

# Einflüsse relevanter Randbedingungen auf die Exposition gegenüber Chrom und Nickel beim MAG/MIG-Schweißen – Vergleich eines praxisnahen Experiments mit realen Arbeitsplätzen (Teil 2)

TEXT: M. Lehnert, A. Lotz, S. Schlatter, T. Brüning, K. Pitzke\*, T. Behrens\*

\*geteilte Letztautorenschaft

**ZUSAMMENFASSUNG** Metallaktivgas- und Metallinertgas-Schweißen ist mit Gesundheitsrisiken durch einatembare Gefahrstoffe verbunden. Insbesondere bei der Verarbeitung von rostfreien Stahlsorten kann es zu Expositionen gegenüber kanzerogenen Chrom- und Nickelverbindungen kommen. Hier wurden die Expositionen gegenüber alveolengängigen Chrom- und Nickelverbindungen bei 20 Werkstattversuchen (InterWeld-Pilotstudie) mit Expositionen an 28 realen Arbeitsplätzen (WELDOX-Studien) verglichen. An realen Arbeitsplätzen zeigten sich beim Schweißen mit chrom- und nickelhaltigem Schweißdraht deutlich höhere Expositionen gegenüber alveolengängigem Chrom (CrA) und Nickel (NiA) als bei den Werkstattversuchen. Außer der Dicke der zu schweißenden Bleche zeigt der effektive Einsatz einer lokalen Absaugung sowohl im Experiment als auch an realen Arbeitsplätzen einen großen Einfluss auf die Exposition des Schweißers. Der Einsatz einer lokalen Absaugung – ob nachzuführend oder brennerintegriert – führte im Experiment zu einer mittleren Reduktion der CrA-Exposition auf nur 10 % der Exposition bei Schweißversuchen ohne Absaugung. An realen Arbeitsplätzen halbierte sich die Exposition durch eine wirksame Absaugung. Bei NiA reduzierte die Absaugung die Exposition auf 15 %, an realen Arbeitsplätzen auf 30 % gegenüber MIG-Schweißen ohne Absaugung. Prozessfaktoren wie Lichtbogenbrenndauer, Schweißstromstärke und Drahtvorschub beeinflussen gleichsinnig die Schweißrauchemission und damit die Exposition des Schweißers. Um Expositionsmessungen besser bewerten und vergleichen zu können, sollten diese Determinanten bei zukünftigen Arbeitsplatzmessungen systematisch dokumentiert werden.

## Influences of relevant boundary conditions on exposure to chromium and nickel during gas metal arc welding – comparison of a practical experiment with real workplaces (Part 2)

**ABSTRACT** Gas metal arc welding is associated with health risks from inhalable hazardous substances. Exposure to carcinogenic chromium and nickel compounds can occur particularly when processing stainless steel grades. Exposures to respirable chromium and nickel compounds in 20 workshop experiments (InterWeld pilot study) were compared with exposure levels at 28 real workplaces (WELDOX studies). Welding with consumable wires containing chromium and nickel showed significantly higher exposure levels to respirable chromium (CrA) and nickel (NiA) at real workplaces than in the workshop experiments. In both scenarios, effective use of a local extraction ventilation as well as the thickness of the metal sheets had a major influence on the welders' exposure. In the experiment, the use of local fume extraction – whether downstream or integrated into the torch – led to an average reduction in CrA exposure to 10% of the exposure in welding tests without extraction. At real workplaces, exposure was halved by effective extraction. For NiA, extraction reduced the exposure to 15%, at real workplaces to 30% compared to welding without extraction. Process factors such as the burning time of the arc, the welding current and the wire feed have an equidirectional influence on welding fume emissions and thus on the welder's exposure. In order to be able to better evaluate and compare exposure measurements, these determinants should be systematically documented in future workplace measurements.

## 1 Einleitung

Das Fügen von Metallen durch Schweißen ist ein unverzichtbares Verfahren in fast allen metallverarbeitenden Branchen. Auftragsschweißen und thermisches Schneiden sind weitere, weit verbreitete schweißtechnische Verfahren. Es wird geschätzt, dass weltweit etwa elf Millionen Menschen als Schweißer oder Schweißerin (im Weiteren als Schweißer bezeichnet) beschäftigt

sind. Weitere 110 Millionen 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].

Beim Schweißen entstehen Rauche, die beim Einatmen potenziell gesundheitsschädlich sind. So gibt es verschiedene Krankheitsbilder, die infolge einer inhalativen Belastung mit Schweißrauchen entstehen können und unter bestimmten Voraussetzun-

gen als Berufskrankheit (BK) anerkannt werden. Unabhängig von der stofflichen Zusammensetzung kann eine zu hohe Belastung der Atemwege durch Schweißrauche zu einer obstruktiven Atemwegserkrankung führen, unter anderem zu COPD (BK-Nr. 4302). Weitere Krankheiten aus Anlage 1 zur Berufskrankheiten-Verordnung (Liste der Berufskrankheiten, BK-Liste) im Zusammenhang mit inhalativen Expositionen bei Schweiß Tätigkeiten sind in einem früheren Artikel beschrieben [3].

BK durch eine inhalative Exposition gegenüber den Metallen Chrom (BK-Nr. 1103) oder Nickel (BK-Nr. 4109) können durch Schweiß Tätigkeiten verursacht sein [4]. Bei spezifischen Expositionen könnten weitere Erkrankungen aus der BK-Liste berücksichtigt werden. Im Jahr 2018 hat die International Agency for Research on Cancer (IARC) Schweißrauch generell – unabhängig von seiner stofflichen Zusammensetzung – als humankanzerogen bewertet [1]. Einzelne Substanzen, die im Schweißrauch enthalten sein können, wie sechswertige Chrom- (CrVI) und oxidische Nickelverbindungen, sind bereits seit längerem als krebserzeugend eingestuft [6]. Inhalative Expositionen führen zu erhöhten Risiken für Lungenkrebs [7 bis 10]. Für Chrom VI-Verbindungen ist ein Beurteilungsmaßstab nach TRGS 910 von  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in der einatembaren Partikelfraktion (E-Fraktion) und für Nickelverbindungen, als Carc. 1A, Carc. 1B eingestuft, eine Akzeptanz- und Toleranzkonzentration nach TRGS 910 von  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in der alveolengängigen Partikelfraktion (A-Fraktion) festgelegt. Der Arbeitsplatzgrenzwert (AGW) nach TRGS 900 für Nickel und Nickelverbindungen (bezogen auf den Elementgehalt des Metalls) beträgt  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in der E-Fraktion und für Nickelmetall  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  in der A-Fraktion [11] (TRGS 900). Für Chrom und anorganische Chrom(II)- und Chrom(III)-Verbindungen (ausgenommen namentlich genannte) gilt ein AGW von  $2 \text{ mg}/\text{m}^3$  in der E-Fraktion. Hierbei bezieht sich der AGW auf den Elementgehalt des Metalls.

