
BGI 593

Schadstoffe beim Schweißen und bei verwandten Verfahren

(bisher ZH 1/223)

Vereinigung der Metall-Berufsgenossenschaften
2003



Vorwort

Die ständige Weiterentwicklung und Verfeinerung der Arbeitsverfahren in der Schweißtechnik sowie die Verwendung neuer Werkstoffe machen es erforderlich, die Maßnahmen zum Schutz der Beschäftigten vor Unfällen und Gesundheitsschäden bei der Arbeit ständig zu optimieren und dadurch insgesamt nach einer Verbesserung der Arbeitsplatzsituation zu streben.

Moderner Arbeitsschutz erschöpft sich nicht in der Erfüllung von Vorschriften. Vielmehr hat der Unternehmer nach dem neuen Arbeitsschutzgesetz die für die Beschäftigten mit ihrer Arbeit verbundene Gefährdung zu ermitteln, zu beurteilen und dementsprechend Arbeitsschutzmaßnahmen zu treffen. Das Vorschriften- und Regelwerk kann dabei selbstverständlich eine Hilfe sein.

Bei der Festlegung der Maßnahmen ist von bestimmten Grundsätzen auszugehen:

1. Die Arbeit ist so zu gestalten, dass eine Gefährdung für Leben und Gesundheit möglichst vermieden und die verbleibende Gefährdung möglichst gering gehalten werden.
2. Gefahren sind an der Quelle zu bekämpfen.
3. Stand der Technik, Arbeitsmedizin und Hygiene sowie sonstige gesicherte arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse sind zu berücksichtigen.
4. Technik, Arbeitsorganisation, sonstige Arbeitsbedingungen, soziale Beziehungen und Einflüsse der Umwelt sind als Einheit zu sehen und sachgerecht zu verknüpfen.
5. Individuelle Schutzmaßnahmen sind nachrangig; zwangsläufig wirkende kollektive Schutzmaßnahmen haben Vorrang.
6. Besonders schutzbedürftige Beschäftigte, z.B. Jugendliche, sind zu berücksichtigen.
7. Den Beschäftigten sind Anweisungen zu geben, die sie zu dem gewünschten sicherheits- und gesundheitsgerechten Verhalten motiviert.

Beim Schweißen und Schneiden sowie bei verwandten Arbeitsverfahren entstehen gas- und partikelförmige Stoffe (Gase, Rauche, Stäube), die je nach Zusammensetzung, Konzentration und Expositionsdauer die Gesundheit der Beschäftigten gefährden (Schadstoffe).

Die Ermittlung der Konzentration und Wirkungsstärke dominierender Schadstoffe (= Leitkomponenten) ist Voraussetzung für die Beurteilung der jeweiligen Arbeitsbedingungen, für die Festlegung und Durchführung der erforderlichen Maßnahmen und damit für eine erfolgreiche Gesundheitsvorsorge insgesamt.

Ziel dieser Druckschrift soll es sein,

- Kenntnisse über Entstehung und Wirkung der beim Schweißen und verwandten Verfahren (thermisches Schneiden, thermisches Spritzen, Löten usw.) auftretenden Schadstoffe zu vermitteln,
- Hinweise zur Ermittlung der Schadstoffe zu geben,
- die Abschätzung der Gefährdung durch Schadstoffe zu erleichtern und
- Möglichkeiten zur Vermeidung oder Verringerung der Gefährdung durch Schadstoffe aufzuzeigen.

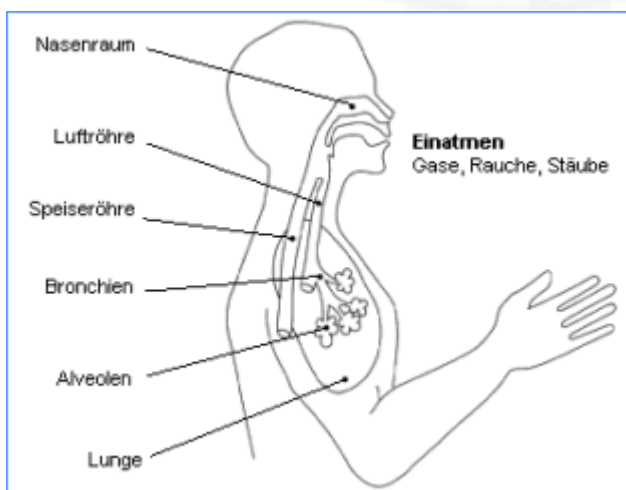
1 Allgemeines über Schadstoffe

1.1 Definition

Schadstoffe in der Schweißtechnik sind die beim Schweißen, Schneiden und verwandten Verfahren entstehenden atembaren Stoffe, die durch den menschlichen Körper aufgenommen werden (Bild 1-1). In unzuträglicher Konzentration können diese Stoffe zu einer Gesundheitsgefährdung führen.

Sie sind in der Unfallverhütungsvorschrift "Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren" (BGV D1) mit dem Begriff "Gesundheitsgefährliche Stoffe" bezeichnet und zählen zu den Gefahrstoffen im Sinne der Gefahrstoffverordnung (GefStoffV).

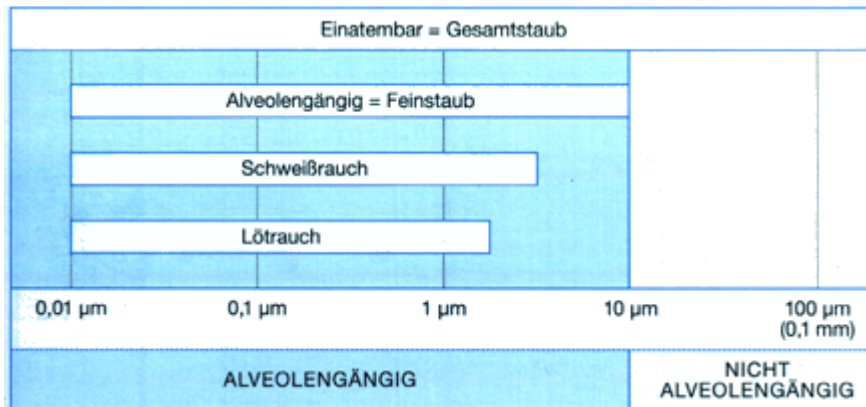
Bild 1-1: Aufnahme der Schadstoffe in den menschlichen Körper durch Einatmen



1.2 Einteilung

Die Schadstoffe, die bei der Anwendung schweißtechnischer Verfahren entstehen, lassen sich nach Vorkommen und Wirkungsweise einteilen (Bild 1-2).

Bild 1-2: Einteilung partikelförmiger Schadstoffe in der Schweißtechnik nach Partikelgröße (Vorkommen)



1.2.1 Vorkommen

Bei schweißtechnischen Verfahren entstehen Schadstoffe als Gase und/oder als Partikel (Bild 1-5). Die partikelförmigen Stoffe sind eine disperse Verteilung kleinster fester Teilchen in der Luft. Bei allen in der Luft vorhandenen Partikeln werden je nach Partikelgröße folgende Anteile unterschieden (nach DIN EN 481):

Einatembare Fraktion – der Anteil der Partikel, der durch den Mund und die Nase in den Körper eingeatmet wird; er umfasst Partikelgrößen bis zu über 100 µm. Dieser Anteil wurde in der Vergangenheit mit dem Begriff "Gesamtstaub" bezeichnet.

Alveolengängige Fraktion – der Anteil der Partikel, der beim Einatmen bis zu den Alveolen (Lungenbläschen) vordringen kann; er umfasst Partikelgrößen bis zu 10 µm. Dieser Anteil wurde in der Vergangenheit mit dem Begriff "Feinstaub" bezeichnet.

Die beim Schweißen entstehenden partikelförmigen Stoffe sind sehr fein. Sie besitzen in der Regel einen Durchmesser kleiner als 1 µm (vorwiegend kleiner als 0,1 µm), sind daher alveolengängig und werden als "Schweißrauche" bezeichnet. Partikel, die im Größenbereich < 0,1 µm liegen, werden als ultrafeine Partikel bezeichnet.

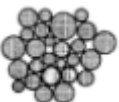
Beim thermischen Schneiden und bei einigen verwandten Verfahren entstehen partikelförmige Stoffe, die nur teilweise alveolengängig sind.

Partikelgröße und Morphologie (Gestalt)

Die Menge der Partikel hängt von der Kombination der eingesetzten Verfahren und Werkstoffe ab.

Je nach Verfahrensgruppe bilden sich unterschiedliche Partikelgrößen mit verschiedener Partikelmorphologie aus (Bild 1-3).

Bild 1-3: Partikelgröße, -form und -gestalt (Morphologie) der Schweißrauche (Beispiele)

Verfahren	Werkstoff	Partikel			
		Form einzelner Partikel	Größe von		
			Einzelpartikeln (Durchmesser)	Ketten (Länge)	Agglomeraten (Durchmesser)
Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Stabelektroden (LBH)	Cr-Ni-Stahl	kugelförmig	bis 50 nm	mehrere μm	bis 500 nm
			bis 400 nm	mehrere μm	
Schutzgas-schweißen (MAG/MIG)	Cr-Ni-Stahl	kugelförmig	bis 10 nm	bis 100 nm	bis 100 nm
	Aluminium-Legierungen	kugelförmig	10 bis 50 nm	k.A.	k.A.
			bis 400 nm	k.A.	
					
k.A. = keine Angaben μm = Mikrometer ($1 \mu\text{m} = 10^{-3} \text{ mm} = 10^{-6} \text{ m}$) nm = Nanometer ($1 \text{ nm} = 10^{-6} \text{ mm} = 10^{-9} \text{ m}$)					

Morphologische Untersuchungen deuten darauf hin, dass die einzelnen Schweißrauchpartikel keine homogene Zusammensetzung aufweisen.

Neben Primärpartikeln (Einzelpartikeln) bilden sich durch Ausflocken auch Ketten und Agglomerate (Bilder 1-4a und b).

Bilder 1-4a und b: Elektronenmikroskopaufnahmen von Schweißrauchen

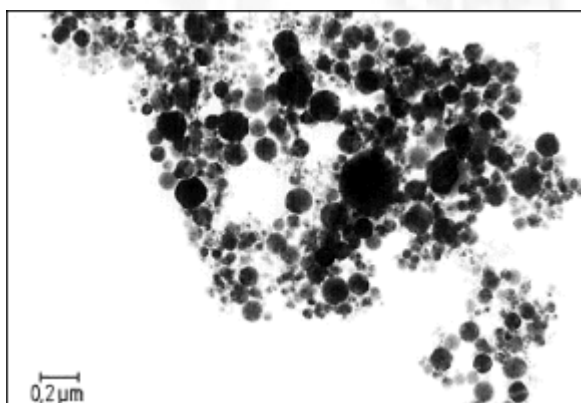


Bild 1-4a: Partikel der beim Metall-Aktivgasschweißen unter Kohlendioxid entstehenden Rauche

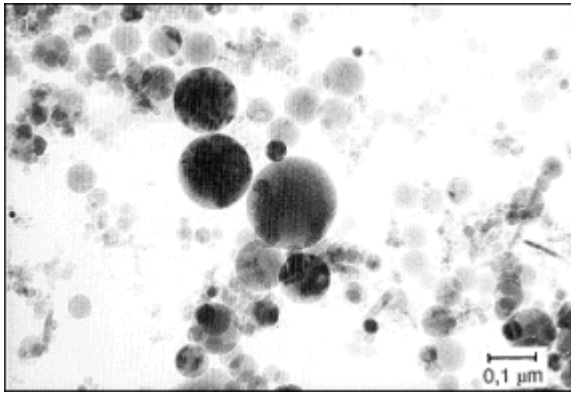


Bild 1-4b: Partikel der beim Metall-Inertgasschweißen von Aluminiumlegierungen entstehenden Rauche

1.2.2 Wirkungsweise

Hinsichtlich der Wirkung auf die verschiedenen Organe des menschlichen Körpers lassen sich die gas- und partikelförmigen Stoffe, die beim Schweißen, Schneiden und verwandten Verfahren entstehen, folgendermaßen einteilen (Bild 1-5):

Atemwegs- und lungenbelastende Stoffe – langzeitige Aufnahme hoher Konzentrationen kann zu einer Belastung der Atemwege und der Lungen führen. So kann z.B. langzeitige Aufnahme hoher Konzentrationen zu Atemwegserkrankungen (in Form von Bronchitis bis zu obstruktiver Bronchitis) führen.

Zusätzlich können Staubablagerungen in der Lunge in Form von Siderose (bei Eisenoxiden) auftreten.

Darüber hinaus können bei hohen Konzentrationen fibrogene Reaktionen (Bindegewebsvermehrung) der Lunge auftreten (z.B. beim Aluminiumoxid).

Toxische (giftige) Stoffe – erzeugen im menschlichen Körper eine Giftwirkung, wenn eine bestimmte Dosis (= Menge pro Gewichtseinheit des Körpers) überschritten wird. Es gibt hier eine Dosis-Wirkung-Beziehung. Schwache Vergiftungen führen zu leichten Gesundheitsstörungen; hohe Konzentrationen dieser Stoffe in der Atemluft können zu lebensgefährlichen Vergiftungen oder zum Tod führen.

Als toxische Stoffe sind z.B. die Gase Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide (Stickstoffmonoxid und -dioxid), Ozon wie auch die Oxide der Metalle Kupfer, Blei, Zink in Form von Rauchen und Stäuben zu nennen.

Krebserzeugende (kanzerogene) Stoffe – sind Stoffe, die erfahrungsgemäß bösartige Geschwülste verursachen können. Das Krebsrisiko ist generell von mehreren Faktoren abhängig, z.B. genetische Disposition, Umweltbelastungen. Es gibt hier keinen Automatismus der Wirkung, aber eine steigende Dosis erhöht das Krebsrisiko.

Die Latenzzeit (der Zeitraum zwischen der ersten Einwirkung und dem Ausbruch der Krankheit) kann Jahre oder Jahrzehnte betragen.

Für diese Stoffe ist kein Schwellenwert bekannt, bei dessen Unterschreitung keine Gefährdung mehr besteht. In vielen Fällen besitzen diese Stoffe zusätzlich eine toxische Wirkung.

Die krebserzeugenden Stoffe sind in der TRGS 905 aufgeführt und in Kategorie 1, 2 oder 3 nach Anhang I GefStoffV eingestuft.

Kategorie 1

Stoffe, die beim Menschen bekanntermaßen krebserzeugend wirken (hinreichende Anhaltspunkte).

Kategorie 2

Stoffe, die als krebserzeugend für den Menschen angesehen werden sollten (begründete Annahme).

Kategorie 3

Stoffe, die wegen möglicher krebserregender Wirkung beim Menschen Anlass zur Besorgnis geben (einige Anhaltspunkte – Vermutung).

Bild 1-5: Einteilung der Schadstoffe nach Vorkommen und Wirkungsweise

Vorkommen		Wirkungsweise		
Gasförmig	Partikelförmig einatembar alveolengängig	Lungen- belastend	Toxisch	Krebs- erzeugend
Stickstoffoxide			X	
Ozon			X	X ¹
Kohlenmonoxid			X	
Phosgen			X	
Cyanwasserstoff			X	
Formaldehyd				X ¹
	Aluminiumoxid	X		
	Eisenoxide	X		
	Magnesiumoxid	X		
	Barium-Verbindungen		X	
	Bleioxid		X	
	Fluoride		X	
	Kupferoxid		X	
	Manganoxide		X	
	Molybdenoxid		X	
	Vanadiumpentoxid		X	
	Zinkoxid		X	
	Chrom(VI)-Verbindungen			X
	Nickeloxide			X
	Cobaltoxid			X ¹
	Cadmiumoxid			X
	Berylliumoxid			X

Von den dort aufgezählten Stoffen sind in der Schweißtechnik die Nickeloxide, bestimmte sechswertige Chromverbindungen, Cadmium und seine Verbindungen, Cobalt und seine Verbindungen und Beryllium und seine Verbindungen zu beachten.

¹ Verdacht auf krebserzeugende Wirkung

1.3 Entstehung

Die in der Schweißtechnik entstehenden Schadstoffe bilden sich aus

- Zusatzwerkstoffen,
- Grundwerkstoffen,
- Schutzgasen,
- Beschichtungen,
- Verunreinigungen und
- Umgebungsluft

bei hoher Temperatur (des Lichtbogens oder der Flamme) durch physikalische und/oder chemische Prozesse (Bild 1-6), wie

- Verdampfen,
- Kondensation,
- Oxidation,
- Zersetzung,
- Pyrolyse und
- Verbrennen.

Die Art und die Menge der gebildeten Schadstoffe ist werkstoff- und verfahrensbedingt. Die chemische Zusammensetzung der eingesetzten Werkstoffe hat einen direkten Einfluss auf die chemische Zusammensetzung der partikelförmigen Schadstoffe. Die angewendeten Verfahren beeinflussen die Entstehung gasförmiger Schadstoffe.

Bild 1-6: Schadstoffentstehung (Beispiele)

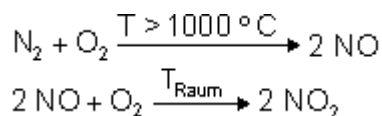
Verdampfen	Metalle	}	Fe, Cu, Mn, Ni, ...
Kondensation	Metalle		
Oxidation	Metalle + O ₂ = Oxide		FeO, FeO ₂ O ₃ , CuO, ...
	N ₂ + O ₂ → 2NO		
	NO + ½ O ₂ → NO ₂		
Zersetzung	CO ₂ → CO + ½ O ₂		
Pyrolyse	Organische Komponente		
	C _x H _y → C _{x1} H _{y1}		
	CO		
	CH ₂ O		
Verbrennen	Organische Komponente + O ₂		
	C _x H _y $\xrightarrow{O_2}$ CO + H ₂ O		
	CO ₂ + H ₂ O		

1.3.1 Gasförmige Schadstoffe

Kohlenmonoxid (CO) entsteht in kritischen Konzentrationen beim Metall-Aktivgasschweißen mit Kohlendioxid (MAGC) oder beim Metall-Aktivgasschweißen mit Mischgas (mit hohem Anteil an Kohlendioxid) durch die thermische Zersetzung des Kohlendioxids (CO₂).

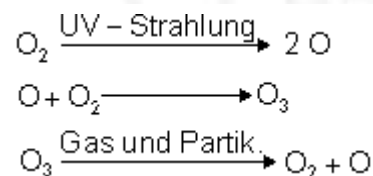
Außerdem entsteht Kohlenmonoxid bei jeder Verbrennung mit unzureichender Sauerstoffzufuhr.

Stickstoffoxide (NO_x = NO, NO₂) bilden sich durch Oxidation des Luftstickstoffes (aus dem Sauerstoff [O₂] und dem Stickstoff [N₂] der Luft) am Rand der Flamme oder des Lichtbogens. Bei Temperaturen über 1000 °C entsteht Stickstoffmonoxid. Das Stickstoffmonoxid oxidiert in der Luft bei Raumtemperatur zu Stickstoffdioxid.



Bei Verfahren der Autogentechnik (Gasschweißen, Flammwärmen, Flammrichten, Brennschneiden, Flamm-spritzen), beim Plasmaschmelzschneiden mit Druckluft oder Stickstoff und beim Laserstrahlschneiden mit Druckluft oder Stickstoff sind Stickstoffoxide (in erster Linie Stickstoffdioxid) meistens der dominierende Schadstoff (die Leitkomponente).

Ozon (O₃) entsteht durch ultraviolette Strahlung aus dem Sauerstoff der Luft, insbesondere beim Schutzgasschweißen von stark strahlungsreflektierenden Werkstoffen, wie Aluminium und Aluminium-Silicium-Legierungen. Die Anwesenheit von anderen Gasen, Rauchen oder Stäuben in der Luft beschleunigt den Zerfall von Ozon zu Sauerstoff.



So ist es erklärlich, dass gerade bei raucharmen Verfahren die Ozonkonzentration erhöht ist.

Phosgen (COCl₂) bildet sich neben Chlorwasserstoff (HCl) beim Erhitzen oder durch UV-Bestrahlung von Entfettungsmitteln, die Chlorkohlenwasserstoffe enthalten.

Gase aus Beschichtungsstoffen entstehen beim Überschweißen von Werkstücken, die mit Shopprimern (Oberflächenbeschichtungen gegen Korrosion) oder mit anderen Beschichtungen (Farben, Lacke) versehen sind. Je nach der chemischen Zusammensetzung dieser Beschichtungen bilden sich neben Metalloxiden, die partikelförmig sind, auch Gase, z.B. Kohlenmonoxid (CO), Formaldehyd (HCHO), Toluylendiisocyanat, Blausäure (HCN), Chlorwasserstoff (HCl).

1.3.2 Partikelförmige Schadstoffe

Eisenoxide (FeO , Fe_2O_3 , Fe_3O_4) entstehen aus dem Zusatz- und Grundwerkstoff beim Schweißen und Schneiden von Stahlwerkstoffen.

Aluminiumoxid (Al_2O_3) entsteht aus dem Zusatz- und Grundwerkstoff beim Schweißen und Schneiden von Aluminium-Werkstoffen.

Manganoxide (MnO_2 , Mn_2O_3 , Mn_3O_4 , MnO) entstehen bei allen Lichtbogenverfahren mit manganhaltigen Zusätzen. Der Anteil von Mangan im Schweißzusatz hat einen direkten Einfluss auf den Anteil von Manganoxid im Schweißrauch und führt immer zu einer Anreicherung im Schweißrauch. Untersuchungen beim Hartauftragschweißen mit hoch manganhaltigen Kerndrähten ergaben Emissionswerte an Manganoxiden im Schweißrauch bis 40 %.

Fluoride (CaF_2 , KF , NaF , andere) entstehen aus der Umhüllung der Stabelektroden oder aus der Füllung der Fülldrähte bei der Verwendung kalkbasischer Umhüllungen bzw. fluorhaltiger Flussmittel.

So erreicht z.B. beim Lichtbogenhandschweißen mit basisch umhüllten un- und niedriglegierten Stabelektroden der Anteil von Fluoriden im Schweißrauch Werte zwischen 10 % bis 20 %.

Barium-Verbindungen (BaCO_3 , BaF_2) entstehen beim Schweißen mit bariumhaltigen Schweißzusätzen aus der Umhüllung bei Stabelektroden oder aus den Füllstoffen bei Fülldrähten, wie z.B.:

- Stabelektroden zum Schweißen von Gusseisen und Kupferlegierungen,
- hoch- und mittellegierte Fülldraht- oder Stabelektroden.

So ergab beispielsweise das Schweißen mit Stabelektroden von Gusseisen und Kupferlegierungen bis zu 40 % Barium-Gehalt im Schweißrauch.

Kaliumoxid, Natriumoxid und Titandioxid (K_2O , Na_2O , TiO_2) entstehen aus der Umhüllung beim Einsatz umhüllter Stabelektroden. Titandioxid kann im Rauch von rutilsauren Elektroden auftreten.

Chrom(VI)-Verbindungen

(Chromate = Na_2CrO_4 , K_2CrO_4 , ZnCrO_4 , usw.)

(Chromtrioxid = CrO_3)

Sechswertige Chromverbindungen entstehen in kritischen Konzentrationen beim Verwenden von hochlegierten umhüllten Stabelektroden beim Lichtbogenhandschweißen wie auch beim Schweißen mit hochlegierten chromhaltigen Fülldrähten.

Auch beim Überschweißen von früher üblichen zinkchromathaltigen Fertigungsbeschichtungen (Reparatur-Schweißen) können Chrom(VI)-Verbindungen auftreten.

Nickeloxide (NiO , NiO_2 , Ni_2O_3) entstehen vorwiegend beim:

- Schweißen mit Reinnickel und Nickelbasiswerkstoffen (aus dem Schweißzusatz),
- Plasmaschneiden von hochlegierten nickelhaltigen Stählen (aus dem Grundwerkstoff),
- thermischen Spritzen mit Nickelbasis-Spritzzusätzen aus dem Spritzzusatz.

Cadmiumoxid (CdO) entsteht:

- aus dem Lot beim Hartlöten mit cadmiumhaltigem Hartlot,
- beim Schweißen und Schneiden von cadmiumbeschichteten Werkstoffen.

Berylliumoxid entsteht aus dem Grundwerkstoff beim Schneiden von berylliumhaltigen Werkstoffen.

Cobaltoxid (CoO) entsteht aus dem:

- Schweißzusatz beim Auftragschweißen mit cobalthaltigen Legierungen,
- Spritzzusatz beim thermischen Spritzen mit cobalthaltigen Legierungen,
- Grundwerkstoff beim Schneiden von Stählen, die Cobalt als Legierungselement enthalten.

Thoriumdioxid (ThO₂) entsteht aus der thoriumoxidhaltigen Wolframelektrode beim WIG-Schweißen, insbesondere von Aluminiumwerkstoffen.

Andere Metalle in der Oxidform

Bleioxid, Kupferoxid, Zinkoxid, Zinnoxid, Vanadiumpentoxid entstehen bei der schweißtechnischen Be- und Verarbeitung (z.B. aus den metallischen Beschichtungen, beim Überschweißen, aus dem Spritzzusatz, beim thermischen Spritzen, aus dem Flussmittel/Lot, beim Löten) von Werkstoffen, welche die vorstehend genannten Metalle enthalten.

Rauche aus Beschichtungsstoffen

Eine große Zahl von Schadstoffen aus organischen Komponenten kann sich bilden bei Schweiß- und Schneidverfahren von metallischen Werkstoffen, die Beschichtungen auf organischer Basis (z.B. Farben, Lacke, Primer) haben.

