



Optische Strahlenbelastung beim Schweißen – Erfassung und Bewertung

baua: Bericht

**Forschung
Projekt F 2368**

S. Bauer
G. Ott
M. Janßen
M. Schmitz
U. Mückenheim

**Optische Strahlenbelastung
beim Schweißen –
Erfassung und Bewertung**

1. Auflage 2017
Dortmund/Berlin/Dresden

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Teilprojekt 1 „Erfassung der optischen Strahlenbelastung beim Schweißen“ – Projekt F 2368 – im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren: Dr. rer. nat. Stefan Bauer
Dipl.-Ing. (FH) Günter Ott
Dipl.-Ing. (FH) Marco Janßen
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Martin Schmitz
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
Unfallversicherung
Alte Heerstraße 111, 53757 Sankt Augustin

Dipl.-Ing. (FH) Uwe Mückenheim
Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH
Köthener Straße 33a, 06118 Halle (Saale)

Titelfoto: Dipl.-Ing. (FH) Marco Janßen
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Umschlaggestaltung: Susanne Graul
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin

Herstellung: Druck & Verlag Kettler GmbH, Bönen

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)
Friedrich-Henkel-Weg 1 – 25, 44149 Dortmund
Postanschrift: Postfach 17 02 02, 44061 Dortmund
Telefon 0231 9071-2071
Telefax 0231 9071-2070
E-Mail info-zentrum@buaa.bund.de
Internet www.buaa.de

Berlin: Nöldnerstraße 40 – 42, 10317 Berlin
Telefon 030 51548-0
Telefax 030 51548-4170

Dresden: Fabricestraße 8, 01099 Dresden
Telefon 0351 5639-50
Telefax 0351 5639-5210

Die Inhalte der Publikation wurden mit größter Sorgfalt erstellt und entsprechen dem aktuellen Stand der Wissenschaft. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte übernimmt die BAuA jedoch keine Gewähr.

Nachdruck und sonstige Wiedergabe sowie Veröffentlichung, auch auszugsweise, nur mit vorheriger Zustimmung der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin.



doi:10.21934/buaa:bericht20170523 (online)

www.buaa.de/dok/8713728

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzreferat	7
Abstract	8
1 Einführung	9
2 Projektziele	11
3 Aktueller Wissensstand	13
3.1 Gefährdungen beim Schweißen	13
3.2 Erfassung der Strahlenbelastung	13
3.3 Rechtsgrundlage für optische Strahlung	14
3.4 Berufskrankheiten bei Schweißer	15
3.5 Arbeitsschutz beim Schweißen	15
3.6 Handlungsbedarf	16
4 Physikalisch-technische Grundlagen	17
4.1 Projektrelevante radiometrische Strahlungsgrößen	17
4.2 Expositionsgrenzwerte und Wichtungsfunktionen	19
4.2.1 Ungewichtete Expositionsgrenzwerte	19
4.2.2 Effektive Expositionsgrenzwerte	21
4.3 Der Lichtbogen	23
4.3.1 Der Pinch-Effekt	23
4.3.2 Lichtbogenarten	24
5 Schweiß- und Schneidverfahren	26
5.1 Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)	27
5.2 Metallschutzgasschweißen (MSG)	27
5.2.1 Metallaktiv- und Metallinertgasschweißen (MAG/MIG)	27
5.2.2 Cold Metal Transfer Schweißen (CMT)	28
5.3 Lichtbogenhandschweißen (MMA)	28
5.4 Plasma-Pulver-Auftragschweißen (PTA)	29
5.5 Laserschweißen	30
5.5.1 Faserlaser	30
5.5.2 CO ₂ -Laser	31
5.6 Plasmaschneiden	31
6 Experimentelles	32
6.1 Stromquellen und Hilfsstoffe	32
6.2 Prozessdokumentation	34
6.3 Optische Messgeräte	35
6.4 Rohrschweißvorrichtung und Messaufbauten	36

6.5	Zeitlicher Verlauf der Schweißströme	38
6.6	Prinzipielle Datenanalyse	39
6.6.1	Aufbereitung der Rohdaten	39
6.6.2	Statistik und Fehlerbetrachtung	40
6.6.3	Auswertung der Leistungsabhängigkeit	41
7	Grundlegende Voruntersuchungen	43
7.1	Transmission der Quarzglas Schutzscheiben	43
7.2	Interrater-Reliabilität	43
7.3	Intrarater-Reliabilität	45
7.4	Photometrisches Abstandsgesetz	47
7.5	Raumwinkelabhängige Strahlungsemission des Lichtbogens	48
8	Optische Strahlung beim Lichtbogenschweißen	51
8.1	Wolfram-Inertgasschweißen	51
8.1.1	Materialspezifische Schweißspektren	51
8.1.2	Leistungsabhängige UV-Bestrahlungsstärken und Expositionsdauern	52
8.1.3	Blaulichtgefährdung	55
8.1.4	Infrarote Strahlenbelastung	57
8.1.5	Variation des Elektrodenabstandes	58
8.2	Metallaktivgasschweißen	60
8.2.1	MAG-Schweißspektren von Bau- und Edelstahl	60
8.2.2	Leistungsabhängige UV-Bestrahlungsstärken und Expositionsdauern	61
8.2.3	Blaulichtgefährdung	63
8.2.4	Infrarote Strahlenbelastung	64
8.3	Metallinertgasschweißen	66
8.3.1	Schutzgasspezifische Schweißspektren	66
8.3.2	Leistungsabhängige UV-Bestrahlungsstärken und Expositionsdauern	67
8.3.3	Gefährdungen durch sichtbare und infrarote Strahlungsanteile	68
8.4	Cold Metal Transfer Schweißen	71
8.4.1	CMT-Puls Schweißspektren	71
8.4.2	Leistungsabhängige UV-Strahlungsemission und Expositionsdauern	72
8.4.3	Blaulichtgefährdung	73
8.4.4	Infrarote Strahlenbelastung	75
8.5	Lichtbogenhandschweißen	77
8.5.1	Spektrale Bestrahlungsstärke bei basischer und rutiler Ummantelung	77
8.5.2	UV-Strahlungsemission als Funktion der Ummantelungsdicke	78
8.5.3	Blaulichtgefährdung	80
8.5.4	Infrarote Strahlenbelastung	81
8.6	Plasma-Pulver-Auftragschweißen	82
8.6.1	Spektrale Bestrahlungsstärke bei Baustahl	82
8.6.2	Leistungsabhängige UV-Strahlungsemission und Expositionsdauern	83
8.6.3	Blaulichtgefährdung und infrarote Strahlenbelastung	84

9	Vergleich der Strahlungsemission beim Lichtbogenschweißen	86
9.1	UV-Anteilsverhältnisse der Lichtbogenschweißverfahren	86
9.2	Verfahrens- und materialabhängige Schweißspektren	87
9.3	Leistungsabhängige integrale Strahlungsemission	89
9.3.1	Ultravioletter Spektralbereich	89
9.3.2	Spektraler Bereich der Blaulichtgefährdung	90
9.3.3	Infrarote Strahlungsanteile	91
9.4	Expositionsdauern im Vergleich	92
9.5	Einfluss der Lichtbogenart	94
9.6	Schutzgaseffekte	95
10	Validierung der Emissionsmodelle	96
11	Zeitabhängigkeit der UV-Strahlungsbelastung	101
11.1	Zünden des Lichtbogens	101
11.2	Zeitliche Fluktuationen der emittierten UV-Strahlung	103
11.3	Personendosimetrie	105
12	Optische Strahlung bei Laserschweißverfahren	108
12.1	CO ₂ -Laserschweißen	108
12.1.1	CO ₂ -Laserschweißspektren von Bau- und Edelstahl	108
12.1.2	Leistungsabhängige UV-Strahlungsemission und Expositionsdauern	109
12.1.3	Sichtbare und infrarote Strahlungsanteile	110
12.2	Faserlaserschweißen	112
12.2.1	Materialspezifische Laserschweißspektren	112
12.2.2	Leistungsabhängige UV-Strahlungsemission und Expositionsdauern	113
12.2.3	Gefährdungen durch sichtbare und infrarote Strahlungsanteile	114
12.3	Resümee Laserschweißverfahren	115
13	Strahlungsemission beim Plasmaschneiden	117
13.1	Spektraler Bestrahlungsstärkeverlauf	117
13.2	Schneidstromabhängige UV-Strahlungsemission	118
13.3	Belastung durch sichtbare und infrarote Strahlungsanteile	118
14	Zusammenfassung und Ausblick	122
	Literaturverzeichnis	125
	Anhang	132
	A. Stromstärkenabhängigkeit der spektralen Bestrahlungsstärke	132
	B. Tabellarische Übersicht der Schweißparameter	133
	C. Berechnungsbeispiele der Strahlungsexposition	144
	Danksagung	146

Optische Strahlenbelastung beim Schweißen – Erfassung und Bewertung

Kurzreferat

Die Fügetechnik Schweißen ist das am häufigsten in der Industrie verwendete Verfahren zum thermischen Verbinden zweier Metalle. So belegt eine Studie, dass 2011 in Deutschland ca. 260.000 Arbeitnehmer beruflich mit Schweißen zu tun hatten. Die Variantenvielfalt reicht hierbei vom Widerstands- über Lichtbogenschweißen bis hin zu modernen Hybridmethoden mit Laserstrahlung. Trotz der bereits jahrhundertelangen Entwicklung findet auch heute noch ein stetiger Fortschritt auf diesem Gebiet statt, z. B. halten neue Kaltschweißverfahren Einzug in den betrieblichen Alltag.

Die für dieses Forschungsprojekt neben Laserschweißen und Plasmaschneiden hauptsächlich untersuchten Lichtbogenschweißverfahren gehen einher mit einer hohen Emission optischer Strahlung und sind dadurch mit einem großen Gefährdungspotenzial für Schweißer aber auch für andere Beschäftigte verbunden. Diese Tatsache ist seit langem bekannt und wurde vor allem in den 1970er und 1980er Jahren umfangreich belegt. In den folgenden Jahren nahm dann jedoch das Interesse am Strahlenschutz beim Schweißen stark ab, so dass die heutige Datenbasis aufgrund des technologischen Fortschritts zu einem Großteil überholt ist. Hinzu kommt, dass modernes optisches Messequipment verbesserte und teilweise auch erweiterte Untersuchungsmöglichkeiten bietet als dies z. B. noch vor 30 Jahren der Fall war.

Übergeordnetes Ziel des Forschungsprojektes war eine umfassende Aktualisierung der Datengrundlage zur Strahlungsemission beim Schweißen, um den Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch optische Strahlung beim Schweißen zu verbessern aber auch um z. B. Sicherheitsfachkräften eine Hilfestellung zur Gewährleistung eines sicheren Arbeitsplatzes geben zu können.

Der vorliegende Forschungsbericht beinhaltet die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen, bei denen unter quasi Laborbedingungen grundlegende Schweißparameter wie Stromstärke und Lichtbogenlänge auf ihren Zusammenhang mit der optischen Strahlungsemission untersucht wurden. Der Fokus lag hierbei auf praxisrelevanten Schweißverfahren und Prozessparametern.

Es zeigte sich, dass bei hohen Schweißstromstärken der aktinische Expositionsgrenzwert bereits innerhalb von Bruchteilen einer Sekunde überschritten wird. (Blau-licht-) Gefährdung durch sichtbares Licht weist ebenfalls ein hohes Schädigungspotenzial auf, wohingegen der Anteil infraroter Strahlung geringer ist aber dennoch nicht vernachlässigt werden darf. Insgesamt sind Verfahren mit abschmelzender Elektrode am emissionsintensivsten.

Die bei der Analyse der Strahlungsdaten gewonnenen mathematischen Emissionsmodelle (Bestrahlungsstärke als Funktion der Schweißstromstärke) wurden abschließend hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in der betrieblichen Praxis validiert.

Schlagwörter:

Lichtbogenschweißen, Strahlenbelastung, künstliche optische Strahlung, Emissionsmodell, Gefährdungsbeurteilung, Expositionsgrenzwerte, Laserschweißen, Plasmaschneiden

Optical Radiation Exposure During Welding – Recording and Assessment

Abstract

The joining technology welding is the most common method used in industry for thermally joining two metals. A recent study shows that around 260000 German employees had to deal with welding in 2011. Thereby, the variety of different welding techniques ranges from resistance and arc welding to modern hybrid methods that use laser radiation. Despite the century-old development, there is still a steady progress within this field, for example, new cold welding techniques find their way into the in-plant daily routine.

The arc welding methods (aside of laser welding and plasma cutting) that are mainly investigated within this research report are accompanied by a high emission of optical radiation and thus connected to a high hazardous potential for welders and other employees. This finding is well known for a long time and has been documented extensively in the 1970s and 1980s. Unfortunately, in the following years, the interest in radiation protection during welding decreased so that due to technological progress today's data base is largely outdated. In addition, modern optical devices offer improved and more advanced possibilities of investigation as it was the case, for example, 30 years ago.

Main goal of this research project was a comprehensive update of the database of radiation emission during welding, on the one hand, to improve the optical radiation protection of welders, on the other hand, to be able to provide information for employers and security specialists to ensure a safe workplace.

This research report includes the results of the experimental measurements that were conducted under quasi laboratory conditions and that reveal the dependence of irradiance from basic welding parameters such as welding current and arc length. Thereby, the main interest focused on welding techniques and parameters used in practice.

It was found that the actinic exposure limit value is exceeded within a split second for high welding currents. Radiation hazards due to visible light, often referred to as Blue Light Hazard, have a high potential for eye damage whereas the portion of infrared radiation is lower but may not be neglected. Overall, welding techniques with a melting electrode are those with the highest radiation emission.

Finally, the mathematical fit models (irradiance as a function of welding current) that were achieved while analyzing the experimental data were validated in practice with regard to applicability.

Key words:

arc welding, radiation exposure, artificial optical radiation, emission model, risk assessment, exposure limit values, laser welding, plasma cutting

1 Einführung

Die ältesten archäologischen Funde zum thermischen Verbinden von Metallen gehen zurück auf die Sumerer und Hethiter des 3. Jahrtausends vor Christus und basieren auf Arbeiten aus Gold, Silber und Kupfer. Im deutschen Sprachgebrauch taucht der Begriff „Schweißen“ in etwa zwischen 800 – 1000 n. Chr. in Form des altdeutschen Wortes „sueizan“ (heiß machen, erhitzen) auf. Die technologische Entwicklung war bis zu diesem Zeitpunkt allerdings noch nicht weit fortgeschritten.

Für die heutige Vielfalt an Schweißverfahren, die zum Verbinden von Metallen, Gläsern und Kunststoffen eingesetzt werden, waren noch etliche Entwicklungsschritte notwendig, die ab dem 19. Jahrhundert z. B. durch die Entdeckung des Gases Acetylen und des Verfahrens der Luftverflüssigung verstärkt einsetzten. In den letzten Jahren war sicherlich die Verwendung von Lasern zum Schweißen oder spezielle „kalte Schweißverfahren“ wie etwa Cold Metal Transfer (CMT-) Schweißen von besonderer Bedeutung. Heutzutage muss sich der Schweißfachingenieur je nach Werkstoff, Bauteilgeometrie, Zugang zur Schweißstelle, Qualitätsanforderungen an die Schweißnaht, Stückzahl des Werkstückes, entstehenden Kosten, etc. Gedanken über die Verfahrensauswahl machen.

Neben den verfahrenstechnischen Anforderungen müssen aber auch Arbeitsschutzaspekte berücksichtigt werden, da die möglichen Gefährdungen beim Schweißen z. B. durch elektrische Ströme, Gase, Rauche und Dämpfe, aber auch durch Funken, Flammen und Lärm vielfältig sind.

Mit allen Lichtbogenschweißverfahren (und auch einigen Laserschweißverfahren oder dem Plasmaschneiden) einhergehend, ist außerdem die Emission von optischer Strahlung im ultravioletten, sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich, die als unerwünschtes und dennoch unvermeidliches Nebenprodukt auftritt. Dabei können die Intensitäten dieser Strahlungsanteile so hoch sein, dass entsprechende Arbeitsschutzgrenzwerte (OStrV) im Sekundenbereich und sogar darunter überschritten werden. Ein sicherer Einsatz der Schweißverfahren ist somit nur bei Anwendung von Schutzmaßnahmen möglich.

Diese Tatsache ist allerdings nicht neu und zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten beschäftigten sich bereits mit den Gefährdungen beim Schweißen. Die technologische Entwicklung der Schweißtechnik schreitet jedoch ständig voran, so dass die Datenlage zur Strahlungsemission verschiedener Schweißverfahren, die zu einem Großteil auf Messungen aus den 80er Jahren beruht, als veraltet und für eine fundierte Gefährdungsbeurteilung als unzureichend angesehen werden muss.

Darüber hinaus gab es auch bei der optischen Messtechnik zur Erfassung der Strahlungsbelastung beim Schweißen erhebliche Fortschritte, so dass nun schnelle und hochpräzise Messungen geringster Strahlungsanteile auch über große Distanzen hinweg möglich sind.

Insgesamt spricht dies für eine neue und umfassende Untersuchung der optischen Strahlungsemission beim Schweißen, die den heutigen Stand der Technik widerspiegelt. Durch die Neubewertung der Strahlungsbelastung von Schweißern aber auch von anderen Beschäftigten an benachbarten Arbeitsplätzen kann der Schutz vor optischer Strahlung verbessert und Sicherheitsfachkräften eine vereinfachte Gefährdungsbeurteilung ermöglicht werden.

Struktur des Forschungsberichtes

Der vorliegende Forschungsbericht ist im Weiteren aus den folgenden Kapiteln aufgebaut:

Kapitel	Kurzbeschreibung
2	Kapitel 2 „Projektziele“ gibt die Idee des Forschungsprojektbündels wider und beschreibt die Vorgehensweise im ersten Teilprojekt F 2368.
3	Eine Übersicht der Literaturrecherche ist zusammen mit den daraus folgenden Konsequenzen, dem Handlungsbedarf, in Kapitel 3 „Aktueller Wissensstand“ gegeben.
4, 5	Die beiden Kapitel 4 „Physikalisch-technische Grundlagen“ und 5 „Schweiß- und Schneidverfahren“ geben Einblicke in das zum Verständnis dieses Forschungsberichtes nötige Grundlagenwissen sowohl zu Expositionsgrenzwerten und Wichtungsfunktionen als auch zu den untersuchten Schweißverfahren.
6	Das verwendete Messequipment sowie einige grundsätzliche Informationen zur Datenauswertung sind in Kapitel 6 „Experimentelles“ erörtert.
7	Einige für dieses Forschungsprojekt notwendige Voruntersuchungen sind in Kapitel 7 „Grundlegende Voruntersuchungen“ zusammengefasst.
8, 9, 10	Im Kapitel 8 „Optische Strahlung beim Lichtbogenschweißen“ werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen beim Lichtbogenschweißen präsentiert, in Kapitel 9 verglichen und in Kapitel 10 die eingeführten mathematischen Emissionsmodelle validiert.
11	Exemplarische Zeitabhängigkeiten beim Lichtbogenschweißen sind im Kapitel 11 aufgeführt.
12, 13	Kapitel 12 und 13 geben die experimentellen Daten zum Laserschweißen und Plasmaschneiden wider.
14	Der Forschungsbericht endet mit einer „Zusammenfassung und Ausblick“ in Kapitel 14 bevor nach einer kurzen „Danksagung“ im „Anhang“ ergänzende Informationen aufgeführt sind.

2 Projektziele

Das Forschungsvorhaben zur „Erfassung der optischen Strahlenbelastung beim Schweißen“ ist Teil eines Projektbündels mit dem Titel „UV-Belastung beim Schweißen“. Dessen übergeordnetes Ziel besteht darin, den Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch optische Strahlung beim Schweißen (und generell vor künstlichen optischen Strahlungsquellen) zu verbessern, wobei der Schwerpunkt auf ultravioletten Strahlungsanteilen liegt. Aber auch Strahlung anderer Wellenlängenbereiche stellt ein großes Gefährdungspotenzial dar, insbesondere Strahlung im sichtbaren Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Das Projektbündel untergliedert sich in folgende drei Teilprojekte:

Teilprojekt 1: „Erfassung der optischen Strahlenbelastung beim Schweißen“

Zentrale Rolle dieses Teilprojektes besteht in der Messung der Emission optischer Strahlung bei verschiedenen Schweißverfahren mit modernem Messequipment, wobei u. a. die Schweißstromstärke variiert wird. Diese Datenbasis zur tatsächlichen Exposition soll für eine sachgerechtere Gefährdungsbeurteilung dienen und daraus branchenspezifische Expositionsdauern an typischen Schweißarbeitsplätzen abgeleitet werden.

Teilprojekt 2: „Biologische Wirksamkeit gepulster und intermittierender inkohärenter optischer Strahlung“

Für die Bewertung der beim Schweißen auftretenden, stark intermittierenden optischen Strahlung werden Expositionsgrenzwerte für kontinuierliche inkohärente optische Strahlung (IOS) verwendet. Bei gepulster IOS werden Regelungen aus dem Bereich der Laserstrahlung benutzt. Inwieweit diese beiden Vorgehensweisen aufgrund der mangelhaften Datenbasis gerechtfertigt sind, soll durch Untersuchung der Auswirkungen von gepulster IOS auf biologisches Gewebe abgeklärt werden. Vorab dient ein wissenschaftliches Gutachten zur Beantwortung grundlegender Fragestellungen.

Teilprojekt 3: „Anforderungen an Schutzkomponenten beim Schweißen“

Die Ergebnisse aus den vorangegangenen Teilprojekten 1 und 2 sollen genutzt werden, um praxistaugliche Empfehlungen für Schutzkomponenten beim Schweißen abzuleiten und um Hilfestellungen zur Gestaltung sicherer und gesundheitsgerechter Arbeitsumgebungen zu geben.

Um die Ziele des Teilprojektes 1 zu erreichen, wird zunächst der aktuelle Wissensstand ermittelt. Nachdem das Studiendesign des experimentellen Aufbaus zur Erfassung der optischen Strahlung entwickelt worden sein wird, kann mit der Datenaufnahme in einer Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt begonnen werden. Die Auswertung der Daten soll Emissionsmodelle liefern, die anschließend in der Industrie auf ihre Gültigkeit und Genauigkeit überprüft werden. Abschluss des Teilprojektes 1 bilden Transfermaßnahmen, beginnend mit diesem Forschungsbericht.

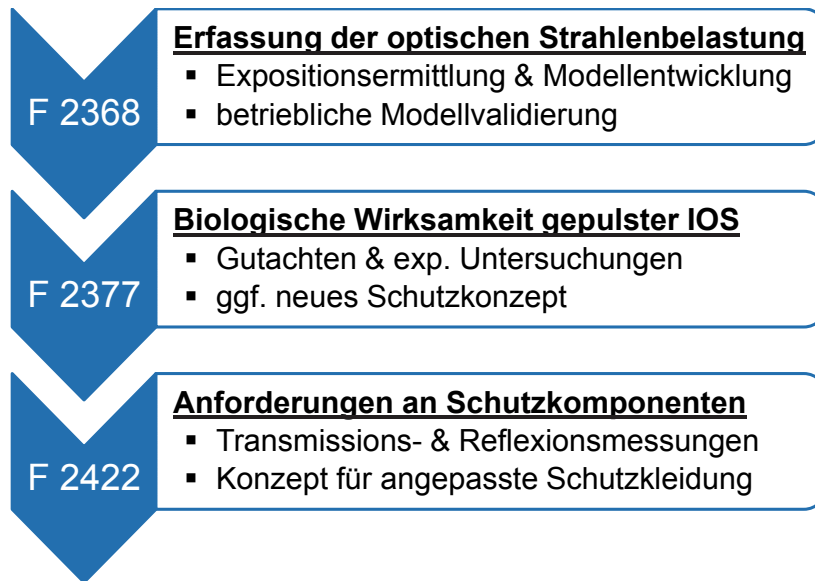


Abb. 2.1 Schematische Abfolge und inhaltliche Übersicht der Forschungsvorhaben im Projektbündel „UV-Belastung beim Schweißen“

Aufgrund der Komplexität der Fügechnik Lichtbogenschweißen ist es im Verlauf des Forschungsprojektes nicht möglich, sämtliche Einstellmöglichkeiten und Parameter (umfassend) zu variieren sowie deren Korrelationen untereinander zu überprüfen. Nach eingehender Beratung mit Experten der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt wird daher der zu untersuchende Parametersatz auf praxisübliche Werte und Kombinationen bei ausgewählten Schweißverfahren beschränkt. Eine schematische Übersicht des Messplanes ist in Abb. 2.2 dargestellt.



Abb. 2.2 Messplanskizze zum Teilprojekt F 2368 mit den grundlegenden Untersuchungsvorhaben bzw. Parametervariationen. Ein Teil davon soll abschließend in der betrieblichen Praxis überprüft werden.

3 Aktueller Wissensstand

3.1 Gefährdungen beim Schweißen

Eine der nach DIN 8593-6:2003-09 (DIN 8593-6) in neun Kategorien unterteilten Füge-techniken ist Schweißen. Im Jahr 2011 wurde diese Methode deutschlandweit von ca. 260 000 Beschäftigten ausgeübt (MOOS2013) und ist somit im produzierenden und verarbeitenden Gewerbe weit verbreitet. Allerdings gehen damit für den Schweißer eine Vielzahl tatsächlicher und möglicher Gefährdungen einher, so z. B. durch radioaktive Strahlenexposition bei der Verwendung thoriumhaltiger Stabelektroden (REICHEL1998; TIETZE1998; LUDWIG2002), durch die Entstehung toxischer Gase wie Ozon und Chrom (DAHLBERG1971; DENNIS1997), durch alveolengängige Schweißrauche (SPIEGEL-CIOBANU2011) oder durch die häufig verwendeten sehr hohen Schweißströme (KANT2013). Potenzielle Brand- oder Explosionsgefahren z. B. beim Acetylschweißen oder starke Lärmbelastungen wie beim gepulsten Lichtbogenschweißen dürfen ebenfalls nicht vernachlässigt werden (KRODER2003; WEIKERT2010b). Insgesamt gab es im Zeitraum von 2004 bis 2011 in Deutschland 63 435 Unfälle, die im Zusammenhang mit beruflichem Schweißen stehen (WEIKERT2013).

Eine ebenso große Gefährdung für Schweißer entsteht durch die vom Lichtbogen emittierte intensive ultraviolette (UV), sichtbare (VIS, engl.: visible) und infrarote (IR) Strahlung, die für Arbeiten im Innenraum das höchste Potenzial für eine Überschreitung bestehender Grenzwerte aufweist (ICNIRP2010).

3.2 Erfassung der Strahlenbelastung

Bereits Mitte des 20. Jahrhunderts bestand Interesse an der UV-Strahlungsemission des Lichtbogens z. B. beim Lichtbogenhandschweißen (KINSEY1943) oder beim Metallinertgasschweißen (FERRY1954). Da das optische Messequipment zu dieser Zeit noch große Messungenauigkeiten aufwies, ist die Aussagekraft solcher Untersuchungen aus heutiger Sicht eher fragwürdig. Erst in den 70er und 80er Jahren kam es zu einer Verbesserung der Messgeräte, einhergehend mit einer Vielzahl an Publikationen zur UV-Expositionsermittlung beim Lichtbogenschweißen.

Bis heute wurden bei den gängigen Lichtbogenschweißverfahren einige Schweißparameter variiert (TENKATE1998) und ein möglicher Zusammenhang hinsichtlich der emittierten UV-Strahlung verifiziert.

- Es konnte nachgewiesen werden, dass eine Erhöhung des Schweißstromes bzw. der Schweißspannung eine Zunahme der UV-Emission bewirkt (HORSTMAN1976; BENNETT1980; SLINEY1980).
- Auch ein verkleinerter Elektrodenabstand führt zu einer größeren UV-Belastung (BARTLEY1981).
- Nimmt die Entfernung r zum Lichtbogen zu, so sinkt die gemessene Intensität mit r^{-2} (HORSTMAN1976; OKUNO2001; CHANG2008).

- Das Schweißen unterschiedlicher Materialien wie z. B. Stahl oder Aluminium führt ebenfalls zu einer veränderten UV-Strahlenbelastung (BARTLEY1981; OKUNO1985; HIETANEN1998).
- Auch die Verwendung verschiedener Schutzgase (HINRICHS1978; DENNIS1997) oder der entstehende Schweißrauch (LYON1976; REKUS1991) beeinflussen die Intensität der emittierten UV-Strahlung.
- Beim Lichtbogenhandschweißen sind zudem die verwendete Stabelektrode sowie ihr Abschmelzverhalten von entscheidender Bedeutung für die Strahlungsemission (EMMETT1976; INGRAM1977).
- Selbst die räumliche Abstrahlcharakteristik des Lichtbogens ist inhomogen und zeigt ein Maximum bei einem Detektionswinkel von ca. 60° zur Schweißoberfläche (HORSTMAN1979; OKUNO2001).
- Zusätzlich ist zu beachten, dass bei den bisher aufgeführten Parametervariationen das verwendete Schweißverfahren einen erheblichen Einfluss auf die emittierte UV-Strahlung aufweist (OKUNO1985; OKUNO1987; MARIUTTI1988).

Insgesamt zeigt dies die Komplexität und Schwierigkeit auf, die tatsächliche UV-Strahlenexposition beim Schweißen zu ermitteln. Handlungsbedarf von staatlicher Seite zum Schutz des Arbeitnehmers war hier zwingend erforderlich.

3.3 Rechtsgrundlage für optische Strahlung

Das Europäische Parlament und der Rat der Europäischen Union reagierten 2006 im Hinblick auf den Arbeitsschutz und nahmen künstliche optische Strahlung in die Reihe der für den Beschäftigten potenziell gefährlichen physikalischen Einwirkungen auf. Als Konsequenz der Rahmenrichtlinie 89/391/EWG (89/391/EWG), national umgesetzt durch das Arbeitsschutzgesetz (ArbSchG), wurde durch das Inkrafttreten dessen 19. Einzelrichtlinie 2006/25/EG, welche die Mindestvorschriften zum Schutz der Arbeitnehmer vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung beschreibt, das erste Mal europaweit ein Grenzwertkonzept zur Gefährdungsbeurteilung bei der Arbeit mit künstlichen optischen Strahlungsquellen geschaffen (2006/25/EG). Die Umsetzung dieser Richtlinie in deutsches Recht erfolgte im Jahr 2010 durch die „Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – OStrV)“ (OStrV), welche anschlie-

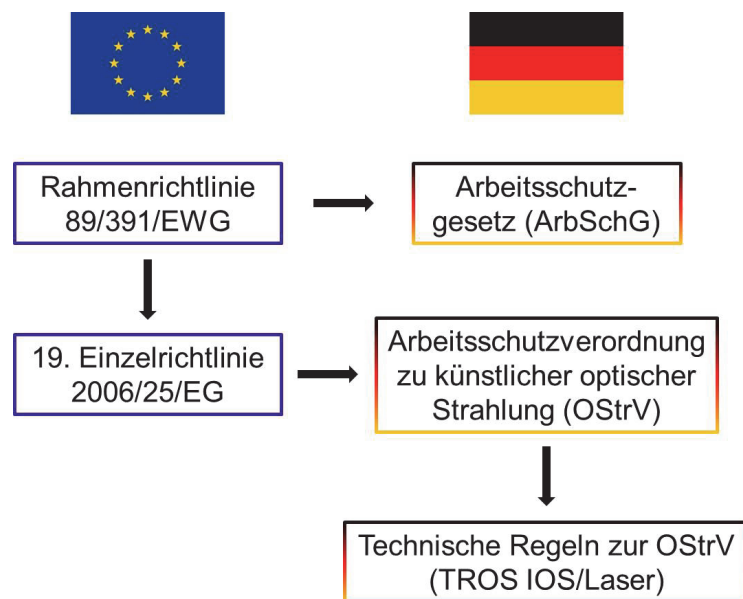


Abb. 3.1 Rechtsgrundlage für den Schutz von Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung

ßend durch die „Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung“ einerseits für kohärente Laserstrahlung (TROSLASER) als auch für inkohärente optische Strahlung (TROSIOS) für den Arbeitgeber konkretisiert wurde. Letztere enthält Beispiele für eine Vielzahl an Arbeitsstätten z. B. bei der Glasherstellung, bei der Prüfung von Werkstoffen oder bei der Metallverarbeitung zu der auch die Schweißtechnik zählt.

3.4 Berufskrankheiten bei Schweißer

Bei Schweißern können im Falle gesundheitlicher Probleme eine Reihe von Berufskrankheiten in Erwägung gezogen werden (BRÜNING2014), ob aber gesundheitliche Schäden wie etwa Hautkrebs durch berufliche Exposition mit optischer Strahlung als Berufskrankheit anerkannt werden, steht noch nicht fest, obwohl die Anzahl der durch Hauterkrankungen anerkannten Berufskrankheiten bei der Berufsgruppe der Schweißer im Zeitraum von 2006 bis 2012 von anfangs 23 auf 149 Fälle angewachsen ist (WEIKERT2014). Ein entsprechender Zusammenhang wird allerdings als sehr wahrscheinlich angesehen (DIXON2004; BGETEM2009; RADESPIELTRÖGER2011) jedoch ist die Datenlage zur Anerkennung als Berufskrankheit nicht hinreichend um abgesichert feststellen zu können, ob eine erhöhte Gefährdung für Schweißer vorliegt. Die bisherige Möglichkeit einer Einzelfallentscheidung (SIEKMANN2011; WITTLICH2011; MARSCHNER2012) ist aktuell nicht mehr gegeben.

Um eine endgültige Entscheidung für oder wider eine Anerkennung einer Berufskrankheit durch künstliche optische Strahlung treffen zu können, müssen die UV-Expositionsbedingungen weiter erforscht werden. Dafür ist eine fundierte und vor allem aktualisierte Datenbasis der tatsächlichen Strahlungsexposition von Schweißern und Beschäftigten in der Umgebung von Schweißarbeitsplätzen unbedingte Voraussetzung.

3.5 Arbeitsschutz beim Schweißen

Die Tatsache, dass Gefährdungen durch künstliche UV-Strahlung bei der Arbeit bestehen, war auch schon vor der gesetzlichen Regelung 2006 bekannt (FISCHER1985). Für einige Schweißverfahren wurden so z. B. in Abhängigkeit vom Schweißstrom oder vom verwendeten Werkstoff entsprechende persönliche und technische Schutzmaßnahmen empfohlen (HÖLSKEN1975).

Heutzutage gibt es eine Reihe von Informationsquellen zum Schutz vor künstlicher optischer Strahlung etwa in Form von unverbindlichen Leitfäden (ICNIRP2004; EU-KOMMISSION2010; AKNIR2011; AKNIR2013; ICNIRP2013). Speziell für schweißtechnische Arbeiten gelten sowohl die Regeln der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung DGUV Regel 100 – 500 zum „Betreiben von Arbeitsmitteln“, Kapitel 2.26 (DGUV Regel 100-500) die seit 2004 die Berufsgenossenschaftliche Vorschrift BGV D1 (BGVD1) (mit Inhalten aus vorheriger VBG 15) ersetzt, als auch Technische Regeln für Gefahrstoffe (TRGS528) branchenübergreifend. Die Handlungshilfe „Einrichtung von Schweißwerkstätten unter Arbeitsschutz Aspekten“ (BAuA2001) liefert weitere detaillierte Informationen zur Sicherheitsthematik beim Schweißen, ebenso wie das „Sicherheitshandbuch Schweißarbeiten“ (WEIKERT2010a). Aber auch spe-

ziellere Literatur wie etwa zur Arbeitssicherheit beim Lichtbogenschweißen (BGHM2013; KÄLBLE2013) oder zu „Schutzmaßnahmen zur Minimierung der Gefahrstoffexposition beim Schutzgasschweißen“ (PANGERT2007) existiert.

Der Schutz des Schweißers vor gefährlicher inkohärenter optischer Strahlung ist somit grundsätzlich gewährleistet. Dennoch gibt es einige Schwachstellen, die überwiegend auf eine veraltete und teilweise überholte Datenbasis zur UV-Strahlungsbelastung zurückzuführen sind. Diese Problematik soll durch Teilprojekt 1 behoben werden damit eine Gefährdungsbeurteilung von Schweißarbeitsplätzen nach aktuellem Stand der Technik möglich wird.

3.6 Handlungsbedarf

Da sowohl die optische Messtechnik als auch die praxisüblichen Schweißverfahren permanent verbessert bzw. weiterentwickelt werden, ist eine regelmäßige Überprüfung der optischen Strahlungsgefährdung sinnvoll. Neuere Techniken wie CMT- (Cold Metal Transfer) oder Laserhybridschweißen nehmen einen immer größer werdenden Stellenwert in der Industrie ein und müssen hinsichtlich ihrer Strahlungsgefährdung umfassend beurteilt werden (MARZEC2013).

Aktuellere Studien zeigen, dass Lichtbogenschweißen eine hochdynamische Füge-technik mit zeitlich stark fluktuierender Strahlungsemission ist (SUTTER1995a; SUTTER1995b; PENG2007b; PENG2007a). Vor allem der Zündvorgang des Lichtbogens steht hierbei im Fokus, da vermutlich in den ersten Millisekunden eine erhöhte Strahlungsbelastung auftritt. Dies kann bei häufigen Schweißungen zu einem großen Problem für Schweißer oder Beschäftigte an benachbarten Arbeitsplätzen werden.

Bisher nur wenig beachtet, sind Gefährdungen durch sichtbare Strahlung (Licht), auch als Blaulichtgefährdung bezeichnet, oder durch thermische Strahlung obwohl Studien eindeutig belegen, dass eine Überschreitung der vorhandenen Grenzwerte bereits innerhalb weniger Sekunden möglich ist (OKUNO1986; OKUNO2002; OKUNO2010; ROSSI2010).

Falls ein Intensitätsmaximum in der azimuthalen und polaren Abstrahlcharakteristik des Schweißlichtbogens (NAKASHIMA2016) in Abhängigkeit vom Anstellwinkel der Schweißelektrode vorliegen sollte, könnte auf einfache Weise die Strahlungsbelastung für Schweißer verringert werden.

Bisher kaum untersucht ist die an Wänden oder Schweißvorhängen reflektierte bzw. gestreute optische Strahlung (ULLRICH1976), die eine potenzielle Gefährdung für ungeschützte Haut z. B. im Nacken des Schweißers oder für Passanten von Schweißarbeitsplätzen wie etwa einem Gabelstaplerfahrer darstellt (BARTH1990; TENKATE1997; IFA2011).

Abschließend sei angemerkt, dass die fundamentalen physikalischen Prozesse, die zur Emission von UV-Strahlung beim Schweißen führen, teilweise immer noch Gegenstand der Grundlagenforschung sind (GARCIA-GUINEA2004; ZHANG2009). Ein tiefer gehendes Verständnis der zu Grunde liegenden Plasmaphysik würde die Möglichkeit bieten, Schweißverfahren hinsichtlich ihrer UV-Emission zu optimieren oder persönliche Schutzausrüstung den gegebenen Anforderungen besser anzupassen. Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) verfolgt allerdings keine Interessen im Bereich der Grundlagenforschung oder der Technologieentwicklung.

4 Physikalisch-technische Grundlagen

In den folgenden Kapiteln wird kurz auf einige wichtige physikalisch-technische Grundlagen eingegangen, die zum Verständnis des Forschungsberichtes erforderlich sind. Dies kann jedoch weder den Anspruch der Vollständigkeit noch einer detaillierten Beschreibung erfüllen. Der interessierte Leser sei deswegen an dieser Stelle auf weiterführende Literatur verwiesen (SUTTER2008; HECHT2014).

4.1 Projektrelevante radiometrische Strahlungsgrößen

Allgemein versteht man unter dem Begriff „Strahlungsgrößen“ optische Größen, die zur Charakterisierung der von Strahlungsquellen emittierten Strahlung notwendig sind. Das elektromagnetische Spektrum wird dabei in verschiedene Wellenlängenbereiche unterteilt, von denen in der Radiometrie zusätzlich zur sichtbaren Strahlung der Photometrie noch ultraviolette und infrarote Strahlungsanteile untersucht werden.

Elektromagnetische Strahlung zwischen 100 nm und 1 mm bezeichnet man als optische Strahlung (2006/25/EG), siehe Abb. 4.1. Davon für den Menschen sichtbar ist nur ein sehr kleiner Spektralbereich zwischen etwa 380 und 780 nm (VIS, Licht). Bei kürzeren Wellenlängen handelt es sich um ultraviolette (UV-) Strahlung, ab 780 nm spricht man von Infrarotstrahlung (IR). Häufig wird der Begriff „Licht“ im Zusammenhang mit IR- oder UV-Strahlung falsch verwendet. Licht umfasst aber ausschließlich sichtbare Strahlungsanteile.

Grundlegende physikalische Größe zur Beschreibung von Strahlung ist neben der Wellenlänge λ bzw. der Frequenz $\nu = c\lambda^{-1}$ (Lichtgeschwindigkeit im Vakuum $c \approx 300\,000\text{ km s}^{-1}$) vor allem die Strahlungsenergie Q . Mit der Anzahl N der Photonen (Lichtteilchen) und deren Energie $h\nu$ folgt Q zu

$$Q = N h \nu \qquad h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \qquad (4.1)$$

(Planck'sches Wirkungsquantum)

Die Einheit von Q ist $[Q] = \text{J}$.

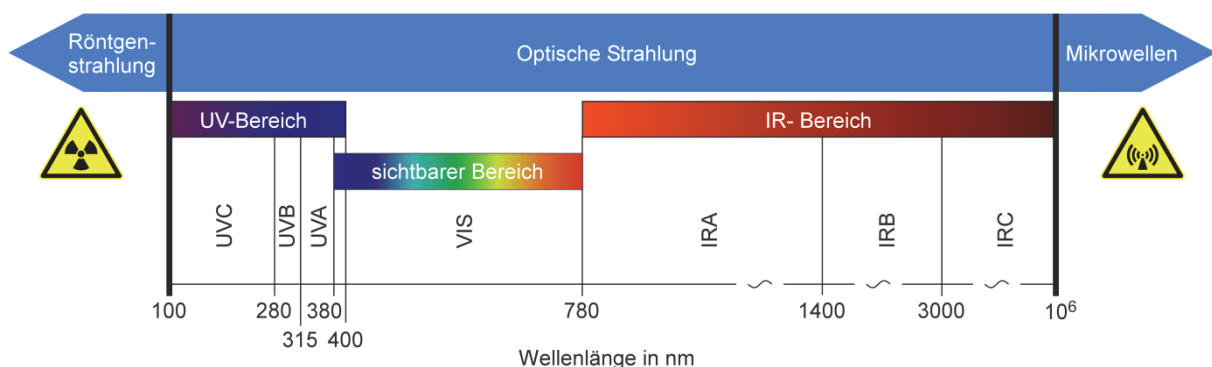


Abb. 4.1 Optische Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 100 nm und 1 mm. UV- und IR-Spektralbereiche sind jeweils in drei Unterbereiche aufgeteilt. Die Wellenlängenskala ist nicht maßstabsgetreu.

Verändert sich die Anzahl der Photonen oder deren Wellenlänge mit der Zeit, so wirkt sich das nach Gleichung (4.1) auch auf die Strahlungsenergie aus. Diese zeitliche Veränderlichkeit wird durch die Strahlungsleistung Φ (auch als Strahlungsfluss bezeichnet) erfasst.

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad [\Phi] = \text{J s}^{-1} = \text{W} \quad (4.2)$$

Um den Strahlungsfluss messen zu können, ist es wichtig, die Fläche A_D des Detektors zu kennen. Nur der Quotient E aus beiden Größen ist (bei sonst identischen Bedingungen) konstant und wird als Messgröße verwendet. Man spricht hierbei von Bestrahlungsstärke oder veraltet auch von Intensität.

$$(a) \quad E = \frac{d\Phi}{dA_D} \quad (b) \quad H = \int_{t_1}^{t_2} \frac{d\Phi}{dA_D} dt = E \cdot t \quad (4.3)$$

Die SI-Einheit der Bestrahlungsstärke ist $[E] = \text{W m}^{-2}$ aber auch mW cm^{-2} wird häufig verwendet. Da Φ nicht explizit von der Zeit t abhängt (aber sehr wohl implizit) kann durch eine einfache Zeitintegration die Strahlungsdosis bzw. die Bestrahlung H (Einheit: $[H] = \text{Jm}^{-2}$) berechnet werden. Die messtechnische Erfassung der Bestrahlungsstärke und der Bestrahlung sind Voraussetzung, um eine Gefährdungsbeurteilung nach OStrV durchführen zu können.

Neben diesen sog. empfängerseitigen Messgrößen muss auch die Strahldichte L , die sich auf den Sender, also die Strahlungsquelle bezieht, bei einer Gefährdungsbeurteilung bestimmt werden.

Emittiert eine idealerweise punktförmige Quelle Strahlung homogen in alle Raumrichtungen, so gilt das photometrische Abstandsgesetz, siehe Kapitel 7.4, welches besagt, dass die Bestrahlungsstärke mit dem inversen quadratischen Abstand R^{-2} zur Strahlungsquelle abnimmt. Dies impliziert aber auch eine Verringerung des beobachteten Raumwinkels Ω .

Die Berechnung von Ω kann entweder über den Abstand R zur Strahlungsquelle und die zu beobachtende Kugeloberfläche bzw. Kugelkalotte A_{KK} erfolgen oder unter Zuhilfenahme des Öffnungswinkels α .

$$\Omega = \frac{A_{KK}}{R^2} = 2\pi \left[1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right] \quad (4.4)$$

Die Einheit des Raumwinkels ist $[\Omega] = \text{m}^2 / \text{m}^2 = \text{sr}$ (Steradian oder Sterad). Rein physikalisch betrachtet handelt es sich also um eine dimensionlose Größe.

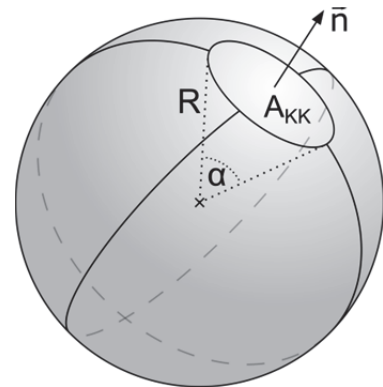


Abb. 4.2 Definition des Raumwinkels

Unter Einbeziehung der effektiven Senderfläche $A_S \cos \varepsilon$ mit ε als ebenem Winkel der Ausrichtung der Strahlungsquelle zur optischen Achse, siehe Abb. 4.3, ergibt sich die Strahldichte L zu

$$L = \frac{d^2\phi}{dA_S \cos \varepsilon d\Omega} \quad \Rightarrow \quad L = E \Omega^{-1} \quad (4.5)$$

Als Einheit der Strahldichte erhält man $[L] = \text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$. Bei senkrechter und homogener Abstrahlung, wie dies z. B. bei einer LED der Fall ist, kann bei bekannter Größe des Raumwinkels die Bestrahlungsstärke gemessen und anschließend die Strahldichte berechnet werden.

Normativ (z. B. DIN EN 62471) kann ein solches Vorgehen durch den Einsatz einer Feldblende mit Durchmesser F realisiert werden. Befindet sich diese Blende nahe der Strahlungsquelle, in Abb. 4.3 knapp vor der LED, und im Abstand r zum Detektor, so gilt für den Empfangswinkel γ in Kleinwinkelnäherung $\gamma = F r^{-1}$. Durch Einsetzen in Gleichung (4.4) mit $\gamma = \alpha$ folgt der gesuchte Raumwinkel Ω .

4.2 Expositionsgrenzwerte und Wichtungsfunktionen

4.2.1 Ungewichtete Expositionsgrenzwerte

Mit Hilfe der im vorherigen Kapitel genannten radiometrischen Größen wird es möglich, die für eine Gefährdungsbeurteilung gemäß OStrV notwendigen Expositionsgrenzwerte zu bestimmen. Eine Übersicht aller für das Projekt relevanten Expositionsgrenzwerte ist in Tab. 4.1 gezeigt.

Durch Messung der spektralen Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ (oder auch integral, siehe Kapitel 6.3) und Integration zwischen 315 und 400 nm kann eine potenzielle Gefährdung der Augenlinse durch UVA-Strahlung ermittelt werden.

$$(a) \quad E_{\text{UVA}} = \int_{315 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E(\lambda) d\lambda \quad (b) \quad H_{\text{UVA}} = E_{\text{UVA}} t_{\text{UVA}} = 10^4 \text{ Jm}^{-2} \quad (4.6)$$

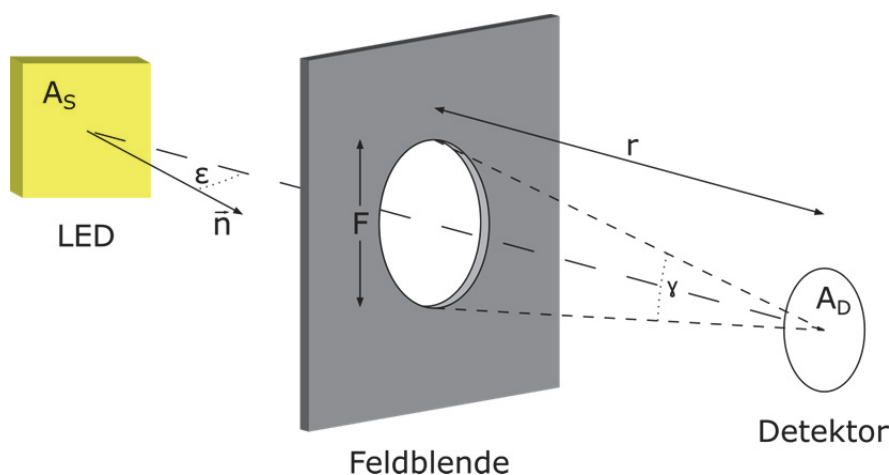


Abb. 4.3 Schematische Skizze zur Bestimmung der Strahldichte unter Verwendung einer Feldblende mit Durchmesser F im Abstand r zum Detektor. Zur besseren graphischen Darstellung befindet sich die Feldblende weit von der LED entfernt, in einem Messaufbau muss dieser Abstand aber möglichst gering gehalten werden.

Tab. 4.1 Projektrelevante Expositionsgrenzwerte mit den zugehörigen Wellenlängenbereichen und Zeitbasen. Die spezifische Gefährdung für Haut und/oder Auge ist ebenfalls angegeben.

Wellenlänge (nm)	Expositionsgrenzwert	Zeitbasis	Gefährdung
200 – 400	$H_{\text{eff}} = 30 \text{ J m}^{-2}$	8 h	Haut & Auge ^a
315 – 400	$H_{\text{UVA}} = 10^4 \text{ J m}^{-2}$	8 h	Auge
300 – 700	$E_{\text{B}} = \frac{100 \text{ s}}{t_{\text{B}}} \text{ W m}^{-2}$ $L_{\text{B}} = \frac{10^6 \text{ s}}{t'_{\text{B}}} \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$	$\leq 10000 \text{ s}$	Auge ^b
380 – 3000	$E_{\text{H}} = \frac{20000 \text{ s}^{0,75}}{t_{\text{H}}^{0,75}} \text{ W m}^{-2}$	$< 10 \text{ s}$	Haut ^c
780 – 3000	$E_{\text{IR}} = \frac{18000 \text{ s}^{0,75}}{t_{\text{IR}}^{0,75}} \text{ W m}^{-2}$	$< 1000 \text{ s}$	Auge ^c

^a Die mit $S(\lambda)$ gewichtete aktinische Bestrahlung H_{eff} repräsentiert den Expositionsgrenzwert für Haut- und Augenschäden und der langfristig damit verbundenen Entstehung von Hautkrebs und grauem Star.

^b Zur Gefährdungsbeurteilung sichtbarer Strahlung bzw. von Strahlungsanteilen aus dem Bereich der Blaulichtgefährdung zwischen 300 und 700 nm kann bei punktförmigen Strahlungsquellen ein Expositionsgrenzwert in Bestrahlungsstärke verwendet werden. Wie später in Kapitel 7.4 gezeigt wird, trifft dies auf den Schweißlichtbogen zu.

^c Aus technischen Gründen muss die obere Integrationsgrenze dieser Expositionsgrenzwerte auf 2700 nm reduziert werden, siehe Kapitel 6.3. In der EU-Richtlinie 2006/25/EG ist der Expositionsgrenzwert für die Haut außerdem (äquivalent) als Bestrahlung $H_{\text{Haut}} = 20000 t^{0,25} \text{ J m}^{-2}$ formuliert. Eine Erweiterung der E_{H} -Zeitbasis auf mehr als zehn Sekunden (analog zur TROS IOS) ist in der EU-Richtlinie bisher nicht berücksichtigt, wird aber aktuell diskutiert.

Mit Hilfe des Expositionsgrenzwertes H_{UVA} kann über das experimentell gemessene E_{UVA} die maximal zulässige Expositionsdauer t_{UVA} bestimmt werden, oder, falls die Expositionsdauer bekannt ist, eine Grenzwertüberschreitung überprüft werden.

Auf ähnliche Weise können auch Gefährdungen für Haut und Augen durch infrarote Strahlungsanteile bestimmt werden. Hierbei sind in Formel (4.6) lediglich die Integrationsgrenzen zu verändern. So ergibt sich zur Beurteilung einer thermischen Gefährdung des Auges

$$E_{\text{IR}} = \int_{780 \text{ nm}}^{3000 \text{ nm}} E(\lambda) d\lambda = \frac{18000 \text{ s}^{0,75}}{t_{\text{IR}}^{0,75}} \text{ Wm}^{-2} \quad (4.7)$$

Eine Umformung der Gleichung nach t_{IR} gestattet die Berechnung der maximal zulässigen Expositionsdauer bis zum Eintritt einer Schädigung des Auges.

Durch Hinzunahme von sichtbaren Strahlungsanteilen E_{VIS} kann die thermische Gefährdung für die Haut bestimmt werden.

$$E_{\text{H}} = \int_{380 \text{ nm}}^{3000 \text{ nm}} E(\lambda) d\lambda = E_{\text{VIS}} + E_{\text{IR}} = \frac{20000 \text{ s}^{0,75}}{t_{\text{H}}^{0,75}} \text{ Wm}^{-2} \quad (4.8)$$

Dabei ist es egal, ob E_{H} durch Integration der spektralen Bestrahlungsstärke zwischen 380 und 3000 nm bestimmt, von einem integralen Detektor (wie im Großteil dieses Forschungsprojektes verwendet) gemessen oder durch Addition sichtbarer und infraroter Strahlungsanteile, E_{VIS} und E_{IR} , berechnet wird. E_{VIS} ist nur eine technische Hilfsgröße und folgt aus

$$(a) \quad E_{\text{VIS}} = \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} E(\lambda) d\lambda \quad (b) \quad E_{\text{IR-A}} = \int_{780 \text{ nm}}^{1400 \text{ nm}} E(\lambda) d\lambda \quad (4.9)$$

Ebenfalls aus technischen Gründen erforderlich ist die Größe $E_{\text{IR-A}}$, da beim WIG-Schweißen leider ein Teil des Messequipments fehlerhaft war und somit nur ein deutlich reduzierter Spektralbereich gemessen werden konnte.

4.2.2 Effektive Expositionsgrenzwerte

Um spezielle wellenlängenabhängige Sensitivitäten von Auge und Haut bei der Gefährdungsbeurteilung zu berücksichtigen, wurden sog. Wichtungs- bzw. Wirkungsfunktionen eingeführt (ICNIRP2004; DIN 5031-102013; ICNIRP2013).