Vor der begleitenden Evaluation von Interventionen an realen Arbeitsplätzen im Rahmen der InterWeld-Studie [12] erfolgten im Zeitraum April bis Juni 2019 orientierende Expositionsmessungen unter experimentellen Bedingungen. Dafür wurden typische, praxisnahe Schweißaufgaben an einem Musterbauteil in der mechanischen Werkstatt des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) ausgeführt und dabei Einflüsse relevanter Randbedingungen (Determinanten) auf die Expositionshöhe untersucht [13]. In zwei Querschnittuntersuchungen waren Gefahrstoffexpositionen bei Schweißern ermittelt worden (WELDOX-Studien). In der ersten WELDOX-Studie wurden im Zeitraum von 2007 bis 2009 243 Schweißer in 23 metallverarbeitenden Unternehmen verschiedener Branchen in Deutschland beprobt. Bereits hier wurden Effekte von Arbeitsplatzfaktoren auf die Exposition eines Schweißers quantitativ untersucht [14]. In der WELDOX II-Studie wurden von 2013 bis 2015 Gefahrstoffmessungen an weiteren 50 Schweißern in 14 Betrieben vorgenommen [15, 16].

Vergleichende Beobachtungen der Effekte auf die Expositionen gegenüber Schweißrauch und Mangan in der InterWeld-Pilotstudie und den WELDOX-Studien wurden bereits berichtet [13]. Für die Blechdicke, die Erfassung an der Entstehungsstelle und die Legierung der verarbeiteten Werkstoffe wiesen die Effekte in beiden Studien in dieselbe Richtung, waren jedoch bei den Werkstattversuchen der InterWeld-Pilotstudie ausgeprägter als bei den Messungen an den realen Arbeitsplätzen der WELDOX-Studien. Eine geringere Variabilität und bessere Kontrolle der

Randbedingungen im Experiment wurden als Hauptursachen diskutiert.

In diesem Beitrag werden nun die Effekte von relevanten Randbedingungen auf die Chrom- und Nickelkonzentrationen im Atembereich von Schweißern verglichen. Dafür wurden nur Messergebnisse von Schweißarbeiten verwendet, bei denen korrosionsbeständige Stähle (CrNi-Stahl) geschweißt wurden. In Abhängigkeit der Blechdicke und dem Vorhandensein einer wirksamen Absaugung an der Entstehungsstelle werden die Expositionshöhen der Schweißer unter experimentellen und unter realen Produktionsbedingungen im Betrieb miteinander verglichen. Es wurde geprüft, ob sich die im Experiment beobachteten Effekte der genannten Randbedingungen auf die Expositionshöhe von Chrom und Nickel in der A-Fraktion auch an realen Arbeitsplätzen widerspiegeln.

## 2 Material und Methode

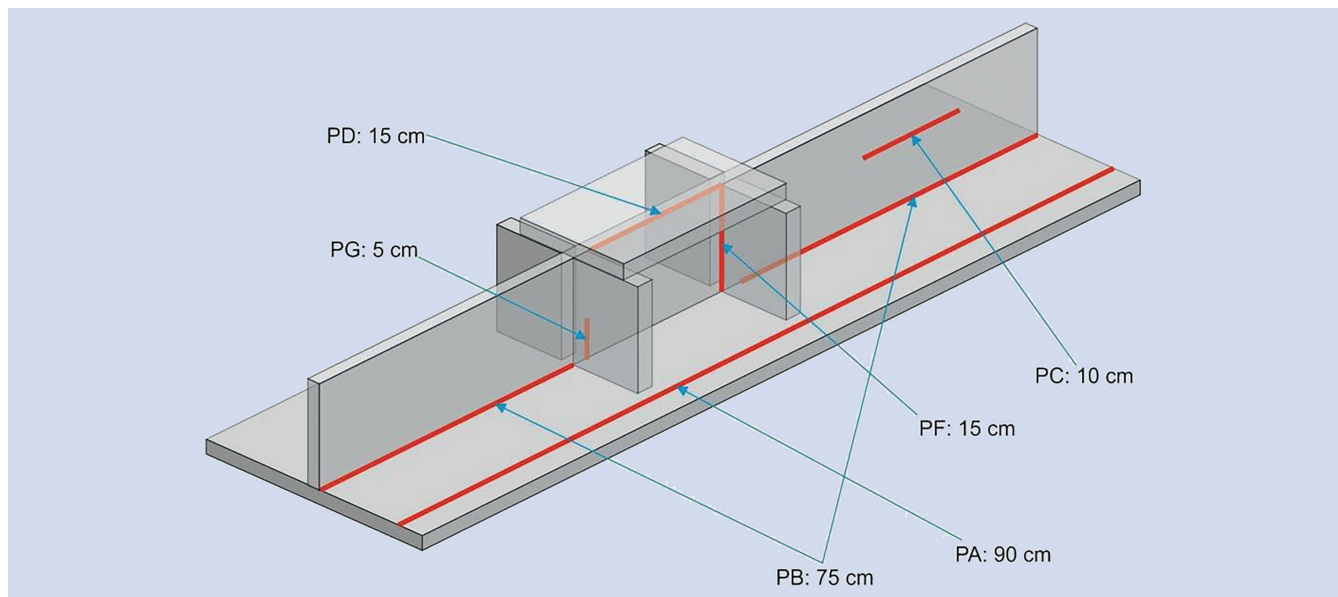
### 2.1 InterWeld-Pilotstudie

Im Rahmen der InterWeld-Pilotstudie führte ein Berufsschweißer systematisch eine Reihe typischer Schweißaufgaben an einem Musterbauteil durch („Bauteil 528“, Bild 1 und 2). An dem vorab gehefteten Bauteil waren in vorgegebener Nahtfolge und -länge neben Kehlnähten (PB) und Auftragsschweißungen (PA) in geringerem Umfang auch Stegschweißungen (PF), Fallschweißungen (PG) und Überkopfschweißungen (PD) auszuführen.

Für jeden Versuch (= jede Expositionsmessung) wurden zwei Musterbauteile beidseitig verschweißt. Die Gesamtlänge der Schweißnähte betrug etwa 8 m und ein Versuch – und damit jede einzelne Probenahme – dauerte etwa eine Stunde. Es wurde eine digital und leistungselektronisch gesteuerte Schweißstromquelle eingesetzt, die ein Schweißen mit modifiziertem Lichtbogen ermöglichte, was zu einem optimierten Schweißprozess führt sowie die Aufzeichnung des Schweißstroms und der Lichtbogenbrenndauer ermöglicht [13].

Bei 20 der insgesamt 40 durchgeführten Versuche wurden Schweißdrähte mit einem hohen Chrom- (18 bis 20 %) und Nickelgehalt (8 bis 11 %) verarbeitet. Dabei wurde ein weitgehend inertes Mischgas aus 97,5 % Argon und 2,5 % Kohlendioxid verwendet.