1.3.3 Schadstoffe aus Beschichtungsstoffen auf organischer Basis

Untersuchungen mittels Pyrolyse bei organischen Beschichtungen, die im Schiffbau verwendet wurden und teilweise auch heute noch zur Anwendung kommen, ergeben die in den Bildern 1-7a und 1-7b enthaltenen Zersetzungsprodukte:

Bild 1-7a: Empfehlungen für Leitkomponenten für die Zersetzungsprodukte von Beschichtungsstoffen auf organischer Basis bei Pyrolyse (t = 350 °C)

Zersetzungs- produkte	Leitkomponenten ² bei verschiedenen Beschichtungsstoffen							
	Voranstrich (Bindemittelbasis)						Deckschicht ³	
	Shopprimer ⁴			Primer ⁵			(Bindemittelbasis)	
	Epoxid- harz	Ethyl- silikat	PVB	Epoxid- harz	Chlor- Kautschuk	Alkyd- harz	Chlor- Kautschuk	Alkyd- harz
Aliphatische Aldehyde ⁶			L ₂		L ₃	L ₄	L ₃	L ₄
Aliphatische Alkohole (C ₂ - C ₄) ⁷	L ₄	L ₂	L ₃	L ₄				
Aliphatische Carbonsäuren						L ₂		L ₂
Alkylbenzole (C ₇ - C ₈) ⁸	L ₃			L ₃	L ₄		L ₄	
Chlorwasserstoff (HCl)					L ₁		L ₁	
Kohlenmonoxid (CO)	L ₂	L ₁	L ₁	L ₂	L ₂	L ₃	L ₂	L ₃
Phenole (einschl. Bisphenol-A)	L ₁			L ₁				
Phthalsäureanhydrid						L ₁		L ₁
Feinstaub (alv. Fraktion)	L	L	L	L	L	L	L	L
Anmerkung: Erfahrungsgemäß verschiebt sich das Spektrum der Zersetzungsprodukte mit steigender Temperatur in Richtung niedermolekularer Stoffe, z.B.: aliphatische Aldehyde → Acrolein, Formaldehyd aliphatische Alkohole → Ethanol, Methanol aliphatische Carbonsäuren → Essigsäure, Ameisensäure								

² L: allgemeine Leitkomponente. L₁ L₂, L₃, L₄: erste, zweite, dritte, vierte Leitkomponente.

³ Deckschicht wird auch als "finishing paint" bezeichnet.

⁴ Als Shopprimer wird der Voranstrich bezeichnet, der meist schon vom Hersteller auf Halbzeuge (Bleche, Profile) aufgebracht wird.

⁵ Als Primer wird der Voranstrich bezeichnet, der vom Verarbeiter auf die fertigen Produkte aufgebracht wird.

⁶ hier z.B. Butyraldehyd.

⁷ hier z.B. Butanol.

⁸ hier z.B. Toluol, Xylol.

Bild 1-7b: Zersetzungsprodukte von Beschichtungsstoffen auf organischer Basis bei Pyrolyse (t = 800 °C): nachgewiesene Stoffe und Leitkomponenten

Beschichtung (Bindemittelbasis)	Epoxid- teer Amid- Addukt gehärtet	Poly- urethan- teer	Epoxid- teer Amin gehärtet	Epoxid- harz	Urethan- Alkyd- harz	Epoxid- teer	Alkyd- harz	Vinyl/ Epoxid- harz (teer- haltig)
Zersetzungsprodukte (Schadstoffe)	Nachgewiesene Stoffe			Leitkomponente				
Acenaphthen	x							
Acetaldehyd								x
Benzaldehyd			x					
Benzol	x	x	x	x	x	x	x	x
Biphenyl	x							
Bisphenol-A	x		x	x		x		
Buten								x
4-tert. Butylphenol			x					
Dibenzofuran	x							
Dihydrobenzopyran oder Isomeres	x							
Diisocyanattoluol		x						
Fluoren	x							
Kresole			x					
Methyl-methacrylat								x
α-Methylstyrol (Isopropenylbenzol)			x	x		x		
Dimeres des α-Methylstyrol			x					
Methylnaphthaline	x							
Naphthalin	x							
4-kern polyaroma- tische Kohlenwasser- stoffe (PAH)	x	x						
5-kern polyaroma- tische Kohlenwasser- stoffe (PAH)	x	x						
Phenanthren/ Anthracen	x	x						
Phenol	x		x	x				x
Pyren	x	x						
Styrol	x		x	x	x	x	x	x
Toluol	x	x	x	x	x	x	x	x
Xylole	x		x					

1.4 Einflussfaktoren

Menge und Art der Schadstoffe werden – außer durch die eingesetzten Verfahren und Werkstoffe – auch von Oberflächenbeschichtungen und -verunreinigungen sowie von den folgenden weiteren Faktoren beeinflusst.

Strom, Spannung

Höhere Werte für Schweißstrom und Schweißspannung führen – bei gleichen Verfahren und Werkstoffen – zu höheren Schadstoffemissionen.

Stromart

Bei Verwendung von Wechselstrom werden höhere Emissionen beobachtet als bei Gleichstrom.

Elektroden Durchmesser

Mit zunehmendem Elektroden Durchmesser nimmt die Schadstoffemission zu.

Art der Umhüllung

Bei rutilumhüllten Elektroden werden die niedrigsten, bei zelluloseumhüllten Elektroden dagegen die höchsten Schadstoffemissionen festgestellt.

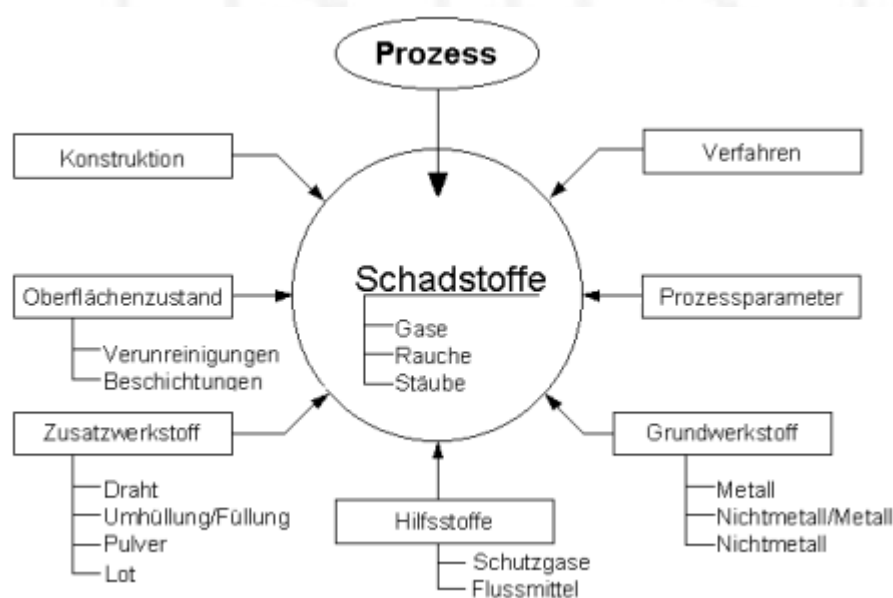
Elektrodenanstellwinkel

Bei flacheren Elektrodenanstellwinkeln werden niedrigere Emissionswerte beobachtet als bei steileren Anstellwinkeln.

Art der Schweißung

Beim Auftragschweißen treten höhere Schadstoffemissionen auf als beim Verbindungsschweißen.

Bild 1-8: Einflussfaktoren



1.5 Grenzwerte

Um die Belastung des Schweißers durch Schadstoffe am Arbeitsplatz zu begrenzen, d.h. um die Auswirkungen dieser Schadstoffe auf den menschlichen Körper zu minimieren, sind stoffspezifische Grenzwerte festgelegt worden. Aufgrund der technischen Gegebenheiten am Arbeitsplatz, der analytischen und arbeitsmedizinischen Erkenntnisse, werden diese Grenzwerte regelmäßig überprüft.

Die TRGS 900 "Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz – Luftgrenzwerte" enthält für zahlreiche Stoffe "Maximale Arbeitsplatzkonzentrationen" (MAK) und "Technische Richtkonzentrationen" (TRK). Beide Begriffe werden auch als Luftgrenzwerte bezeichnet.

Maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK)

MAK ist die Konzentration eines Stoffes in der Luft am Arbeitsplatz, bei der im Allgemeinen die Gesundheit der Arbeitnehmer nicht beeinträchtigt wird. Maßgebend sind dabei wissenschaftlich fundierte Kriterien des Gesundheitsschutzes, nicht die technischen und wirtschaftlichen Möglichkeiten der Realisation in der Praxis.

Die MAK gilt in der Regel nur für einzelne Stoffe (reine Stoffe) und ist ein Langzeitwert, nämlich ein Schichtmittelwert bei in der Regel täglich achtstündiger Exposition und bei Einhaltung einer durchschnittlichen Wochenarbeitszeit von 40 Stunden (in Vierschichtbetrieben 42 Stunden je Woche im Durchschnitt von vier aufeinander folgenden Wochen). Aufgrund der Tatsache, dass die Konzentration verschiedener Stoffe in der Luft am Arbeitsplatz schwanken kann, wurden Kurzzeitwerte aufgestellt, um kurzfristige Überschreitungen des Schichtmittelwertes (Expositionsspitzen) beurteilen zu können. Sie sind nach Höhe, Dauer, Häufigkeit und zeitlichem Abstand begrenzt.

Grenzwerte für Stoffgemische sollen nach TRGS 403 "Bewertung von Stoffgemischen in der Luft am Arbeitsplatz" ermittelt werden.

In der Schweißtechnik treten Schadstoffe immer im Gemisch auf. Die Ermittlung der Grenzwerte ist daher sehr aufwendig. Deshalb arbeitet man in der Praxis häufig mit verfahrens- und werkstoffspezifischen Leitkomponenten.

Allgemeiner Staubgrenzwert

Der Allgemeiner Staubgrenzwert unterscheidet zwischen:

- Grenzwert für die alveolengängige Fraktion (A-Fr) 3 mg/m³ und
- Grenzwert für die einatembare Fraktion (E-Fr) 10 mg/m³.

Bei Einhaltung des Allgemeinen Staubgrenzwertes ist mit einer Gesundheitsgefährdung dann nicht zu rechnen, wenn nach einschlägiger Überprüfung sichergestellt ist, dass mutagene, krebserzeugende, fibrogene, toxische oder allergisierende Wirkungen des Staubes nicht zu erwarten sind.

Der Allgemeiner Staubgrenzwert gilt auch für

- Aluminiumoxid,
- Eisenoxide,
- Magnesiumoxid und
- Titandioxid.

Der Allgemeiner Staubgrenzwert wird als Schichtmittelwert festgelegt und ist für schwer lösliche bzw. unlösliche Stäube anzuwenden, die nicht anderweitig reguliert sind oder für Mischstäube. Der Grenzwert gilt als allgemeine Obergrenze, zusätzlich sind aber die stoffspezifischer Luftgrenzwerte einzuhalten.

Der Grenzwert gilt nicht für lösliche Stäube, ultrafeine und grobdisperse Partikelfractionen, für Lackaerosole und die Tätigkeit "Schweißen". Für Lackaerosole und Schweißen ist eine separate Regelung in Vorbereitung. Für Schweißen gilt bis zum Vorliegen dieser Regelung entsprechend die Nummer 2.4 Abs. 9 der TRGS 900 (siehe auch Bild 1-11b).

Bei Stäuben mit ultrafeinen Partikelanteilen und Schweißarbeiten gilt der Allgemeine Staubgrenzwert als Obergrenze, ultrafeine Partikelfractionen sind nach Vorliegen entsprechender Bewertungskriterien (Grenzwerte) gesondert zu berücksichtigen.

Für Tätigkeiten oder Arbeitsbereiche, in denen der Grenzwert von 3 mg/m^3 (A-Fr) nachweislich nicht eingehalten werden kann – obwohl der Stand der Technik umgesetzt ist – gilt gleichfalls der Grenzwert von 6 mg/m^3 (A-Fr). In diesen Fällen sind Beschreibungen des Standes der Technik, der Tätigkeit und der Arbeitsbereiche sowie die Arbeitsplatzbeurteilungen mit den zugrunde liegenden Messergebnissen der Aufsichtsbehörde sowie dem AGS mitzuteilen. Ferner ist ein Schutzmaßnahmenkonzept zu erarbeiten, welches insbesondere betriebsspezifische technische, organisatorische und persönliche Schutzmaßnahmen (z.B. Tragen von Atemschutz) enthält.

Sofern an Arbeitsplätzen eine Staubkonzentration von 3 mg/m^3 (A-Staub) nicht eingehalten werden kann, sind für die Beschäftigten arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen vorzusehen.

Die Beeinträchtigung der Atmungsorgane durch die vorstehend genannten Stäube und Rauche sind Langzeiteffekte und hängen maßgeblich von der Staubdosis ab, die durch die über einen längeren Zeitraum einwirkende mittlere Feinstaubkonzentration bestimmt wird.

Die Werte sollen die Beeinträchtigung der Funktion der Atmungsorgane infolge einer allgemeinen Staubwirkung verhindern.

Technische Richtkonzentration (TRK)

TRK ist die Konzentration eines Stoffes in der Luft am Arbeitsplatz, die nach dem Stand der Technik erreicht werden kann. TRK sind Schichtmittelwerte bei in der Regel täglich 8-stündiger Exposition und bei einer durchschnittlichen Wochenarbeitszeit von 40 Stunden. Die Begrenzung der Abweichungen vom Mittelwert nach oben wird auch in diesem Fall durch Kurzzeitwerte festgelegt. TRK werden nur für solche Stoffe aufgestellt, für die zurzeit keine toxikologisch-arbeitsmedizinisch begründeten MAK aufgestellt werden können.

Für krebserzeugende Stoffe werden TRK benannt; bei deren Einhaltung am Arbeitsplatz ist das Risiko einer Gesundheitsbeeinträchtigung vermindert, jedoch nicht vollständig auszuschließen.

Auslöseschwelle

Die Auslöseschwelle ist überschritten, wenn die Einhaltung des Luftgrenzwertes nicht nachgewiesen ist. Bei gesplitteten Luftgrenzwerten gilt der niedrigere Wert, sofern nicht im Einzelfall andere Regelungen getroffen werden (TRGS 101). Bei Überschreitung der Auslöseschwelle sind zusätzliche Maßnahmen zum Schutz der Gesundheit erforderlich, so z.B. arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen (GefStoffV und Unfallverhütungsvorschrift "Arbeitsmedizinische Vorsorge" [BGV A4]).

Liegen Messergebnisse für mindestens drei verschiedene Schichten vor und sind alle Indices ≤ 1 und ist der geometrische Mittelwert $(I_1 \cdot I_2 \cdot \dots \cdot I_n)^{1/n} \leq 1/2$, so gilt der Grenzwert als eingehalten (TRGS 402, Anhang 1).

Biologischer Arbeitsplatztoleranzwert (BAT-Wert)

BAT-Wert ist die Konzentration eines Stoffes oder seines Umwandlungsproduktes im Körper oder die dadurch ausgelöste Abweichung eines biologischen Indikators von seiner Norm, bei der im Allgemeinen die Gesundheit der Arbeitnehmer nicht beeinträchtigt wird. Die BAT-Werte sind in der TRGS 903 aufgelistet. Für einige Schadstoffe in der Schweißtechnik sind die BAT-Werte in Bild 1-9 aufgeführt. BAT-Werte sind als Höchstwerte für gesunde Einzelpersonen konzipiert. Maßgebend sind arbeitsmedizinisch-toxikologisch fundierte Kriterien des Gesundheitsschutzes. BAT-Werte gelten in der Regel für eine Belastung mit Einzelstoffen.

BAT-Werte können als Konzentrationen, Bildungs- oder Ausscheidungsraten (Menge/Zeiteinheit) in der Regel im Blut und/oder Urin definiert sein. Wie bei den MAK wird in der Regel eine Stoffbelastung von maximal 8 Stunden täglich und 40 Stunden wöchentlich zugrunde gelegt.

BAT-Werte dienen insbesondere im Rahmen spezieller ärztlicher Vorsorgeuntersuchungen dem Schutz der Gesundheit am Arbeitsplatz. Sie geben eine Grundlage für die Beurteilung der Bedenklichkeit oder Unbedenklichkeit der vom Organismus aufgenommenen Stoffmengen ab.

Die Überwachung kann durch die periodische quantitative Bestimmung eines Stoffes im biologischen Material oder biologischen Parameter erfolgen. Die Messstrategie soll den Expositionsverhältnissen am Arbeitsplatz Rechnung tragen. Die Einhaltung von BAT-Werten entbindet nicht von einer Überwachung der Schadstoffkonzentration in der Luft.

Bild 1-9: Biologische Arbeitsplatztoleranzwerte (BAT) für einige Schadstoffe in der Schweißtechnik

Schadstoff	Parameter	BAT-Wert	Untersuchungs- material	Probe- nahme- zeitpunkt
1 Gasförmig				
Kohlenmonoxid (CO)	CO-Hb	5 %	Blut (B)	b
2 Partikelförmig				
Aluminiumoxid (Al ₂ O ₃)	Aluminium	200 µg/l	Harn (H)	b
Bleioxid (PbO)	Blei	700 µg/l 300 µg/l ⁹	Blut (B)	a
Fluoride (anorganische Fluorverbindungen)	Fluorid	7,0 mg/g Kreatinin	Harn (H)	b
		4,0 mg/g Kreatinin	Harn (H)	d
a – keine Beschränkung b – Expositionsende, bzw. Schichtende d – vor nachfolgender Schicht				

⁹ Frauen unter 45 Jahren

Grenzwerte nach Strahlenschutzverordnung (StrlSchV)

Die StrlSchV vom 1. August 2001 gibt neue Grenzwerte für den Umgang mit radioaktiven Stoffen.

Es gelten die folgenden Dosisgrenzwerte:

- 6 mSv für nicht beruflich strahlenexponierte Personen bei "Arbeiten",
- 20 mSv für beruflich strahlenexponierte Personen,
- 40 mSv für die gesamte beruflich bedingte Dosis,
- 6 mSv für Personen unter 18 Jahren.

Aufgrund der am Arbeitsplatz gegebenen Randbedingungen sind im konkreten Fall aus dem stoffspezifischen biologischen Wert nicht ohne weiteres Rückschlüsse auf die bestehende Stoffkonzentration in der Arbeitsluft und umgekehrt zulässig.

Wesentliche Einflussfaktoren sind schwere körperliche Arbeit, Arbeit in Zwangshaltung und die Temperatur am Arbeitsplatz.

Expositionsäquivalente für krebserzeugende Arbeitsstoffe (EKA)

Für manche krebserzeugenden Stoffe – wie Alkalischromate, Cobalt, Nickel und Nickelverbindungen – gibt es Korrelationen zwischen der Schadstoffkonzentration in der Luft und im biologischen Material (Blut oder Harn), die begründet werden können. Diese Korrelationen werden als Expositionsäquivalente bezeichnet (Bild 1-10).

**Bild 1-10: Expositionsäquivalente für krebserzeugende Arbeitsstoffe (EKA)
für einige Schadstoffe in der Schweißtechnik**

Alkalichromate	Luft CrO ₃ (mg/m ³)	Probenahmezeitpunkt: bei Langzeitexposition nach mehreren voran- gegangenen Schichten	Probenahmezeitpunkt: Expositionsende bzw. Schichtende
		Erythrozyten ¹⁰ Chrom (µg/l Vollblut)	Harn ¹¹ Chrom (µg/l)
	0,03	9	12
	0,05	17	20
	0,08	25	30
	0,10	35	40
Cobalt	Luft Cobalt (µg/m ³)	Probenahmezeitpunkt: keine Beschränkung	
		Vollblut/Cobalt (µg/l)	Harn/Cobalt (µg/l)
	50	2,5	30
	100	5	60
	500	25	300
Hydrazin	Luft Hydrazin (mg/m ³)	Probenahmezeitpunkt: Expositions- bzw. Schichtende	
		Harn µg Hydrazin/g Kreatinin	Plasma Hydrazin (µg/l)
	0,013	35	27
	0,026	70	55
	0,065	200	160
	0,104	300	270
	0,130	380	340
Nickel (Nickelmetall, -oxid, -carbonat, -sulfid, sulfidische Erze)	Luft Nickel (µg/m ³)	Probenahmezeitpunkt: nach mehreren vorangegangenen Schichten	
			Harn Nickel (µg/l)
	100		15
	300		30
	500		45

EU-Werte sind Grenzwerte der Europäischen Union (verbindliche Grenz- und Richtwerte) für eine berufsbedingte Exposition. Diese Grenzwerte sind auch wie die MAK oder TRK Schichtmittelwerte bei 8-stündiger Exposition.

In den Bildern 1-11a und 1-11b sind die Schadstoffe in der Schweißtechnik, deren Grenzwerte und Einstufungen tabellarisch zusammengefasst.

Im Bild 1-11c wird die Anwendung des Allgemeinen Staubgrenzwertes in der Schweißtechnik – auf der Basis der TRGS 900 – grafisch dargestellt.

¹⁰ gilt nicht für Schweißrauch-Exposition

¹¹ gilt auch für Schweißrauch-Exposition

Bild 1-11a: Schadstoffe in der Schweißtechnik, Grenzwerte, Einstufung, Stand Januar 2003

1 Gasförmige Schadstoffe										
I		II						III	IV	V
Schadstoff	Einstufung K	Luftgrenzwerte						Wert im biol. Mat.	G- Grund- sätze	Relev. Regeln/ Literatur
		mg/m ³	ml/m ³	Art (Herkunft)	Spitz.- Begr./ Kateg.	Kurzzeit- wert- höhe	Kurzzeit- wert- dauer ¹²			
1.1 Toxisch										
Kohlen- monoxid (CO)		35	30	MAK (DFG)	2	2 · MAK	15 min, MiW	BAT	7	
Kohlendioxid (CO ₂)		9100	5000	MAK (DFG, EU)	4	4 · MAK	15 min, MiW			
Phosgen (COCl ₂) (Carbonylchlorid)		0,082	0,02	MAK (DFG)	= 1 =					ZH 1/298
Stickstoff- monoxid (NO)		30	25	MAK (EU)						
Stickstoff- dioxid (NO ₂)		9,5	5	MAK (DFG)	= 1 =	MAK				ZH 1/214
1.2 Krebserzeugend										
Form- aldehyd (HCHO)	3	0,62	0,5	TRK (AGS)	= 1 =	TRK				TRGS 513, 607 ZH 1/296
Ozon (O ₃)	3	0,2	0,1	MAG (DFG)	= 1 =	MAK				

¹² Die Dauer der erhöhten Exposition darf in einer Schicht insgesamt 1 Stunde nicht überschreiten.

Bild 1-11b: Schadstoffe in der Schweißtechnik, Grenzwerte, Einstufung, Stand Januar 2003

2 Partikelförmige Schadstoffe										
I		II						III	IV	V
		Luftgrenzwerte						Wert		
Schadstoff	Einstufung K	mg/m ³	ml/m ³	Art (Herkunft)	Spitz.-Begr./Kateg.	Kurzzeitwert-höhe	Kurzzeitwert-dauer ¹³	im biol. Mat.	G-Grundsätze	Relev. Regeln/Literatur
2.1 Lungenbelastend¹⁴										
Aluminiumoxid		3 A/6 A ¹⁴		MAK (DFG)	4	4 · MAK	15 min, MiW	BAT		
Eisenoxide		3 A/6 A ¹⁴		MAK (DFG)	4	4 · MAK	15 min, MiW			
Magnesiumoxid		3 A/6 A ¹⁴		MAK (DFG)	4	4 · MAK	15 min, MiW			
Molybdän-Verbindungen, unlösliche (als Mo berechnet)		15 E ¹⁴		MAK (DFG)	4	4 · MAK	15 min, MiW			
Titandioxid		3 A/6 A ¹⁴		MAK (DFG)	4	4 · MAK	15 min, MiW			
2.2 Toxisch										
Barium-Verbindungen, lösliche		0,5 E		MAK (DFG, EU)	4	4 · MAK	15 min, MiW			
Bleioxid		0,1 E		MAK (DFG)	4	4 · MAK	15 min, MiW	BAT		
Calciumoxid		5 E		MAK (DFG)	= 1 =	MAK	15 min, MiW			
Fluoride (als Fluor berechnet)		2,5 E		MAK (DFG)	4	4 · MAK	15 min, MiW	BAT		ZH 1/161
Kupferoxid		0,1 A		MAK (DFG)	4	4 · MAK	15 min, MiW			
Manganoxide		0,5 E		MAK (DFG)	4	4 · MAK	15 min, MiW			
Molybdän-Verbindungen, lösliche (als Mo berechnet)		5 E		MAK (DFG)	4	4 · MAK	15 min, MiW			
Silber-Verbindungen		0,01 E		MAK (EU)						

¹³ Die Dauer der erhöhten Exposition darf in einer Schicht insgesamt 1 Stunde nicht überschreiten.

¹⁴ siehe Abschnitt 1.5 Grenzwerte, Allgemeiner Staubgrenzwert, BGI 593

Vanadiumpentoxid		0,05 A		MAK (DFG)	4	4 · MAK	15 min, MiW			
Zinkoxid		5 A		MAK (DFG)	4	4 · MAK	15 min, MiW			
Zinn-Verbindungen, anorganische		2 A		MAK (DFG, EU)	4	4 · MAK	15 min, MiW			
2.3 Krebserzeugend										
Berylliumoxid	2	0,002 E		TRK (AGS)	4	4 · MAK	15 min, MiW		40	
Cadmiumoxid	2	0,03 E ¹⁵ 0,015E ¹⁶		TRK (AGS)	4	4 · MAK	15 min, MiW		32	ZH 1/136 Bundes- arbeitsbl. (1991) Nr. 9, S. 76
Chrom(VI)-Verbindungen einschließlich Bleichromat (in Form von Stäuben/ Aerosolen, ausgenommen die in Wasser praktisch unlöslichen, wie z.B. Bariumchromat)	2 ¹⁷	0,1 G ¹⁸ 0,5 G ¹⁹		TRK (AGS)	4	4 · MAK	15 min, MiW	EKA 20	15	TRGS 602, 613 ZH 1/88 BIA- Arbeitsm. KZ 1010
Cobaltoxid	3 ²¹	0,1 E		TRK (AGS)	4	4 · TRK	15 min, MiW	EKA	40	
Nickeloxid	1	0,5 E		TRK (AGS)	4	4 · TRK	15 min, MiW	EKA	38	

¹⁵ für Schweißen cadmiumhaltiger Legierungen

¹⁶ im Übrigen

¹⁷ Bleichromat: Einstufung = 3
Zinkchromat: Einstufung = 1
Strontiumchromat: Einstufung = 2
Chromtrioxid: Einstufung = 1
Zinkkaliumchromat: Einstufung = 1

¹⁸ für Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Stabelektroden

¹⁹ im Übrigen

²⁰ für Alkalichromate

²¹ Einstufung nach Liste B und Liste C (Siehe Erläuterungen zur Spalte "Einstufung")

Zeichenerklärung:

A Erläuterungen zur Spalte "Luftgrenzwerte" (siehe TRGS 900)

A	Alveolengängige Fraktion (früher Feinstaub)
E	Einatembare Fraktion (früher Gesamtstaub)
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
TRK	Technische Richtwertkonzentration
(AGS)	Ausschuss für Gefahrstoffe
(DFG)	Senatskommission der Deutschen Forschungsgemeinschaft
(EU)	Kommission der Europäischen Union
MiW	Mittelwert

B Erläuterungen zur Spalte "Einstufung" (siehe TRGS 905)

K	Einstufung als krebserzeugend (siehe Liste A, B und C) Kategorie 1, 2 oder 3 nach Anhang I GefStoffV.
Liste A:	Hier sind alle Stoffe aufgeführt, die von der Europäischen Union (EU) eingestuft wurden und alle Stoffe, die in den §§ 15a und 35 der GefStoffV angegeben werden.
Liste B:	Die hier aufgeführten Stoffe wurden noch nicht von der EU zwecks Einstufung bearbeitet.
Liste C:	Hier werden alle Stoffe aufgelistet, deren nationale Bewertung durch den AGS von der EU-Einstufung abweicht. Eine Änderung der EU-Legaleinstufung wird für diese Stoffe angestrebt.

