsse re-

Tabelle 3. Vergleich der Effekte von relevanten Randbedingungen am Arbeitsplatz auf die Exposition gegenüber SrA und MnA in der InterWeld-Pilotstudie (N = 40) mit den Weldox-Studien (N = 95) bei MAG/MIG-Schweißen. (Weiterführende Informationen zur Interpretation des Anteilwertes und der Richtungswahrscheinlichkeit sind im Anhang „Statistik“ auf Seite 275 aufgeführt.)

	InterWeld Effektschätzer		Weldox I & II Effektschätzer		Vergleich der Effekte InterWeld vs. Weldox I & II		
	Faktor	95 % KI	Faktor	95 % KI	Full Rope in %	pd in %	Unterschied vorhanden?
Schweißrauch (A)							
Blechdicke (< 10 mm vs. ≥ 10 mm)	3,98	1,84 bis 9,14	1,29	0,89 bis 1,89	0,92	99,48	Sehr wahrscheinlich
Legierung (Baustahl vs. CrNi)	0,83	0,30 bis 2,27	0,71	0,45 bis 1,14	17,33	60,54	Unsicher
Mn-Gehalt (≤ 3 % vs. > 3 %)	0,60	0,19 bis 1,86	1,06	0,39 bis 2,86	10,05	77,19	Unsicher
Lokale Erfassung (ohne vs. mit)	0,19	0,10 bis 0,38	0,34	0,21 bis 0,56	9,42	91,44	Unsicher
Mangan (A)							
Blechdicke (< 10 mm vs. ≥ 10 mm)	4,52	2,16 bis 9,45	1,30	0,86 bis 1,96	0,50	99,79	Sehr wahrscheinlich
Legierung (Baustahl vs. CrNi)	0,60	0,26 bis 1,41	0,66	0,40 bis 1,08	23,05	56,94	Unsicher
Mn-Gehalt (≤ 3 % vs. > 3 %)	2,96	1,04 bis 8,46	4,31	1,46 bis 12,81	13,73	68,76	Unsicher
Lokale Erfassung (ohne vs. mit)	0,11	0,06 bis 0,22	0,27	0,16 bis 0,46	3,33	98,12	Vermutlich

KI: Kreditibilitätsintervall

Full Rope: Anteil in der Region der praktischen Äquivalenz. Ein niedriger Wert deutet auf einen Unterschied hin.

pd: Richtungswahrscheinlichkeit. Ein hoher Wert deutet auf einen Unterschied hin.

relevanter Randbedingungen (Determinanten) auf die Expositionen des Schweißers gegenüber SrA und dem darin enthaltenen MnA. Die hier beobachteten Effekte der Determinanten Absaugung, Werkstofflegierung und Blechdicke wiesen in beiden Messserien in dieselbe Richtung. Die Effekte insbesondere der Blechdicke waren im Experiment (InterWeld) ausgeprägter als bei den Messungen an realen Arbeitsplätzen (Weldox).

Der Einsatz einer lokalen Erfassung an der Entstehungsstelle führte im Experiment zu einer Minderung der Exposition gegenüber MnA um 89 % (Faktor 0,11) gegenüber Schweißungen ohne Absaugung. An realen Arbeitsplätzen unterschieden sich die Expositionen mit und ohne wirksame Absaugung um 73 % (Faktor 0,27). Dabei wurden im Experiment entweder eine nachführbare (N = 8) oder eine brennerintegrierte Erfassung (N = 21) eingesetzt. Die nachführbare Absaugung erschien beim Schweißen dickerer Bleche also bei stärkeren Emissionen als etwas wirksamer [18]. Bei Weldox war die Modalität der Erfassung nicht näher spezifiziert. Nicht jeder Arbeitsplatz, an dem eine Absaugung vorhanden war, wurde in den Weldox-Studien als Arbeitsplatz „mit wirksamer Absaugung“ gewertet, da die Wirksamkeit der Absaugung per Experteneinschätzung für jeden Arbeitsplatz beurteilt wurde und nicht jede vorhandene Absaugung tatsächlich wirksam war. Dies war zum Beispiel der Fall, wenn ein nachführbares Erfassungselement nicht sachgerecht nachgeführt wurde oder der Luftvolumenstrom nicht ausreichte und sich die unzureichende Raucherfassung visuell erkennen ließ. Somit haftet der Kategorisierung von Arbeitsplätzen mit nur unzureichend verifizierbarer lokaler Schweißraucherfassung eine gewisse Unschärfe an, die sich auf die Ergebnisse verzerrend ausgewirkt haben könnte. Dagegen gab es solche Grenzfälle in der InterWeld-Pilotstudie nicht: Hier war die Erfassung entweder voll wirksam