Die Versuche unterschieden sich hinsichtlich der Dicke der zu schweißende Bleche (2 bis 3 mm, 10 mm), der Erfassung des Rauchs an der Entstehungsstelle sowie der Lichtbogenvariante (konventionell/modifiziert). Die lokale Absaugung erfolgte entweder mit einem Schweißbrenner mit integrierter Schweißrauchabsaugung (N = 10) oder mit einer nachzuführenden Absaughaube (N = 4). Der normgerechte Betrieb der Absaugvorrichtungen wurde sichergestellt (Einhaltung des Mindestluftvolumenstroms nach DIN EN ISO 21904-4:2020 sowie korrekte Positionierung der nachzuführenden Absaughaube). Zum Vergleich wurde in sechs Versuchen auf eine lokale Absaugung verzichtet. Dickere Bleche (10 mm, N = 9) wurden mit einem Schweißdraht von 1,2 mm Durchmesser und mit einem Schweißstrom zwischen 103 und 193 A verschweißt. Bei dünneren Blechen (2 bis 3 mm, N = 11) betrug der Drahtdurchmesser 1,0 mm und der Schweißstrom je nach Schweißaufgabe zwischen 75 und 120 A. Die Schweißungen erfolgten in Impulslichtbogen- oder Kurzlichtbogentechnik (hier als „Prozessvariante konventionell“ bezeichnet). Bei jeweils der Hälfte der Versuche wurde eine modifizierte Prozessvariante der Kurzlichtbogen- oder der Impulslichtbogentechnik



**Bild 1** Bauteil 528 mit Schweißnähten (rot). Grafik: BGHM



**Bild 2** Berufsschweißer bei Schweißversuchen in der Werkstatt des IFA für die InterWeld-Pilotstudie. Foto: IFA

nik eingesetzt (hier als „Prozessvariante modifiziert“ bezeichnet). Bei modifizierten Prozessregelvarianten handelt es sich um Techniken, bei denen der Lichtbogen mittels moderner, digitaler Schweißgerätetechnik gezielt angepasst wird, um spezielle technologische Eigenschaften zu erzielen, z. B. zur Reduktion von Schweißspritzern [17].

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 FSP10 und GSP10 (Volumenstrom 10 l/min). Mit dem FSP10-System wurden alveolengängige Partikel gesammelt, um die enthaltenen Metalle Mangan, Chrom und Nickel zu analysieren [18]. Mittels GSP10-Systemen wurden einatembare Partikel für die Analyse von CrVI-Konzentrationen gesammelt. Beide Systeme waren mit Cellulosenitratmembranfiltern mit einem Durchmesser von 37 mm und einer Porengröße von 8 µm ausgestattet.

Die Bestimmung der Chrom- und Nickel-Konzentrationen im alveolengängigen Schweißrauch erfolgten per induktiv gekoppelter

Plasmamassenspektrometrie (ICP-MS) mit einem Spektrometer der Fa. PerkinElmer LAS [19 bis 21]. Die Konzentrationen der CrVI-Verbindungen im einatembaren Schweißrauch wurden mittels UV-Spektroskopie der Fa. Unicam Chromatography (Typ UV2-200) analysiert [22].

## 2.2 WELDOX-Studien

Im Datenbestand des Instituts für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IPA) befinden sich 243 Datensätze der WELDOX-Studie und 51 Datensätze der WELDOX II-Studie mit Ergebnissen von Gefahrstoffmessungen an Schweißarbeitsplätzen. Aus diesen insgesamt 293 Datensätzen wurden 95 Datensätze von Arbeitsplätzen selektiert, die sich für einen Vergleich mit der InterWeld-Pilotstudie eignen. Ausgewählt wurden nur Beobachtungen an Arbeitsplätzen, an denen handgeführt im MIG/MAG-Verfahren Massivdraht verschweißt wurde (N = 114). Ausgeschlossen wurden Beobachtungen, die auf einer Probenahme innerhalb eines belüfteten Schweißhelms basieren (N = 18). Aus dieser Gruppe (N = 95) wurden wiederum 28 Schweißer für den vorliegenden Vergleich ausgewählt, die CrNi-Legierungen im MIG-Verfahren bearbeitet hatten.

Die Sammlung von A- und E-Staub in den WELDOX-Studien wurde mit den Probenahmesystemen PGP-EA und GSP3,5 durchgeführt, die nach damaligem Standard jeweils mit einem Volumenstrom von 3,5 l/min betrieben wurden. Die mediane Probenahmedauer betrug 3,2 h (Spanne 2 bis 4 h) [14, 15]. An Arbeitsplätzen, wo chrom- und nickelhaltige Werkstoffe verarbeitet wurden, kam jeweils ein zweites PGP-EA-System zur Bestimmung der Konzentration von CrVI zur Anwendung. Hierbei wurden Quarzfaserfilter mit alveolengängigen Partikeln beaufschlagt und zeitnah der Spektrometrie im IFA unterzogen [23].

Anders als in InterWeld erfolgte die Luftprobenahme bei den WELDOX-Studien bis auf wenige Ausnahmen innerhalb des Schweißerschutzschirms. Die quantitative Bestimmung der Metalle erfolgte unter Anwendung derselben Analysemethoden in den Laboren des IFA.

Die Bewertung der Wirksamkeit einer vorhandenen Absaugung wurde bei den Messungen an realen Arbeitsplätzen von dem anwesenden Messpersonal vorgenommen. In den WELDOX-Studien erfolgte keine systematische Dokumentation der Blechdicken. Daher wurde die Blechdicke für die ausgewählten Messungen nachträglich anhand des Produktes und vorhandener Fotodokumente geschätzt.

### 2.3 Statistik

Die Höhe der CrA- und NiA-Exposition wurde auf Basis der Messungen aus der InterWeld-Pilotstudie und den Weldox-Studien mit Medianen und Quartilen dargestellt.

Zur Bewertung des Einflusses einzelner Faktoren auf die Exposition und zur Identifikation von Unterschieden zwischen den Studien wurden Bayes'sche lineare Regressionsmodelle [24] verwendet. Hierbei dienten log-transformierte Expositionsmesswerte (CrA oder NiA) als Zielvariable und Blechdicke (< 10 mm vs. ≥ 10 mm), lokale Erfassung (keine Absaugung oder nicht wirksame Absaugung vs. Absaugung am Brenner oder Absaughaube; kurz: ohne vs. mit) und Schweißtechnik (konventionell vs. modifiziert) als Einflussgrößen. Zudem wurde die Studienvariable (InterWeld-Pilotstudie vs. WELDOX I und II) als Einflussfaktor mit Wechselwirkung in die Modellierung aufgenommen. Die Variable Schweißtechnik diente als Korrekturfaktor im Modell, da modifizierte Schweißtechniken ausschließlich in der InterWeld-Pilotstudie zum Einsatz kamen. Daraus ergab sich folgende Modellgleichung:

$$\log(y_{\text{Exposition}}) = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_{\text{Blechdicke}} + \beta_2 \cdot x_{\text{Erfassung}} + \beta_3 \cdot x_{\text{Studie}} + \beta_4 \cdot x_{\text{Studie}} \cdot x_{\text{Blechdicke}} + \beta_5 \cdot x_{\text{Studie}} \cdot x_{\text{Erfassung}} + \beta_6 \cdot x_{\text{Schweißtechnik}} + e.$$

Während für die meisten Parameter nicht-informative Priors genutzt wurden, basierten die informativen Priors für die Schweißtechnik (BUGS-Code: Modell zu CrA,  $\text{dnorm}(-0,77; 2,8)$ ; Modell zu NiA,  $\text{dnorm}(-0,99; 3)$ ) auf den in der Publikation von Lehnert et al. [11] in Tabelle 2 dargestellten Schätzwerten (Effektschätzer, modifiziertes Schweißverfahren, CrA: 0,46 (95 % Konfidenzintervall 0,24 bis 0,88) und NiA: 0,37 (95 % Konfidenzintervall 0,20 bis 0,69)).