C Erläuterung der Zuordnungen in der Spalte "Art (Herkunft)"/

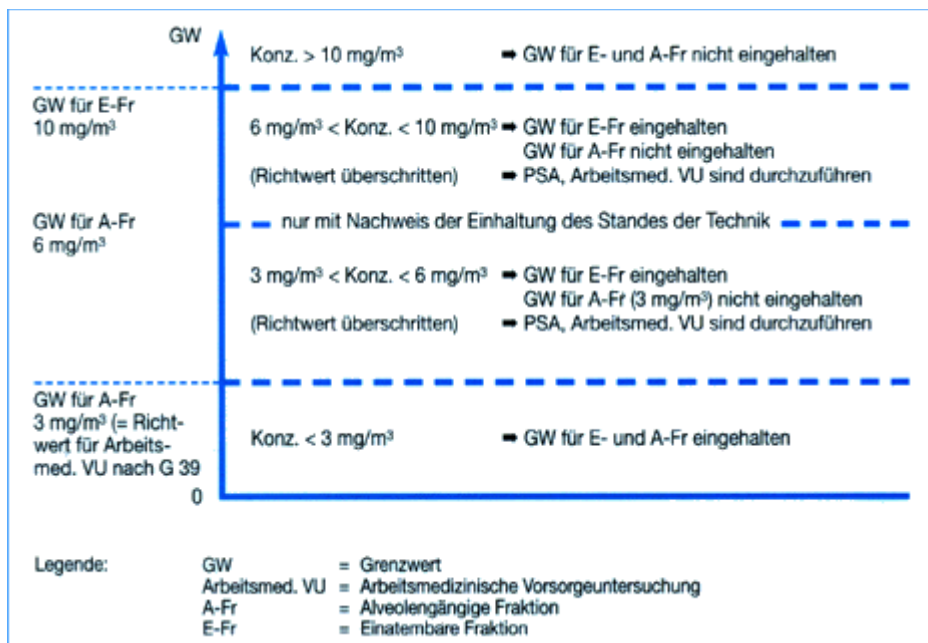
Vergleich der Einstufungen krebserzeugender Stoffe DFG – TRGS 900

DFG	TRGS 900	
III	K	Bestimmte besondere Stoffgruppen (Karzinogene), die in der Mitteilung der Senatskommission in Abschnitt III "Krebserzeugende Arbeitsstoffe" bzw. in der Richtlinie 90/394/EWG "Krebsrichtlinie" (Artikel 2, Buchstabe C) aufgeführt sind.
III A1	1	Eindeutig als krebserzeugend ausgewiesene Arbeitsstoffe, die beim Menschen erfahrungsgemäß bösartige Geschwülste zu verursachen vermögen.
III A2	2	Eindeutig als krebserzeugend ausgewiesene Arbeitsstoffe, die sich nach Meinung der Kommission bislang nur im Tierversuch als krebserzeugend erwiesen haben, und zwar unter Bedingungen, die der möglichen Exponierung des Menschen am Arbeitsplatz vergleichbar sind bzw. aus denen Vergleichbarkeit abgeleitet werden kann.
III B	3	Stoffe mit begründetem Verdacht auf krebserzeugendes Potenzial

D Erläuterungen zur Spalte "Wert im Biologischen Material"

BAT	Biologische Arbeitsplatztoleranzwerte
EKA	Expositionsäquivalente für krebserzeugende Arbeitsstoffe

Bild 1-11c: Auslegung der TRGS 900 bezüglich der Anwendung des Allgemeinen Staubgrenzwertes in der Schweißtechnik; "Übergangslösung"



1.6 Untersuchungsmethoden

Um gesicherte Aussagen über die Gefährdung der Schweißer durch Schadstoffe am Arbeitsplatz machen zu können, werden verschiedene Untersuchungsmethoden angewandt, so vor allem

- Emissionsmessungen im Labor,
- Immissionsmessungen am Arbeitsplatz – Konzentrationsmessungen,
- Untersuchungen im biologischen Material sowie
- epidemiologische Studien.

Emissionsmessungen im Labor bestimmen die Menge pro Zeiteinheit (= Emissionsrate [mg/s]) und die chemische Zusammensetzung der emittierten Schadstoffe bei einzelnen Verfahren und Werkstoffen unter Verwendung der Fumebox-Methode.

Man gewinnt dadurch Grunddaten zum Vergleich unterschiedlicher Verfahren und Werkstoffe sowie für eine Beurteilung der Gefährdung der Schweißer (siehe Abschnitt 4). Die Emissionsmessungen geben jedoch eine Grundlage für die Berechnung von Lüftungssystemen und für weitere erforderliche Schutzmaßnahmen.

Als zusätzliches Beispiel für Ergebnisse von Emissionsmessungen siehe auch Bild 1-12 "Analyse der beim Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Stabelektroden nach DIN 1913 entstehenden Schweißrauche".

Bild 1-12: Ergebnisse von Emissionsmessungen (Beispiele)

Beispiel 1:	Emissionen bei unterschiedlichen Schweißverfahren von hochlegiertem Chrom-Nickel-Stahl				
	Emissionswerte in mg/s				
Schweißverfahren	Schweiß- rauch	Gesamt- Chrom	Chrom(VI)- Verbindungen	Nickeloxid	Manganoxid
LBH ²²	2-16	0,04-1,3	0,01-1,2	0,03-0,5	0,04-1,1
MAG	1,5-8	0,1-1,3	0-0,05	0,05-0,6	0,1-1,2
Laserstrahl- schweißen	1,3-2,0	0,16-0,26	0,003-0,007	0,05-0,08	0,09-0,16

Beispiel 2:	Emissionen bei unterschiedlichen Schweißverfahren von unlegiertem und niedriglegiertem Stahl	
Schweißverfahren	Emissionsrate mg/s	
Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Stabelektroden (LBH)	4 – 18	
Metall-Aktivgasschweißen (MAG)	mit Massivdraht	2 – 12
	mit Fülldraht unter Schutzgas	6,7 – 54
	mit selbstschützendem Fülldraht	bis zu 97

Beispiel 3:	Emissionen beim MIG-Schweißen mit unterschiedlichen hochnickelhaltigen Zusatzwerkstoffen und Schutzgasen						
Schweißzusatz- Werkstoff	Schutzgas	Emissionsrate in mg/s					
		Schweiß- rauch	Nickel	Gesamt- Chrom	Molyb- dän	Kupfer	Titan
SG-NiTi4	Cronigon® He30S	2,82	1,94	–	–	–	0,03
SG-NiCr23Mo16	Cronigon® He30S	2,23	0,98	0,26	0,19	–	–
SG-CuNi30Fe	Cronigon® He30S	3,58	0,67	–	–	2,2	–
SG-NiMo28Cr	Cronigon® He30S	1,97	0,99	–	0,1	–	–
	Argon	1,05	0,53	–	0,05	–	–
	Varigon® He50	1,57	0,88	–	0,18	–	–
	Cronigon® He50S	1,02	0,53	–	0,11	–	–

Immissionsmessungen am Arbeitsplatz sollen die reale externe Belastung des Schweißers zeigen. Die Probenahme erfolgt im Atembereich des Schweißers. Einzelheiten über die quantitative und qualitative Auswertung der Probe sind in Abschnitt 5.1 (Messverfahren für gasförmige Stoffe) und Abschnitt 5.2 (Messverfahren für partikelförmige Stoffe) beschrieben. **Die gemessenen Konzentrationen (mg/m³)** werden mit den jeweiligen Grenzwerten verglichen und sind maßgebend für die anzuwendenden Schutzmaßnahmen. Die Korrektheit der Messung hängt vor allem davon ab, ob die Probenahme tatsächlich im Atembereich erfolgt. Hierzu gibt es derzeit verschiedene Modellansätze mit entsprechenden Vorgaben für die Messtechnik (Probenahme).

Untersuchungen im biologischen Material, also in den vom Schweißer

²² LBH = Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Stabelektroden

abgenommenen Körperflüssigkeiten (Harn, Blut), zeigen die dort enthaltenen Konzentrationen kritischer Stoffe. Diese Werte geben Informationen über die Höhe der internen Belastung des Schweißers durch die Exposition am Arbeitsplatz und werden mit Normalwerten bzw. BAT-Werten verglichen.

Epidemiologische Untersuchungen werden zur Abklärung von Krankheits- oder Todeshäufigkeiten in unterschiedlichen Personengruppen durchgeführt, z.B. zur Klärung des Lungenkrebsrisikos von Schweißern. Den epidemiologischen Studien liegen Vergleiche zugrunde zwischen "Probanden" (z.B. Schweißern) und einer Kontrollgruppe (Arbeitnehmer, die nichts mit Schweißen zu tun haben und insoweit als unbelastet gelten).

Etliche epidemiologische Studien wurden im Hinblick auf die gesundheitliche Gefährdung von Chrom-Nickel-exponierten Lichtbogenschweißern durchgeführt.

Sie haben eine leicht erhöhte Krebsrisikorate für Lichtbogenhandschweißer gezeigt, die Edelstahl schweißen.

Neuere epidemiologische Studien weisen allerdings auf ein leicht erhöhtes Lungenkrebsrisiko bei Lichtbogenschweißern allgemein hin.

2 Wirkung spezifischer Schadstoffe

2.1 Toxische gasförmige Schadstoffe

2.1.1 Kohlenmonoxid (CO)

Sehr giftiges, geruchloses Gas. Bei höheren Konzentrationen wird der Sauerstofftransport im Blut durch die große Affinität des Kohlenmonoxids zu Hämoglobin (Hämoglobin ist für den Sauerstofftransport im Körper erforderlich) blockiert. Es kommt zum Sauerstoffmangel in den Geweben.

Kohlenmonoxid ist als reproduktionstoxischer Stoff (R_E 1) eingestuft.

Bei 150 ml/m³ CO im Atembereich kommt es zu Schwindel, Mattigkeit, Kopfschmerzen. Bei 700 ml/m³ CO kommt es zu Ohnmacht, Puls- und Atemsteigerung, schließlich zu Bewusstlosigkeit, Atemlähmung, Herzstillstand und Tod.

MAK = 33 mg/m³, 30 ml/m³.

2.1.2 Stickstoffoxide (NO_x = NO, NO₂)

Werden auch Stickoxide oder nitrose Gase genannt. Stickstoffmonoxid (NO) ist ein farbloses, giftiges Gas. Stickstoffdioxid (NO₂) ist ein braunrotes, giftiges, oxidierend wirkendes Gas. Stickstoffdioxid ist erheblich toxischer als Stickstoffmonoxid und wirkt bereits in relativ geringeren Konzentrationen als ein heimtückisches Reizgas.

Anfänglich Reizung der Luftwege und Atemnot, dann mehrstündiger (in der Regel 4 bis 12 Stunden) beschwerdefreier Zustand und anschließend in schweren Fällen tödliches Lungenödem (Lungenwassersucht).

MAK für NO₂ = 9 mg/m³; 5 ml/m³

MAK für NO = 30 mg/m³; 25 ml/m³

2.1.3 Ozon (O₃)

Ist in hoher Konzentration ein tiefblaues Gas mit durchdringendem Geruch und stark giftig. Wirkt als Reizgas auf Atmungsorgane und Augen. Erzeugt Hustenreiz, Atemnot und möglicherweise Lungenödem.

MAK = 0,2 mg/m³; 0,1 ml/m³

Neuere Studien schließen die Möglichkeit nicht aus, dass Ozon ein krebserzeugendes Potenzial besitzt. Deshalb wurde Ozon in die Kategorie K 3 (Stoffe mit Verdacht auf krebserzeugendes Potenzial) eingestuft.

2.1.4 Phosgen (COCl₂)

(Carbonylchlorid oder Kohlenoxidchlorid) – ist ein farbloses, äußerst giftiges Gas mit muffigem Geruch. Anfänglich (3 bis 8 Stunden) nur geringe Krankheitserscheinungen, dann können schwere Reizungen der Atemwege folgen bis hin zum Lungenödem (Lungenwassersucht).

MAK = 0,4 mg/m³; 0,1 ml/m³

2.1.5 Gase aus Beschichtungsstoffen

Blausäure (HCN) (Cyanwasserstoffsäure) – riecht nach Bittermandel und ist eine sehr schwache, wenig stabile Säure, die zu den stärksten und am schnellsten wirkenden Giften zählt. Ähnlich wie beim Kohlenmonoxid, jedoch in viel stärkerem Maß wird der Sauerstofftransport im Blut blockiert.

MAK = 11 mg/m³; 10 ml/m³

Formaldehyd (CH₂O) – ein stechend riechendes farbloses Gas, das stark reizend auf die Schleimhäute wirkt. Erzeugt Entzündungen der Atemwege; steht unter dem Verdacht, mutagen und karzinogen zu wirken.

MAK = 0,6 mg/m³; 0,5 ml/m³

Toluylendiisocyanat (TDI) – übt eine starke Reizwirkung auf die Atemwege aus; kann asthmaähnliche Attacken auslösen und durch Sensibilisierung zu "Asthmabronchiale" führen.

MAK = 0,07 mg/m³; 0,01 ml/m³

Eine tabellarische Zusammenfassung der Wirkungen wichtiger, gasförmiger Schadstoffe auf den menschlichen Körper zeigt Bild 2-1.

Bild 2-1: Wirkung spezifischer gasförmiger Schadstoffe in der Schweißtechnik

Schadstoff		Wirkung
1.1 Toxisch		
Blausäure	(HCN)	toxisch – behindert den Sauerstofftransport im Blut Vergiftungen Atemlähmung
Kohlenmonoxid	(CO)	toxisch – behindert den Sauerstofftransport im Blut Kopfschmerzen Vergiftungen Atemlähmung eventuell Bewusstlosigkeit
Phosgen (Carbonylchlorid)	(COCl ₂)	toxisch – Schleimhautreizung Reizgasvergiftung
Stickstoffdioxid	(NO ₂)	verzögertes Lungenödem (Lebensgefahr)
Toluylendiisocyanat	(TDI)	toxisch – Reizung der Atemwege (Asthmabronchiale)
1.2 Krebserzeugend		
Formaldehyd	(CH ₂ O)	Verdacht auf krebserzeugende Wirkung – starke Schleimhautreizung
Ozon	(O ₃)	Verdacht auf krebserzeugende Wirkung – toxisch – Schleimhautreizung akute Reizgasvergiftung Lungenödem

2.2 Partikelförmige Schadstoffe

2.2.1 Lungenbelastende Stoffe

Eisenoxide (FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄) – gelten als Stoffe ohne toxische oder krebserzeugende Wirkung. Langzeitige Aufnahme hoher Konzentrationen kann zu einer Staubablagerung in der Lunge führen. Diese Ablagerung ist als Eisenstaublunge oder Lungensiderose bekannt. Sie wird auch als "Tätowierung der Lunge" bezeichnet. Nach Beendigung der Exposition bilden sich die Eisenablagerungen im Allgemeinen zurück.

MAK = 6 mg/m³

Aluminiumoxid (Al₂O₃) – kann zu einer Staubablagerung in der Lunge führen. Unter bestimmten Umständen kann eine Aluminose (Pneumokoniose) auftreten, die nicht reversibel wie die Siderose ist. Dabei ist weniger die Dauer als die Intensität der Einwirkung des Aluminiumoxids von Bedeutung. Reizerscheinungen der Atemwege können ebenfalls auftreten.

MAK = 6 mg/m³

Kaliumoxid, Natriumoxid und Titandioxid (K₂O, Na₂O, TiO₂) – sind als lungenbelastend einzustufen, weil sie zu Staubablagerungen in der Lunge führen können.

MAK = 6 mg/m³

2.2.2 Toxische Stoffe

Manganoxide (MnO_2 , Mn_2O_3 , Mn_3O_4 , MnO) – beim Auftreten in hohen Konzentrationen können Manganoxide eine reizende Wirkung auf die Atemwege ausüben und zu Lungenentzündungen führen. Bei chronischer Einwirkung können Schäden des Nervensystems wie auch Schüttellähmung auftreten (bei Schweißern bisher nicht bekannt).

MAK = 0,5 mg/m³ für Mn-Verbindungen

Fluoride (CaF_2 , KF , NaF und andere) – hohe Konzentrationen führen zu Reizungen der Schleimhäute des Magens und der Atemwege. In Extremfällen, bei chronischer Aufnahme großer Mengen, werden chronische Allgemein- und Knochenschäden beobachtet (bei Schweißern bisher nicht bekannt).

MAK = 2,5 mg/m³

Barium-Verbindungen (BaCO_3 , BaF_2) – sind überwiegend in wasserlöslicher Form im Schweißrauch vorhanden und wirken nach Aufnahme in den menschlichen Körper toxisch. Bei Überschreitung der MAK für lösliches Barium ist eine geringe Barium-Kumulation nicht auszuschließen. In manchen Fällen kann es zu einem Kaliummangel (Hypokaliämie) im Organismus führen. Eine deutliche Korrelation zwischen externer und interner Barium-Belastung wurde festgestellt.

MAK = 0,5 mg/m³

Weitere Metalle in Oxidform – mit toxischer Wirkung:

Bleioxid – kann zu Blut- und Nervenvergiftungen führen.

MAK = 0,1 mg/m³

Kupferoxid, Zinkoxid – können zu Metallrauchfieber führen.

Vanadiumpentoxid – ist toxisch, hat eine reizende Wirkung auf Augen und Atemwege. Bei höheren Konzentrationen über die MAK können Lungenschädigungen auftreten.

MAK = 0,05 mg/m³

2.2.3 Krebserzeugende Stoffe

Chrom(VI)-Verbindungen – in der Form von Chromaten (und zwar besonders die schwer löslichen) und Chromtrioxid können auf den menschlichen Körper, insbesondere auf die Atmungsorgane, eine krebserzeugende Wirkung haben. Sie sind unterschiedlich in Kategorie 1, 2 oder 3 als krebserzeugende Stoffe eingestuft (siehe Bild 1-11b "Grenzwerte, Einstufung").

Vor allem ist Chromtrioxid als krebserzeugender Stoff Kategorie 1 eingestuft. Das bedeutet, dass seine Exposition beim Menschen erfahrungsgemäß bösartige Geschwülste verursachen kann.

Zudem wirken die Chrom(VI)-Verbindungen auch schleimhautreizend und ätzend. TRK = 0,1 mg/m³ beim Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Stabelektroden, 0,05 mg/m³ bei allen anderen Verfahren.

Nickeloxide (NiO , NiO_2 , Ni_2O_3) – können eine krebserzeugende Wirkung auf die Atemwege haben und sind als krebserzeugende Stoffe Kategorie 1 eingestuft.

TRK = 0,5 mg/m³

Cadmiumoxid (CdO) – wird als krebserzeugender Stoff Kategorie 2 eingestuft. Es wirkt als starkes Reizmittel und führt, ähnlich wie die nitrosen Gase, häufig nach geringen Erscheinungen und einem mehrstündigen (20 bis 30 Stunden) symptomlosen Stadium zu einer unter Umständen schweren Lungenwassersucht. Bei Aufnahme größerer Mengen von Cadmiumoxid können meist nach etwa zwei Jahren Veränderungen im Bereich der oberen Atemwege, eine Lungenüberblähung und rheumaähnliche Beschwerdezustände auftreten.

TRK = 0,03 mg/m³ für das Schweißen cadmiumhaltiger Legierungen, 0,015 mg/m³ bei allen anderen Verfahren.

Berylliumoxid (BeO) – ist als krebserzeugender Stoff Kategorie 2 eingestuft. Beryllium hat eine allgemeine starke Giftwirkung. Die Inhalation von berylliumhaltigen Rauchen und Stäuben verursacht starke Reizerscheinungen der oberen Luftwege und ein akutes Metallrauchfieber. In schweren Fällen können chronische entzündliche Erscheinungen des Atemtraktes (chronische Pneumonie) auftreten.

TRK = 0,002 mg/m³

Cobaltoxid (CoO) – ist als krebserzeugender Stoff Kategorie 3 eingestuft. Schädigungen der Atemorgane sind bei höheren Expositionen nicht auszuschließen.

TRK = 0,1 mg/m³

2.2.4 Thoriumoxid (ThO₂)

Thoriumdioxid (ThO₂) – ist ein radioaktiver Stoff. Die Inhalation von Rauchen und Stäuben, die Thoriumoxid beinhalten, führt zu einer inneren Strahlenbelastung. Schäden können durch die Ablagerung des Thoriums in den Knochen, Bestrahlung der Bronchien und der Lunge auftreten. Für nicht beruflich strahlenexponierte Personen bei "Arbeiten" (also beim WIG-Schweißen) gilt der Grenzwert für die effektive Dosis²³ in Höhe von 6 mSv pro Jahr.

Eine tabellarische Zusammenfassung der Wirkung der wichtigsten partikelförmigen Schadstoffe auf den menschlichen Körper erfolgt in Bild 2-2.

²³ In der letzten Fassung dieser BGI stand hier der Grenzwert der Jahresaktivitätszufuhr (GJAZ) – diesen gibt es mit In-Kraft-Treten der neuen StrlSchV vom 1. August 2001 nicht mehr (s. BG-Information "Umgang mit thoriumoxidhaltigen Wolframelektroden beim Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)" [BGI 746].

Bild 2-2: Wirkung spezifischer partikelförmiger Schadstoffe in der Schweißtechnik

Schadstoff	Wirkung
2.1 Lungenbelastend	
Aluminiumoxid	Staubablagerungen in der Lunge, Aluminose
Eisenoxide	Staubablagerungen in der Lunge, Siderose
Kaliumoxid	Staubablagerungen in der Lunge
Natriumoxid	
Titandioxid	
2.2 Toxisch	
Barium-Verbindungen, lösliche	toxisch – Übelkeit eventuell Kaliummangel
Bleioxid	toxisch – Übelkeit Magen- und Darmstörungen Nerven- und Nierenschäden
Fluoride	toxisch – Schleimhautreizung Knochenschäden
Kupferoxid	toxisch – Metallrauchfieber (Kupferrauchfieber)
Manganoxide	toxisch – Schleimhautreizung Nervenschäden
Vanadiumpentoxid	toxisch – Reizung der Augen und der Atmungsorgane Lungenschäden
Zinkoxid	toxisch – Metallrauchfieber (Zinkrauchfieber)
2.3 Krebserzeugend	
Berylliumoxid	krebserzeugend – Metallrauchfieber chronische Pneumonie
Cadmiumoxid	krebserzeugend – Schleimhautreizung Lungenüberblähung
Chrom(VI)-Verbindungen	krebserzeugend (Atmungsorgane) – Schleimhautreizung
Cobaltoxid	krebserzeugend – Schädigung der Atmungsorgane
Nickeloxide	krebserzeugend (Atmungsorgane)
2.4 Radioaktiv	
Thoriumdioxid	radioaktiv – Bestrahlung der Bronchien und der Lunge kann krebserzeugende Wirkung haben

3 Zuordnung der Schadstoffe zu den Verfahren und Werkstoffen der Schweißtechnik

Untersuchungen, wie sie im Abschnitt 1.6 erläutert worden sind, haben zu folgenden wichtigen Erkenntnissen geführt:

- Die chemische Zusammensetzung der gas- und partikelförmigen Schadstoffe ist verfahrens- und werkstoffabhängig.
- Die Schadstoffe treten nie als einzelne Komponenten, sondern immer als Gemisch mehrerer Komponenten auf.
- Eine, zwei oder sogar drei Schadstoffkomponenten (Gase und Partikel) können – verfahrens- und werkstoffabhängig – hinsichtlich Konzentration und Wirkungsstärke dominieren (d.h., die entsprechenden Grenzwerte werden als erste überschritten).

Der jeweils dominierende Schadstoff wird als **Leitkomponente** (für eine bestimmte Verfahrens-/Werkstoff-Kombination) bezeichnet (siehe auch Abschnitt 7 dieser BG-Information). **Hauptkomponente** im Schweißrauch ist eine Komponente mit arbeitsmedizinischer Bedeutung, deren Anteil im Schweißrauch nicht dominant ist, d.h. diese Komponente ist keine Leitkomponente im Schweißrauch. Hauptkomponenten sind nicht mit Leitkomponenten gleichzustellen.

In den weiteren Ausführungen werden die Verfahren in vier Hauptgruppen eingeteilt:

- Schweißen,
- thermisches Schneiden,
- thermisches Spritzen und
- Löten.

3.1 Schweißen

Beim Schweißen bilden sich immer gas- und partikelförmige Schadstoffe. Die partikelförmigen Stoffe haben hier eine Partikelgröße (aerodynamischer Durchmesser) kleiner als 1 µm, sind alveolengängig und werden in der Praxis als "Schweißrauche" bezeichnet. Aus arbeitsmedizinischer Sicht ist die alveolengängige Fraktion (A-Fraktion) von besonderer Bedeutung. Diese Fraktion, die in der Vergangenheit als Feinstaub bezeichnet wurde, wird bei den personenbezogenen Messungen beim Schweißen vorwiegend mit dem Probenahmekopf für die einatembare Fraktion (früher Gesamtstaub) gemessen. Dies liegt in der – zurzeit noch bestehenden – Schwierigkeit, den Probenahmekopf für die A-Fraktion hinter dem Schweißerschutzschirm zu positionieren (Platzmangel).