oder gar nicht vorhanden, was den etwas größeren Effekt im Experiment erklären könnte.

Die im Experiment vergleichsweise etwas geringeren Schweißrauch- und Manganexpositionen bei der Verarbeitung des CrNi-Werkstoffes könnten sich durch die Verwendung des weniger aktiven Prozessgases erklären, da ansonsten vergleichbare Rahmenbedingungen herrschten. Mischgase mit geringerem Anteil aktiver Komponenten oder reine Inertgase werden auch in der Praxis bevorzugt bei der Bearbeitung dieser Werkstoffe eingesetzt. Bei Schweißungen mit derartigen Gasen werden geringere Emissionen beobachtet als beim Einsatz von Mischgasen mit hohem Anteil von reaktionsfreudigem CO₂ oder O₂. Eine Berücksichtigung der Prozessgaskomposition war zwar bei den Weldox-Studien nicht möglich. Da aber der Effekt dem im Experiment sehr ähnlich ist, erhärtet sich die oben erläuterte Annahme.

Wenn Schweißdraht mit erhöhtem Mn-Gehalt verschweißt wurde, ergaben sich konsistent höhere Mediane für MnA.

Die Effekte waren generell in den experimentellen Schweißversuchen etwas ausgeprägter als bei den Messungen an den Arbeitsplätzen der Weldox-Studie. Diese Beobachtung ist zunächst nicht unerwartet, da die kontrollierten Bedingungen im Labor eine klarere Abgrenzung der untersuchten Kategorien erlauben. So gab es beispielsweise keine Nachbarbeitsplätze, die ebenfalls Emissionen verursachen. Weitere mögliche Gründe für diese Diskrepanzen lassen sich aus methodischen Unterschieden bei der Datengewinnung und auf Annahmen gestützten Ergänzungen bei fehlenden Informationen ableiten.

4.1 Korrekturfaktor für Prozessregelvarianten

In den Werkstattexperimenten der InterWeld-Pilotstudie wurde der Einfluss von Prozessregelvarianten („modifizierter Licht-

bogen“) auf die Exposition des Schweißers mit konventionellen Prozessen verglichen. Im Mittel wurde eine etwa um die Hälfte geringere Exposition gegenüber Schweißrauch und MnA bei den neuen Techniken beobachtet. In den Weldox-Studien war der Einsatz von Prozessregelvarianten nicht dokumentiert und kann weitestgehend ausgeschlossen werden, da zum Zeitpunkt der Messungen diese Techniken im Produktionsalltag noch nicht verbreitet waren. Die Tatsache, dass im Experiment bei etwa der Hälfte der Messungen Prozessregelvarianten Anwendung fanden, führt zu insgesamt niedrigeren Expositionen als bei Weldox. Um für die Modellierung dennoch eine Vergleichbarkeit beider Studien herzustellen, wurden die Messwerte der InterWeld-Studie mit Prozessregelvarianten korrigiert.