#### MODELLSCHÄTZUNG:

Die Parameterschätzung erfolgte für die zwei Modelle (CrA und NiA) mittels Markow-Chain-Monte-Carlo (MCMC)-Verfahren mit drei Ketten, 500 000 Iterationen, einem Burn-in von 100 000 und einer Ausdünnung von zwei. Zur Sicherstellung der Konvergenz wurden die MCMC-Ketten visuell überprüft. Es wurde gewährleistet, dass  $R^*$  unter 1,01 und die effektive Anzahl der Ziehungen (Neff) über 10 000 lag.

Die mittleren Konzentrationen der untersuchten Effekte wurden als Median der Posteriori-Verteilung geschätzt und mit 95 %-Kreditintervallen (95 % KI: 2,5 %- und 97,5 % Quantil der Posteriori-Verteilung (ETI: Equal-Tailed Interval)) angegeben.

ben. Der Einfluss modifizierter Schweißtechniken auf die Exposition wurde in den Ergebnisdarstellungen so weit wie möglich herausgerechnet.

Die hier genutzten Modelle, das Testverfahren und die verwendete Software sind analog zu den bereits an anderer Stelle ausführlich beschriebenen statistischen Methoden zur Auswertung der Exposition gegenüber alveolengängigem Schweißrauch und Mangan in diesen Studien [25].

#### KENNZAHLEN ZUR ANALYSE DER STUDIEN-UNTERSCHIEDE:

Um Unterschiede zwischen den Studien zu bewerten, wurden zwei Kennzahlen genutzt: der prozentuale Anteil der Posteriori-Verteilung innerhalb der Region der praktischen Äquivalenz (Full ROPE, niedrige Werte deuten auf Unterschiede hin) und die Richtungswahrscheinlichkeit (pd, hohe Werte deuten auf Unterschiede hin) [26] (siehe Tabelle 3). Die ROPE wurde als  $\pm 0.1 \text{ sd}(\log(\text{CrA}))$  beziehungsweise  $\pm 0.1 \text{ sd}(\log(\text{NiA}))$  definiert, wobei sd die Standardabweichung beschreibt. Für  $\log(\text{CrA})$  lag die ROPE bei  $\pm 0.144$  und für  $\log(\text{NiA})$  bei  $\pm 0.162$ .

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Deskription

Der Median der 28 an realen Arbeitsplätzen (WELDOX) gemessenen Konzentrationen von Chrom im alveolengängigen Schweißrauch (CrA) lag annähernd dreifach über dem Median der 18 Messungen der InterWeld-Pilotstudie (75 vs. 27  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) (Tabelle 1). Für zwei Experimente fehlt dieser Messwert. In jeder Kategorie waren an den realen Arbeitsplätzen höhere Konzentrationen im Atembereich des Schweißers gemessen worden als im Experiment. Besonders groß war der Unterschied der beiden Messserien, wenn dicke Bleche geschweißt wurden (155 vs. 32  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). In beiden Messserien wurden geringere Expositionen beobachtet, wenn dünnere Bleche geschweißt wurden oder eine lokale Absaugung wirksam war. Bei Einsatz einer modifizierten Prozessvariante (InterWeld-Pilotstudie) betrug der Median der CrA-Exposition 8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  gegenüber 33  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  bei konventioneller Schweißtechnik.

Bei den Messungen der Nickelkonzentrationen im alveolengängigen Schweißrauch wurden keine Werte unterhalb der Bestimmungsgrenze ermittelt. Die mittleren Expositionen gegenüber NiA betrugen 8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  bei den InterWeld-Experimenten (N = 20) und 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  bei den WELDOX-Messungen (N = 28) (Tabelle 2). Auch in Bezug auf Nickel wurden in allen Kategorien an den realen Arbeitsplätzen höhere Expositionen im Vergleich zum Experiment beobachtet.

Wurde bei den Werkstattversuchen der Schweißrauch an der Entstehungsstelle abgesaugt, ergab sich für NiA im Mittel eine Konzentration von 4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ohne Absaugung waren es 22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . An Arbeitsplätzen ohne Absaugung ergab sich eine mittlere NiA-Konzentration von 95  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Wurde eine lokale Absaugung wirksam eingesetzt, ergab sich im Atembereich des Schweißers eine mittlere Konzentration von 21  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Wurden in den experimentellen Schweißversuchen modifizierte Lichtbogenvarianten eingesetzt, zeigten sich im Mittel niedri-



Tabelle 1 Deskription (Median und Quartile) Chrom A-Fraktion aus der InterWeld-Pilotstudie und den WELDOX-Studien bei Metall-Inert-Gas-Schweißen.

		InterWeld CrA [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]			WELDOX I & II CrA [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]		
Determinante	Kategorie	N	Median	(Q1-Q3)	N	Median	(Q1-Q3)
	Alle	18	27	(6-50)	28	75	(35-143)
Blechdicke	2-3 mm (< 10 mm)	10	15	(3-50)	19	59	(21-83)
Blechdicke	10 mm ( $\geq$ 10 mm)	8	32	(9-52)	9	155	(107-224)
Lokale Erfassung	Ohne	6	61	(50-89)	16	110	(68-212)
Lokale Erfassung	Mit	12	7	(3-27)	12	43	(19-76)
Prozessvarianten	konventionell	9	33	(11-67)			
Prozessvarianten	modifiziert	9	8	(3-36)			

Tabelle 2 Deskription (Median und Quartile) Nickel A-Fraktion aus der InterWeld-Pilotstudie und den WELDOX-Studien bei Metall-Inert-Gas-Schweißen.