Da beim Schweißen ohnehin nur sehr feine Partikel entstehen, die alle zur "alveolengängigen Fraktion" gehören, liegen die Messergebnisse von "E-Staub" anstelle von "A-Staub" immer auf der sicheren Seite. Die Menge der entstehenden Schadstoffe bei den verschiedenen Schweißverfahren ist unterschiedlich.

Die Rauchemission (mg/s) beim Schweißen ist meist kleiner als die Rauch- und Staubemission beim Schneiden oder Spritzen.

Untersuchungen zur Schadstoffemission beim Schweißen haben gezeigt, dass etwa 95 % des Schweißrauches aus den Schweißzusätzen stammen und nur weniger als 5 % aus dem Grundwerkstoff.

3.1.1 Gasschweißen

Beim Gasschweißen von un- und niedriglegiertem Stahl entstehen vor allem nitrose Gase (Stickstoffoxide). Stickstoffdioxid ist hier die Leitkomponente wie bei anderen Autogenverfahren, z.B. Flammwärmen und Flammrichten, wo eine noch stärkere Bildung von Stickstoffoxiden nachgewiesen ist.

Die Stickstoffdioxid-Konzentration in der Luft am Arbeitsplatz steigt mit der Flammenlänge und daher mit der Brennergröße und mit dem Abstand Düse – Blech.

Kritisch wird die Stickstoffdioxid-Konzentration beim Arbeiten in engen Räumen ohne entsprechende Lüftungstechnische Maßnahmen. Sie kann bei frei brennender Flamme im Vergleich zu einer Flamme von 15 mm Länge den 10fachen Wert erreichen.

Ergebnisse von Emissionsmessungen beim Gasschweißen und Wärmen ergaben für nitrose Gase in etwa folgende Werte:

Verfahren	NO _x Emissionen (mg/s)
Gasschweißen	0,8 – 40
Wärmen	bis 75

Probleme hinsichtlich der entstehenden partikelförmigen Stoffe können nur bei der Bearbeitung von Nichteisenmetallen (z.B. Blei, Kupfer) oder von daraus bestehenden Überzügen auftreten.

3.1.2 Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Stabelektroden

Unlegierter, niedriglegierter Stahl

(Legierungselemente < 5 %)

Bei diesen Verfahren treten im Vergleich zum Gasschweißen hohe Mengen an partikelförmigen Stoffen auf. Eine Gefährdung durch nitrose Gase ist hier nicht zu erwarten.

Beim Lichtbogenhandschweißen mit unlegierten oder niedriglegierten Stabelektroden ist der Schweißrauch (insgesamt) zu berücksichtigen.

Die chemische Zusammensetzung des Schweißrauches spiegelt die chemische Zusammensetzung des Kerndrahtes und der Umhüllung wider. Die Hauptbestandteile der Schweißrauche sind in diesem Fall: Eisenoxid (Fe₂O₃), Siliziumdioxid (SiO₂), Kaliumoxid (K₂O), Manganoxid (MnO), Natriumoxid (Na₂O), Titandioxid (TiO₂), Aluminiumoxid (Al₂O₃).

Diese Komponenten treten in unterschiedlichen Anteilen auf, abhängig von der Umhüllungsart (sauer-, rutil-, basisch-, zelluloseumhüllt). Die Rauche der basisch-umhüllten Stabelektroden beinhalten zusätzlich Calciumoxid (CaO) und Fluoride (F). Hier sind Fluoride als weitere Leitkomponente zu berücksichtigen (Bild 3-1).

Bild 3-1: Analyse der beim Lichtbogenhandschweißen mit unlegierten/niedriglegierten Stabelektroden (nach DIN 1913) entstehenden Schweißrauche

Schadstoffe	Umhüllungstyp			
	sauer %	rutil %	basisch %	zellulose %
Na ₂ O	2 – 4	2 – 4	2 – 4	2 – 4
Al ₂ O ₃	1 – 2	1 – 2	1 – 2	1 – 2
SiO ₂	30 – 40	30 – 40	≈ 10	≈ 10
K ₂ O	10 – 20	10 – 20	20 – 30	–
CaO	1 – 2	1 – 2	15 – 20	–
TiO ₂	< 1	≈ 5	≈ 1	≈ 1,5
MnO	≈ 10	≈ 7	≈ 6	≈ 5
Fe ₂ O ₃	≈ 40	20 – 30	20 – 30	70 – 80
F [–]	–	–	12 – 16	–

Rauche sauerumhüllter Stabelektroden enthalten bis zu 10 % **Manganoxid**. Somit kann hier Manganoxid eine zusätzliche Hauptkomponente im Schweißrauch werden.

Aus zahlreichen Messungen ergaben sich beim Lichtbogenhandschweißen mit unlegierten/niedriglegierten Elektroden in etwa folgende Emissionswerte für Schweißrauch:

Verfahren	Schweißrauch Emissionsraten (mg/s)
Lichtbogen- handschweißen	4 – 18

Bei Sonderelektroden mit Kupferbestandteilen kann der Kupferoxid (CuO) eine zusätzliche Leitkomponente sein.

Chrom-Nickel-Stahl

(≤ 20 % Cr und ≤ 30 % Ni)

Die hochlegierten umhüllten Stabelektroden enthalten neben Eisen und Umhüllungsstoffen (wie oben) Chrom bis zu 20 % und Nickel bis zu 30 % im Kerndraht.

Beim Lichtbogenhandschweißen mit hochlegierten Stabelektroden entsteht Schweißrauch, dessen chemische Zusammensetzung bis zu 16 % Chromverbindungen enthalten kann. Diese Chromverbindungen liegen bis zu 90 % als Chrom(VI)-Verbindungen (hier Chromate) vor, die größtenteils als krebserzeugend eingestuft sind. Das Nickeloxid ist hier mit 1 % bis selten 3 % deutlich unterrepräsentiert.

Bei diesem Verfahren mit den vorgenannten Werkstoffen ist die Leitkomponente im Schweißrauch "Chromate". Rauche basischumhüllter Stabelektroden enthalten deutlich höhere Chrom(VI)-Anteile als die rutilumhüllten.

Untersuchungen im biologischen Material und epidemiologische Studien deuten darauf hin, dass die stärkste Gesundheitsgefährdung für den Schweißer beim Lichtbogenhandschweißen mit hochlegierten Stabelektroden liegt. Hier müssen am Arbeitsplatz gezielte Schutzmaßnahmen, z.B. durch Absaugung der Schweißrauche an der Entstehungsstelle, vorgesehen werden. Darüber hinaus sind arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen durchzuführen.

Emissionsmessungen ergaben beim Lichtbogenhandschweißen mit hochlegierten Stabelektroden etwa folgende Emissionswerte für Schweißrauch:

Verfahren	Schweißrauch Emissionsraten (mg/s)
Verbindungsschweißen	2 – 16
Auftragschweißen	3 – 22

Nickel, Nickellegierungen (> 30 % Ni)

Beim Lichtbogenhandschweißen mit Reinnickel oder Nickelbasiswerkstoffen ist Nickeloxid die Leitkomponente, obwohl im Schweißrauch maximal 5 % Nickeloxid vorhanden sind. Nickeloxide sind als krebserzeugende Stoffe Kategorie 1 eingestuft. Deshalb müssen am Arbeitsplatz gezielte Schutzmaßnahmen vorgesehen werden.

Neben Nickeloxid im Schweißrauch entsteht – abhängig von der Legierungsart (mit Kupferanteilen) – evtl. Kupferoxid als weitere Hauptkomponente. Bei Elektroden zum Auftragschweißen, deren chemische Zusammensetzung Cobalt beinhaltet, muss das Cobaltoxid (CoO) beachtet werden.

Emissionsmessungen ergaben beim Lichtbogenhandschweißen mit Reinnickel oder Nickelbasiswerkstoffen etwa folgende Schweißrauchemissionen:

Verfahren	Schweißrauch Emissionsraten (mg/s)
Lichtbogen- handschweißen	etwa 7

3.1.3 Schutzgasschweißen

Bei den Verfahren mit Aktivgas (MAGC, MAGM) ist in erster Linie mit einer starken Entwicklung von partikelförmigen Schadstoffen (Schweißrauchen) zu rechnen. Die Menge dieser Schadstoffe hat dieselbe Größenordnung wie beim Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Stabelektroden.

Im Gegensatz dazu ist bei den Verfahren mit Inertgas (MIG, WIG) eine zum Teil deutlich niedrigere Rauchentwicklung festzustellen.

Abhängig von den eingesetzten Schweißzusatzwerkstoffen und Schutzgasen entstehen Gase und Schweißrauche, aus denen die Leitkomponenten ausgewählt werden. Bild 3-2a gibt einige Beispiele.

Bild 3-2a: Zuordnung der Leitkomponenten

Verfahren	Schweißzusatzwerkstoff	Schweißrauch/ Leitkomponente(n)
Gasschweißen	unlegierter, niedriglegierter Stahl (Legierungsbestandteile < 5 %)	Stickstoffoxid
Lichtbogenhandschweißen	unlegierter, niedriglegierter Stahl (Legierungsbestandteile < 5 %)	Schweißrauch ²⁴
	Chrom-Nickel-Stahl (≤ 20 % Cr und ≤ 30 % Ni)	Chrom(VI)-Verbindungen
	Nickel, Nickellegierungen (> 30 % Ni)	Nickeloxid oder Kupferoxid ²⁵
Metall-Aktivgasschweißen mit Kohlendioxid (MAGC)	unlegierter, niedriglegierter Stahl (Legierungsbestandteile < 5 %)	Schweißrauch ²⁴ Kohlenmonoxid
Metall-Aktivgasschweißen mit Mischgas (MAGM)	unlegierter, niedriglegierter Stahl (Legierungsbestandteile < 5 %)	Schweißrauch ²⁴
	Chrom-Nickel-Stahl Massivdraht (≤ 20 % Cr und ≤ 30 % Ni)	Nickeloxid
	Chrom-Nickel-Stahl Fülldraht (≤ 20 % Cr und ≤ 30 % Ni)	Chrom(VI)-Verbindungen
Metall-Inertgasschweißen (MIG)	Nickel, Nickellegierungen (> 30 % Ni)	Nickeloxid oder Kupferoxid ²⁵ ; Ozon
	Rein-Aluminium, Aluminium-Silicium-Legierungen	Ozon Schweißrauch ²⁴
	andere Aluminium-Legierungen ²⁶	Schweißrauch Ozon
Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)	unlegierter, niedriglegierter Stahl (Legierungsbestandteile < 5 %)	Schweißrauch ²⁴ Ozon
	Chrom-Nickel-Stahl (≤ 20 % Cr und ≤ 30 % Ni)	Schweißrauch ²⁴ Ozon
	Nickel, Nickellegierungen (> 30 % Ni)	Ozon Schweißrauch ²⁴
	Rein-Aluminium, Aluminium-Silicium-Legierungen	Ozon Schweißrauch ²⁴
	andere Aluminium-Legierungen ²⁶	Schweißrauch ²⁴ Ozon

²⁴ Bis zur Festlegung eines eigenständigen Grenzwertes für Schweißrauche sollte der Grenzwert für die A-Fraktion des Staubes (3 bzw. 6 mg/m³) herangezogen werden.

²⁵ Je nach Legierungsart, mit/ohne Kupfer, Grenzwert für Kupfer-Rauch.

²⁶ Aluminium-Werkstoffe (Reinaluminium, Aluminium-Legierungen) Grenzwert für Aluminiumoxidrauch.

3.1.3.1 Metall-Schutzgasschweißen (MAG/MIG)

- Einfluss des verwendeten Schutzgases auf die Rauchentwicklung

Metall-Aktivgasschweißen mit Kohlendioxid (MAGC)

Beim Metall-Aktivgasschweißen mit Kohlendioxid (MAGC) von un- und niedriglegiertem Stahl ist neben Schweißrauch Kohlenmonoxid eine Leitkomponente. Durch die thermische Zersetzung des Kohlendioxides, das als Schutzgas verwendet wird, entsteht Kohlenmonoxid. Der Schweißrauch besteht hier vorwiegend aus Eisenoxiden.

Emissionsmessungen ergaben beim MAGC-Schweißen von unlegiertem/niedriglegiertem Stahl in etwa folgende Emissionswerte für Schweißrauch und Kohlenmonoxid:

Schadstoff	Emissionsraten (mg/s)
Schweißrauch	2 – 12
Kohlenmonoxid (CO)	2 – 12,5

Metall-Aktivgasschweißen mit Mischgas (MAGM)

Beim Metall-Aktivgasschweißen mit Mischgas (MAGM) von un- und niedriglegiertem Stahl wird als Schutzgas ein Mischgas verwendet. Wenn das Mischgas Kohlendioxid enthält, ist eine gewisse CO-Bildung zu erwarten. Der Schweißrauch besteht hier aus Eisenoxiden.

Beim MAGM-Schweißen von Chrom-Nickel-Stahl ist das Nickeloxid als mögliche Leitkomponente zu berücksichtigen. Der Schweißrauch enthält zwar bis zu 17 % Chrom-Verbindungen und bis zu 5 % Nickeloxid, aber die Chrom-Verbindungen bestehen hier fast ausschließlich aus der dreiwertigen Form, die als nicht krebserzeugend gilt.

Metall-Inertgasschweißen (MIG)

Beim Metall-Inertgasschweißen (MIG) von Aluminium-Werkstoffen muss zusätzlich zum Schweißrauch (in der Form von Aluminiumoxid) die Ozon-Bildung (durch die UV-Strahlung und die stark reflektierenden Werkstoffe) berücksichtigt werden. Die Rauchentwicklung ist dagegen in den meisten Fällen kleiner als beim MAG-Schweißen.

Bei Aluminium-Silicium-Legierungen sind die Ozon-Konzentrationen höher als bei Reinaluminium und wesentlich höher als bei Aluminium-Magnesium-Werkstoffen.

Beim MIG-Schweißen von Nickel und Nickelbasislegierungen ist das Nickeloxid die entscheidende Leitkomponente im Schweißrauch.

Aufgrund der hohen Nickel-Anteile in den Schweißzusätzen kann der Nickeloxidgehalt im Schweißrauch Werte zwischen 30 bis 87 % annehmen.

Emissionsmessungen beim MIG-Schweißen von Nickel und Nickelbasislegierungen ergaben in etwa folgende Emissionswerte für Schweißrauch und Nickeloxid:

Schadstoff	Emissionsraten (mg/s)
Schweißrauch	2 – 6
Kohlenmonoxid (CO)	bis 5

Generell sind bei Nickelbasislegierungen, die auch Kupfer enthalten (z.B. Nicorros), höhere Schweißrauch-Emissionsraten zu erwarten als bei Nickelbasislegierungen mit anderen Legierungselementen, wie z.B. Cr, Co, Mo. Hier ist Kupferoxid anstelle von Nickeloxid die Leitkomponente.

Es sind Schutzmaßnahmen wie bei allen anderen krebserzeugenden Stoffen vorzusehen. Kontrollen der Ozonkonzentration können hier ebenfalls erforderlich sein.

- Einfluss der Elektrodenart auf die Rauchentwicklung

Beim MAG/MIG-Schweißen mit Fülldrahtelektroden entwickeln sich größere Schweißrauchmengen als mit Massivdrahtelektroden.

Die Verwendung von selbstschützenden Fülldrahtelektroden führt zu erheblich höheren Schweißrauchemissionen als die von Fülldrahtelektroden unter Schutzgas.

Beispielsweise ergaben sich für das Metall-Aktivgasschweißen von un- und niedriglegiertem Stahl folgende Emissionswerte:

Schweißzusatz	Schweißrauch Emissionsraten (mg/s)
Massivdraht	2 – 12
Fülldraht unter Schutzgas	6 – 54
selbstschützender Fülldraht	bis zu 97

Prinzipiell enthält die Pulverfüllung der Fülldrähte ähnliche Komponenten wie die Umhüllung entsprechender Stabelektroden.

Abhängig von der Art des Schweißzusatzes können folgende Leitkomponenten im Schweißrauch auftreten:

Schweißzusatz	Leitkomponente
a) un-/niedriglegierter basischer Fülldraht (unter Schutzgas)	Manganoxid
b) hochlegierter Fülldraht	Chrom(VI)-Verbindungen
c) un-/niedriglegierter selbstschützender Fülldraht	Manganoxid oder Barium-Verbindungen (je nach Fülldraht)

3.1.3.2 MAG-Hochleistungsschweißen (MAG-HL)

Bei diesem Verfahren liegt die Drahtvorschubgeschwindigkeit über 15 m/min. Gleichzeitig liegt die Abschmelzleistung über 8 kg/h.

Je höher die Abschmelzleistung oder die Drahtvorschubgeschwindigkeit ist, desto höhere Schadstoffemissionen entstehen.

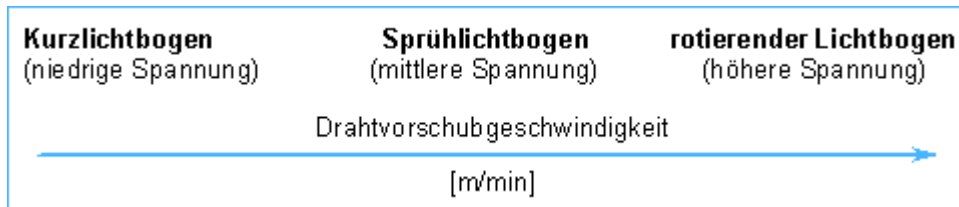
Je höher die eingebrachte Wärme (Energie) im Prozess ist, desto höher sind die Schadstoffemissionen. Da beim MAG-HL-Schweißen mit Massivdraht niedrigere Energien als beim MAG-HL-Schweißen mit Band eingebracht werden, liegen auch hier die Schadstoffemissionsraten bei den letztgenannten Verfahren höher (siehe unten stehende Grafik).

Mit steigender Spannung sowie mit steigender Drahtvorschubgeschwindigkeit steigen die Schadstoffemissionsraten.

Somit sind die höchsten Emissionsraten bei den rotierenden Lichtbögen zu erwarten, die kleinsten dagegen beim Kurzlichtbogen.

Die Leitkomponenten sind auch hier, von den eingesetzten Werkstoffen abhängig, die gleichen wie beim MAG-Schweißen.

Bezüglich der Lichtbogenart:



3.1.3.3 Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)

Beim Wolfram-Inertgasschweißen (WIG-Schweißen) wird durch die niedrigere Rauchentwicklung die Ozon-Bildung unterstützt. Besonders hoch (trotzdem niedriger als beim MIG) sind die Ozon-Werte bei Reinaluminium- und – mehr noch – bei Aluminium-Silicium-Legierungen. Nickeloxid kann die Leitkomponente darstellen bei der Verwendung von Reinnickel und Nickellegierungen.

Bei Anwendung thoriumoxidhaltiger Wolframelektroden beim WIG-Schweißen, insbesondere bei Aluminium-Werkstoffen, ist mit einer Strahlenbelastung durch die Inhalation von Rauchen, die Thoriumoxid beinhalten, zu rechnen. Hier sind die Grenzwerte für beruflich nicht strahlenexponierte Personen in der Regel überschritten. Deshalb müssen am Arbeitsplatz gezielte Schutzmaßnahmen vorgesehen werden (z.B. Verwendung thoriumoxidfreier Wolframelektroden).

3.1.4 Widerstandsschweißen

Beim Widerstandsschweißen mit unterschiedlichen Werkstoffen entstehen Schweißrauchkonzentrationen (Metalloxide aus dem Verspritzen oder Verdampfen des Werkstoffes), die unter praxisüblichen Bedingungen und bei normaler Lüftungssituation unter den MAK- oder TRK-Werten für die jeweiligen Schadstoffe liegen (Bild 3-2b).

Das Schweißen verölter oder gefetteter Bleche ist in der Praxis – wenn möglich – zu vermeiden. Stärkere Öl- oder Fettschichten führen zu höheren Rauchkonzentrationen mit Anteilen organischer Stoffe.

Beim spritzerfreien Schweißen entstehen bei gefetteten Blechen etwa 30 % mehr Rauche als bei ungefetteten Blechen.

Beim Abbrennstumpfschweißen entstehen im Vergleich zu anderen Widerstandsschweißverfahren (z.B. Punktschweißen) größere Rauchmengen, die im Regelfall eine Absaugung an der Maschine erfordern.

Bild 3-2b: Zuordnung der Leitkomponenten

Verfahren	Grundwerkstoff	Schweißrauch/ Leitkomponente(n)
Laserstrahlschweißen ²⁷	unlegierter, niedriglegierter Stahl (Legierungsbestandteile < 5 %)	Schweißrauch ²⁸
	Chrom-Nickel-Stahl (≤ 20 % Cr und ≤ 30 % Ni)	Nickeloxid
	verzinkter Stahl	Zinkoxid
Verfahren	Schweißzusatzwerkstoff	Leitkomponente(n)
Laserstrahlauftragschweißen	Cobaltbasis-Legierungen (> 60 % Co, > 20 % Cr)	Cobaltoxid
	Nickelbasis-Legierungen (> 60 % Ni)	Nickeloxid
	Eisenbasis-Legierungen (< 40 % Cr, > 60 % Fe)	Schweißrauch ²⁹
	Aluminiummehrst.-Bronzen (≈ 75 % Cu)	Kupferoxid ³⁰

3.1.5 Laserstrahlschweißen mit CO₂-Laser

Die Anwendung von Lasern in der Schweißtechnik ist ein relativ neues und komplexes Verfahren. Besondere Beratungen, insbesondere zur Lüftungs- und Filtertechnik, bietet das Laser Zentrum Hannover (LZH) Hollerithallee 8, 30419 Hannover.

3.1.5.1 Laserstrahlschweißen ohne Zusatzwerkstoff

Durch die hohe Energie der Laserquelle finden Verdampfungen aus dem Grundwerkstoff (Schmelze) statt.

Diese führen zu Schadstoffemissionen (Schweißrauche), deren chemische Zusammensetzung etwa der Zusammensetzung des Grundwerkstoffes entspricht.

Die Schadstoffmengen beim Laserschweißen ohne Zusatzwerkstoff sind in der Größenordnung vergleichbar mit denen beim Metall-Aktivgasschweißen. So betragen z.B. beim Laserschweißen von Chrom-Nickel-Stahl die Schadstoffemissionen für Gesamtstaub 1,2 bis 2 mg/s.

Emissionsmessungen beim Laserstrahlschweißen von unterschiedlichen metallischen Werkstoffen ergaben bei einheitlichen Schweißparametern (Materialdicke = 1 mm, Laserleistung = 2900 W, Brennweite = 200 mm, Vorschub = 50 mm/s, Bearbeitungsgas = Ar) folgende Emissionen:

²⁷ Hier ohne Schweißzusatzwerkstoff

²⁸ Bis zur Festlegung eines eigenständigen Grenzwertes für Schweißrauche sollte der Grenzwert für die A-Fraktion des Staubes (3 bzw. 6 mg/m³) herangezogen werden.

²⁹ Bis zur Festlegung eines eigenständigen Grenzwertes für Schweißrauche sollte der Grenzwert für die A-Fraktion des Staubes (3 bzw. 6 mg/m³) herangezogen werden.

³⁰ Grenzwert für Kupfer-Rauch.

Werkstoff	partikelförmige Schadstoffemission (mg/s) (oberhalb der Bearbeitungsseite)
unlegierter Stahl	1,5
X 5 CrNi 18 9	1,2
verzinkter Stahl	7
Titan	0,9

Die höchsten Schadstoffemissionen werden beim verzinkten Stahl beobachtet, wobei die Schweißrauchbildung im Wesentlichen durch die Zinkbeschichtung verursacht wird.

Werkstoff	gasförmige Schadstoffemissionen (µg/s)		
	NO_x	CO	O₃
unlegierter Stahl	200	56	53
X 5 CrNi 18 9	350	28	19
verzinkter Stahl	800	56	< n.G

Die Ergebnisse zeigen niedrigere Emissionsraten für gasförmige Schadstoffe.

3.1.5.2 Laserstrahlaufragschweißen

Beim Laserstrahlaufragschweißen kann der Zusatzwerkstoff in Draht- oder Pulverform zugeführt werden. Es entstehen überwiegend partikelförmige Schadstoffe (Rauche). Wird der Zusatzwerkstoff in Pulverform zugeführt, entstehen neben Rauchen zum Teil partikelförmige einatembare, jedoch nicht alveolengängige Stoffe. Insgesamt liegen beim Laserstrahlaufragschweißen die Emissionen von partikelförmigen Stoffen unter 5 mg/s. Die gasförmigen Schadstoffe stellen hier kein Problem dar. Die chemische Zusammensetzung des Schweißrauches entspricht in etwa der chemischen Zusammensetzung des Zusatzwerkstoffes, wobei Elemente mit niedriger Siedetemperatur in den Rauchen überrepräsentiert sind.

Neben der Leitkomponente (sie entspricht dem Basislegierungselement) können zusätzlich Oxide der anderen Legierungselemente (die mehr als 10 % haben) nach unterschiedlichen Bearbeitungszeiten kritische Werte annehmen. Diese sind Hauptkomponenten.

Beim Laserauftragschweißen mit Cobaltbasis-Legierungen bilden sich Schweißrauche und -stäube, für die als Leitkomponenten Cobaltoxid infrage kommt.

Bei Nickelbasis-Legierungen, die zugleich über 10 % Cobalt enthalten, kann – abhängig vom jeweiligen Anteil im Schweißrauch – Nickeloxid **oder** Cobaltoxid als Leitkomponente im Schweißrauch gelten. Der Schweißrauch enthält zusätzlich auch Aluminiumoxid.

Beim Laserstrahlaufragschweißen von hoch chromhaltigen Eisenbasis-Legierungen ist Schweißrauch (Eisenoxid) zu berücksichtigen.

Das im Schweißrauch auftretende Gesamtchrom liegt vorwiegend in der metallischen Form oder dreiwertigen Oxidform vor.

Die gemessenen Chrom(VI)-Verbindungen sind sehr gering (≤ 5 % des Gesamtchroms).

Bei Aluminiummehrstoffbronze ist aufgrund des hohen Anteiles an Kupfer (etwa 75 % Cu) Kupferoxid als Leitkomponente zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist Aluminiumoxid eine Hauptkomponente.