- Die häufig als Arbeitsschutzkurve bezeichnete Wichtungsfunktion $S(\lambda)$, siehe Abb. 4.4, berücksichtigt sowohl die Wirkung von UV-Strahlung auf die Haut als auch auf das Auge und setzt sich zusammen aus den relativen spektralen Wirksamkeiten zur Bildung einer Photokeratitis, einer Photokonjunktivitis und eines Erythems (TROSIOS). Ihr Maximum liegt bei 270 nm und spiegelt die besonders hohe biologische Wirksamkeit von UVC- und UVB-Strahlung wider.
- Die relative spektrale Wirksamkeit hinsichtlich einer fotochemischen Schädigung der Netzhaut ist durch $B(\lambda)$ gegeben. Diese Wichtungsfunktion erstreckt sich von 300 bis 700 nm und beinhaltet damit nicht nur sichtbare sondern auch ultraviolette Strahlungsanteile. Da das Maximum im Bereich des blauen Lichtes liegt, spricht man auch von sog. Blaulichtgefährdung (engl.: blue light hazard, BLH).

Es gibt noch weitere Wichtungsfunktionen (TROSIOS), die allerdings nicht projektrelevant sind und deswegen in diesem Forschungsbericht nicht erwähnt werden.

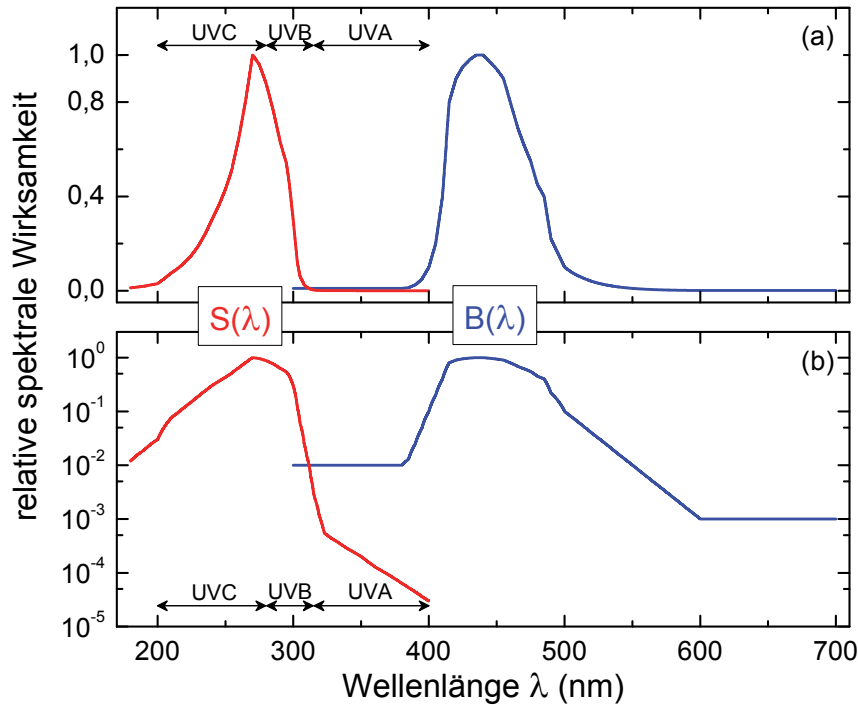


Abb. 4.4 Relative spektrale Wirksamkeiten von ultravioletter Strahlung auf Haut und Augen $S(\lambda)$ sowie von Teilen der UV- und sichtbaren Strahlung auf die Netzhaut des Auges $B(\lambda)$ in (a) linearer und (b) halblogarithmischer Darstellung.

Zur Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung muss die zu untersuchende optische Größe $X(\lambda)$ mit einer der beiden Wichtungsfunktionen $A_{\text{biol}}(\lambda)$ multipliziert („gewichtet“, „bewertet“) werden (DIN 5031-102013). Somit gilt allgemein:

$$X_{\text{eff}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X(\lambda) A_{\text{biol}}(\lambda) d\lambda \quad \begin{array}{l} X(\lambda) = E, L \\ A_{\text{biol}}(\lambda) = S(\lambda), B(\lambda) \end{array} \quad (4.10)$$

Nach Integration über einen bestimmten Wellenlängenbereich erhält man die gesuchte effektive biologisch gewichtete Strahlungsgröße X_{eff} .

Für dieses Forschungsprojekt relevant sind im Wesentlichen nur zwei gewichtete Bestrahlungsstärken: Strahlungsanteile zwischen 200 und 400 nm, die mit $S(\lambda)$ gewichtet und häufig als aktinische Bestrahlungsstärke bezeichnet werden, sowie mit $B(\lambda)$ gewichtete Strahlung aus dem Bereich der Blaulichtgefährdung.

$$(a) \quad E_{\text{eff}} = \int_{200 \text{ nm}}^{400 \text{ nm}} E(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (b) \quad H_{\text{eff}} = E_{\text{eff}} t_{\text{eff}} = 30 \text{ Jm}^{-2} \quad (4.11)$$

$$E_B = \int_{300 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} E(\lambda) B(\lambda) d\lambda = \frac{100 \text{ s}}{t_B} \text{ Wm}^{-2} \quad (4.12)$$

Wie später gezeigt werden wird (Kapitel 7.4), kann der zu untersuchende Lichtbogen im Abstand von 50 cm als punktförmig betrachtet werden und eine Bestimmung der

Blaulichtgefährdung ist mit Hilfe der Bestrahlungsstärke E_B möglich. Trotzdem wird bei jedem Schweißverfahren in Kombination mit dem jeweiligen Werkstoff auch immer die blaublichtgewichtete Strahldichte L_B (mit einem Integralmessgerät) bestimmt.

$$L_B = \int_{300 \text{ nm}}^{700 \text{ nm}} L(\lambda)B(\lambda) d\lambda = \frac{10^6 \text{ s}}{t'_B} \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1} \quad (4.13)$$

Dies erlaubt einen Vergleich der beiden Expositionsdauern t_B und t'_B .

4.3 Der Lichtbogen

Grundlage bei der physikalischen Betrachtung des Schweißlichtbogens ist die Plasmaphysik (KEGEL1998). Unter dem Begriff „Plasma“ versteht man ein (teilweise) ionisiertes Gasgemisch aus positiv geladenen Atomrümpfen und negativ geladenen Elektronen. Neben fest, flüssig und gasförmig bezeichnet man ein Plasma deswegen auch als vierten Aggregatzustand. Dabei trifft man im Alltag viel häufiger auf Plasmen als man denkt z. B. im Plasma-TV oder in Gasentladungslampen.

Der Schweißlichtbogen ist ebenfalls ein teilionisiertes Plasma, welches durch eine Gasentladung zwischen zwei Elektroden entsteht. Durch das Erzeugen eines relativ kleinen Potenzialgefälles (Spannung) zwischen Werkstück und Schweißelektrode und der Bereitstellung einer großen Schweißstromstärke kommt es bei geringem Elektrodenabstand zu einem elektrischen Überschlag. Das dazwischen liegende (Schutz-) Gas wird dadurch teilionisiert was wiederum dazu führt, dass nun Strom fließen kann, der aufgrund der hohen Stromstärke und der damit verbundenen starken Wärmeentwicklung das Werkstück aufschmelzen kann. Insgesamt besteht das Plasma des Schweißlichtbogens aus Atomen der Schweißelektrode, des Schutzgases und des Werkstoffes.

Der grundsätzliche zugrunde liegende physikalische Vorgang ist hierbei die Umwandlung von elektrischer in thermische Energie mit Temperaturen des Plasmas von bis zu 30.000 K (WEIKERT2010a).

4.3.1 Der Pinch-Effekt

Die Bewegung eines geladenen Teilchens ist stets mit der Erzeugung eines Magnetfeldes \vec{B} verbunden. Da durch den Lichtbogen ebenfalls Strom fließt, entsteht auch beim Lichtbogenschweißen ein Magnetfeld. Dies führt dazu, dass die geladenen Teilchen aufgrund der Lorentzkraft \vec{F}_L zum Zentrum des Plasmaschlauches

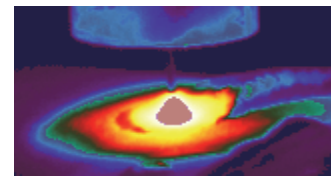


Abb. 4.5 IR-Aufnahme des Lichtbogens

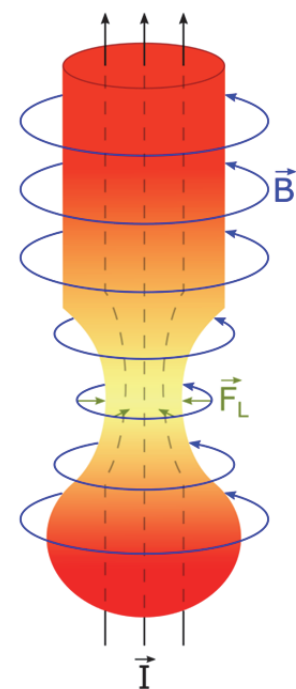


Abb. 4.6 Pinch-Effekt

nach Innen „gezogen“ werden, siehe Abb. 4.6. Dieser Effekt der aus der Elektrodynamik auch als z-Pinch bekannt ist, hat insbesondere beim Schweißen mit abschmelzender Elektrode eine große Bedeutung, da er dort für die Werkstoffablösung verantwortlich ist.

4.3.2 Lichtbogenarten

Verschiedene Arten von Schweißlichtbögen, die sich in vielen Eigenschaften unterscheiden, werden in der Industrie verwendet. Dazu zählen nicht nur Einsatz- oder Anwendungsgebiete sondern auch physikalische Charakteristika wie etwa die Lichtbogenlänge oder die Plasmatemperatur. Aber auch Parameter wie Stromstärke, Gleich- oder Wechselspannung, Drahtfördergeschwindigkeit oder das eingesetzte Schutzgas haben Einfluss auf den Lichtbogen.

Dabei ist Schweißen mit einer abschmelzenden Elektrode, einhergehend mit einer zyklischen Längenänderung des Lichtbogens, oder mit einer nicht-abschmelzenden Elektrode bei möglichst konstantem Schweißstrom von grundlegender Bedeutung für die Lichtbogeneigenschaften.

- Kurzlichtbogen
Durch den zyklischen Wechsel zwischen Kurzschluss- und Brennphase, wobei nur in der Kurzschlussphase ein Materialübertrag stattfindet, variiert auch die Lichtbogenlänge entsprechend. Der Wärmeeintrag ist gering, ebenso der Materialverzug.
- Übergangslichtbogen
Der hinsichtlich seiner Charakteristika zwischen Kurz- und Sprühlichtbogen einzuordnende Übergangslichtbogen weist einen teilweise kurzschlussbehafteten Materialübergang mit mittlerem Wärmeeintrag auf.

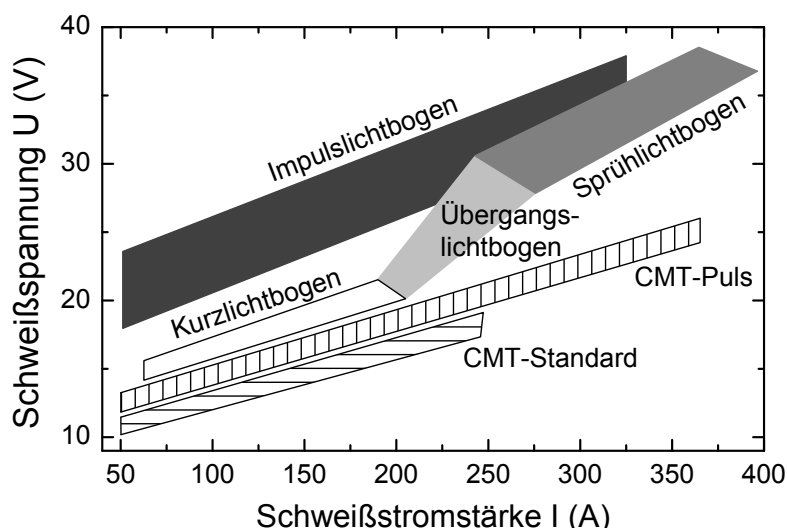


Abb. 4.7 Schematischer $U(I)$ -Verlauf einiger in diesem Forschungsprojekt verwendeter Lichtbögen. Die eingezeichneten Flächen geben grundsätzliche Strom-Spannungs-Bereiche wieder und können in der Praxis je nach Anwendung variieren.

- Sprühlichtbogen
Diese Art von Lichtbogen brennt ständig ohne Kurzschlussunterbrechung, wodurch es zu einem feintropfigen Materialübertrag mit hohem Wärmeeintrag kommt. Mit einem Sprühlichtbogen können auch dicke Werkstücke geschweißt werden.
- Impulslichtbogen
Der Versuch, die „besten“ Eigenschaften von Kurz- und Sprühlichtbogen zu vereinen, führte zum Impulslichtbogen, mit dem ein spritzerarmes und gleichmäßiges Schweißen möglich ist. Hierbei wird zyklisch zwischen einem Grundstrom, der das stetige Brennen des Lichtbogens gewährleistet, und einem Impulsstrom zur Tropfenablösung gewechselt. Dadurch findet nur ein geringer Wärmeeintrag statt und auch dünne Werkstücke können geschweißt werden.

Abb. 4.7 zeigt schematisch die Beziehung zwischen manuell gewählter Schweißstromstärke und von der Stromquelle meistens automatisch geregelter Schweißspannung für die in diesem Forschungsprojekt verwendeten Lichtbögen. Hierbei gibt es allerdings keine eindeutige $U(I)$ -Relation, sondern charakteristische Strom-Spannungs-Bereiche, in denen der jeweilige Lichtbogen betrieben werden kann.

Einen Spezialfall stellt das CMT-Schweißen (Cold-Metal-Transfer, siehe Kapitel 5.2.2 und 8.4) dar, bei dem auch die Förderrichtung des Zusatzwerkstoffes zyklisch verändert wird (FRONIUS2013).

Weiterführende physikalisch-technische Informationen zu Lichtbögen können der Literatur entnommen werden (SCHELLHASE1985).

5 Schweiß- und Schneidverfahren

Metallschweißverfahren können gemäß DIN 1910-100:2008-02 ((DIN 1910-100), enthält DIN EN 14610, welche wiederum DIN ISO 857-1 ersetzt) nach thermischer oder mechanischer Energieeinwirkung eingeteilt werden, projektrelevant sind allerdings nur Schmelzschweißprozesse. Durch die Art des eingesetzten Energieträgers, z. B. Flüssigkeiten, Gase, elektrischer Strom etc., werden diese dann weiter untergliedert. Beim hier betrachteten Lichtbogenschweißen wird zum Verbinden zweier Werkstoffe eine elektrische Gasentladung als Energieträger verwendet. In Abb. 5.1 ist der Lichtbogenschweißprozess weiter unterteilt, wobei in der untersten Ebene die in diesem Forschungsprojekt untersuchten Schweißverfahren aufgeführt sind.

Ergänzend zu den Lichtbogenschweißverfahren wird die optische Strahlenbelastung auch beim Schweißen mit einem CO₂- und einem Faserlaser erfasst. Aufgrund der vermeintlich hohen thermischen Belastung wird abschließend die emittierte Strahlung beim Plasmaschneiden gemessen.

In den folgenden Kapiteln 5.1 bis 5.6 werden die einzelnen Schweiß- und Schneidverfahren näher erläutert. Weiterführende Informationen können Standardwerken wie etwa „Schweißtechnik – Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen“ von Klaus-Jürgen Matthes und Erhardt Richter (MATTHES2016) oder dem „Sicherheitshandbuch Schweißarbeiten“ von Fritz Weikert (WEIKERT2010a) entnommen werden.

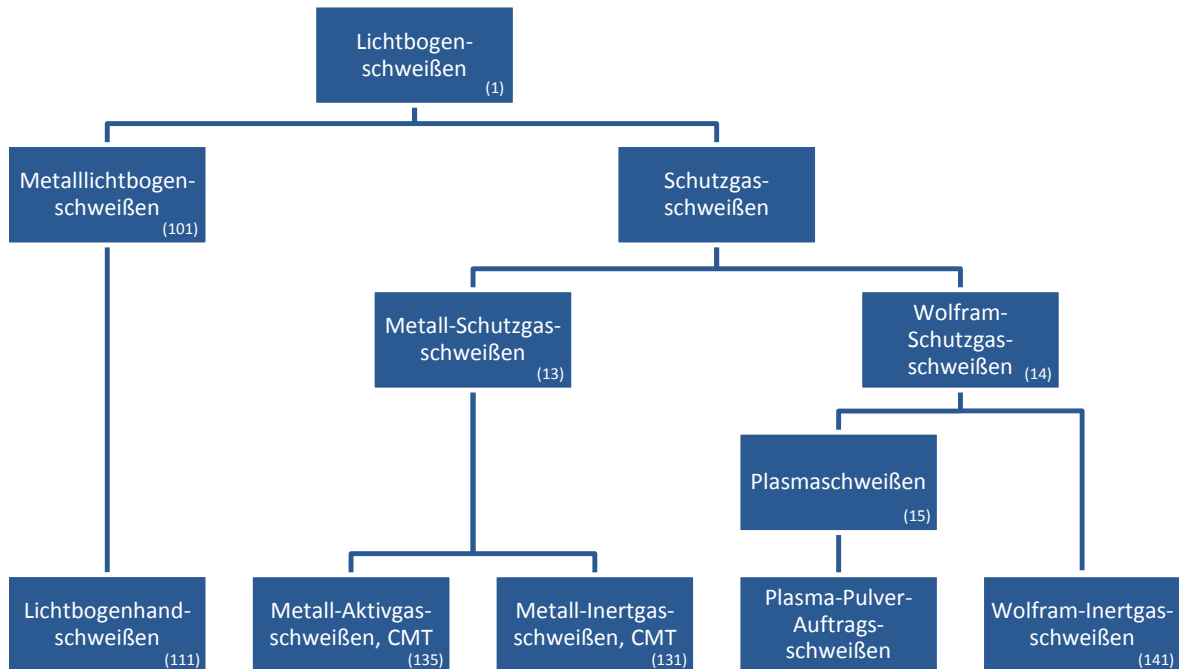


Abb. 5.1 Schematische Einteilung nach DIN 1910-100 (DIN 1910-100) der in diesem Forschungsprojekt untersuchten Schweißverfahren. Die angegebenen Ordnungsnummern (normative Einteilung) in runden Klammern entstammen der DIN EN ISO 4063 (DIN EN ISO 4063). CMT-Schweißen ist als Prozessvariante sowohl von MAG- als auch von MIG-Schweißen aufgeführt.

5.1 Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)

Beim WIG-Schweißen brennt der Lichtbogen zwischen einer nichtabschmelzenden Wolframelektrode und dem Grundwerkstoff in einer inerten Schutzgasatmosphäre. Je nach Schweißaufgabe wird entweder mit oder ohne Zusatzwerkstoff geschweißt (in diesem Forschungsprojekt stets ohne Zusatzwerkstoff). Als Schutzgase dienen vorwiegend inerte Gase wie Argon Ar, Helium He oder Gemische aus beiden Gasen 70Ar30He (70 % Argon mit 30 % Helium, I3-ArHe-30). Dadurch wird die üblicherweise einsetzende Oxidation der Elektrode und des Werkstückes vermindert.

Der Lichtbogen beim Wolfram-Inertgasschweißen wird in der Regel mit Gleichstrom erzeugt. Leichtmetalle wie Aluminium und Magnesium sowie einige Kupferlegierungen werden hingegen vorrangig mit Wechselstrom geschweißt. Bei Werkstoffen, die hochschmelzende Oxide bilden, hilft der Wechsel der Polarität nicht nur um die Oxidschicht aufzureißen sondern auch um die Wolframelektrode zu kühlen und dadurch eine annehmbare Standzeit zu erreichen.

Da in jedem Fall die Zusatzwerkstoffzufuhr von der Wärmequelle (Lichtbogen) entkoppelt ist, lässt sich eine sehr definierte Beeinflussung der Schmelzbadgröße und der Schweißnahtform realisieren. Die verfahrensspezifischen Besonderheiten ermöglichen dadurch qualitativ hochwertige und spritzerfreie Schweißverbindungen. Nachteilig sind allerdings die vergleichsweise geringe Abschmelzleistung und die langsame Schweißgeschwindigkeit.

Haupteinsatzgebiete des WIG-Schweißens liegen im Apparate-, Rohrleitungs- und Behälterbau, in der Luft- und Raumfahrttechnik, in der Feinwerktechnik und bei Anlagen für den Lebensmittelsektor. Geschweißt werden hierbei vor allem unlegierte und legierte Stähle, Aluminium, Kupfer, Titan, Nickelwerkstoffe und andere Nichteisenmetalle mit Materialstärken zwischen 0,5 und 5 mm. Bei dickeren Bauteilen wird aus wirtschaftlichen Gründen häufig nur die Wurzelschweißung mit WIG durchgeführt.

5.2 Metallschutzgasschweißen (MSG)

5.2.1 Metallaktiv- und Metallinertgasschweißen (MAG/MIG)

Der Lichtbogen beim MSG-Schweißen brennt zwischen einer kontinuierlich zugeführten, abschmelzenden Drahtelektrode und dem Grundwerkstoff. Dabei unterscheidet man je nach verwendetem Schutzgas zwischen Metallaktivgasschweißen (MAG) und Metallinertgasschweißen (MIG).

Beim MAG-Schweißen von sowohl unlegierten als auch niedrig und hoch legierten Stählen, werden aus metallurgischen oder technologischen Gesichtspunkten aktive Schutzgase wie CO₂, Argon-CO₂- und Argon-Sauerstoff-Gemische sowie Mehrkomponenten-Gase verwendet. Je nach Kohlenstoffdioxid- oder Sauerstoffgehalt beeinflusst das Schutzgas „aktiv“ die Lichtbogenlänge, den Tropfenübergang, den Einbrand usw. MIG-Schweißen von Nichteisenmetallen wird unter den inerten (reaktionsarmen) Schutzgasen Argon, Helium oder Gemischen aus beiden durchgeführt.

Beeinflusst durch die Charakteristik der Schutzgase und der eingestellten Schweißparameter können bei MSG-Schweißverfahren sehr unterschiedliche Werkstoffüber-

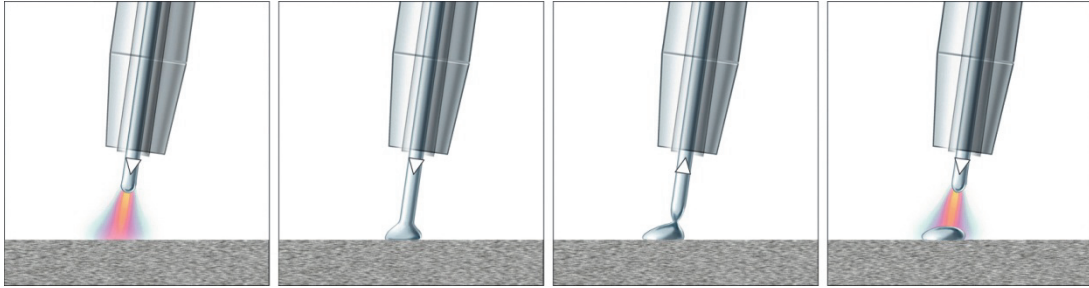


Abb. 5.2 Schematische Darstellung der Tropfenablösung beim CMT-Schweißen. Der weiße Pfeil gibt die Förderrichtung des Zusatzwerkstoffes wieder. © Fronius International GmbH

gänge erzielt werden. Typische Lichtbogenarten sind hierbei der Kurzlichtbogen, der Sprühlichtbogen und der Impulslichtbogen. Ein weiterer Vorteil des MSG-Schweißens ist die flexible Einsatzmöglichkeit in praktisch allen Position. Dies gilt allerdings nicht für jede Lichtbogenart. Im Gegensatz z. B. zum WIG-Schweißverfahren besteht außerdem eine größere Gefahr von Unregelmäßigkeiten wie etwa von Bindefehlern.

Die wirtschaftlichsten und damit in der Praxis am häufigsten vorzufindenden Einsatzgebiete sind im Stahl-, Maschinen-, Apparate-, Behälter-, Brücken- und Kranbau sowie bei der Fahrzeugherstellung und -reparatur. Dabei werden vor allem Stähle und Nichteisenmetalle mit Wandstärken zwischen 0,6 mm und 10 cm geschweißt.

5.2.2 Cold Metal Transfer Schweißen (CMT)

Das CMT-Verfahren der Firma Fronius ist eine herstellereigenspezifische Prozessvariante des MSG-Schweißens und kann als MAG- oder MIG-Prozess sowohl gepulst als auch ungepulst ausgeführt werden. Charakteristisch für dieses Verfahren ist, dass in kurzen zeitlichen Intervallen mit einer typischen Frequenz von 50 – 100 Hz der Schweißdraht entgegen seiner Förderrichtung zurückgezogen wird, sog. CMT-Zyklus, siehe Abb. 5.2. Mit Hilfe einer angepassten Schweißdrahtsteuerung kann so ein beinahe stromloser Werkstoffübergang mit einer kontrollierten, sauberen und spritzerfreien Tropfenablösung erfolgen.

Vorteile des CMT-Verfahrens sind eine kleine Wärmeeinflusszone und eine sehr geringe Aufmischung, d.h. die Mischung aus Zusatz- und Grundwerkstoff ist minimal. Typische Einsatzgebiete sind dadurch Dünnschweißungen mit Materialstärken von 0,3 bis 0,8 mm, das Löten verzinkter Bleche und das Fügen von Stahl und Aluminium z. B. in der Automobilindustrie oder im Schienenfahrzeugbau.

5.3 Lichtbogenhandschweißen (MMA)

Beim Lichtbogenhandschweißen (engl.: **Manual Metal Arc Welding**) brennt der Lichtbogen zwischen einer abschmelzenden Stabelektrode, bestehend aus Kernstab und mineralischer Umhüllung, und dem Werkstück. Lichtbogen und Schmelzbad werden hierbei durch das sich aus der Umhüllung bildende Schutzgas und einer Schlacke vor Oxidation geschützt. Abhängig von der geplanten Anwendung und der mineralischen Umhüllung werden die Stabelektroden entweder am Minus- oder am Pluspol verschweißt. Der Schweißer führt die in einem Elektrodenhalter eingespannte Stab-

elektrode entlang der Schweißfuge, durch den Lichtbogen schmilzt dabei die Elektrode ab und verflüssigt den Grundwerkstoff an der Fugestelle. MMA-Schweißen ist das einzige Verfahren, welches in der Industrie nicht automatisiert angewandt wird.

Aufgrund der großen Anwendungsbreite wurden für die Untersuchungen dieses Projektes rutil dickumhüllte Elektroden (Typ RR) und basische Elektroden (Typ B) verwendet. Rutil Elektroden werden in der Praxis am häufigsten eingesetzt, da sie hervorragende Schweißseigenschaften für viele Anwendungsbereiche besitzen. Basische Elektroden zeichnen sich wiederum durch hohe Kerbschlagarbeit des Schweißgutes bei tiefen Temperaturen und einer hohen Rissicherheit aus. Die gewählten Stromstärkebereiche (RR: 80 bis 240 A, B: 70 bis 280 A) orientierten sich an den Herstellerangaben laut Verpackung und sind an die Dicke der jeweiligen Stabelektroden (2 bis 5 mm) angepasst.

Als besonders vorteilhaft beim Lichtbogenhandschweißen sind die vielseitigen Anwendungsmöglichkeiten zu nennen, da auf dem Markt ein großes Elektrodensortiment verfügbar ist und so in Abhängigkeit des Elektrodentyps in allen Arbeitspositionen gearbeitet werden kann. Dabei können diverse Werkstoffe wie etwa un- oder niedriglegierte Stähle, Feinkornstähle oder Gusseisen geschweißt werden. Einschränkungen gibt es jedoch bei Nichteisenmetallen wie Aluminium oder Kupfer, bei denen auf ein anderes Schweißverfahren zurückgegriffen werden muss.

Nachteilig ist außerdem die niedrige Abschmelzleistung, Dünnbleche einer Dicke kleiner als 1,5 mm sind nicht sicher und fehlerfrei schweißbar und die Nahtqualität hängt größtenteils von der Handfertigkeit des Schweißers ab.

Einsatz findet MMA-Schweißen quasi überall in der Industrie, z. B. im Chemieanlagen-, Maschinen-, Schiff- und Fahrzeugbau, im Stahlbau durch die einfache und unkomplizierte Einsetzbarkeit und bei einer Vielzahl von Reparaturschweißungen. Vor allem in Klein- und Mittelbetrieben ist Lichtbogenhandschweißen weit verbreitet. Aber auch im privaten Sektor erfreut sich Lichtbogenhandschweißen großer Beliebtheit da kleine Stromquellen problemlos erworben werden können und kein zusätzliches Schutzgas notwendig ist.

5.4 Plasma-Pulver-Auftragschweißen (PTA)

Verglichen mit anderen Lichtbogenschweißverfahren brennt beim Plasmaschweißen der Lichtbogen nicht frei, sondern wird durch eine gekühlte Kupferdüse, Abb. 5.3 (i), eingeschnürt, wodurch sich die Leistungsdichte des Plasmas erhöht.

Beim Plasma-Pulver-Auftragschweißen (engl.: **P**lasma **T**ransferred **A**rc) kommen zwei getrennt einstellbare Lichtbögen zum Einsatz: Ein Lichtbogen brennt zwischen der Wolframelektrode (ii) und der wassergekühlten (iii) Kupferdüse und hat die Aufgabe den über das Pulvergas zugeführten pulverförmigen Zusatzwerkstoff (iv) vorab teilweise aufzuschmelzen. Zusätzlich wirkt dieser Lichtbogen als sog. Pilotlichtbogen (nicht abgebildet) und ermöglicht das Zünden des eigentlichen Hauptlichtbogens (vi), durch den das Pulver vollständig aufgeschmolzen und in feinsten Tröpfchen auf die Werkstoffoberfläche aufgetragen wird. Der Hauptlichtbogen schmilzt dabei nur eine dünne Schicht der Werkstückoberfläche an, wodurch ein kleiner Aufmischungsgrad unter 5 % erreicht wird.

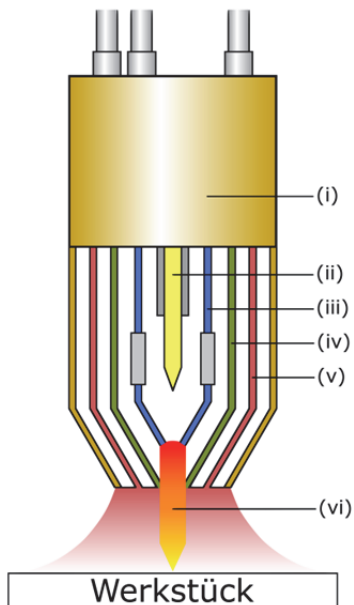


Abb. 5.3 PTA-Schweißdüse

Als Schutzgase (v) kommen vorwiegend inerte Gase oder Gasmischungen mit Anteilen von Wasserstoff zum Einsatz.

Besonders geeignet ist das PTA-Schweißverfahren bei Auftragschweißungen von verschleiß- und korrosionsbeständigen Schichten und hat dadurch einen großen Anwendungsbereich in vielen Branchen wie etwa der Kies- und Zementindustrie, im Tagebau oder bei der Beschichtung von Behältern.

- (i) Kupferdüse
- (ii) Wolframelektrode
- (iii) Wasserkühlung
- (iv) Zusatzwerkstoff, Pulvergas
- (v) Schutzgaszufuhr
- (vi) Hauptlichtbogen

5.5 Laserschweißen

Aufgrund ihrer hohen Präzision und der immer weiter fortschreitenden Automatisierung sind Laserschweißverfahren industriell von zunehmender Bedeutung. Vor allem in der Automobilindustrie, wo kleine Getriebebauteile oder Zahnräder verschweißt werden müssen, aber auch im medizintechnischen Bereich z. B. bei Herzschrittmachern sind Laserschweißverfahren nicht mehr wegzudenken. Neue innovative schweißtechnische Verfahrenskombinationen wie etwa Laser-MSG-Hybrid-Schweißen besitzen hohes Zukunftspotenzial, da sie Vorteile beider Verfahren vereinen und Nachteile minimieren.

Laserschweißen ist generell sehr verzugsarm, da es nur eine kleine Wärmeeinflusszone hat. Meistens wird auch ohne Schweißzusatz geschweißt, was die Handhabung erleichtert. Allerdings muss das Bauteil bzw. die Schweißnaht sehr genau positioniert werden.

Einschränkungen an den Werkstoff gibt es nicht. Alle auch konventionell fügbaren Werkstoffe können mit einem Faserlaser geschweißt werden.

5.5.1 Faserlaser

Bei einem Festkörperlaser besteht das aktive Medium aus einem gezüchteten Einkristall, in dessen Kristallstruktur kontrolliert eine geringe Menge Fremdatome wie etwa Chrom oder Neodym eingebracht wird und die die eigentlichen laseraktiven Atome sind. Dieses aktive Medium liegt meistens in Form eines Stabes vor und ist zwischen zwei Resonatorspiegeln angeordnet.

Ein Faserlaser ist eine spezielle Form des Festkörperlasers, bei dem das aktive Medium aus einer Glasfaser besteht, der über Pumpdioden Energie zugeführt wird. Aufgrund der großen Länge dieser Glasfaser wird die Intensität der emittierten Laserstrahlung ($\lambda = 1070 \text{ nm}$) deutlich verstärkt. Als Dotierelemente für den laseraktiven Faserkern werden häufig Ytterbium, Erbium oder Neodym eingesetzt.

5.5.2 CO₂-Laser

Der optische Resonator dieses Lasertyps enthält ein Gasgemisch aus Kohlenstoffdioxid, Stickstoff und Helium (Verhältnis 1:2:10), wobei als laseraktive Komponente die CO₂-Moleküle dienen. Durch Anlegen einer Spannung wird zwischen zwei Elektroden eine Niederdruck-Gasentladung gezündet. Diese elektrische Energie (HF oder DC) regt in geringem Maße das Kohlenstoffdioxidmolekül direkt an, die hauptsächliche Energieübertragung erfolgt allerdings durch Elektronenstöße auf Stickstoffmoleküle, die ihrerseits wiederum die CO₂-Moleküle anregen usw. Helium kühlt aufgrund seiner hohen Wärmeleitfähigkeit das Gasgemisch und trägt somit zur Stabilisierung des Prozesses bei. Der CO₂-Laser besitzt eine standardisierte Wellenlänge von 10,6 µm.

5.6 Plasmaschneiden

Die bisher betrachteten Lichtbogenschweißverfahren nutzen den Lichtbogen zum Fügen oder zum Auftragen. Aber auch die Verwendung als „Trennwerkzeug“ ist industriell von großer Bedeutung wie etwa beim Plasmaschneiden.

Hierbei wird der Lichtbogen durch eine wassergekühlte Düse stark eingeschnürt wodurch dessen Energiedichte und Temperatur, verglichen mit einem frei brennenden Lichtbogen, deutlich erhöht werden. Eine dem Plasmagas (Schneidgas) überlagerte Gasströmung im Düsenkanal, das sog. Wirbelgas, bringt zusätzlich kinetische Energie in den Prozess ein, weshalb dieses Verfahren besonders gut zum Trennen von Werkstücken aus unterschiedlichsten Materialien geeignet ist.

Bei der in diesem Forschungsprojekt angewendeten Verfahrensvariante (Schmelzschneidverfahren) handelt es sich um das direkte Plasmaschneiden. Zu Prozessbeginn wird das Plasmagas zugeschaltet und strömt durch den Brenner. Mittels herstellereinspezifischer Hochspannung wird dann ein energiearmer Pilotlichtbogen zwischen der Kathode und der Plasmaschneiddüse gezündet dessen Aufgabe darin besteht, die Gasstrecke zwischen Kathode und Werkstück teilweise zu ionisieren. Diese Teilionisierung bewirkt, dass beim Einschalten der Betriebsspannung (ca. 100 – 200 V, 150 – 450 A) zwischen Elektrode und Werkstück der Hauptlichtbogen (Schneidlichtbogen) gezündet wird. Er brennt von der Kathode durch die einschnürende Plasmaschneiddüse zum Werkstück (Anode) und schmilzt mit seiner hohen Temperatur von ca. 10.000 bis 50.000 °C das Werkstück auf. Aufgrund der hohen kinetischen Energie des Plasmagases wird das verflüssigte Material durch die Schnittfuge getrieben und ein Schnitt entsteht.

Ursprünglich war Plasmaschneiden für nicht brennschneidgeeignete Werkstoffe wie hochlegierte Stähle, Aluminium oder Kupfer gedacht. Heutzutage können eine Vielzahl von Werkstoffen und selbst nicht leitende Materialien geschnitten werden. Dementsprechend findet Plasmaschneiden auch überall dort Einsatz, wo eine schneidende Werkstückvorbereitung notwendig ist. Ein Nachteil ist allerdings der große Anlagenaufwand gegenüber z. B. dem Autogenbrennschneiden.

6 Experimentelles

6.1 Stromquellen und Hilfsstoffe

Aufgrund des großen Sortiments an industriell verwendeten Schweißgeräten wurde für Projekt F 2368 auf die schweißtechnische Ausstattung des Kooperationspartners SLV Halle GmbH zurückgegriffen, der sämtliche Schweißgeräte, Schutzgase, Werkstoffe etc. zur Verfügung stellte. Einige Details zum verwendeten Equipment sind in Tab. 6.1 und Tab. 6.2 aufgelistet.

Die dort gewählten Abkürzungen sind normgerecht. Für die verschiedenen Elektrodentypen bedeutet dies

- WC-20 ist eine Wolframelektrode mit 2 % Ceroxid (DIN EN ISO 6848),
- G3Si1 ist eine Massivdrahtelektrode für unlegierte Stähle (DIN EN ISO 14341),
- G 19 9 L Si ist eine Massivdrahtelektrode für nichtrostende Stähle (DIN EN ISO 14343),
- AlMg4,5MnZr ist eine Massivdrahtelektrode für Aluminium (DIN EN ISO 18273),
- RR ist eine rutile dickumhüllte sowie
- B eine basisch umhüllte Stabelektrode (DIN EN ISO 2560).

Alle verwendeten Gase sind entsprechend DIN EN ISO 14175 benannt und setzen sich zusammen aus

- 100 % Argon (I1-Ar),
- 98 % Argon und 2 % Kohlenstoffdioxid (M12-ArC-2),
- 95 % Argon und 5 % Wasserstoff (R1-ArH-5),
- 82 % Argon und 18 % Kohlenstoffdioxid (M21-ArC-18),
- 70 % Argon und 30 % Helium (I3-ArHe-30),
- 65 % Argon und 35 % Wasserstoff (R2-ArH-35) sowie
- 100 % Stickstoff (N1-N).

Bei den Abkürzungen für die verwendeten Werkstoffe handelt es sich um für dieses Projekt definierte Kurzformen, die aufgrund ihrer häufigen Verwendung praktikabler sind und im Folgenden stets verwendet werden.

- Baustahl (S235)
- nichtrostender Stahl, X5CrNi18-10 (CrNi oder Edelstahl) und
- Aluminium, AlSi1MgMn EN AW-6082 (Al)

Tab. 6.1 Details der im Rahmen des Forschungsprojektes F 2368 verwendeten Stromquellen, Hilfs- und Werkstoffe. Abkürzungen sind in Kapitel 6.1 im Fließtext erklärt.

Wolfram-Inertgasschweißen (WIG)

Stromquelle	Fronius Magic Wave 2600	
Elektrodentyp	WC-20	
Elektrodenndurchmesser	3,2 mm	
Schutzgase	ISO 14175-I1-Ar	ISO 14175-I3-ArHe-30
Schutzgasmenge	9 l min ⁻¹	10 l min ⁻¹
Werkstoffe	S235, CrNi, Al	Al

Metallschutzgasschweißen (MAG/MIG)

Stromquelle	EWM alpha Q 551		
Elektrodentyp	G3Si1 (1.5125)	G 19 9 L Si (1.4316)	AlMg4,5MnZr (3.3546)
Elektrodenndurchmesser	1,2 mm		
Schutzgase	ISO 14175-M21-ArC-18	ISO 14175-M12-ArC-2	ISO 14175-I1-Ar ISO 14175-I3-ArHe-30
Schutzgasmenge	16 l min ⁻¹		
Kontaktrohrabstand	16 mm		
Werkstoffe	S235	CrNi	Al

Cold Metal Transfer Schweißen (CMT)

Stromquelle	Fronius CMT advanced 4000	
Elektrodentyp	G3Si1 (1.5125)	AlMg4,5MnZr (3.3546)
Elektrodenndurchmesser	1,2 mm	
Schutzgase	ISO 14175-M21-ArC-18	ISO 14175-I1-Ar
Schutzgasmenge	16 l min ⁻¹	
Kontaktrohrabstand	16 mm	
Werkstoffe	S235	Al

Lichtbogenhandschweißen (MMA)

Stromquelle	EWM alpha Q 551			
Elektrodentyp	RR			
Elektrodenbezeichnung	ISO 2560-A – E 51 3 RR 22	ISO 2560-A – E 42 0 RR 12	ISO 2560-A – E 42 0 RR 12	ISO 2560-A – E 51 2 RR 22
Elektrodenndurchmesser	2,5 mm	3,2 mm	4,0 mm	5,0 mm
Elektrodenpolung	DC (-)			
Elektrodentyp	B			
Elektrodenbezeichnung	ISO 2560-A – E 42 2 B 42 H10	ISO 2560-A – E 42 5 B 32 H5	ISO 2560-A – E 42 2 B 42 H10	ISO 2560-A – E 51 4 B 16
Elektrodenndurchmesser	2,5 mm	3,2 mm	4,0 mm	5,0 mm
Elektrodenpolung	DC (+)			
Werkstoff	S235			

Tab. 6.2 Details der im Rahmen des Forschungsprojektes F 2368 verwendeten Stromquellen, Hilfs- und Werkstoffe. Abkürzungen sind in Kapitel 6.1 im Fließtext erklärt (Fortsetzung Tab. 6.1).

Plasma-Pulver-Auftragschweißen (PTA)

Stromquelle	Castolin Eutronic GAP3002
Elektrotyp	WC-20
Elektroden Durchmesser	4,0 mm
Schutzgas	ISO 14175-R1-ArH-5
Schutzgasmenge	16 l min ⁻¹
Pilotgas	ISO 14175-I1-Ar
Pilotgasmenge	2,3 l min ⁻¹
Pulverfördergas	ISO 14175-R1-ArH-5
Pulverfördergasmenge	3 l min ⁻¹
Werkstoff	S235

Laserschweißen

Lasersquelle	Faserlaser YLS 12000 (Firma IPG)
max. Leistung	12 kW
Werkstoffe	S 235, CrNi, Al
Lasersquelle	CO ₂ -Laser RS DC 035 (Firma ROFIN)
max. Leistung	3,5 kW
Werkstoffe	S235, CrNi

Plasmaschneiden

Stromquelle	High Focus 440i (Firma Kjellberg)
Schneidsystem	Messer Cutting System
Schneidgas	ISO 14175-R2-ArH
Schneidgasmenge	automatisch gesteuert
Wirbelgas	ISO 14175-N1-N
Wirbelgasmenge	automatisch
Werkstoffe	CrNi

6.2 Prozessdokumentation

Die schweißtechnischen Prozessparameter wurden mit einem Gerät QAS der Firma HKS Prozesstechnik GmbH unter Verwendung eines Prozesssensors P1000 aufgezeichnet. Als Abtastrate wurde dabei 3200 Hz gewählt. Neben den so erfassten elektrischen Prozessgrößen wie etwa der Mittelwert von Schweißstrom und Schweißspannung, I_M und U_M , wurden die verfahrensspezifischen Einstellgrößen z. B. Drahtvorschub- und Schweißgeschwindigkeit per Hand dokumentiert.

6.3 Optische Messgeräte

Zur Erfassung der emittierten optischen Strahlung der in Kapitel 5 erläuterten Schweiß- und Schneidverfahren werden mehrere Messgeräte verwendet. Dazu zählen Spektralradiometer, Radiometer (Integralmessverfahren), ein Strahldichtemessgerät, ein Oszilloskop mit Stromzange und schneller UV-Photodiode sowie Personendosimeter. Eine Übersicht der „Messverfahren zur Bewertung inkohärenter optischer Strahlung“ ist in (BAuA2016) zu finden.

Spektralradiometer/Diodenarrays

Zur Messung hochpräziser Schweißspektren wird ein Diodenarray BTS2048-UV-S der Firma Gigahertz-Optik verwendet. Mit einer spektralen Auflösung $\Delta\lambda = 0,8 \text{ nm}$ ist das Gerät in der Lage, im Wellenlängenbereich von 200 – 430 nm selbst kleine spektrale Details aufzulösen.

Um auch sichtbare und infrarote Strahlungsanteile beim Schweißen (sehr schnell) zu erfassen, wird eine Kombination aus zwei Diodenarrays der Firma Instrument Systems verwendet: ein CAS140CT-152 mit einer spektralen Auflösung von $\Delta\lambda = 2,7 \text{ nm}$ deckt den Wellenlängenbereich von 200 – 800 nm ab, ein CAS140CT-171 misst Infrarotstrahlung zwischen 780 und 1600 nm ($\Delta\lambda = 9 \text{ nm}$). Beide Diodenarrays sind über ein Y-förmiges Faserbündel OFG-554 von Instrument Systems mit der Eingangsoptik EOP-146 verbunden.

Bei den Spektralradiometern BTS2048-UV-S und CAS140CT-152 wird stets mindestens über 15 Spektren gemittelt, beim IR-Diodenarray aufgrund der langen Integrationszeit wird jeweils nur ein Spektrum gemessen.

Radiometer

Ein Optometer P-9801 der Firma Gigahertz-Optik wird zusammen mit einem Messkopf XD-45-HUV (Gigahertz-Optik) zur Aufnahme unbewerteter UVA- sowie bewerteter UVB- und UVC-Bestrahlungsstärken (nur in Summe) eingesetzt. Gleichzeitig wird mit einem zweiten Messkopf XD-45-HB (Gigahertz-Optik) die bewertete Blaulichtgefährdung als Bestrahlungsstärke E_B erfasst. Das Optometer erlaubt außerdem mit einer zeitlichen Auflösung von minimal 2 ms die oben genannten Größen zeitabhängig aufzuzeichnen.

Infrarote Strahlungsanteile müssen laut OStrV bis zu einer Wellenlänge von 3000 nm detektiert werden. Dazu wird ein Infrarotmessgerät IL1400BL der Firma International Light verwendet, welches mit einem Bandpassfilter RG780 (ca. 780 – 2740 nm) ausgestattet ist. Aufgrund der eingesetzten Quarzglas Schutzscheiben, die nur bis ca. 2700 nm ausreichend Transmission zeigen, vgl. mit Abb. 7.1, stellen die Größen E_{IR} und somit auch E_H , siehe Kapitel 4.2, eine Unterschätzung der tatsächlich größeren Bestrahlungsstärken dar.

Personendosimeter

UV-Bestrahlungsstärken werden zusätzlich mit zwei verschiedenen Personendosimetern X2012 der Firma Gigahertz-Optik als Funktion der Zeit aufgezeichnet. Angebracht an der Front des Schweißerschutzhelmes messen die Dosimeter im zeitlichen Abstand von 5 s mit einer Integrationszeit von 0,2 s vorhandene UV-Strahlung. Dabei ist jedes Dosimeter mit zwei Eingangsoptiken ausgestattet, die bei der Variante X2012-11v2 einerseits die $S(\lambda)$ -gewichteten UVA-Bestrahlungsstärken und andererseits die Summe der aktinischen UVB- und UVC-Bestrahlungsstärken detektieren.

Insgesamt ergibt sich dadurch E_{eff} . Das ungewichtete Dosimeter Typ X2012-14v2 misst radiometrische UVA- und UVB-Bestrahlungsstärken.

Vor Beginn der Untersuchungen werden Dunkelstrom- und Umgebungslichtmessungen durchgeführt und die erhaltenen Messwerte entsprechend korrigiert.

Strahldichtemessgerät

Neben der Erfassung der Blaulichtgefährdung mittels der Bestrahlungsstärke E_B , wird zusätzlich auch die gewichtete Strahldichte L_B des Lichtbogens unter einem Empfangswinkel γ , siehe Kapitel 4.1, von 1,7 mrad gemessen. Dazu wird ein Strahldichtemesskopf LDM-9811 in Verbindung mit einem Integralmesskopf PD-16BLH der Firma Gigahertz-Optik verwendet und L_B digital mit Hilfe eines P-9710-1 Optometers (Gigahertz-Optik) über mehrere Sekunden aufgezeichnet. Die so erhaltenen Strahldichtemesswerte werden anschließend über die Messzeit gemittelt.

6.4 Rohrschweißvorrichtung und Messaufbauten

Alle Schweißungen in der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt erfolgen mit Hilfe einer vollmechanischen Rohrschweißvorrichtung, d. h. auf einem sich drehenden Rohr mit fester Positionierung der Schweißbrenner, siehe Abb. 6.1 (a). Die Umlaufzeit, resultierend aus Rotationsgeschwindigkeit und Durchmesser des Rohres, ist um ein Vielfaches länger als die Detektionszeit der optischen Messgeräte. Nach einer vollen Umdrehung wird der Brenner bzgl. der Schweißnaht entlang der Axialrichtung versetzt (Abb. 6.1 (b)) und das optische Messequipment neu justiert.

Beim Lichtbogenhandschweißen (MMA) kommt eine für dieses Forschungsprojekt konstruierte Stabelektrodenführung zum Einsatz, so dass Ort und Anstellwinkel der Stabelektrode bzgl. der Rohrschweißvorrichtung unveränderlich sind. Das Nachführen der Stabelektrode wird von einem erfahrenen Schweißer durchgeführt.

Aufgrund der Räumlichkeiten des Schweißarbeitsplatzes ist es nicht möglich, jedes für dieses Forschungsprojekt verwendete optische Messgerät separat auf einem Stativ um den Lichtbogen zu platzieren. Dessen ungeachtet ist es sinnvoll, alle Eingangsoptiken so kompakt wie möglich aufzustellen, um systematische Messfehler

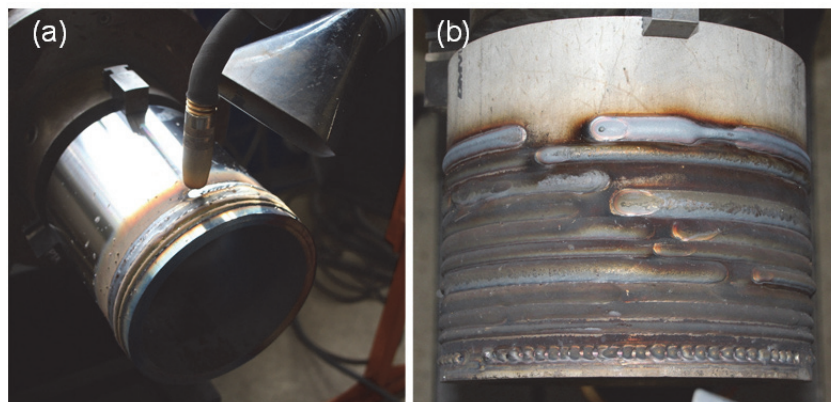


Abb. 6.1 (a) Rohrschweißvorrichtung mit Brenner und Absaugung. (b) Schweißnähte nach Ende einer Versuchsreihe. Länge und Dicke der Schweißnähte variieren in Abhängigkeit der verwendeten Schweißparameter.

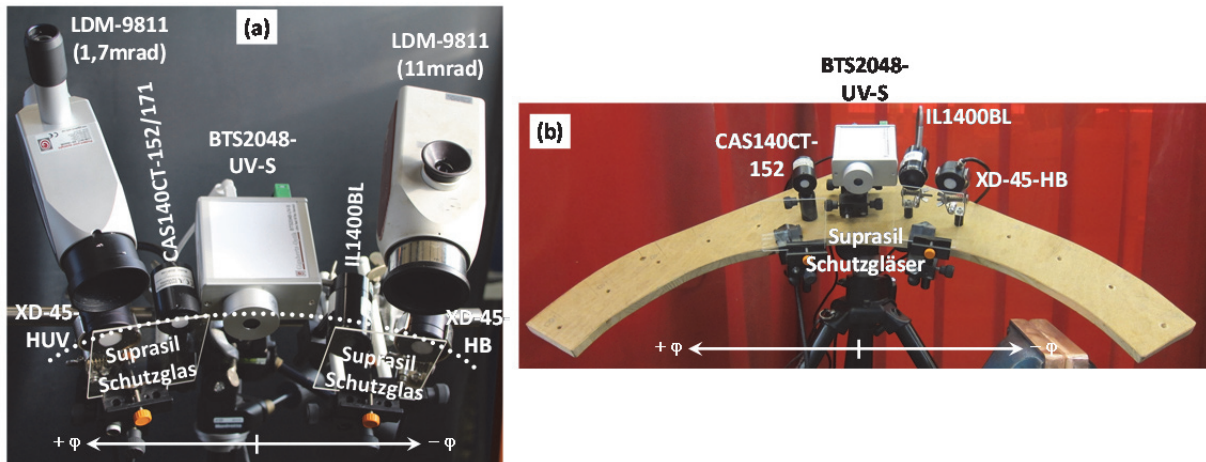


Abb. 6.2 (a) Anordnung und Bezeichnungen der für dieses Forschungsprojekt verwendeten optischen Messinstrumente. Die gepunktete Linie verdeutlicht schematisch die Ausrichtung aller Geräte im radialsymmetrischen Abstand von 50 cm zum Lichtbogen. Zusätzlich abgebildet ist die Definition des Azimutalwinkelbereichs $\pm\varphi$. (b) Zur Überprüfung der Polar- und Azimutalwinkelabhängigkeiten der vom Lichtbogen emittierten optischen Strahlung sowie zur betrieblichen Modellvalidierung verwendeter Messaufbau.

durch große Unterschiede im Azimutalwinkel φ zu verhindern. Zur Realisierung eines entsprechenden Messaufbaus wird eine runde Metallschiene mit flexiblen Befestigungsmöglichkeiten auf einem Stativ mit Feineinstellung montiert, siehe Abb. 6.2 (a).

Der komplette Aufbau wird zunächst um einen Polarwinkel von $\theta = 45^\circ$ bezüglich der Ebene des Lichtbogens geneigt. Da dessen emittierte Strahlung von θ abhängig ist, erhöht sich durch diese Neigung die detektierte Bestrahlungsstärke, siehe Kapitel 7.5. Aus Platzgründen müssen beide LDM-9811 bei einem um ca. 5° größeren Polarwinkel positioniert werden. Mit Hilfe einer kreisförmigen Schablone werden dann alle Eingangsoptiken auf einen konstanten radialsymmetrischen Abstand von $r = 50$ cm zum Lichtbogen ausgerichtet. Die Feineinstellung der Azimutalwinkel jedes Messgerätes erfolgt abschließend mit einem Justierlaser bzw. mit einem Sucher (LDM-9811). Zum Schutz vor möglichen Metallspritzern beim Schweißen dienen Quarzglasplatten, die vor den Eingangsoptiken platziert werden (beim BTS2048-UV-S ist eine Schutzscheibe bereits im Gerät integriert).

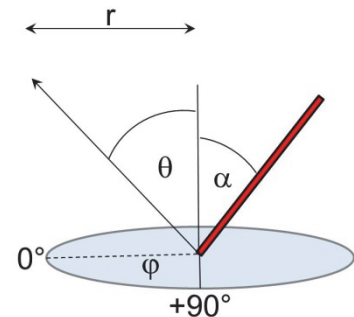


Abb. 6.3 Winkeldefinitionen

Zur Aufnahme der raumwinkelabhängigen Strahlungsemission des Lichtbogens, siehe Kapitel 7.5, eignet sich obiger Aufbau allerdings weniger da die azimutale Position des detektierenden Spektralradiometers für jede Messung verändert werden muss. Als zweiter Messaufbau wird deswegen eine sichelförmige Holzscheibe mit einem festen Radius von $r = 50$ cm und feststehenden φ -Positionen angefertigt, siehe Abb. 6.2 (b). Durch eine geeignete Aufnahmevorrichtung am φ -variablen Spektralradiometer (hier: CAS140CT-152) kann schnell und präzise die Azimutalwinkelabhängigkeit der vom Lichtbogen emittierten Strahlung untersucht werden. Das BTS2048-UV-S befindet sich stets an der Zentralposition bei $\varphi = 0^\circ$. Um die Polarwinkelabhängigkeit

aufzuzeichnen, muss der auf einem Stativ befestigte Messaufbau lediglich um 90° gekippt werden.