4.2 Verschiedene Probenahmesysteme (PGP-EA vs. FSP 10)

Bei der Interpretation der vorgestellten Ergebnisse ist weiterhin zu berücksichtigen, dass in den Untersuchungen unterschiedliche Probenahmesysteme zum Einsatz kamen. In der ersten Weldox-Studie erfolgte die Schweißrauchprobensammlung mit einem zweistufigen System (PGP-EA) mit einem Volumenstrom von 3,5 l/min. Beim überwiegenden Teil der Messungen waren die Sammler im Schweißerschutzschirm montiert. Bei den späteren Messungen im Rahmen der Weldox II-Studie und den Experimenten im Labor kam ein zyklonisch wirkendes System zu Einsatz, welches mit einem Volumenstrom von 10 l/min betrieben wurde (FSP 10). Hier waren die Sammler im Bereich des Kragens an Gurten fixiert und damit außerhalb des Schweißerschutzschirms und etwa 20 cm weiter entfernt von Mund oder Nase des Schweißers als bei der Montage am Schweißerschutzschirm. Beide Systeme waren im Rahmen des MGU geprüft und zertifiziert, sodass die Vergleichbarkeit der Messwerte als gegeben angenommen werden kann. Dennoch sind Verzerrungen der Messwerte nicht gänzlich auszuschließen.

4.3 Blechdicke

Da die Dicke der bearbeiteten Bleche nach MGU-Standard nicht systematisch dokumentiert wurden, wurde ein nachträgliches Rating für die Messungen bei den Weldox-Studien vorgenommen. Dabei wurde aus Informationen zum Produkt, der Branche und mittels Bilddokumentation der Arbeitsplätze entschieden, ob die verarbeiteten Bleche eine Dicke von mindestens 10 mm (dick) oder weniger als 10 mm aufwiesen (dünn). Bei den Versuchen der InterWeld-Pilotstudie wurden ausschließlich Bleche von 10 mm (dick) oder von 2 und 3 mm (dünn) Dicke verarbeitet. Fehler und Unschärfen beim nachträglichen Rating und eine vermutlich breite Streuung der Ausprägungen in Verbindung mit dem Einsatz typischer Blechdicken im Anlagenbau im Bereich von 4 bis 6 mm in den Weldox-Daten könnte zur Verdünnung des Effekts der Determinante geführt haben. Dies könnte größere Unterschiede der Effekte in den beiden Messserien teilweise erklären.

4.4 Lichtbogenbrenndauer

Die Lichtbogenbrenndauer oder Lichtbogenzeit hat unmittelbaren Einfluss auf die Emission von Schweißrauch und ist deshalb auch eine wesentliche Determinante der Exposition des

Schweißers. Allerdings wurde dieser Parameter in bisherigen MGU-Messungen nicht dokumentiert, so auch bei den Weldox-Messungen. Für 15 von 40 InterWeld-Experimenten konnte die Lichtbogenbrenndauer aus den vom Schweißgerät aufgezeichneten Prozessdaten ermittelt werden. Sie machte zwischen 45 und 86 % (arithmetisches Mittel: 68 %) der Probenahmedauer aus. Ein derart hoher Anteil der Lichtbogenbrenndauer an der Probenahmedauer wird an betrieblichen Arbeitsplätzen vermutlich selten erreicht, da hier meistens mehr Zeit für Vorbereitungen und Nacharbeiten benötigt wird. Die im Experiment geschätzten Expositionen können daher nicht ohne weiteres auf reale Arbeitsplätze übertragen werden. Die hohe Lichtbogenbrenndauer im Experiment würde – isoliert betrachtet – zunächst höhere Expositionen gegenüber den Arbeitsplatzmessungen erwarten lassen. Der in diesem Artikel untersuchte Vergleich zeigt allerdings das Gegenteil. Vermutlich sind es eine Reihe verschiedener Faktoren, die an realen Arbeitsplätzen trotz mutmaßlich geringerer Lichtbogenbrenndauer zu höheren Expositionen im Vergleich zum Labor-Setting führen, die an dieser Stelle nicht abschließend beleuchtet werden können. Die im Experiment einwandfrei wirksame Absaugung und fehlende Nachbararbeitsplätze könnten Beispiele hierfür sein.