		InterWeld NiA [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]			WELDOX I & II NiA [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]		
Determinante	Kategorie	N	Median	(Q1-Q3)	N	Median	(Q1-Q3)
	Alle	20	8	(3-14)	28	45	(16-135)
Blechdicke	2-3 mm (< 10 mm)	11	12	(1-24)	19	28	(7-58)
Blechdicke	10 mm ( $\geq$ 10 mm)	9	8	(3-11)	9	170	(90-199)
Lokale Erfassung	Ohne	6	22	(14-39)	16	95	(45-200)
Lokale Erfassung	Mit	14	4	(1-9)	12	21	(6-35)
Prozessvarianten	konventionell	10	12	(7-30)			
Prozessvarianten	modifiziert	10	3	(1-12)			

gere NiA-Expositionen als beim Einsatz konventioneller Technik (4 vs. 12  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Um den Zusammenhang der gemessenen Expositionen von CrA und NiA zu zeigen, wurden die Messwerte aus beiden Messreihen gegeneinander aufgetragen (Bild 3). Im Gesamtkollektiv

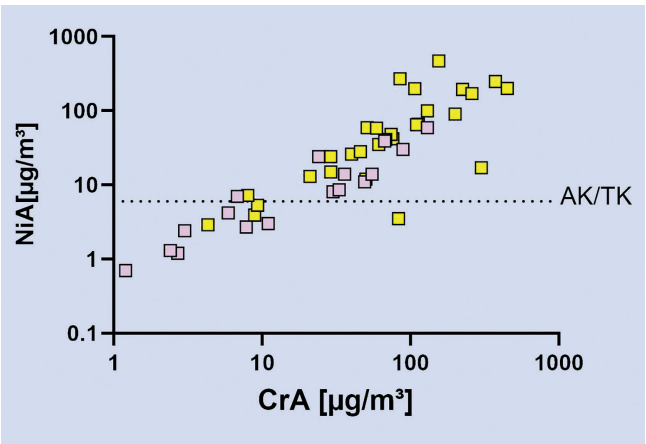


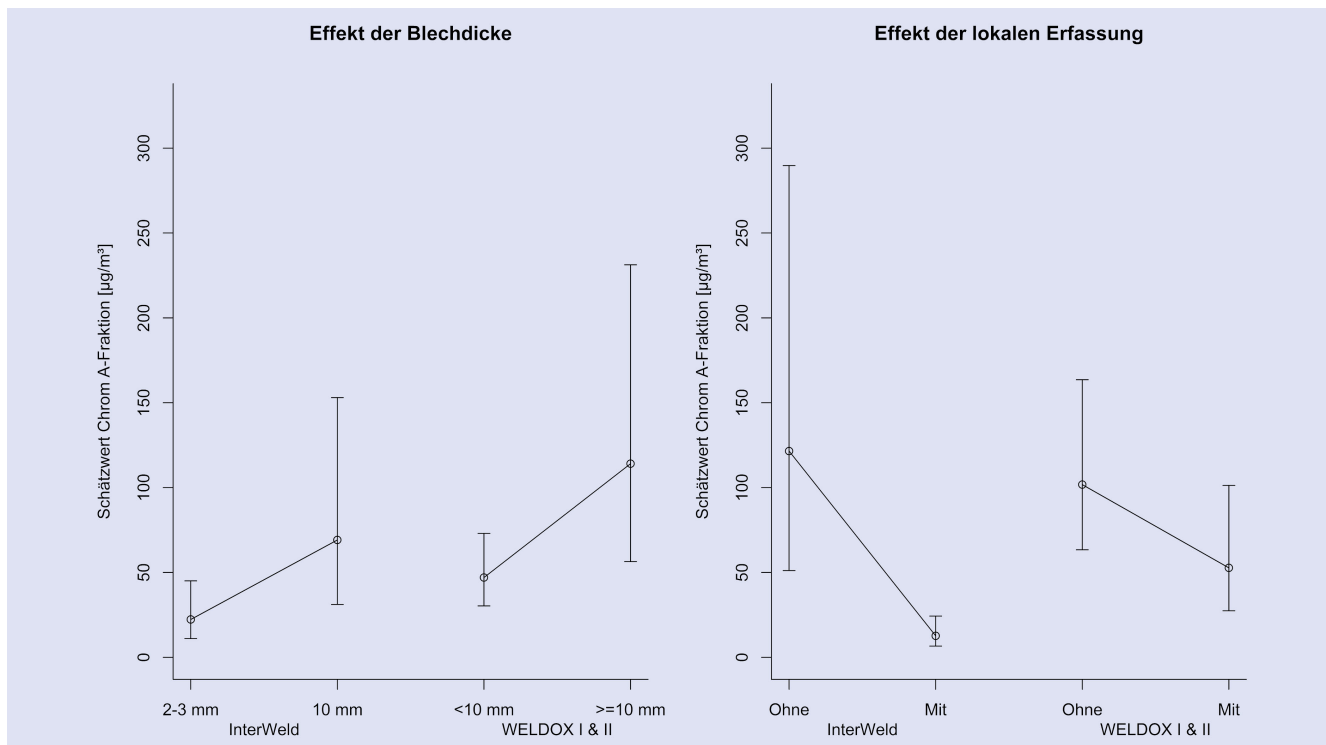
Bild 3 Zusammenhang von CrA und NiA bei 46 Wertepaaren aus WELDOX (gelb; N=28) und InterWeld-Pilot (fliederfarben; N=18), Akzeptanz-/Toleranzkonzentration (AK/TK) für NiA (6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Grafik: IPA

von 46 Wertepaaren zeigte sich ein Korrelationskoeffizient nach Pearson von 0,61 (95 %-Konfidenzintervall 0,38 – 0,76). Der Arbeitsplatzgrenzwert von 6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  für Nickel in der A-Fraktion wurde bei 36 der 48 Beobachtungen überschritten (dies entspricht 75 % der Messungen).

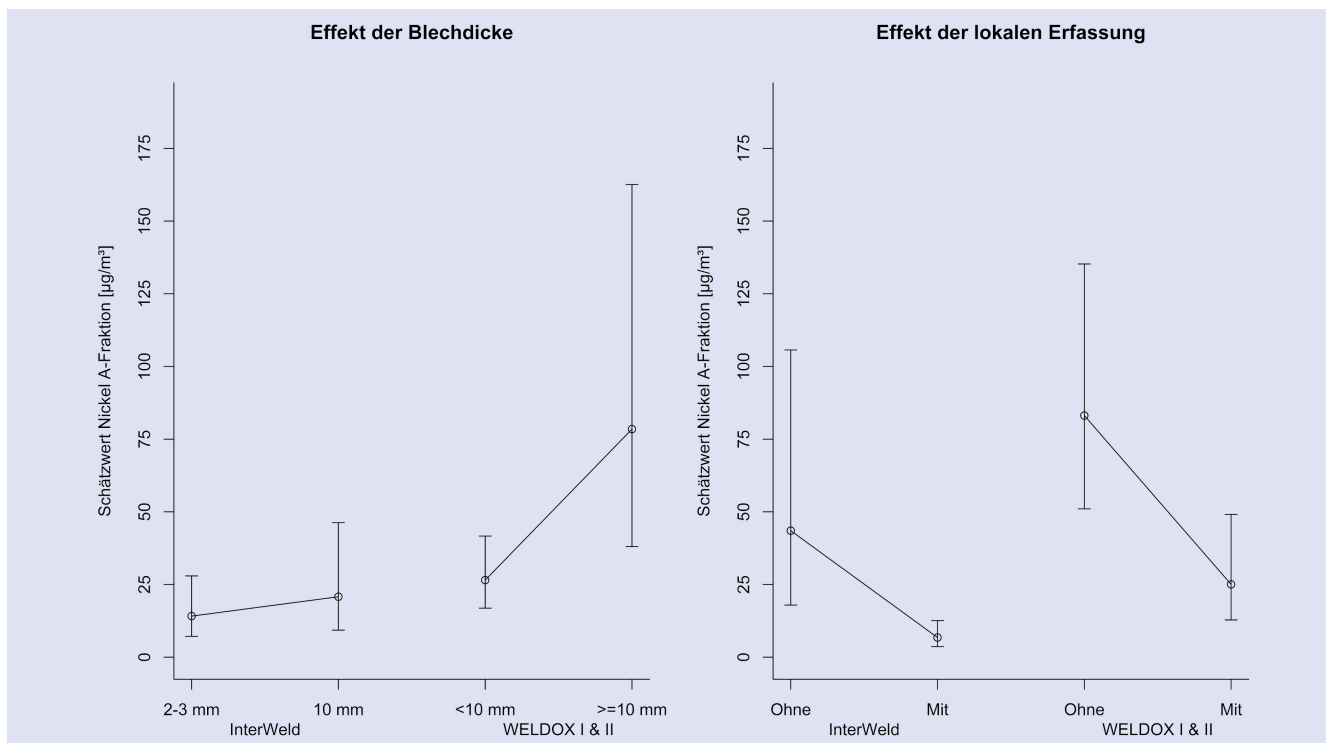
Die Konzentrationen von einatembarem Chrom VI bewegten sich im Experiment zwischen 0,3 und 17  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Der Median betrug 2,2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (N=20). Die Werte für alveolengängiges CrVI an vergleichbaren realen Arbeitsplätzen (WELDOX II) betrugen 2,4 und 66  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . An einem weiteren Arbeitsplatz wurde die Bestimmungsgrenze nicht erreicht. Auf eine stratifizierte Darstellung der Messwerte wurde ebenso verzichtet wie auf die Anwendung von Regressionsmodellen.