Da der in Abb. 6.2 (b) dargestellte Messaufbau auch zur betrieblichen Modellvalidierung eingesetzt wird, ist im Bild zusätzlich noch die Eingangsoptik des Infrarotradiometers IL1400BL sowie das XD-45-HB zu erkennen.

6.5 Zeitlicher Verlauf der Schweißströme

Bei den meisten Schweißverfahren und ihren Prozessvarianten unterliegt die Schweißstromstärke einer technisch gewollten zeitlichen Veränderung. Dies impliziert aber, dass neben der mittleren Schweißstromstärke I_M , die hauptsächlich in diesem Forschungsbericht verwendet wird, noch andere (zeitlich variable) Größen auftreten.

Zur Erfassung der Zeitabhängigkeit der Schweißströme wird neben der in Kapitel 6.1 erwähnten Apparatur auf eine Kombination aus Oszilloskop und Strommesszange zurückgegriffen. Hierbei kommt ein Rhode&Schwarz RTE1024 Digitaloszilloskop mit einer Bandbreite von mindestens 200 MHz und eine RT-ZC05B Strommesszange ebenfalls von Rhode&Schwarz mit einer Bandbreite von 2 MHz und einem maximalen Messbereich für die Stromstärke von 500 A zum Einsatz.

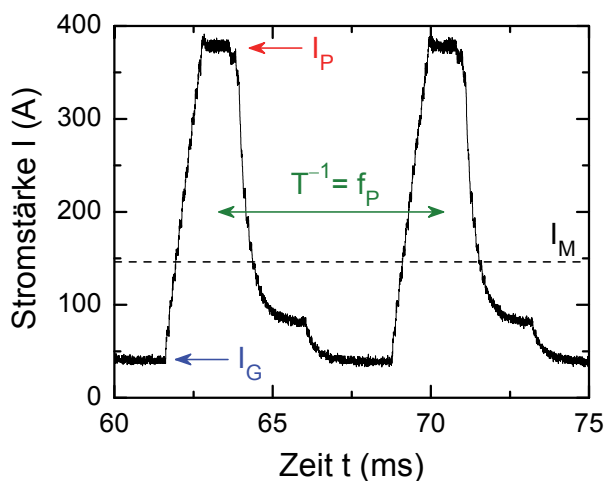


Abb. 6.4 Erklärung verschiedener Stromstärken anhand p-MAG-Schweißen von CrNi

Ein für gepulstes Lichtbogenschweißen typischer zeitlicher Stromstärkeverlauf ist in nebenstehender Abb. 6.4 dargestellt. Die hier gezeigten beiden Pulse mit ihrer komplexen Pulsform treten in Zeitintervallen (Periodendauer) T auf. Der Kehrwert T^{-1} entspricht der Impulswiederholfrequenz f_P .

Weiterhin gut zu erkennen sind die Grundstromstärke I_G , die für gepulstes Lichtbogenschweißen ein unteres Stromstärkelimit darstellt, sowie die Impulsstromstärke I_P , die der Maximalstromstärke entspricht.

Zu beachten ist, dass der in Abb. 6.4 gezeigte Stromstärkeverlauf nur ein mögliches Beispiel wiedergibt.

Einige weitere Zeitabhängigkeiten der Schweißstromstärke sind in Abb. 6.5 exemplarisch für (a) WIG-, (b) CMT- und (c) MAG-Schweißen (normale Prozessvariante) dargestellt. Für WIG-Schweißen mit Gleichstrom (DC) stellt sich nach ca. 0,15 s die gewünschte Schweißstromstärke (hier: 140 A) ein während mit Wechselstrom (AC) das Stromsignal symmetrisch um Null oszilliert.

Der zeitliche Stromstärkeverlauf beim CMT-Schweißen mit normaler Prozessvariante weist zunächst einen intensiven Impuls auf bevor sich „langsam“ mit einer komplizierten Pulsform die gewünschte Stromstärke einregelt.

Dieser „Overshoot“ tritt auch beim MAG-Schweißen auf, gefolgt von einer für einen Kurzlichtbogen typischen sägezahnartigen Stromstärke.

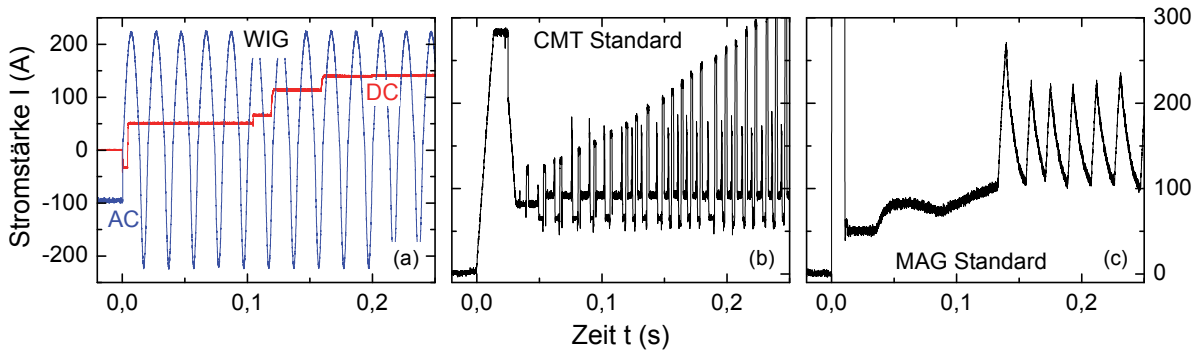


Abb. 6.5 Zeitverlauf der Schweißstromstärke ($I_M = 140 \text{ A}$) beim (a) WIG-Schweißen mit Gleich- (DC) und Wechselstrom (AC) sowie beim (b) CMT- und (c) MAG-Schweißen, beide mit normaler Prozessvariante. Die Ordinatenskalierung in (b) entspricht der von (c).

6.6 Prinzipielle Datenanalyse

Auf viele der für dieses Forschungsprojekt gemessenen und anschließend ausgewerteten experimentellen Daten wird dieselbe Analyseroutine angewendet, die im Folgenden erläutert wird.

6.6.1 Aufbereitung der Rohdaten

- Vor Beginn jeder Messserie, also z. B. bei der Variation der mittleren Schweißstromstärke eines Schweißverfahrens auf einem Material, wird zunächst die Umgebungsstrahlung gemessen. Der entsprechende Integralwert bzw. das Hintergrundspektrum wird vor der anschließenden Analyse vom Messwert bzw. vom gemessenen Spektrum subtrahiert.
- Da alle Eingangsoptiken zum Schutz vor Schweißspritzern hinter Quarzglas Schutzscheiben positioniert sind, müssen die Messwerte bzw. Schweißspektren in einem zweiten Schritt hinsichtlich der spektralen Transmission dieser Schutzscheiben, siehe Kapitel 7.1, korrigiert werden (außer BTS2048-UV-S). Die aufgenommenen Schweißspektren werden mit dem inversen spektralen Transmissionsverlauf der Schutzscheiben multipliziert, $E(\lambda) T^{-1}(\lambda)$, und so für jede Wellenlänge (Datenpunktintervall 0,1 nm) die spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ korrigiert.
 Zur Korrektur der Integraldaten wird die spektrale Transmission der Schutzscheiben im Wellenlängenbereich, in dem das entsprechende Messgerät empfindlich ist (z. B. UVA von 315 bis 400 nm), integriert. Die so berechnete Fläche F wird mit der Maximalfläche F_{\max} bei 100 %-iger Transmission verglichen. Der Quotient der beiden Werte, $K = F_{\max}/F$, entspricht dem gesuchten Korrekturfaktor, siehe Tab. 6.3.
- Die hintergrund- und transmissionskorrigierten Schweißspektren können nun in die Formeln (4.6) – (4.12) aus Kapitel 4.2 eingesetzt und somit die entsprechenden (un-) gewichteten Integralwerte bestimmt werden.
 Bei den Integralmessverfahren müssen die jeweiligen gewichteten Messwerte addiert werden, d. h. z. B. die beiden Integralwerte von 200 – 400 nm beim

Tab. 6.3 verwendete Korrekturfaktoren K

	spektraler Bereich	K
XD-45-HUV	315 – 400 nm, ungewichtet	1,078
	200 – 320 nm	1,086
	320 – 400 nm	1,078
XD-45-HB	300 – 380 nm	1,079
	380 – 600 nm	1,074
	600 – 700 nm	1,071
IL1400BL	780 – 2740 nm	1,09

Messkopf XD-45-HUV (resultiert in E_{eff}) und die drei Integralwerte zwischen 300 und 700 nm beim Messkopf XD-45-HB (ergibt E_B).

6.6.2 Statistik und Fehlerbetrachtung

Ein Teil der vorhandenen Integralwerte, sowohl als gemessene als auch aus Spektren berechnete Werte, ist für einen Schweißparametersatz mehrfach vorhanden, so dass eine statistische Analyse erfolgen kann.

- Zur Bestimmung der ungewichteten UVA-Bestrahlungsstärke E_{UVA} wird der Mittelwert \bar{y} , Gleichung (6.1), und dessen Standardabweichung s , Gleichung (6.2), aus den Messdaten y_i des BTS2048-UV-S und des CAS140CT-152 gebildet (Anzahl $N = 2$). Aufgrund der Abweichung von 11 % beim UVA-Integralwert des XD-45-HUV, siehe Tab. 7.1, werden diese Werte hier nicht verwendet. (Anmerkung: Bei der Darstellung der Messdaten in einem Diagramm wird s der besseren Übersicht halber nur dann gezeigt, wenn diese die Symbolgröße übersteigt.)

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (6.1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (6.2)$$

- In die Mittelwertbildung der effektiven Bestrahlungsstärke E_{eff} und der effektiven UVA-Bestrahlungsstärke $E_{\text{UVA,eff}}$ fließen sowohl die berechneten Inte-

gralwerte der beiden Spektralradiometer als auch die des Integralmesskopfes XD-45-HUV mit ein.

- Zur Bestimmung der effektiven UVB- und UVC-Bestrahlungsstärken $E_{UVB/C,eff}$ wird der entsprechende Mittelwert mit Standardabweichung aus den berechneten Integralwerten der beiden Spektralradiometer BTS2048-UV-S und CAS140CT-152 gebildet.
- Der Mittelwert der gewichteten Bestrahlungsstärke E_B setzt sich zusammen aus der Summe der drei gemessenen Integralwerte des Messkopfes XD-45-HB und den berechneten Werten des Diodenarrays CAS140CT-152.
- Bei der Ermittlung der thermischen Gefährdung der Haut E_H wird, sofern möglich, der Integralwert des IL1400BL in Addition mit dem berechneten Integralwert E_{VIS} betrachtet. Eine Mittelwertbildung ist hier nicht möglich. Aufgrund technischer Probleme war das IL1400BL und auch das CAS140CT-152 beim WIG-Schweißen, siehe Kapitel 8.1, nicht vorhanden, so dass hier nur der reduzierte Wert E_{IR-A} gezeigt werden kann.

Mit Hilfe der berechneten Bestrahlungsstärken im UV-, VIS- und IR-Bereich kann ein Vergleich mit bestehenden Grenzwerten nach der OStrV (OStrV) erfolgen. Als Ergebnis erhält man nach Gleichungen (4.6) - (4.12) die maximalen Expositionszeiten. Die Unsicherheit Δt in der Expositionszeit resultiert aus dem Fehler der Bestrahlungsstärke ΔE und muss mit Hilfe der Gauß'schen Fehlerfortpflanzung, Gleichung (6.3), berechnet werden.

$$t = t(E) \quad \Delta t = \frac{\partial t(E)}{\partial E} \Delta E \quad (6.3)$$

6.6.3 Auswertung der Leistungsabhängigkeit

Bei der Analyse von Schweißspektren ist es sinnvoll, den gewichteten Anteil von UVA-, UVB- oder UVC-Strahlung $E_{j,eff}$ (mit $j = \text{UVA, -B oder -C}$) am gesamten ultravioletten Spektralbereich von 200 – 400 nm, E_{eff} , zu betrachten. Ein Blick auf die biologische Wichtungsfunktion $S(\lambda)$, siehe Abb. 4.4, macht deutlich, dass vor allem Strahlungsanteile im UVC- und UVB-Bereich in die effektive Bestrahlungsstärke E_{eff} miteinfließen. Hierauf basierend wird das UV-Anteilsverhältnis ρ eingeführt:

$$\rho_j(P) = \frac{E_{j,eff}}{E_{eff}} \times 100 \quad (6.4)$$

$P = U_M I_M$ ist hierbei die dem Lichtbogen zugeführte mittlere elektrische Leistung.

Bemerkung: Da die emittierte Bestrahlungsstärke vieler Schweißverfahren proportional zu $P \propto I_M^2$ ist (Tenkate, 1998), resultiert eine Auftragung gegen die mittlere elektrische Leistung in einer linearen Abhängigkeit. Neben der mittleren Stromstärke I_M wird auch stets die mittlere Spannung U_M nachgeregelt. Somit ergibt sich über die Verknüpfung mit dem elektrischen Widerstand, $U_M = R I_M$, die mittlere elektrische Leistung zu $P = U_M I_M$.

Sofern eine Proportionalität der Art $E \propto P$ bei den gemessenen Bestrahlungsstärken vorhanden ist, kann eine lineare Funktion

$$E = E_0 + mP \quad (6.5)$$

an die leistungsabhängigen Bestrahlungsstärken (E_{eff} , E_{UVA} , E_{B} , etc.) angepasst werden. Hierbei ist E_0 die bei verschwindender, dem Lichtbogen zugeführter elektrischer Leistung auftretende Bestrahlungsstärke, $E_0 = \lim_{P \rightarrow 0} E$. Dies impliziert, dass der Lichtbogen nicht brennt ($P = 0$). Somit spiegelt E_0 das Umgebungslicht wider und ist bei Ursprungsgeraden sehr klein. m ist die Steigung der linearen Funktion.

Bei einer linearen Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke von der elektrischen Leistung folgt aus den Gleichungen (4.6) - (4.13), dass die maximal zulässige Expositionsdauer t die Gestalt einer Hyperbel hat. Zur Anpassung an die berechneten t -Werte kann eine Funktion

$$t = \frac{t_1}{P - P_{\text{off}}} + t_{\text{off}} \quad (6.6)$$

verwendet werden. Der Parameter t_1 beschreibt die Krümmung, P_{off} und t_{off} die Verschiebung der Hyperbel bzgl. der x- und y-Achse. Die beiden „Offset“ Parameter sind sehr klein bzw. im Idealfall gleich null.

Ist der zugängliche Leistungsbereich eines Schweißverfahrens relativ klein, ist eine Anpassung an die Expositionsdauern nach Gleichung (6.6) oft nicht möglich. In diesen Fällen kann trotzdem eine Auswertung der Daten mit einer linearen Näherungsfunktion

$$t^* = t_0 + m^*P \quad (6.7)$$

in Analogie zu Formel (6.5) durchgeführt werden.

Eine zweite Herangehensweise zur mathematischen Beschreibung der berechneten Expositionsdauern basiert auf den Anpassungsparametern aus Gleichung (6.5): Durch Verknüpfung dieser Werte z. B. mit Gleichung (4.6) (b)

$$t_{\text{UVA}} = \frac{10^4 \text{ Jm}^{-2}}{E_0 + mP} \quad (6.8)$$

kann eine Funktion (hier: $t_{\text{UVA}}(E_0, m)$) ohne zusätzliche Fit-Analyse an die Expositionsdauern angepasst werden.

Beide Analysemethoden liefern identische Resultate, wobei der zweite Beschreibungsansatz mit geringerem Arbeitsaufwand verbunden ist. Andere mathematische Beschreibungsmodelle wie z. B. eine Exponentialfunktion werden an entsprechender Stelle im Forschungsbericht eingeführt und erläutert.

7 Grundlegende Voruntersuchungen

7.1 Transmission der Quarzglas Schutzscheiben

Zum Schutz der empfindlichen Eingangsoptiken der in Kapitel 6.3 aufgeführten Messgeräte werden synthetische Quarzglasplatten (FS03) der Firma GVB eingesetzt. Da keine 100 %-ige optische Durchlässigkeit erreicht werden kann, wird vorab die spektrale Transmission mit einem Cary 5000 UV-Vis-NIR (Agilent Technologies) zwischen 200 und 3300 nm (Datenpunktintervall 0,5 nm) gemessen, siehe Abb. 7.1.

Unterhalb einer Wellenlänge von $\lambda \approx 2000$ nm besitzen die Quarzglas Schutzscheiben hervorragende Transmissionseigenschaften mit einer durchschnittlichen Transmission von $\bar{T} = (93,3 \pm 0,6) \%$. Aufgrund der geringen Halbwertsbreite von $\lambda_{1/2} \approx 25$ nm und einer Verringerung von T von nur 3 % stört das Minimum bei ca. 1400 nm nicht bei den Messungen dieses Projektes. Das Minimum bei ca. 2200 nm muss lediglich bei der Korrektur der Bestrahlungsstärkewerte des IL1400BL berücksichtigt werden und kann mit einer Transmissionsverringerung von ca. 10 % und $\lambda_{1/2} \approx 60$ nm als noch akzeptabel betrachtet werden.

Oberhalb von $\lambda \approx 2700$ nm steigt die spektrale Transmission der Quarzglas Schutzscheiben stark an. Bedingt durch die Transmission des RG780-Filters im IL1400BL, siehe Kapitel 6.3, liegt die obere Wellenlängengrenze dieses Projektes allerdings bereits bei etwa 2700 nm.

7.2 Interrater-Reliabilität

Da mit mehreren optischen Messgeräten gleichzeitig die vom Lichtbogen emittierte Strahlung gemessen wird, stellt sich die Frage nach deren Vergleichbarkeit untereinander. Diese sog. Interrater-Reliabilität wird vor Beginn der experimentellen Untersuchungen des Lichtbogens (und generell in regelmäßigen zeitlichen Abständen) im Labor untersucht.

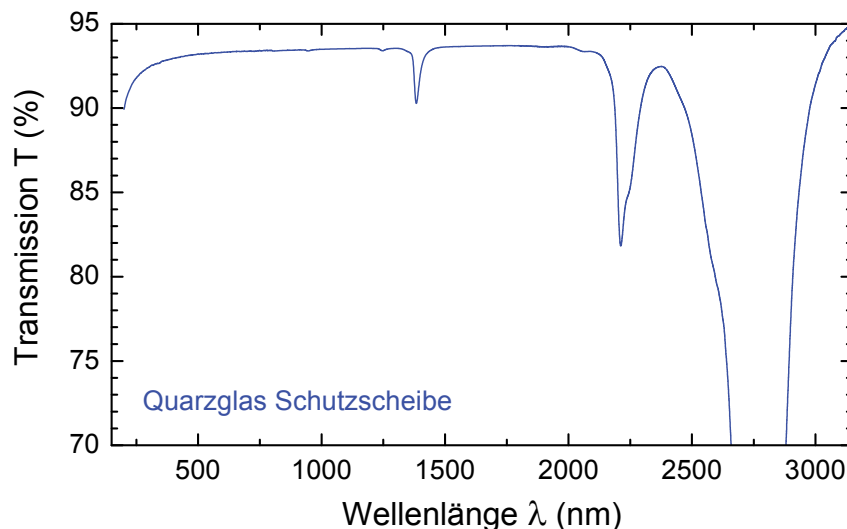


Abb. 7.1 Spektrale Transmission T in % der Quarzglas Schutzscheiben im Wellenlängenbereich zwischen 200 und 3300 nm. Drei Minima sind zu erkennen, wobei dasjenige bei ca. 2750 nm auf 0 % abfällt.

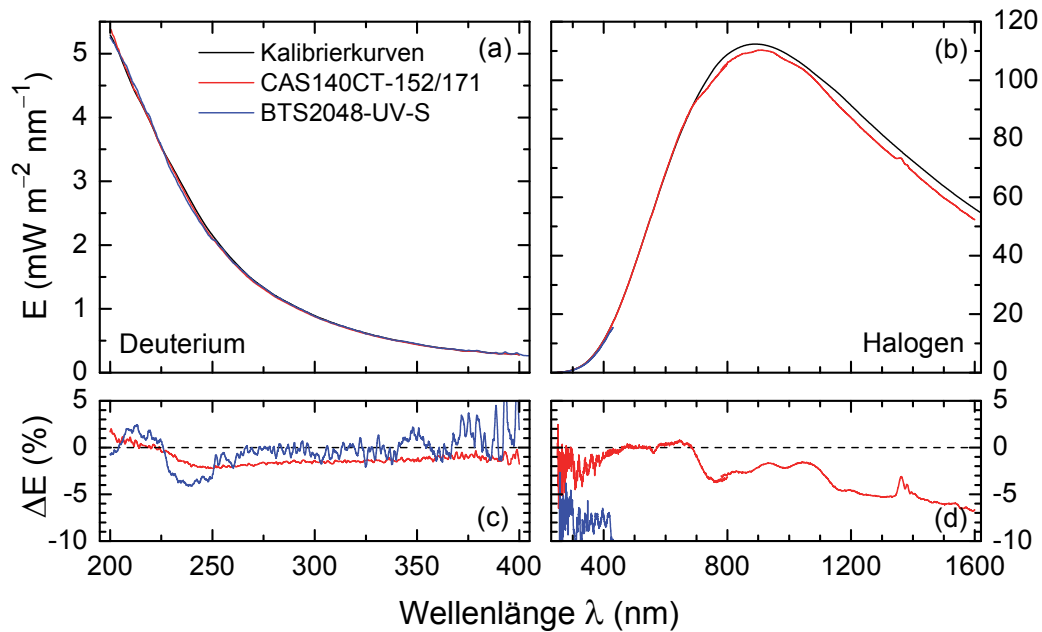


Abb. 7.2 Ergebnisse der Interrater-Reliabilität der im Forschungsprojekt verwendeten Spektralradiometer (a) vor einer Deuterium- und (b) vor einer Halogenlichtquelle. In (c) und (d) sind die jeweiligen prozentualen Abweichung ΔE von der Kalibrierkurve, nach Gleichung (7.1), abgebildet.

Dafür wird die jeweilige Kalibrierlampe, hier eine CL3-Deuteriumlichtquelle (Firma Bentham) und eine stabilisierte 1000 W Halogenlichtquelle der Firma Omtec, gemäß Kalibrierschein im Abstand von 20 bzw. 70 cm zur Eingangsoptik eines (Spektral-) Radiometers aufgebaut. Nach Laserjustage des Strahlengangs wird die spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ gemessen, siehe Abb. 7.2 (a) und (b), und die prozentuale Abweichung ΔE über

$$\Delta E(\lambda) = \frac{E(\lambda) - E_{D2,Halo}}{E_{D2,Halo}} \times 100 \quad (7.1)$$

bestimmt. Hierbei sind $E_{D2,Halo}$ die von der PTB gegen ein Bestrahlungsstärkenormal ermittelten Kalibrierwerte der Deuterium- bzw. der Halogenlichtquelle.

Die prozentuale Abweichung der beiden Spektralradiometer von der Kalibrierkurve der Deuteriumlichtquelle liegt unterhalb von $\pm 5\%$, siehe Abb. 7.2 (c).

Beim Vergleich der beiden Diodenarrays von Instrument Systems mit der Kalibrierkurve der Halogenlampe, Abb. 7.2 (d), zeigt sich zunächst praktisch keine Abweichung. Die Schwankungen in ΔE unterhalb von $\lambda \approx 300$ nm resultieren aus einem sehr kleinen Wert für E_{Halo} in Gleichung (7.1). Erst ab einer Wellenlänge von ca. 700 nm nimmt die prozentuale Abweichung zu, bleibt aber im betrachteten Messfenster oberhalb von -7% . Aufgrund der geringen UV-Strahlungsanteile der Halogenlampe beträgt $\Delta E \approx -8\%$ beim Spektralradiometer BTS2048-UV-S.

Auf ähnliche Weise kann die Vergleichbarkeit der Integralverfahren, siehe Kapitel 6.3, festgestellt werden. Für deren Interrater-Reliabilität müssen aber zusätzlich noch entsprechende (gewichtete) Integralwerte nach Kapitel 4.2 aus den Kalibrierkurven

Tab. 7.1 Ergebnisse der Interrater-Reliabilität. Prozentuale Abweichungen vom Kalibrierstandard (grün unterlegt) sind in Klammern angegeben.

	E_{UVA} (mW m ⁻²)	E_{eff} (mW m ⁻²)
Deuteriumlampe	37	78
CAS140CT-152	37 (0)	77 (-1)
BTS2048-UV-S	38 (3)	77 (-1)
XD-45-HUV	41 (11)	79 (1)

	E_B (W m ⁻²)	E_{IR-A}/E_{IR} (W m ⁻²)
Halogenlampe	1,52	61 / 104
CAS140CT-152	1,52 (0)	–
XD-45-HB	1,48 (3)	–
CAS140CT-171	–	59 (-3) / –
IL1400BL	–	– / 110 (6)

berechnet werden. Die Ergebnisse finden sich in Tab. 7.1.

Der Integralmesskopf XD-45-HUV für den UV-Bereich hat bei der ungewichteten UVA-Bestrahlungsstärke einen prozentualen Fehler von 11 %, bei E_{eff} beträgt die Abweichung nur 1 %, resultierend aus einer gut angepassten Filterkurve. Im Folgenden werden die ungewichteten UVA-Integralwerte des Messkopfes XD-45-HUV nicht weiter verwendet.

Der aus dem Spektrum (CAS140CT-152) berechnete Integralwert E_B stimmt innerhalb der Messgenauigkeit mit dem des Kalibrierstandards überein, der Integralmesskopf XD-45-HB weicht um 3 % davon ab. Auch der E_{IR-A} -Wert des IR-Diodenarrays zeigt mit einer Abweichung von -3 % eine gute Übereinstimmung mit der Halogenlampe. Zur Berechnung des E_{IR} -wertes liegen lediglich Kalibrierdaten der Halogenlampe bis 2500 nm vor, so dass das Integralmessgeräte IL1400BL, welches bis ca. 2700 nm misst, konsequenterweise einen höheren Wert anzeigt.

An dieser Stelle sei noch erwähnt, dass auch die Wellenlängengenauigkeit der drei Diodenarrays mittels einer 10 W Niederdruck Quecksilberdampfampe überprüft worden sind. Aufgrund der sehr guten Wellenlängenkali-brierungen mit prozentualen Abweichungen deutlich unterhalb von 1 % wird auf eine Abbildung und eine weitere Diskussion verzichtet.

7.3 Intrarater-Reliabilität

Neben der Interrater-Reliabilität, bei der durch verschiedene Messinstrumente stets dieselbe Messung durchgeführt wird, überprüft man mit Hilfe der Intrarater-Reliabilität die Messgenauigkeit eines Gerätes durch sich wiederholende Messungen. Dies wird für die verwendeten Spektralradiometer und Integralmessverfahren am Kurzlichtbogen beim MAG-Schweißen auf S235 untersucht. Zur Überprüfung des Dynamikbereichs der Messgeräte hinsichtlich ihrer Messgenauigkeit, wird zusätzlich die dem Lichtbogen zugeführte elektrische Leistung $P = U_M I_M$ sukzessive erhöht.

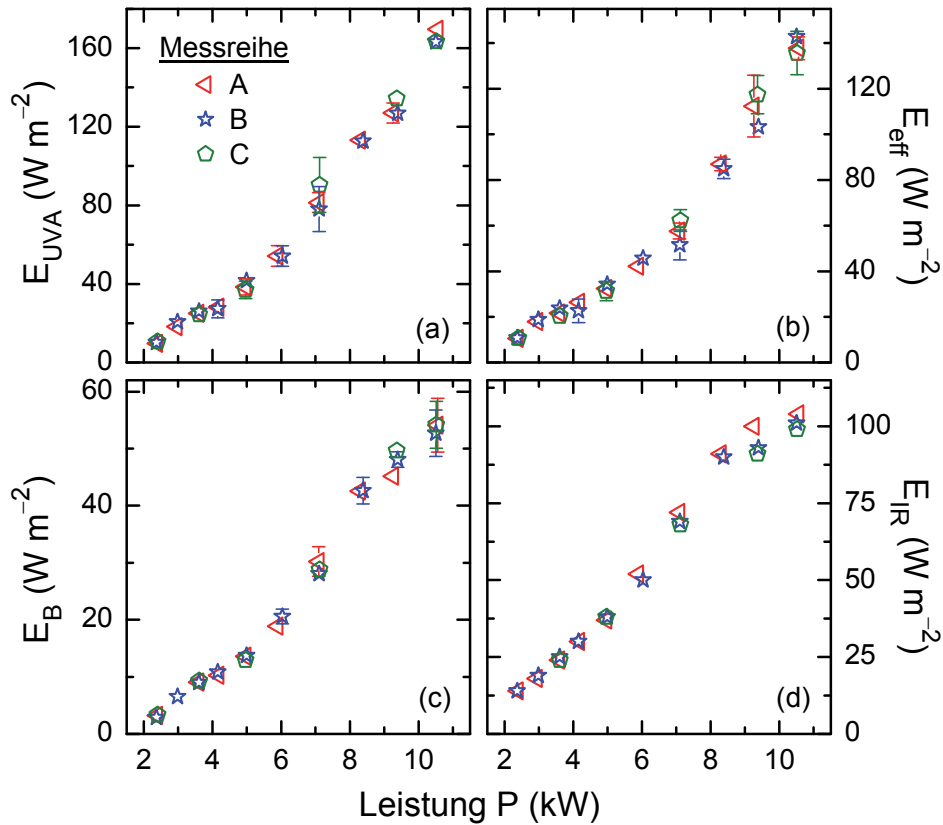


Abb. 7.3 Ergebnisse der Intrarater-Reliabilität. Dargestellt sind (a) E_{UVA} , (b) E_{eff} , (c) E_B und (d) E_{IR} in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung P für drei unabhängige Messreihen A, B und C beim MAG-Schweißen mit Kurzlichtbogen auf S325.

Um die für die eingesetzten optischen Messgeräte durch dreimalige Wiederholung des Experimentes große Datenmenge übersichtlich darstellen zu können, ist in Abb. 7.3 jeweils der Mittelwert mehrerer Messinstrumente (außer im Infrarotbereich) bei einer Leistung abgebildet. Die Auftragung gegen P und nicht wie häufig üblich gegen I_M begründet sich durch die Tatsache, dass für viele Schweißverfahren die emittierte Strahlung proportional zu $P \propto I_M^2$ ist (Tenkate, 1998).

In Abb. 7.3 (a) ist der ungewichtete UVA Wert E_{UVA} als Mittelwert aus BTS2048-UV-S und CAS140CT-152 dargestellt, in (b) kommen zur Mittelwertbildung die Ergebnisse des Messkopfes XD-45-HUV hinzu. Für die Bestrahlungsstärke E_B wurden die Resultate des CAS140CT-152 und die des Messkopfes XD-45-HB verwendet. Lediglich in (d) sind rein die Bestrahlungsstärkewerte E_{IR} des IL1400BL ohne Mittelwertbildung abgebildet. Die entsprechenden Standardabweichungen nach Formel (6.3) sind durch Fehlerbalken visualisiert.

Trotz der potenziell möglichen Fluktuationen der vom Lichtbogen emittierten Strahlung, siehe Kapitel 11, stimmen die drei unabhängig voneinander aufgenommenen Messreihen A, B und C innerhalb der Fehlergrenzen überein. Es zeigt sich kein leistungs- oder wellenlängenabhängiger Trend.

Fazit

Inter- und Intra-Rater-Reliabilität zeigen auf, dass die im Rahmen dieses Forschungsprojektes verwendeten optischen Messgeräte untereinander vergleichend eingesetzt werden können und dass deren Messgenauigkeit jeweils innerhalb kleiner Fehlergrenzen liegt.

7.4 Photometrisches Abstandsgesetz

Das photometrische Abstandsgesetz (auch als Entfernungsgesetz bezeichnet) beschreibt die Abnahme der Bestrahlungsstärke E als Funktion des Abstandes r zur Strahlungsquelle:

$$E = \frac{A}{r^2} + E_{\infty} \quad (7.2)$$

A beschreibt die Abschwächung der Bestrahlungsstärke durch das Medium z. B. durch Luft und $E_{\infty} = \lim_{r \rightarrow \infty} E$ ist im Idealfall null. Durch eine Verdopplung des Abstandes zur Lichtquelle wird somit nur noch ein Viertel der Bestrahlungsstärke gemessen, siehe Abb. 7.4. Dies gilt allerdings nur für punktförmige Lichtquellen.

Anhand eines WIG-Lichtbogens (Gleichstrom, S235) wird überprüft, ob das photometrische Abstandsgesetz für die allgemein als punktförmige Lichtquellen geltenden Lichtbögen angewendet werden darf bzw. ab welchem Abstand das Gesetz erfüllt ist. Aufgrund technischer Einschränkungen konnte kein Abstand kleiner als 30 cm bzw. größer als 3 m untersucht werden. In Abb. 7.5 sind die Ergebnisse der Abstandsmessungen dargestellt.

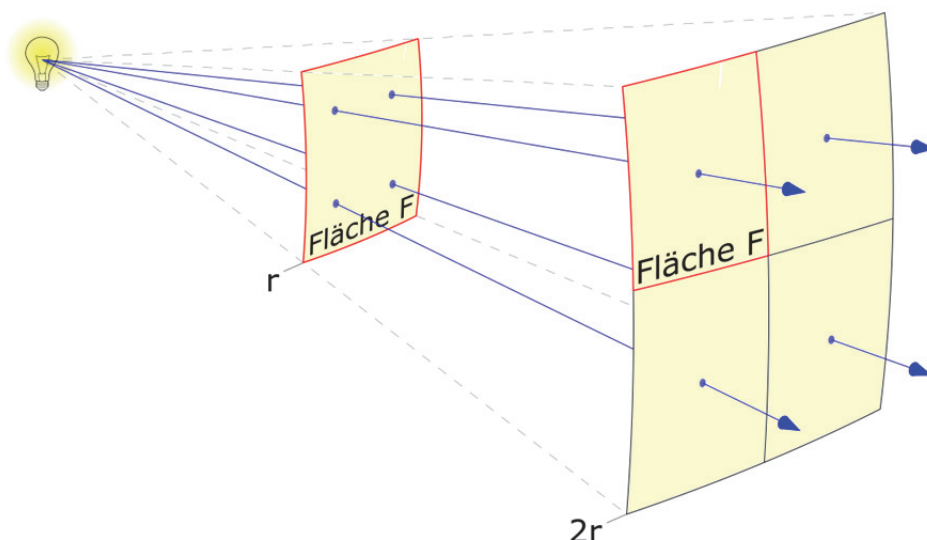


Abb. 7.4 Skizze zur Veranschaulichung des Entfernungsgesetzes: Im Abstand r treffen vier Photonen auf eine beliebige Kugeloberfläche F , bei doppelter Entfernung $2r$ tritt nur noch ein Lichtteilchen durch eine gleich große Kugeloberfläche.

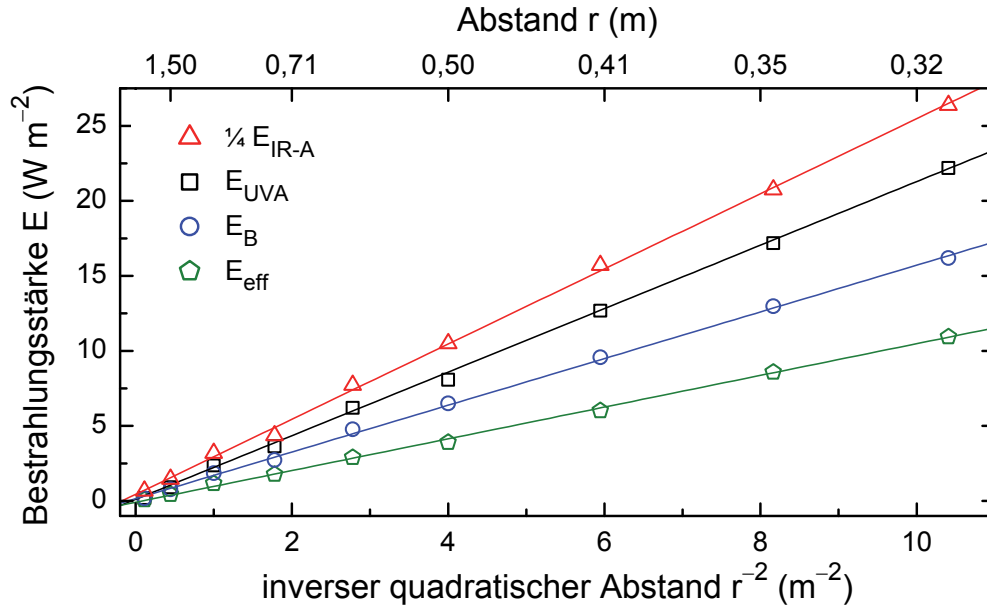


Abb. 7.5 Bestrahlungsstärke E als Funktion des inversen quadratischen Abstandes r^{-2} für die vier Größen E_{IR-A} , E_{UVA} , E_B und E_{eff} beim WIG-Schweißen von S235. Der Übersicht halber ist nur $\frac{1}{4} E_{IR-A}$ dargestellt. Zur besseren Verständlichkeit ist r in m als zusätzliche obere x-Achse hinzugefügt. Fehlerbalken sind nicht eingezeichnet.

Die bei den untersuchten Abständen aufgenommenen Messwerte zeigen eine lineare Abhängigkeit vom inversen quadratischen Abstand. Eine Abweichung zu kleinen Abständen ist nicht zu erkennen, so dass der Lichtbogen mindestens ab einem Abstand von 30 cm als punktförmig angesehen werden kann.

Eine lineare Anpassung an die Messwerte aus Abb. 7.5 mit einer Funktion nach Gleichung (7.2) ergibt die in Tab. 7.2 aufgelisteten Parameter. Zu größeren Abständen sinkt die Bestrahlungsstärke schnell ab und E_{∞} ist innerhalb der Fehlergrenzen fast null. Die größte Abschwächung durch Luft erfährt Infrarotstrahlung gefolgt von UVA- und sichtbarer Strahlung.

Tab. 7.2 Anpassungsparameter A in W und E_{∞} in $W m^{-2}$ der in Abb. 7.5 gezeigten linearen Funktionen

	A (W)	E_{∞} ($W m^{-2}$)
E_{UVA}	$(2,12 \pm 0,03)$	$(0,11 \pm 0,14)$
E_{eff}	$(1,06 \pm 0,01)$	$(-0,09 \pm 0,07)$
E_B	$(1,56 \pm 0,02)$	$(0,15 \pm 0,13)$
E_{IR-A}	$(10,0 \pm 0,1)$	$(1,8 \pm 1,6)$

7.5 Raumwinkelabhängige Strahlungsemission des Lichtbogens

Durch den gleichzeitigen Einsatz mehrerer optischer Messgeräte zur Erfassung der emittierten Strahlung des Schweißlichtbogens ist es nicht möglich, die verwendeten Instrumente unter demselben Azimutalwinkel $\varphi = 0^\circ$ senkrecht zum Brenner zu orientieren, vgl. mit Kapitel 6.4. Falls die vom Lichtbogen emittierte Strahlung eine Richtungsabhängigkeit besitzt, muss diese bei der Korrektur der Messwerte der verschiedenen Geräte mitberücksichtigt werden, damit ein sinnvoller Vergleich und eine Mittelwertbildung der gemessenen Bestrahlungsstärken gewährleistet werden kann.

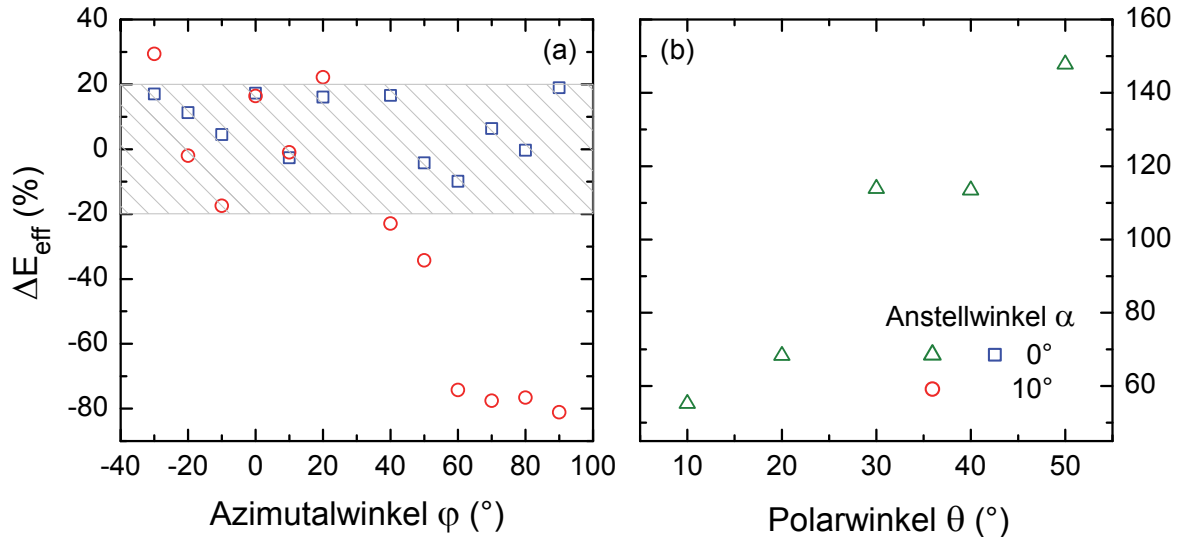


Abb. 7.6 (a) Azimutal- und (b) Polarwinkelabhängigkeit der relativen effektiven Bestrahlungsstärke ΔE_{eff} bei Anstellwinkeln α von 0° und 10° . Die grau schraffierte Fläche in (a) gibt eine prozentuale Abweichung von $\pm 20\%$ wieder.

Um eine potenzielle Azimutalwinkelabhängigkeit zu untersuchen, wird mit einem MAG-Lichtbogen einer durchschnittlichen Leistung von $P = (6,80 \pm 0,04)$ kW auf S235 geschweißt. Der Anstellwinkel des Brenners beträgt dabei $\alpha = 0^\circ$ bzw. 10° . Damit aufgrund des Messaufbaus in Abb. 6.2 (b) der Azimutalwinkel keine zusätzliche Polarwinkelabhängigkeit bekommt, wird θ auf null gesetzt. Das Spektralradiometer BTS2048-UV-S misst bei einer festen Position von $\varphi = 0^\circ$ die Bestrahlungsstärke, $E_{\text{eff}}^{\text{BTS},0^\circ}$, wohingegen das CAS140CT-152 Diodenarray unter variablen Winkeln zum Lichtbogen positioniert wird und gleichzeitig ebenfalls die emittierte Strahlung detektiert, $E_{\text{eff}}^{\text{CAS}}(\varphi)$. So können leistungsabhängige Fluktuationen des Lichtbogens abgefangen werden und man kann

$$\Delta E_{\text{eff}}(\varphi) = \frac{E_{\text{eff}}^{\text{CAS}}(\varphi) - E_{\text{eff}}^{\text{BTS},0^\circ}}{E_{\text{eff}}^{\text{BTS},0^\circ}} \times 100 \quad (7.3)$$

als Größe zur Bestimmung der Azimutalwinkelabhängigkeit definieren. Aufgrund räumlicher Einschränkungen am Schweißarbeitsplatz war nur ein Azimutalwinkelbereich zwischen -30° und 90° zugänglich.

Die gemessenen $\Delta E_{\text{eff}}(\varphi)$ in Abb. 7.6 (a) zeigen für einen Anstellwinkel von 0° keine signifikanten Abweichungen von 0% . Aufgrund messtechnischer Ungenauigkeiten sowohl im Abstand der Spektralradiometer zum Lichtbogen als auch bei der exakten Ausrichtung ihrer Eingangsoptiken kann hier eine prozentuale Abweichung von $\pm 20\%$, veranschaulicht durch die grau schraffierte Fläche, als systematischer Fehler betrachtet werden. Da alle Messungen im Rahmen dieses Forschungsprojektes bei einem Anstellwinkel von 0° durchgeführt worden sind, ist die Vergleichbarkeit der Messwerte gegeben.

Erhöht man α auf 10° (stechend), so zeigt sich ab ca. $\varphi = 60^\circ$ eine drastische Abnahme der detektierten Bestrahlungsstärke, im Gegensatz zu Resultaten von

Nakashima *et al.* (NAKASHIMA2016). Eine Abschottung des Lichtbogens durch den Brenner ist bei diesem kleinen Anstellwinkel ausgeschlossen. Als mögliche Ursache könnte ein verändertes Potenzialgefälle zwischen Brenner und Werkstoffe in Betracht gezogen werden, dies ist jedoch spekulativ.

Durch Drehen des gesamten Messaufbaus um eine horizontale Achse kann zusätzlich zur Azimutal- auch die Polarwinkelabhängigkeit aufgenommen werden. Die Ergebnisse dieser exemplarischen Messungen sind in Abb. 7.6 (b) dargestellt. Mit zunehmendem Polarwinkel erhöht sich die emittierte Bestrahlungsstärke deutlich, in Übereinstimmung mit früheren Untersuchungen von Okuno *et. al* (OKUNO2001). Dies bestätigt den Messaufbau zur Durchführung aller Experimente dieses Forschungsprojektes mit einem Polarwinkel von $\theta = 45^\circ$.

8 Optische Strahlung beim Lichtbogenschweißen

8.1 Wolfram-Inertgasschweißen

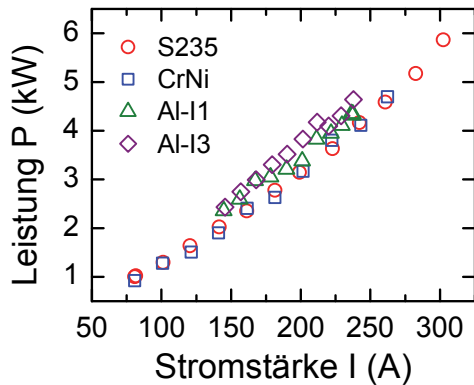


Abb. 8.1 Leistungsbereich beim WIG-Schweißen

Wolfram-Inertgasschweißen, kurz WIG-Schweißen, ist ein Lichtbogenschweißverfahren mit einer nichtabschmelzenden Wolframelektrode, d. h. es wird kein Zusatzwerkstoff benötigt. Häufig verwendet man als Schutzgase I1-Ar (hier als I1 bezeichnet) oder I3-ArHe-30 (kurz I3), siehe Kapitel 6.1. Typische zu schweißende Werkstoffe sind Baustahl (S235), Edelstahl (CrNi) und Aluminium (Al), wobei letzterer mit Wechselstrom (AC) geschweißt wird. Abb. 8.1 zeigt den in diesem Projekt abgedeckten Leistungsbereich für einen Brennerabstand von $d = 2,4$ mm. Eine genaue Beschreibung des WIG-Schweißens kann in Kapitel 5.1 nachgelesen werden.

8.1.1 Materialspezifische Schweißspektren

Ein Großteil der berechneten Integralwerte und der daraus folgenden maximalen Expositionszeiten, siehe Kapitel 4.2, basiert auf der Messung von Schweißspektren im UV-, VIS- und IR-A-Spektralbereich sowie ihrer anschließenden Analyse. Dabei können sich je nach Werkstoff unterschiedliche spektrale Verläufe und Intensitäten ergeben, da der Lichtbogen das zu schweißende Material teilweise aufschmilzt und sich somit Elemente des Werkstoffes im Plasma befinden.

In Abb. 8.2 sind WIG-Schweißspektren von drei Werkstoffen und zwei unterschiedlichen Schutzgasen beim Schweißen von Aluminium gezeigt. Eine genaue Zuordnung der einzelnen Emissionslinien zu entsprechenden Metallionen ist im Rahmen dieses Forschungsprojektes nicht zielführend. Stattdessen sollen spektrale Unterschiede, soweit vorhanden, zwischen den Materialien und Schutzgasen betrachtet werden.

Vergleicht man die beiden Werkstoffe S235 und CrNi so zeigt sich im Wesentlichen der gleiche spektrale Verlauf mit ähnlicher Bestrahlungsstärke. Auffallend ist allerdings die deutlich erhöhte UVC-Bestrahlungsstärke beim Schweißen von CrNi. Zur besseren Quantifizierung dieses Befundes wird das UV-Anteilsverhältnis ρ , siehe Gleichung (6.4), gebildet.

Tab. 8.1 Gemittelte ρ verschiedener Materialien und Schutzgase

	ρ_{UVA} (%)	ρ_{UVB} (%)	ρ_{UVC} (%)
S235	(0,050 ± 0,004)	(30 ± 2)	(68 ± 2)
CrNi	(0,047 ± 0,006)	(31 ± 2)	(70 ± 3)
Al-I1	(0,049 ± 0,002)	(32 ± 1)	(68 ± 1)
Al-I3	(0,050 ± 0,002)	(33 ± 1)	(67 ± 1)

Zunächst zeigt sich, dass der spektrale Verlauf und damit ρ unabhängig von der betrachteten Leistung ist. Die in Tab. 8.1 aufgelisteten Werte wurden somit über die jeweilige Anzahl an variierten Leistungen P gemittelt.

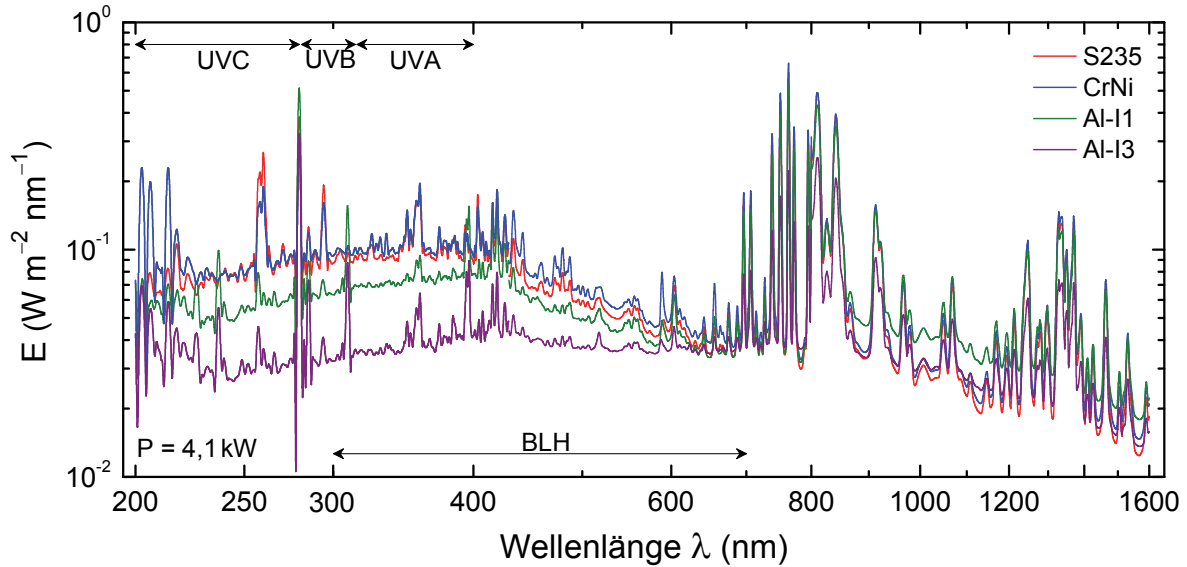


Abb. 8.2 Doppeltlogarithmische Darstellung von $E(\lambda)$ beim WIG-Schweißen einer Leistung von $P = 4,1 \text{ kW}$. Als Werkstoffe wurden S235, CrNi und Al verwendet. Ein Vergleich zweier Schutzgase, I1 und I3, ist ebenfalls gezeigt. UV- und VIS-Bereiche sind durch Doppelpfeile gekennzeichnet.

Gewichtete UV-Strahlung tritt quasi ausschließlich im UVB- und UVC-Bereich in einem Verhältnis von ca. 1 : 2 auf. UVA-Anteile mit deutlich unter 0,1 % können vernachlässigt werden. Unterschiede in ρ zwischen den einzelnen Werkstoffen (und damit auch zwischen Gleich- oder Wechselspannung) sowie den beiden Schutzgasen sind innerhalb der Fehlergrenzen nicht zu erkennen.

Auch im sichtbaren und infraroten Spektralbereich treten keine signifikant unterschiedlichen Spektralverläufe auf. An den Spektren in Abb. 8.2 wird allerdings klar, dass die Bestrahlungsstärken durchaus variieren, siehe Kapitel 8.1.2.

8.1.2 Leistungsabhängige UV-Bestrahlungsstärken und Expositionsdauern

Die gemessenen UV-Bestrahlungsstärken sowie die daraus resultierenden Expositionsdauern sind in Abhängigkeit von der dem Lichtbogen zugeführten mittleren elektrischen Leistung $P = U_M I_M$ in Abb. 8.3 dargestellt.

S235/CrNi

Die ungewichtete UVA-Bestrahlungsstärke, E_{UVA} Abb. 8.3 (c), zeigt für die beiden Werkstoffe S235 und CrNi einen quasi identischen leistungsabhängigen Verlauf. Lineare Anpassungen mit einer Funktion nach Gleichung (6.5) an die entsprechenden Daten ergeben innerhalb der Fehlergrenzen den gleichen Wert für den Achsenabschnitt E_0 , siehe Tab. 8.2, Steigungswerte m stimmen beinahe überein. Hierbei ist zu beachten, dass die graphischen Darstellungen der in Abb. 8.3 eingezeichneten linearen Anpassungen nicht den Anpassungsfehler wiedergeben.