4.5 Korrelation von Mangan- und Schweißrauchkonzentration

Wie bereits anderweitig beschrieben, waren auch hier im Fokus stehender SrA und Mn in hohem Maße linear korreliert [32]. Im Bereich niedriger Expositionen – deutlich unterhalb der geltenden Arbeitsplatzgrenzwerte – fehlen zahlreiche Messwerte für den Schweißrauch, da die Nachweisgrenze nicht erreicht wurde. Allerdings könnte es aufgrund der IARC-Einstufung von Schweißrauch als krebserzeugend zu einer Einführung eines Schweißrauch-Beurteilungsmaßstabes kommen, der wesentlich niedriger liegen könnte als der Allgemeine Staubgrenzwert. Dann würde die Quantifizierung sehr kleiner Schweißrauchexpositionen (< Nachweisgrenze) wieder an Bedeutung gewinnen. In diesem Bereich wäre eine Schätzung der Massenkonzentration aus den analytisch bestimmten Messwerten der Mangankonzentrationen hilfsweise möglich.

5 Schlussfolgerungen

Für die Blechdicke, die Erfassung an der Entstehungsstelle und die Legierung des verarbeiteten Zusatzwerkstoffs bestätigten sich durch den Vergleich von Experiment und Praxis die Einflüsse auf die Exposition des Schweißers. Die beobachteten Effekte waren bei den Werkstattversuchen der InterWeld-Pilotstudie ausgeprägter als bei älteren Messungen an realen Arbeitsplätzen, wenn auch die Effekte in beiden Messserien immer in dieselbe Richtung wiesen. Als Gründe für die beobachteten Unterschiede sind eine große Variabilität bei den Randbedingungen in der realen Arbeitswelt sowie Lücken und Unschärfen der bisherigen Dokumentation von Prozessparametern und relevanter Randbedingungen zu vermuten.

Um Vergleichbarkeit bei Expositionsmessungen an verschiedenen Arbeitsplätzen oder zu unterschiedlichen Zeitpunkten am selben Arbeitsplatz zu ermöglichen, erscheint eine zweckmäßige Erweiterung der Dokumentation relevanter Randbedingungen für zukünftige Gefahrstoffmessungen unverzichtbar.

Insbesondere zur Prüfung der Wirksamkeit von Interventionsmaßnahmen oder zur Schätzung der zu erwartenden Exposition an einem typischen Schweißplatz in Prognosemodellen bedarf es einer Ergänzung der Datenbasis. Dazu sollte die systematische Dokumentation eingesetzter Arbeitsmittel und Werkstoffe um ein zuverlässiges Monitoring der Lichtbogenbrenndauer erweitert werden. Nach Möglichkeit sollten auch Drahtvorschubgeschwindigkeit, Schweißstromstärke und -führung, Gasfluss sowie Funktionsparameter von Absaugvorrichtungen dokumentiert werden. Die Minimierung der individuellen Exposition des Schweißers und seines Umfelds setzt achtsames Verhalten und bestimmungsgemäße Anwendung angebotener Schutzmaßnahmen voraus. Eine praktikable Dokumentation diesbezüglicher Beobachtungen im Rahmen von Expositionsmessungen könnte weitere wegweisende Informationen liefern, die ebenfalls die Gestaltung und Entwicklung eines betrieblichen Schweißrauchminderungsplans bestimmen und die Umsetzung der TRGS 528 unterstützen.

Eine diesbezügliche Erweiterung der Dokumentation im Rahmen des MGU wird derzeit auf Praktikabilität und Machbarkeit geprüft.

DANKSAGUNG

Herrn Arno Goebel danken wir für maßgebliche Beiträge bei der Konzeption, der Durchführung und der Auswertung der Experimente im Rahmen der InterWeld-Pilotstudie.