3.1.6 Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Laser

Die Schadstoffemissionen (Emissionsraten [mg/s]) liegen bei optimierten (Schweiß-) Parametern insgesamt niedriger bei der Anwendung von Festkörperlasern (Nd:YAG-Laser) als bei der Anwendung von CO₂-Lasern, wobei die zurzeit erreichbaren Schweißgeschwindigkeiten beim Nd:YAG-Laser niedriger sind als beim CO₂-Laser.

Für die Menge der partikelförmigen Stoffe ist die absorbierte Intensität (Leistungsdichte) in der Wechselwirkungszone maßgebend.

Mit steigender Intensität steigt die Schmelztemperatur und somit die Verdampfungsrate.

Emissionsmessungen beim Schweißen von Chrom-Nickel-Stahl und verzinktem Stahl in Abhängigkeit von der absorbierten Strahlintensität ergaben folgende Schweißrauchemissionen:

Werkstoff	Schweißrauch Emissionsraten (mg/s)
Chrom-Nickel-Stahl (s = 3 mm, v _s = 600 mm/min)	≈ 1,5
verzinkter Stahl (s = 1 mm, v _s = 400 mm/min)	≈ 2,7

Die Strahlintensität liegt zwischen $3,18 \times 10^5$ und $6,67 \times 10^5$ W/cm²

3.1.7 Hybridschweißen

Hybridschweißen (= zwei Einzelverfahren kombiniert) gewinnt bei der schweißtechnischen Fertigung zunehmend an Bedeutung. Die bekanntesten sind dabei:

- Laserstrahl-MIG-,
- Laserstrahl-WIG-,
- Plasma-MIG-,
- Plasma-WIG-Schweißen und
- Laserstrahl-Plasmaschweißen.

Da bei diesen Verfahren, verglichen mit den einzelnen Verfahren, die Abschmelzleistungen und die Vorschubgeschwindigkeit viel höher sind, ist damit zu rechnen, dass auch die dabei entstehenden Schadstoffemissionen (mg/s) etwas höher – als beim einfachen MIG- oder WIG-Schweißen – liegen.

Bei allen Hybridschweißverfahren wird eine integrierte Absaugung im Entstehungsbereich der Schadstoffe dringend empfohlen.

Für die korrekte Dimensionierung der Lüftungsanlage sind Untersuchungen zur Bestimmung der verfahrens-/werkstoff-spezifischen Emissionsraten zweckmäßig.

Laserstrahl-Plasmaschweißen von Aluminiumwerkstoffen

Diese Verfahrenskombination erlaubt eine deutliche Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit und wird bei Aluminiumwerkstoffen sowohl mit CO₂ als auch mit Nd:YAG-Laser eingesetzt. Auch hier sind im Vergleich zum einfachen Laserstrahlschweißen höhere Schadstoff-Emissionsraten zu erwarten. Für die

Auswahl der Leitkomponenten sind auch die eingesetzten Werkstoffe maßgebend. Hier sind die Leitkomponenten Ozon und aluminiumoxidhaltiger Schweißrauch – die gleichzeitig auftreten – zu berücksichtigen. Eine wirksame Absaugung sollte unmittelbar im Entstehungsbereich der vorgenannten Schadstoffe eingesetzt werden.

3.2 Thermisches Schneiden

Zu dieser Verfahrensgruppe gehören Brennschneiden, Plasmaschmelzschnitten und Laserschneiden (Bild 3-2d). Die Zusammensetzung des Grundwerkstoffes ist maßgebend für die chemische Zusammensetzung der partikelförmigen Stoffe (Rauche), die im Übrigen hier einen größeren Partikeldurchmesser haben als die Schweißrauche, aber dennoch alveolengängig sind.

3.2.1 Autogenes Brennschneiden (unlegierter und niedriglegierter Stahl)

Bei diesem Verfahren entstehen hohe Rauch- und Staubemissionen, abhängig von verschiedenen Parametern:

- Blechdicke,
- Brenngas,
- Schneidgasdruck und
- Schneidgeschwindigkeit.

Zusätzlich zum Schweißrauch – der bei diesem Verfahren von Bedeutung ist – muss die Entstehung von nitrosen Gasen berücksichtigt werden, also muss Stickstoffdioxid als Leitkomponente neben Schweißrauch berücksichtigt werden.

Die Schweißrauchemission ist hier etwa mit 10 bis 50 mg/s anzusetzen.

3.2.2 Plasmaschmelzschnitten

Dieses Verfahren ist grundsätzlich begleitet von einer hohen Emission partikelförmiger Stoffe.

Die emittierten Schadstoffe sind in erster Linie abhängig vom geschnittenen Grundwerkstoff (d.h. seiner chemischen Zusammensetzung), von den gewählten Schneidparametern und von der Art der eingesetzten Plasmagase.

Eine Erhöhung der Schneidgeschwindigkeit (mm/min) führt zu einer Verringerung der Schadstoffemission (g/min).

Bei der Bearbeitung von un- und niedriglegiertem Stahl ist Schweißrauch (vorwiegend Eisenoxide) von Bedeutung. Dagegen entsteht beim Plasmaschmelzschnitten von Chrom-Nickel-Stahl Nickeloxid als Leitkomponente. Zusätzlich entstehen Chrom(VI)-Verbindungen als Hauptkomponente.

Nickel und Nickelbasislegierungen, die mit Hilfe des Plasmaschmelzschnitens bearbeitet werden, führen zu hohen Werten von Nickeloxid im Schweißrauch.

Bei Aluminium-Werkstoffen kann bei stark reflektierenden Grundwerkstoffen (z.B. Aluminium-Silicium-Legierungen) – neben dem Schweißrauch – Ozon eine Leitkomponente bilden.

Sind keine technischen Schutzmaßnahmen, wie Untertischabsaugung, getroffen, so ist davon auszugehen, dass an Arbeitsplätzen an der Maschine unabhängig von der chemischen Zusammensetzung der Werkstoffe der Grenzwert für die A-Fraktion des Staubes (3 bzw. 6 mg/m³) überschritten ist. Enthalten die Werkstoffe über 5 % Chrom und Nickel (hochlegierte Werkstoffe), gilt dies ebenso für die Grenzwerte für Chrom(VI)-Verbindungen und Nickeloxid, wobei Nickeloxid die Leitkomponente ist.

Beim Einsatz von Druckluft oder Stickstoff als Plasmagas ist auch das Stickstoffdioxid als weitere Leitkomponente zu berücksichtigen.

3.2.3 Laserstrahlschneiden

Aufgrund der Komplexität der Verfahren und Geräte wird die Entstehung der Schadstoffe beim Laserstrahlschneiden durch viele Einflussgrößen bestimmt.

Neben dem Werkstoff und den durch den Bearbeitungsprozess bedingten Parametern spielt die Laserquelle eine wichtige Rolle bei der Schadstoffentstehung und -zusammensetzung.

3.2.3.1 Laserstrahlschneiden mit CO₂-Laser

Die Parameter, die wesentlichen Einfluss auf die Menge der emittierten Schadstoffe haben, sind Werkstückdicke, Linsenbrennweite, Schneidgasdruck, Laserstrahlleistung und Schneidgeschwindigkeit.

Mit zunehmender Werkstückdicke und/oder mit zunehmender Linsenbrennweite und/oder mit zunehmendem Schneidgasdruck und/oder mit zunehmender Laserstrahlleistung nimmt die Staubemission (mg/m) zu.

Mit zunehmender Schneidgeschwindigkeit nimmt die Staubemission pro Zeiteinheit (mg/s) zu und pro Schnittlänge (mg/m) ab.

Insgesamt entstehen beim Laserstrahlschneiden relativ große Staubmengen, die dennoch geringer ausfallen als beim Brenn- und Plasmaschmelzschneiden.

Die höchsten Schadstoffemissionen treten beim Laserstrahlschneiden von Chrom-Nickel-Stahl auf.

Das Schneiden von verzinktem Stahl bewirkt höhere Emissionswerte als das Schneiden von unlegiertem Stahl.

Beim Schneiden mit einem CO₂-Laser (Leistung = 1 kW) ergaben sich für die gleiche Werkstoffdicke folgende Schweißrauchemissionen:

Werkstoff	Schweißrauch Emissionsrate (mg/s)
unlegierter Stahl	16 – 24
Chrom-Nickel Stahl	14 – 35

Bezogen auf die Schadstoffproblematik kann zwischen

- Laserstrahlhochdruckschneiden (mit Stickstoff) und
- Laserstrahlbrennschneiden (mit Sauerstoff)

differenziert werden.

Durch die Verwendung von Stickstoff als Schneidgas werden beim Chrom-Nickel-Stahl und bei verzinktem Stahl die Schadstoffemissionen gegenüber dem Schneiden mit Sauerstoff etwa um die Hälfte reduziert.

Schweißrauchemissionen beim Laserstrahlhochdruckschneiden und Laserstrahlbrennschneiden (Beispiel):

(Leistung = 1 kW, Linsenbrennweite = 63,5 mm, Werkstoffdicke = 1 mm)

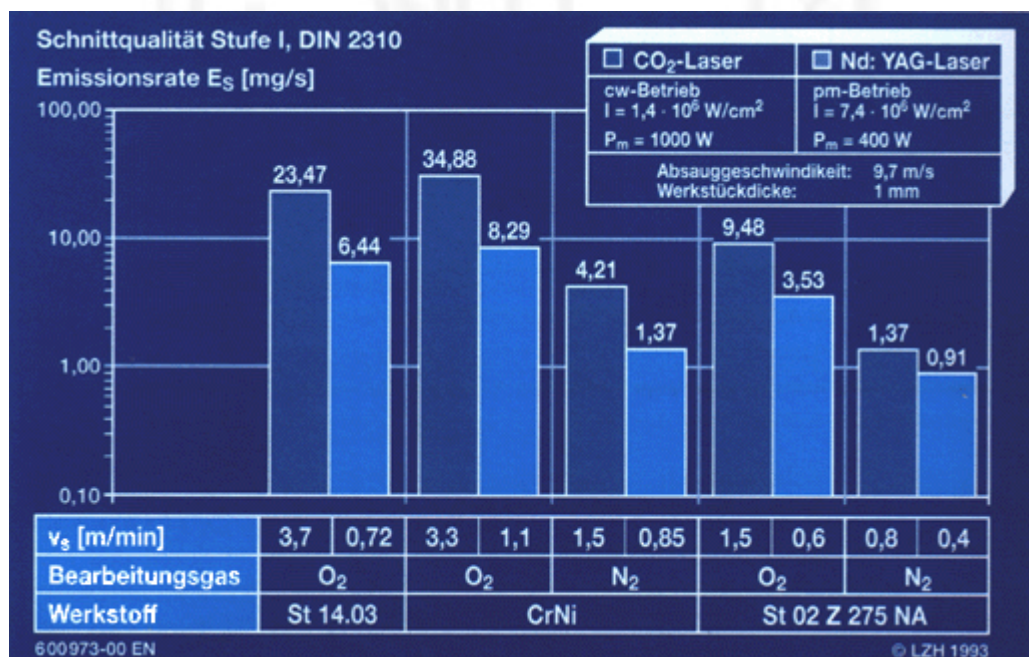
Werkstoff	Schweißrauch Emissionsraten (mg/s)	
	Laserstrahlhochdruckschneiden	Laserstrahlbrennschneiden
niedriglegierter Stahl	–	17
Chrom-Nickel-Stahl	8	20
verzinkter Stahl	4,5	9

Ohne eine entsprechende Absaugung werden beim Laserschneiden, unabhängig vom Grundwerkstoff, die jeweiligen MAK und TRK für die entsprechenden Leitkomponenten überschritten.

3.2.3.2 Laserstrahlschneiden mit Nd:YAG-Laser

Auch hier liegen (wie unter Abschnitt 3.1.6) die Schadstoffemissionen bei der Anwendung von Festkörperlaser (Nd:YAG-Laser) insgesamt niedriger als bei der Anwendung von CO₂-Lasern (Bild 3-2c), wobei die z.Z. erreichbaren Schneidgeschwindigkeiten beim Nd:YAG-Laser niedriger sind als beim CO₂-Laser.

Bild 3-2c: Vergleich der Emissionen beim Laserstrahlschneiden mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern (Quelle: Engel, Seite 92, Bild 44)



Beim Schneiden mit einem Nd:YAG-Laser ergaben sich für 1 mm Werkstoffdicke folgende Schweißrauchemissionen:

	Schweißrauch – Emissionsraten (mg/s)	
Werkstoff	Bearbeitungsgas	
	N₂	O₂
Chrom-Nickel-Stahl (I = 2,98 x 10 ⁶ W/cm ²)	(v _s = 850 mm/min) ≈ 2	(v _s = 400 mm/min) ≈ 2,7
Al Mg 3 (I = 1,89 x 10 ⁶ W/cm ²)	(v _s = 200 mm/min) ≈ 0,3	–

Mit zunehmender Werkstückdicke nimmt auch hier die Schweißrauchemission (mg/m) zu. Die Anwendung von Stickstoff als Bearbeitungsgas (Schneidgas) führt auch hier zu einer erheblichen Schweißrauchreduzierung (mg/s).

Die Parameter, die wesentlichen Einfluss auf die Menge der emittierten Schadstoffe haben, sind: absorbierte Intensität (Leistungsdichte), Schneidgasdruck, Schneidgeschwindigkeit, Bearbeitungswirkungsgrad, Werkstückdicke.

Die maximalen gasförmigen Schadstoffemissionen entstehen beim Schneiden von 1 mm Chrom-Nickel-Stahl mit einer Schneidgeschwindigkeit von 400 mm/min und Sauerstoff als Bearbeitungsgas, und zwar:

0,17 ppm/s Ozon, 0,00155 ppm/s Stickstoffmonoxid, 0,041 ppm/s Kohlenmonoxid.

Mit dem Einsatz anderer Nd:YAG-Laseranlagen mit höheren Ausgangsleistungen (z.B. 1000 W) werden die Emissionen (Emissionsraten [mg/s]) bei optimierten Parametern über denen des CO₂-Lasers liegen.

Die bei der Anwendung von Nd:YAG-Lasern entstehenden Mengen partikelförmiger Schadstoffe sind in der Größenordnung vergleichbar mit denen beim Metall-Inertgasschweißen (MIG). Lüftungstechnische Maßnahmen, insbesondere eine wirksame Absaugung, sind auch hier notwendig, um Überschreitungen der Grenzwerte für die jeweiligen Leitkomponenten zu vermeiden.

Bild 3-2d: Zuordnung der Leitkomponente

Verfahren	Grundwerkstoff	Schweißrauch/ Leitkomponente(n)
Brennschneiden	unlegierter, niedriglegierter Stahl (Legierungsbestandteile < 5 %)	Schweißrauch ³¹ Stickstoffdioxid
Plasmaschmelzschnitten ³² Laserstrahlschnitten	unlegierter, niedriglegierter Stahl (Legierungsbestandteile < 5 %)	Schweißrauch ³¹
	Chrom-Nickel-Stahl (≤ 20 % Cr und ≤ 30 % Ni)	Nickeloxid
	Nickel, Nickellegierungen (> 30 % Ni)	Nickeloxid
	Aluminium-Werkstoffe ³³	Schweißrauch ³¹ Ozon

³¹ Bis zur Festlegung eines eigenständigen Grenzwertes für Schweißrauche sollte der Grenzwert für die A-Fraktion des Staubes (3 bzw. 6 mg/m³) herangezogen werden.

³² Beim Einsatz von Druckluft oder Stickstoff als Plasmagas ist auch das Stickstoffdioxid als Leitkomponente zu berücksichtigen!

³³ Aluminium-Werkstoffe (Reinaluminium, Aluminium-Legierungen) Grenzwert für Aluminiumoxidrauch

3.3 Thermisches Spritzen

Beim thermischen Spritzen werden verfahrensabhängig hohe Mengen an partikelförmigen Schadstoffen gebildet (Bild 3-2e). So sind die Schadstoffemissionen beim Flammsspritzen deutlich niedriger als beim Lichtbogenspritzen.

Plasmaspritzen verursacht im Vergleich zum Flamm- und Lichtbogenspritzen die höchsten Schadstoffemissionen.

Die entstehenden Schadstoffe sind darüber hinaus werkstoffabhängig und bilden sich ausschließlich aus dem jeweils verwendeten Spritzzusatz.

Der Grundwerkstoff hat keinen Einfluss auf Menge und Zusammensetzung der entstehenden Schadstoffe.

Bei allen thermischen Spritzverfahren liegen die Schweißrauch- und Staubkonzentrationen im Atembereich über dem Allgemeinen Staubgrenzwert sowohl für die A- als auch für die E-Fraktion des Staubes, wenn keine oder eine nur unzureichende Schadstofferfassung und -abscheidung vorhanden ist. Insgesamt sollten die Spritzverfahren (besonders Plasmaspritzen) in geschlossenen Kabinen durchgeführt werden, um die Belastungen des Schweißers und weiterer Personen durch Rauche und Stäube sowie Lärm zu minimieren.

Bild 3-2e: Zuordnung der Leitkomponenten

Verfahren	Spritzzusatzwerkstoff	Schweißrauch/ Leitkomponente(n)
Flammspritzen	unlegierter, niedriglegierter Stahl (Legierungsbestandteile < 5 %)	A-, E-Staub ³⁴ Stickstoffdioxid
	Chrom-Nickel-Stahl (≤ 27 % Cr und ≤ 22 % Ni)	Nickeloxid Stickstoffdioxid
	Nickel und Nickellegierungen (> 60 % Ni)	Nickeloxid Stickstoffdioxid
	Aluminium-Werkstoffe ³⁵	A-, E-Staub ³⁴ Stickstoffdioxid
	Bleilegierungen	Bleioxid Stickstoffdioxid
	Kupfer und Kupferlegierungen	Kupferoxid ³⁶ Stickstoffdioxid
	andere Nichteisenmetalle und Legierungen	A-, E-Staub ³⁴ Stickstoffdioxid
Lichtbogenspritzen	unlegierter, niedriglegierter Stahl (Legierungsbestandteile < 5 %)	A-, E-Staub ³⁴
	Chrom-Nickel-Stahl (≤ 27 % Cr und ≤ 22 % Ni)	Nickeloxid
	Nickel und Nickellegierungen (> 60 % Ni)	Nickeloxid
	Aluminium-Werkstoffe ³⁵	A-, E-Staub ³⁴
	Kupfer und Kupferlegierungen	Kupferoxid ³⁶
	andere Nichteisenmetalle und Legierungen	A-, E-Staub ³⁴
Plasmaspritzen	Kupfer-Aluminium- und Kupfer-Zinn-Legierungen	Kupferoxid ³⁶
	Chrom-Nickel-Stahl (≤ 27 % Cr und ≤ 22 % Ni)	Nickeloxid Ozon
	Nickel und Nickellegierungen (> 60 % Ni)	Nickeloxid
	Cobaltbasislegierungen (> 50 % Co)	Cobaltoxid

³⁴ Grenzwert für A-Staub/Schweißrauch und E-Staub

³⁵ Aluminium-Werkstoffe (Reinaluminium, Aluminium-Legierungen) Grenzwert für Aluminiumoxidrauch

³⁶ Grenzwert für Kupfer-Rauch

3.3.1 Flammspritzen

Beim Flammspritzen mit Spritzzusätzen in Draht- oder Pulverform entstehen gas- und partikelförmige Stoffe. Die chemische Zusammensetzung der partikelförmigen Stoffe im Rauch/Staub entspricht der Zusammensetzung des Spritzzusatzes.

Wie bei anderen Autogenverfahren ist beim Flammspritzen die Bildung von nitrosen Gasen zu berücksichtigen.

Beim Flammspritzen mit hochlegiertem Spritzzusatz (z.B. Chrom < 27 %, Ni < 22 %) enthalten die hohen Staubemissionen auch hohe Werte für Nickeloxid.

Hier sind die Nickeloxid-Konzentrationen erheblich über der TRK für Nickeloxid.

Darüber hinaus können sich Chrom(VI)-Verbindungen bilden. Es wird angenommen, dass ein vielfältiges Gemisch verschiedener Chromoxide entsteht. Dieses Gemisch ist schwer löslich, enthält auch Chrom(VI)-Verbindungen und gilt als krebserzeugend.

Bei Nickel und Nickellegierungen ist Nickeloxid die Leitkomponente. Auch hier sind vielfach Überschreitungen der TRK für Nickeloxid zu erwarten.

Bei gleicher Auftragsrate entstehen bei Chrom-Nickel-Legierungen höhere Emissionen als bei Zink- oder Aluminiumlegierungen.

3.3.2 Lichtbogenspritzen

Beim Lichtbogenspritzen entstehen hohe Emissionen von partikelförmigen Stoffen.

Bei vergleichbaren Spritzparametern und etwa gleicher Auftragsrate liegt die Schadstoffemission beim Aluminiumdraht höher als bei Zink-, Chrom-Nickel- und Aluminiumbronzedrähten, wo die Schadstoffemissionen vergleichbar hoch sind. Beim Lichtbogenspritzen mit Chrom-Nickel oder mit Nickelbasis-Spritzzusätzen muss Nickeloxid als Leitkomponente beachtet werden. Hier sind Überschreitungen der TRK nachgewiesen worden.

Beim Lichtbogenspritzen sind die Partikeldurchmesser insgesamt kleiner als beim Flammspritzen, wodurch eine größere alveolengängige Fraktion entsteht.

3.3.3 Plasmaspritzen

Beim Plasmaspritzen entsteht durch die viel höhere Spritzgeschwindigkeit eine noch höhere Schadstoffemission als beim Flamm- oder Lichtbogenspritzen mit gleichen Spritzzusätzen.

Die meisten Plasmaspritzverfahren werden deshalb in geschlossenen Anlagen (gekapselte Anlagen) durchgeführt. Trotzdem bleibt für die wenigen handgeführten Plasmaspritzverfahren eine Gesundheitsgefährdung des Schweißers möglich, solange die hohen Schadstoffkonzentrationen nicht an der Entstehungsquelle abgesaugt und abgeführt werden.

Die Praxis zeigt, dass beim Plasmaspritzen mit höheren Anteilen kritischer Werkstoffe (Chrom, Nickel, Cobalt u.a.) ohne Anwendung einer wirksamen Absaugung die TRK und MAK erheblich überschritten werden können.

3.4 Löten

Die Schadstoffemission ist auch hier verfahrens- und werkstoffbedingt (Bild 3-4). Die Menge und die chemische Zusammensetzung der entstehenden Schadstoffe (Lötrauche) sind von den verwendeten Werkstoffen (Lote, Flussmittel, Bindemittel) und von den Verfahrensparametern (Löttemperatur [Bild 3-5], Löt- und Haltezeit) abhängig.



Bild 3-3: Löt Arbeitsplatz mit Absaugung

Bild 3-4: Schadstoffe beim Löten

Lote			Schadstoffe
Anwendungs- gebiet	Lotart	Flussmittel (Flussmittelbasis)	(Liste der möglicher- weise entstehenden Schadstoffe)
Weichlöten (Temp. < 450 °C)			
Schwermetalle	A) antimonhaltige, antimonarme und antimonfreie Blei-Zinn und Zinn-Blei - Weichlote B) Zinn-Blei -Weichlote mit Kupfer-, Silber- oder Phosphor-Zusatz C) Sonderweichlote mit z.T. erhöhten Anteilen an Cadmium und Silber	1) Zink- und andere Metallchloride, und/oder Ammoniumchlorid (in wässriger Lösung oder organischer Zubereitung) 2) organische Säuren, z.B. Zitronen-, Öl-, Stearin-, Benzoesäure 3) Amine, Diamine und Harnstoff 4) organische Halogenverbindungen 5) natürliche Harze (Kolophonium) oder modifizierte natürliche Harze mit und ohne Zusatz von organischen und/oder halogenhaltigen Aktivatoren	Bromwasserstoff Bleioxid Chlorwasserstoff Formaldehyd Hydrazin Kolophonium anorganische Zinn-Verbindungen organische Zinn-Verbindungen
Leichtmetalle	D) Weichlote auf der Basis von:	6) Chloride und Fluoride 7) Zink- und/oder Zinnchlorid	
	a) Zinn-Zink b) Zinn-Cadmium c) Zinn-Aluminium	8) rein organische Verbindungen, z.B. Amine 9) organische Halogenverbindungen	
Hartlöten (Temp. ≥ 450 °C)			
Schwermetalle	A) Kupferbasislote B) silberhaltige Lote mit weniger als 20 % Ag C) silberhaltige Lote mit mindestens 20 % Ag	1) Borverbindungen mit Zusätzen von einfachen und komplexen Fluoriden, Phosphaten sowie Silikaten 2) borfreie Flussmittel, überwiegend aus Chloriden und Fluoriden	Boroxid Bortrifluorid Cadmiumoxid Fluoride Kupferoxid
Leichtmetalle	D) Aluminiumbasislote E) Nickelbasislote	3) hygroskopische Chloride und Fluoride sowie nicht hygroskopische Fluoride	Phosphorpentoxid Silberoxid Zinkoxid

Bild 3-5: Schadstoffemission in Abhängigkeit von der Löttemperatur

Löttemperatur (°C)	Emission			
	Gesamtrauch (mg/g Flussmittel)	Kolophonium (mg/g Lot)	Aldehyd (mg/g Lot)	Zinn (µg/g Lot)
250	40	1	2×10^{-3}	8
450	102	4,2	$12,5 \times 10^{-3}$	30

Grundsätzlich kann man das Löten einteilen in Weichlöten und Hartlöten.

3.4.1 Weichlöten ($T < 450\text{ °C}$)

Hier besteht vor allem eine deutliche Abhängigkeit der Schadstoffentstehung von der Löttemperatur.

Als Beispiel hierfür dienen Messergebnisse beim Handlöten mit kolophoniumhaltigem Röhrenlot (1,5 DIN 8516-L-Sn 60 PbCu 2 zh) und Flussmittel F-SW 32 3,5.

Beim Weichlöten bilden sich als Schadstoffe im wesentlichen Kolophonium und seine Zersetzungsprodukte, da viele Flussmittel Kolophonium als Basis enthalten.

Zusätzlich, je nach dem eingesetzten Lot und Flussmittel, können Hydrazin, Blei, Chlor- und Bromwasserstoff oder Zinn-Verbindungen auftreten. Dies ist vor allem bei Lötarbeiten im Anlagenbau zu finden.