Auch die Anpassungsparameter bei E_{eff} stimmen innerhalb der Fehlergrenzen überein. Auffällig ist die Steigungsänderung bei etwa 3 kW. Bennett und Harlen fanden hingegen eine konstante effektive Bestrahlungsstärke ab ca. 150 A (BENNETT1980). Eine genauere Analyse, siehe Abb. 8.3 (e - g), zeigt, dass der „Knick“ in E_{eff} aus einer Steigungsänderung im UVB- und UVC-Spektralbereich resultiert, wohingegen

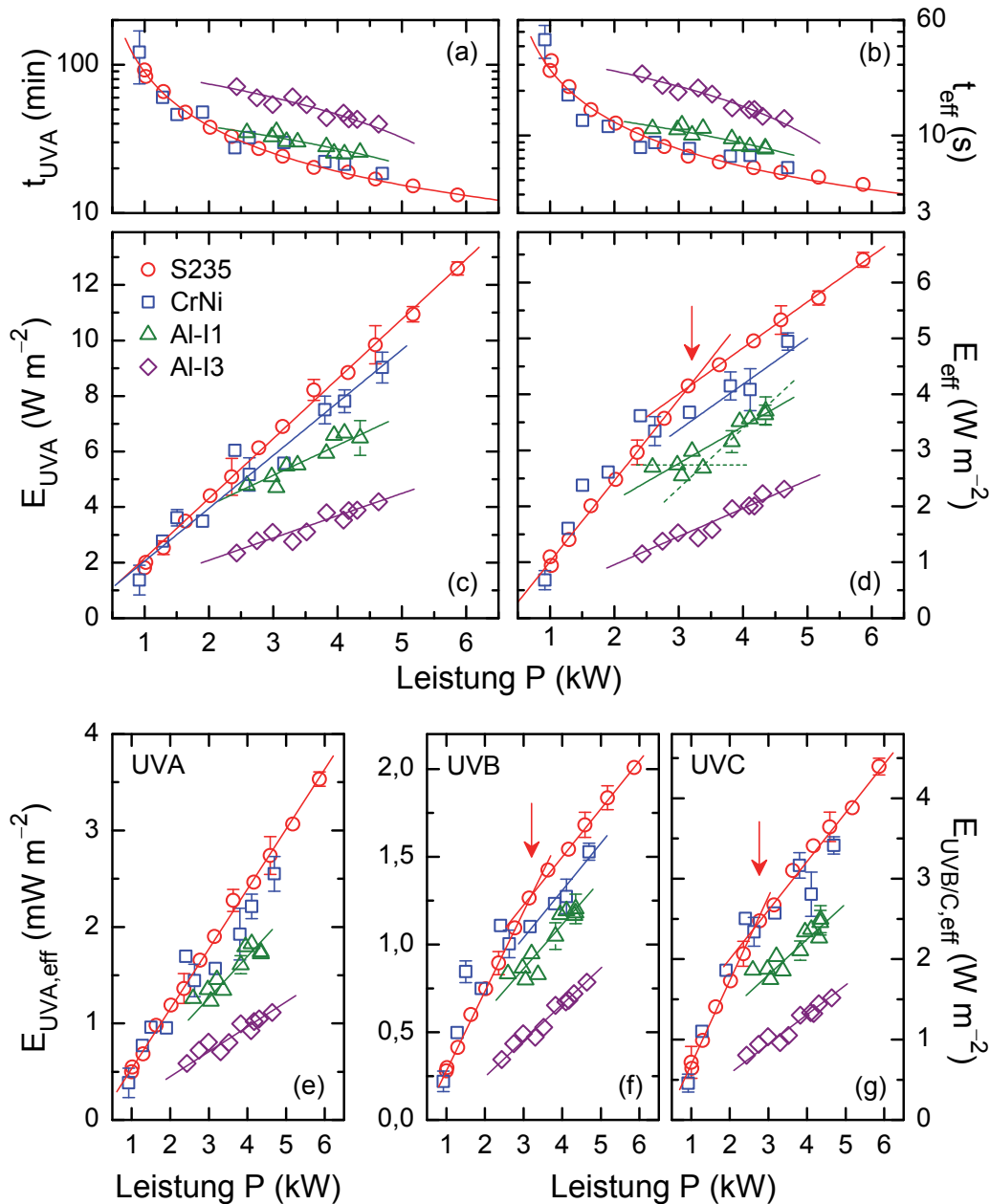


Abb. 8.3 (a, b) Ergebnisse für die nach Gleichungen (4.6) (b) und (4.11) (b) berechneten Expositionsdauern der in (c) und (d) abgebildeten leistungsabhängigen E_{UVA} - und E_{eff} -Werte. Abbildungen (e - g) zeigen die effektiven Bestrahlungsstärken der einzelnen UV-Bereiche. Eingezeichnete Linien in (a - d) sind Anpassungen an die Daten nach Gleichungen (6.5), (6.7) und (6.6), sonst Verdeutlichungen des Datenverlaufs. Rote Pfeile kennzeichnen eine Steigungsänderung bei den Werkstoffen S235 und CrNi.

im UVA-Spektralbereich keine Verhaltensänderung zu erkennen ist. Eine Interpretation dieser Beobachtung wäre rein spekulativ, und wird an dieser Stelle nicht geführt.

Die gemessenen Bestrahlungsstärken können nach Gleichung (4.6) (b) und (4.11) (b) mit den Expositionsgrenzwerten nach OStrV (OStrV) verglichen und daraus die leistungsabhängigen Expositionsdauern berechnet werden, siehe Abb. 8.3 (a) und (b).

Tab. 8.2 Anpassungsparameter m in $\text{W m}^{-2} \text{ kW}^{-1}$ sowie E_0 in W m^{-2} aus Gleichung (6.5) für die vier untersuchten Materialien in Abb. 8.3. Einheiten für t_1 , t_{off} , P_{off} , m^* und t_0 aus Gleichungen (6.7) und (6.6) sind in der Tabelle vermerkt.

		UVA	UV, gewichtet
S235 / CrNi	E	$m = (2,15 \pm 0,01)$ $= (1,9 \pm 0,1)$ $E_0 = (0,1 \pm 0,1)$	$m_{P < 3\text{kW}} = (1,45 \pm 0,03)$ $E_{0,P < 3\text{kW}} = (-0,44 \pm 0,06)$ $m_{P \geq 3\text{kW}} = (0,82 \pm 0,02)$ $E_{0,P \geq 3\text{kW}} = (1,5 \pm 0,1)$
	t	$t_1 = (63 \pm 6) \text{ kW min}$ $t_{\text{off}} = (2 \pm 2) \text{ min}$ $P_{\text{off}} = (0,3 \pm 0,1) \text{ kW}$	$t_1 = (20 \pm 2) \text{ kW s}$ $t_{\text{off}} = (0,8 \pm 0,5) \text{ s}$ $P_{\text{off}} = (0,3 \pm 0,1) \text{ kW}$
Al-11	E	$m = (1,1 \pm 0,2)$ $E_0 = (1,9 \pm 0,6)$	$m = (0,66 \pm 0,09)$ $E_0 = (0,8 \pm 0,4)$
	t^*	$m^* = (-5,7 \pm 0,7) \text{ min kW}^{-1}$ $t_0 = (50 \pm 3) \text{ min}$	$m^* = (-1,9 \pm 0,3) \text{ s kW}^{-1}$ $t_0 = (17 \pm 1) \text{ s}$
Al-13	E	$m = (0,8 \pm 0,07)$ $E_0 = (0,5 \pm 0,3)$	$m = (0,50 \pm 0,03)$ $E_0 = (-0,1 \pm 0,1)$
	t^*	$m^* = (-14 \pm 2) \text{ min kW}^{-1}$ $t_0 = (102 \pm 6) \text{ min}$	$m^* = (-5,7 \pm 0,6) \text{ s kW}^{-1}$ $t_0 = (39 \pm 2) \text{ s}$

Da diese für S235 und CrNi identisch sind, erfolgt mit Gleichung (6.6) nur eine Anpassung an die S235-Expositionsauern. Die entsprechenden Anpassungsparameter sind in Tabelle Tab. 8.2 aufgelistet. Obwohl die effektiven Bestrahlungsstärken beim WIG-Schweißen von S235 und CrNi selbst bei hohen Leistungen verhältnismäßig klein sind, werden die zulässigen Expositionsauern im niedrigen Sekundenbereich überschritten. Die UVA-Expositionsauern befinden sich dagegen im zweistelligen Minutenbereich.

Al-11/Al-13

Beim WIG-Schweißen von Aluminium mit Wechselspannung ist der zugängliche Leistungsbereich verglichen mit S235 und CrNi deutlich eingeschränkt. Für die UVA- und effektiven Bestrahlungsstärken zeigt sich ein lineares Verhalten.

Allerdings ist es prinzipiell auch möglich, E_{eff} bei Al, I1 durch zwei Geraden (gestrichelte Linien) mit einer Steigungsänderung um 3 kW zu beschreiben. Demnach würde beim Schutzgas I1 eine leistungsabhängige Verhaltensänderung auftreten, bei I3 hingegen nicht. Die Datenqualität der Al-I1-Werte ist jedoch nicht ausreichend für einen Beweis dieser Hypothese.

Die Expositionsauern t_{eff} befinden sich im Bereich zwischen 10 und 30 s, für die UVA-Bestrahlungsstärke liegen diese zwischen ca. 25 und 80 min. Aufgrund der logarithmischen Zeitskala sind die linearen Anpassungen an Al-I1 und Al-I3 in Abb. 8.3 (a) und (b) leicht gebogen.

8.1.3 Blaulichtgefährdung

Neben ultravioletter Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 200 bis 400 nm, die u. a. zu Horn- und Bindehautschädigungen sowie Hautkrebs führen kann, ist sichtbare Strahlung zwischen 300 bis 700 nm potenziell gefährlich für die Netzhaut. Aufgrund der spektralen Wichtung mit $B(\lambda)$, dessen Maximum sich im blauen Wellenlängenbereich befindet, siehe Abb. 4.4, wird in diesem Zusammenhang häufig von „Blaulichtgefährdung“ (engl.: blue light hazard, kurz BLH) gesprochen.

Je nach Quellengröße werden die entsprechenden Strahlungsanteile entweder als Bestrahlungsstärke E oder als Strahldichte L gemessen. Für einen kleinen Quellenöffnungswinkel ($\alpha < 11$ mrad), wie dieser beim Schweißlichtbogen vorhanden ist, kann eine potentielle Gefährdung durch einen Vergleich mit dem Expositionsgrenzwert in Bestrahlungsstärke erfolgen. Als Zeitbasis sind dabei deutlicher weniger als 10000 s zu Grunde zu legen, siehe Tab. 4.1.

Abb. 8.4 (a) zeigt die $B(\lambda)$ gewichteten Bestrahlungsstärken für verschiedene Werkstoffe beim WIG-Schweißen, die sich mit linearen Funktionen nach Gleichung (6.5) beschreiben lassen. Die Anpassungsparameter finden sich in Tab. 8.3 wieder. Für CrNi wird durchwegs die höchste BLH-Bestrahlungsstärke gemessen, Al-I3 zeigt die geringste Strahlungsbelastung. Im Gegensatz zum UV-Spektralbereich, siehe Abb. 8.3, tritt hier keine leistungsabhängige Verhaltensänderung um 3 kW auf.

In Abb. 8.4 (b) sind die aus den Bestrahlungsstärken nach Gleichung (4.12) berechneten maximalen Expositionsdauern dargestellt. Obwohl E_B bei CrNi und S235 deutlich unterschiedlich ist, können die daraus resultierenden t_B innerhalb der Fehlergrenzen mit **einer** Funktion nach Gleichung (6.6) beschrieben werden.

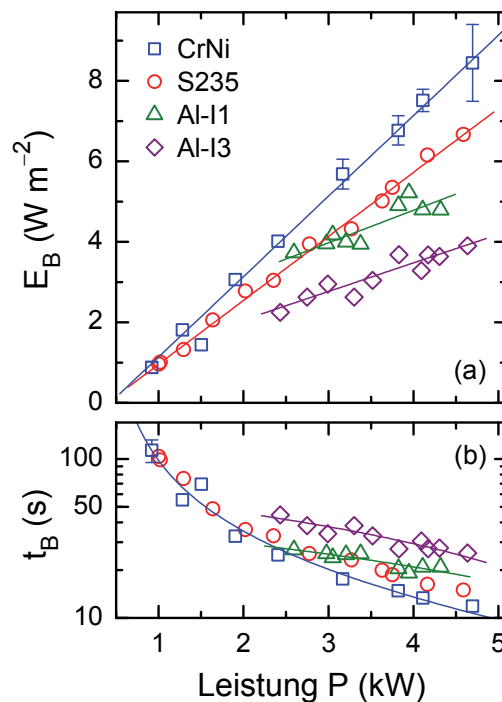


Abb. 8.4 (a) $B(\lambda)$ gewichtete Bestrahlungsstärken E_B beim WIG-Schweißen und (b) die daraus resultierenden Expositionsdauern t_B nach Formel (4.12). Ein-gezeichnete Linien entsprechen Anpassungen an die Daten mit Gleichungen (6.5), (6.7) und (6.6).

Tab. 8.3 Anpassungsparameter m in $\text{W m}^{-2} \text{kW}^{-1}$, m^* in s kW^{-1} , E_0 in W m^{-2} , t_0 und t_{off} in s, P_{off} in kW sowie t_1 in kW s aus den Gleichungen für E (6.5), t (6.6) und t^* (6.7) für die vier untersuchten Materialien in Abb. 8.4.

	S235 / CrNi		Al-I1		Al-I3	
	E	t	E	t^*	E	t^*
m, m^*	$1,59 \pm 0,04$ $2,00 \pm 0,05$	$t_1 = 64 \pm 24$ $t_{\text{off}} = -4 \pm 5$	$0,8 \pm 0,2$	$-4,2 \pm 0,8$	$0,71 \pm 0,09$	-8 ± 1
E_0, t_0	$-0,6 \pm 0,1$ $-0,9 \pm 0,2$	$P_{\text{off}} = 0,4 \pm 0,1$	$1,6 \pm 0,6$	38 ± 3	$0,6 \pm 0,3$	62 ± 4

Generell ist die Strahlungsbelastung beim WIG-Schweißen eher gering (verglichen z. B. mit MAG-Schweißen), trotzdem findet auch im spektralen Bereich der Blaulichtgefährdung eine Überschreitung der Expositionsgrenzwerte bei hohen Leistungen im Sekundenbereich statt. Hierbei muss aber auch erwähnt werden, dass ein beabsichtigter Blick in den Lichtbogen von mehr als zehn Sekunden unwahrscheinlich ist.

Ergänzend zur Bestrahlungsstärke wurde exemplarisch auch die gewichtete Strahldichte L_B gemessen. Problematisch ist hierbei dessen messtechnische Erfassung, da bei einem Empfangswinkel $\gamma = 1,7$ mrad eine sehr präzise Ausrichtung des Messgerätes erforderlich ist. Erschwerend kommt hinzu, dass aufgrund der verwendeten Rohrschweißvorrichtung der Lichtbogen regelmäßig versetzt werden musste. Trotz einer stetigen Überprüfung und Neueinstellung der Justage des Strahldichtemesskopfes konnten stark schwankende und sprunghafte Strahldichten im Verlauf der Messungen nicht verhindert werden. Dadurch war es nicht möglich, eine Abhängigkeit der Strahldichte von der eingestellten mittleren Leistung festzustellen. Dies schließt jedoch nicht die mögliche Existenz einer solchen Abhängigkeit $L_B = L_B(P)$ aus (OKUNO2002; OKUNO2010).

Zusätzlich zu diesem systematischen Fehler muss auch die zeitliche Fluktuation des Lichtbogens, siehe Kapitel 11, berücksichtigt werden. Dafür wird über mehrere Sekunden die Strahldichte aufgezeichnet und anschließend der Mittelwert gebildet.

Aufgrund der oben beschriebenen messtechnischen Probleme wird hier nur die höchste (gemittelte) Strahldichte, $L_B = 242 \text{ kW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ bei S235, diskutiert. Dieser Wert stellt eine untere Grenze für die tatsächlich beim WIG-Schweißen auftretenden Strahldichten dar: Eine Umrechnung von L_B mit Gleichung (4.5) nach E_B liefert $0,55 \text{ W m}^{-2}$ und ist damit deutlich kleiner als die minimal gemessene Bestrahlungsstärke von ca. 1 W m^{-2} , siehe Abb. 8.4 (a). Trotzdem ist die nach Gleichung (4.13) aus $L_B = 242 \text{ kW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ resultierende maximal zulässige Expositionsdauer $t'_B = 4 \text{ s}$ deutlich restriktiver als die aus der Bestrahlungsstärke berechnete Zeit von ca. 10 s , resultierend aus den unterschiedlichen zugrunde liegenden Expositionsgrenzwerten.

Fazit

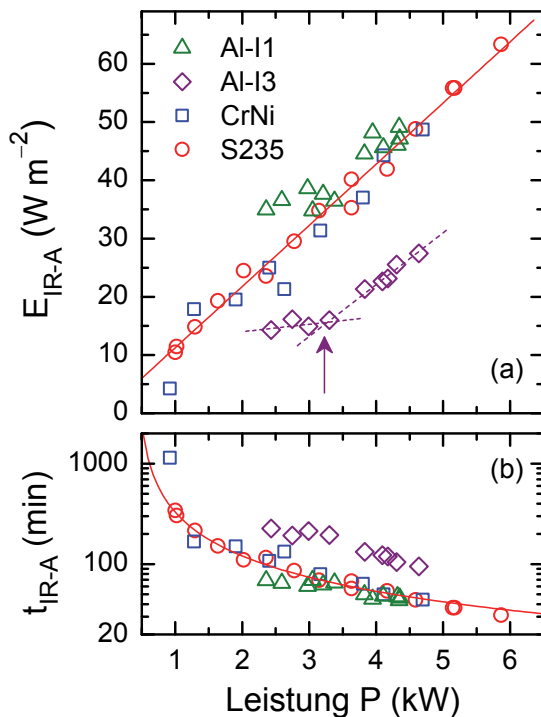
Unabhängig von der im sichtbaren Spektralbereich gemessenen physikalischen Strahlungsgröße, Bestrahlungsstärke E_B oder Strahldichte L_B , führt der direkte Blick in den WIG-Schweißlichtbogen innerhalb weniger Sekunden zum Überschreiten der entsprechenden Expositionsgrenzwerte.

8.1.4 Infrarote Strahlenbelastung

An den WIG-Schweißspektren in Abb. 8.2 ist gut zu erkennen, dass auch im Infrarotspektralbereich bei Wellenlängen $\lambda > 780$ nm signifikante Bestrahlungsstärken vorhanden sind. Aufgrund technischer Probleme bei der Untersuchung des WIG-Schweißlichtbogens kann an dieser Stelle nur eine untere Grenze für die thermische Strahlenbelastung in Form der „Hilfsgröße“ $E_{\text{IR-A}}$, siehe Formel (4.9) (b), angegeben werden, da das Spektralradiometer zur Erfassung des Infrarotspektrums teilweise defekt und das IL1400BL noch nicht vorhanden war. Die Ergebnisse der Datenerfassung sind in Abhängigkeit von der dem Lichtbogen zugeführten mittleren Leistung P in Abb. 8.5 (a) gezeigt.

Die Bestrahlungsstärken der Werkstoffe Al-I1, CrNi und S235 können im Wesentlichen durch die in den unten stehenden Formeln aufgeführten Anpassungsparameter beschrieben werden. Interessant ist die Tatsache, dass hier nun beim Schutzgas I3 eine Verhaltensänderung um 3 kW auftritt, bei I1 hingegen nicht. Dies steht im Gegensatz zur Beobachtung im UV-Spektralbereich, siehe Abb. 8.3.

Die nach Gleichung (4.7) berechneten Expositionsdauern $t_{\text{IR-A}}$ sind selbst für hohe Leistungen länger als eine halbe Stunde. Da $E_{\text{IR-A}}$ nicht den kompletten zu messenden IR-Spektralbereich abdeckt, handelt es sich bei diesen Zeiten lediglich um eine Begrenzung nach oben, d. h. kürzere $t_{\text{IR-A}}$ könnten existieren. Eine Schädigung durch Infrarotstrahlung beim WIG-Schweißen ist dennoch unwahrscheinlich.



$$E_{\text{IR-A}} = (10,5 \pm 0,3) \text{ Wm}^{-2}\text{kW}^{-1} \times P + (0,7 \pm 1,0) \text{ Wm}^{-2}$$

$$t_{\text{IR-A}} = \frac{(188 \pm 23) \text{ kWmin}}{P - (0,43 \pm 0,06) \text{ kW}} + (1 \pm 7) \text{ min}$$

Abb. 8.5 (a) Infrarote Strahlenbelastung beim WIG-Schweißen, angedeutet durch die Hilfsgröße $E_{\text{IR-A}}$ und (b) den nach Gleichung (4.7) daraus folgenden maximal zulässigen Expositionsdauern $t_{\text{IR-A}}$. Durchgezogene Linien entsprechen Anpassungen an die S235-Daten mit Formel (6.5) und (6.6), deren Anpassungsparameter als Gleichungen dargestellt sind. Gestrichelte Linien sowie der violette Pfeil visualisieren eine mögliche Steigungsänderung um ca. 3 kW.

8.1.5 Variation des Elektrodenabstandes

Die Lichtbogenlänge l spielt eine wichtige Rolle unter den Prozessparametern beim Schweißen denn hierüber wird die Wärmeverteilung (die Schweißspannung steuert die dem Werkstoff zugeführte Wärmemenge) geregelt. Dies hat Einfluss auf den Einbrand und die Breite der Schweißnaht und wirkt sich dadurch maßgeblich auf die Qualität der Schweißung aus.

Typischerweise wird die Lichtbogenlänge durch die angelegte Spannung und somit durch den Elektrodenabstand d zwischen Brenner und Werkstück bestimmt. Aufgrund technischer Schwierigkeiten war eine optische Messung der Lichtbogenlänge mit Hilfe einer Kamera und Dichtefiltern nicht möglich, so dass auf den Einstellwert d zurückgegriffen werden muss. Im Allgemeinen gilt allerdings $l \approx d$. Für interessierte Leser sei an dieser Stelle z. B. auf eine Arbeit von Li *et al.* verwiesen, die eine optische Technik zur Messung der Lichtbogenlänge entwickelt haben (LI2001).

In älterer Literatur finden sich Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen der Lichtbogenlänge und der emittierten Strahlungsleistung mit dem Ergebnis, dass mit zunehmendem l auch die detektierte Bestrahlungsstärke ansteigt (BENNETT1980; WILKINSON1985). Die genaue Abhängigkeit wurde jedoch nicht aufgeklärt. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde daher beim WIG-Schweißen auf S235 mit einer konstanten mittleren Stromstärke von $(161,0 \pm 0,1)$ A der Abstand d des Brenners vom Werkstück durch Veränderung der angelegten Spannung variiert.

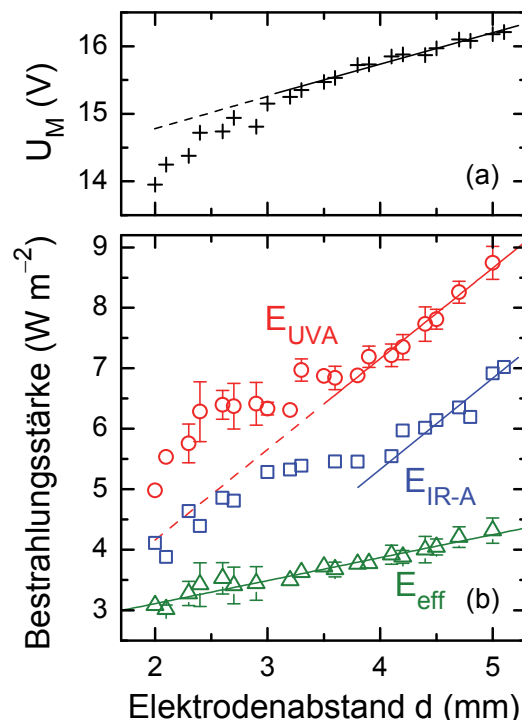


Abb. 8.6 (a) Zusammenhang zwischen eingestelltem Elektrodenabstand d und der von der Spannungsquelle nachgeregelten Spannung U_M beim WIG-Schweißen auf S235. (b) Bestrahlungsstärken E_{UVA} , $1/7 E_{IR-A}$ (zur besseren Vergleichsmöglichkeit mit E_{UVA} und E_{eff}) und E_{eff} als Funktionen des Elektrodenabstandes. Die mittlere Stromstärke beträgt $(161,0 \pm 0,1)$ A.

Abb. 8.6 (a) zeigt die Relation zwischen eingestelltem Elektrodenabstand d und der von der Stromquelle entsprechend geregelten mittleren Spannung U_M . Für Abstände kleiner als ca. 3 mm ist $U_M(d)$ keine lineare Funktion mehr. Dies spiegelt sich in der UVA-Bestrahlungsstärke E_{UVA} wider: für $d > 3,5$ mm stimmt eine lineare Anpassung mit $m = (1,5 \pm 0,1) \text{ W m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ und $E_0 = (1,2 \pm 0,5) \text{ W m}^{-2}$ mit den gemessenen Bestrahlungsstärken überein, wohingegen für kleinere Abstände E_{UVA} deutlich abweicht, siehe Abb. 8.6 (b). Ein ähnliches Verhalten ist für den Verlauf der Bestrahlungsstärke E_{IR-A} zu beobachten (der Übersicht halber und um einen besseren Vergleich mit E_{UVA} und E_{eff} zu ermöglichen, ist nur ein 1/7 der detektierten Bestrahlungsstärke dargestellt), hier allerdings in einem Übergangsbereich von etwa 3 mm bis 4 mm Elektrodenabstand.

Bei der mit $S(\lambda)$ gewichteten effektiven Bestrahlungsstärke ist eine Anpassung mit $m = (0,38 \pm 0,02) \text{ W m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$ und $E_0 = (2,35 \pm 0,08) \text{ W m}^{-2}$ für alle gemessenen Elektrodenabstände möglich. Im sichtbaren Spektralbereich lässt die Datenqualität aufgrund großer Messunsicherheiten keine Aussage zu.

Ein Vergleich dieser abstandsabhängigen Verhaltensänderung mit dem leistungsabhängigen „Knick“ in der effektiven Bestrahlungsstärke bei etwa 3 kW (Abb. 8.3, $d = 2,4$ mm = konstant) ergibt, dass beide Phänomene separat voneinander zu betrachten sind: Der untersuchte Leistungsbereich bei der Variation des Elektrodenabstandes ist mit einem Maximalwert von 2,6 kW deutlich unterhalb der „Knick“ Leistung von etwa 3 kW und die Verhaltensänderungen treten in unterschiedlichen spektralen Bereichen auf.

8.2 Metallaktivgasschweißen

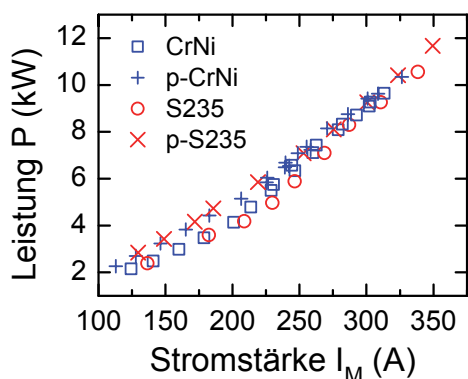


Abb. 8.7 Leistungsbereich beim MAG-Schweißen

Beim Metallaktivgas- (MAG-) Schweißen wird ein Zusatzwerkstoff in Form eines Drahtes zum Schweißen von Bau- oder Edelstahl verwendet. Mischungen aus Argon und Kohlenstoffdioxid dienen als Schutzgase. Neben einer normalen ist auch eine gepulste Prozessvariante (mit „p-“ gekennzeichnet) üblich. Hierbei wird periodisch mit einer Frequenz von $100 \text{ Hz} < f_p < 300 \text{ Hz}$ zwischen Impulsmaximalstrom I_P und Grundstrom I_G gewechselt, siehe Kapitel 6.5. I_M ergibt sich daraus als zeitgemittelte Stromstärke. Ein fester Elektrodenabstand wie etwa beim WIG-Schweißen ist für die-

sen Impulslichtbogen allerdings nicht möglich. Weiterführende Informationen können im Kapitel 5.2 nachgelesen werden.

8.2.1 MAG-Schweißspektren von Bau- und Edelstahl

Anhand der MAG-Schweißspektren von S235 und CrNi in Abb. 8.8 wird sofort ersichtlich, warum Metallaktivgasschweißen für den Schweißer ein erhöhtes Gefährdungspotenzial in sich birgt: Ein Großteil der vom Lichtbogen emittierten Strahlung tritt bei den biologisch besonders wirksamen UVB- und UVC-Wellenlängen auf. Im Gegensatz zur spektralen Verteilung z. B. bei einem WIG-Lichtbogen, siehe Abb. 8.2, fällt die Bestrahlungsstärke beim MAG-Schweißen dann allerdings mit zunehmender Wellenlänge um bis zu zwei Größenordnungen ab, mit geringen sichtbaren und infraroten Strahlungsanteilen.

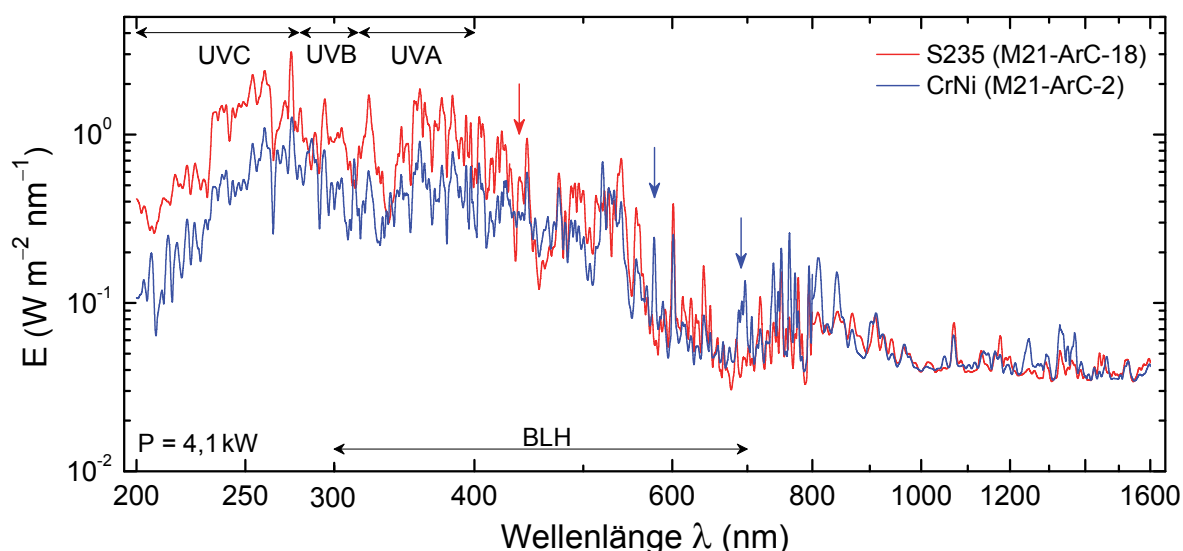


Abb. 8.8 MAG-Schweißspektren (normale Prozessvariante) von Bau- und Edelstahl bei einer mittleren elektrischen Leistung von 4,1 kW. Senkrechte farbige Pfeile kennzeichnen zusätzlich auftretende Emissionslinien, waagrechte Pfeile spektrale Bereiche.

Tab. 8.4 Gemittelte ρ von Bau- und Edelstahl in normaler und gepulster Prozessvariante

	ρ_{UVA} (%)	ρ_{UVB} (%)	ρ_{UVC} (%)
S235	(0,032 ± 0,005)	(21 ± 3)	(79 ± 5)
p-S235	(0,028 ± 0,001)	(19,2 ± 0,4)	(80,8 ± 0,6)
CrNi	(0,027 ± 0,007)	(28 ± 1)	(72 ± 1)
p-CrNi	(0,019 ± 0,003)	(25,7 ± 0,8)	(74,1 ± 0,8)

Aus einem Vergleich der gewichteten UV-Bestrahlungsstärken mit Hilfe des UV-Anteilsverhältnisses ρ nach Formel (6.4) wird deutlich, dass etwa 80 % (S235) bzw. 73 % (CrNi) der biologisch relevanten Strahlungsanteile bei Wellenlängen unterhalb von 280 nm auftreten. Ein Unterschied zwischen normaler und gepulster Prozessvariante ist innerhalb der Fehlergrenzen (und auch im Spektrum) nicht zu erkennen.

Bei genauer Betrachtung des spektralen Verlaufs in Abb. 8.8 fällt jedoch auf, dass sowohl bei Bau- als auch bei Edelstahl Emissionslinien erscheinen, die im jeweils anderen Spektrum nicht zu erkennen sind. Da beim WIG-Schweißen von S235 und CrNi z. B. bei den Emissionslinien um 700 nm kein spektraler Unterschied auftritt, legt dies die Vermutung nahe, dass der verwendete Elektrodentyp hierfür ursächlich ist. Die prozentual verschiedenen Argon- und Kohlenstoffdioxidanteile im Schutzgas können kein vollständiges Verschwinden einer Spektrallinie erklären.

8.2.2 Leistungsabhängige UV-Bestrahlungsstärken und Expositionsdauern

Für beide Prozessvarianten (normal und gepulst) sind in Abb. 8.9 (a) und (b) die OStrV-relevanten Bestrahlungsstärken E_{UVA} und E_{eff} als Funktionen der dem Lichtbogen zugeführten elektrischen Leistung dargestellt.

S235/p-S235

Für beide Größen sind lineare P -Abhängigkeiten mit Bestrahlungsstärken bis zu 250 W m^{-2} vorhanden. Während die gepulste Prozessvariante durchgehend mit einer linearen Funktion beschrieben werden kann, tritt beim Normalprozess eine Verhaltensänderung bei etwa 6 - 7 kW auf. Eine exponentielle Anpassung an E_{UVA} (S235) bzw. E_{eff} (S235) führte zu keinem Ergebnis. Da einerseits ein Impulslichtbogen und andererseits ein Kurz- und Sprühlichtbogen verwendet wird, der „Knick“ aber nur bei der normalen Prozessvariante auftritt, legt dies den Schluss nahe, dass die Verhaltensänderung das Resultat des Übergangs zwischen zwei verschiedenen Lichtbogenarten ist, vgl. mit Abb. 4.7. Für höhere Leistungen stimmen die Bestrahlungsstärkezunahmen m sowohl bei E_{UVA} als auch bei E_{eff} innerhalb der Fehlergrenzen quasi überein, siehe Tab. 8.5.

Die vergleichsweise hohen Bestrahlungsstärken führen für große P zu Expositionsdauern unterhalb einer Minute bei t_{UVA} bzw. sogar deutlich unterhalb einer Sekunde bei t_{eff} , siehe Abb. 8.9 (c) und (d). Aber auch bei der geringsten in diesem Forschungsprojekt untersuchten Schweißleistung von etwa 2 kW tritt eine Überschreitung der Expositionsgrenzwerte bereits nach $t_{eff} = 3 \text{ s}$ auf. Ein direkter Blick in den Lichtbogen ist zwingend zu verhindern aber auch eine indirekte Exposition kann schnell zu einer gesundheitlichen Gefährdung führen.

Tab. 8.5 Anpassungsparameter an die Bestrahlungsstärken aus Abb. 8.9 (a) und (b) nach Formel (6.5). m ist in der Einheit $\text{W m}^{-2} \text{kW}^{-1}$ und E_0 in W m^{-2} angegeben.

	UVA	UV, gewichtet
S235	$m_{P < 6 \text{kW}} = (11,5 \pm 0,9)$ $E_{0,P < 6 \text{kW}} = (-16 \pm 4)$	$m_{P \leq 7 \text{kW}} = (9,0 \pm 0,9)$ $E_{0,P \leq 7 \text{kW}} = (-10 \pm 4)$
	$m_{P \geq 6 \text{kW}} = (24 \pm 2)$ $E_{0,P \geq 6 \text{kW}} = (-93 \pm 21)$	$m_{P > 7 \text{kW}} = (26 \pm 2)$ $E_{0,P > 7 \text{kW}} = (-135 \pm 20)$
p-S235	$m = (24,6 \pm 1,5)$ $E_0 = (-57 \pm 12)$	$m = (22,0 \pm 0,7)$ $E_0 = (-44 \pm 5)$
CrNi	$m = (6,1 \pm 0,3)$ $E_0 = (-4 \pm 2)$	$m_{P \leq 6,5 \text{kW}} = (5,2 \pm 0,2)$ $E_{0,P \leq 6,5 \text{kW}} = (-4,9 \pm 0,8)$ $E = 36 \text{ W m}^{-2}$ für $P > 6,5 \text{ kW}$
p-CrNi	$m = (10,2 \pm 0,3)$ $E_0 = (-13 \pm 2)$	$m = (11,6 \pm 0,6)$ $E_0 = (-4 \pm 3)$

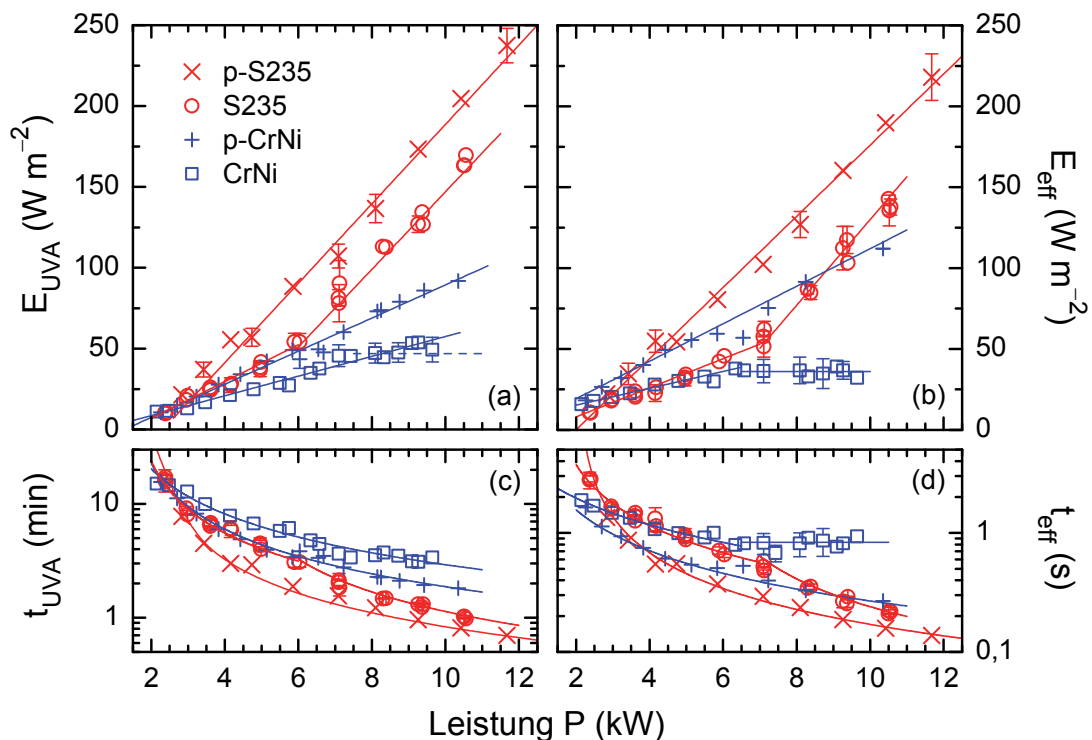


Abb. 8.9 (a), (b) Ergebnisse der Bestrahlungsstärkemessungen beim MAG-Schweißen auf Bau- und Edelstahl als gepulste (p-) und normale Prozessvariante. Eingezeichnete Linien entsprechen Anpassungen an die Bestrahlungsstärken nach Formel (6.5). Die daraus berechneten Expositionsdauern sind in (c) und (d) zusammen mit den entsprechenden mathematischen Beschreibungen nach Formel (6.8) dargestellt.

CrNi/p-CrNi

Abgesehen von E_{eff} beim gepulsten MAG-Prozess sind die effektiven Bestrahlungsstärken beim Schweißen von Edelstahl stets kleiner als bei Baustahl. Ebenso wie für p-S235 können die p-CrNi-Daten durch lineare Funktionen beschrieben werden und auch beim Normalprozess tritt eine leistungsabhängige Verhaltensänderung zwischen 6 und 7 kW auf. Allerdings steigt bei Edelstahl die Bestrahlungsstärke für $P > 7$ kW nicht steiler an sondern sättigt bei einem festen Wert. Für E_{UVA} (CrNi) ist die Datenqualität nicht ausreichend um zu entscheiden, ob eine durchgängige lineare Abhängigkeit vorliegt oder ob auch hier eine leistungsabhängige Sättigungsbestrahlungsstärke von ca. 47 kW (gestrichelte blaue Linie) existiert.

8.2.3 Blaulichtgefährdung

Bei Betrachtung der $B(\lambda)$ gewichteten Bestrahlungsstärken in Abb. 8.10 (a) spiegelt sich der im Verhältnis zur UV-Strahlung geringe sichtbare Spektralanteil wider. E_B beträgt hier maximal 80 W m^{-2} . Dennoch werden die zulässigen Expositionsgrenzwerte innerhalb weniger Sekunden überschritten. Besonderes Augenmerk gilt der Bestrahlungsstärke beim Schweißen (normale Prozessvariante) von Baustahl. Außerhalb des Leistungsbereiches von ca. 6 - 8 kW sind lineare Anpassungen an die Bestrahlungsstärken mit den in Tab. 8.6 gegebenen Parametern brauchbar, innerhalb dieser 2 kW tritt eine nicht-lineare Erhöhung von E_B auf.

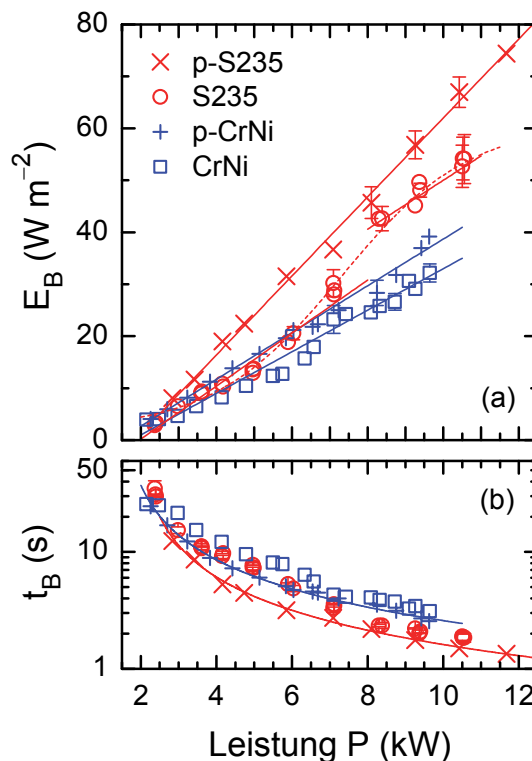


Abb. 8.10 (a) Leistungsabhängige, blaulichtgewichtete Bestrahlungsstärken E_B für Bau- und Edelstahl beim MAG-Schweißen (gepulste und normale Prozessvariante). Geraden entsprechen Anpassungen an die Daten nach Gleichung (6.5), die gestrichelte Linie einem sigmoidalen Fit nach Formel (8.1). In (b) sind die aus (a) berechneten Expositionsdauern t_B abgebildet. Zur besseren Übersicht in (b) sind mathematische Beschreibungen nur für p-S235 und p-CrNi gezeigt.

Tab. 8.6 Anpassungsparameter m in $\text{W m}^{-2} \text{kW}^{-1}$ und E_0 in W m^{-2} für E_B , siehe Abb. 8.10 (a), von S235 und CrNi bei zwei Prozessvarianten des MAG-Schweißens.

	CrNi	p-CrNi	S235		p-S235
			$P < 8 \text{ kW}$	$P \geq 8 \text{ kW}$	
m	$4,0 \pm 0,2$	$4,5 \pm 0,1$	$5,1 \pm 0,3$	$4,7 \pm 0,4$	$7,6 \pm 0,2$
E_0	-7 ± 1	$-6,3 \pm 0,8$	-10 ± 1	3 ± 3	-14 ± 1

Im Gegensatz zum diskontinuierlichen Fit mit zwei Geraden stellt die mathematische Beschreibung der S235-Bestrahlungsstärken aus Abb. 8.10 (a) mit einer Sigmoid- bzw. S-Funktion nach Formel (8.1) (gestrichelte Linie) die elegantere, wenn auch kompliziertere Anpassung an den E_B -Verlauf dar.

$$E_B = E_S \left[1 - \left(1 + \exp\left(\frac{P - P_0^*}{\kappa}\right) \right)^{-1} \right] \quad \begin{array}{l} E_S = \lim_{P \rightarrow \infty} E_B = (61 \pm 5) \text{ W m}^{-2} \\ P_0^* = (7,3 \pm 0,3) \text{ kW} \\ \kappa = (1,7 \pm 0,3) \text{ kW} \end{array} \quad (8.1)$$

Hierbei ist E_S die Sättigungsbestrahlungsstärke für sehr hohe Leistungen, P_0^* eine horizontale Verschiebung der S-Funktion und κ beschreibt die Krümmung der Sigmoidfunktion. Eine Überprüfung der Gesetzmäßigkeit nach Gleichung (8.1) kann z. B. durch kleinere Leistungsschritte oder durch Werte mit $P > 10 \text{ kW}$ validiert werden.

Die bei einem Empfangswinkel von $\gamma = 1,7 \text{ mrad}$ aufgezeichnete Strahldichte L_B zeigt in Übereinstimmung mit den Bestrahlungsstärkemessungen einen Maximalwert bei p-S235 von $492 \text{ kW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$. Nach Gleichung (4.13) folgt daraus eine berechnete Expositionsdauer von 2 s, die nahe dem Minimum von t_B liegt, siehe Abb. 8.10 (b).

8.2.4 Infrarote Strahlenbelastung

Ein erneuter Blick auf die MAG-Schweißspektren aus Abb. 8.8 lässt erkennen, dass Gefährdungen des Schweißers durch infrarote Strahlungsanteile gering sind jedoch nicht vernachlässigt werden dürfen. Auch wenn die integrierten Bestrahlungsstärken in Abb. 8.11 Werte bis zu 360 W m^{-2} erreichen, liegen die nach Gleichung (4.7) und (4.8) berechneten maximal zulässigen Expositionsdauern $t_{IR}(\text{p-S235}) = 13,5 \text{ min}$ und $t_H(\text{CrNi}) = 3,5 \text{ min}$ im Minutenbereich. Eine realistische kumulierte Expositionsdauer durch Mehrfachblick in den Lichtbogen ist aber sicherlich kürzer als 13,5 min.

Auffällig in Abb. 8.11 ist die unterschiedliche mathematische Beschreibung der Leistungsabhängigkeiten: Für $E_{IR,H}$ (p-S235) zeigt sich eine lineare Abhängigkeit gemäß Gleichung (6.5), wohingegen $E_{IR,H}$ (CrNi) durch einen exponentiellen Anstieg

$$E_{IR,H} = E_S^* + A \exp(pP) \quad (8.2)$$

charakterisiert werden kann. $E_S^* = \lim_{P \rightarrow -\infty} E_{IR,H}$ beschreibt hierbei analog zu Formel (8.1) eine (unphysikalische) Sättigungsbestrahlungsstärke für unendlich negative Leistungen. A und p dienen zur Anpassung der Exponentialfunktionen an die Datensätze. Die entsprechenden Parameter sind in Tab. 8.7 aufgelistet.

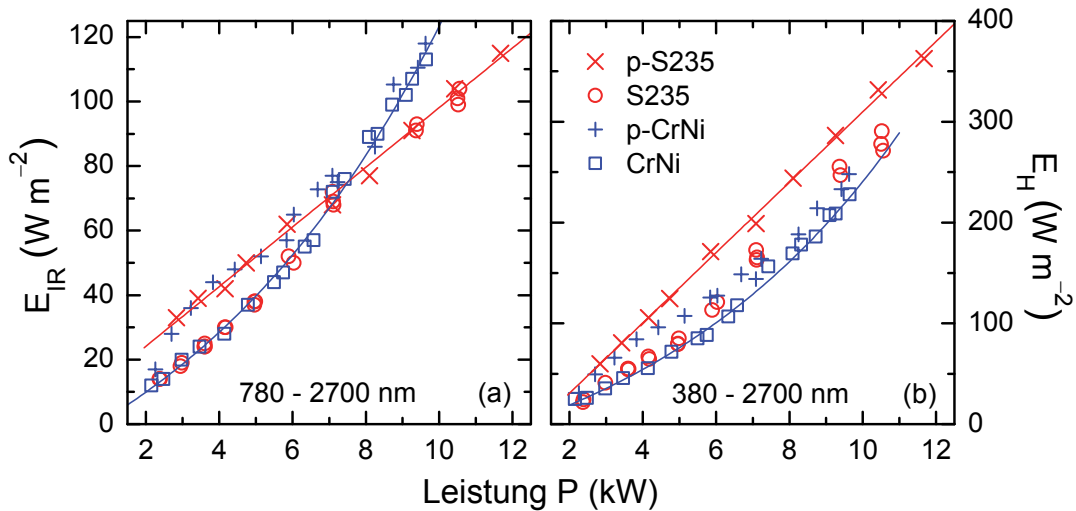


Abb. 8.11 (a) Infrarote Strahlenbelastung beim MAG-Schweißen von S235 und CrNi, normale und gepulste Prozessvariante. In (b) ist die leistungsabhängige Bestrahlungsstärke E_H dargestellt. Eingezeichnete Linien geben Anpassungen an die Daten entsprechend der Parameter aus Tab. 8.7 wieder.

Die Bestrahlungsstärken beim Schweißen von Baustahl mit normaler Prozessvariante ähneln dem sigmoidalen Verlauf von E_B (S235) (Anpassungsfunktion nicht abgebildet). Die Werte bei p-CrNi liegen zunächst dicht an denen von p-S235, nähern sich aber für größere Leistungen $E_{IR,H}$ (CrNi) an. Insgesamt befinden sich alle gemessenen Bestrahlungsstärken innerhalb eines Bereiches, der durch eine lineare und eine exponentielle Funktion mit den Parametern aus Tab. 8.7 eingegrenzt werden kann.

Abschließend ist anzumerken, dass durch Addition sichtbarer Strahlungsanteile zu E_{IR} (S235) gemäß Gleichung (4.8) die daraus resultierenden Bestrahlungsstärken E_H (S235) in Abb. 8.11 (b) verglichen mit denen von CrNi größer werden, d. h. es tritt mehr sichtbare Strahlung beim Schweißen von Baustahl auf, vgl. mit Abb. 8.10 (a).

Tab. 8.7 Anpassungsparameter der infraroten Bestrahlungsstärken aus Abb. 8.11 nach Gleichungen (6.5) und (8.2). Die entsprechenden Einheiten sind $W m^{-2}$ für E_0 , E_S^* und A , $W m^{-2} kW^{-1}$ für m und kW^{-1} für p .

	E_{IR}	E_H
p-S235	$m = (9,2 \pm 0,3)$ $E_0 = (6 \pm 2)$	$m = (34,9 \pm 0,6)$ $E_0 = (-39 \pm 4)$
CrNi	$E_S^* = (-54 \pm 14)$ $A = (49 \pm 12)$ $p = (0,13 \pm 0,02)$	$E_S^* = (-95 \pm 26)$ $A = (87 \pm 21)$ $p = (0,14 \pm 0,02)$

8.3 Metallinertgasschweißen

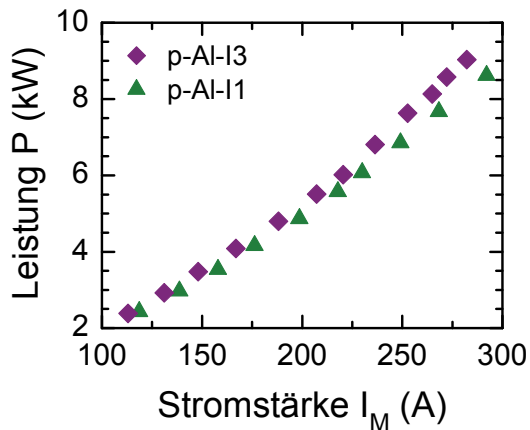


Abb. 8.12 Leistungsbereich beim MIG-Schweißen

Metallinertgasschweißen, kurz MIG-Schweißen, ist wie MAG-Schweißen eine Variante des Metallschutzgasschweißens, siehe Kapitel 5.2. Bei den verwendeten Schutzgasen handelt es sich um inertes Argon (I1) und Helium bzw. um Gemische (I3) aus beiden. Typischerweise wird MIG-Schweißen als gepulste Prozessvariante zum Schweißen von Aluminium verwendet. Der in Abb. 8.12 gezeigte Leistungsbereich ähnelt dem des MAG-Schweißens wird aber durch eine maximale mittlere Stromstärke I_M von etwa 300 A begrenzt.

8.3.1 Schutzgasspezifische Schweißspektren

Obwohl die beim gepulsten MIG-Schweißen von Aluminium gemessene spektrale Bestrahlungsstärke den MAG-Schweißspektren von S235 und CrNi wenig ähnelt, finden sich auch hier erhöhte Strahlungsanteile im besonders biologisch wirksamen UVB-Spektralbereich, siehe Abb. 8.13. Auffällig im Vergleich zu Abb. 8.8 ist die deutlich geringere Anzahl an Emissionslinien beim Aluminium Schweißen. Aber auch sichtbare Strahlungsanteile, insbesondere in der BLH-Region, weisen intensive Emissionslinien auf, während infrarote Strahlung unterhalb einer spektralen Bestrahlungsstärke von etwa $0,5 \text{ W m}^{-2} \text{ nm}^{-1}$ bleibt.

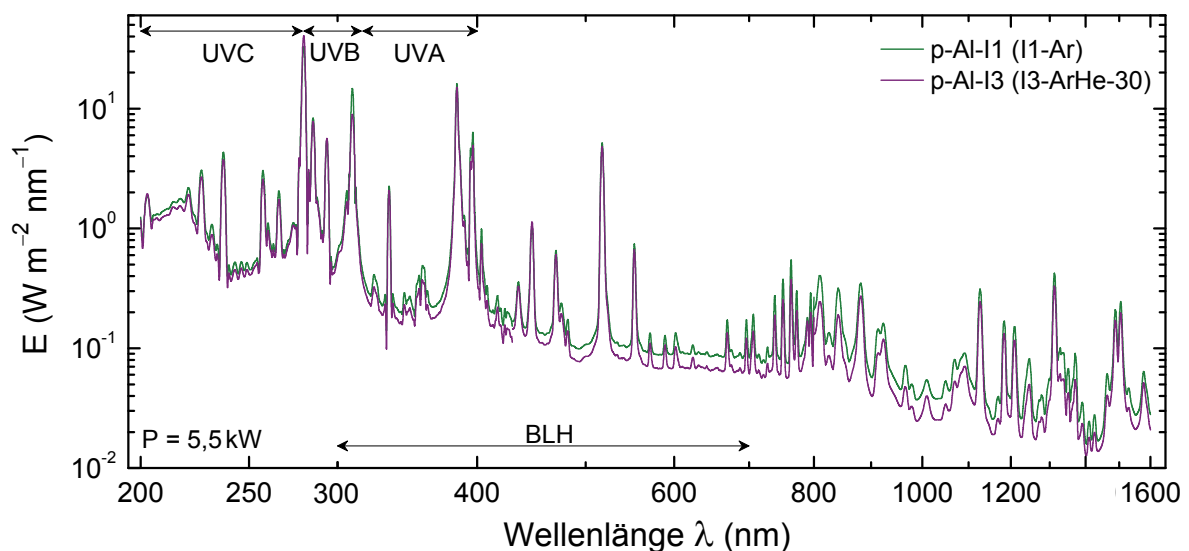


Abb. 8.13 Spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ beim MIG-Schweißen von Aluminium mit gepulster Prozessvariante unter zwei verschiedenen Schutzgasen bei einer mittleren Leistung von 5,5 kW. Ultraviolette Spektralbereiche und der Bereich der Blaulichtgefährdung sind durch Pfeile gekennzeichnet.

Tab. 8.8 Gemittelte UV-Anteilsverhältnisse ρ beim gepulsten MIG-Schweißen von Aluminium.

	ρ_{UVA} (%)	ρ_{UVB} (%)	ρ_{UVC} (%)
p-Al-I1	(0,010 ± 0,001)	(42 ± 1)	(58 ± 1)
p-Al-I3	(0,009 ± 0,001)	(43 ± 2)	(57 ± 2)

Eine Analyse mit Hilfe des UV-Anteilsverhältnisses ρ ergibt, dass die gewichtete UVB-Bestrahlungsstärke beim MIG-Schweißen von Aluminium mit ca. 42 % Anteil fast doppelt so hoch ist verglichen mit MAG-Schweißen von Bau- und Edelstahl, siehe Tab. 8.4. Dementsprechend sind UVA- und UVC-Anteile geringer. Ein Unterschied zwischen den beiden Schutzgasen I1 und I3 ist innerhalb der Fehlergrenzen in Tab. 8.8 nicht zu erkennen, in Übereinstimmung mit der spektralen Bestrahlungsstärke aus Abb. 8.13.