Literatur

- [1] Welding, Molybdenum Trioxide, and Indium Tin Oxide – IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, Volume 118. Hrsg.: International Agency for Research on Cancer (IARC), Lyon, France 2018.
- [2] Koppisch, D.; Zschiesche, W. et al.: Schweißrauchexpositionen in Deutschland und Bewertung der gesundheitsschädigenden Wirkungen – insbesondere im Hinblick auf Lungenkrebskrankungen. *Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed* 58 (2023), S. 185-195.
- [3] Honaryar, M. K.; Lunn, R. M.; Luce, D. et al.: Welding fumes and lung cancer: a meta-analysis of case-control and cohort studies. *Occup Environ Med* 76 (2019), S. 422-31.
- [4] BK-Zahlen und Statistik. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2023. <https://www.dguv.de/de/zahlen-fakten/bk-geschehe/anerkannte-bken/index.jsp>
- [5] McMillan, G.: Is Electric Arc Welding linked to Manganism or Parkinson's Disease? *Toxicol Rev* 24 (2005), S. 237-57.
- [6] Flynn, M.R.; Susi, P.: Neurological risks associated with manganese exposure from welding operations – a literature review. *Int J Hyg Environ Health* 212 (2009), S. 459-469.
- [7] Racette, B.A.; Searles Nielsen, S.; Criswell, S. R. et al.: Dose dependent progression of parkinsonism in manganese-exposed welders. *Neurology* 88 (2017), S. 344-351.
- [8] Pesch, B.; Kendzia, B.; Pohlabein, H. et al.: Exposure to welding fumes, hexavalent chromium, or nickel and risk of lung cancer. *Am J Epidemiol* 188 (2019), S. 1984-93.
- [9] Behrens, T.; Lehnert, M.; Zschiesche, W. et al.: Ableitung des Arbeitsplatzgrenzwerts für Mangan (MnA) bei Schweißarbeiten. *Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed*; 53 (2018): 598-601.
- [10] Technische Regel für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900). Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund 2006. <https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/TRGS/TRGS-900.html>
- [11] Technische Regel für Gefahrstoffe: Schweißtechnische Arbeiten (TRGS 528). Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund 2020. <https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/TRGS/Regelwerk/TRGS-528.html>
- [12] Technische Regel für Gefahrstoffe: Risikobezogenes Maßnahmenkonzept für Tätigkeiten mit krebserzeugenden Gefahrstoffen (TRGS 910). Hrsg.: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Dortmund 2006. <https://www.baua.de/DE/Angebote/Regelwerk/TRGS/TRGS-910.html>
- [13] Kendzia, B.; Koppisch, D.; Van Gelder, R. et al.: Modelling of exposure to respirable and inhalable welding fumes at German workplaces. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* (2019), S. 400-409.
- [14] Kendzia, B.; Van Gelder, R.; Schwank, T. et al.: Occupational Exposure to Inhalable Manganese at German Workplaces. *Annals of Work Exposures and Health* (2017), S. 1-10.
- [15] Spiegel-Ciobanu, V. E.; Costa, L.; Zschiesche, W.: Kapitel 3.1.4 – Gas-Shielded Metal Arc Welding (GMAW). In: Hazardous substances in welding and allied processes. Hrsg.: International Institute of Welding, Cham, Switzerland, Springer 2020.
- [16] Brand, P.; Ebert, B.; Esser, A. et al.: Direct exposure of welders to welding fumes and effect of fume extraction systems under controlled conditions. *J Occup Environ Med* 63 (2021), S. 490-502.
- [17] Egerland, S. A.; Wiesinger, M.; Sharma, R. et al.: Experimental study of measures preventing welders from fume exposure. *Weld World* 67 (2023), S. 1-20. doi.org/10.1007/s40194-022-01395-1
- [18] Lehnert, M.; Goebel, A.; Zschiesche, W. et al.: How to Reduce the Exposure of Welders to an Acceptable Level: Results of the InterWeld Study. *Ann Work Expo Health* 66 (2022) Nr. 2, S. 192-202.