3.4.2 Hartlöten ($T > 450\text{ °C}$)

Beim Hartlöten werden im Wesentlichen Lote aus Kupfer-Zinn-Legierungen, die noch Zusätze an Nickel, Zinn, Silber und Cadmium enthalten können, verwendet.

Die Flussmittel zum Hartlöten enthalten Gemische aus Borsäuren, einfachen oder komplexen Fluoriden, Fluoroxiden und Borax.

Entsprechend der eingesetzten Lote und Flussmittel entstehen beim Hartlöten folgende Schadstoffe: Cadmiumoxid, Kupferoxid, Zinkoxid, Silberoxid, Fluoride, Boroxid usw.

Aus arbeitsmedizinischer Sicht sind im Rauch beim Hartlöten insbesondere Cadmiumverbindungen und Fluoride von Bedeutung.

Beim **Hartlöten mit cadmiumhaltigen Lotten** ist eine Absaugung der Rauche zwingend erforderlich.

Bei **Kupfer-Basis-Lotten** wird, aufgrund der schwankenden messtechnischen Ergebnisse am Arbeitsplatz (Kupferrauch-Konzentrationen über/unter dem Grenzwert), eine Absaugung im Entstehungsbereich empfohlen.

3.4.3 MIG-Löten, Laserstrahl-Löten, Plasma-Löten ($T > 900\text{ °C}$)

Bei diesen Verfahren wird als Zusatzwerkstoff überwiegend drahtförmige Kupferbasis-Legierung eingesetzt, deren Schmelzbereich niedriger ist als der Grundwerkstoff, z.B. CuSi 3 (Si 3 %, Mn 1 %, Cu Rest), AlBz 8 (Al 8,2 %, Cu Rest).

Die emittierten partikelförmigen Schadstoffe entstehen aus dem Zusatzwerkstoff. Der Grundwerkstoff wird nicht aufgeschmolzen.

Verzinkter Stahl

Bei der Bearbeitung verzinkter Stähle enthalten die Rauche hohe Anteile von Zinkoxid, die aus der Beschichtung durch Verdampfen und Oxidation entstehen.

Darüber hinaus entstehen aus dem Zusatzwerkstoff hohe Mengen an Kupferoxid.

Die höchsten Emissionsraten sind beim MIG-Löten zu erwarten. Die kleinsten Emissionsraten sind demgegenüber beim Plasmalöten zu erwarten.

Dementsprechend entstehen beim MIG-Löten mit CuSi 3 (1 mm Drahtdurchmesser) und bei einer 45 µm Zinkschicht etwa 4,7 mg/s.

Hochlegierter Stahl

Hier ist die Leitkomponente im Schweißrauch vom Zusatzwerkstoff bestimmt, und zwar Kupferoxid. Der Grundwerkstoff ist für die Schadstoffentstehung nicht relevant.

Beim MIG-Löten mit 1 mm Drahtdurchmesser liegt die Rauchentwicklung etwa bei 2,4 mg/s.

Beim Plasma- und Laserstrahllöten mit gleichem Zusatzwerkstoff liegt die Schweißrauchemission viel niedriger als beim MIG-Löten.

Bild 3-6: Zuordnung der Haupt- und Leitkomponenten zu den Verfahren und Werkstoffen beim Löten

Verfahren	Grundwerkstoff	Zusatzwerkstoff	Hauptkomponente	Leitkomponente
MIG-Löten	verzinkter Stahl	CuSi 3	Zinkoxid	Kupferoxid
	Chrom-Nickel-Stahl	AlBz 8		Kupferoxid
Laserstrahl-Löten	verzinkter Stahl	CuSi 3	Zinkoxid	Kupferoxid
	Chrom-Nickel-Stahl	AlBz 8		Kupferoxid
Plasma-Löten	verzinkter Stahl	CuSi 3	Zinkoxid	Kupferoxid
	Chrom-Nickel-Stahl	AlBz 8		Kupferoxid
Chrom-Nickel-Stahl: ≤ 20 % Cr und ≤ 30 % Ni AlBz: Al 8,2 %, Cu Rest CuSi: Si 3 %, Mn 1 %, Cu Rest				

4 Gefährdungsbeurteilung beim Schweißen

Für die Festlegung von Maßnahmen zum Schutz der Gesundheit ist entsprechend § 5 Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG) eine Beurteilung der für die Beschäftigten mit ihrer Arbeit verbundenen Gefährdungen durchzuführen.

Voraussetzung für die Beurteilung der Gefährdung sowie für die Auswahl der geeigneten Schutzmaßnahmen bei jeder Verfahrens-/Werkstoffkombination sind die Kenntnisse über die "Emissionsrate" und "chemische Zusammensetzung" des Schweißrauches.

Folgende Faktoren werden in die Gefährdungsbeurteilung einbezogen:

Verfahrensspezifische Faktoren

- Die **Schweißverfahren** können hinsichtlich der Partikel nach Emissionsraten (mg/s) in vier Klassen (**Emissionsklassen 1 bis 4**) eingeteilt werden.

Wirkungsspezifische Faktoren

- Die Schweißrauche können hinsichtlich der **spezifischen Wirkung ihrer Inhaltstoffe** auf den Körper in drei Klassen (**Wirkungsklasse A, B, C**) eingeteilt werden.

Die Höhe der Gesundheitsgefährdung (niedrige in sehr hohe) ist von verfahrens- und wirkungsspezifischen Faktoren abhängig (Bild 4-1).

Eine Zuordnung zu den Schweißrauchklassen anhand von Emissionsraten und Wirkung (A 1 bis C 4) enthält Bild 4-2.

Arbeitsplatzspezifische Faktoren

- Dazu gehören insbesondere: räumliche Verhältnisse, Lüftungssituation, Kopf- und Körperposition beim Schweißen

Bei **mittleren, hohen und sehr hohen Emissionsraten** treten im Atembereich des Schweißers – ohne Lüftungstechnische Maßnahmen – **Schadstoffkonzentrationen** auf, die **mehrfach die Grenzwerte überschreiten**.

Bei niedrigen Emissionsraten liegen die Schadstoffkonzentrationen im Atembereich des Schweißers erfahrungsgemäß im Grenzwertbereich oder knapp darunter.

Ohne Lüftungstechnische Maßnahmen und bedingt durch zusätzliche Gegebenheiten am Arbeitsplatz wird in einigen Fällen die Gesundheitsgefährdung erhöht, z.B. in engen Räumen.

Deshalb sind hier neben Überlegungen zur:

1. Auswahl schadstoffarmer Verfahren
2. Auswahl schadstoffarmer Werkstoffe

– soweit technisch möglich – auch optimale Lösungen für die Lüftungstechnik zu finden und anzuwenden.

Es kann davon ausgegangen werden, dass "keine Gesundheitsgefährdung" vorliegt, sofern die stoffspezifischen Grenzwerte der im Schweißrauch enthaltenen lungenbelastenden und toxischen Stoffe eingehalten und die der krebserzeugenden Stoffe deutlich unterschritten sind.

Durch die Auswahl wirksamer Lüftungstechnischer Maßnahmen wird die Gesundheitsgefährdung reduziert oder sogar ausgeschlossen.

Bild 4-1: Zuordnung der Gefährdungen zu den Schweißrauchklassen

Gefährdung	Schweißrauchklasse
I niedrige Gesundheitsgefährdung	A 1
II mittlere Gesundheitsgefährdung	A 2, B 1, C 1
III hohe Gesundheitsgefährdung	A 3, B 2, B 3, C 2, C 3
IV sehr hohe Gesundheitsgefährdung	A 4, B 4, C 4

**Bild 4-2: Gefährdungsbeurteilung anhand von Emissionsraten und Wirkung;
Zuordnung zu den Schweißrauchklassen**

Schweißrauche: Emissions- klassen/ Emissionsraten [mg/s]		Beispiele von Verfahren	Schweißrauch: Wirkung		
			Wirkungsklasse A	Wirkungsklasse B	Wirkungsklasse C
			Atemwegs- und lungenbelastende Stoffe ³⁷ z.B. Fe ₂ O ₃	Toxische oder toxisch-irritative Stoffe ³⁷ z.B. F ⁻ , MnO, CuO	Krebserzeugende Stoffe ³⁷ z.B. Cr(VI), NiO
			Gefährdung	Gefährdung	Gefährdung
1	< 1	z.B. WIG, UP	I (A 1)	II (B 1)	II (C 1)
2	1 bis 2	z.B. Laserstrahl- schweißen	II (A 2)	III (B 2)	III (C 2)
3	2 bis 25	z.B. LHB, MAG (Massivdraht)	III (A 3)	III (B 3)	III (C 3)
4	> 25	z.B. MAG (Fülldraht)	IV (A 4)	IV (B 4)	IV (C 4)
I = niedrige Gesundheitsgefährdung; II = mittlere Gesundheitsgefährdung; III = hohe Gesundheitsgefährdung; IV = sehr hohe Gesundheitsgefährdung A 1 bis C 4: Schweißrauchklassen					

5 Messverfahren

Die Messung von Schadstoffen am Arbeitsplatz hat das Ziel, ein Bild über die aktuelle Schadstoffsituation zu erhalten, um daraus gegebenenfalls Entscheidungen für Schutzmaßnahmen treffen zu können.

Aus diesem Grund ist es erforderlich, dass die jeweilige Messung so sorgfältig geplant, vorbereitet und durchgeführt wird, dass das Ergebnis diese Situation tatsächlich repräsentiert.

Hierzu wurden im Laufe der Zeit verschiedene Messstrategien entwickelt, die je nach Anforderung an die Aussagekraft des Ergebnisses unterschiedlich aufwendig sind.

Messverfahren für Schadstoffe am Arbeitsplatz bestehen in der Regel aus mehreren Einzelschritten, und zwar:

- Vorbereitung der Probenahme,
- Probenahme,
- Transport und Lagerung der Probe,
- Probenaufbereitung,
- analytische Bestimmung und
- Berechnung des Ergebnisses.

Die Probenahme erfolgt dadurch, dass die Schadstoffe auf einem Probenträger gesammelt werden und dass sie auf dem Probenträger zu einer Veränderung einer vorhandenen Substanz führen.

³⁷ Wenn Legierungs- und Umhüllungs-/ Füllungskomponenten jeweils < 5 % sind.

Die Probenträger können grob eingeteilt werden in:

- Probenträger für Gase (Ozon, Stickstoffoxide, Kohlenmonoxid) und
- Probenträger für partikelförmige Stoffe (Rauche, Stäube).

Die Höhe der Schadstoffkonzentrationen (mg/m^3) am Arbeitsplatz und die entsprechende Belastung des Schweißers werden durch verschiedene Messverfahren ermittelt.

Analog zu den Probenträgern unterscheidet man zwischen:

- Messverfahren für gasförmige Stoffe (Gase) und
- Messverfahren für partikelförmige Stoffe (Rauche, Stäube).

Grundsätzlich werden diese Messungen so vorgenommen, dass eine Beurteilung der Schadstoffkonzentration im Atembereich des Schweißers möglich ist.

5.1 Messverfahren für gasförmige Stoffe

Personenbezogene Exposition wird im Allgemeinen ermittelt durch (Bild 5-1):

- kontinuierliche Messverfahren mit direktanzeigenden Messgeräten (elektrische Direktanzeigergeräte, Prüfröhrchen [Bild 5-2]),
- diskontinuierliche Messverfahren.

Bild 5-1: Anhang B (informativ) – aus der E DIN 32507-2: 1995-07³⁸
Messung einzelner Gase und organischer Dämpfe

Mess- verfahren	Gase und Dämpfe				
	Ozon (O ₃)	Kohlenstoff- monoxid CO	Kohlenstoff- dioxid CO ₂	Stickstoff- oxide (NO) + Stickstoff- dioxide (NO ₂)	Organische Dämpfe
	0,01 ppm bis 3 ppm	3 ppm bis 500 ppm	500 ppm bis 10 %	0,3 ppm bis 250 ppm	–
Elektrische Direktanzei- geräte	Allgemein benutzt	Allgemein benutzt	Allgemein benutzt	Allgemein benutzt	Verfügbar, Nützlichkeit aber begrenzt durch geringe spezifische Wirksamkeit
Prüfröhrchen	Verfügbar, aber nicht empfohlen	Allgemein benutzt	Allgemein benutzt	Allgemein benutzt	Verfügbar, Nützlichkeit aber begrenzt durch geringe spezifische Wirksamkeit
Indirekte Verfahren mit Laboranalyse	Nicht allgemein anwendbar	Nicht allgemein anwendbar	Nicht allgemein anwendbar	Verfügbar, aber nicht allgemein empfohlen	Allgemein benutzt

³⁸ (= EN ISO 10882 Part 2)

Probenahme von partikelförmigen Stoffen und Gasen im Atembereich des Schweißers
(Teil 2: Probenahme von Gasen)

Kontinuierliche Messverfahren

Elektrische Direktanzeigergeräte

Durch den Einsatz mobiler IR-Analysatoren zur Bestimmung der CO-Konzentration bzw. direktanzeigender Geräte zur Messung von Stickstoffoxiden und Ozon, die nach dem Chemilumineszenz-Verfahren arbeiten, kann die Höhe und der zeitliche Verlauf eventueller Schadstoffexpositionen direkt vor Ort angezeigt werden. Diese Geräte sind nützlich für Übersichtsmessungen: der zeitlichen Konzentrationsveränderung, des Schichtmittelwertes sowie für Grenzwert-Vergleichsmessungen und periodische Messungen. Für Einsatz und Wartung bedarf es qualifizierter Personen. Auf Querempfindlichkeiten ist zu achten.

Prüfröhrchen

Ein definiertes Luftvolumen wird mittels einer geeigneten Handpumpe bzw. batteriegetriebenen Pumpe durch das geöffnete Röhrchen angesaugt.

Anhand der Verfärbung des Füllpräparates, das spezifisch für einen Schadstoff oder eine Schadstoffgruppe ist, kann die Konzentration abgelesen werden. Es gibt Kurzzeit- und Langzeitröhrchen.

Prüfröhrchen sind sehr nützlich für Übersichtsmessungen des Schichtmittelwertes und weniger für Grenzwert-Vergleichsmessungen oder periodische Messungen.

Bild 5-2: Direktanzeigende Prüfröhrchen; Einhandgasspürpumpe und Pumpautomat accuro 2000 mit Prüfröhrchen für die Messung von gasförmigen Schadstoffen



Diskontinuierliche Messverfahren

Die Probeluft wird mittels elektrisch betriebener Probenahmepumpen durch geeignete Sorptionsröhrchen hindurchgesaugt, so zum Beispiel Aktivkohle- oder Silikagelröhrchen. Die Aufnahmekapazität des Absorbers muss ausreichend groß sein. Probenahmen können sowohl stationär wie personengetragen erfolgen. Die Anwendung von Passivsammlern ist ebenfalls möglich. Eine Auswertung ist ausschließlich im Labor möglich. Diese Verfahren haben getrennte Probenahme- und Analysestufen.

5.2 Messverfahren partikelförmiger Stoffe

Bei Messungen der Konzentration partikelförmiger Schadstoffe unterscheidet man:

- Probenahmesysteme für Messungen an der Person (personenbezogene Probenahme) mit personenbezogenem Staubsammelgerät und
- Probenahmesysteme für ortsfeste Messung mit stationärem Staubsammelgerät (Bild 5-8).

Die Probenahme mit dem personenbezogenen Staubsammelgerät (Personal Air Sampler = PAS) erfolgt im Atembereich des Schweißers (Bild 5-3 und 5-4) mit einem "Probenahmekopf" für die einatembare Fraktion, der die partikelförmigen Stoffe auf einem Filter ansammelt. Mit Hilfe einer Pumpe, die am Schweißer mit einem Gürtel befestigt ist, wird ein bestimmtes Luftvolumen angesaugt. Die Probenahme direkt an der Person (beim Schweißen hinter dem Schweißerschutzschild/-schirm) ist die zweckmäßigere Methode für die korrekte Beurteilung der Belastung des Schweißers am Arbeitsplatz.

Bild 5-3: Messung von partikelförmigen Schadstoffen mit Hilfe eines personenbezogenen Staubsammelgerätes (PAS) sowie Prüfung auf gasförmige Schadstoffe mit Hilfe von Prüfröhrchen



Bild 5-4: Personenbezogene Messung mit PAS für die Ermittlung partikelförmiger Schadstoffe



Die Ermittlung der Schweißrauchkonzentration erfolgt entsprechend der Norm – meistens mit einem Probenahmekopf, mit dem die einatembare Fraktion (E-Staub) erfasst wird, z.B. BIA-GSP-System (siehe Abschnitt 3.1 dieser BG-Information).

Nach der Probenahme und dem Transport des Filters zum Labor erfolgt die quantitative (mg/m^3) und die qualitative (chemische Zusammensetzung) Auswertung der Probe im Labor. Durch Auswiegen und chemische Analyse wird die analytische Bestimmung in der Regel auf die jeweiligen Leitkomponenten beschränkt.

Die neue europäische/internationale Norm EN ISO 10882-1 "Probenahme von partikelförmigen Stoffen und Gasen im Atembereich des Schweißers" Teil 1 legt die Verfahren zur personenbezogenen Probenahme von partikelförmigen Stoffen beim Schweißen und bei verwandten Verfahren fest.

Laut Norm muss die Probenahmeeinrichtung hinter dem Schweißergesichtsschutz positioniert werden. Sie kann dabei verschiedene Stellungen nehmen: links oder rechts vom Gesicht oder unter dem Kinn. Gemessen wird hier mit dem Probenahmekopf für die E-Fraktion des Staubes.

Bilder 5-5 bis 5-7: Anordnungsbeispiele für das Anbringen der Probenahmeeinrichtung hinter einem Schweißer-Gesichtsschutzschirm. Anhang A, (informativ) aus der EN ISO 10882-1.

Bild 5-5: Schweißer-Gesichtsschutzschirm mit einer mit abnehmbarer Haltevorrichtung befestigten Probenahmeeinrichtung

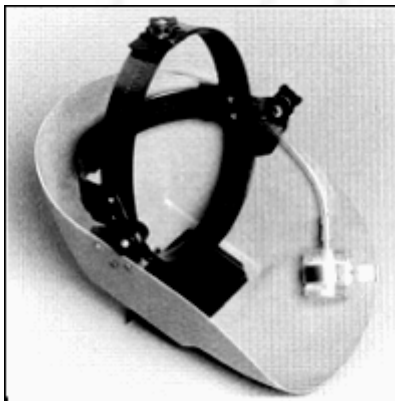


Bild 5-6: Schweißer, der eine am Sportler-Stirnband befestigte Probenahmeeinrichtung trägt



Bild 5-7: **Schweißer, der eine am Sportler-Stirnband befestigte Probeentnahmeeinrichtung und einen Schweißer-Gesichtsschutzschirm trägt**



Die Probenahme mit dem stationären Staubsammelgerät (Bild 5-8) erfolgt ortsfest in der Umgebung (Arbeitsbereich) des Schweißers. Die Probenahmeposition im Raum wird so ausgewählt, dass sie zur Bestimmung der allgemeinen Konzentration von Schweißrauch in der Arbeitsplatzatmosphäre geeignet ist und wird auch zusätzlich zur Beurteilung der Lüftungssituation im Raum verwendet.

Bild 5-8: **Stationäres Staubsammelgerät (VC 25) für die ortsfeste Probenahme (Messung) partikelförmiger Schadstoffe**



6 Beurteilung partikelförmiger Stoffe beim Schweißen und bei verwandten Verfahren

- Bei allen Verfahren mit unlegierten/niedriglegierten Werkstoffen (Grund- und Zusatzwerkstoffe), deren Anteile an Chrom, Nickel, Cobalt, Mangan, Kupfer, Barium, Fluoride einzeln niedriger als 5 Gew.-% sind, bei denen keine mutagene, krebserzeugende, fibrogene, toxische oder allergisierende Stoffe im Schweißrauch enthalten sind, ist bei der Beurteilung der Exposition des Schweißers am Arbeitsplatz in den meisten Fällen ausreichend, die Konzentration der Schweißrauche/ alveolengängigen Fraktion des Staubes zu ermitteln und mit dem gültigen Grenzwert zu vergleichen.

Der Grenzwert für Schweißrauch ist hier maßgebend.

Beim thermischen Spritzen sowie bei Mischarbeitsplätzen (Schweißen und Schleifen) kann die einatembare Fraktion (E-Staub) zusätzlich zur alveolengängigen von Bedeutung sein. Hier wird auch die Ermittlung der einatembaren Staubkonzentration empfohlen.

- Bei allen Verfahren mit hochlegierten Werkstoffen (Grund- und Zusatzwerkstoffe), deren Anteile an Chrom, Nickel, Cobalt, Mangan, Kupfer, Barium, Fluoride einzeln mindestens 5 Gew.-%, bei denen mutagene, krebserzeugende, fibrogene, toxische oder allergisierende Stoffe im Schweißrauch enthalten sind, sind die Grenzwerte der jeweiligen Leitkomponente einzuhalten. Bezüglich der festgelegten Leitkomponenten siehe auch die Bilder 3-2a bis 3-2e und Bild 3-4 dieser BG-Information.

Die Konzentration der Schweißrauche ergibt sich aus der Einhaltung der Leitkomponente und ist entsprechend abhängig von

- a) Verfahren und Werkstoffen,
- b) der chemischen Zusammensetzung der Schweißrauche und
- c) der Konzentration der Leitkomponente im Schweißrauch sowie ihrem Grenzwert.

In diesem Fall liegt die Schweißrauchkonzentration unterhalb von 3 bzw. 6 mg/m³.

Der Grenzwert für Schweißrauch ist hier nicht maßgebend, sondern der Grenzwert der jeweiligen Leitkomponente steht hier im Vordergrund (siehe Beispiele in Bild 6-1).

- Bei allen Verfahren, bei denen in bestimmten Bereichen, wie engen Räumen (z.B. Kessel, Behälter, Schiffs-Doppelbodenzellen) sowie anderen Bereichen mit geringem/ungenügenden Luftaustausch, eine Einhaltung des aktuellen Luftgrenzwertes für Schweißrauche bzw. alveolengängige Fraktion des Staubes – trotz Lüftungstechnischer Maßnahmen – nicht möglich ist, sind zusätzliche Schutzmaßnahmen (z.B. organisatorische Maßnahmen und Einsatz persönlicher Schutzausrüstungen) notwendig.

Bild 6-1: Beispiele

Verfahren	Erste Leitkomponente	GW der Leitkomponente	Schweißrauchkonzentration bei Einhaltung des Grenzwerts der Leitkomponente
Lichtbogenhandschweißen mit hochlegierten umhüllten Stabelektroden (hier: mit 18 % Cr und 8 % Ni)	Cr(VI)-Verb.	0,1 mg/m ³	1,7 mg/m ³
Metall-Inertgasschweißen mit Nickelbasis-Zusatzwerkstoff (hier: mit 66 % Ni)	NiO	0,5 mg/m ³	1,0 mg/m ³
Metall-Schutzgasschweißen mit niedriglegierten selbstschützenden Fülldrahtelektroden (hier: mit 20 % Mn)	Manganoxide	0,5 mg/m ³	2,5 mg/m ³

Die Einhaltung des Grenzwertes für die Leitkomponente – dementsprechend die Einhaltung der berechneten Schweißrauchkonzentration nach "Health and Safety Executive" mit der Formel:

$$SRK = \frac{100 \cdot GW}{C}$$

wobei

GW = stoffspezifischer Grenzwert, mg/m³

C = Anteil (%) der Leitkomponente im Schweißrauch

SRK = Schweißrauchkonzentration, mg/m³

– bedeutet zugleich auch die Grenzwert-Unterschreitung aller im Schweißrauch enthaltenen Stoffe.

7 Ermittlung und Beurteilung der Schadstoffkonzentration

Bei der Ermittlung der Exposition des Schweißers gegenüber Schweißrauchen mit dem Luftgrenzwert für Schweißrauche (zurzeit Luftgrenzwert für die A-Fraktion des Staubes) muss die Probenahme hinter dem Schweißerschutzschild bzw. -schirm durchgeführt werden. Dies gilt auch für enge Bereiche, wie Behälter, Kessel oder Schiffs-Doppelbodenzellen (siehe auch Abschnitt 5 Messverfahren).

Wenn – in Ausnahmefällen – die Probenahme von Schweißrauch nur außerhalb des Schweißerschutzschirms (vor oder neben dem Schutzschild bzw. -schirm) möglich ist, dann gibt die dabei gemessene Schadstoffkonzentration, trotz Vergleich mit dem jeweiligen Grenzwert, keine Auskunft über die Exposition des Schweißers. In diesem Fall kann nur eine Aussage zur unmittelbaren Lüftungssituation gemacht werden.

Zur Ermittlung und Beurteilung der Schadstoffkonzentration am Arbeitsplatz wird die TRGS 402 herangezogen.

Darin wird beschrieben, wie festgestellt werden kann, ob die Luftgrenzwerte für Schadstoffe am Arbeitsplatz eingehalten sind.

Bei einer dauerhaft sicheren Einhaltung der Grenzwerte kann in bestimmten Arbeitsbereichen auf die im Anschluss an die Arbeitsbereichsanalyse vorgesehenen Kontrollmessungen verzichtet werden; so z.B. BG-/BIA-Empfehlung bei bestimmten Weichlötarbeiten mit elektrisch beheizten LötKolben an elektrischen und elektronischen Baugruppen oder deren Einzelkomponenten (Kolbenlöten).

Bezüglich der Umsetzung der TRGS 403 "Bewertung von Stoffgemischen in der Luft am Arbeitsplatz" beim Schweißen und bei verwandten Verfahren, wird auf Abschnitt 3.3 "Vereinfachtes Bewertungsverfahren anhand von Leitkomponenten" verwiesen (siehe auch Abschnitt 3 dieser BG-Information).

Wird (werden) die für die Leitkomponente(n) geltende(n) Grenzwert(e) im Atembereich des Schweißers eingehalten, liegen die Konzentrationen aller anderen Schadstoffe im Schadstoffgemisch unterhalb ihrer jeweiligen Grenzwerte.

8 Schadstoffsituation am Arbeitsplatz

8.1 Exposition gegenüber Schweißrauchen

Eine Auswertung der von den Metall-Berufsgenossenschaften vorgenommenen Messungen über Schweißrauchexpositionen an Arbeitsplätzen bezüglich der Einhaltung

- des damaligen Grenzwertes für den alveolengängigen Anteil von 6 mg/m^3 und
- des Schweißrauch-Richtwertes für arbeitsmedizinische Vorsorguntersuchungen von 3 mg/m^3

ist in Bild 8-1 dargestellt.