8.3.2 Leistungsabhängige UV-Bestrahlungsstärken und Expositionsdauern

Bei den leistungsabhängigen Bestrahlungsstärken E_{UVA} und E_{eff} in Abb. 8.14 (a) und (b) fällt auf, dass hier im Gegensatz zum WIG- oder MAG-Schweißen die effektive mit $S(\lambda)$ gewichtete Bestrahlungsstärke größer als E_{UVA} ist, vgl. mit Abb. 8.13 und Tab. 8.8.

Die beim WIG-Schweißen anhand von E_{eff} (Abb. 8.3 (d)) aufgestellte Hypothese, eine

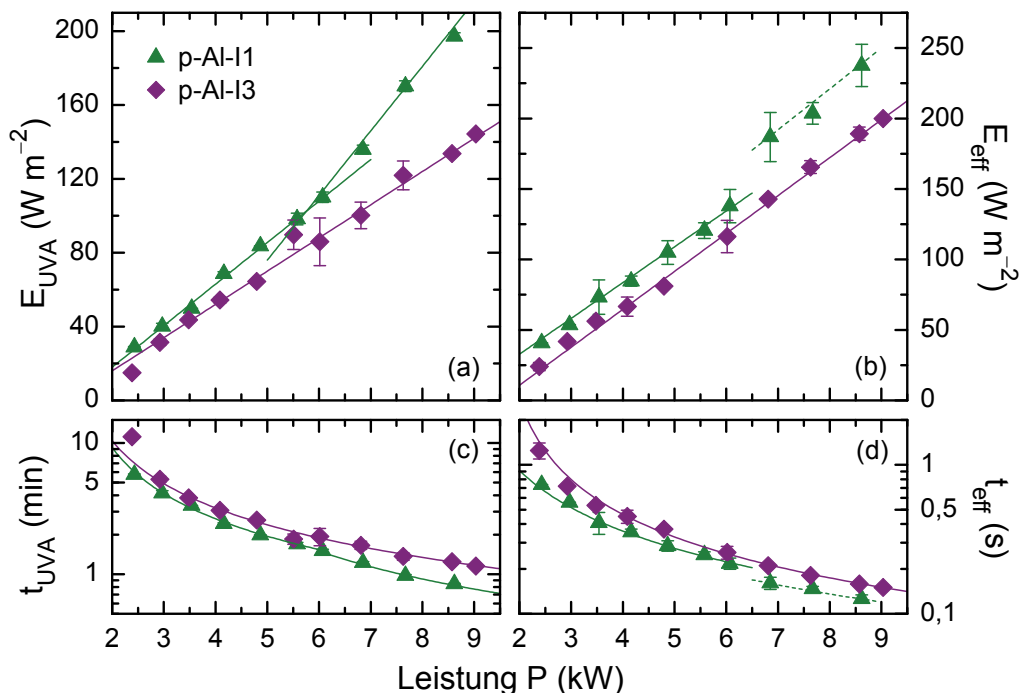


Abb. 8.14 (a), (b) Berechnete Bestrahlungsstärken E_{UVA} und E_{eff} in Abhängigkeit der dem Lichtbogen zugeführten elektrischen Leistung P . Eingezeichnete Geraden entsprechen Anpassungen an die Messwerte nach Formel (6.5) mit den Parametern aus Tab. 8.9. Die gestrichelte grüne Linie symbolisiert die mangelnde Genauigkeit der Anpassung. (c), (d) Leistungsabhängiger Verlauf der aus (a) und (b) berechneten Expositionsdauern mit entsprechenden mathematischen Beschreibungen.

Tab. 8.9 Anpassungsparameter an die Bestrahlungsstärken aus Abb. 8.14 (a) und (b) nach Formel (6.5). m ist in der Einheit $\text{W m}^{-2} \text{kW}^{-1}$ und E_0 in W m^{-2} angegeben.

	UVA	UV, gewichtet
p-Al-I1	$m_{P \leq 6 \text{kW}} = (22,5 \pm 0,5)$ $E_{0,P \leq 6 \text{kW}} = (-27 \pm 2)$	$m_{P \leq 6 \text{kW}} = (25,4 \pm 0,8)$ $E_{0,P \leq 6 \text{kW}} = (-18 \pm 4)$
	$m_{P > 6 \text{kW}} = (35 \pm 2)$ $E_{0,P > 6 \text{kW}} = (-101 \pm 13)$	$m_{P > 6 \text{kW}} = (29 \pm 3)$ $E_{0,P > 6 \text{kW}} = (-11 \pm 26)$
p-Al-I3	$m = (18 \pm 1)$ $E_0 = (-20 \pm 9)$	$m = (26,9 \pm 0,5)$ $E_0 = (-43 \pm 3)$

leistungsabhängige Steigungsänderung stehe in Verbindung mit dem eingesetzten Schutzgas, findet hier erneut Beachtung: Während die Bestrahlungsstärken für das Argon-Helium-Gasgemisch I3 über den kompletten Leistungsbereich mit einer linearen Funktion nach Gleichung (6.5) beschrieben werden können, sind zur Anpassung an E_{UVA} und E_{eff} beim Schutzgas I1 zwei Geraden notwendig. Die entsprechenden Fitparameter sind in Tab. 8.9 aufgelistet.

Da für den höheren Leistungsbereich von E_{eff} (p-Al-I1) lediglich drei Bestrahlungsstärkewerte mit großen Standardabweichungen für eine mathematische Anpassung verwendet werden konnten, sind die Fitparameter stark fehlerbelastet und ungenau, veranschaulicht durch die gestrichelte Linie. Prinzipiell ist ebenso wie bei E_{UVA} (p-Al-I1) ein Schnittpunkt der beiden Leistungsbereiche nahe 6 kW möglich.

Diese „Knick-Leistung“ passt allerdings nicht zur Verhaltensänderung beim WIG-Schweißen um etwa 3 kW. Ein Vergleich mit dem Übergang vom Kurz- zum Sprühlichtbogen wie beim MAG-Schweißen wäre naheliegend, da allerdings beim MIG-Schweißen nur der Impulslichtbogen verwendet wird, kann dieser Erklärungsversuch ausgeschlossen werden. Eine Schutzgasabhängigkeit ist somit durchaus möglich.

8.3.3 Gefährdungen durch sichtbare und infrarote Strahlungsanteile

In Abb. 8.13 ist gut zu erkennen, dass im Bereich der Blaulichtgefährdung zwischen 300 und 700 nm (BLH) einzelne intensive Emissionslinien auftreten. Die Wichtung dieses Spektralbereichs nach Gleichung (4.12) resultiert in der leistungsabhängigen Bestrahlungsstärke E_B , dargestellt in Abb. 8.15 (a). Bei beiden eingesetzten Schutzgasen I1 und I3 können lineare Funktionen mit den Parametern aus Tab. 8.10 an die Daten angepasst werden. Eine Steigungsänderung wie bei den UV-Bestrahlungsstärken tritt hier nicht auf.

Die berechneten maximal zulässigen Expositionsdauern t_B , welche in Abb. 8.15 (b) abgebildet sind, betragen bei hohen elektrischen Leistungen nur wenige Sekunden. Eine Netzhautgefährdung durch unbeabsichtigten Blick in den Schweißlichtbogen ist hoch und muss zwingende vermieden werden. Der Höchstwert der Strahldichtemessungen von $L_B = 324 \text{ kW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ bei p-Al-I3 ergibt ebenfalls eine maximale Expositionsdauer von etwa 3 s.

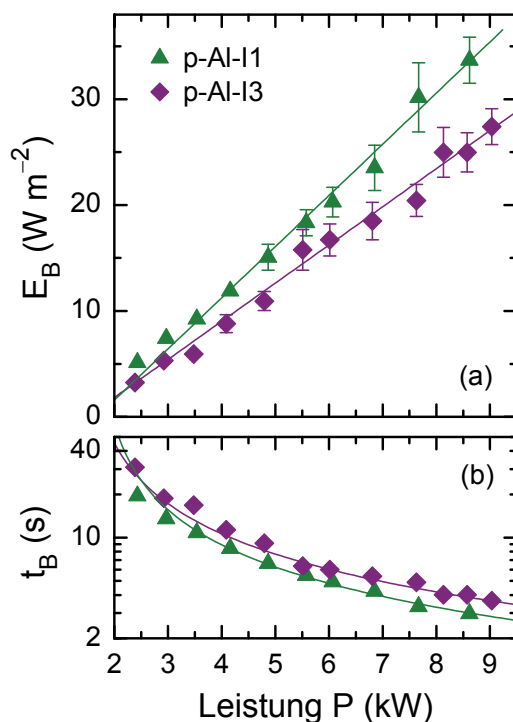


Abb. 8.15 (a) Leistungsabhängige blaulichtgewichtete Bestrahlungsstärken des gepulsten WIG-Schweißens auf Aluminium bei zwei argonhaltigen Schutzgasen. Eingezeichnete Linien geben lineare Anpassungen mit den in Tab. 8.10 genannten Parametern wieder. In (b) sind die aus (a) nach Formel (4.12) berechneten leistungsabhängigen Expositionsdauern abgebildet.

Im Vergleich zur infraroten Strahlenbelastung beim Schutzgasschweißen Typ MAG, Kapitel 8.2.4, liegen die maximal zulässigen Expositionsdauern beim MIG-Schweißen etwas niedriger: t_{IR} beträgt bei p-Al-I1 8,3 min (13,5 min bei p-S235/MAG) und $t_H = 2,6$ min (CrNi/MAG: 3,5 min) berechnet nach Gleichungen (4.7) und (4.8) aus den Bestrahlungsstärken in Abb. 8.16. Schädigungen des ungeschützten Auges z. B. durch Netzhautverbrennungen sind bei diesen langen maximalen Expositionsdauern unwahrscheinlich, da über mehrere Minuten ein direkter Blick in den Lichtbogen erfolgen müsste. Für ungeschützte Haut ist eine Überschreitung der Expositionsgrenzwerte jedoch nicht zu vernachlässigen.

In Abb. 8.16 zeigt sich ebenso wie bei den UV-Bestrahlungsstärken aus Abb. 8.14 eine Steigungsänderung bei einer Leistung von etwa 6 kW, allerdings nur beim reinen Argon Schutzgas I1. Dies bekräftigt weiter die Hypothese eines Einflusses des verwendeten Schutzgases auf die Leistungsabhängigkeit der emittierten Strahlung.

Tab. 8.10 Anpassungsparameter nach Formel (6.5) an die Bestrahlungsstärken aus Abb. 8.15 (a) und Abb. 8.16. m ist in der Einheit $\text{W m}^{-2} \text{ kW}^{-1}$ und E_0 in W m^{-2} angegeben.

	E_B	E_{IR}	E_H
p-Al-I1	$m = (4,8 \pm 0,2)$ $E_0 = (-8 \pm 1)$	$m_{P \leq 6\text{kW}} = (18,4 \pm 0,5)$ $E_{0,P \leq 6\text{kW}} = (-13 \pm 2)$ $m_{P > 6\text{kW}} = (28 \pm 1)$ $E_{0,P > 6\text{kW}} = (-73 \pm 7)$	$m_{P \leq 6\text{kW}} = (51,6 \pm 0,9)$ $E_{0,P \leq 6\text{kW}} = (-54 \pm 4)$ $m_{P > 6\text{kW}} = (82 \pm 7)$ $E_{0,P > 6\text{kW}} = (-241 \pm 54)$
p-Al-I3	$m = (3,6 \pm 0,2)$ $E_0 = (-5 \pm 1)$	$m = (15,4 \pm 0,3)$ $E_0 = (-16 \pm 2)$	$m = (43 \pm 1)$ $E_0 = (-52 \pm 8)$

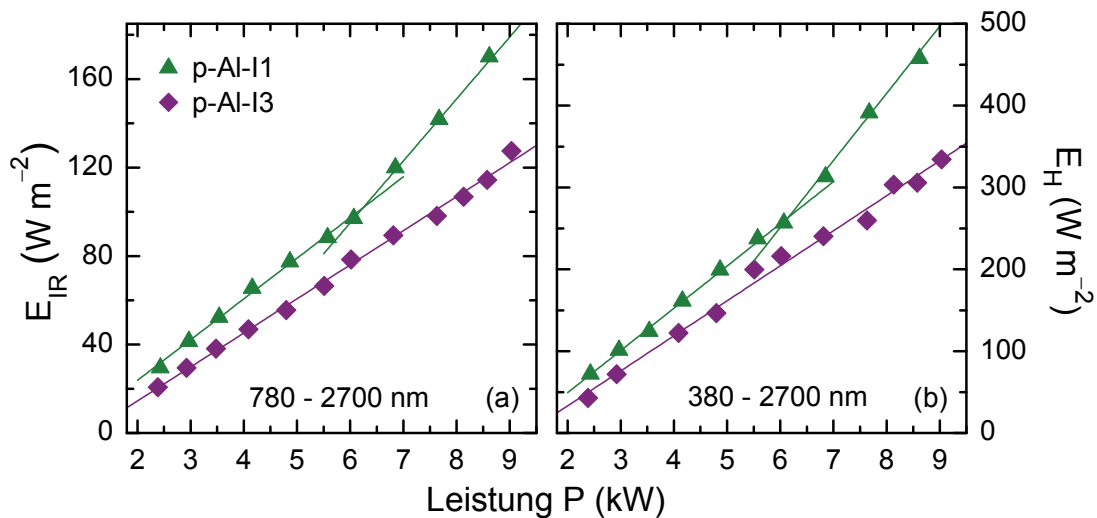


Abb. 8.16 Leistungsabhängigkeit der Bestrahlungsstärken (a) E_{IR} und (b) E_H beim MIG-Schweißen von Aluminium unter zwei verschiedenen Schutzgasen I1 und I3. Eingezeichnete lineare Anpassungen erfolgten gemäß Gleichung (6.5) mit den zugehörigen Parametern aus Tab. 8.10.

8.4 Cold Metal Transfer Schweißen

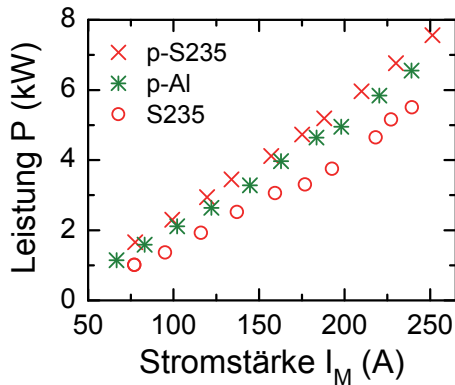


Abb. 8.17 Leistungsbereich beim CMT-Schweißen

CMT- oder Cold-Metal-Transfer Schweißen ist eine Prozessvariante des Metallschutzgas-schweißens, welche unter inertem (Werkstoff: Aluminium) oder aktiven Schutzgas (hier: Baustahl) erfolgen kann. Dabei wird der Schweißdraht im sog. CMT-Zyklus mit einer bestimmten Frequenz in und entgegen seiner Förderrichtung bewegt, siehe Kapitel 5.2.2. Beim CMT Standard Prozess wird stets mit einem Kurzlichtbogen geschweißt, wohingegen beim CMT Puls Verfahren zusätzlich zur Drahtführung auch der Lichtbogen gepulst wird. Da bei beiden Verfahrensvarianten im Vergleich zu MAG oder MIG weniger Wärmeintrag in das Werkstück notwendig ist, kann mit

reduzierter elektrischer Leistung gearbeitet werden, siehe Abb. 8.17. Weiterführende Informationen zum CMT-Schweißen können der Literatur entnommen werden, z. B. „Schweißpraxis aktuell: CMT-Technologie“ (FRONIUS2013).

8.4.1 CMT-Puls Schweißspektren

Da das S235-Standard Schweißspektrum mit dem der gepulsten Verfahrensvariante identisch ist, sind in Abb. 8.18 nur die spektralen Bestrahlungsstärken von p-S235 und p-Al gezeigt. Sowohl das Spektrum von Baustahl als auch von Aluminium ähneln den jeweiligen beim MAG- oder MIG-Schweißen. Ein Vergleich material- und prozessspezifischer (spektraler) Bestrahlungsstärken erfolgt in Kapitel 9.2.

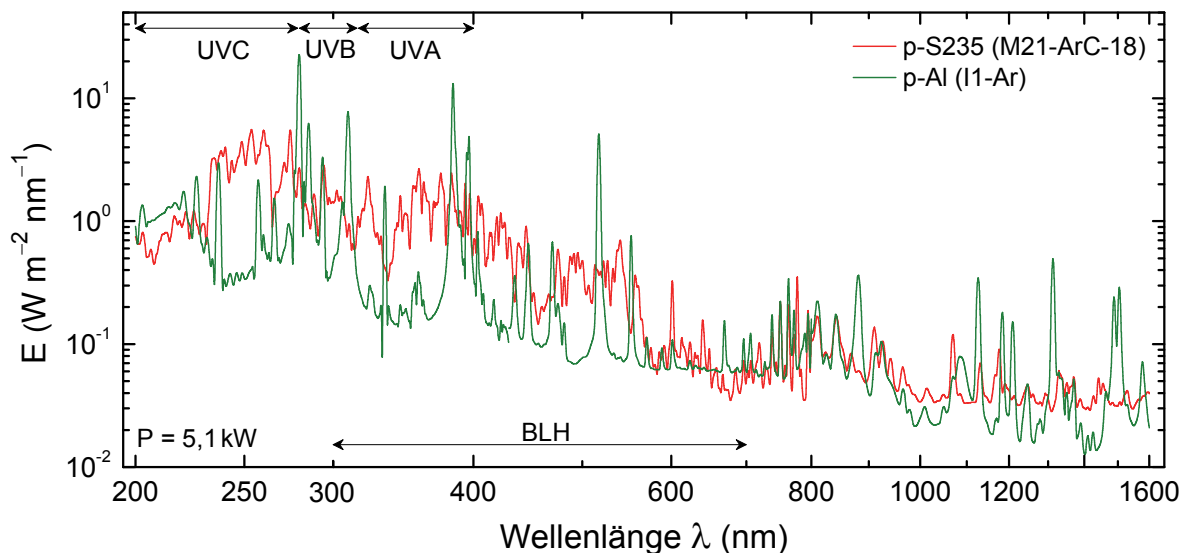


Abb. 8.18 Cold-Metal-Transfer Schweißspektren bei einer mittleren Leistung von $P = 5,1 \text{ kW}$. Abgebildet sind nur die spektralen Bestrahlungsstärken des Impulslichtbogens beim CMT-Puls Schweißen auf Baustahl und Aluminium. Horizontale Doppelpfeile visualisieren typische spektrale Bereiche.

Tab. 8.11 Gemittelte UV-Anteilsverhältnisse ρ beim CMT-Schweißen von Baustahl (CMT Puls und Standard) und Aluminium (CMT Puls).

	ρ_{UVA} (%)	ρ_{UVB} (%)	ρ_{UVC} (%)
p-S235	(0,026 ± 0,007)	(18,9 ± 0,4)	(82 ± 2)
S235	(0,024 ± 0,006)	(18 ± 1)	(81 ± 3)
p-Al	(0,010 ± 0,002)	(42 ± 1)	(57 ± 2)

Eine quantitative Analyse mit Hilfe des UV-Anteilsverhältnisses ρ , siehe Tab. 8.11, bestätigt, dass die gewichteten Spektralanteile im UVA-, UVB- und UVC-Bereich zwischen den Metallschutzgasschweißverfahren MAG, MIG und CMT quasi identisch sind: Für MAG-Schweißen von Baustahl findet sich $\rho_{UVA} \approx 0,03$ %, $\rho_{UVB} \approx 20$ % und $\rho_{UVC} \approx 80$ %, für MIG-Schweißen von Aluminium $\rho_{UVA} \approx 0,01$ %, $\rho_{UVB} \approx 43$ % und $\rho_{UVC} \approx 57$ %. Ein prozessspezifischer Einfluss auf das gewichtete Verhältnis der spektralen UV-Bestrahlungsstärken ist demnach nicht zu erkennen.

8.4.2 Leistungsabhängige UV-Strahlungsemission und Expositionsdauern

Beim Betrachten der in Abb. 8.19 dargestellten leistungsabhängigen E_{UVA} - und E_{eff} -Werte fällt auf, dass unabhängig von der Verfahrensvariante (CMT Standard oder CMT Puls) und vom Werkstück die gemessenen Bestrahlungsstärken relativ dicht beieinander liegen. Zusätzlich konnten Marzec *et al.* (MARZEC2013) zeigen, dass quasi kein Einfluss des verwendeten Schutzgases beim CMT-Schweißen von Edelstahl auf die UV-Bestrahlungsstärken vorhanden ist. Auch die Absolutwerte von E_{UVA} und E_{eff} sowie deren Anpassungsparameter, siehe Tab. 8.12, sind vergleichbar.

Zur mathematischen Beschreibung der Leistungsabhängigkeiten der p-S235-, S235- und p-Al-CMT-Bestrahlungsstärken müssen jedoch unterschiedliche Modelle gewählt werden.

Beim gepulsten CMT-Schweißen von Baustahl wäre prinzipiell eine Anpassung an die gemessenen Bestrahlungsstärken mit einer Sigmoid Funktion möglich. Da aber dessen Krümmung sehr gering ist, können die Daten auch gut mit einer linearen Funktion und entsprechenden Anpassungsparametern aus Tab. 8.12 beschrieben werden, was für betriebliche Zwecke sicherlich einfacher zu handhaben ist.

Im Gegensatz dazu ist beim CMT-Standard-Schweißen von Baustahl der sigmoide Verlauf deutlicher stärker ausgeprägt. Leider konnte für S235 nicht mit Leistungen $P > 6$ kW geschweißt werden, um den Sättigungscharakter der Bestrahlungsstärken besser sichtbar zu machen.

Versuche, E_{UVA} (p-Al) und E_{eff} (p-Al) mit einer linearen oder einer exponentiellen Funktion zu beschreiben, waren mit großen Fehlern behaftet oder scheiterten. Die Beschreibung der leistungsabhängigen Bestrahlungsstärken mit zwei Exponentialfunktionen lieferte hingegen sehr gute Ergebnisse. Die Trennung der jeweiligen Bereiche liegt bei $P = 2,6$ kW. Um die Qualität der Anpassungen zu verbessern, wurde dieser Bestrahlungsstärkewert für beide Exponentialfunktionen verwendet. Für $P \leq 2,6$ kW (nur vier Punkte) sind die Anpassungsfehler trotzdem groß.

Die Ursache dieser doppeltexponentiellen Beschreibung und dem damit verbundenen Bereichsgrenzwert von $P = 2,6$ kW bleibt zu klären. Eine signifikante Verhaltens-

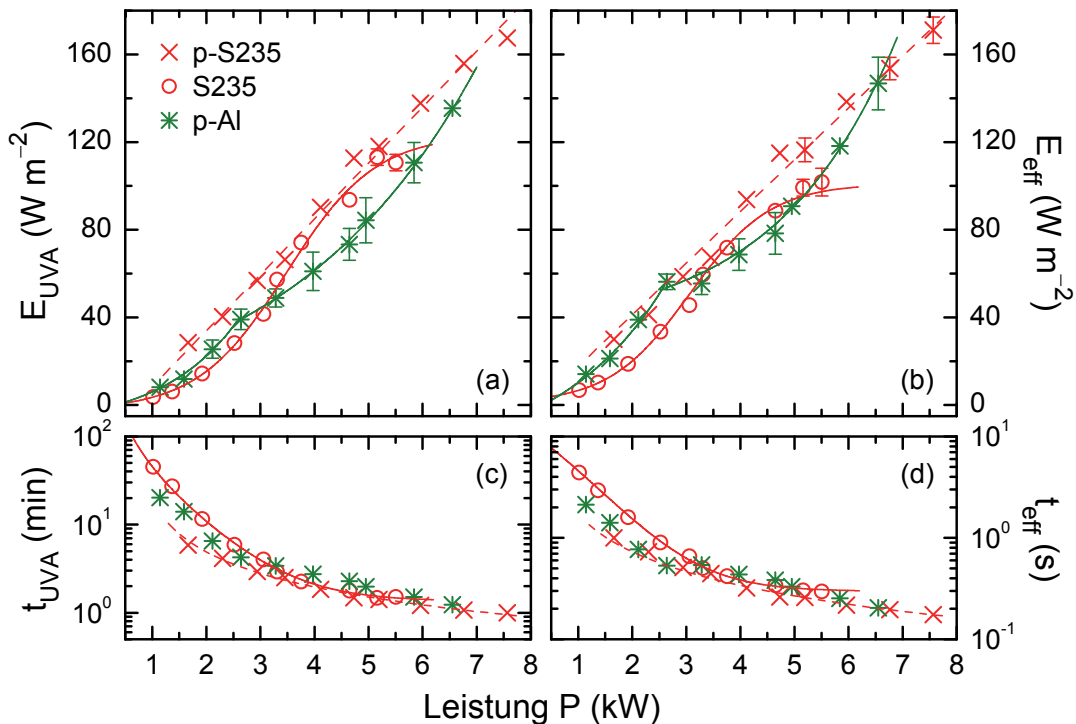


Abb. 8.19 (a) Ungewichtete UVA- und (b) mit $S(\lambda)$ gewichtete effektive Bestrahlungsstärken als Funktionen der dem Lichtbogen zugeführten elektrischen Leistung P . Eingezeichnete Linien entsprechen numerischen Anpassungen an die Daten nach Gleichungen (6.5) (p-S235), (8.1) (S235) und (8.2) (p-Al). Die Anpassungsgerade für p-S235 ist lediglich zur besseren Übersicht gestrichelt dargestellt. Für p-Al sind zwei Exponentialfunktionen zur Beschreibung notwendig. In (c) und (d) sind entsprechende Expositionsdauern t_{UVA} und t_{eff} nach Gleichung (4.6) (b) und (4.11) (b) zusammen mit mathematischen Anpassungen abgebildet. Zur besseren Visualisierung sind für p-Al keine Fitfunktionen gezeigt.

änderung der Leistungsfunktion $P(I_M)$ ist in Abb. 8.17 nicht zu erkennen. Unabhängig davon erfolgt die Auftragung der Bestrahlungsstärken gegen eine lineare Leistungsskala. Ein Übergang zwischen zwei Lichtbogenarten kann durch die Verwendung des Impulslichtbogens bei Leistungen unterhalb von etwa 4 kW ausgeschlossen werden. Eine Schutzgasabhängigkeit wie beim WIG-Schweißen mit einer „Knick-Leistung“ von etwa 3 kW wäre prinzipiell möglich, der vermutlich gleiche Effekt beim MIG-Schweißen tritt allerdings erst bei ca. 6 kW auf, siehe Abb. 8.14.

8.4.3 Blaulichtgefährdung

Bei den mit $B(\lambda)$ gewichteten Bestrahlungsstärken in Abb. 8.20 (a) zeigt sich die jeweils gleiche material- und prozessspezifische Leistungsabhängigkeit wie bei den UV-Bestrahlungsstärken: linear bei p-S235, sigmoid bei S235 und doppeltexponentiell bei p-Al. Die entsprechenden Anpassungsparameter sind in Tab. 8.13 aufgelistet. Im Gegensatz zum ultravioletten Spektralbereich wird hier beim reinen Argon Schutzgas I1 erheblich weniger sichtbare Strahlung emittiert. Für einen Großteil der gemessenen E_B liegen die Expositionsdauern im Sekundenbereich, Abb. 8.20 (b), verbunden mit einer schnellen potenziellen fotochemischen Schädigung des Auges.

Tab. 8.12 Anpassungsparameter an die Bestrahlungsstärken aus Abb. 8.19 (a) und (b). E_S , E_S^* , E_0 und A sind in W m^{-2} , P_0^* und κ in kW , m in $\text{W m}^{-2} \text{kW}^{-1}$ und p in kW^{-1} angegeben.

	UVA	UV, gewichtet
S235	$E_S = (123 \pm 10)$ $P_0^* = (3,5 \pm 0,1)$ $\kappa = (0,82 \pm 0,09)$	$E_S = (101 \pm 8)$ $P_0^* = (3,1 \pm 0,1)$ $\kappa = (0,74 \pm 0,08)$
p-S235	$m = (25,5 \pm 0,9)$ $E_0 = (-17 \pm 4)$	$m = (23,1 \pm 0,5)$ $E_0 = (-3 \pm 3)$
p-Al	$E_{S,P \leq 2,6\text{kW}}^* = (-10 \pm 21)$ $A_{P \leq 2,6\text{kW}} = (8 \pm 13)$ $p_{P \leq 2,6\text{kW}} = (0,7 \pm 0,5)$ $E_{S,P \geq 2,6\text{kW}}^* = (-9 \pm 9)$ $A_{P \geq 2,6\text{kW}} = (23 \pm 6)$ $p_{P \geq 2,6\text{kW}} = (0,28 \pm 0,03)$	$E_{S,P \leq 2,6\text{kW}}^* = (-26 \pm 41)$ $A_{P \leq 2,6\text{kW}} = (22 \pm 31)$ $p_{P \leq 2,6\text{kW}} = (0,5 \pm 0,3)$ $E_{S,P \geq 2,6\text{kW}}^* = (34 \pm 9)$ $A_{P \geq 2,6\text{kW}} = (6 \pm 3)$ $p_{P \geq 2,6\text{kW}} = (0,46 \pm 0,08)$

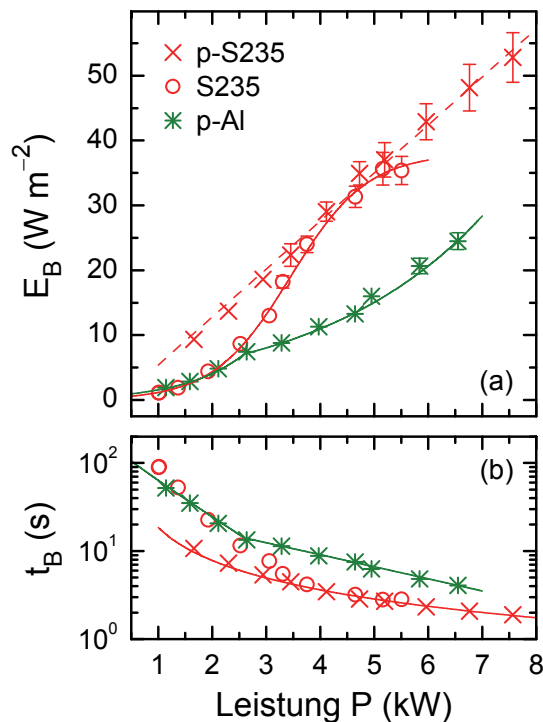


Abb. 8.20 (a) Blaulichtgewichtete leistungsabhängige Bestrahlungsstärken E_B beim CMT-Schweißen mit Impulslichtbogen (p-S235, p-Al) und Kurzlichtbogen (S235). Anpassungsfunktionen nach Gleichung (6.5) (p-S235), (8.1) (S235) und (8.2) (p-Al) sind eingezeichnet. (b) Expositionsdauern nach Formel (4.12) mit mathematischen Beschreibungen analog zu Gleichung (6.8).

Tab. 8.13 Anpassungsparameter an die Bestrahlungsstärken aus Abb. 8.20 (a). E_S , E_S^* , E_0 und A sind in W m^{-2} , P_0^* und κ in kW , m in $\text{W m}^{-2} \text{kW}^{-1}$ und p in kW^{-1} angegeben.

S235	p-S235	p-Al	
		$P \leq 2,6 \text{ kW}$	$P \geq 2,6 \text{ kW}$
$E_S = (38 \pm 2)$	$m = (7,4 \pm 0,2)$	$E_S^* = (0,03 \pm 0,23)$	$E_S^* = (-0,2 \pm 2,5)$
$P_0^* = (3,5 \pm 0,1)$	$E_0 = (-2 \pm 1)$	$A = (0,7 \pm 0,1)$	$A = (3 \pm 2)$
$\kappa = (0,76 \pm 0,05)$		$p = (0,92 \pm 0,06)$	$p = (0,31 \pm 0,06)$

Simultan durchgeführte Strahldichtemessungen ergaben einen Maximalwert beim Standard-CMT-Schweißen auf S235 von $L_B = 523 \text{ kW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$, resultierend in einer minimalen Expositionsdauer nach Gleichung (4.13) von $t'_B = 2 \text{ s}$.

8.4.4 Infrarote Strahlenbelastung

In Abb. 8.21 sind ungewichtete infrarote Bestrahlungsstärken zur Berechnung der maximal zulässigen Expositionsauern beim CMT-Schweißen von Aluminium und Baustahl gezeigt. Mit Minimalzeiten von $t_{IR} = 15,1 \text{ min}$ und $t_H = 4,3 \text{ min}$, beide bei p-Al bestimmt, ist zumindest eine Schädigung des ungeschützten Auges unwahrscheinlich. Ähnlich zu MIG- oder MAG-Schweißen darf jedoch auch beim CMT-Schweißen eine potenzielle Gefährdung ungeschützter Haut nicht vernachlässigt werden.

Besonderes Augenmerk gilt der mathematischen Beschreibung der leistungsabhängigen Bestrahlungsstärken beim CMT-Puls Schweißen von Aluminium und Baustahl. Für p-Al wäre ebenso wie im UV- und sichtbaren Spektralbereich eine Anpassung

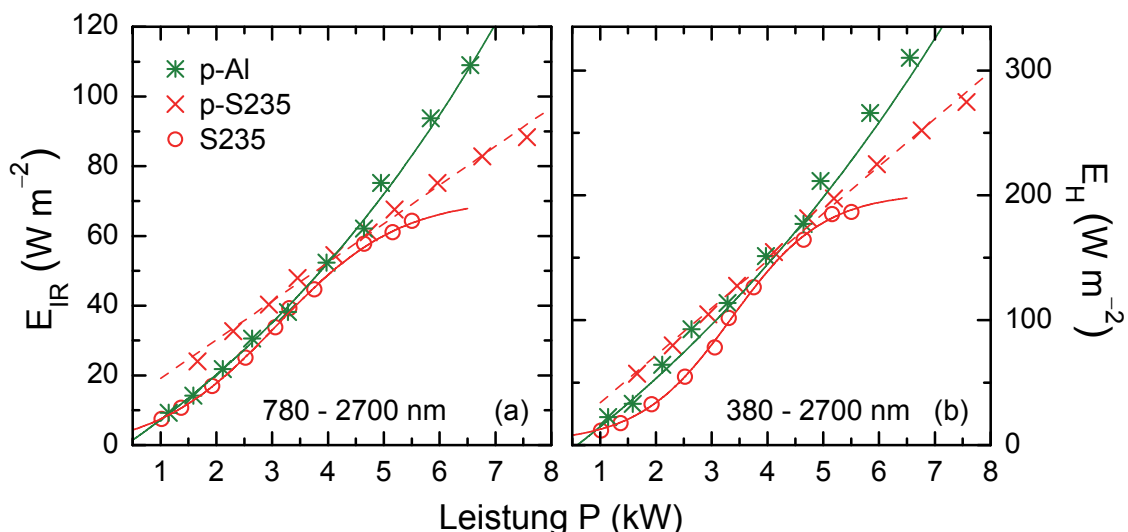


Abb. 8.21 Leistungsabhängige Bestrahlungsstärken (a) E_{IR} und (b) E_H für CMT-Puls Schweißen von Aluminium (p-Al) und Baustahl (p-S235) sowie für CMT-Standard Schweißen von S235. Lineare (p-S235), exponentielle (p-Al) und sigmoide (S235) Anpassungsfunktionen mit Parametern aus Tab. 8.14 sind eingezeichnet.

Tab. 8.14 Anpassungsparameter an die infraroten Bestrahlungsstärken aus Abb. 8.21 nach Gleichungen (6.5), (8.1) und (8.2). Die entsprechenden Einheiten sind W m^{-2} für E_S , E_0 , E_S^* und A , kW für P_0^* und κ , $\text{W m}^{-2} \text{kW}^{-1}$ für m und kW^{-1} für p .

	E_{IR}	E_{H}
S235	$E_S = (71 \pm 2)$ $P_0^* = (3,09 \pm 0,06)$ $\kappa = (1,1 \pm 0,1)$	$E_S = (202 \pm 6)$ $P_0^* = (3,36 \pm 0,06)$ $\kappa = (0,82 \pm 0,09)$
p-S235	$m = (11,1 \pm 0,3)$ $E_0 = (8 \pm 2)$	$m = (37,9 \pm 0,8)$ $E_0 = (-4 \pm 4)$
p-Al	$E_S^* = (-79 \pm 25)$ $A = (75 \pm 23)$ $p = (0,14 \pm 0,03)$	$E_S^* = (-318 \pm 118)$ $A = (298 \pm 111)$ $p = (0,11 \pm 0,03)$

mit zwei Exponentialfunktionen denkbar. Aber auch eine Beschreibung mit zwei linearen Funktionen ist möglich. Das beste Ergebnis, d. h. mit den geringsten Fehlern der Anpassungsparameter, ergibt sich jedoch aus einem Fit mit einer Exponentialfunktion.

Die Wahl einer Sigmoid Funktion zur Anpassung an die leistungsabhängigen Bestrahlungsstärken von S235 ist eindeutig. Für p-S235 ähnlich wie für p-Al gilt dies jedoch nicht. Prinzipiell würde eine modifizierte (um einen Parameter erweiterte) S-Funktion die $E_{\text{IR,H}}$ (p-S235) Werte am besten beschreiben, da allerdings weder für kleine noch für große Leistungen Sättigungsbestrahlungsstärken gemessen werden konnten, sind entsprechende Anpassungsparameter stark fehlerbehaftet. Eine lineare Funktion mit Werten für m und E_0 aus Tab. 8.14 ist zur Beschreibung der Leistungsabhängigkeit aber ebenso gut geeignet.

Insgesamt gilt also Vorsicht bei der mathematischen Beschreibung der CMT-Puls IR-Bestrahlungsstärken bzw. bei der Anwendung der Anpassungsfunktionen in der betrieblichen Praxis.

8.5 Lichtbogenhandschweißen

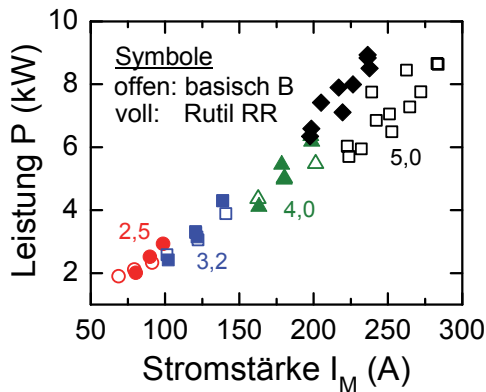


Abb. 8.22 Leistungsbereich beim MMA-Schweißen

Aufgrund der vielseitigen Einsatzmöglichkeiten und der Breite der auf dem Markt erhältlichen Stabelektroden zählt Lichtbogenhandschweißen (Manual Metal Arc, kurz MMA-Schweißen) zu den am häufigsten verwendeten Schweißverfahren. Die für den Kurzlichtbogen aufzubringende elektrische Leistung hängt dabei u.a. von der Dicke der Stabelektrodenummantelung ab, siehe Abb. 8.22. Für dieses Forschungsprojekt wurden vier verschiedene dicke basische (B) und dick mit Rutil umhüllte (RR) Stabelektroden hinsichtlich ihrer Strahlungsemission untersucht.

Vorab ist zu erwähnen, dass es sich trotz einer Haltevorrichtung für die Stabelektrode um ein manuelles und damit je nach Schweißer individuelles Verfahren handelt. So wird z. B. die Länge des Lichtbogens gemäß der subjektiven Erfahrung des Schweißers permanent nachgeregelt. Schwankende Strahlungsemissionswerte sind somit zu erwarten.

8.5.1 Spektrale Bestrahlungsstärke bei basischer und rutiler Ummantelung

Die spektralen Bestrahlungsstärken beim MMA-Schweißen von S235 mit basisch und dick mit Rutil ummantelten Stabelektroden sind für ein Leistung von 5 kW in Abb. 8.23 dargestellt. Über den kompletten erfassten Spektralbereich von 200 bis 1600 nm ist eine von der Ummantelung abhängige spektrale Verteilung der Emissionslinien zu erkennen. Exemplarisch sei auf die Linie bei ca. 1050 nm verwiesen. Die

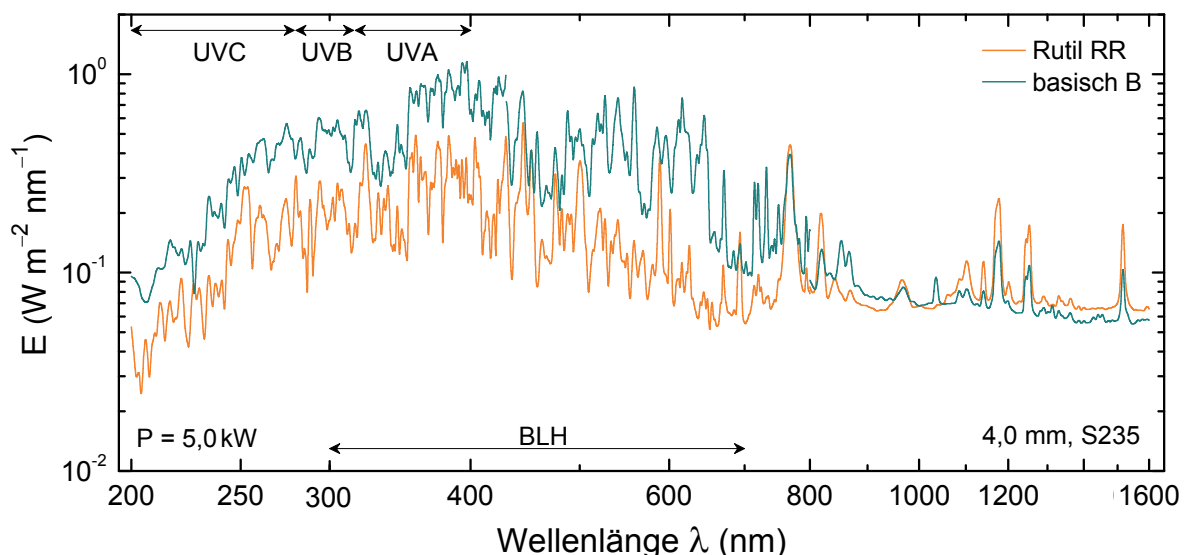


Abb. 8.23 Spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ beim Lichtbogenhandschweißen von Baustahl (S235) mit einer Leistung von 5 kW und einer 4 mm dicken basischen bzw. rutilen Ummantelung der Stabelektrode. Horizontale Doppelpfeile kennzeichnen UV- und BLH-Spektralbereiche.

Tab. 8.15 Gemittelte UV-Anteilsverhältnisse ρ nach Formel (6.4) beim MMA-Schweißen von Baustahl mit basisch oder dick Rutil ummantelter Stabelektrode in Abhängigkeit der Dicke D . Die letzte Zeile gibt durchschnittliche ρ -Werte und deren Standardabweichung wieder.

	D (mm)	ρ_{UVA} (%)	ρ_{UVB} (%)	ρ_{UVC} (%)
basisch (B)	2,5	(0,074 ± 0,002)	(33,0 ± 0,1)	(67,0 ± 0,1)
	3,2	(0,09 ± 0,02)	(35,6 ± 0,7)	(64,3 ± 0,7)
	4,0	(0,070 ± 0,005)	(36 ± 1)	(64 ± 1)
	5,0	(0,080 ± 0,007)	(35 ± 1)	(64 ± 2)
Rutil (RR)	2,5	(0,087 ± 0,003)	(35,9 ± 0,2)	(64,0 ± 0,2)
	3,2	(0,082 ± 0,008)	(35 ± 1)	(65 ± 1)
	4,0	(0,079 ± 0,001)	(34,1 ± 0,5)	(66,0 ± 0,5)
	5,0	(0,10 ± 0,02)	(35,8 ± 0,2)	(58 ± 6)
	$\bar{\rho}$	(0,08 ± 0,01)	(35 ± 1)	(64 ± 3)

absoluten Bestrahlungsstärken weisen im UV- und VIS-Spektralbereich höhere Werte für die basisch ummantelte Stabelektrode auf. Dies wird sich in den folgenden Kapiteln auch in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung P bestätigen.

An den MMA-Schweißspektren in Abb. 8.23 zeigt sich weiter, dass die Emissionsmaxima nicht wie bei den bisher betrachteten Schweißverfahren im UVB- oder UVC-Spektralbereich liegen, sondern erst bei größeren Wellenlängen auftauchen. Dies spiegelt sich auch im leistungsunabhängigen UV-Anteilsverhältnis ρ wider, welches mit durchschnittlich 0,08 % den höchsten UVA-Anteil aufweist, vgl. mit Tab. 9.1. Eine Abhängigkeit von der Dicke D der Ummantelung oder aber auch von dessen chemischer Zusammensetzung (B oder RR) ist innerhalb der Fehlergrenzen nicht festzustellen.

8.5.2 UV-Strahlungsemission als Funktion der Ummantelungsdicke

Wie bereits erwähnt, liegt aufgrund der manuellen Führung der Stabelektrode durch den Schweißer eine große Streuung der gemessenen leistungsabhängigen UVA- und effektiven Bestrahlungsstärken vor, siehe Abb. 8.24 (a) und (b). Die Fehlerbalken, die durch Mittelung der (bereits geräteintern durch mehrfache Messung gemittelten) Werte mehrerer Messinstrumente entstehen, sind entsprechend groß.

Dennoch sind klare leistungsabhängige E_{UVA} - und E_{eff} -Verläufe zu erkennen, die mathematisch gut mit Exponentialfunktionen beschrieben werden können. Durch die stark schwankenden Bestrahlungsstärken ist es jedoch sinnvoll, nicht wie bisher üblich **eine** Funktion an die Messwerte anzupassen, sondern einen wahrscheinlichsten Wertebereich (schraffierte Flächen in Abb. 8.24) anzugeben. Die Parameter der diesen Wertebereich einhüllenden Exponentialfunktionen nach Gleichungen (8.3) und (8.4) resultieren allerdings nicht aus einer numerischen Anpassung nach der Methode der kleinsten Quadrate (KQ-Methode), sondern sind durch systematische Werte-

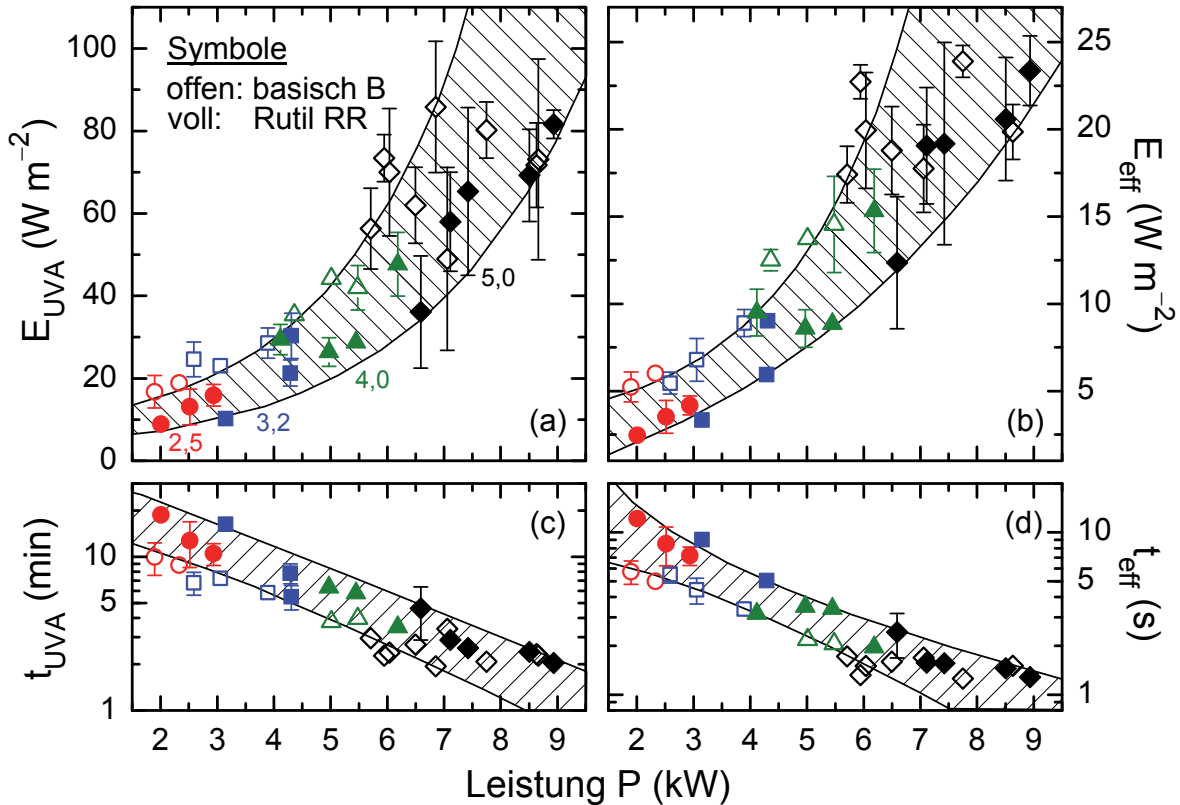


Abb. 8.24 (a) Ungewichtete UVA- und (b) aktinische Bestrahlungsstärken in Abhängigkeit von der Ummantelung der Stabelektrode (basisch und Rutil), von dessen Dicke (2,5 mm, 3,2 mm, 4,0 mm und 5,0 mm) und vom jeweiligen Leistungsbereich. Die schraffierten Flächen zwischen zwei Exponentialfunktionen, Formeln (8.3) und (8.4), geben den wahrscheinlichsten Wertebereich der leistungsabhängigen Bestrahlungsstärken wieder. In (c) und (d) sind entsprechende Expositionsdauern abgebildet. Zusätzlich sind Wertebereiche an die wahrscheinlichsten Expositionsdauern analog zu Formel (6.8) gezeigt.

variation ausgewählt worden. Dementsprechend sind keine Messunsicherheiten angegeben. Aus Gründen der Übersicht ist in den Formeln (8.3) (8.4) auf die Angabe der Einheiten W m^{-2} und kW^{-1} verzichtet worden.

$$[0,63 + 3,3 \exp(0,35 P)] \leq E_{\text{UVA}} \leq [5,0 + 4,6 \exp(0,42 P)] \quad (8.3)$$

$$[-5,7 + 5,4 \exp(0,18 P)] \leq E_{\text{eff}} \leq [2,6 + 1,0 \exp(0,47 P)] \quad (8.4)$$

In Abb. 8.24 (a) und (b) ist die Zunahme von E_{UVA} und E_{eff} mit steigender Ummantelungsdicke und damit auch mit wachsender elektrischer Lichtbogenleistung P zu erkennen. Wie bereits anhand der Schweißspektren impliziert wurde, ist die UV-Strahlungsemission bei basischer Ummantelung trotz großer Fehlerbalken signifikant höher. Speziell bei einer Ummantelungsdicke von 5 mm muss bei RR-Elektroden teilweise mit 2 kW mehr Leistung geschweißt werden, um vergleichbare Bestrahlungsstärken wie bei einer basischen Stabelektrode messen zu können.

Die aus den Bestrahlungsstärken nach Gleichungen (4.6) (b) und (4.11) (b) berechneten Expositionsdauern sind in Abb. 8.24 (c, d) graphisch dargestellt. Auch hier ist

der wahrscheinlichste Wertebereich durch schraffierte Flächen visualisiert. Die minimalen Expositionsdauern betragen $t_{UVA} = 2$ min und $t_{eff} = 1,5$ s.

8.5.3 Blaulichtgefährdung

Ebenso wie im ultravioletten Spektralbereich sind deutliche Schwankungen in der detektierten Emission von sichtbaren Strahlungsanteilen, in Form der blaulichtgewichteten Bestrahlungsstärke E_B , siehe Abb. 8.25 (a), auch hier vorhanden. Der wahrscheinlichste Wertebereich wird allerdings nicht wie bei E_{UVA} und E_{eff} durch zwei Exponentialfunktionen eingehüllt, sondern durch lineare Funktion gemäß

$$[4 + 3 P] \leq E_B \leq [-3 + 8 P] \quad (8.5)$$

in den Einheiten $W m^{-2}$ und $W m^{-2} kW^{-1}$ aufgespannt. Auch hier handelt es sich nicht um Fitparameter sondern um „passend“ gewählte Werte, entsprechend ohne Angabe eines Fehlers.

Die blaulichtgewichteten Bestrahlungsstärken der basisch ummantelten Stabelektroden weisen über einen Großteil des untersuchten Leistungsbereiches höhere E_B -Werte auf verglichen mit denen der RR-Stabelektroden. Die Zunahme der Bestrah-

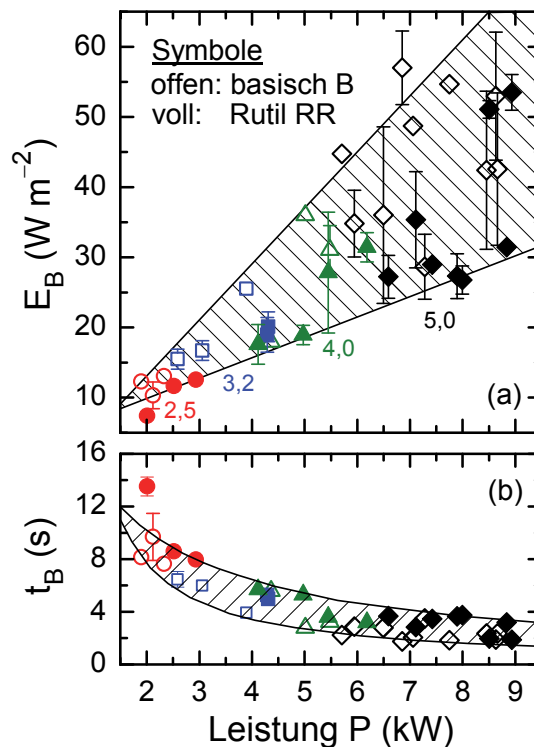


Abb. 8.25 (a) Mit $B(\lambda)$ gewichtete Bestrahlungsstärken E_B für basisch und Rutil ummantelte Stabelektroden als Funktion der Ummantelungsdicke (farbige Ziffern) bzw. der angelegten Leistung. Die schraffierte Fläche visualisiert einen durch zwei Geraden nach Formel (8.5) aufgespannten Bereich in dem die gemessenen Bestrahlungsstärken am wahrscheinlichsten wiederzufinden sind. (b) Aus den Bestrahlungsstärken in (a) nach Formel (4.12) berechnete Expositionsdauern zusammen mit einem Bereich (schraffiert) der wahrscheinlichsten $t_B(P)$.

lungsstärken mit steigender Ummantelungsdicke ist stringent.

In Abb. 8.25 (b) sind die nach Formel (4.12) berechneten t_B als Funktion der elektrischen Lichtbogenleistung dargestellt. Diese blaulichtgewichteten Expositionsdauern befinden sich innerhalb eines Bereiches von etwa 10 s bis 2 s. Eine Überschreitung der Expositionsgrenzwerte nach OStrV, siehe Tab. 4.1, ist somit schnell möglich und geeignete Schutzmaßnahmen müssen am Schweißarbeitsplatz aber auch an benachbarten Arbeitsplätzen vorhanden sein.