- [19] Lehnert, M.; Pesch, B.; Lotz, A. et al.: Exposure to Inhalable, Respirable and Ultrafine Particles in Welding Fume. *Ann Occup Hyg* 56 (2012) Nr. 5, S. 557-567.
- [20] Lehnert, M.; Weiss, T.; Pesch, B. et al.: Reduction in Welding Fume and Metal Exposure of Stainless Steel Welders – An Example from the WELDOX Study. *Int Arch Occup Environ Hyg* 87 (2014) Nr. 5, S. 483-92.
- [21] Pesch, B.; Dydak, U.; Lotz, A. et al.: Association of exposure to manganese and iron with relaxation rates R1 and R2* – magnetic resonance imaging results from the WELDOX II study. *Neurotoxicology* 64 (2018), S. 68-77.
- [22] Casjens, S.; Dydak, U.; Dharmadhikari, S. et al.: Association of exposure to manganese and iron with striatal and thalamic GABA and other neurometabolites – Neuroimaging results from the WELDOX II study. *Neurotoxicology* 64 (2018), S. 60-67.
- [23] Lotz, A.; Pesch, B.; Casjens, S. et al.: Association of exposure to manganese and fine motor skills in welders – Results from the WELDOX II study. *Neurotoxicology* 82 (2021), S. 137-145.
- [24] Schweißen ohne Rauch – Erfassen, Absaugen und Filtern. Ein Leitfa-den für mobile und stationäre Anlagen. 7. Auflage. Hrsg.: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA e.V.), Frankfurt 2023.
- [25] DIN EN ISO 21904-4: Arbeits- und Gesundheitsschutz beim Schweißen und bei verwandten Verfahren – Einrichtungen zum Erfassen und Abscheiden von Schweißrauch – Teil 4: Bestimmen des Mindestluftvolumenstromes von Absaugeinrichtungen. Berlin, Beuth 2020.
- [26] Pitzke, K.: Metallanalytik im Wandel ihrer Anforderungen. *Gefahrstoffe – Reinhalt. Luft* 79 (2019) Nr. 4, S. 99-104.
- [27] Cläsgens, C.; Schwank, T.; Wippich, C. et al.: Metalle (Cr, Cu, Mn, Pb, Zn) und ihre Verbindungen (ICP-Massenspektrometrie) (Kennzahl 7806). In: IFA-Arbeitsmappe Lfg.1/2023. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin. Erich Schmidt, Berlin 2023. https://www.ifa-arbeitsmappdigital.de/IFA-AM_7806
- [28] Pitzke, K.; Schwank, T.; Wippich, C.: Krebserzeugende Metalle (Arsen, Beryllium, Cadmium, Cobalt, Nickel) und ihre Verbindungen (ICP-Massenspektrometrie) (Kennzahl 7808). In: IFA-Arbeitsmappe Lfg. 2/2021. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin. Erich Schmidt, Berlin 2021. https://www.ifa-arbeitsmappdigital.de/IFA-AM_7808bt
- [29] Hagemann, C.; Hahn, J. U.: ChromVI-Verbindungen (Kennzahl 6665). In: IFA-Arbeitsmappe Lfg. 2/2014. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Berlin. Erich Schmidt, Berlin 2014. https://www.ifa-arbeitsmappdigital.de/IFA-AM_6665
- [30] Gelman, A.: Bayesian Data Analysis (Chapman & Hall / CRC Texts in Statistical Science). Third Edition. CRC Press, Boca Raton, USA 2013.
- [31] Makowski, D.; Ben-Shachar, M.; Chen, S. H. et al.: Indices of Effect Existence and Significance in the Bayesian Framework. *Frontiers Psychol* 10 (2019), S. 2767.
- [32] Lehnert, M.; Zschiesche, W.; Lotz, A. et al.: Gesundheitsschutz beim Schweißen – Aktuelle Herausforderungen. In: IPA-Journal 01/2020, S. 20-23. Hrsg.: Institut für Prävention und Arbeitsmedizin (IPA), Bochum. https://www.dguv.de/medien/ipa/publikationen/ipa-journale/ipa-journale2020/ipa-journal2001/ipa_journal_2001_schweissen.pdf

Dr. med. Martin Lehnert,
Dipl. Stat. Anne Lotz,
PD Dr. med. Wolfgang Zieschang,
PD Dr. med. Dirk Taeger,
PD Dr. med. Thomas Behrens,
Prof. Dr. med. Thomas Brüning

Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IPA), Institut der Ruhr-Universität Bochum, Bochum.

Dipl. Ing. Saskia Schlatter,
Dipl. Chem. Thomas von der Heyden,
Dipl. Chem. Rainer Van Gelder,
Dipl. Chem. Katrin Pitzke

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.