Bild 8-1: Exposition gegenüber Schweißrauchen³⁹, Datenzeitraum 1986 bis 1996

Verfahren	Probenahme: an der Person (PAS)						Probenahme: stationär					
	mit Erfassung			ohne Erfassung			mit Erfassung			ohne Erfassung		
	Anzahl der Mess-daten	Über-schreitungs-häufigkeit bei		Anzahl der Mess-daten	Über-schreitungs-häufigkeit bei		Anzahl der Mess-daten	Über-schreitungs-häufigkeit bei		Anzahl der Mess-daten	Über-schreitungs-häufigkeit bei	
		6 mg/m ³ 40	3 mg/m ³ 41		6 mg/m ³ 40	3 mg/m ³ 41		6 mg/m ³ 40	3 mg/m ³ 41		6 mg/m ³ 40	3 mg/m ³ 41
		%	%		%	%		%	%		%	%
Lichtbogenhandschweißen	386	19	38	186	49	73	45	4	8	41	4	19
MAG-Schweißen	741	31	58	544	69	83	187	5	16	110	14	29
MIG-Schweißen	250	22	43	176	43	68	58	2	23	52	7	24
WIG-Schweißen	149	5	10	182	5	15	39	0	1	35	4	9
Th. Schneiden (Brenn-, Plasma-, Laserstrahl-schneiden)	66	14	23	18	52	69	33	0	11	13	18	26
Th. Spritzen (Flamm-, Lichtbogen-, Plasmaspritzen)	40	14	29	1	0	0	28	15	19	0	–	–

³⁹ Schweißrauch = Feinstaub = Gesamtstaub (siehe auch Abschnitt 3.1)

⁴⁰ 6 mg/m³ = Grenzwert für alveolengängigen Anteil

⁴¹ 3 mg/m³ = Richtwert für arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen nach BGI 504-39 "Schweißrauche"

8.2 Exposition gegenüber Chrom(VI)-Verbindungen und Nickeloxid

Ergebnisse aus Forschungsvorhaben und Arbeitsplatzmessungen bei der Be- und Verarbeitung von Chrom-Nickel-Stählen und von Nickel und Nickelbasislegierungen ohne Lüftungstechnischen Maßnahmen oder bei nicht ausreichender Wirksamkeit von Lüftungstechnischen Maßnahmen zeigen die in Bild 8-2 dargestellte Situation:

Bild 8-2: Exposition gegenüber Chrom(VI)-Verbindungen und Nickeloxid

Verfahren	Exposition gegenüber	Cr(VI)-Verbindungen bei		Nickeloxid bei			
		Chrom-Nickel-Werkstoffen		Chrom-Nickel-Werkstoffen		Nickel und Nickelbasiswerkstoffen	
		Überschreitung des TRK-Wertes ⁴²	Unterschreitung des TRK-Wertes ⁴²	Überschreitung des TRK-Wertes ⁴³	Unterschreitung des TRK-Wertes ⁴³	Überschreitung des TRK-Wertes ⁴³	Unterschreitung des TRK-Wertes ⁴³
Lichtbogenhandschweißen mit umhüllten Stabelektroden		immer			fast immer	selten	
MAG-Schweißen mit Massivdraht			häufig		häufig	fast immer	
MAG-Schweißen mit Fülldraht		häufig			fast immer		
MIG-Schweißen						fast immer	
WIG-Schweißen			immer		immer		fast immer
Plasmaschmelzschnitten		häufig		immer		immer	
Laserstrahlschnitten		häufig		immer		immer	
Thermisches Spritzen		häufig		immer		immer	

9 Schadstoffabwehrmaßnahmen

Um die Gesundheitsgefährdung des Schweißers durch Schadstoffe am Arbeitsplatz zu minimieren, sind technische, organisatorische und in bestimmten Situationen auch persönliche Schutzmaßnahmen zu treffen.

9.1 Technische Schutzmaßnahmen

Die nachfolgend aufgeführten technischen Schutzmaßnahmen sind einzeln oder in Kombination zu wählen.

9.1.1 Auswahl schadstoffarmer Verfahren

- Beim Lichtbogenhandschweißen von Chrom-Nickel-Stahl werden hochlegierte umhüllte Stabelektroden verwendet. Bei diesem Verfahren entstehen hohe Rauchmengen, die sechswertige – krebserzeugende – Chromverbindungen (hier: Chromate) in kritischen Konzentrationen enthalten. Es bietet sich die Möglichkeit, auf Metall-Aktivgasschweißen (MAG) umzustellen. Beim MAG-Schweißen bilden sich zwar insgesamt mehr Chromverbindungen, jedoch weit überwiegend in der dreiwertigen Form (nicht krebserzeugend), kaum in der sechswertigen Form (krebserzeugend).

⁴² TRK-Wert für Cr(VI)-Verbindungen = 0,1 mg/m³ beim Lichtbogenhandschweißen
TRK-Wert für Cr(VI)-Verbindungen = 0,05 mg/m³ bei allen anderen Verfahren

- Im Vergleich zum Lichtbogenhandschweißen, Metall-Aktivgasschweißen (MAG) und Metall-Inertgasschweißen (MIG) entwickelt sich beim Wolfram-Inertgas-schweißen (WIG) wesentlich weniger Rauch (Bild 9-1). Das WIG-Verfahren kann daher als schadstoffarmes Verfahren bezeichnet werden. Es empfiehlt sich gerade bei der Bearbeitung von Werkstoffen, die viel Chrom und Nickel enthalten.

Bild 9-1: WIG-Schweißen, ein schweißraucharmes Verfahren



- Beim Unterpulverschweißen wird der Schweißprozess unter einer Pulverschicht durchgeführt (Bild 9-2). Dadurch entstehen nur geringe Schadstoffmengen. Außerdem ist der Bediener verfahrensbedingt in der Regel nicht so nahe an der Schweißstelle. Aus diesen Gründen empfiehlt sich anstelle von anderen Lichtbogenschweißverfahren – wo technisch machbar – das Unterpulverschweißen.

Bild 9-2: Unterpulverschweißen, ein schadstoffarmes Verfahren



- Impulsbetrieb beim Schutzgasschweißen (Impulsschweißen) führt zur Senkung der Schweißrauchemission von 50 % bis zu 90 %.
- Laserstrahlbrennschneiden von unlegiertem und niedriglegiertem Stahl führt zu niedrigeren Schadstoffemissionen als autogenes Brennschneiden.
- Laserstrahlhochdruckschneiden (mit N₂) anstelle von Laserstrahlbrennschneiden (mit O₂). Beim Laserstrahlhochdruckschneiden können die Schadstoffemissionen bei gleichem Werkstoff und gleicher Blechdicke um den Faktor 2 bis 15 geringer sein als beim Laserstrahlbrennschneiden.

⁴³ TRK-Wert für Nickeloxide = 0,05 mg/m³

- Flamspritzen sollte, soweit möglich, dem Lichtbogenspritzen wegen der geringeren Schadstoffemission vorgezogen werden.

9.1.2 Auswahl schadstoffarmer Werkstoffe

Die beim Löten entstehenden Rauche und die damit zusammenhängende Belastung können durch eine sorgfältige Auswahl von Werkstoffen (z.B. niedrigschmelzende hoch silberhaltige Lote) verringert werden. Besondere Aufmerksamkeit ist beim Hartlöten mit Nickelbasisloten und cadmiumhaltigen Loten (aufgrund der krebserzeugenden Wirkung von Cadmium- oder Nickeloxid) geboten. Insbesondere ist zu prüfen, ob im Einzelfall Nickelbasislote und cadmiumhaltige Lote nicht durch weniger gefährliche Lote ersetzt werden können.

9.1.3 Optimierung der Arbeitsbedingungen

Die Entstehung der Schadstoffe und ihr Eindringen in den Atembereich können durch die Wahl günstiger Schweißparameter (Bild 9-3) und durch die Verbesserung der übrigen Arbeitsbedingungen verringert werden.

Bild 9-3: Wahl günstiger Parameter bei verschiedenen Verfahren

Verfahren	Autogen- technik	Lichtbogenhand- schweißen	MAG-/MIG Schweißen
Parameter			
Brennergröße	klein		
Sauerstoffverbrauch	begrenzt		
Flammenlänge	klein		
Schneidgeschwindigkeit (mm/s)	niedrig		
Schweißspannung		niedrig ⁴⁴	Niedrig ⁴⁴
Schweißstromstärke		niedrig ⁴⁴	niedrig ⁴⁴
Lichtbogenlänge		klein	
Schutzgaszusammensetzung			höhere Anteile von Edelgas (z.B. Ar)
Schutzgasdurchfluss			niedrig ⁴⁴

9.1.3.1 Wahl günstiger Schweißparameter

Die Wahl günstiger Schweißparameter kann wesentlich zur Schadstoff-Minimierung beitragen. Erhöhte Werte der Schweißspannung, der Schweißstromstärke und der Schutzgasmenge sind zu vermeiden

9.1.3.2 Verwendung thoriumoxidfreier Wolframelektroden beim WIG-Schweißen

Thoriumoxidfreie Wolframelektroden für das WIG-Schweißen mit andersartigen Oxidzusätzen (z.B. cer- oder lanthanhaltige) sind bereits in DIN EN 26848 genormt und verfügbar.

⁴⁴ unter Berücksichtigung von Herstellerangaben

9.1.3.3 Wahl günstiger Parameter beim Laserstrahl-Auftragschweißen

Beim Laserstrahl-Auftragschweißen kann eine Minimierung der Schadstoffe erfolgen durch

- möglichst niedrige Energie pro eingebrachtes Pulver unter Berücksichtigung des Prozessergebnisses und
- optimale Auswahl der Pulver hinsichtlich der Korngrößenverteilung.

9.1.3.4 Wahl günstiger Parameter beim Laserstrahlschneiden

Beim Laserstrahlschneiden kann eine Minimierung der Schadstoffe im Rahmen der optimalen Parameter erfolgen durch

- niedrigere Laserstrahlleistung,
- kurze Linsenbrennweite bei Dünnblechen und
- geringen Schneiddruck.

9.1.3.5 Oberflächenzustand des Werkstückes

Bei Schweiß- oder Schneidarbeiten an oberflächenbeschichteten Werkstücken entstehen aus der Beschichtung weitere Schadstoffe, die durch folgende Maßnahmen vermieden werden können:

- Beschichtungsdicken auf 15 bis 20 µm begrenzen,
- Beschichtungen im Schweißbereich entfernen und
- Verunreinigungen auf der Werkstückoberfläche (z.B. Öle, Fette, Lacke, Lösemittelreste) mit Reinigungsmittel entfernen.

9.1.3.6 Körperhaltung des Schweißers

Der Arbeitsplatz des Schweißers und die Positionierung des Werkstückes sollen so sein, dass

- der waagerechte Abstand zwischen der Schweißstelle und dem Kopf des Schweißers möglichst groß und
- der senkrechte Abstand möglichst klein ist.

Damit werden die mit der Thermik aufsteigenden Schadstoffe aus dem Atembereich des Schweißers weitgehend ferngehalten.

9.1.4 Technische Schutzeinrichtungen

Zur Verminderung der Schadstoffemission und -immission können spezielle technische Schutzeinrichtungen verwendet werden.

9.1.4.1 Brenner-Ablageeinrichtung mit Gasabsperrung

An ortsfesten Arbeitsplätzen der Autogentechnik besteht die Möglichkeit, Brenner-Ablageeinrichtungen zu verwenden, die mit selbsttätig wirkenden Gasabsperrungen ausgerüstet sind. Dadurch wird während der Arbeitspausen die Bildung größerer Mengen von nitrosen Gasen vermieden.

9.1.4.2 Wasserschutzvorrichtungen beim Plasmaschmelzschneiden

(mit Wasservorhang/Luft-Wasser-Dusche oder Wasserschutzglocke)

Das Plasmaschmelzschneiden mit Wasservorhang kommt in der Praxis meistens in Verbindung mit einem Wasser-Schneidisch und einem Wasserinjektionsschneidbrenner zur Anwendung. Die Schadstoffemission wird dadurch zwar reduziert, jedoch nicht vermieden.

9.1.4.3 Wasserabdeckung beim Plasmaschmelzschneiden

Das Plasmaschmelzschneiden unter Wasserabdeckung wird heute mit zahlreichen kleineren und größeren Anlagen durchgeführt. Durch dieses Verfahren reduzieren sich Schadstoffemission und Schallemission ganz wesentlich.

Je nach Anwendungsfall (Blechdicke, Werkstoffart) können die partikelförmigen Schadstoffemissionen bei vergleichbaren Schneidaufgaben bis zum 500fachen reduziert werden. Die Emission von Gasen, besonders nitrosen Gasen (beim Plasmaschneiden mit Argon/Stickstoff/Wasserstoff als Plasmagas) ist etwa um die Hälfte verringert.

9.1.4.4 Brennschneiden und Plasmaschmelzschneiden auf der Wasseroberfläche

Das Blech wird auf der Wasseroberfläche eines Schneidbeckens plaziert. Um den Brenner kann eine konzentrische Absaugung installiert werden, wodurch sich die Schadstoffemissionen verringern.

9.1.4.5 Wasserabdeckung beim Brennschneiden

Untersuchungen zum Brennschneiden mit Wasserabdeckung haben eine drastische Verringerung der Schadstoffemissionen im Vergleich zum Brennschneiden an Atmosphäre gezeigt:

- die partikelförmigen Emissionen werden um mehrere Größenordnungen verringert,
- auch die Emission gasförmiger Schadstoffe verringert sich ganz erheblich.

9.1.4.6 Arbeiten in geschlossenen Kabinen

Thermisches Spritzen wird in geschlossenen Kabinen empfohlen, möglichst automatisiert (Bedienungspersonal außerhalb).

Plasmaspritzen in geschlossenen Kabinen ist heute Stand der Technik (Bild 9-4).

Auch bei der Lasermaterialbearbeitung wird eine Einhausung des Bearbeitungsbereiches empfohlen.

Bild 9-4: Geschlossene Kabine zum Plasmaspritzen



9.1.5 Lüftung

Die praxisbezogenen Erfahrungen zeigen, dass die Lüftung häufig die einzige Möglichkeit zur Schadstoffminimierung ist.

a) Freie Lüftung (natürliche Lüftung)

Hier erfolgt der Luftaustausch zwischen Raumluft und Außenluft durch den Druckunterschied infolge Wind oder Temperaturdifferenzen zwischen außen und innen.

Der Luftaustausch erfolgt über Fenster, Türen, Dachreiter usw. Freie Lüftung kann nur bei geringem Gefährdungsgrad (bestimmt durch Menge, Konzentration, Schadstoffart) als Lösung dienen. Als Beispiel dient WIG-Schweißen mit thoriumoxidfreien Wolframelektroden kurzfristig.

b) Technische (maschinelle) Lüftung

Als technische (maschinelle) Lüftung wird der Luftaustausch zwischen Raumluft und Außenluft durch Strömungsmaschinen (z.B. Ventilatoren oder Gebläse) bezeichnet.

Um eine wirksame technische Lüftung in Räumen oder Hallen zu erreichen, muss z.B. beim Schweißen – Thermik der Schadstoffe von unten nach oben – die Luftführung so gewählt werden, dass im oberen Raumbereich Abluft abgeführt wird, während die Zuluft unten einströmt.

9.1.5.1 Absaugung

Bei Verfahren der Schweißtechnik, wo mit hohen Schadstoffkonzentrationen und/oder mit kritischen Stoffen in der Luft am Arbeitsplatz gerechnet werden muss, ist der Einsatz von Absaugeinrichtungen (Bild 9-5) zum direkten örtlichen Erfassen der entstehenden Schadstoffe die wirksamste Schutzmaßnahme. Hier sind alle Verfahren-/Werkstoff-Kombinationen zu erwähnen, von denen erfahrungsgemäß eine mittlere, hohe und sehr hohe Gefährdung (siehe Abschnitt 4 dieser BG-Information) ausgeht.

Bild 9-5: Beispiel einer stationären Absaugung



Ziel ist die möglichst weitgehende Erfassung und sichere Ableitung der Schadstoffe sowie ein hoher Wirkungsgrad des Filtersystems.

Das Erfassungselement ist für die Effektivität der Absaugung entscheidend (Bild 9-6).

Bild 9-6: Metall-Schutzgasschweißen (MIG/MAG) mit Absaugung



Die Auswahl der Form, die korrekte Dimensionierung und Anordnung der Erfassungselemente muss der thermisch bedingten Bewegung der Schweißrauche und deren Menge entsprechen und ist von der jeweiligen Arbeitssituation abhängig (siehe Richtlinie DVS/VDI 6005).

Das Erfassungselement muss immer in der Nähe des Entstehungsbereiches der Schadstoffe angebracht werden, so dicht wie möglich.

Bei flexiblen Erfassungselementen spielt die Bereitschaft des Schweißers zur richtigen Positionierung eine große Rolle.

Erfassungselemente mit Flansch sind effektiver als die bisherigen konventionellen Formen ohne Flansch (Bild 9-7).

Bild 9-7: Untersuchungen auf dem Prüfstand; Ergebnistabelle der gemessenen Saugreichweiten bei 1200 m³/h (GS 9/2002 "Absaugtechnik – Teil 2")

Beschreibung	Abbildung	Saugreichweite x bei 1200 m³/h ($w_x = 0,3 \text{ m/s}$) ¹⁾	Saugreichweite x bei 1200 m³/h ($w_x = 0,5 \text{ m/s}$) ²⁾	Erforderlicher Volumenstrom für $w_x = 0,4 \text{ m/s}$ x = 300 mm
Saugrohr ➤ 150 mm ohne Flansch		290 mm	217 mm	1705 m³/h
Saugrohr ➤ 150 mm mit Flansch 400 x 400 mm		337 mm	255 mm	1270 m³/h
Trichter ➤ 300 mm ohne Flansch		302 mm	240 mm	1580 m³/h
Trichter ➤ 300 mm mit Flansch 400 x 400 mm		335 mm	254 mm	1290 m³/h
Asymmetrische Einströmdüse mit Flansch 360 x 290 mm (Kemper)		343 mm	248 mm	1220 m³/h
Düsenplatte 400 x 400 mm, r = 40 mm (Kessler+Luch)		344 mm	258 mm	1220 m³/h

¹⁾ Mittelwerte aus 30 Messpunkten in 2 um 90° versetzten Achsen
²⁾ Mittelwerte aus 26 Messpunkten in 2 um 90° versetzten Achsen
 Ergebnistabelle mit den gemessenen Saugreichweiten bei 1200 m³/h. Zur vereinfachten Lesbarkeit wird die mittlere Saugreichweite angegeben.

Untersuchungen auf dem Prüfstand zeigen, dass bereits das Nachrüsten von Trichterhauben mit einem 50 mm breiten Flansch eine um etwa 10 % erhöhte Saugreichweite in allen Richtungen bzw. einen um etwa 20 % reduzierten Luftmengenbedarf ermöglichen kann (siehe auch "Gesund und Sicher" 9/2002 "Absaugtechnik – Teil 2").

Bei der Abscheidung von Schadstoffen spielen die eingesetzten Filtersysteme eine entscheidende Rolle. Die Auswahl dieser Filtersysteme ist neben anderen Faktoren auch von der chemischen Zusammensetzung der Schadstoffe abhängig.

Für die Filtration von metallischen Stäuben können selbstabreinigbare (mit Druckluft gereinigte) Oberflächenfilter empfohlen werden.

Die Abscheidung von Gasen und insbesondere von organischen Komponenten ist äußerst schwierig und muss dem Einzelfall (Prozess, Werkstoff) angepasst werden. Die Absaugeinrichtungen erfordern eine wirksame Ausfilterung der Schadstoffe für den Umluftbetrieb und für die Umwelt. Verschiedene Filtersysteme – mechanische, elektrostatische – stehen zur Verfügung.

Die zur Auswahl stehenden **Absaugeinrichtungen** lassen sich unterscheiden in:

- stationäre Absauganlagen und
- mobile Absauggeräte.

Die **stationären Absauganlagen** eignen sich für wiederkehrende schweißtechnische Arbeiten an ortsfesten Stellen (z.B. Serienproduktion). Durch Rohrleitungen wird die erfasste Luft nach außen geleitet (z.B. in einem größeren zentralen System). Die Erfassungselemente sind je nach Aufgabe starr angeordnet oder mit flexiblen Schläuchen nachführbar.

Es gibt unterschiedliche Bauformen für diese Anlagen. Schneidtische werden in der Regel mit unterer Absaugung ausgeführt. Hier wirkt die Untertischabsaugung der Thermik den Schadstoffen entgegen. Zusätzlich kann eine Absaugung nach hinten oben angebracht werden. Absaugtische an Brenn- oder Plasmaschneidanlagen sollen sektionsweise wirken und sich damit auf den jeweiligen Staubentstehungsbereich konzentrieren.

Beispiel:

Beim Laserstrahlschweißen mit Untertischabsaugung und optimalem Raumlufwechsel werden die MAK für die alveolengängige Fraktion des Staubes (Feinstaub) und die jeweiligen MAK und TRK für Leitkomponenten um das 10fache unterschritten. Dadurch kann eine dauerhafte sichere Einhaltung dieser Grenzwerte erreicht werden.

Kabinen mit Absaugung zum Schweißen und thermischen Spritzen:

Kabinen mit integrierter Absaugung haben sich in der Praxis gut bewährt. Der Arbeitsbereich wird von den Kabinenwänden möglichst eng umschlossen. Die durch die Kabinenöffnung einströmende Raumluf wird auf der gegenüberliegenden Kabinenwand abgesaugt. Innerhalb dieser Kabinen sollten die Schadstoffe durch spezielle Erfassungseinrichtungen unmittelbar an der Entstehungsquelle erfasst und abgeführt werden.

Bei Laserstrahlmaterialbearbeitung bieten Kabinen ebenfalls guten Schutz gegen Schadstoffe und optische Strahlung.

Der Abscheider kann entweder an das zentrale Absaugsystem angeschlossen sein oder die Kabine kann ihren eigenen Abscheider haben.

Mobile Schweißrauch-Absauggeräte eignen sich an wechselnden Arbeitsplätzen und sind in vielen Bereichen einsetzbar. Diese Geräte arbeiten mit Umluftbetrieb, d.h., dass die erfasste und gefilterte Luft in den Arbeitsraum zurückgeführt wird. Mobile Absauggeräte können mit unterschiedlichen Erfassungseinrichtungen kombiniert und betrieben werden:

- Schutzgasschweißbrenner mit integrierter Absaugung,
- Schutzschild mit integrierter Absaugung,
- nachführbare Erfassungseinrichtungen (Absaugrüssel).

Früher erfolgte die Absaugung und deren Regulierung durch eine Ringdüse; die neue Variante, mit drehbar am Brenner befestigter Absaugeinrichtung, kann den örtlichen Gegebenheiten und der Schweißsituation besser angepasst werden. Es wird ein größerer Erfassungsgrad ohne nennenswerte Beeinträchtigung des Schutzgasmantels erreicht. Auch vorhandene Brenner können damit nachgerüstet werden.

Bild 9-8: Erfassungselement am Brenner befestigt



Der § 24 Abs. 2 der Unfallverhütungsvorschrift "Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren" (BGV D1) enthält die Anforderungen bezüglich der Luftrückführung. Eine Abscheidung gilt als ausreichend, wenn die Konzentration der Stoffe der zurückgeführten Luft mindestens 1/4 (gemäß BGV D1) des geltenden Grenzwertes nicht überschreitet. Bei der Absaugung von Schadstoffen mit krebserzeugenden Anteilen muss die Luftrückführung den Anforderungen der TRGS 560 entsprechen. Mobile Schweißrauch-Absauggeräte erfüllen die Anforderungen, wenn sie vom Berufsgenossenschaftlichen Institut für Arbeitssicherheit (BIA) geprüft und im BIA-Handbuch unter Sachgruppe "510215 – Mobile Schweißrauchabsauggeräte – Positivliste" veröffentlicht sind.

Heute werden beim Schweißen mobile Filterabsauggeräte, die dem Stand der Technik entsprechen, mit Erfolg eingesetzt

Brennerintegrierte Absaugungen sind für MIG/MAG-Verfahren geeignet. Diese ermöglichen die zwangsläufige Erfassung der Schadstoffe direkt im Entstehungsbereich. Sie können sowohl in stationären als auch in mobilen Anlagen verwendet werden (Bild 9-9).

Bild 9-9: Brenner mit integrierter Absaugung



Auch für Nd:YAG-Laser wurden arbeitskopfigintegrierte Absaugdüsen entwickelt.

**Bild 9-10: Arbeitskopfigintegrierte Absaugung für Nd:YAG-Laser
(Quelle: Heiz-Piest-Institut, HPI-Absaugdüse MK 5)**

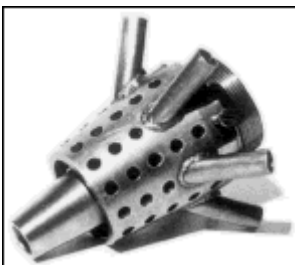
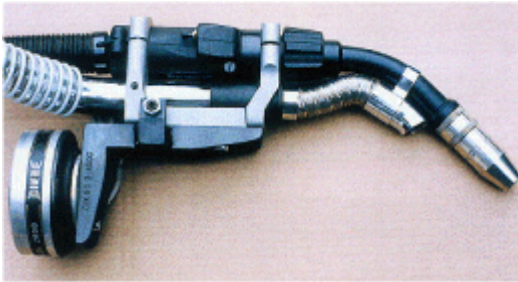


Bild 9-11: Brenner zum Metall-Schutzgasschweißen (MIG/MAG) mit integrierter Absaugung für automatisierte Anlagen



9.1.5.2 Zuluftanlagen/Raumlüftung

Im Allgemeinen ist es bei schweißtechnischen Verfahren in Hallen zur Beseitigung der Schadstoffe erforderlich, Zu- und Abluftanlagen einzusetzen. Die mit Schadstoffen belastete Luft muss in geeigneter Weise durch unbelastete Luft ersetzt werden.