8.5.4 Infrarote Strahlenbelastung

Wie bereits bei den ultravioletten und sichtbaren Bestrahlungsstärken ist auch bei den Leistungsabhängigkeiten von E_{IR} und E_H , siehe Abb. 8.26, die Angabe eines wahrscheinlichsten Wertebereiches sinnvoller als der Versuch einzelner mathematischer Beschreibungen. Dabei ist zu beachten, dass durch die Addition sichtbarer Strahlungsanteile zu E_{IR} , resultierend in E_H , lineare Anpassungsfunktionen gewählt werden müssen. Insgesamt lässt sich die infrarote Strahlenbelastung beim Lichtbogenhandschweißen durch folgende Funktionen beschreiben:

$$[20 + 18 \exp(0,28 P)] \leq E_{IR} \leq [25 + 25 \exp(0,29 P)] \quad (8.6)$$

$$[5 + 40 P] \leq E_H \leq [-20 + 65 P] \quad (8.7)$$

Die bei einer RR-Stabelektrode maximal zulässige Expositionsdauer von $t_{IR} = 4,5$ min ähnelt dem Wert beim CMT-Schweißen ist allerdings deutlich kürzer als entsprechende Expositionsdauern z.B. bei MAG- oder MIG-Schweißen. Für t_H ergibt sich eine maximal zulässige Expositionsdauer von 2,5 min, ebenfalls bei einer RR-Stabelektrode gemessen.

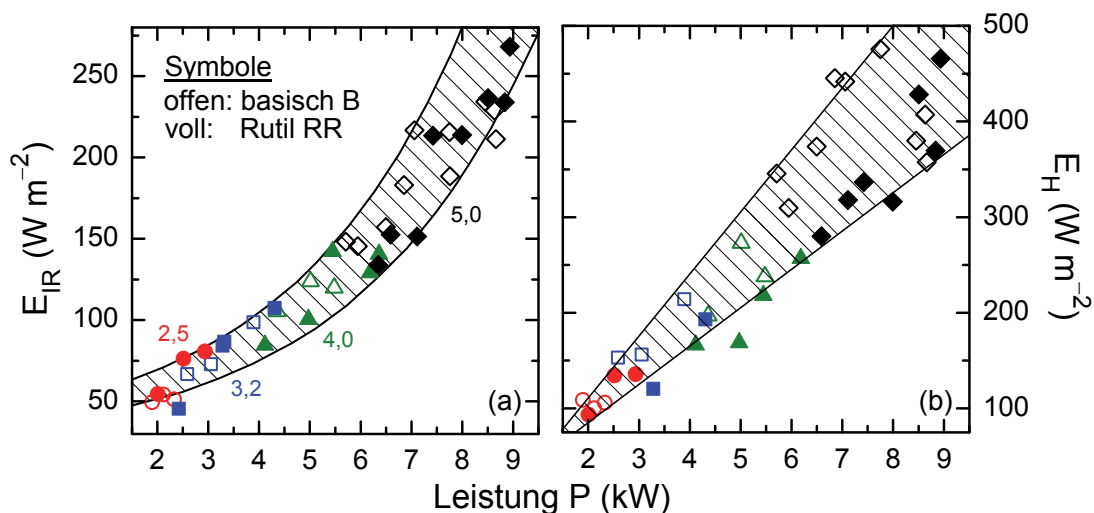


Abb. 8.26 Infrarote Bestrahlungsstärken beim Lichtbogenhandschweißen in Abhängigkeit von der Dicke (farbige Zahlen) und Art (B und RR) der Stabelektrodenummantelung sowie den entsprechenden Leistungen P . Die schraffierte Fläche spiegelt den wahrscheinlichsten Bestrahlungsstärke Wertebereich zwischen (a) zwei Exponentialfunktionen (Formel (8.6)) bzw. (b) zwei Geraden (Gleichung (8.7)) wider.

8.6 Plasma-Pulver-Auftragschweißen

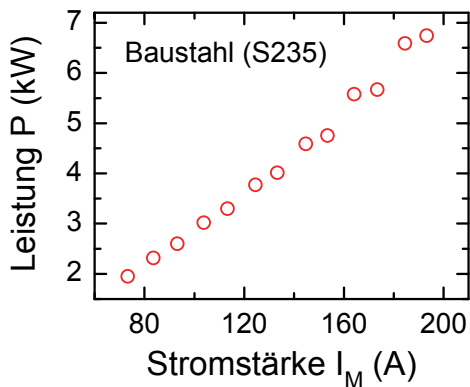


Abb. 8.27 Leistungsbereich beim PTA-Schweißen

Das in der Bevölkerung vielleicht am wenigsten bekannte aber in der Industrie trotzdem häufig verwendete Lichtbogenschweißverfahren ist Plasma-Pulver-Auftragschweißen (engl. Plasma Transferred Arc, kurz PTA), siehe Kapitel 5.4. Damit werden vor allem Auftragschweißungen von verschleiß- und korrosionsbeständigen Schichten durchgeführt.

Bei den Untersuchungen in einer SLV berichteten die Schweißer von einem subjektiv sehr hell wahrgenommenen PTA-Lichtbogen und von Problemen durch reflektierte Strahlung. Diese Aussagen sollen im Folgenden anhand der Strahlungsdaten überprüft werden.

8.6.1 Spektrale Bestrahlungsstärke bei Baustahl

Die stärkste relative Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges beim Tagsehen liegt in etwa zwischen 510 nm und 610 nm (grüne bis gelbe Farbe). Der spektrale Bestrahlungsstärkeverlauf beim PTA-Schweißen von Baustahl, siehe Abb. 8.28, zeigt in diesem Wellenlängenbereich jedoch keine signifikanten Emissionslinien, die den subjektiven Eindruck der Schweißer bestätigen würde. Auch im Vergleich mit anderen Schweißspektren (Kapitel 9.2) ist keine erhöhte Blaulichtgefährdung zu erkennen. Allerdings tauchen ab etwa 650 nm erhöhte rote Strahlungsanteile auf, inwieweit diese jedoch mit der Aussage der Schweißer in Verbindung gebracht werden können, bleibt zu klären.

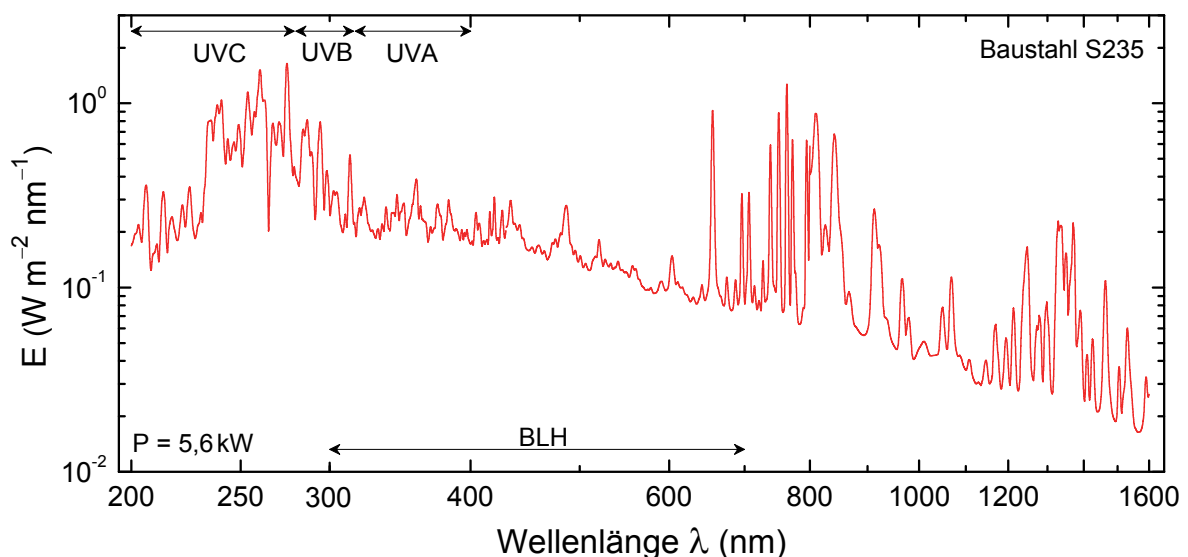


Abb. 8.28 PTA-Schweißspektrum von Baustahl S235 bei einer dem Lichtbogen zugeführten elektrischen Leistung von 5,6 kW. Eingezzeichnete Doppelpfeile kennzeichnen typische spektrale Bereiche.

Im Vergleich zum restlichen Schweißspektrum tritt vor allem im besonders biologisch wirksamen UVC- und UVB-Spektralbereich eine erhöhte Strahlungsemission auf. Eine Analyse zeigt jedoch, dass die UV-Anteilsverhältnisse $\rho_{UVA} = (0,04 \pm 0,02)$, $\rho_{UVB} = (28 \pm 4)$ und $\rho_{UVC} = (72 \pm 4)$ typische Werte für Lichtbogenschweißverfahren aufweisen, siehe Kapitel 9.1. Vermutlich war speziell an diesem (relativ engen) Schweißarbeitsplatz die Reflektivität der umgebenden Wände besonders hoch, was die Beobachtung der Schweißer erklären würde. Auf diese Problematik wird im dritten Teilprojekt dieses Forschungsbündels „Anforderungen an Schutzkomponenten beim Schweißen“, siehe Kapitel 2, näher eingegangen.

8.6.2 Leistungsabhängige UV-Strahlungsemission und Expositionsdauern

Durch Erhöhung der dem Lichtbogen zugeführten elektrischen Leistung zeigt sich im UVA-Spektralbereich eine lineare Zunahme der Bestrahlungsstärken gemäß Formel (6.5), siehe Abb. 8.29 (a), wohingegen die gewichteten E_{eff} -Werte exponentiell ansteigen (vgl. mit Gleichung (8.2)). Die zugehörigen Anpassungsparameter sind in Tab. 8.16 aufgelistet.

Berechnet man aus den UV-Bestrahlungsstärken die maximal zulässigen Expositionsdauern, liegen diese im UVA-Spektralbereich oberhalb von etwa 5 min. Aus den aktinischen E_{eff} -Werten ergibt sich über einen großen Leistungsbereich hingegen eine Überschreitung der Expositionsgrenzwerte im Sekundenbereich.

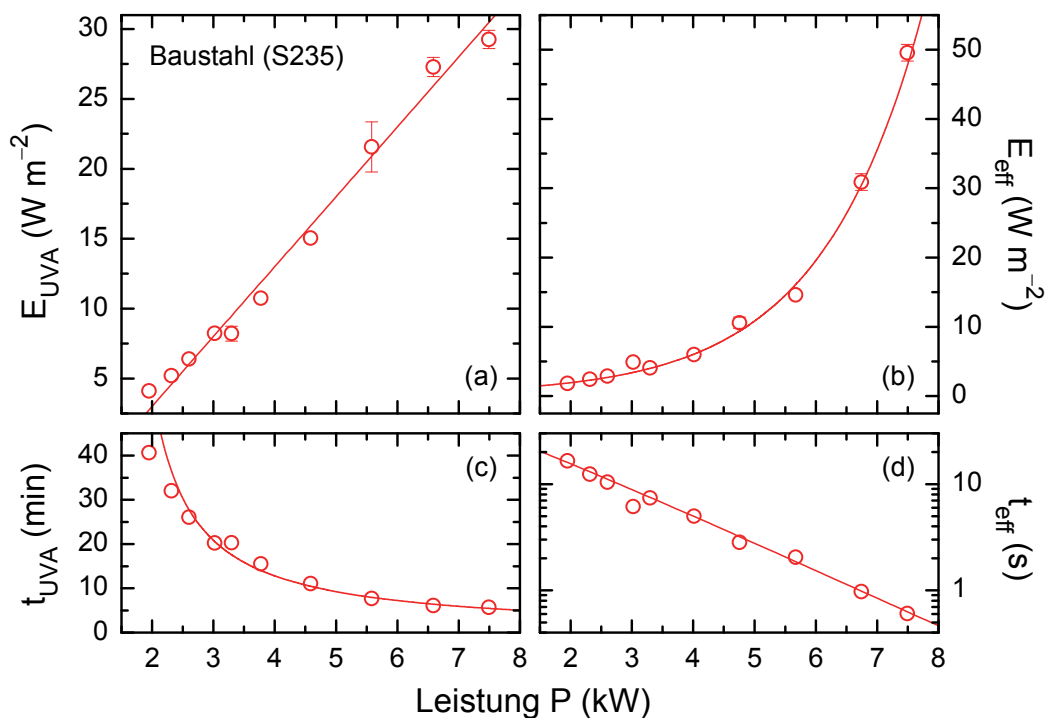


Abb. 8.29 Leistungsabhängige (a) UVA- und (b) aktinische Bestrahlungsstärken beim PTA-Schweißen von Baustahl zusammen mit Anpassungsfunktionen entsprechend der Parameter in Tab. 8.16. In (c) und (d) sind maximal zulässige Expositionsdauern nach Gleichung (4.6) (b) und (4.11) (b) dargestellt.

Tab. 8.16 Anpassungsparameter an die Bestrahlungsstärken aus Abb. 8.29 (a) und (b). E_S^* , E_0 und A sind in W m^{-2} , m in $\text{W m}^{-2} \text{ kW}^{-1}$ und p in kW^{-1} angegeben.

	UVA	UV, gewichtet
S235	$m = (5,0 \pm 0,2)$ $E_0 = (-7 \pm 1)$	$E_S^* = (1,1 \pm 0,6)$ $A = (0,4 \pm 0,1)$ $p = (0,65 \pm 0,04)$

8.6.3 Blaulichtgefährdung und infrarote Strahlenbelastung

Die leistungsabhängige lineare Zunahme der blaulichtgewichteten Bestrahlungsstärken E_B ist zusammen mit entsprechenden Expositionsdauern t_B in Abb. 8.30 dargestellt. Anhand dieser Werte lässt sich, verglichen mit anderen Lichtbogenschweißverfahren, ebenfalls kein besonders hohes Schädigungsrisiko durch sichtbare Strahlungsanteile, wie dies von den Schweißern subjektiv empfunden wurde, erkennen. Der in Kapitel 9.3 durchgeführte Vergleich der integralen Strahlungsemissionen zeigt, dass PTA- neben WIG-Schweißen zu den emissionsärmeren Verfahren zählt. Mit maximal zulässigen Expositionsdauern von nur wenigen Sekunden bedeutet das jedoch nicht, dass die OStrV-Expositionsgrenzwerte nicht trotzdem schnell überschritten werden können.

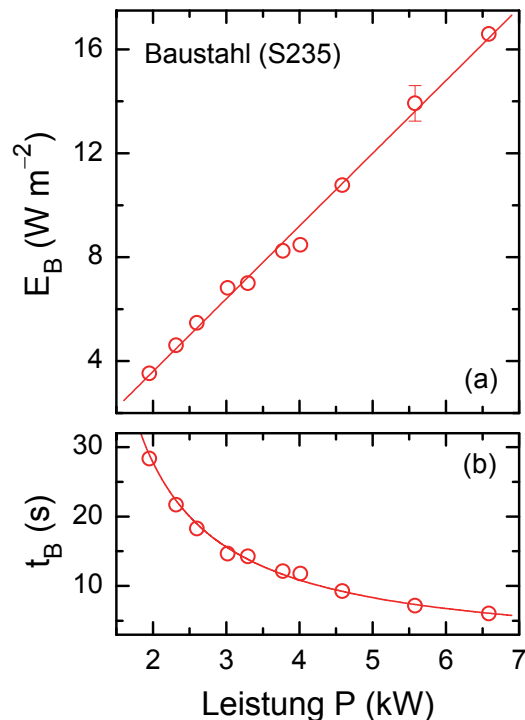


Abb. 8.30 (a) Blaulichtgewichtete leistungsabhängige Bestrahlungsstärken E_B beim PTA-Schweißen von Baustahl. Eine lineare Funktion gemäß den Parametern in Tab. 8.17 wurde an die Daten angepasst. (b) Aus E_B nach Gleichung (4.12) berechnete Expositionsdauern mit einer mathematischen Beschreibung analog zu Formel (6.8).

Tab. 8.17 Anpassungsparameter nach Formel (6.5) an die Bestrahlungsstärken aus Abb. 8.30 (a) und Abb. 8.31. m ist in der Einheit $\text{W m}^{-2} \text{ kW}^{-1}$ und E_0 in W m^{-2} angegeben.

	E_B	E_{IR}	E_H
S235	$m = (2,80 \pm 0,08)$ $E_0 = (-2,0 \pm 0,3)$	$m = (14,2 \pm 0,5)$ $E_0 = (12 \pm 2)$	$m = (25,2 \pm 0,8)$ $E_0 = (14 \pm 4)$

Gefährdungen von Haut und Augen, die durch infrarote Strahlung verursacht werden, bewegen sich beim PTA-Schweißen im Vergleich zu den in diesem Forschungsprojekt betrachteten Schweißverfahren hingegen im mittleren Bereich. Abb. 8.31 stellt die leistungsabhängigen integralen IR-Bestrahlungsstärken E_{IR} und E_H dar. Die maximal zulässigen Expositionsdauern betragen nach Formel (4.7) und (4.8) $t_{IR} = 13,2$ min bzw. $t_H = 7,9$ min. Analog zu den bisherigen Betrachtungen infraroter Strahlungsgefährdungen beim Lichtbogenschweißen ist auch hier der Expositionsgrenzwert für die Haut restriktiver als für die Augen. Eine Überschreitung der maximal zulässigen Expositionsdauer von knapp 8 min ist über einen 8 h Arbeitstag verteilt durchaus möglich.

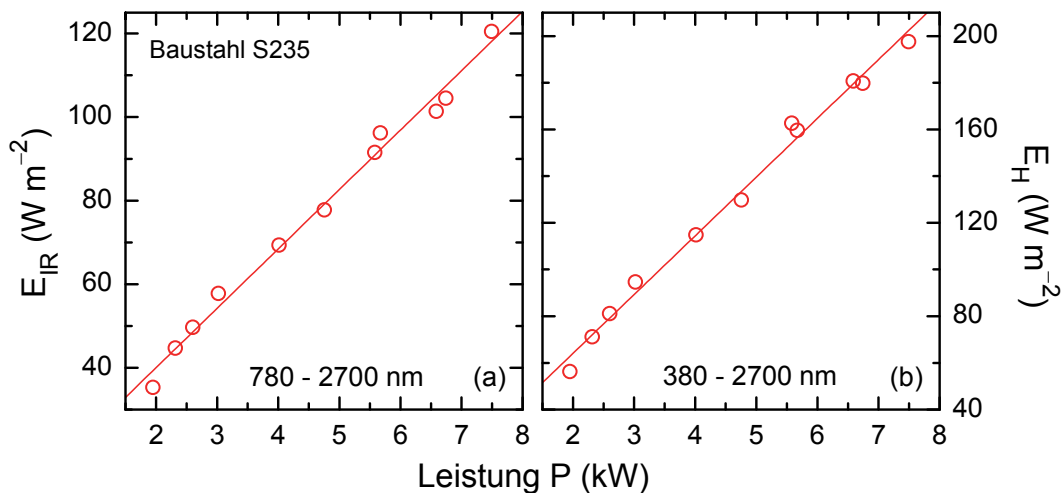


Abb. 8.31 Infrarote Strahlenbelastung beim PTA-Schweißen von Baustahl als Funktion der elektrischen Leistung P . Die beiden Größen E_{IR} und E_H gemäß Formel (4.7) und (4.8) sind jeweils durch eine lineare Funktion mit Parametern aus Tab. 8.17 mathematisch beschrieben.

9 Vergleich der Strahlungsemission beim Lichtbogenschweißen

Viele der in Kapitel 8 diskutierten Integralwerte wie etwa E_{UVA} oder E_{eff} basieren auf der Analyse und Gewichtung der spektralen Bestrahlungsstärken $E(\lambda)$, die bei verschiedenen Schweißverfahren und drei typischen Werkstoffen (S235, CrNi und Al) gemessen wurden. Neben dem geschweißten Material können sich weitere Parameter wie der verwendete Elektrodentyp, die Prozessvariante, das eingesetzte Schutzgas oder die dem Lichtbogen zugeführte elektrische Leistung auf das Emissionsspektrum auswirken. Im Folgenden werden die in diesem Forschungsprojekt verwendeten Schweißverfahren hinsichtlich der genannten Parameter verglichen.

9.1 UV-Anteilsverhältnisse der Lichtbogenschweißverfahren

Anhand der UV-Anteilsverhältnisse ρ aus Kapitel 8 wird ersichtlich, dass sich der spektrale Verlauf der Schweißspektren, also die Wellenlängenabhängigkeit von $E(\lambda)$, mit zunehmender Leistung P nicht verändert. Unabhängig von der zugeführten Leistung werden also keine zusätzlichen Emissionslinien angeregt, vorbehaltlich der zur Verfügung stehenden spektralen Bandbreite der optischen Messgeräte. Eine Übersicht der berechneten ρ findet sich in Tab. 9.1.

Darüber hinaus tritt bei keinem UV-Anteilsverhältnis eine Abhängigkeit von der Prozessvariante (normal und gepulst) oder vom Argon Schutzgas (I1 und I3) auf. Sofern mehrere Werkstoffe mit demselben Verfahren geschweißt wurden, sind auch diesbezüglich keine signifikanten Unterschiede in ρ zu erkennen (abgesehen vom CMT-Schweißen auf S235 und Al-I1). Auch innerhalb der einzelnen Verfahrensklassen (WIG/PTA und MSG) stimmen die UV-Anteilsverhältnisse, soweit Daten vorhanden sind, überein.

Tab. 9.1 Überblick über die UV-Anteilsverhältnisse ρ in % der verschiedenen Schweißverfahren bei normaler Prozessvariante (außer bei MIG mit p-Al-I1) in Abhängigkeit vom Werkstoff. Für Aluminium sind exemplarisch Werte für das Schutzgas I1 aufgelistet.

$\rho_{\text{UV-}}$		WIG	MAG	MIG	CMT	MMA	PTA
S235	A	0,050 ± 0,004	0,03 ± 0,01	–	0,024 ± 0,006	0,08 ± 0,01	0,04 ± 0,02
	B	30 ± 2	21 ± 3	–	18 ± 1	35 ± 1	28 ± 4
	C	68 ± 2	79 ± 5	–	81 ± 3	64 ± 3	72 ± 4
CrNi	A	0,047 ± 0,006	0,03 ± 0,01	–	–	–	–
	B	31 ± 2	28 ± 1	–	–	–	–
	C	70 ± 3	72 ± 1	–	–	–	–
Al-I1	A	0,049 ± 0,002	–	0,010 ± 0,001	0,010 ± 0,002	–	–
	B	32 ± 1	–	42 ± 1	42 ± 1	–	–
	C	68 ± 1	–	58 ± 1	57 ± 2	–	–

Fazit: Im Mittel liegt beim WIG/PTA-Schweißen ein aktinisches UVB/UVC-Verhältnis von 30 zu 70 %, bei MSG-Verfahren von 20 zu 80 % (Al: 40 zu 60 %) vor.

9.2 Verfahrens- und materialabhängige Schweißspektren

Für eine weitere Analyse der spektralen Bestrahlungsstärken bzw. deren Einflussparameter ist es sinnvoll, einen direkten Vergleich der verschiedenen Schweißspektren zu erstellen, siehe Abb. 9.1. Dies gestattet es bei z. B. gleichen Schutzgasen und Elektrodentypen verfahrens- oder materialspezifische Emissionslinien zu identifizieren.

Dafür muss eine Auswahl relevanter Spektren bei ähnlicher elektrischer Leistung P getroffen werden. Anschließend erfolgt eine dimensionslose Normierung von $E(\lambda)$ auf eine (beliebige) Spektrallinie, die in den materialspezifischen Bestrahlungsstärkeverläufen vorhanden ist. Hier ist dies z. B. bei 260,1 nm (S235 und CrNi) sowie bei 279,8 nm (Al) der Fall. Da in Kapitel 8 und 9.1 festgestellt wurde, dass sich sowohl die Prozessvariante (normal und gepulst) als auch das verwendete Argon Schutzgas (I1 und I3) nur unwesentlich auf den spektralen Verlauf der Schweißspektren auswirken (sehr wohl aber auf die Absolutwerte von $E(\lambda)$), sind in Abb. 9.1 normierte spektrale Bestrahlungsstärken nur bei normaler Prozessvariante (außer p-Al-I1 beim MIG-Schweißen) und nur beim Schutzgas I1 gezeigt. Aufgrund der generell unterschiedlichen Technik beim MMA-Schweißen (manuelle Elektrodenführung, Ummantelung und chemische Zusammensetzung der Elektrode, kein extern zugefügtes Schutzgas, etc.) ist dieses Verfahren gesondert zu betrachten, siehe Kapitel 8.5.

In Abb. 9.1 (a) ist gut zu erkennen, dass beim CMT- und MAG-Schweißen von Baustahl keine verfahrensabhängige Änderung der spektralen Bestrahlungsstärke auftritt. Ein Vergleich von MIG- und CMT-Schweißen von Aluminium in (b) zeigt ebenfalls keine verfahrensspezifischen Charakteristika. MSG-Schweißspektren sind demnach verfahrensunabhängig.

Für WIG- und PTA-Schweißen, Verfahren mit nicht-abschmelzender Elektrode, sind Strahlungsanteile oberhalb von etwa 500 nm identisch, siehe Abb. 9.1 (a). Als Ursache dafür kann z. B. die glühende WC20-Wolframelektrode in Betracht gezogen werden. Im UV-Spektralbereich treten hingegen signifikante Unterschiede auf. Auffällig ist außerdem die im Vergleich zum WIG-Spektrum starke PTA-Emissionslinie bei 656 nm.

Interessant ist auch die Emissionsbande zwischen etwa 800 und 900 nm, die bei allen Verfahren, Schutzgasen und Werkstoffen auftritt. Häufig verwendete Elemente wie etwa Eisen oder Kohlenstoff können aufgrund des CMT- und MIG-Schweißens von Al-I1 ausgeschlossen werden. Prinzipiell könnte es sich um Emissionslinien anteilmäßig geringerer Zusatzstoffe wie z. B. Magnesium handeln aber auch die Anregung der Stickstoffmoleküle in der Atemluft ist denkbar.

Eine ausführliche Analyse der Schweißspektren ist sehr umfangreich und an dieser Stelle nicht zielführend. Für eine Zuordnung der Emissionslinien sei der interessierte Leser z. B. auf die National Institute of Standards and Technology Datenbank (NIST) verwiesen.

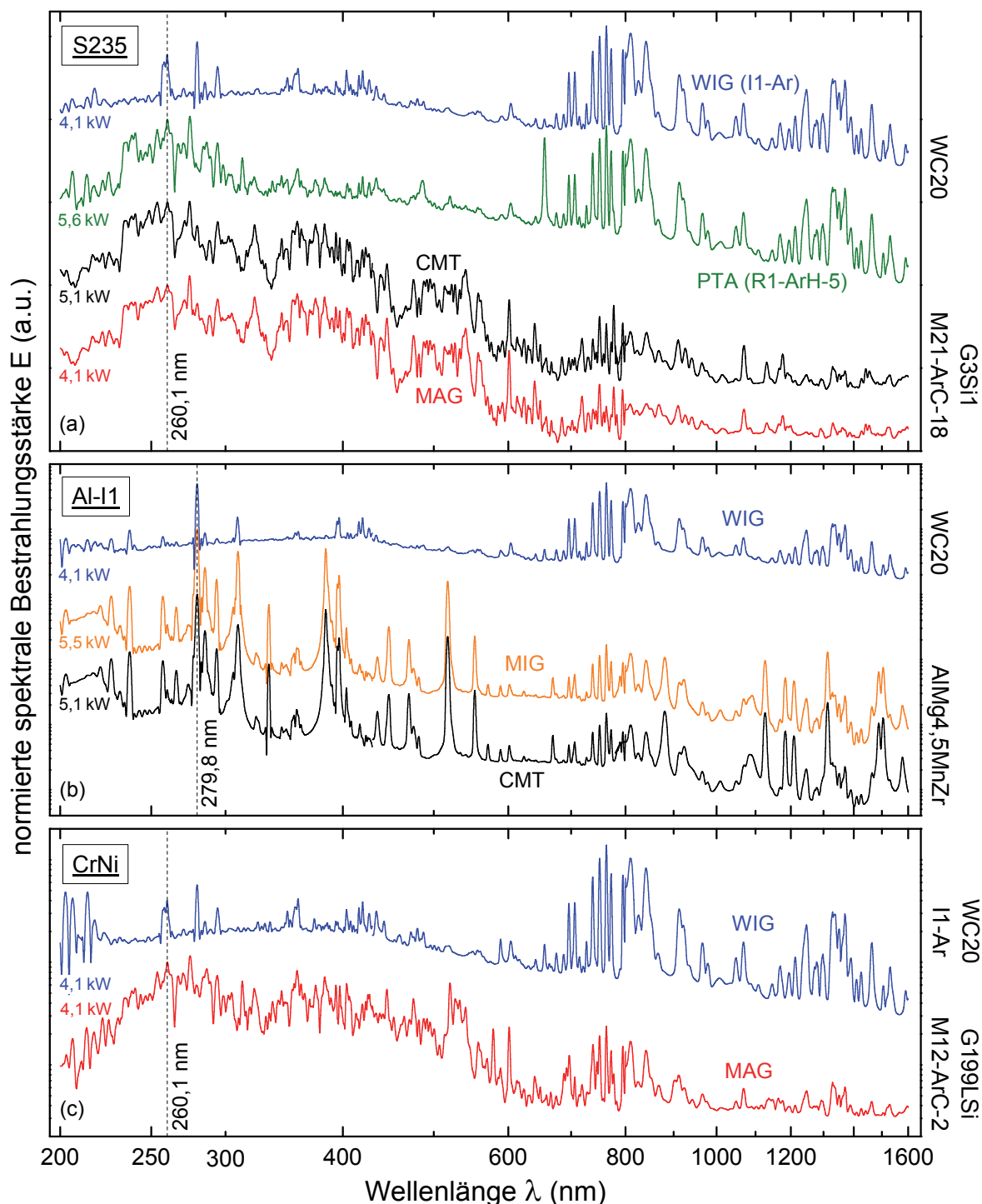


Abb. 9.1 Doppellogarithmische Darstellung des spektralen Bestrahlungsstärkeverlaufs der in diesem Forschungsprojekt untersuchten Lichtbogenschweißverfahren bei (a) Baustahl (S235), (b) Aluminium unter reinem Argon Schutzgas (Al-I1) sowie (c) Edelstahl (CrNi), jeweils normiert auf die Emissionslinien bei 260,1 nm bzw. 279,8 nm (gestrichelte vertikale Linien). Zur besseren Visualisierung sind die Emissionsspektren vertikal um ein Vielfaches von 10 verschoben. Für alle Verfahren ist an der rechten Ordinatenachse der verwendete Elektrodentyp und (sofern nötig) das verwendete Schutzgas angegeben. Die den Lichtbögen zugeführten elektrischen Leistungen sind als farbige Zahlen innerhalb der Diagramme abgebildet.

Fazit

MSG-Schweißspektren sind verfahrensunabhängig und bei Verfahren mit nicht-abschmelzender Elektrode (WIG, PTA) wird im sichtbaren und infraroten Spektralbereich vermutlich vor allem die glühende Wolframelektrode detektiert.

9.3 Leistungsabhängige integrale Strahlungsemission**9.3.1 Ultravioletter Spektralbereich**

Eine Analyse der relativen gewichteten UV-Bestrahlungsstärken mit Hilfe des UV-Anteilsverhältnisses ρ ergibt keine Abhängigkeit von der dem Lichtbogen zugeführten elektrischen Leistung P . Der spektrale Verlauf der Schweißspektren, also die Wellenlängenabhängigkeit von $E(\lambda)$, bleibt bei einer P -Variation ebenfalls unverändert. Absolutwerte der gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken und damit auch die rechnerisch bestimmten Integralwerte wie etwa E_{UVA} oder E_{eff} hängen allerdings in großem Maße von der elektrischen Leistung P ab.

In Abb. 9.2 sind die mathematischen Beschreibungen der leistungsabhängigen UVA- und aktinischen Bestrahlungsstärken aus Kapitel 8 für Baustahl (S235) und Aluminium (Al-I1) vergleichend gegenüber gestellt. Da Edelstahl lediglich mit MAG und WIG geschweißt wurde, die UV-Strahlungsemission beim MAG-Schweißen aber deutlich die bei WIG-Schweißen übersteigt, wird auf einen graphischen Vergleich verzichtet.

S235

WIG-Schweißen ist das UV-emissionsärmste Verfahren (auch bei CrNi und Al), gefolgt vom PTA-Schweißen, dessen aktinische Bestrahlungsstärken für größere Lichtbogenleistungen P allerdings exponentiell ansteigen.

E_{UVA} vom Lichtbogenhandschweißen (MMA) liegt innerhalb seines zugänglichen Leistungsbereiches in etwa zwischen den Werten von MAG- und PTA-Schweißen, E_{eff} ist relativ niedrig und überschneidet sich mit den aktinischen Bestrahlungsstärken vom PTA- und WIG-Schweißen.

CMT-Schweißen weist im untersuchten Leistungsbereich mit Abstand das höchste Gefährdungspotenzial auf. Bei beiden MSG-Schweißverfahren (CMT und MAG) emittiert außerdem die gepulste Prozessvariante mehr UV-Strahlung als der Standardprozess und für Leistungen ab etwa 6 – 7 kW stimmen die Bestrahlungsstärkeanstiege (Steigungen der Geraden) innerhalb der Fehlergrenzen überein.

Al-I1

Wie bereits an den Spektren in Abb. 9.1 (b) zu erkennen war, ist die normierte spektrale Bestrahlungsstärke beim MIG- und CMT-Schweißen von Aluminium (I1) identisch. Aber auch die Absolutwerte und die Leistungsabhängigkeiten von E_{UVA} und E_{eff} , siehe Abb. 9.2 (c) und (d), liegen dicht beieinander obwohl einerseits zwei Geraden und andererseits zwei Exponentialfunktionen zur mathematischen Beschreibung benutzt werden mussten. Im Vergleich zu den MSG-Verfahren ist die UV-Strahlenbelastung beim WIG-Schweißen minimal.

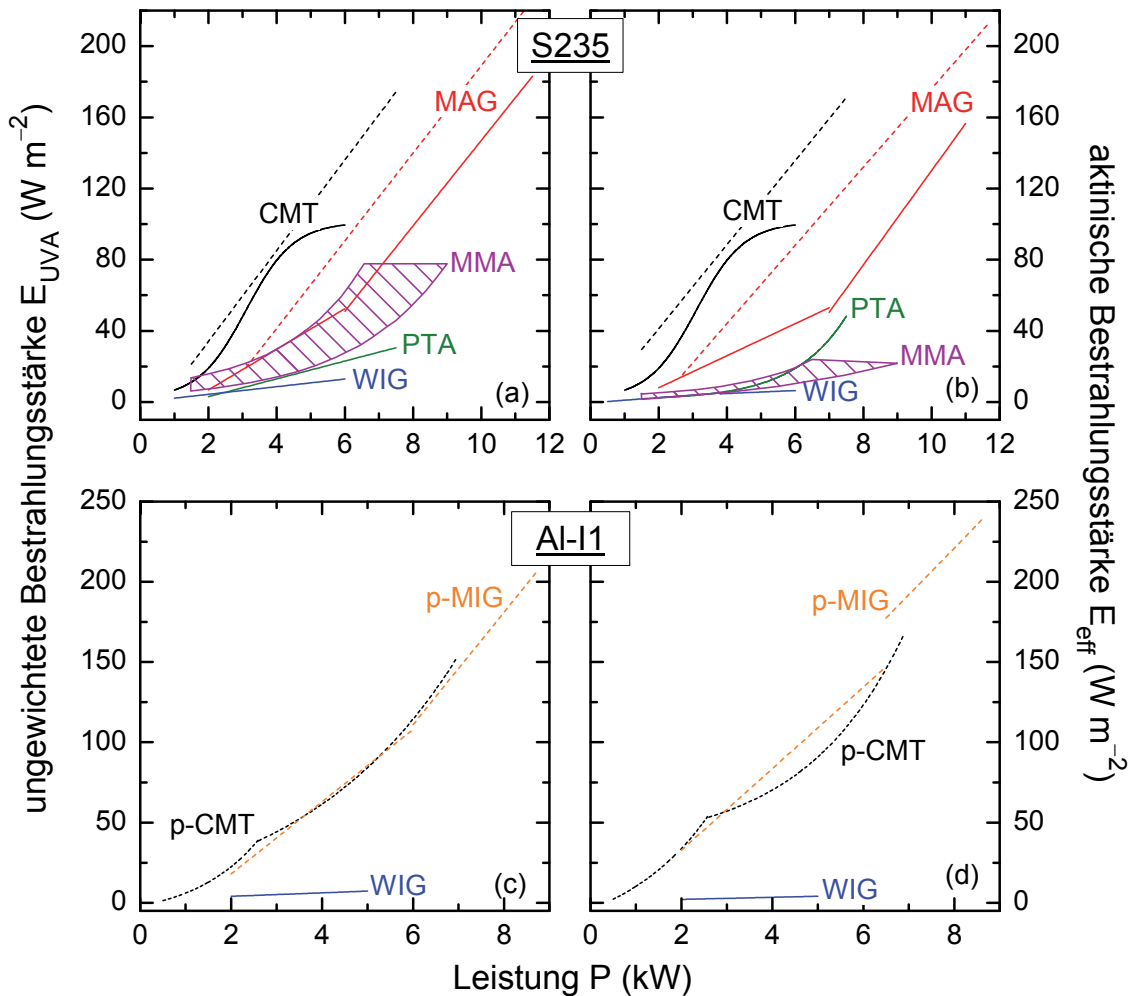


Abb. 9.2 Vergleich der leistungsabhängigen (a, c) ungewichteten und (b, d) aktinischen UV-Bestrahlungsstärken bzw. deren mathematischen Beschreibungen für verschiedene Schweißverfahren bei Baustahl (S235) und Aluminium unter reinem Argon Schutzgas (Al-11). Anpassungsfunktionen gepulster Prozessvarianten sind durch gestrichelte Linien wiedergegeben.

9.3.2 Spektraler Bereich der Blaulichtgefährdung

Für Strahlungsanteile zwischen 300 und 700 nm ist WIG-Schweißen ebenfalls das emissionsärmste Verfahren, siehe Abb. 9.3, auch wenn beim Schweißen von Edelstahl (CrNi) für kleine Leistungen unterhalb von etwa 3 kW im Vergleich zum MAG-Schweißen geringfügig mehr Blaulichtstrahlung auftritt.

Das höchste Gefährdungspotenzial für eine Schädigung durch Blaulichtstrahlung liegt nicht bei hochreflektierenden Materialien wie CrNi oder Al vor, sondern bei Baustahl. Dabei gehören erneut CMT- und MAG-Schweißen zu den emissionsreichsten Verfahren. Allerdings zeigt hier Lichtbogenhandschweißen (MMA) im Gegensatz zum ultravioletten Spektralbereich das höchste Gefährdungspotenzial. Die Blaulichtgefährdung beim p-CMT- und p-MIG-Schweißen von Aluminium ist identisch.

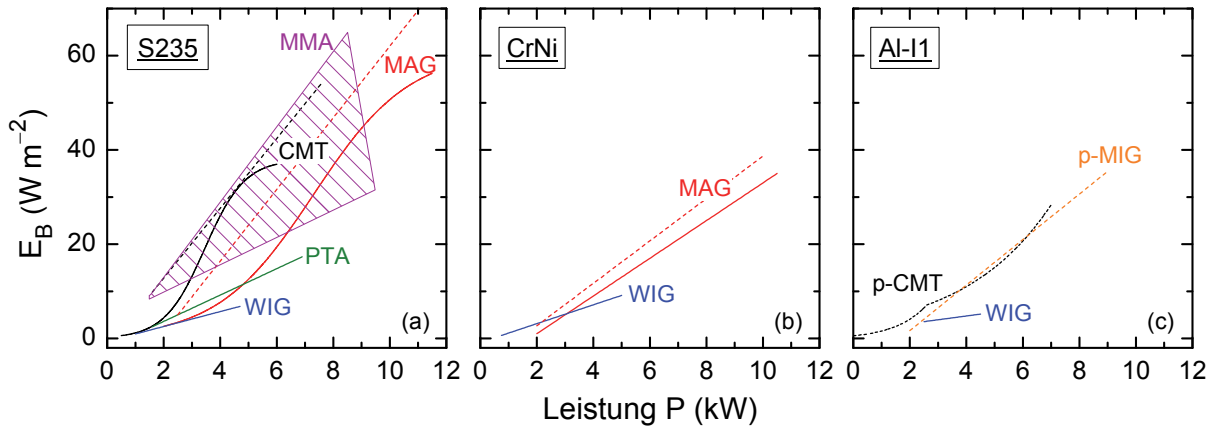


Abb. 9.3 Blaulichtgewichtete Bestrahlungsstärken E_B bzw. deren Anpassungsfunktionen der in diesem Forschungsprojekt verwendeten Schweißverfahren bei (a) Baustahl (S235), (b) Edelstahl (CrNi) und (c) Aluminium unter reinem Argon Schutzgas (Al-I1). Abszissen- und Ordinatenachse sind zum besseren Vergleich jeweils gleich skaliert. Mathematische Beschreibungen der gepulsten MSG-Processvarianten sind gestrichelt dargestellt.

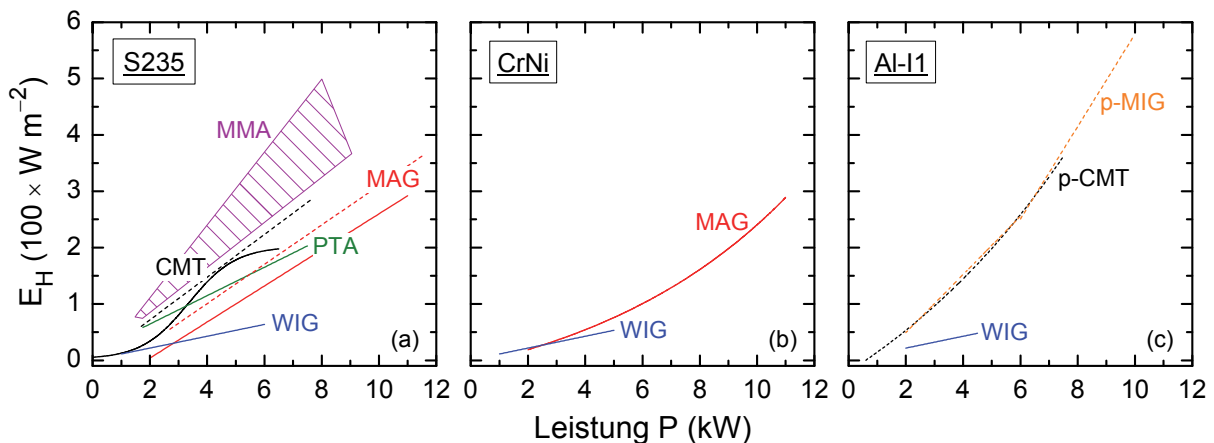


Abb. 9.4 Mathematische Beschreibungen der leistungsabhängigen Bestrahlungsstärken E_H nach Gleichung (4.8) bei verschiedenen Schweißverfahren für (a) Baustahl (S235), (b) Edelstahl (CrNi) und (c) Aluminium unter reinem Argon Schutzgas (Al-I1). Aufgrund fehlender Messwerte ist für WIG-Schweißen lediglich E_{IR} nach Formel (4.7) abgebildet. Gepulste Prozessvarianten sind als gestrichelte Linien dargestellt. Bei p-MAG-Schweißen von CrNi konnte keine Anpassungsfunktion gefunden werden.

9.3.3 Infrarote Strahlungsanteile

Strahlung mit Wellenlängen größer als 780 nm wird zum Infrarotbereich gezählt und kann eine Schädigung sowohl der Haut als auch der Netzhaut verursachen. Ein entsprechender Integralwert für die Haut E_H nach Gleichung (4.8) ist für alle in diesem Forschungsbericht verwendeten Schweißverfahren bei den Materialien Baustahl (S235), Edelstahl (CrNi) und Aluminium (Al-I1) als Funktion der elektrischen Leistung in Abb. 9.4 dargestellt.

Ein ähnliches Bild wie im ultravioletten und sichtbaren Spektralbereich mit hohen Gefährdungspotenzialen der MSG-Schweißverfahren zeichnet sich auch hier ab. Die intensivsten IR-Strahlungsemissionen treten aber neben gepulsten MIG-Schweißen von Aluminium beim MMA-Schweißen von Baustahl auf.

Erneut zeigt sich kein signifikanter Unterschied zwischen p-MIG- und p-CMT-Schweißen und auch die Bestrahlungsstärkezunahmen (Geradensteigungen) der linearen Anpassungsfunktionen beim Schweißen von Baustahl sind bei den MSG-Schweißverfahren quasi identisch.

Interessant erscheint die Tatsache, dass obwohl PTA- und WIG-Schweißen ähnliche Verfahren mit einer nicht-abschmelzenden Wolframelektrode sind, die infrarote Strahlungsemission beim Plasma-Pulver-Auftragsschweißen deutlich höher ist. Ursächlich hierfür könnten z. B. das schmelzende Pulver oder aber auch die verwendeten Schutz- und Fördergase sein.

9.4 Expositionsdauern im Vergleich

Ebenso wie die gemessenen Bestrahlungsstärken, die einen Vergleich der Gefährdungspotenziale durch optische Strahlung beim Schweißen ermöglichen, kann auch mit Hilfe der daraus berechneten Expositionsdauern eine vergleichende Übersicht wiedergegeben werden. Der Begriff der Zeit ist jedoch weniger abstrakt und leichter zu erfassen als die physikalische Größe Bestrahlungsstärke und somit für praktische Zwecke dienlicher.

In Abb. 9.5 sind vier der fünf in diesem Forschungsprojekt verwendeten maximal zulässigen Expositionsdauern bis zum Überschreiten des jeweiligen Expositionsgrenzwertes als Funktion der dem Lichtbogen zugeführten elektrischen Leistung dargestellt. Der Übersicht halber werden nicht die Werte sondern nur deren mathematischen Anpassungsfunktionen gezeigt. Da E_{IR} quasi in E_H enthalten und letzterer Expositionsgrenzwert restriktiver ist, wird an dieser Stelle auf die Angabe von t_{IR} verzichtet.

Eine einfache und vor allem praxisnahe Darstellung ist durch Abb. 9.5 aber nicht gegeben. Hier fehlt eine zusammenfassende Betrachtung aller Expositionsdauern. Ein übersichtlicherer Vergleich wird möglich, wenn man die Gefährdungspotenziale durch optische Strahlung beim Lichtbogenschweißen durch die Angabe einer „mittleren“ Expositionsdauer vergleichend betrachtet. Hierfür wird zunächst eine „mittlere“ Leistung bestimmt (Beispiel: die MAG-Leistung reicht ungefähr von 2 bis 11 kW was zu einer mittleren Leistung von 6,5 kW führt). Die bei dieser Leistung abgelesene Expositionsdauer gibt einen typischen, „mittleren“ Wert wieder und ermöglicht eine vergleichende Betrachtung aller Lichtbogenschweißverfahren.

Die in Abb. 9.6 gezeigte Darstellung basiert dabei auf den mathematischen Beschreibungen, die beim Schweißen von Baustahl verwendet wurden. Metallinertgasschweißen von Aluminium (gepulste Prozessvariante) ist in der Abbildung integriert. Da die Expositionsdauern t_{eff} und t_H restriktiver als t_{UVA} und t_{IR} sind, werden letztere in der vergleichenden Darstellung in Abb. 9.6 nicht aufgeführt.

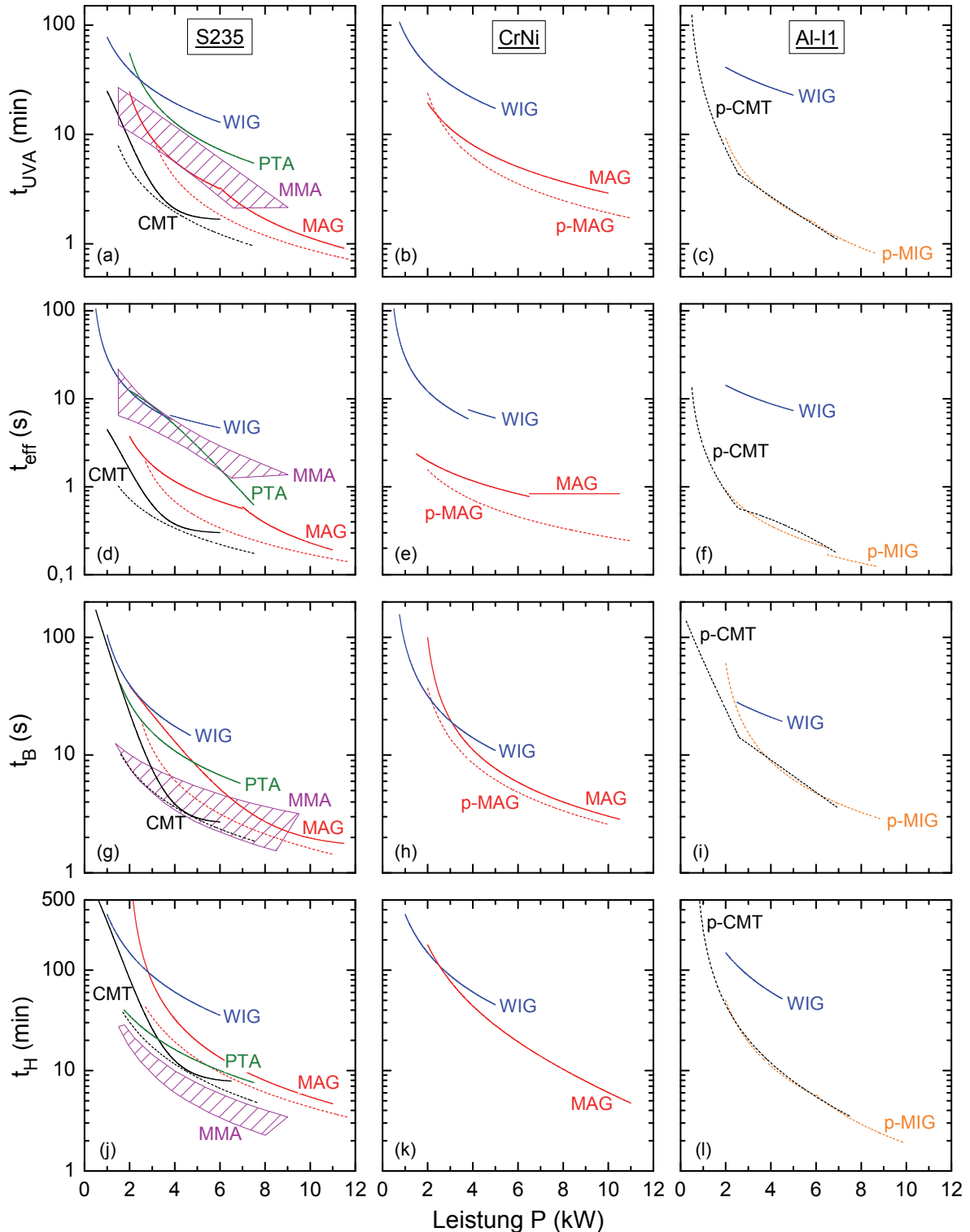


Abb. 9.5 Vergleich der leistungsabhängigen mathematischen Beschreibungen der Expositionsdauern aller in diesem Forschungsprojekt untersuchten Lichtbogenschweißverfahren. Die Anpassungsfunktionen ergeben sich aus Formel (6.8) entsprechend den Expositionsgrenzwerten nach Gleichung (a, b, c) (4.6) (b), (d, e, f) (4.11) (b), (g, h, i) (4.12) und (j, k, l) (4.8). Für MMA ist aufgrund der stark schwankenden Strahlungsemissionen stets ein wahrscheinlicher Emissionsbereich (schraffierte Fläche) angegeben. Gepulste Verfahrensvarianten (p-) sind als gestrichelte Linien dargestellt.

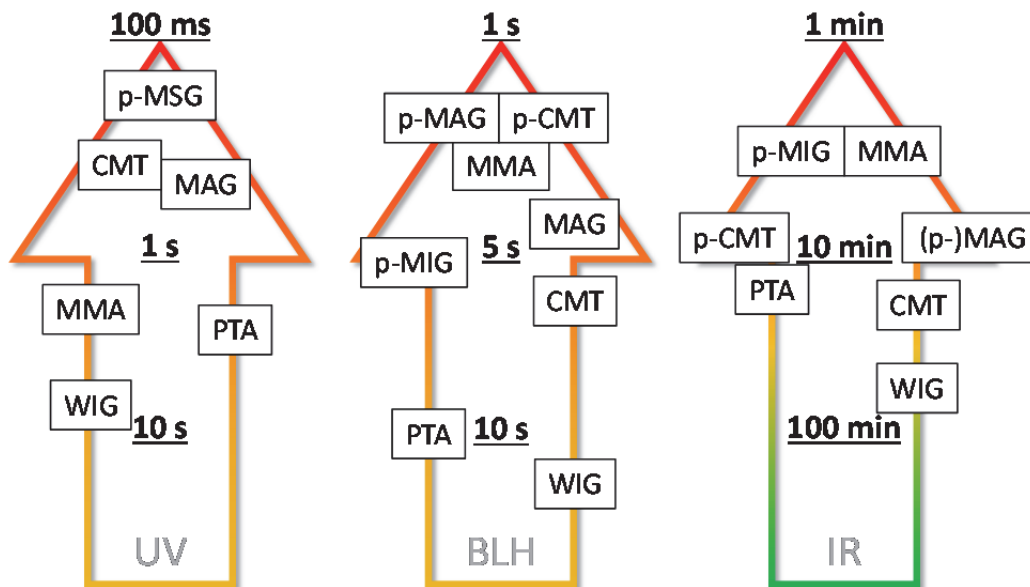


Abb. 9.6 Vergleichende Darstellung der UV-, BLH- und IR-Gefährdungspotenziale basierend auf den mittleren Expositionsdauern t_{eff} , t_B und t_H bei diversen Lichtbogenschweißverfahren. Im linken und rechten Pfeil wurde eine logarithmische Zeitskala verwendet, im mittleren Pfeil ist die Zeitskala linear. Der Farbverlauf von orange bzw. grün nach rot steht symbolisch für eine Gefährdungszunahme und enthält im eigentlichen Sinne keinen „sicheren“ Zeitbereich.

9.5 Einfluss der Lichtbogenart

Obwohl ein möglicher Einfluss der Lichtbogenart auf die optische Strahlungsemission beim Schweißen in diesem Forschungsprojekt nicht explizit untersucht wurde, ergeben sich aus den bisherigen Daten in Kapitel 8 doch einige interessante Aspekte.

Im Vergleich von normaler (Kurz-, Übergangs- und Sprühlichtbogen) mit gepulster Prozessvariante (Impulslichtbogen) zeigt sich bei allen Metallschutzgasschweißverfahren, dass der Impulslichtbogen stets deutlich mehr optische Strahlung emittiert.

Weiterhin taucht z. B. beim MAG-Schweißen von Bau- und Edelstahl mit normaler Prozessvariante eine Änderung der leistungsabhängigen Bestrahlungsstärkezunahme um etwa $P = 6 \text{ kW}$ auf, siehe Abb. 8.9, die bei Verwendung des Impulslichtbogens nicht vorhanden ist. Durch einen Abgleich mit Tab. A. 3 und Tab. A. 4 ergibt sich entsprechend dieser „Knick“-Leistung ein Strom-Spannungs-Wertepaar von etwa $250 \text{ A} / 25 \text{ V}$. Mit Abb. 4.7 findet man, dass dieses Wertepaar dem Übergangslichtbogen zuzuordnen ist. Die Verhaltensänderung um 6 kW spiegelt somit den Übergang vom Kurz- zum Sprühlichtbogen wieder, einhergehend mit einer stärkeren Zunahme der optischen Strahlungsemission beim Sprühlichtbogen.

Diese Änderung der Bestrahlungsstärkezunahme ist allerdings nur im ultravioletten Spektralbereich vorhanden, für sichtbare und infrarote Strahlung zeigt sich kein Knick.