3.2 Analytik / Modellierung

Die für jeweils eine Determinante geschätzten Effekte für beide Studien (InterWeld-Pilotstudie vs. WELDOX) wurden einander gegenübergestellt. Bild 4 visualisiert die Effekte der Blechdicke und der wirksamen Verwendung einer lokalen Erfassung auf die CrA-Konzentration im Atembereich des Schweißers, Bild 5 die Effekte auf die NiA-Exposition. Ein jeweils steilerer Anstieg oder Abfall signalisiert jeweils einen größeren Effekt in einer der beiden Untersuchungen. Weitere Angaben finden sich in Tabelle 3. Sie zeigt Schätzungen für die Einflüsse relevanter Randbedingungen auf die Exposition gegenüber CrA und NiA im



**Bild 4** Effekte der relevanten Randbedingungen auf die Exposition gegenüber Chrom (A-Fraktion) in der InterWeld-Pilotstudie (N=18) und den WELDOX-Studien (N=28). Geschätzte mittlere Konzentration der Gefahrstoffe 95 %-Kredibilitätsintervalle. Grafik: IPA



**Bild 5** Effekte der relevanten Randbedingungen auf die Exposition gegenüber Nickel (A-Fraktion) in der InterWeld-Pilotstudie (N=20) und den WELDOX-Studien (N=28). Geschätzte mittlere Konzentration der Gefahrstoffe und 95 %-Kredibilitätsintervalle. Grafik: IPA

multiplen Modell und Ergebnisse einer Prüfung auf Übereinstimmung dieser Effekte in den Studien InterWeld und WELDOX.

Für die Verarbeitung von dicken Blechen ( $\geq 10$  mm) ergaben sich im Vergleich zur Bearbeitung von dünnen Ble-

chen ( $<10$  mm) Effekte auf die CrA-Exposition um den Faktor 3,10 bei InterWeld und 2,43 bei WELDOX. Die Effekte der Blechdicke auf die NiA-Exposition waren 1,47 und 2,96.

**Tabelle 3** Vergleich der Effekte (Faktor) von relevanten Randbedingungen am Arbeitsplatz auf die Exposition gegenüber CrA und NiA in der InterWeld-Pilotstudie (N=20) und den WELDOX-Studien (N=28) beim MIG-Schweißen mit CrNi-Schweißdraht.

	InterWeld		WELDOX I & II		Vergleich der Effekte		
	Faktor	95 % KI	Faktor	95 % KI	Full Rope	pd	Unterschied vorhanden?
<b>Chrom A-Fraktion</b>							
Blechdicke (< 10 vs. ≥ 10 mm)	3,10	1,24 bis 7,71	2,43	1,03 bis 5,72	16,92 %	65,32 %	Unsicher
Lokale Erfassung (ohne vs. mit)	0,10	0,04 bis 0,27	0,52	0,23 bis 1,16	0,80 %	99,32 %	Sehr wahrscheinlich
<b>Nickel A-Fraktion</b>							
Blechdicke (< 10 vs. ≥ 10 mm)	1,47	0,60 bis 3,57	2,96	1,23 bis 7,14	10,91 %	86,77 %	Unsicher
Lokale Erfassung (ohne vs. mit)	0,15	0,06 bis 0,41	0,30	0,13 bis 0,69	11,66 %	85,15 %	Unsicher

Eine wirksame Erfassung des Schweißrauchs an der Entstehungsstelle reduzierte die CrA-Exposition bei InterWeld um den Faktor 0,10 und um 0,52 bei WELDOX. Die Exposition gegenüber NiA wurde durch eine wirksame Erfassung um die Faktoren 0,15 (InterWeld) und 0,30 (WELDOX) reduziert.

Die einzelnen Effekte wiesen jeweils in beiden Studien in dieselbe Richtung. Im Bayesianischen Modell ergaben sich lediglich für den Einsatz einer Absaugung an der Entstehungsstelle der Hinweis auf einen relevanten Unterschied in den Messserien: Der Effekt der Absaugung auf CrA war in den WELDOX-Studien deutlich geringer als in den InterWeld-Experimenten.

## 4 Diskussion

Im Fokus standen Einflüsse relevanter Randbedingungen (Determinanten) auf die Expositionen des Schweißers gegenüber CrA und NiA – Metalle, die nur emittiert werden, wenn Schweißdrähte entsprechender Legierungen im Schweißprozess aufgeschmolzen werden.

Die Expositionen waren in den Werkstattversuchen (InterWeld) insgesamt deutlich geringer als die etwa zehn Jahre zuvor an realen Arbeitsplätzen (WELDOX) ermittelten Expositionen. Die beobachteten Effekte der Blechdicke und Absaugung auf die Chrom- und Nickel-Exposition im Atembereich des Schweißers wiesen in beiden Studien in dieselbe Richtung. Die Effekte insbesondere einer lokalen Absaugung waren im Experiment (InterWeld) ausgeprägter als bei den Messungen an realen Arbeitsplätzen (WELDOX): Der Einsatz einer nachführbaren Absaugung oder einer Absaugung im Schweißbrenner führte bei den Werkstattversuchen zu einer Minderung der Exposition um 90 % (CrA) und um 85 % (NiA) gegenüber Schweißungen ohne Absaugung. An realen Arbeitsplätzen reduzierte eine als wirksam bewertete Absaugung die Expositionen nur um 48 % (CrA) und 70 % (NiA). Die nachgeführte Absaugung erschien beim Schweißen dickerer Bleche, also bei stärkeren Emissionen, etwas wirksamer als die brennerintegrierte Absaugung [13]. Bei WELDOX war die Modalität der Erfassung nicht näher spezifiziert. Brennerintegrierte Absaugungen wurden hier selten eingesetzt. Nicht

jeder Arbeitsplatz, an dem eine Absaugung vorhanden war, wurde in den WELDOX-Studien als Arbeitsplatz „mit wirksamer Absaugung“ bewertet, da die Wirksamkeit der Absaugung per Experteneinschätzung für jeden Arbeitsplatz beurteilt wurde und nicht jede vorhandene Absaugung tatsächlich wirksam war und sachgerecht nachgeführt wurde. Die Bewertung durch das ausführende Messpersonal, ob die vorhandene Absaugung als wirksam oder unwirksam eingestuft wurde, bringt für die WELDOX-Messungen eine gewisse Unschärfe mit sich.