Für Verfahrens-/Werkstoff-Kombinationen, bei denen von einer niedrigen Gefährdung auszugehen ist (siehe Abschnitt 4 dieser BG-Information), kann in der Regel bei länger dauernden Schweißarbeiten eine technische Raumlüftung ausreichend sein.

9.1.5.3 Zuordnung von Lüftungstechnischen Maßnahmen zu Verfahren und Werkstoffen der Schweißtechnik

Die Durchführungsanweisungen zu § 24 Absatz 1 Unfallverhütungsvorschrift "Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren" (BGV D1) enthalten die Lüftungstechnischen Anforderungen für die Regelfälle wichtiger Verfahren der Schweißtechnik.

Dabei wird unterschieden zwischen Lüftung in Räumen bei Anwendung von Verfahren, bei denen der Schadstoffgehalt vorwiegend vom eingesetzten

- Zusatzwerkstoff
oder
- Grundwerkstoff

abhängig ist (Bilder 9-12 bis 9-15).

Bild 9-12a: Brennerintegrierte Absaugung nicht in Betrieb



Bild 9-14: In Anlehnung an die Unfallverhütungsvorschrift "Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren" (BGV D1), Tabelle 2:
Lüftung in Räumen bei Verfahren ohne Zusatzwerkstoff

Verfahren	Zusatzwerkstoff					
	Unlegierter und niedriglegierter Stahl, Aluminium-Werkstoffe		Hochlegierter Stahl, NE-Werkstoffe (außer Aluminium-Werkstoffe)		Schweißen an beschichtetem Stahl	
	k	l	k	l	k	l
Flammwärmen, Flammrichten	T	A	T	A	T	A
Flammhärten	T	A	–	–	–	–
Flammstrahlen	T	A	–	–	T	A
Brennschneiden	T	A	A	A	T	A
Brennfugen	F	T	–	–	T	T
Flämmen	A	A	A	A	–	–
WIG-Schweißen						
mit thoriumfreien Wolframelektroden	F	T	F	T	F	T
mit thoriumhaltigen Wolframelektroden	A	A	A	A	A	A
Plasmaschneiden	A	A	A	A	A	A
Lichtbogen-Sauerstoffschneiden Lichtbogen-Druckluftfugen	T	A	A	A	T	A
Abbrennstumpfschweißen	T	A	A	A	T	A
Andere Widerstandsschweißverfahren	F	F	F	T	F	T
k = kurzzeitig, max. 2,0 Std./Woche – 0,5 Std./Tag l = länger dauernd, > 2,0 Std./Woche oder mehr als 0,5 Std./Tag F = freie (natürliche) Lüftung T = technische (maschinelle) Lüftung A = Absaugung der Schadstoffe im Entstehungsbereich						

Bild 9-15: Abweichend von den Angaben in den Tabellen 1 und 2 kann intensivere Lüftung erforderlich oder – bei messtechnischem Nachweis – geringere Lüftung ausreichend sein, z.B.

intensivere Lüftung erforderlich bei	geringere Lüftung ausreichend bei
• besonders großen Gasdurchsätzen, • besonders hohen Schweißstromstärken, • Verunreinigungen von Werkstücken, • ungünstigen Raumverhältnissen (z.B. kleine Räume, ungünstige Strömungsverhältnisse)	• besonders kleinen Gasdurchsätzen, • besonders niedrigen Schweißstromstärken, • günstigen Raumverhältnissen (z.B. hohe Hallen, günstige Strömungsverhältnisse), • günstigen Strömungsverhältnissen (z.B. bei Dachöffnungen und Luftzufuhr im Bodenbereich), • Beschichtungen, für die durch ein neutrales Gutachten nachgewiesen ist, dass gesundheitsgefährliche Stoffe nur in geringem Maße entstehen, • WIG-Schweißen mit thoriumoxidhaltigen Wolframelektroden mit Gleichstrom an nicht ortsgebundenen Arbeitsplätzen.

9.2 Persönliche Schutzausrüstungen

Persönliche Schutzausrüstungen dienen dem direkten Schutz des Schweißers und sind in vielen Fällen eine notwendige Ergänzung zu den technischen Schutzmaßnahmen:

9.2.1 Schweißerschutzschilde und -schirme

Beim Lichtbogenverfahren müssen Schweißerschutzschilde und -schirme mit Schutzfilter entsprechender Schutzstufe verwendet werden. Sie dienen dem Schutz gegen optische Strahlung, Hitze, Funken und bedingt auch gegen Schadstoffe. Eine richtige Positionierung muss durch den Schweißer erfolgen.

9.2.2 Atemschutzgeräte

Der Einsatz von Atemschutzgeräten darf nur dann erfolgen, wenn bei kritischen Bedingungen alle organisatorischen und technischen Schutzmaßnahmen erschöpft sind.

Generell heißt das, nur kurzfristig und nur in engen Räumen (z.B. Kesseln, Behältern, Schiffs-Doppelbodenzellen) oder anderen Bereichen mit geringem/ungenügendem Luftaustausch.

Bei bestimmten Verfahrens-/Werkstoff-Kombinationen, wie MIG-Schweißen von Aluminium-Werkstoffen, ist erfahrungsgemäß eine Minimierung der Schadstoffkonzentration – durch lüftungstechnische Maßnahmen – nicht ausreichend, um eine Unterschreitung der jeweiligen Grenzwerte für Ozon und Schweißrauch gleichzeitig zu erreichen. Hier sind in Ergänzung zur Lüftung gebläseunterstützte Atemschutzgeräte, z.B. fremdbelüftete Schweißerschutzhelme, zu empfehlen.

Auswahl von Atemschutzgeräten bei schweißtechnischen Arbeiten

Bis 20fache Grenzwertüberschreitung für die alveolengängige Fraktion empfiehlt sich der Einsatz von **Halb-/Viertelmasken mit P3-Filter bzw. partikelfilternden Halbmasken FFP3**.

Es muss jedoch beachtet werden, dass bei bestimmten Schneid- und Schweißarbeiten weitere Gase, Ozon und CO sowie weitere gas- und dampfförmige Schadstoffe auftreten können. Ferner kann bei nicht ausreichender Lüftung des Arbeitsplatzes der Luftsauerstoff durch die o.g. Gase verdrängt werden und somit die Konzentration auf unter 17 Vol-% fallen. Aus diesem Grund wird Folgendes empfohlen:

- a) **Bei ausreichender Sauerstoffversorgung ein Kombinationsfilter**, welcher organische und anorganische Gase und Dämpfe zurückhält. Darüber hinaus sollte der **Filter für Gase für CO und nitrose Gase** geeignet sein. Ein Kombinationsfilter empfiehlt sich, da die aufgeführten Schadstoffe zwar in unterschiedlicher Konzentrationen aber auch gemeinsam auftreten.

Das auftretende **Ozon** wird durch einen **Filter mit Aktivkohle** zurückgehalten. Wegen des hohen Gewichts eines solchen Filters kommt als Atemanschluss nur eine Vollmaske in Betracht. Als **bessere Alternative** wird die **Auswahl eines Gebläsefiltergerätes** mit Maske oder Helm/Haube genannt. Wenn mit CO und nitrosen Gasen gerechnet werden muss, sollte ein A1B B2 E2 K1 CO NO HG P3-Filter eingesetzt werden. Ist nicht mit CO und nitrosen Gasen zu rechnen, dann reicht ein ABEK2 P3-Filter aus.

- b) **Bei nicht ausreichendem oder ungewissem Sauerstoffgehalt** der Umgebungsluft muss ein **umluftunabhängiges Atemschutzgerät** eingesetzt werden.

Hier sollte einem Druckluftschlauchgerät mit Haube der Vorzug gegeben werden, da bei diesen Geräten eine G 26-Untersuchung entfallen kann und keine Tragezeitbegrenzung zu beachten ist.

Bei Arbeiten mit offener Flamme oder solchen Tätigkeiten, bei denen es zu Schweißperlenflug kommen kann, ist bei Verwendung von Atemfiltergeräten, insbesondere mit nicht unmittelbar am Atemanschluss angebrachten Gas- oder Kombinationsfilter, auf die mögliche Gefährdung durch Entzündung der Filter zu achten (u.a. Entstehung hoher Konzentrationen an Kohlenmonoxid und Kohlendioxid).

Beim Einsatz von Atemschutzgeräten wird auf die BG-Regel "Einsatz von Atemschutzgeräten" (BGR 190) und auf die BG-Information "Zertifizierte Atemschutzgeräte" (BGI 693) verwiesen.

10 Arbeitsmedizinische Vorsorge

10.1 Allgemeines

Eine vollkommene Sicherheit gegen die Einwirkung gesundheitsschädlicher Stoffe kann unter den heutigen Betriebsbedingungen trotz erheblicher technischer und organisatorischer Anstrengungen nicht erreicht werden. Daher ist es bei bestimmten Arbeiten erforderlich und unstrittig, neben der notwendigen technischen Prävention auch eine arbeitsmedizinische Vorsorge zu betreiben. Ziele sind hierbei die Verhinderung bzw. Früherkennung insbesondere chronischer Erkrankungen.

Gefährdete Arbeitnehmer müssen daher vor Aufnahme der Arbeit und dann in bestimmten Zeitabständen durch einen dazu ermächtigten Arzt arbeitsmedizinisch untersucht werden (siehe Gefahrstoffverordnung und Unfallverhütungsvorschrift "Arbeitsmedizinische Vorsorge" [BGV A1]). Diese Forderungen gelten u.a. auch für Arbeitnehmer, die einer stärkeren Einwirkung krebserzeugender Stoffe, wie Chrom(VI)-Verbindungen (Chromate, Chromtrioxid) oder Nickeloxid, ausgesetzt sind. Betroffen sind also auch zahlreiche Schweißer.

10.2 Grundsätze und Auswahlkriterien

Die "Berufsgenossenschaftlichen Grundsätze für arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen" (G ...) geben dem ermächtigten Arzt wesentliche Hinweise für das Vorgehen in der Praxis (Bild 10-1). Hinsichtlich der in der Schweißtechnik entstehenden Schadstoffe sind insbesondere die Grundsätze G 15, G 38 und G 39 von Bedeutung.

Bild 10-1: "Berufsgenossenschaftliche Grundsätze für arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen" (G ...) und die zugeordneten "Auswahlkriterien"

BG-Grundsatz	Titel	Auswahlkriterien
G 2	Blei oder seine Verbindungen	BGI 504-2
G 7	Kohlenmonoxid	BGI 504-7
G 15	Chrom(VI)-Verbindungen	BGI 504-15
G 27	Isocyanate	BGI 504-27
G 32	Cadmium oder seine Verbindungen	BGI 504-32
G 34	Fluor oder seine anorganischen Verbindungen	BGI 504-34
G 38	Nickel oder seine Verbindungen	BGI 504-38
G 39	Schweißrauche	BGI 504-39
G 40	Krebserzeugende Gefahrstoffe – allgemein	BGI 504-40c (Be) BGI 504-40f (Co)

Welche Personenkreise für eine spezielle arbeitsmedizinische Untersuchung infrage kommen, nennen die BG-Informationen "Auswahlkriterien für die spezielle arbeitsmedizinische Vorsorge nach den Berufsgenossenschaftlichen Grundsätzen für arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen" (BGI 504 und BGI-504-...).

Grundlage für diese Auswahl ist die Über- oder Unterschreitung der Auslöseschwelle für einzelne Schadstoffkomponenten. Die Auswahlkriterien verweisen konkret auf Verfahren mit Überschreitung oder Unterschreitung der Auslöseschwelle und sind damit eine wesentliche Entscheidungshilfe für die Auswahl der Mitarbeiter zur Durchführung von arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchungen.

10.3 Schweißrauche (allgemein)

Der Grundsatz G 39 gilt für Schweißrauche allgemein. Bei Versicherten, die bei ihrer Tätigkeit einer Schweißrauchkonzentration von mehr als 3 mg/m³ A-Staubanteil (alveolengängige Fraktion) als Schichtmittelwert im Atembereich ausgesetzt sind, müssen laut Unfallverhütungsvorschrift "Allgemeine Vorschriften" (BGV A1) arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen nach G 39 "Schweißrauche" durchgeführt werden.

Eine Überschreitung des Richtwertes 3 mg/m^3 ist nach neuesten Erkenntnissen bei folgenden Verfahren der Schweißtechnik in der Regel anzunehmen:

- Lichtbogenhand-, MIG-, MAG-Schweißen ohne ausreichende Lüftung,
- Plasmaschneiden ohne Absaugung oder ohne Wasserabdeckung,
- Flamm-, Lichtbogen-, Plasmaspritzen in nicht gekapselter Betriebsart,
- Brennfugen,
- Lichtbogen-Druckluftfugen,
- Abbrennstumpfschweißen,
- maschinelles Brennschneiden ohne Absaugung oder ohne Wasserabdeckung,
- Schweißen mit Fülldraht (MAG-, MIG-, MOG-Schweißen) ohne Absaugung,
- Laserstrahl-Schweißen (mit/ohne Zusatzwerkstoff) und -Schneiden ohne Absaugung.

Vorsorgeuntersuchungen nach Grundsatz G 39 sind wegen Unterschreitung des Richtwertes in der Regel nicht erforderlich bei folgenden Verfahren der Schweißtechnik:

- Gasschweißen,
- Flammwärmen,
- Wolfram-Inertgasschweißen,
- Mikro-Plasmaschweißen,
- Plasmaschneiden mit Wasserabdeckung,
- Unterpulverschweißen,
- Widerstandsschweißen (ausgenommen Abbrennstumpfschweißen),
- Reibschweißen,
- thermisches Spritzen in gekapselten Anlagen,
- Bolzenschweißen,
- Gießschmelzschweißen (Thermitschweißen),
- Elektroschlackeschweißen.

Bei anderen Verfahren oder Situationen müssen Arbeitsplatzmessungen zur Entscheidung herangezogen werden.

Nach G 39 müssen arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen vor Arbeitsaufnahme durchgeführt werden; die Nachuntersuchungen erfolgen dann im Abstand von 36 Monaten.

10.4 Chrom(VI)-Verbindungen

Nach dem Grundsatz G 15 und den zugeordneten Auswahlkriterien der BG-Information "Chrom(VI)-Verbindungen" (BGI 504-15) werden bei der Überschreitung der Auslöseschwelle arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen für Chrom(VI)-Verbindungen notwendig.

Mit einer Überschreitung der Auslöseschwelle ist nach neuesten Erkenntnissen bei folgenden Verfahren der Schweißtechnik zu rechnen:

- Lichtbogenhandschweißen mit hochlegierten umhüllten Stabelektroden (mit einem Massengehalt von 5 % oder mehr Chrom),
- Metall-Aktivgasschweißen mit hochlegiertem Fülldraht (mit einem Massengehalt von 5 % oder mehr Chrom in der Legierung oder Schlackenbildnern),
- Plasmaschmelz- und Laserstrahlschneiden von Chrom-Nickel-Werkstoffen (mit einem Massengehalt von 5 % oder mehr Chrom),
- Flamm-, Lichtbogen-, Plasmaspritzen mit hochlegierten Spritz-Zusatzstoffen (mit einem Massengehalt von 5 % oder mehr Chrom),
- Schweißen, Schneiden sowie Trockenschleifen von Werkstücken mit Chrom(VI)-haltigen Anstrichstoffen.

Vorsorgeuntersuchungen nach Grundsatz G 15 sind wegen Unterschreitung der Auslöseschwelle in der Regel nicht erforderlich bei folgenden Verfahren der Schweißtechnik:

- Schutzgasschweißen mit Massivdrähten mit maximal 10 % Chrom,
- Wolfram-Inertgasschweißen,
- Mikro-Plasmaschweißen,
- Plasmaschmelzschneiden mit Wasserabdeckung.

Bei anderen Verfahren oder in besonderen Situationen müssen Arbeitsplatzmessungen zur Entscheidung herangezogen werden.

Die arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchungen müssen vor Arbeitsaufnahme (Erstuntersuchung) durchgeführt werden. Die erste Nachuntersuchung hat nach 6 bis 9 Monaten, weitere Nachuntersuchungen haben nach 12 bis 24 Monaten zu erfolgen.

Darüber hinaus sind hier wegen der Einstufung des Chrom(VI) als krebserzeugend noch nachgehende Untersuchungen erforderlich, d.h., auch nach Beendigung der gefährdenden Tätigkeit erfolgt eine arbeitsmedizinische Überwachung. In diesen Fällen ist auch eine besondere Meldung an die Berufsgenossenschaft erforderlich (ODIN).

10.5 Nickel und Nickelverbindungen

Der Grundsatz "Nickel oder seine Verbindungen" (G 38) erläutert die Einzelheiten zu arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchungen für Arbeitnehmer, die Verfahren mit Überschreitung der Auslöseschwelle für Nickel und seine Verbindungen durchgeführt haben.

Eine Überschreitung der Auslöseschwelle wird nach neuesten Erkenntnissen nach den dem Grundsatz G 38 zugeordneten Auswahlkriterien der BG-Information "Nickel oder seine Verbindungen" (BGI 504-38) bei folgenden Verfahren in der Regel erwartet:

- Metall-Schutzgasschweißen und Lichtbogenhandschweißen mit hochlegierten Zusatzwerkstoffen (mit einem Massengehalt von 5 % oder mehr Nickel),
- Plasmaschmelz- und Laserstrahlschneiden von Werkstoffen mit einem Massengehalt von 5 % oder mehr Nickel,
- thermisches Spritzen mit Spritzzusätzen mit mehr als 5 % Nickel.

Vorsorgeuntersuchungen nach Grundsatz G 38 sind wegen Unterschreitung der Auslöseschwelle in der Regel nicht erforderlich bei folgenden Verfahren der Schweißtechnik:

- Wolfram-Inertgasschweißen,
- Mikro-Plasmaschweißen,
- Plasmaschneiden mit Wasserabdeckung,
- thermisches Spritzen in gekapselten Anlagen.

Bei anderen Verfahren oder in besonderen Situationen müssen Arbeitsplatzmessungen zur Entscheidung herangezogen werden.

Nach G 38 werden eine Erstuntersuchung vor der Arbeitsaufnahme und Nachuntersuchungen jeweils nach 36 bis 60 Monaten vorgeschrieben. Bei Tätigkeit von mehr als 5 Jahren werden zusätzlich nachgehende Untersuchungen in Abständen von 36 bis 60 Monaten durchgeführt. In diesen Fällen ist auch eine besondere Meldung an die Berufsgenossenschaft erforderlich (ODIN).

11 Vorschriften und Regeln

Zusammenstellung technischer Regelwerke, die bei Schadstoffen in der Schweißtechnik zu beachten sind.

11.1 Unfallverhütungsvorschriften

- "Allgemeine Vorschriften" (BGV A1)
- "Arbeitsmedizinische Vorsorge" (BGV A4)
- "Umgang mit Gefahrstoffen" (BGV B1)
- "Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren" (BGV D1)

11.2 BG-Regeln, BG-Informationen und BG-Grundsätze

- "Arbeitsplätze mit Arbeitsplatzlüftung" (BGR 121)
- "Einsatz von Atemschutzgeräten" (BGR 190)
- "Auswahlkriterien für die spezielle arbeitsmedizinische Vorsorge nach den Berufsgenossenschaftlichen Grundsätzen für arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen" (BGI 504)
- "Blei oder seine Verbindungen (mit Ausnahme der Bleialkyle)" (BGI 504-2)
- "Kohlenmonoxid" (BGI 504-7)
- "Chrom(VI)-Verbindungen" (BGI 504-15)
- "Isocyanate" (BGI 504-27)
- "Cadmium oder seine Verbindungen" (BGI 504-32)
- "Fluor oder seine anorganischen Verbindungen" (BGI 504-34)
- "Nickel oder seine Verbindungen" (BGI 504-38)
- "Schweißrauche" (BGI 504-39)

- "Beryllium" (BGI 504-40c)
- "Cobalt und seine Verbindungen" (BGI 504-40f)
- "Von den Berufsgenossenschaften anerkannte Analysenverfahren zur Feststellung der Konzentrationen krebserzeugender Arbeitsstoffe in der Luft in Arbeitsbereichen" (BGI 505)
- "Bestimmung von sechswertigem Chrom" (BGI 505-5)
- "Bestimmung von Nickel" (BGI 505-10)
- "Bestimmung von Cobalt" (BGI 505-15)
- "Lichtbogenschweißer" (BGI 553)
- "Gasschweißer" (BGI 554)
- "Zertifizierte Atemschutzgeräte" (BGI 693)
- "Nitrose Gase beim Schweißen, Schneiden und bei verwandten Verfahren" (BGI 743)
- "Umgang mit thoriumoxidhaltigen Wolframelektroden beim Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)" (BGI 746)
- "Berufsgenossenschaftliche arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen" (BGG 904)
 - G 2 Blei oder seine Verbindungen
 - G 7 Kohlenmonoxid
 - G 15 Chrom(VI)-Verbindungen
 - G 2 Isocyanate
 - G 32 Cadmium oder seine Verbindungen
 - G 34 Fluor oder seine anorganischen Verbindungen
 - G 38 Nickel oder seine Verbindungen
 - G 39 Schweißrauche
 - G 40 Krebserzeugende Gefahrstoffe – Allgemein

11.3 Verordnungen und Technische Regeln

- Verordnung über gefährliche Stoffe (Gefahrstoffverordnung)
- TRGS 101 "Begriffsbestimmungen"
- TRGS 102 "Technische Richtkonzentrationen (TRK) für gefährliche Stoffe"
- TRGS 402 "Ermittlung und Beurteilung der Konzentration gefährlicher Stoffe in der Luft in Arbeitsbereichen"
- TRGS 403 "Bewertung von Stoffgemischen in der Luft am Arbeitsplatz"
- TRGS 415 "Tragezeitbegrenzungen von Atemschutzgeräten und isolierenden Schutzanzeigen ohne Wärmeaustausch für Arbeit"
- TRGS 420 "Verfahrens- und stoffspezifische Kriterien für die dauerhaft sichere Einhaltung von Luftgrenzwerten (VSK)"
- TRGS 560 "Luftrückführung beim Umgang mit krebserzeugenden Gefahrstoffen"

- TRGS 900 "Grenzwerte in der Luft am Arbeitsplatz – Luftgrenzwerte"
- TRGS 903 "Biologische Arbeitsplatztoleranzwerte – BAT-Werte"
- TRGS 905 "Verzeichnis krebserzeugender, erbgutverändernder und fortpflanzungsgefährdender Stoffe"
- TRGS 910 "Begründungen für die Einstufung der krebserzeugenden Gefahrstoffe in die Gruppen I, II oder III der Liste des Anhangs II Nr. 1.1 Gefahrstoffverordnung"

(zu beziehen bei Carl Heymanns Verlag KG, Luxemburger Straße 449, 50939 Köln)

11.4 DIN-Normen

- DIN EN 481 "Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel"
- E DIN 32507-1 (EN ISO 10882-1)
"Probenahme von partikelförmigen Stoffen und Gasen im Atembereich des Schweißers" Teil 1: Probenahme von partikelförmigen Stoffen
- E DIN 32507-2 (EN ISO 10882-2) Teil 2: Probenahme von Gasen
- E DIN 32507-3 (EN ISO 15011-1)
Teil 3: Laborverfahren zum Sammeln von Rauch und Gasen, die beim Lichtbogenschweißen erzeugt werden
- E DIN 32507-4 (EN ISO 15011-2)
Teil 4: Bestimmung der Emissionsraten außer Ozon
- E DIN 32507-5 (EN ISO 15011-3)
Teil 5: Bestimmung der Ozonkonzentration an festgelegten Messpunkten
- DIN EN 26848 "Wolframelektroden für Wolfram-Schutzgasschweißen und für Plasmaschneiden und -schweißen; Kurzzeichen (ISO 6848:1984); Deutsche Fassung EN 26848:1991"

(zu beziehen bei Beuth-Verlag, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin)

11.5 Sonstige Regeln der Technik

- DVS/VDI-Richtlinie "Lüftungstechnik beim Schweißen und bei verwandten Verfahren"
- DVS 2307 Blatt 2 "Arbeitsschutz beim Flammsspritzen"
- DVS 2307 Blatt 3 "Arbeitsschutz beim Lichtbogenspritzen"
- DVS 2307 Blatt 4 "Arbeitsschutz beim Plasmaspritzen"

(zu beziehen bei DVS-Verlag, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf)

11.6 Andere Literaturquellen

- Eichhorn, F. und Oldenburg, Th.
"Untersuchung der Schweißrauchentstehung beim Lichtbogenhandschweißen und beim Schutzgasschweißen mit mittel- und hochlegierten Zusatzwerkstoffen", DVS-Verlag, Düsseldorf

- Bach, F.W., Haferkamp, H., Vinke, T. und Wittbecker, J.S.
"Ermittlung der Schadstoffemissionen beim thermischen Trennen nach dem Laserprinzip", Schriftenreihe Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Fb 615, Dortmund
- Zschesche, W.
Institut für Arbeits- und Sozialmedizin der Universität Erlangen-Nürnberg
"Vergleichende arbeitsmedizinische Bewertung der Emissionen beim Laserschneiden von Stählen" (Juni 1991)
- Kraume, G. und Zober, A.
"Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz in der Schweißtechnik"
Band 105, DVS-Verlag, Düsseldorf (1989)
- Grothe, I., Hufschlag, F., Kraume, G. und Schreiber, G.
"Arbeitsschutz beim Schweißen"
Band 29, DVS-Verlag, Düsseldorf
- Wittbecker, J.-G.
"Gefahrstoffermittlung bei der CO₂-Laserstrahlbearbeitung"
Reihe 2: Fertigungstechnik Nr. 298, VDI-Verlag, Düsseldorf
- Steiner, H.
"Partikelmeßtechnik beim Plasmaschmelzschneiden",
Reihe 2: Fertigungstechnik Nr. 245, VDI-Verlag, Düsseldorf
- Lauterbach, R.
"Umweltbelastungen beim atmosphärischen Plasmaspritzen"
Reihe Werkstofftechnik, Verlag Shaker
- Spiegel-Ciobanu, V. E.
"Bewertung der Gefährdung durch Schweißrauch und Schutzmaßnahmen"
Schweißen und Schneiden 54 (2002) Heft 2
- Spiegel-Ciobanu, V. E.
"Beurteilung partikelförmiger Stoffe in der Schweißtechnik"
Schweißen und Schneiden 51 (1999) Heft 4