Ein weiterer Unterschied zwischen beiden Prozessvarianten und damit zwischen Kurz-, Übergangs- und Sprühlichtbogen und Impulslichtbogen ergibt sich bei Betrachtung der mathematischen Emissionsmodelle. So ist beim MAG-Schweißen von Baustahl mit normaler Prozessvariante bei der blaulichtgewichteten Bestrahlungsstärke ein sigmoidaler Verlauf zu erkennen, wohingegen beim Schweißen mit Impulslichtbogen eine lineare Funktion an die leistungsabhängigen Daten angepasst werden kann, siehe Abb. 8.10.

Deutlich ausgeprägter ist dieser Unterschied beim CMT-Schweißen von Baustahl und zwar in allen Spektralbereichen, siehe Abb. 8.19, Abb. 8.20 und Abb. 8.21.

Wie bereits zu Beginn des Kapitels erwähnt, war die Untersuchung der Lichtbogenart kein zentrales Forschungsvorhaben. Aus den bisherigen Daten können deswegen auch keine möglichen Unterschiede zwischen WIG-Gleichstrom- und WIG-Wechselstromlichtbogen abgeleitet werden. Allerdings zeigt sich hier ein Einfluss des verwendeten Schutzgases.

9.6 Schutzgaseffekte

Beim WIG-Schweißen von Aluminium wurden als Schutzgase reines Argon (Kurzbezeichnung: I1) und ein Argon-Helium-Gemisch (I3) verwendet, siehe Kapitel 8.1. Dabei absorbierte das I3-Schutzgas in allen untersuchten Spektralbereichen mehr optische Strahlung verglichen mit dem I1-Schutzgas.

Die gleiche Beobachtung ist auch beim MIG-Schweißen von Aluminium zu finden, siehe Abb. 8.14. Hier zeigt sich zusätzlich noch eine Steigungsänderung in der Bestrahlungsstärkezunahme bei Verwendung des Schutzgases I1.

10 Validierung der Emissionsmodelle

Ein wesentlicher Bestandteil dieses Forschungsprojektes ist neben der Generierung einer aktualisierten Datenbasis zur optischen Strahlungsemission beim Schweißen auch die Unterstützung professioneller Schweißer bzw. mit Schweißen Beschäftigter oder Sicherheitsbeauftragter bei der Gewährleistung eines sicheren Schweißarbeitsplatzes. Dazu angedacht sind die in Kapitel 8 eingeführten mathematischen Emissionsmodelle, die bei Kenntnis der Schweißstromstärke I (und ggf. der Schweißspannung) sowie des Werkstoffes verfahrensspezifisch eine Abschätzung der optischen Strahlungsemission erlauben. Bezüglich der Lichtbogenleistung ($P \propto I^2$) fanden sich vorwiegend lineare aber auch sigmoidale oder (doppelt-) exponentielle Emissionsmodelle:

$$\text{linear} \quad E = E_0 + mP \quad (10.1)$$

$$\text{sigmoidal} \quad E = E_S \left[1 - \left(1 + \exp\left(\frac{P - P_0^*}{\kappa}\right) \right)^{-1} \right] \quad (10.2)$$

$$\text{exponentiell} \quad E = E_S^* + A \exp(pP) \quad (10.3)$$

Zur Parameterdefinition und für weitere Informationen vgl. mit den Formeln (6.5), (8.1) und (8.2).

Die Ableitung dieser Modelle basiert jedoch auf quasi laborähnlichen Daten, die in einer Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt (SLV) bei automatisierten Schweißungen erfasst wurden. Bekanntermaßen geben aber Laborversuche die Realität nicht immer zu 100 % wider, so dass die mathematischen Emissionsmodelle hinsichtlich ihrer Praxistauglichkeit zu überprüfen sind. Dabei steht allerdings **nicht** die physikalische Gültigkeit der Modelle zur Validierung, sondern deren Anwendbarkeit bei handgeführten Schweißverfahren.

Wie bereits in Kapitel 8.5 aufgezeigt, unterliegt die Emission optischer Strahlung bei solchen handgeführten Verfahren starken Schwankungen. Darüber hinaus sind insbesondere der Abstand r zur Strahlungsquelle (Kapitel 7.4) sowie der Betrachtungswinkel/Polarwinkel θ (7.5) von fundamentaler Bedeutung für die Höhe der Exposition. Da nicht immer bei den für dieses Forschungsprojekt verwendeten Parametern $r = 50$ cm und $\theta = 45^\circ$ die Strahlungsbelastung detektiert werden kann, sind entsprechende Korrekturen notwendig.

Aus Gleichung (7.2) folgt für die Umrechnung zweier in verschiedenen Entfernungen gemessener Bestrahlungsstärken E und E' bei sonst gleichen Parametern A und E_∞

$$E = E' \cdot \left(\frac{r'}{r}\right)^2 \quad (10.4)$$

Eine Korrektur hinsichtlich des Betrachtungswinkels erfolgt durch Vergleich mit Abb. 7.6. Bei den im Folgenden gezeigten Strahlungsdaten wurden jeweils beide Korrekturen (sofern erforderlich) angewandt.

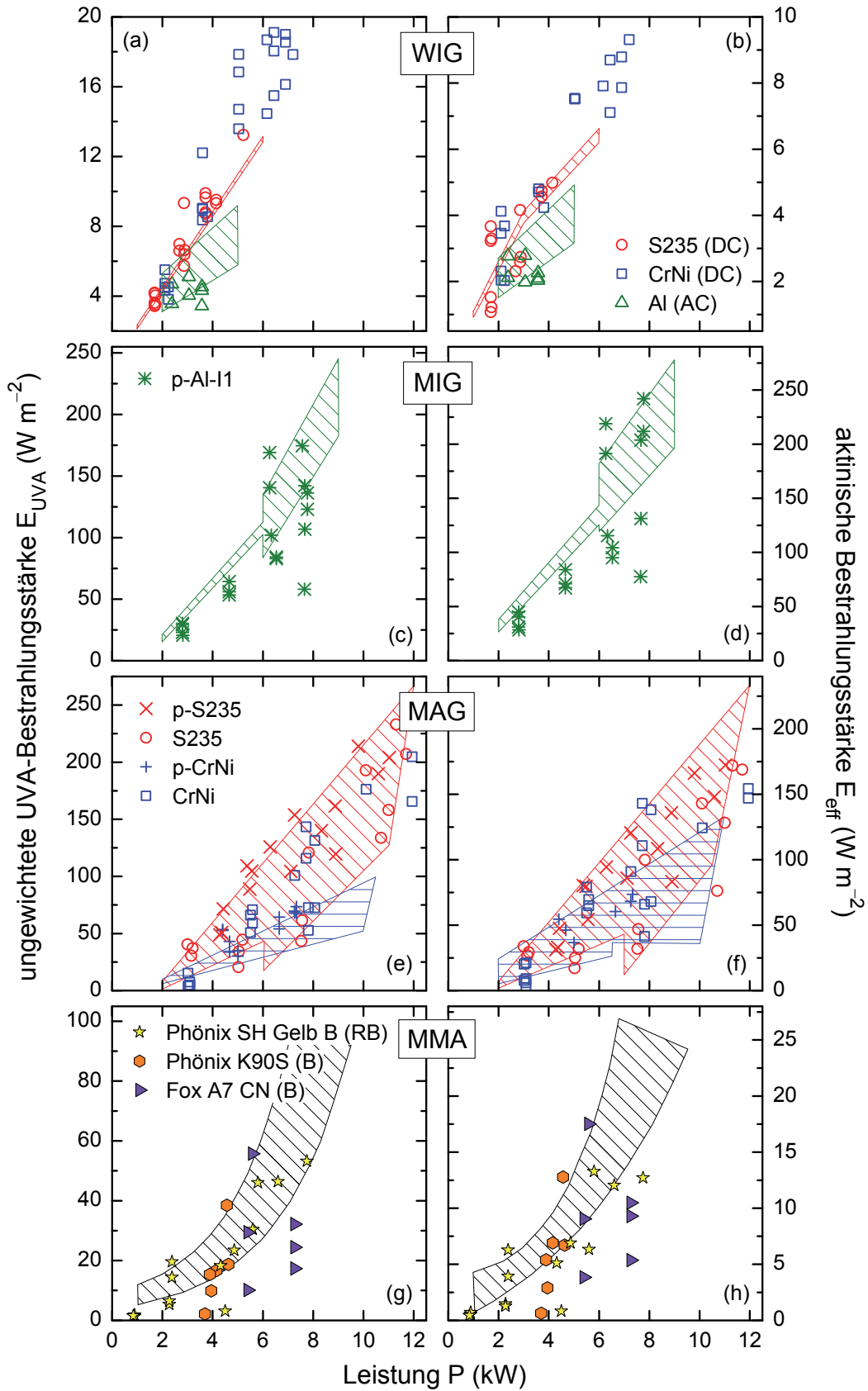


Abb. 10.1 Überprüfung der Praxistauglichkeit einiger der in diesem Forschungsprojekt eingeführten Emissionsmodelle (schraffierte Flächen) im ultravioletten Spektralbereich durch Messergebnisse bei handgeführten Schweißverfahren (Symbole). Für Details, siehe Fließtext.

In Abb. 10.1 und Abb. 10.2 sind Ergebnisse der Modellvalidierung für den ultravioletten bzw. den sichtbaren und infraroten Spektralbereich gezeigt. Hierbei entsprechen die schraffierten Flächen den jeweiligen mathematischen Anpassungsfunktionen inklusive der Fehler der Fitparameter. Da beim MAG-Schweißen die gemessenen Bestrahlungsstärken dicht beieinander liegen, wurde aus Gründen der Übersicht auf eine Unterscheidung der Prozessvariante (normal oder gepulst) verzichtet und bei E_H lediglich Maximal- und Minimalwertfunktionen in die Abbildung eingetragen.

WIG, (a) und (b)

Die gemessenen UV- und VIS-Strahlungsdaten liegen sehr gut in oder nahe den schraffierten Flächen und bestätigen die Gültigkeit der Emissionsmodelle. Für größere Lichtbogenleistungen ab ca. 6 kW, die nicht bei der Modellbildung berücksichtigt wurden, deutet sich jedoch für Edelstahl eine gesteigerte Bestrahlungsstärkezunahme im UV-Bereich an, wohingegen für E_B das Emissionsmodell auch hier Gültigkeit besitzt.

Aufgrund fehlerhafter Messtechnik konnte bei der Modellbildung für Infrarotstrahlung beim WIG-Schweißen lediglich die reduzierte Bestrahlungsstärke E_{IR-A} bestimmt werden. Erwartungsgemäß höher liegen nun auch die bei manuellem WIG-Schweißen gemessenen E_H -Werte. Eine lineare Anpassung an die Bestrahlungsstärkewerte bei S235 und CrNi gemäß $E_H = 25 \text{ Wm}^{-2}\text{kW}^{-1} \cdot P - 10 \text{ Wm}^{-2}$ (gestrichelte Linie) ersetzt das bisherige Emissionsmodell.

MIG, (c) und (d)

Im Gegensatz zum WIG-Schweißen weisen die UV-Bestrahlungsstärken beim gepulsten MIG-Schweißen von Aluminium eine relativ hohe Streuung auf. Ein Großteil der korrigierten Strahlungsdaten befindet sich bei kleineren Werten als durch das Emissionsmodell prognostiziert. Die möglichen Ursachen können hierbei vielfältig sein (unzureichende Korrekturen, stark schwankende Strahlungsdaten, partiell abgedeckter Lichtbogen, etc.). Demnach ist das UV-Emissionsmodell als „Worst-Case“-Funktion zu verwenden.

Strahlungsdaten für den sichtbaren Spektralbereich liegen leider nur begrenzt vor (die betrieblichen Messungen konnten nur mit einer limitierten Anzahl an Messequipment durchgeführt werden). Für Infrarotstrahlung zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit dem Emissionsmodell.

MAG, (e) und (f)

Im UV-Bereich sind die gemessenen E_{UVA} - und E_{eff} -Werte innerhalb der angegebenen Fehlerbereiche der Emissionsmodelle zu finden. Allerdings sind die Bestrahlungsstärken bei normaler Prozessvariante auf Edelstahl deutlich größer als durch das entsprechende Emissionsmodell erwartet.

Das gleiche Verhalten liegt auch bei größeren Wellenlängen (sichtbarer und infraroter Spektralbereich) vor. Innerhalb der Minimal- und Maximalwertfunktionen zeigt sich aber eine gute Übereinstimmung.

MMA, (g) und (h)

Ebenfalls überprüft wurden die Emissionsmodelle beim Lichtbogenhandschweißen anhand zweier basischer und einer Rutil-basischen Stabelektrode, die nicht bei der Modellbildung verwendet wurden. Im Wesentlichen stellt auch hier das Emissionsmodell eine „Worst-Case“-Funktion dar, wohingegen im infraroten Spektralbereich die Übereinstimmung von prognostizierten und gemessenen E_H -Werten sehr gut ist.

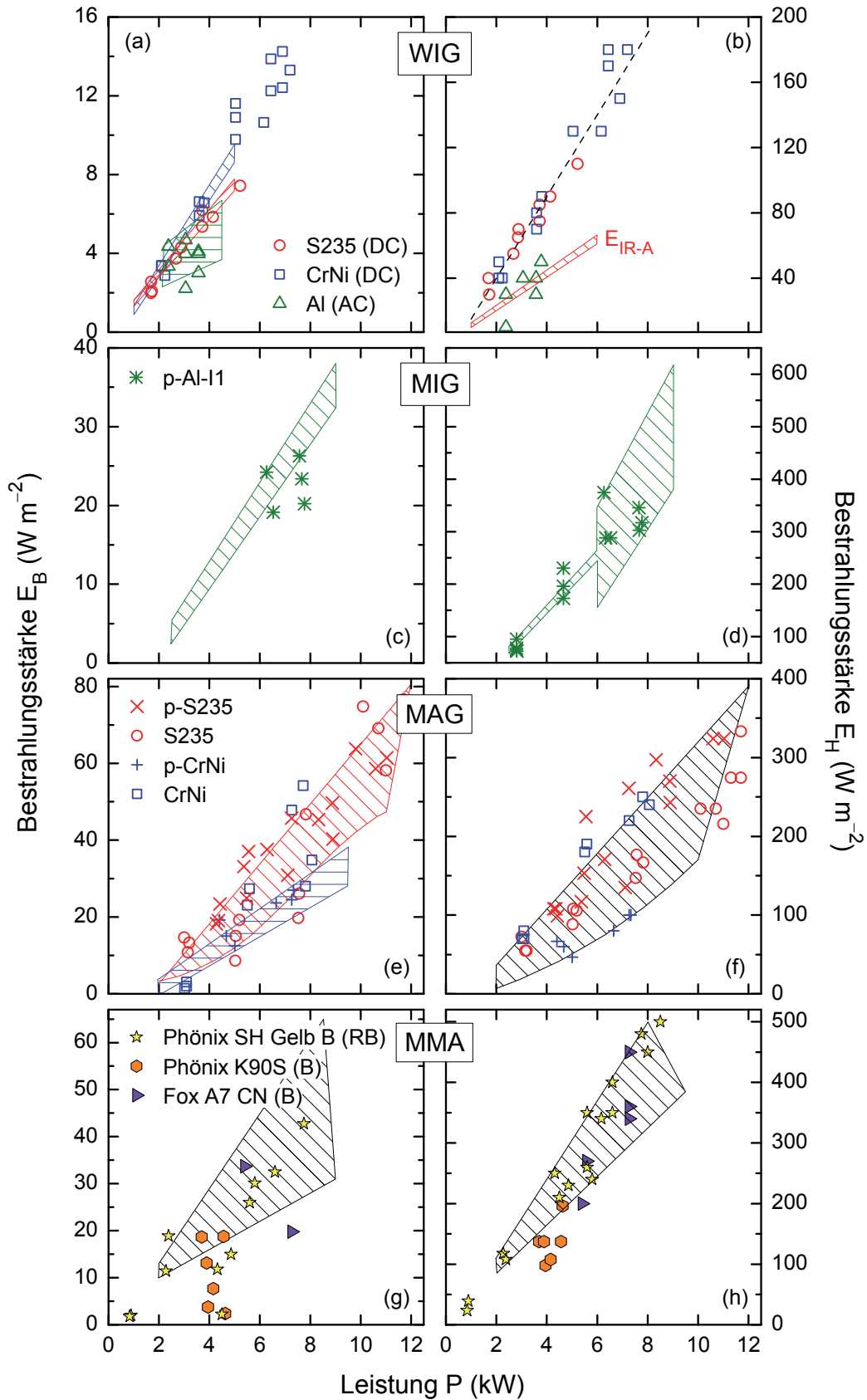


Abb. 10.2 Überprüfung der Praxistauglichkeit einiger der in diesem Forschungsprojekt eingeführten Emissionsmodelle (schraffierte Flächen) im sichtbaren und infraroten Spektralbereich durch Messergebnisse bei handgeführten Schweißverfahren (Symbole). Für Details, siehe Fließtext.

Unter Vorbehalt weiterer experimenteller Untersuchungen lässt sich demnach vermuten, dass das vorliegende Emissionsmodell für Lichtbogenhandschweißen auch auf andere, in diesem Forschungsbericht nicht untersuchte Stabelektroden angewendet werden kann.

Fazit

Insgesamt ist die Übereinstimmung der bei manuellen Schweißverfahren bestimmten Strahlungsdaten mit den aus automatisierten Schweißungen abgeleiteten Emissionsmodellen zufriedenstellend. Speziell beim handgeführten MIG- und MMA-Schweißen ist die Streuung der optischen Bestrahlungsstärken allerdings so groß, dass die Emissionsmodelle als „Worst-Case“-Funktion verwendet werden sollten.

11 Zeitabhängigkeit der UV-Strahlungsbelastung

Bei Beobachtung des Lichtbogens z. B. durch einen Schweißvorhang fällt sofort das starke „Flackern“ der emittierten sichtbaren Strahlung auf. Die zeitlichen Fluktuationen dieser sog. intermittierenden (lateinisch: *intermittere* = unterbrechen, aussetzen) optischen Strahlung variieren dabei je nach Schweißverfahren. Bei den bisherigen Messungen dieses Forschungsberichtes wurden die Bestrahlungsstärkeschwankungen durch Mittelung mehrerer Spektren über einige Sekunden ausgeglichen. In den folgenden Kapiteln sollen nun diese zeitlichen Fluktuationen explizit untersucht werden.

11.1 Zünden des Lichtbogens

Das Zünden des Lichtbogens beim Schweißen ist ein komplexer physikalischer Prozess, bei dem durch eine Potenzialdifferenz zwischen Werkstück und Elektrode sowie einem starkem Stromfluss das Schutzgas ionisiert wird, siehe Kapitel 4.3. Dieser Vorgang ist hochgradig nichtlinear. Untersuchungen von Sutter und Schirmacher zeigten, dass eine Verbindung zwischen der Zeitabhängigkeit der Leuchtdichte und der Spannungoszillation besteht (SUTTER1995a; SUTTER1995b). Eine spektrale Auflösung des Zündvorgangs war zu dieser Zeit allerdings noch nicht möglich.

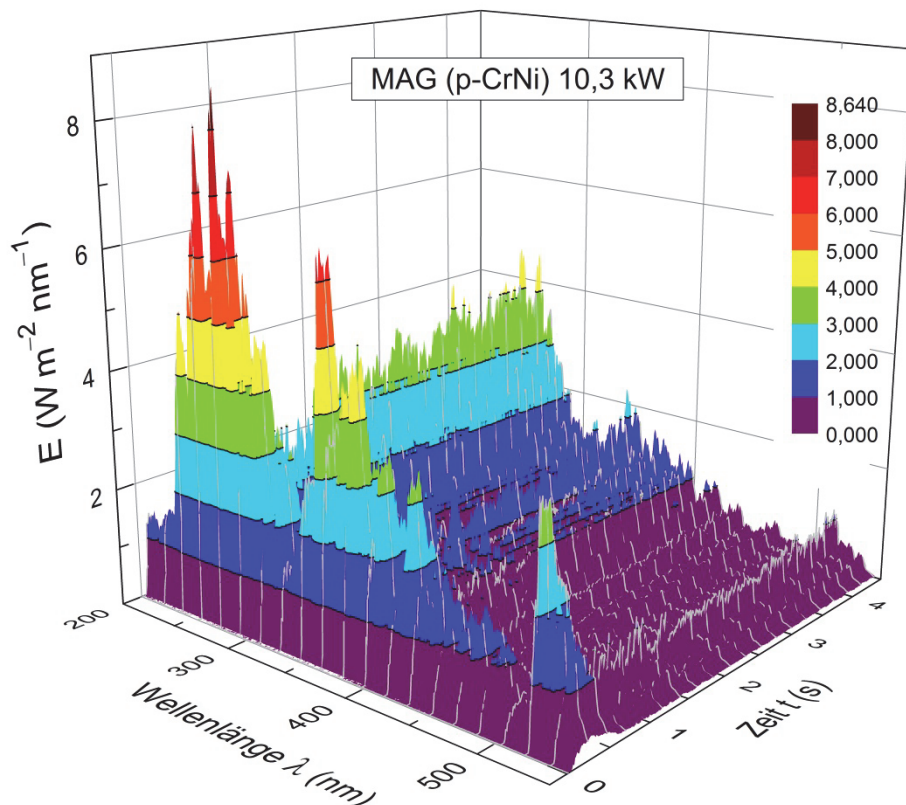


Abb. 11.1 Zeitabhängigkeit der spektralen Bestrahlungsstärke beim Zünden eines MAG-Impulslichtbogens mit $P = 10,3 \text{ kW}$ auf Edelstahl (CrNi). Je nach Größe der Bestrahlungsstärke wurde eine Farbcodierung (rechte Farbskala) gewählt. Eine starke Überhöhung im UV-Spektralbereich ist innerhalb der ersten 500 ms zu erkennen.

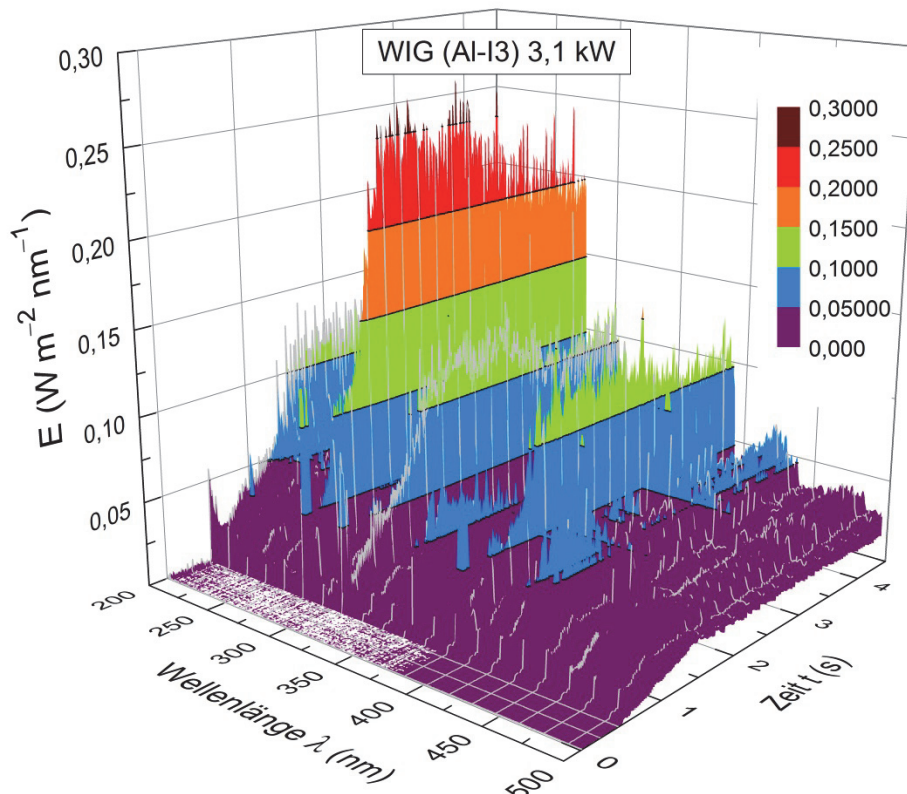


Abb. 11.2 Spektrale Bestrahlungsstärke als Funktion der Zeit t während des Zündvorgangs eines WIG-Wechselstromlichtbogens auf Aluminium unter dem Schutzgas I3. In den ersten 500 ms ist noch kein Lichtbogen vorhanden.

In Abb. 11.1 ist exemplarisch das Zündverhalten eines Impulslichtbogens beim MAG-Schweißen von Edelstahl (CrNi) dargestellt. Dafür wurde die spektrale Bestrahlungsstärke mit einer Zeitauflösung von 10 ms detektiert. Es erfolgte **keine** Mittelung mehrerer Spektren.

Innerhalb der ersten etwa 500 ms tritt eine starke Überhöhung der spektralen Bestrahlungsstärke vor allem im UV-Bereich auf. Nach diesem anfänglichen Spitzenwert von ungefähr $8,6 \text{ W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$ sinkt die Bestrahlungsstärke zunächst wieder und erreicht dann einen Durchschnittswert von etwa $4 \text{ W m}^{-2} \text{nm}^{-1}$. Speziell für kurze Schweißvorgänge ergibt sich daraus ein mehr als doppelt so hohes Gefährdungspotenzial verglichen mit längeren Schweißungen. Dementsprechend reduziert sich die maximal zulässige Expositionsdauer auf die Hälfte.

Aber auch im sichtbaren Spektralbereich wird beim Zündvorgang optische Strahlung in erhöhtem Maße emittiert, die nach der Stabilisierung des Lichtbogens nur noch geringfügig vorhanden ist. Im Falle des Impulslichtbogens beim MAG-Schweißen von CrNi ist diese viermal so intensiv und reduziert somit die maximal zulässige Expositionsdauer für Blaulichtgefährdung auf ein Viertel.

Die für den MAG-Impulslichtbogen beschriebene Bestrahlungsstärkeüberhöhung kann jedoch nicht pauschal auf andere Schweißverfahren übertragen werden. So zeigt sich beim Zündvorgang z. B. eines WIG-Wechselstromlichtbogens, siehe Abb. 11.2, der erwartete anfängliche Bestrahlungsstärkeanstieg, der nach etwa 1,5 s sein Maximum erreicht (in den ersten 500 ms wurde der Lichtbogen noch nicht gezündet). Dies spricht für weitergehende Untersuchungen des Zündverhaltens von Schweißlichtbögen.

11.2 Zeitliche Fluktuationen der emittierten UV-Strahlung

In Abb. 11.2 ist weiterhin gut zu erkennen, dass trotz der Stabilisation des Lichtbogens nach (in diesem Fall) etwa ein bis zwei Sekunden kein konstanter Bestrahlungsstärkewert vorhanden ist. Zur Untersuchung dieser Bestrahlungsstärkefluktuationen während des eigentlichen Schweißvorganges wurde daher über einen Zeitraum von 10 s mit einer Integrationszeit von 100 ms die vom Lichtbogen emittierte optische Strahlung aufgezeichnet, siehe Abb. 11.3 (exemplarisch für gepulstes MAG-Schweißen von S235). Zum besseren Vergleich wurden die aktinischen und blaulichtgewichteten Bestrahlungsstärken auf den jeweiligen Maximalwert normiert.

Sofort fällt auf, dass die Intensität der E -Fluktuationen zwischen Maximalwert (entspricht dem Wert 1) und einem quasi Aussetzen der Strahlungsemission (≈ 0) schwanken kann. Dies rechtfertigt die Begrifflichkeit, optische Strahlung von Schweißlichtbögen als intermittierend zu bezeichnen. Die Fluktuationen der einzelnen Strahlungsanteile, wie in Abb. 11.3 exemplarisch für E_{eff} und E_B gezeigt, können hinsichtlich der Absolutwerte stark unterschiedlich sein, ihre Periodizität ist jedoch sehr ähnlich.

Eine genaue Analyse der Zeitabstände der lokalen Bestrahlungsstärkemaxima resultiert in einer mittleren Periodendauer bzw. in einer mittleren (Impuls-) Wiederholfrequenz. Eine entsprechende Auswertung einer Stichprobe von Bestrahlungsstärkeschwankungen führte bei allen Schweißverfahren, unabhängig von Schutzgas, Werkstück und sogar Art der Elektrode (abschmelzend oder nichtabschmelzend) zu Periodizitäten von etwa 2,5 bis 4 Hz. Ein Zusammenhang zur Schweißspannung kann für diese Frequenzen nicht in Betracht gezogen werden, da einerseits bei WIG-Schweißen mit Gleichstrom eine ähnliche Wiederholfrequenz (3,1 Hz) festgestellt werden konnte und andererseits die Schweißspannungssoszillation deutlich höhere Frequenzen aufweist. Messtechnische Probleme sind durch entsprechende Vorversuche ebenfalls auszuschließen. Die genaue Ursache dieser Wiederholfrequenzen muss an dieser Stelle ungeklärt bleiben.

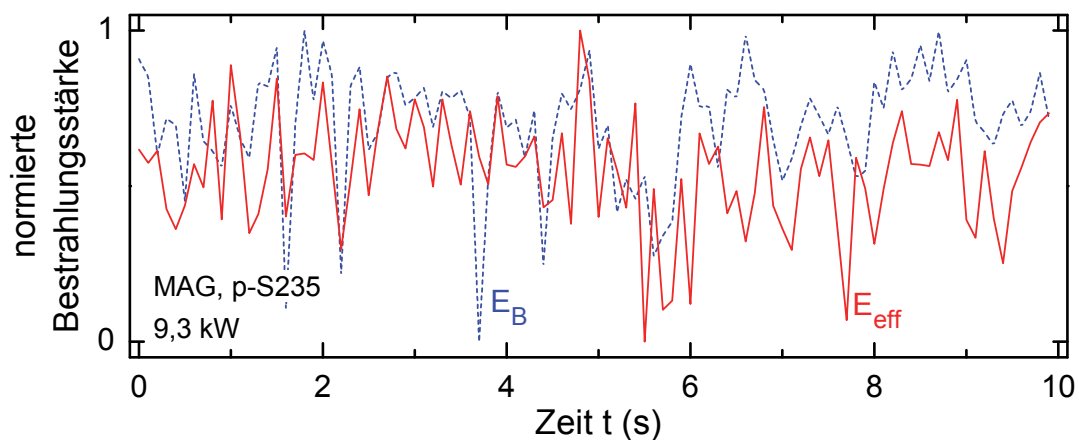


Abb. 11.3 Auf den jeweiligen Maximalwert normierte zeitabhängige aktinische und blaulichtgewichtete Bestrahlungsstärke beim gepulsten MAG-Schweißen von Baustahl mit einer Leistung von 9,3 kW.

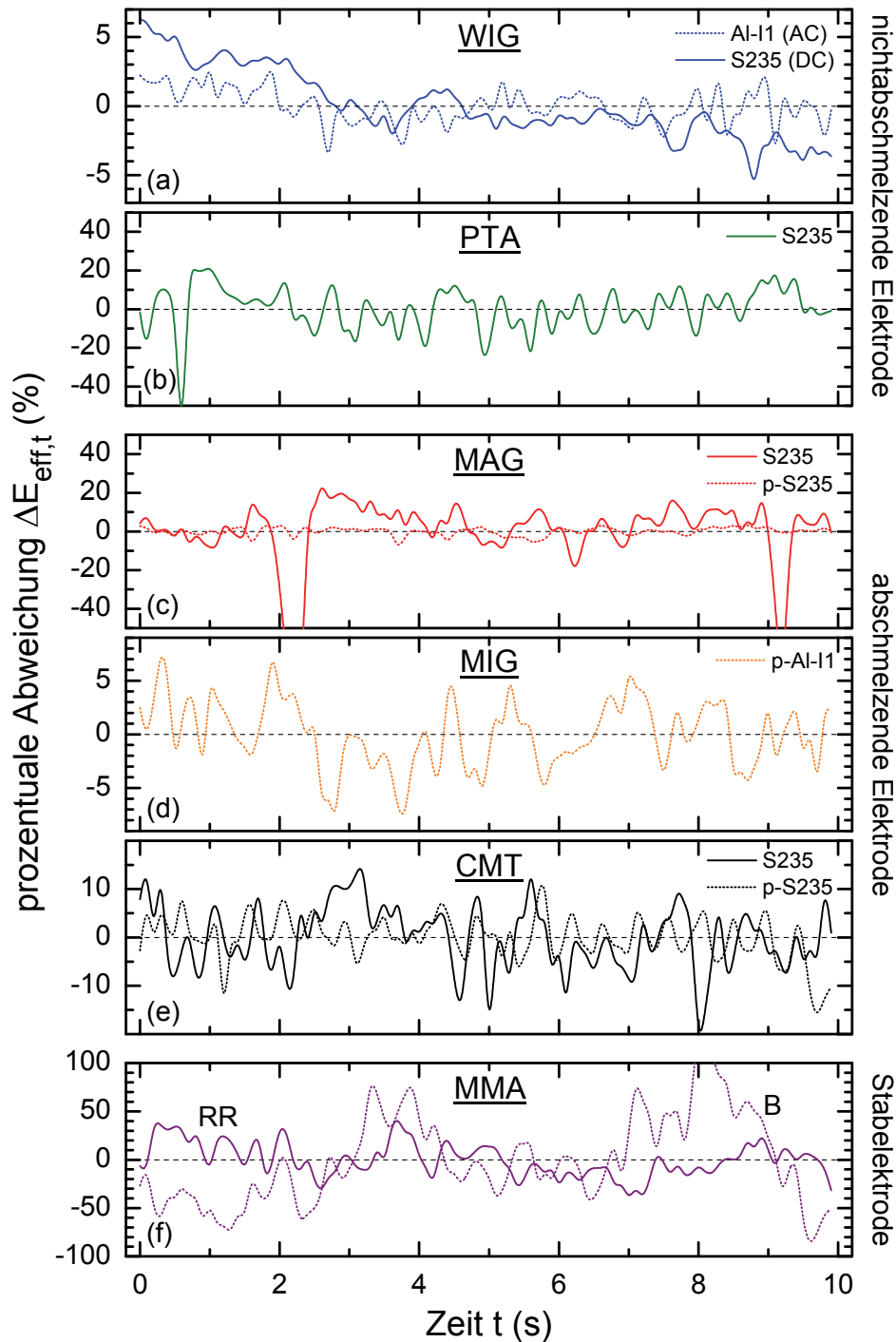


Abb. 11.4 Zeitliche prozentuale Abweichung der aktinischen Bestrahlungsstärken $E_{\text{eff}}(t)$ vom Zeitmittelwert $\overline{E_{\text{eff}}}$ nach Gleichung (11.1) beim Schweißen von Baustahl und/oder Aluminium. Gezeigt sind exemplarische Bestrahlungsstärkefluktuation bei Verwendung von (a) 5,6 kW (Al-I1: 4,3 kW), (b) 7,5 kW, (c) 8,4 kW (p-S235: 8,4 kW), (d) 8,6 kW, (e) 5,5 kW (p-S235: 7,5 kW) und (f) 8,6 kW (RR) bzw. 8,4 kW (B). Bei WIG ist zum Vergleich zusätzlich $\Delta E_{\text{eff},t}(t)$ beim Schweißen von Aluminium mit Wechselstrom gezeigt, bei MAG und CMT jeweils die gepulsten Prozessvarianten und für MMA-Schweißen Unterschiede bei der Verwendung einer RR- und einer basischen Stabelektrode.

Zur besseren Visualisierung der zeitlichen Bestrahlungsstärkefluktuationen ist in Abb. 11.4 exemplarisch für E_{eff} die zeitliche prozentuale Abweichung vom Zeitmittelwert $\overline{E_{\text{eff}}}$ gemäß

$$\Delta E_{\text{eff,t}}(t) = \frac{E_{\text{eff}}(t) - \overline{E_{\text{eff}}}}{\overline{E_{\text{eff}}}} \times 100 \quad (11.1)$$

für verschiedene Schweißverfahren hauptsächlich am Werkstück Baustahl dargestellt. Durchschnittswerte betragen hier in etwa $\pm 20\%$, wobei beim MMA-Schweißen aufgrund der individuellen Handführung die Intensität der Fluktuationen deutlich höher ist.

Wie bereits erwähnt, gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen Verfahren mit abschmelzender und nichtabschmelzender Elektrode auch wenn in Abb. 11.4 die Bestrahlungsstärkefluktuationen beim WIG-Schweißen am niedrigsten sind.

11.3 Personendosimetrie

Die Erfassung der optischen Strahlungsemission bei wohldefinierten Parametern wie Abstand, Polar- und Azimutalwinkel oder unveränderlichen Umgebungsbedingungen ist für Forschungszwecke zwingend erforderlich. Nur bei einem konstanten Parametersatz kann der Einfluss einer Variablen wie z. B. der Schweißstromstärke auf die Strahlungsemission untersucht werden.

Die Tatsache, dass kein Schweißer sich stets im gleichen Abstand zum Lichtbogen befindet, kann bei den in Kapitel 8 abgeleiteten Anpassungsmodellen bzgl. der Schweißstromabhängigkeit der Strahlungsemission durch das in Kapitel 7.4 beschriebene photometrische Abstandsgesetz berücksichtigt werden. Schwieriger gestaltet sich die mathematische Beschreibung von z. B. Reflexionen an Wänden, Bodenbelägen oder generell von Oberflächen am Schweißarbeitsplatz. Hierzu werden aktuell experimentelle Untersuchungen durchgeführt, die jedoch auf komplizierte mathematische Abhängigkeiten deuten. Viel einfacher ist stattdessen die Erfassung der tatsächlichen Exposition des Schweißers mit Hilfe der Personendosimetrie.

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden deswegen zwei Personendosimeter, siehe Kapitel 6.3, an der Vorderseite des Schweißerschutzhelmes angebracht (Abb. 11.5), die exemplarisch während einiger Schweißungen (bzw. während eines Arbeitstages) die tatsächlichen Bestrahlungsstärken E_{eff} und E_{UVA} zeit aufgelöst detektierten.

Abb. 11.6 gibt beispielhaft die detektierten ungewichteten UVA- und aktinischen Bestrahlungsstärken bei Untersuchungen des CMT-Schweißens wieder. Ein Anstieg von E_{eff} und E_{UVA} mit der Schweißstromstärke bzw. hier mit der Messblockdauer ist deutlich zu erkennen. Im Vergleich mit Kapitel 8.4 findet sich beim CMT-Schweißen auf S235 ebenfalls der sigmoidale Bestrahlungsstärkeanstieg.

Basierend auf der reinen Schweißzeit t_s (Zeit, in der der Lichtbogen brannte) werden



Abb. 11.5 Schutzhelm mit Dosimetern

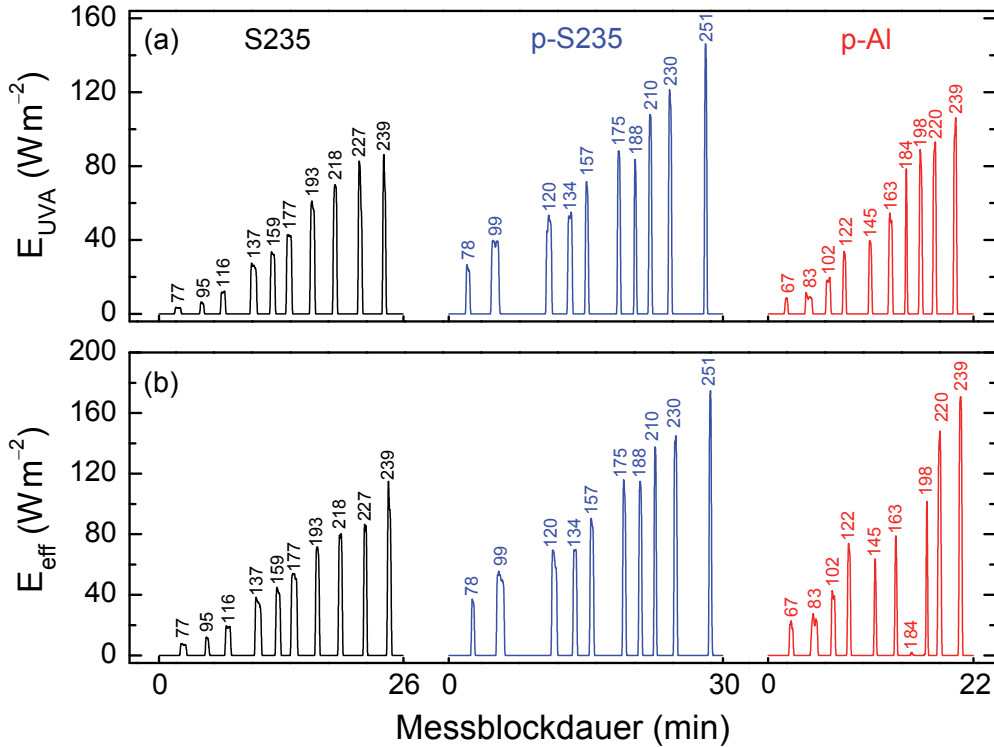


Abb. 11.6 Ergebnisse der exemplarischen personendosimetrischen Messungen von (a) E_{UVA} bzw. (b) E_{eff} beim CMT-Schweißen mit normaler und gepulster Prozessvariante auf Baustahl und Aluminium. Die Zeitachse gibt jeweils die Dauer eines Messblockes wieder und ist zeitlich zwischen den Prozessvarianten bzw. Werkstücken unterbrochen. Angegebene vertikale Zahlen entsprechen den jeweiligen Schweißstromstärken.

Tab. 11.1 Auflistung der Ergebnisse verschiedener Schweißverfahren, Prozessvarianten und Werkstücke. Angegeben ist die reine Schweißzeit t_S (in min), die gemessene Bestrahlung H_{eff} bzw. H_{UVA} (in $kJ m^{-2}$) sowie die daraus nach Gleichungen (4.6) bzw. (4.11) berechneten mittleren Bestrahlungsstärken \bar{E}_{eff} bzw. \bar{E}_{UVA} (in $W m^{-2}$) und die mittleren maximal zulässigen Expositionsdauern \bar{t}_{eff} (s) bzw. \bar{t}_{UVA} (min).

		t_S	H_{eff}	H_{UVA}	\bar{E}_{eff}	\bar{E}_{UVA}	\bar{t}_{eff}	\bar{t}_{UVA}
MAG	S235	5,0	12,5	12,5	41,7	41,7	0,7	4,0
	CrNi	6,8	17,6	12,4	43,1	30,4	0,7	5,5
p-MAG	S235	6,2	38,2	34,7	102,7	93,3	0,3	1,8
	CrNi	7,2	27,0	17,1	62,5	39,6	0,5	4,2
p-MIG	Al-I1	4,9	9,7	5,9	33,0	20,1	0,9	8,3
	Al-I3	5,8	9,9	5,8	28,4	16,7	1,1	10,0
WIG AC	Al	5,6	0,3	0,4	0,9	1,2	33,6	140,0
CMT	S235	5,8	13,9	10,9	39,9	31,3	0,8	5,3
p-CMT	S235	4,8	27,0	16,9	93,8	58,7	0,3	2,8
	Al	4,8	13,3	10,2	46,2	35,4	0,6	4,7

die Bestrahlungsstärken integriert und über die jeweiligen Messblockdauern aufsummiert. Dies resultiert in der tatsächlichen Bestrahlung für eine Versuchsreihe, d. h. in H_{eff} bzw. H_{UVA} für die Schweißstromvariation bei einem Schweißverfahren mit einer Prozessvariante auf einem Werkstück. Daraus kann anschließend eine mittlere Bestrahlungsstärke, \bar{E}_{eff} bzw. \bar{E}_{UVA} , berechnet werden, welche die durchschnittliche Strahlungsexposition beschreibt. Durch Vergleich mit den entsprechenden Expositionsgrenzwerten, siehe Tab. 4.1, folgt daraus schlussendlich eine mittlere maximal zulässige Expositionsdauer. Die Ergebnisse sind in Tab. 11.1 zusammengefasst.

Abgesehen vom WIG-Schweißen liegen alle \bar{t}_{eff} -Zeiten unterhalb einer Sekunde was wiederholt die Notwendigkeit umfassender Schutzmaßnahmen vor optischer Strahlung aufzeigt. Außerdem ist auch hier die aktinische maximal zulässige Expositionsdauer restriktiver als das ungewichtete \bar{t}_{UVA} .

Interessant ist außerdem die Gesamtdosis/Gesamtbestrahlung, die während eines kompletten 8h-Arbeitstages von den Personendosimetern aufgezeichnet wurde. An den drei Versuchstagen kamen so aktinische Bestrahlungen von 117, 24 und 56 kJ m^{-2} zustande. Diese Werte hängen natürlich stark von tatsächlicher Schweißdauer und vom Schweißverfahren ab, geben aber eine ungefähre Größenordnung des Gefährdungspotenzials wieder.

Anmerkung

Während der betrieblichen Modellvalidierung der mathematischen Anpassungsfunktionen, siehe Kapitel 10, wurden ebenfalls exemplarische Dosimetermessungen durchgeführt. Hierbei waren die Personendosimeter allerdings nicht am Schweißschutzhelm befestigt, sondern befanden sich gut abgeschirmt vom Lichtbogen hinter einem Schweißvorhang. Die während der etwa zweistündigen Untersuchungen detektierte effektive Bestrahlung betrug ungefähr $H_{\text{eff}} = 700 \text{ mJ m}^{-2}$ und entspricht somit ca. 2 % des Expositionsgrenzwertes von 30 J m^{-2} . Die Gefährdung durch reflektierte Strahlung darf demnach keinesfalls unterschätzt werden und bekräftigt das in Teilprojekt 3 durchzuführende Forschungsvorhaben.

12 Optische Strahlung bei Laserschweißverfahren

Da Laserschweißverfahren z. B. mit einem Kohlenstoffdioxid-, einem Nd:YAG- oder einem Faserlaser aber auch Hybridvarianten in Kombination mit klassischen Lichtbogenschweißverfahren immer häufiger industrielle Anwendung finden, soll dieser Forschungsbericht, wenn auch nur exemplarisch, die dort auftretende optische Strahlung hinsichtlich des Gefährdungspotenzials bewerten. Dafür wurde, sofern möglich, mit einem CO₂- und einem Faserlaser im maximal zugänglichen Leistungsbereich Aluminium, Bau- und Edelstahl geschweißt.

12.1 CO₂-Laserschweißen

Bei einem Kohlenstoffdioxidlaser handelt es sich um einen Infrarotlaser, bei dem CO₂ als aktives Medium verwendet wird. Der in diesem Forschungsprojekt untersuchte Laser arbeitete bei einer Wellenlänge von 10,6 µm. Das allgemeine Funktionsprinzip ist in Kapitel 5.5.2 kurz erläutert.

Bei den experimentellen Untersuchungen in der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt war Laserschweißen von Aluminium geplant, allerdings gelang es nicht, den Kohlenstoffdioxidlaser einzukoppeln. Aufgrund der Gefahr zurückgestreuter Laserstrahlung und der damit verbundenen Zerstörung der Laserapparatur hat CO₂-Laserschweißen von Aluminium aber auch kaum Praxisbezug.

12.1.1 CO₂-Laserschweißspektren von Bau- und Edelstahl

Durchaus häufig CO₂-lasergeschweißt werden allerdings Bau- und Edelstahl, für die der spektrale Verlauf der Bestrahlungsstärke in Abb. 12.1 dargestellt ist. Charakteris-

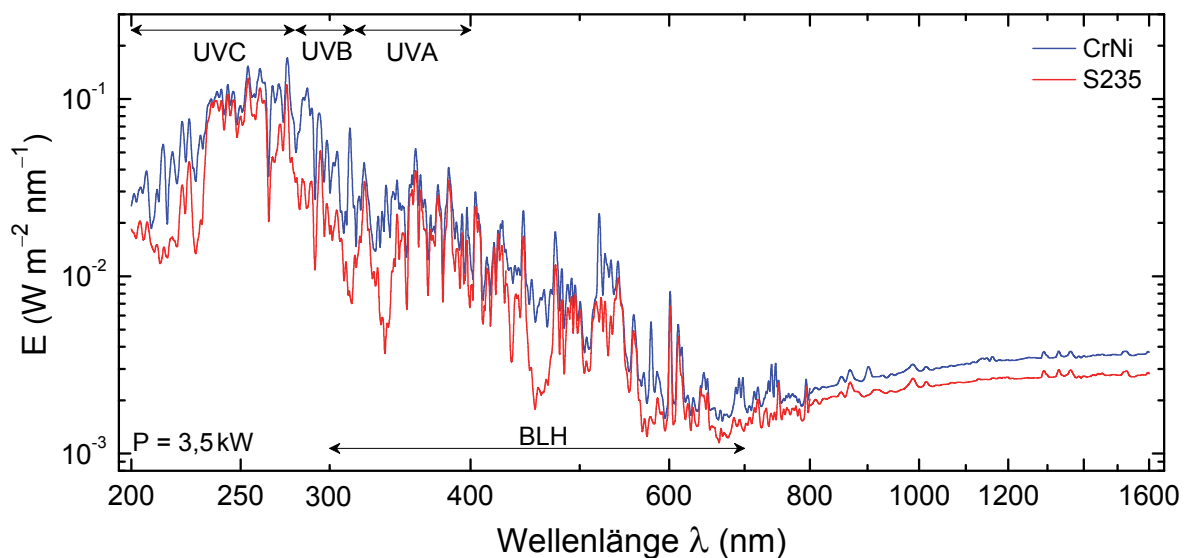


Abb. 12.1 Doppeltlogarithmische Darstellung der spektralen Bestrahlungsstärke beim CO₂-Laserschweißen von Bau- und Edelstahl mit einer elektrischen Leistung von $P = 3,5 \text{ kW}$. Ultraviolette und sichtbare (BLH-) Spektralbereiche sind durch Doppelpfeile markiert.

Tab. 12.1 Gemittelte UV-Anteilsverhältnisse ρ beim CO₂-Laserschweißen von Bau- und Edelstahl.

	ρ_{UVA} (%)	ρ_{UVB} (%)	ρ_{UVC} (%)
S235	(0,016 ± 0,003)	(14,9 ± 0,4)	(85,1 ± 0,5)
CrNi	(0,017 ± 0,002)	(23,9 ± 0,6)	(76,1 ± 0,6)

tische Emissionslinien z. B. im Schweißspektrum von CrNi bei einer Wellenlänge von 313 nm können atomspezifisch zugeordnet werden, dies übersteigt allerdings den Umfang des vorliegenden Forschungsberichtes. Generell zeigt sich bei beiden Werkstoffen eine Bestrahlungsstärkeabnahme vom UV- zum sichtbaren Wellenlängenbereich und ein leichter Anstieg von $E(\lambda)$ für IR-Wellenlängen. Die große Ähnlichkeit zu entsprechenden Lichtbogenschweißspektren (siehe Abb. 9.1) lässt die Existenz eines heißen Plasmas vermuten. Gemäß dem Wienschen Verschiebungsgesetz beträgt die Plasmatemperatur bei einer Maximumwellenlänge von 250 nm ca. 12.000 K.

Die Werte des UV-Anteilsverhältnisses ρ sind in Tabelle Tab. 12.1 aufgeführt. Dabei weist ρ_{UVC} beim CO₂-Laserschweißen von Baustahl mit 85 % und bei Edelstahl mit 76 % den bisher höchsten prozentualen Wert der relativen aktinischen Bestrahlungsstärken verglichen mit den Lichtbogenschweißverfahren, siehe Tab. 9.1, auf. Dementsprechend zeigen die ρ -Werte im UVB-Spektralbereich die niedrigsten prozentualen Anteile.

12.1.2 Leistungsabhängige UV-Strahlungsemission und Expositionsdauern

Bei Erhöhung der Laserschweißleistung steigt sowohl die ungewichtete UVA-Bestrahlungsstärke als auch der aktinische E_{eff} -Wert linear an, siehe Abb. 12.2 (a) und (b), wobei beide Bestrahlungsstärkezunahmen bei Edelstahl größer sind (Tab. 12.2).

Während die maximal zulässigen Expositionsdauern t_{UVA} im Stundenbereich liegen, wird der aktinische Expositionsgrenzwert $H_{\text{eff}} = 30 \text{ J m}^{-2}$ bereits in wenigen Sekunden überschritten. Diese Werte sind mit denen beim WIG-Schweißen vergleichbar und entsprechende Schutzmaßnahmen hinsichtlich der Gefährdung durch UV-Strahl-

Tab. 12.2 Anpassungsparameter nach Formel (6.5) an die Bestrahlungsstärken aus Abb. 12.2 (a) und (b) sowie aus Abb. 12.3 (a). m ist in der Einheit $\text{W m}^{-2} \text{ kW}^{-1}$ und E_0 in W m^{-2} angegeben.

	E_{UVA}	E_{eff}	E_B
S235	$m = (0,41 \pm 0,01)$ $E_0 = (0,04 \pm 0,03)$	$m = (0,89 \pm 0,04)$ $E_0 = (-0,3 \pm 0,1)$	$m = (0,158 \pm 0,005)$ $E_0 = (0,003 \pm 0,012)$
CrNi	$m = (0,73 \pm 0,02)$ $E_0 = (-0,32 \pm 0,06)$	$m = (1,61 \pm 0,08)$ $E_0 = (-1,1 \pm 0,2)$	$m = (0,27 \pm 0,01)$ $E_0 = (-0,11 \pm 0,02)$

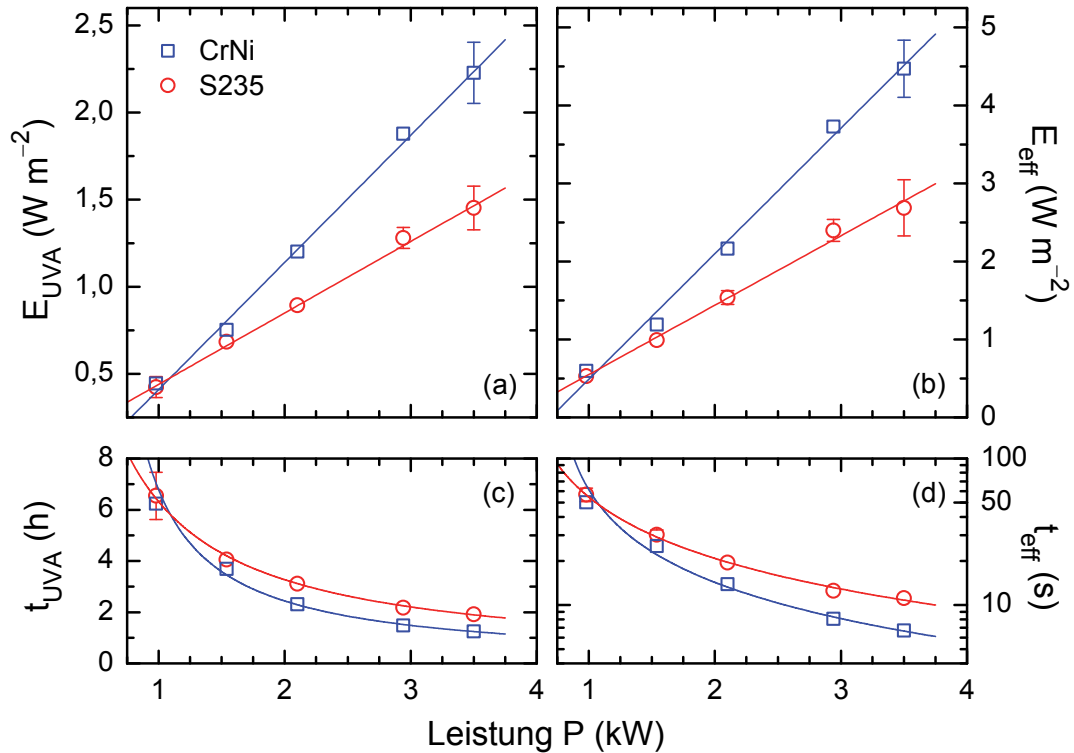


Abb. 12.2 (a, b) Leistungsabhängige ungewichtete UVA- und aktinische Bestrahlungsstärken beim CO_2 -Laserschweißen von Bau- (S235) und Edelstahl (CrNi) zusammen mit linearen Anpassungen entsprechend der Parameter in Tab. 12.2. In (c) und (d) sind die aus E_{UVA} und E_{eff} berechneten Expositionsdauern ebenfalls mit Anpassungsfunktionen analog zu Formel (6.8) abgebildet.

ung müssen angewandt werden. Zur Veranschaulichung: Nimmt man an, dass der CO_2 -Laser bei einer mittleren Leistung ca. 1 h Betriebszeit am Tag hat, müsste man sich ohne Schutzkomponenten im Abstand von ca. 9,5 m zum Werkstück aufhalten, um keine Überschreitung der Grenzwerte zu riskieren.