Dagegen war bei den Werkstattversuchen (InterWeld) die Erfassung entweder voll wirksam oder gar nicht vorhanden, was den deutlich größeren Effekt im Vergleich erklärt.

Einschränkungen bei der Präzision der Schätzungen können aus methodischen Unterschieden bei der Gefahrstoffmessung und der Datengewinnung sowie aus der kleinen Zahl von Beobachtungen von 20 und 28 Schweißern, die für den Vergleich genutzt werden konnten, resultieren.

### 4.1 Korrekturfaktor für Prozessregelvarianten

In den Werkstattexperimenten der InterWeld-Pilotstudie wurde der Einfluss von Prozessregelvarianten („Prozessvariante modifiziert“) auf die Exposition des Schweißers mit konventionellen Prozessen verglichen. Beim Einsatz der neuen Techniken wurden im Mittel um jeweils 75 % geringere Expositionen gegenüber CrA und NiA 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-Pilotstudie mit Prozessregelvarianten korrigiert. Grundlegende technische Erklärungen zu Lichtbogenarten und Prozessregelvarianten befinden sich unter anderem im VDMA-Leitfaden „Schweißen ohne Rauch“ [27].

## 4.2 Verschiedene Probenahmesysteme (PGP-EA vs. FSP10)

Bei der Interpretation der vorgestellten Ergebnisse ist weiterhin zu berücksichtigen, dass in den Untersuchungen unterschiedliche Probenahmesysteme zum Einsatz kamen. In den WELDOX-Studien erfolgte die Schweißrauchprobenahme mit einem zwei-stufigen System (PGP-EA) mit einem Volumenstrom von 3,5 l/min, bei dem die größeren Partikel der E-Fraktion durch eine Polyurethanschauauflage abgeschieden wurden [14]. Beim überwiegenden Teil der Messungen waren die Sammler innerhalb des Schweißerschutzschirms montiert. Bei den später durchgeführten Werkstattversuchen der InterWeld-Studie kam ein zyklonisch wirkendes System zum Einsatz, das mit einem Volumenstrom von 10 l/min betrieben wurde (FSP10). 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 zwar geprüft und validiert, jedoch kann eine Verzerrung nicht ausgeschlossen werden.

## 4.3 Blechdicke

Dickere Bleche werden mit dickerem Schweißdraht und höherer Stromstärke verschweißt, was zu höheren Emissionen führt. Da die Dicke der bearbeiteten Bleche nach MGU-Standard nicht systematisch dokumentiert wurden, erfolgte ein nachträgliches Rating für die Messungen bei den WELDOX-Studien. 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). Es wurden jedoch auch Bleche verarbeitet, die deutlich dicker als 10 mm waren. Bei den Versuchen der InterWeld-Pilotstudie wurden ausschließlich Bleche von 10 mm Dicke (dick) oder 2 und 3 mm (dünn) 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 dabei zur Verwässerung des Effekts dieser Determinante geführt haben. Dies könnte die 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 nicht 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 führten, die in der laufenden InterWeld-Feldstudie weiter untersucht werden [28]. Die im Experiment einwandfrei wirksame Absaugung und fehlende Nachbararbeitsplätze könnten Beispiele hierfür sein.

## 5 Schlussfolgerungen

Einflüsse der Blechdicke und einer Schweißrauchabsaugung an der Entstehungsstelle wiesen erwartungsgemäß im Experiment und in der Praxis in dieselbe Richtung. Die beobachteten Effekte waren bei den Werkstattversuchen der InterWeld-Pilotstudie ausgeprägter als bei den Messungen an realen Arbeitsplätzen. Als Gründe für die beobachteten Unterschiede sind die höhere Standardisierung der Randbedingungen im Experiment und somit eine höhere Variabilität in der realen Arbeitswelt sowie Lücken und Unschärfen der bisherigen Dokumentation von Prozessparametern und relevanten Randbedingungen zu vermuten.

Um die 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 Schweißarbeitsplatz in Prognosemodellen bedarf es einer Ergänzung der Datenbasis. Dazu sollte die systematische Dokumentation eingesetzter Arbeitsmittel und Werkstoffe sowie ein zuverlässiges Monitoring der Lichtbogenbrenndauer erfolgen. Nach Möglichkeit sollten auch Drahtvorschubgeschwindigkeit, Schweißstromstärke und Spannung 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 Informa-



tionen liefern, um insbesondere die individuelle Anwendung des Schweißrauchminderungsprogramms der DGUV (DGUV Information 296-096) zu ermöglichen und die Umsetzung der TRGS 528 [29, 30] zu unterstützen.

## DANKSAGUNG

Arno Goebel danken wir für maßgebliche Beiträge bei der Konzeption, der Durchführung und der Auswertung der Experimente im Rahmen der InterWeld-Pilotstudie. PD Dr. Wolfgang Zschiesche, Boyan Ivanov und Rene Stieper danken wir für ihre sachkundige Beratung und großzügige Unterstützung bei der Konzeption und Durchführung der Werkstattversuche.

## LITERATUR

- [1] International Agency for Research on Cancer. (2018) Monograph 118: Welding, Molybdenum Trioxide, and Indium Tin Oxide: Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Lyon, France: IARC. ISBN: 9789283201854.
- [2] Koppisch, D.; Zschiesche, W.; Goebel, A.; Schlatter, S.; von Mering, Y.; Ellegast, R. et al.: Schweißrauchexpositionen in Deutschland und Bewertung der gesundheitsschädigenden Wirkungen – insbesondere im Hinblick auf Lungenkrebskrankungen. Arbeitsmed Sozialmed Umweltmed 58 (2023), S. 185-195.
- [3] Lehnert, M.; Lotz, A.; Schlatter, S.; Zschiesche, W.; von der Heyden, T.; Van Gelder, R. et al.: Einflüsse relevanter Randbedingungen auf die Schweißrauchexposition – Vergleich eines praxisnahen Experiments mit realen Arbeitsplätzen. Gefahrstoffe – Reinh. Luft 83 (2023) Nr. 11-12, S. 265-274.
- [4] Anerkannte Berufskrankheiten. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin 2023. <https://www.dguv.de/de/zahlen-fakten/bk-geschehen/anerkannte-bken/index.jsp>
- [5] International Agency for Research on Cancer. (2018) Monograph 118: Welding, Molybdenum Trioxide, and Indium Tin Oxide: Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Lyon, France: IARC. ISBN 9789283201854.
- [6] Monograph 49: Chromium, Nickel and Welding: Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Ed.: International Agency for Research on Cancer (IARC), Lyon/France 1990.
- [7] Pesch, B.; Lehnert, M.; Weiss, T.; Kendzia, B.; Menne, E.; Lotz, A. et al.: Exposure to hexavalent chromium in welders: Results of the WELDOX II field study. Ann Work Expo Health, 2018.
- [8] Pesch, B.; Kendzia, B.; Pohlabein, H.; Ahrens, W.; Wichmann, H.E.; Siemiatycki, S.: Exposure to welding fumes, hexavalent chromium, or nickel and risk of lung cancer. Am J Epidemiol 188 (2019), p. 1984-1993.
- [9] Honaryar, M.K.; Lunn, R.M.; Luce, D.; Ahrens, W.; Mannetje, A.; Hansen, J. et al.: Welding fumes and lung cancer: a meta-analysis of case-control and cohort studies. Occup Environ Med 76 (2019), p. 422-31
- [10] Behrens, T.; Ge, C.; Vermeulen, R.; Kendzia, B.; Olsson, A.; Schüz, J. et al.: Occupational exposure to nickel and hexavalent chromium and the risk of lung cancer in a pooled analysis of case-control studies (SYNERGY). Int J Cancer 2023; 152(4): 645-660.
- [11] Technische Regel für Gefahrstoffe: Arbeitsplatzgrenzwerte (TRGS 900). BAuBl. (2006) Nr. 1, S. 41; zul. geänd. GMBI. (2025) Nr. 8, S. 155. <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/TRGS-900.html>
- [12] InterWeld-Studie: Wirksame Maßnahmen zur Schweißrauch-Minderung identifizieren. In: IPA-Journal 02/2024, S.33-36. Hrsg.: Institut für Prävention und Arbeitsmedizin der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV), Bochum 2024. [https://www.dguv.de/ipa/publik/ipa-journale/ipa-journale-2024/ipa-journal-02-2024/ipa-journal-2402\\_praxis.jsp](https://www.dguv.de/ipa/publik/ipa-journale/ipa-journale-2024/ipa-journal-02-2024/ipa-journal-2402_praxis.jsp)
- [13] Lehnert, M.; Goebel, A.; Zschiesche, W.; Kendzia, B.; Pelzer, J.; Taeger, D. 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.
- [14] Lehnert, M.; Pesch, B.; Lotz, A.; Pelzer, J.; Kendzia, B.; Gawrych, K. et al.: WELDOX study group (2012) Exposure to Inhalable, Respirable, and Ultrafine Particles in Welding Fume. Ann Occup Hyg 2012; 56(5): 557-567
- [15] Casjens, S.; Dydak, U.; Dharmadhikari, S.; Lotz, A.; Lehnert, M.; Quetscher, C. 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 2018; 64: 60-67.
- [16] Lotz, A.; Pesch, B.; Casjens, S.; Lehnert, M.; Zschiesche, W.; Taeger, D.: Association of exposure to manganese and fine motor skills in welders – Results from the WELDOX II study. Neurotoxicology 2021; 82: 137-145.
- [17] DVS Media Poster: Prozessregelvarianten des MSG-Schweißens. <https://www.home-of-welding.com/storage/media/documents/10214/poster-msg-varianten-2022-de.pdf> (letzter Aufruf: 21.05.2025)
- [18] EN 481: Arbeitsplatzatmosphäre; Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel; Deutsche Fassung EN 481:1993
- [19] Pitzke, K.: Metallanalytik im Wandel ihrer Anforderungen. Gefahrstoffe – Reinh. Luft 79 (2019) Nr. 4, S. 99-104.
- [20] Cläsgens, C.; Schwank, T.; Wippich, C.; Pitzke, K.: Metalle (Cr, Cu, Mn, Pb, Zn) und ihre Verbindungen (ICP-Massenspektrometrie). In: IFA-Arbeitsmappe 2023. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. Erich Schmidt, Berlin 2023. [https://www.ifa-arbeitsmappeditonal.de/IFA-AM\\_7806](https://www.ifa-arbeitsmappeditonal.de/IFA-AM_7806)
- [21] Pitzke, K.; Schwank, T.; Wippich, C.: Krebserzeugende Metalle (Arsen, Beryllium, Cadmium, Cobalt, Nickel) und ihre Verbindungen (ICP-Massenspektrometrie). In: IFA-Arbeitsmappe 2021. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. Erich Schmidt, Berlin 2021. [https://www.ifa-arbeitsmappeditonal.de/IFA-AM\\_7808bt](https://www.ifa-arbeitsmappeditonal.de/IFA-AM_7808bt)
- [22] Hagemann, C.; Hahn, J.U.: ChromVI-Verbindungen. In: IFA-Arbeitsmappe 2014. Hrsg.: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Berlin. Erich Schmidt, Berlin 2014. [https://www.ifa-arbeitsmappeditonal.de/IFA-AM\\_6665](https://www.ifa-arbeitsmappeditonal.de/IFA-AM_6665)
- [23] Pesch, B.; Dydak, U.; Lotz, A.; Casjens, S.; Quetscher, C.; Lehnert, M. 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), p. 68-77.
- [24] Gelman, A.: Bayesian Data Analysis, Third Edition (2013). Chapman & Hall, CRC Texts in Statistical Science; ISBN: 978-1-439-84095-5.
- [25] Lehnert, M.; Lotz, A.: Statistik – Bayes'sche Modelle (Anhang). Gefahrstoffe Reinh. Luft 83 (2023), Nr. 11-12, S. 275-278.
- [26] Makowski, D.; Ben-Shachar, M.; Chen S.H.; Lüdtke, D.: Indices of Effect Existence and Significance in the Bayesian Framework. Frontiers Psychol 10: (2019), p. 2767.
- [27] Leitfaden: Schweißen ohne Rauch – Erfassen, Absaugen und Filtern. Ein Leitfaden für mobile und stationäre Anlagen; 7. Auflage. Hrsg.: Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbauer (VDMA), 2023.
- [28] Bürger, N.: InterWeld-Studie: Wirksame Maßnahmen zur Schweißrauchminderung identifizieren. IPA Journal 2 (2024), S. 33-36
- [29] DGUV Information 209-096: Schweißrauchminderung im Betrieb – Schweißrauchminderungsprogramm. <https://www.sicherschiessen.de/home/schweissrauchminderungsprogramm>
- [30] Technische Regel für Gefahrstoffe: Schweißtechnische Arbeiten (TRGS 528). GMBI. 2020, Nr. 12-13; zul. geänd. GMBI. 2020, Nr. 23. <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TRGS/TRGS-528.html>

Dr. med. Martin Lehnert,

Dipl.-Stat. Anne Lotz,

Prof. Dr. med. Thomas Brüning,

Prof. Dr. med. Thomas Behrens,

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

Saskia Schlatter,

Dr. rer. nat. Katrin Pitzke,

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