12.1.3 Sichtbare und infrarote Strahlungsanteile

Ein Blick auf den spektralen Bestrahlungsstärkeverlauf in Abb. 12.1 erkennen, dass auch eine Gefährdung durch sichtbare Strahlungsanteile schnell möglich ist. Die aus der in Abb. 12.3 (a) als Funktion der Leistung dargestellten linearen blaulichtgewichteten Bestrahlungsstärke E_B berechneten Expositionsdauern t_B liegen im einstelligen Minutenbereich und können unter normalen Arbeitsbedingungen und einem 8 h Arbeitstag leicht überschritten werden.

Eine Gefährdung durch infrarote Strahlungsanteile kann beim CO_2 -Laserschweißen ausgeschlossen werden. Mit einer maximal zulässigen Expositionsdauer von $t_H = 9,5$ h (bei CrNi) übersteigt dieser Wert sogar die Arbeitszeit eines durchschnittlichen Arbeitnehmers. Aus diesem Grund wird auf eine weitere Diskussion infraroter Bestrahlungsstärken beim CO_2 -Laserschweißen verzichtet.

Ein ganz anderes Bild der optischen Strahlungsemission zeigt sich beim Schweißen mit einem Faserlaser.

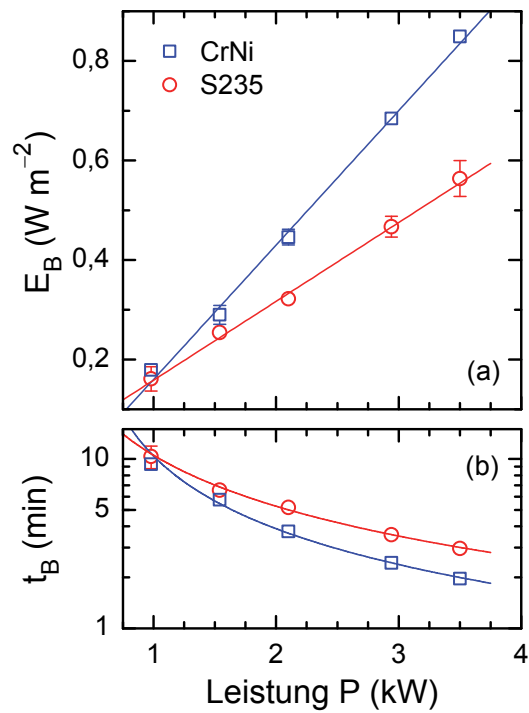


Abb. 12.3 (a) Leistungsabhängige blaulichtgewichtete Bestrahlungsstärken E_B beim CO_2 -Laserschweißen von Bau- (S235) und Edelstahl (CrNi). Lineare Anpassungsfunktion gemäß der Parameter in Tab. 12.2 sind zusätzlich eingezeichnet. (b) Expositionsdauern t_B aus den in (a) abgebildeten Bestrahlungsstärken nach Formel (4.12) berechnet zusammen mit mathematischen Beschreibungen analog zu Gleichung (6.8).

12.2 Faserlaserschweißen

Zusätzlich zum CO₂-Laserschweißen wurde auch die Emission optischer Strahlung beim Schweißen mit einem Faserlaser untersucht. Dieser arbeitet mit einer ähnlichen Wellenlänge wie etwa ein Nd:YAG-Laser (1070 nm, siehe Kapitel 5.5.1) und kann in einem relativ großen Leistungsbereich betrieben werden.

12.2.1 Materialspezifische Laserschweißspektren

Bereits anhand der Schweißspektren in Abb. 12.4 zeigen sich signifikante Unterschiede einerseits zum spektralen Bestrahlungsstärkeverlauf beim CO₂-Laserschweißen als auch beim Vergleich der einzelnen Werkstoffe Aluminium, Bau- und Edelstahl untereinander.

Lag die Hauptemission optischer Strahlung beim CO₂-Laser noch im UVC- und UVB-Bereich, so tritt beim Faserlaser bei diesen Wellenlängen kaum Strahlung auf und Streulicht verfälscht das Spektrum. Deswegen werden bei der folgenden Analyse Bestrahlungsstärken unterhalb einer Wellenlänge von 280 nm, also der komplette UVC-Bereich, nicht berücksichtigt. Dies reduziert entsprechend auch den aktinischen E_{eff} -Wert.

Für die beiden Stähle sehen die Laserschweißspektren abgesehen von einigen wenigen Emissionslinien zwischen 350 und 400 nm quasi identisch aus. Für $\lambda > 400$ nm steigt $E(\lambda)$ an und erreicht sein Maximum bei der Laserwellenlänge von 1070 nm. Die relativ gleichmäßige Bestrahlungsstärkezunahme vom sichtbaren zum nahen infraroten Wellenlängenbereich lässt vermuten, dass im Spektrum die Wärmeverteilung des beim Schweißen erwärmten Werkstückes ($\propto \lambda^2$) zu erkennen ist.

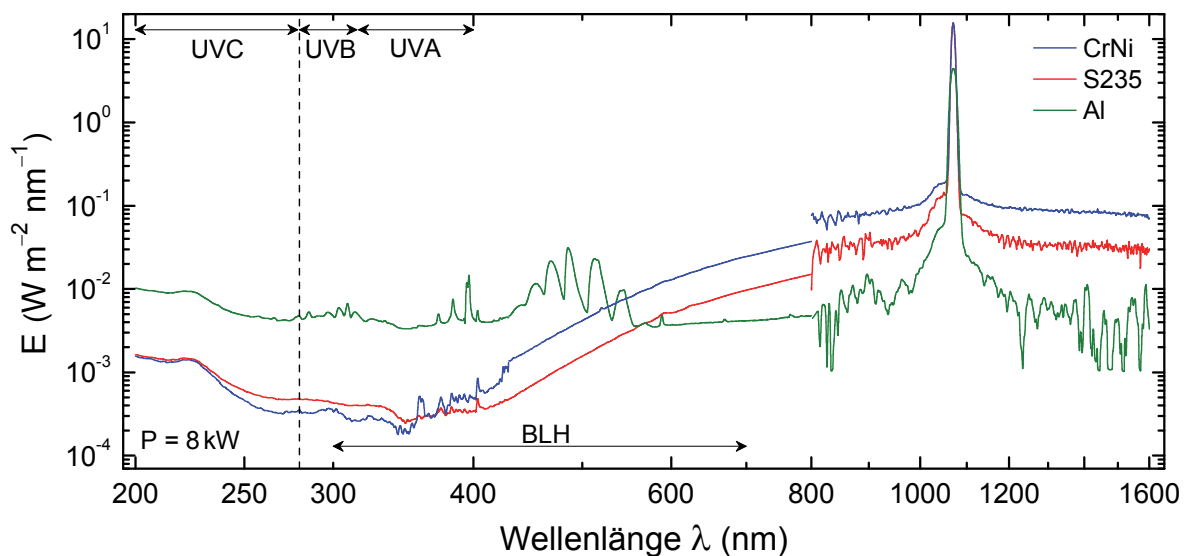


Abb. 12.4 Spektraler Verlauf der Bestrahlungsstärken beim Faserlaserschweißen von Aluminium, Bau- und Edelstahl. Die eingestellte Laserleistung beträgt $P = 8 \text{ kW}$. Horizontale Doppelpfeile kennzeichnen ultraviolette Spektralbereiche und den Wellenlängenbereich der Blaulichtgefährdung. Die gestrichelte Linie bei 280 nm markiert die Wellenlänge, unterhalb der aufgrund des überwiegenden Streulichtanteils keine Auswertung mehr stattfindet.

Ein gänzlich anderes Schweißspektrum zeigt sich beim Werkstoff Aluminium. So sind die UV-Bestrahlungsstärken um ca. eine Dekade größer und sowohl im UV- als auch im VIS-Spektralbereich tauchen Emissionslinien auf. Auch zeigt sich im Gegensatz zu den Schweißspektren bei Bau- und Edelstahl kein gleichmäßiger Anstieg der spektralen Bestrahlungsstärke vom sichtbaren zum infraroten Spektralbereich.

Berechnet man trotz der sehr niedrigen UV-Bestrahlungsstärken das UV-Anteilsverhältnis ρ , so findet man für alle Werkstoffe, dass innerhalb der Fehlergrenzen biologisch wirksame Strahlung zu 100 % im UVB-Bereich auftritt.

12.2.2 Leistungsabhängige UV-Strahlungsemission und Expositionsdauern

Analysiert man die ultravioletten Strahlungsanteile weiter, so findet man die in Abb. 12.5 (a) und (b) gezeigten leistungsabhängigen UVA- und aktinischen Bestrahlungsstärken.

Es erscheint wenig sinnvoll, ein mathematisches Modell an die experimentellen Bestrahlungsstärken anzupassen, da einerseits die Messunsicherheiten bei Maximalwerten von 300 mW m^{-2} recht groß sind und andererseits kein leistungsabhängiger Trend zu erkennen ist.

Die durchschnittliche Expositionsdauer t_{eff} von $(80 \pm 55) \text{ min}$ ist, verglichen mit denen der Lichtbogenschweißverfahren oder auch derer beim CO_2 -Laserschweißen, recht lange.

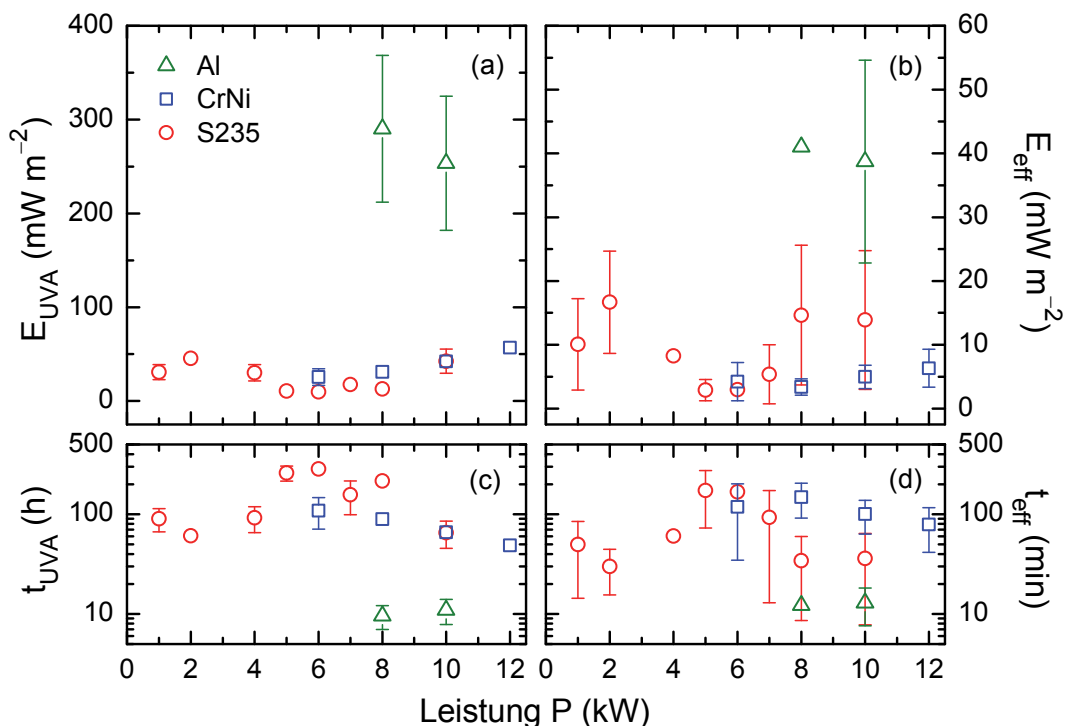


Abb. 12.5 Leistungsabhängigkeit der nach Gleichungen (4.6) und (4.11) berechneten Bestrahlungsstärken (a) E_{UVA} und (b) E_{eff} beim Faserlaserschweißen von Aluminium, Bau- und Edelstahl. In (c) und (d) sind die aus diesen Bestrahlungsstärken bestimmten Expositionsdauern t_{UVA} und t_{eff} abgebildet. Eine mathematische Anpassung an die Leistungsabhängigkeit der Bestrahlungsstärken bzw. Expositionsdauern ist nicht möglich bzw. sinnvoll.

12.2.3 Gefährdungen durch sichtbare und infrarote Strahlungsanteile

Ein ähnliches Verhalten wie bei den UV-Bestrahlungsstärken E_{UVA} und E_{eff} tritt auch bei den blaulichtgewichteten sichtbaren Strahlungsanteilen E_{B} auf. Die sehr kleinen Bestrahlungsstärken weit unterhalb von 1 W m^{-2} zeigen keine systematische Leistungsabhängigkeit, siehe Abb. 12.6 (a). Tendenziell steigt zwar bei Bau- und Edelstahl (in bestimmten Leistungsbereichen) mit zunehmender Leistung auch die Emission sichtbarer Strahlung an (angedeutet durch die gestrichelte Linie), eine übergeordnete Systematik ist jedoch, auch aufgrund der wenigen Daten oder schlechten Datenqualität, nicht erkennbar.

Die Expositionsdauern reichen hierbei von 3 bis 60 min, im Durchschnitt ergibt sich ein (leistungsunabhängiges) t_{B} von $(22 \pm 18) \text{ min}$, d. h. im Vergleich zur ultravioletten Strahlung werden die Expositionsgrenzwerte im Spektralbereich der Blaulichtgefährdung etwa viermal so schnell überschritten. Allerdings liegt im Vergleich zu anderen Schweißverfahren kein besonders hohes BLH-Gefährdungspotenzial vor.

Infrarote Strahlungsanteile beim Faserlaserschweißen bergen hingegen ein erhöhtes Gefährdungspotenzial in sich. Abb. 12.7 (a) und (b) zeigen die Bestrahlungsstärken E_{IR} und E_{H} für die ebenso wie bei sichtbaren Strahlungsanteilen eine in grober Näherung lineare Leistungsabhängigkeit (angedeutet durch die gestrichelten Linien) angenommen werden kann. Interessant ist jedoch, dass mit zunehmender Leistung die detektierte IR-Strahlung drastisch abnimmt, von anfänglich fast $1,2 \text{ kW m}^{-2}$ auf etwa 100 W m^{-2} . Vermutlich tritt der Laserstrahl mit steigender Leistung immer tiefer in das Werkstück ein, so dass weniger Infrarotstrahlung gemessen werden kann.

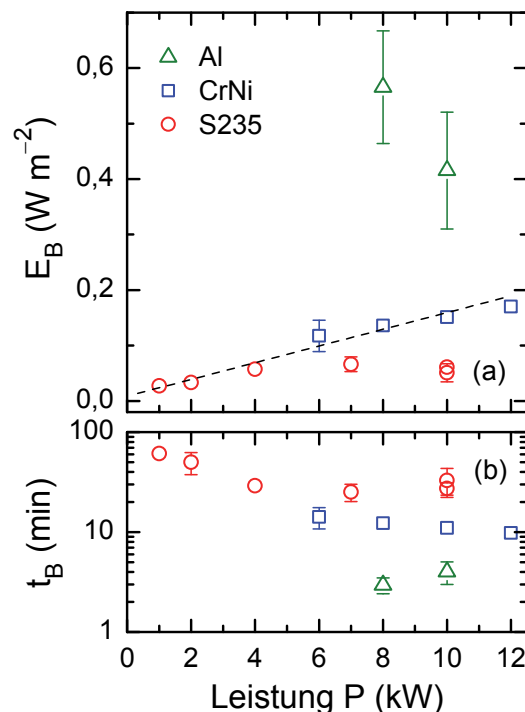


Abb. 12.6 (a) Blaulichtgewichtete Bestrahlungsstärken beim Faserlaserschweißen von Aluminium, Bau- und Edelstahl als Funktion der Laserleistung P . In (b) sind die nach Formel (4.12) berechneten zugehörigen Expositionsdauern t_{B} dargestellt.

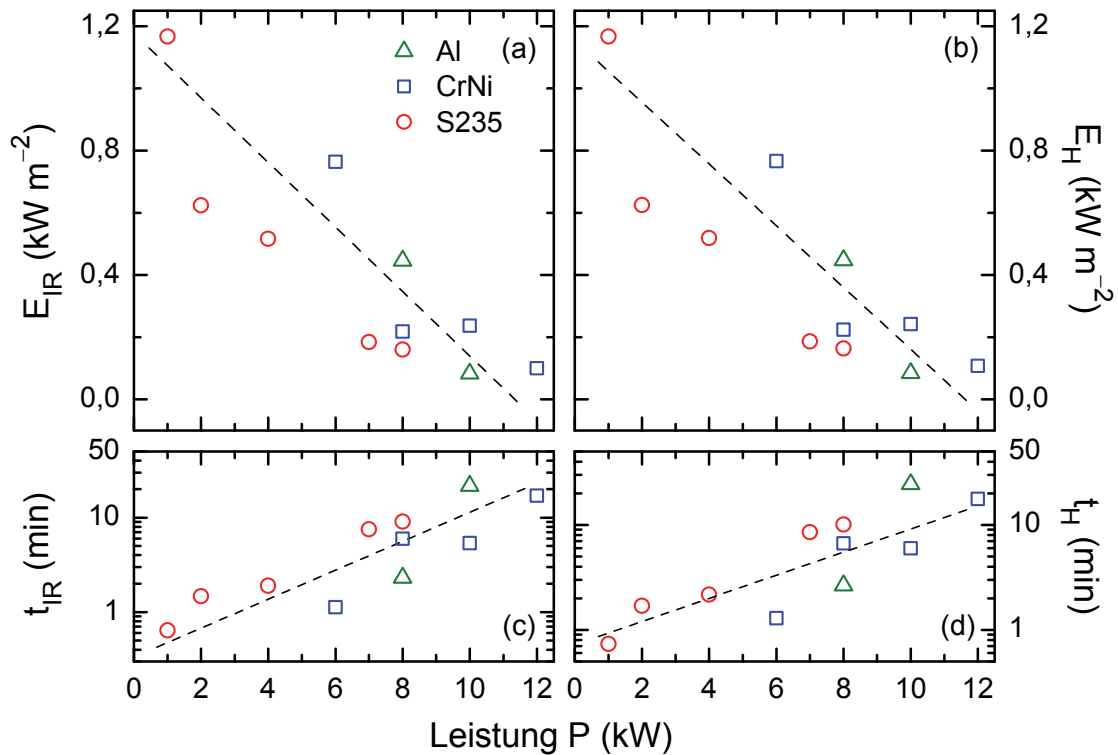


Abb. 12.7 Infrarote Bestrahlungsstärken (a) E_{IR} und (b) E_H nach Gleichungen (4.7) und (4.8) als Funktion der Laserleistung P . Geschweißt wurden Aluminium, Edel- und Baustahl. Gestrichelte Linien verdeutlichen die Tendenz einer Strahlungsabnahme bei steigender Leistung. In (c) und (d) sind die aus den infraroten Bestrahlungsstärken berechneten Expositionsdauern t_{IR} und t_H abgebildet.

Bei einer mittleren Leistung von etwa $P = 6,25$ kW ergibt sich eine mittlere maximale zulässige Expositionsdauer von gut 3 min. Zu beachten ist allerdings, dass beim Faserlaserschweißen mit niedriger Leistung auch Expositionsdauern um ca. 1 min auftreten. Insgesamt liegt hier also ein erhöhtes IR-Gefährdungspotenzial vor.

12.3 Resümee Laserschweißverfahren

Insbesondere ultraviolette Strahlung beim CO₂-Laserschweißen und Infrarotstrahlung beim Faserlaserschweißen ist so intensiv, dass bestehende Expositionsgrenzwerte im Sekunden- oder niedrigen Minutenbereich überschritten werden können. Ein Vergleich mit den Gefährdungspotenzialen der Lichtbogenschweißverfahren kann am besten über die mittleren Expositionzeiten gemäß Kapitel 9.4 erfolgen. Eine entsprechende Einordnung ist in Abb. 12.8 dargestellt.

Anmerkung

Bei der Lasermaterialbearbeitung werden auch Lasereinrichtungen verwendet, bei denen die Laserstrahlung während des Betriebes zumindest teilweise zugänglich sein kann, z. B. bei einer Positionierung des Werkstückes oder des Laserkopfes per Hand oder generell bei handgeführten Lasergeräten. Aus praktischen Gründen (Taktilität) können hierbei oft keine Handschuhe getragen werden, obwohl sich die Hände

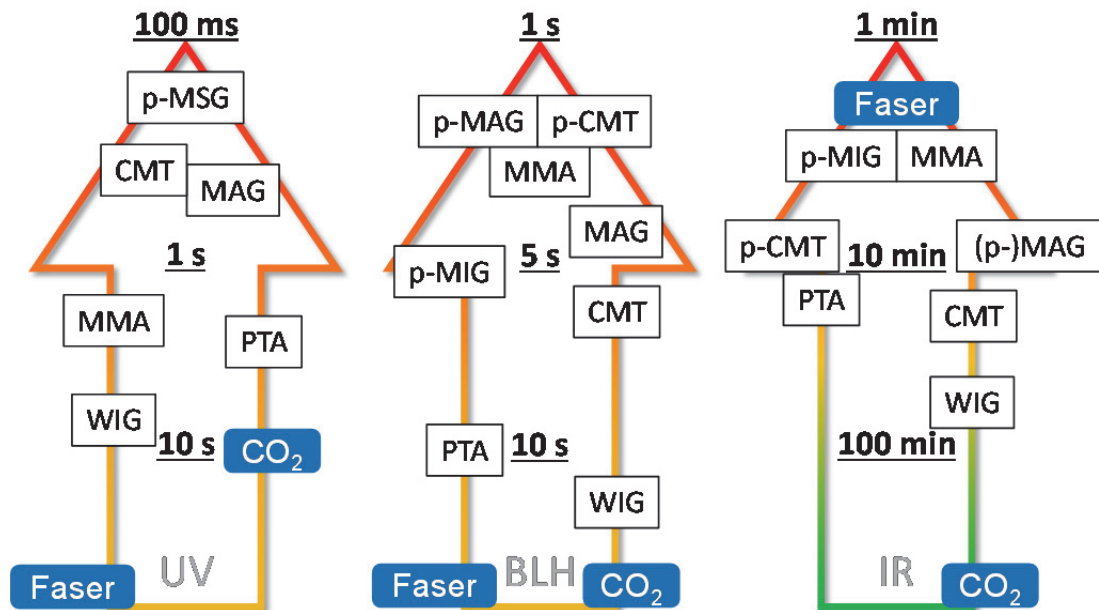


Abb. 12.8 Einordnung der UV-, BLH- und IR-Gefährdungspotenziale der Laserschweißverfahren mit Hilfe der mittleren Expositionsdauern t_{eff} , t_B und t_H in Bezug auf die Lichtbogenschweißverfahren. Logarithmischen Zeitskalen wurden im linken und rechten Pfeil verwendet, im mittleren Pfeil ist die Zeitskala linear.

nur etwa 5 cm von der Strahlungsquelle entfernt befinden. Berücksichtigt man diese Erkenntnis, so verringern sich die in Kapitel 12 abgeleiteten maximal zulässigen Expositionsdauern (in einem Abstand von 50 cm bestimmt) nach dem photometrischen Entfernungsgesetz um einen Faktor 100 bei handgeführten Lasern. Somit besteht ein erhöhtes Gefährdungspotenzial. Weiterführende experimentelle Untersuchungen zu dieser Thematik sind bereits in Planung.

13 Strahlungsemission beim Plasmaschneiden

Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde zusätzlich zu den diversen Lichtbogenschweißverfahren und zum CO₂- und Faserlaserschweißen exemplarisch auch ein Schneideverfahren hinsichtlich dessen Emission von optischer Strahlung untersucht. Dabei stand insbesondere die Belastung durch infrarote Strahlungsanteile im Fokus.

Im Gegensatz zu den bisherigen Schweißverfahren konnte beim Plasmaschneiden (PS) kein sich drehendes Werkstück (Rohrschweißvorrichtung) realisiert werden. Stattdessen wurde als Schneidform eine enge Spirale (maximaler Durchmesser ungefähr 10 cm) programmiert. Wenn auch nicht punktgenau so gestattet es diese Methode, unter ähnlichem Detektionswinkel und Messabstand die emittierte Strahlung zu messen. Trotzdem müssen größere Messunsicherheiten in Kauf genommen werden.

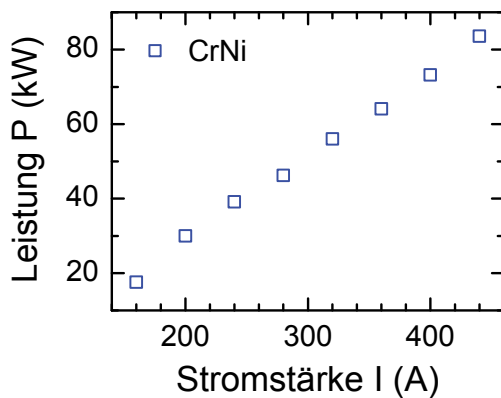


Abb. 13.1 stellt über die an der Stromquelle abgelesene Spannung den Zusammenhang zwischen eingestellter Stromstärke und Schneideleistung her. Zu beachten ist, dass auch bei mehreren Schneideversuchen nicht jede Stromstärke mit entsprechender Messgenauigkeit untersucht werden konnte. Als Werkstoff wurde Edelstahl (CrNi) gewählt.

Abb. 13.1 Leistungsbereich beim PS

13.1 Spektraler Bestrahlungsstärkeverlauf

Entgegen der Erwartung intensiver Spektrallinien im infraroten Wellenlängenbereich, liegt die Hauptemissionslinie im Schneidespektrum von Edelstahl, siehe Abb. 13.2, im Bereich des sichtbaren Lichtes bei etwa 656 nm. Weitere Emissionslinien im spektralen Bereich der Blaulichtgefährdung aber auch im UVA- oder UVC-Spektralbereich sind ebenfalls intensiver als Strahlung im Nahinfrarotbereich.

Bei der Berechnung der UV-Anteilsverhältnisse nach Gleichung (6.4) ergeben sich $\rho_{UVA} = (0,07 \pm 0,01) \%$, $\rho_{UVB} = (30 \pm 1) \%$ und $\rho_{UVC} = (70 \pm 1) \%$. Bei einem Vergleich dieser Werte mit denen in Tab. 9.1 zeigt sich kein wesentlicher Unterschied der biologisch gewichteten Strahlungsemission beim Plasmaschneiden zum Lichtbogenschweißen. Da beide Verfahren auf der Verwendung eines Lichtbogens und damit eines heißen Plasmas beruhen, ist dieses Ergebnis nicht überraschend.

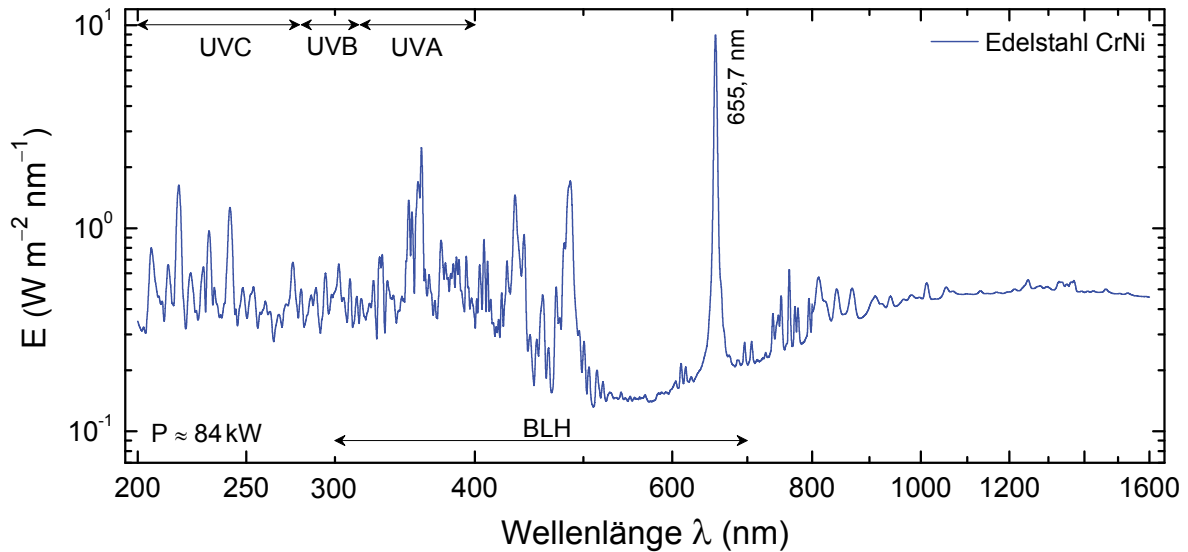


Abb. 13.2 Doppeltlogarithmische Darstellung eines Schneidespektrums von Edelstahl im ultravioletten, sichtbaren und nahinfraroten Spektralbereich bei einer Schneideleistung von ca. 84 kW. Doppelpfeile visualisieren charakteristische Wellenlängenregionen. Die Hauptemissionslinie befindet sich bei etwa 656 nm.

13.2 Schneidstromabhängige UV-Strahlungsemission

Wie bereits zu Anfang dieses Kapitels erwähnt, sind die gemessenen Bestrahlungsstärken aufgrund des räumlich nicht lokalen Schneidevorgangs mit größeren Messunsicherheiten belastet. Dies spiegelt sich in den relativ großen Fehlerbalken der leistungsabhängigen E_{UVA} - und E_{eff} -Werte in Abb. 13.3 (a) und (b) wider und erschwert die zweifelsfreie Anpassung eines mathematischen Modells an die Bestrahlungsstärken. Dennoch beschreibt eine lineare Funktion mit entsprechenden Parametern in Tab. 13.1 zufriedenstellend den leistungsabhängigen Verlauf der integralen UV-Strahlungsemission.

Während der UVA-Expositionsgrenzwert erst im Minutenbereich überschritten wird, ist das Gefährdungspotenzial der bewerteten UV-Strahlungsanteile mit Expositionzeiten im niedrigen Sekundenbereich ungleich höher. Dies beweist, dass technische, organisatorische oder persönliche Schutzmaßnahmen ebenso wie bei allen Lichtbogenschweißverfahren zwingend erforderlich sind.

13.3 Belastung durch sichtbare und infrarote Strahlungsanteile

Aber auch bei größeren Wellenlängen optischer Strahlung wie etwa im Bereich der Blaulichtgefährdung liegt ein erhöhtes Gefährdungspotenzial vor. Ähnlich wie bei den ultravioletten Strahlungsanteilen beim Schneiden von Edelstahl sind die gemessenen E_{B} -Werte mit großen Messunsicherheiten belastet, siehe Abb. 13.4 (a), wobei eine lineare mathematische Anpassung als sinnvollstes Modell erscheint. Die dazu gehörigen Fitparameter sind in Tab. 13.1 aufgelistet.

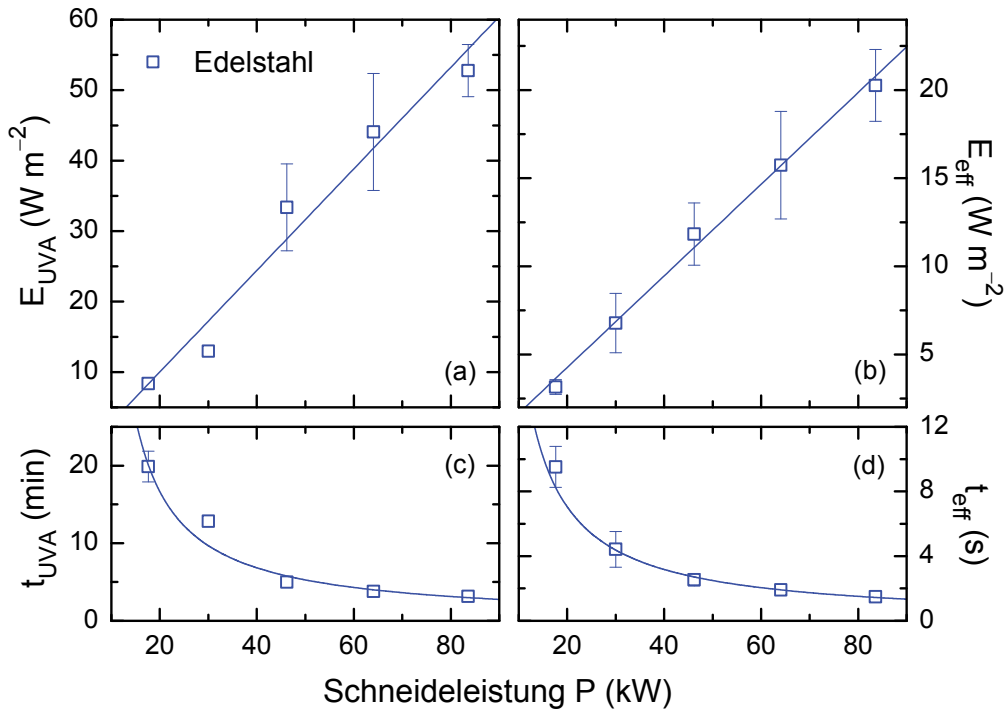


Abb. 13.3 (a) UVA- und (b) aktinische Bestrahlungsstärken beim Plasmaschneiden von Edelstahl in Abhängigkeit von der Schneidleistung. Lineare Anpassungen an die Daten erfolgen gemäß Gleichung (6.5) und den Anpassungsparametern in Tab. 13.1. In (c) und (d) sind entsprechende mit Formel (6.8) berechnete leistungsabhängige Expositionsdauern t_{UVA} und t_{eff} dargestellt.

Selbst bei mittleren Schneidleistungen wird der Expositionsgrenzwert bereits nach wenigen Sekunden überschritten. Somit darf kein direkter Blick in den Schneidlichtbogen (Hauptlichtbogen) erfolgen, da bereits durch Akkumulation von z. B. reflektierter Strahlung über einen Arbeitstag eine Überschreitung der maximal zulässigen Expositionsdauer sehr wahrscheinlich ist.

Exemplarische Messungen der Strahldichte ergaben einen Maximalwert von $L_B = 270 \text{ kW m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ entsprechend einer Expositionsdauer von $t'_B = 3,7 \text{ s}$ und in guter Übereinstimmung mit den aus Bestrahlungsstärken berechneten Expositionsdauern.

Abschließend bleiben noch infrarote Strahlungsanteile hinsichtlich ihres Gefährdungspotenzials zu betrachten. Die leistungsabhängigen Bestrahlungsstärken E_{IR}

Tab. 13.1 Anpassungsparameter nach Formel (6.5) an die Bestrahlungsstärken aus Abb. 13.3 (a) und (b), Abb. 13.4 (a) sowie aus Abb. 13.5 (a) und (b). m ist in der Einheit $\text{W m}^{-2} \text{ kW}^{-1}$ und E_0 in W m^{-2} angegeben.

	E_{UVA}	E_{eff}	E_B	E_{IR}	E_H
m	$0,72 \pm 0,08$	$0,26 \pm 0,01$	$0,65 \pm 0,02$	18 ± 2	21 ± 2
E_0	-4 ± 4	$-0,9 \pm 0,6$	-4 ± 1	-221 ± 110	-236 ± 125

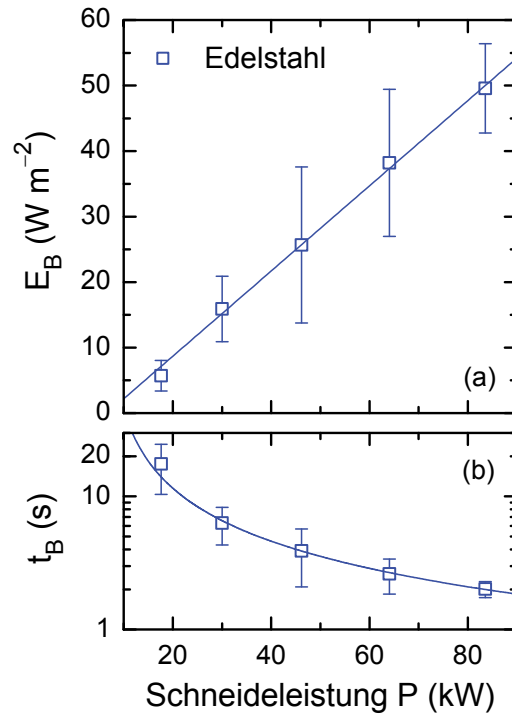


Abb. 13.4 (a) Blaulichtgewichtete leistungsabhängige Bestrahlungsstärken E_B nach Formel (4.12), gemessen beim Plasmaschneiden von Edelstahl. Die Fitparameter der linearen Anpassungsfunktion sind in Tab. 13.1 aufgeführt. (b) Aus den in (a) gezeigten Bestrahlungsstärken berechnete Expositionsdauern t_B zusammen mit einer Funktion analog zu Gleichung (6.8).

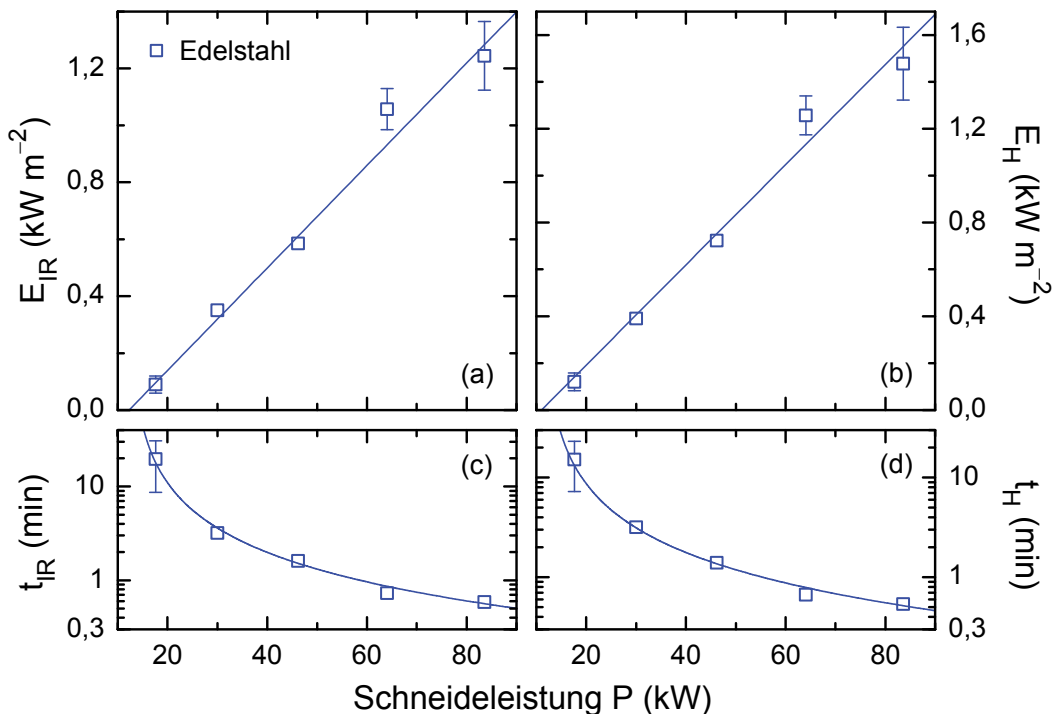


Abb. 13.5 Ungewichtete infrarote Bestrahlungsstärken (a) E_{IR} und (b) E_H als Funktion der Schneideleistung beim Plasmaschneiden von CrNi. Die Anpassungsparameter der Fitgeraden sind in Tab. 13.1 aufgeführt. In (c) und (d) sind Expositionsdauern gemäß Gleichungen (4.7) und (4.8) abgebildet.

sowie E_H in Abb. 13.5 (a) und (b) können erneut mit einer linearen Funktion beschrieben werden. Bei Betrachtung der spektralen Bestrahlungsstärke beim Plasmaschneiden von Edelstahl ließ sich bereits ein erhöhtes IR-Gefährdungspotenzial vermuten, die integralen Werte weisen nun eindeutig eine hohe infrarote Strahlungsgefährdung nach. Dies erscheint plausibel, da der Hauptlichtbogen Temperaturen von mehreren zehntausend Grad Celsius erreichen kann. Da spektral aufgelöst nur bis etwa 1600 nm gemessen wird, integral aber auch Strahlungsanteile bis 2700 nm detektiert werden, liegt der Schluss nahe, dass eine starke Emission im IRB-Spektralbereich auftritt.

Ungeachtet dessen tauchen beim Plasmaschneiden die in diesem Forschungsprojekt kürzesten maximal zulässigen Expositionsdauern t_{IR} und t_H auf. Mit Werten unterhalb einer Minute befindet sich Plasmaschneiden erwartungsgemäß an der Spitze des IR-Gefährdungspotenzials, siehe Abb. 13.6. Aber auch ultraviolette und sichtbare Strahlungsanteile weisen ein erhöhtes Schädigungsrisiko auf, so dass sich Plasmaschneiden bei den potenziell besonders gefährlichen Verfahren einreicht.

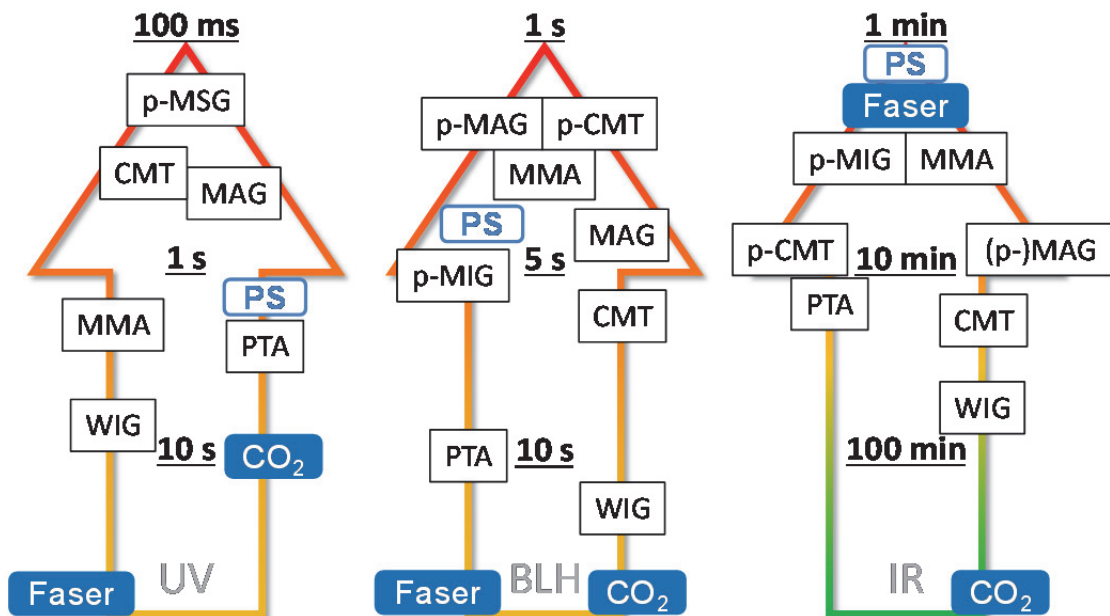


Abb. 13.6 Übersichtsgrafik der Gefährdungspotenziale im ultravioletten, sichtbaren und infraroten Spektralbereich. Die zugrunde liegenden Zeitskalen sind linear (BLH) oder logarithmisch (UV und IR). Die mittlere infrarote Expositionsdauer t_H beim Plasmaschneiden beträgt etwa 1 min.

14 Zusammenfassung und Ausblick

Einflussgrößen auf die Strahlungsemission

In der Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (OStrV) sind verbindliche Expositionsgrenzwerte festgelegt, deren Einhaltung im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung zu prüfen ist. Dies gilt auch für Expositionen gegenüber optischer Strahlung beim Schweißen. Spektraler Verlauf und Bestrahlungsstärke können allerdings je nach Schweißverfahren, Werkstoff und weiteren Schweißparametern sehr unterschiedlich sein.

- Generell zeigt sich bei allen untersuchten Lichtbogenschweißverfahren eine Zunahme der optischen Strahlenbelastung mit der Schweißstromstärke.
- Hierbei sind Verfahren mit abschmelzender Elektrode deutlich emissionsintensiver als z. B. WIG- oder PTA-Schweißen.
- Insbesondere gepulste Prozessvarianten mit Impulslichtbogen stellen das höchste Gefährdungspotenzial dar, mit einer Überschreitung der UV-Expositionsgrenzwerte in Bruchteilen einer Sekunde.
- Ummantelung (basisch oder mit Rutil) sowie Dicke einer Stabelektrode haben Auswirkungen auf die Intensität der emittierten Strahlung.
- Auch mit steigender Lichtbogenlänge erhöht sich die detektierte Bestrahlungsstärke.
- Geometrische Parameter wie Polar- und Azimutalwinkel (in Verbindung mit dem Anstellwinkel der Elektrode) sowie Abstand zum Lichtbogen haben ebenfalls entscheidenden Einfluss auf die Strahlungsexposition.

Emissionsmodelle

Die vorliegenden experimentellen Daten wurden für die Entwicklung eines mathematischen Modells zur Berechnung der Strahlungsemission als Funktion der Schweißstromstärke und des Werkstoffes verwendet. Bei der Analyse wurde jedoch deutlich, dass ein einziges Modell nicht ausreicht. Neben einer linearen Anpassung an die gemessenen Bestrahlungsstärken zeigen sich auch (doppelt-) exponentielle und sigmoidale Abhängigkeiten, maßgeblich beeinflusst durch das Schweißverfahren und die verwendete Prozessvariante.

Ein Praxistest dieser Emissionsmodelle bei handgeführten Schweißverfahren ergab im Wesentlichen eine gute Anwendbarkeit. Aufgrund der manuellen Führung der Stabelektrode durch den Schweißer treten jedoch erhebliche Schwankungen in der Strahlungsemission auf. Grundsätzlich können die Modelle nach Abstands- und Winkelkorrektur zur Expositionsabschätzung dienen.

Sichtbare und infrarote Strahlungsanteile

Weiterhin zeigen die experimentellen Untersuchungen, dass eine Gefährdung durch sichtbares Licht (Blaulichtgefährdung) sehr wahrscheinlich ist – maximal zulässige Expositionsdauern liegen hier im Sekundenbereich – und der Anteil infraroter Strahlung nicht vernachlässigt werden darf auch wenn die Expositionsgrenzwerte erst nach Minuten überschritten werden. Selbst in größeren Abständen z. B. an benachbarten Arbeitsplätzen können trotz des photometrischen Abstandsgesetzes durch direkte und reflektierte Strahlungsanteile die Expositionsgrenzwerte innerhalb eines 8h-Arbeitstages nicht immer eingehalten werden.

Strahlungsfluktuationen

Exemplarische Messungen des Zündverhaltens machen deutlich, dass innerhalb der ersten etwa 500 ms beim Aufbau des Lichtbogens eine mehr als doppelt so hohe UV-Strahlungsbelastung vorliegen kann und dies speziell bei häufig durchgeführten kurzen Schweißungen berücksichtigt werden muss. Auch nachdem der Lichtbogen stabil brennt, fluktuiert die emittierte optische Strahlung selbst bei automatischer Prozessführung stark. Personendosimetrische Messungen ergaben effektive Bestrahlungswerte von bis zu 117 kJ m^{-2} am Tag, eine 3900-fache Expositionsgrenzwertüberschreitung.

Laserschweißen und Plasmaschneiden

Während beim CO_2 -Laserschweißen eine dem WIG-Verfahren vergleichbar hohe UV-Strahlenbelastung auftritt (mittlere maximal zulässige Expositionsdauer von etwa 10 s), ist für einen Faserlaser und auch beim Plasmaschneiden die infrarote Strahlenbelastung kritisch. Hierbei wurden die in diesem Forschungsbericht höchsten IR-Bestrahlungsstärken gemessen mit einer Expositionsgrenzwertüberschreitung nahe 1 min.

Gefährdungsbeurteilung

Mit der in diesem Forschungsbericht umfassend überarbeiteten und aktualisierten Datenbasis werden Arbeitgeber zukünftig besser in der Lage sein, Gefährdungen durch optische Strahlung beim Schweißen beurteilen zu können. Bereits bei Kenntnis einiger weniger grundlegender Schweißparameter kann mit Hilfe der Emissionsmodelle schnell und ohne Messung eine Abschätzung der Strahlungsexposition am Schweißarbeitsplatz erfolgen.

UV-Schutzkomponenten

Auf Basis der vorliegenden spektralradiometrischen Messungen soll ein Schutzkonzept für noch fehlende normative Anforderungen an Schutzkleidung, insbesondere zum Schutz vor UV-Strahlung, erstellt werden (Teilprojekt 3). Dabei sind im Hinblick auf Gebrauchstauglichkeit und Akzeptanz persönlicher Schutzausrüstung abgestufte Anforderungen geplant.

Exposition in der Schweißplatzumgebung

Neben dem Schutz des Schweißers selbst sind aber auch weitere Beschäftigte an benachbarten Arbeitsplätzen oder auf Verkehrswegen wie etwa Kranführer oder Gabelstaplerfahrer vor Gefährdungen durch optische Strahlung zu schützen, da trotz des photometrischen Abstandsgesetzes auch in großer Entfernung die Expositionsgrenzwerte innerhalb eines 8 h-Arbeitstages schnell überschritten werden können. Bei entsprechenden Anforderungen an eine praxisgerechte Gestaltung solcher Arbeitsbereiche bestehen Defizite, die aktuell in einem europäischen Projekt mit dem Titel „Indirect UV- and IR-Radiation Emitted by Arcs, Flames and Thermal Radiators“ (IndIR-UV) untersucht werden. Die BAuA-Beteiligung an diesem PEROSH-Projekt (Partnership for European Research in Occupational Safety and Health) beinhaltet unter anderem, dass nach Veröffentlichung der Ergebnisse in diesem Forschungsbericht die gemessenen Daten dem EU-Projektteam bereitgestellt werden.

Nutzungsmöglichkeiten

Der Forschungsbericht konnte aufzeigen, dass beim Schweißen nicht nur ultraviolette sondern auch sichtbare und infrarote Strahlung in erheblichem Maße vom Licht-

bogen emittiert wird. Der Schweißer selbst sollte durch PSA ausreichend geschützt sein, allerdings kann es unter bestimmten Umständen oder z. B. aus praktischen Gründen zu einer ungeschützten Exposition von Passanten oder Beschäftigten an benachbarten Arbeitsplätzen, die unbewusst der Strahlung ausgesetzt sein können, kommen. Der kumulative Effekt dieser Exposition kann dann langfristig zu Erkrankungen führen (WEIKERT2014). Obwohl für Schäden durch natürliche UV-Strahlung eine Berufserkrankung anerkannt ist, fehlte für künstliche inkohärente optische Strahlung bisher eine fundierte Datenbasis. Der vorliegende Forschungsbericht kann helfen, diese Lücke zu schließen.

Bei einer Überarbeitung der Technischen Regeln zur inkohärenten optischen Strahlung (TROSIOS) sind die vorliegenden Resultate ebenfalls von Bedeutung und sollen an entsprechender Stelle eingearbeitet werden.

Literaturverzeichnis

- (89/391/EWG) Richtlinie des Rates vom 12. Juni 1989 über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer bei der Arbeit (89/391/EWG). *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft*, 1-8, 1989.
- (2006/25/EG) Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2006 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung) (19. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG). 38-59, 2006.
- (AKNIR2011) ARBEITSKREIS "NICHTIONISIERENDE STRAHLUNG" (AKNIR) FACHVERBAND FÜR STRAHLENSCHUTZ E.V. (FS), Leitfaden "Sichtbare und infrarote Strahlung". 1-45, 2011.
- (AKNIR2013) ARBEITSKREIS "NICHTIONISIERENDE STRAHLUNG" (AKNIR) FACHVERBAND FÜR STRAHLENSCHUTZ E.V. (FS), Leitfaden "Ultraviolettstrahlung künstlicher Quellen". 1-46, 2013.
- (ArbSchG) Arbeitsschutzgesetz vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), das zuletzt durch Artikel 427 der Verordnung vom 31. August 2015 (BGBl. I S. 1474) geändert worden ist. 1-11, 1996.
- (BARTH1990) BARTH, C., KNUSCHKE, P. and BARTH, J., UV Strahlenbelastung in der Umgebung von Schweißarbeitsplätzen. *Zeitschrift für die gesamte Hygiene und Ihre Grenzgebiete* **36**(12), 654-655, 1990.
- (BARTLEY1981) BARTLEY, D. L., MCKINNERY, W. N. and WIEGAND, K. R., Ultraviolet Emissions from the Arc-Welding of Aluminum-Magnesium Alloys. *American Industrial Hygiene Association Journal* **42**(1), 23-31, 1981.
- (BAuA2001) BUNDESANSTALT FÜR ARBEITSSCHUTZ UND ARBEITSMEDIZIN, Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse, Forschungsergebnisse für die Praxis, Arbeitsschutz beim Schweißen. **95**, 1-24, 2001.
- (BAuA2016) BUNDESANSTALT FÜR ARBEITSSCHUTZ UND ARBEITSMEDIZIN, Janßen, M., Ott, G., Messverfahren zur Bewertung inkohärenter optischer Strahlung. 2016.
- (BENNETT1980) BENNETT, A. P. and HARLEN, F., Measuring the UV Radiation Hazard to Welders. *Welding and Metal Fabrication* **48**(8), 541-549, 1980.
- (BGETEM2009) BERUFSGENOSSENSCHAFT ENERGIE TEXTIL ELEKTRO MEDIENERZEUGNISSE, Hautkrebs durch UV-Strahlen - eine neue Berufskrankheit. *betrifft sicherheit* (2), 10-11, 2009.
- (BGHM2013) BERUFSGENOSSENSCHAFT HOLZ UND METALL, BGI 553 Lichtbogenschweißer. 1-72, 2013.

- (BGVD1) MASCHINENBAU- UND METALL-BERUFGENOSSENSCHAFT (MMBG), BGV D1 Unfallverhütungsvorschrift Schweißen, Schneiden und verwandte Verfahren vom 1. April 1990 in der Fassung vom 1. April 2001 mit Durchführungsanweisungen vom April 2001. 1-100, 1990.
- (BRÜNING2014) BRÜNING, T., HAGEMEYER, O., WEIß, T. and ZSCHIESCHE, W., Lungenkrebs bei einem Schweißer - welche Berufskrankheit? *IPA-Journal* **3**, 6-11, 2014.
- (CHANG2008) CHANG, C., LIU, H., PENG, C., FANG, H., TSAO, T. and LAN, C., Evaluation of Erythral UV Effective Irradiance from UV Lamp Exposure. *Health Physics Society* **94**(4), 318-327, 2008.
- (DAHLBERG1971) DAHLBERG, J. A., The Intensity and Spectral Distribution of Ultraviolet Emission from Welding Arcs in Relation to the Photodecomposition of Gases. *The Annals of Occupational Hygiene* **14**(3), 259-267, 1971.
- (DENNIS1997) DENNIS, J. H., MOTRAZAVI, S. B., FRENCH, M. J., HEWITT, P. J. and REDDING, C. R., The Effects of Welding Parameters on Ultraviolet Light Emissions, Ozone and CrVI Formation in MIG Welding. *The Annals of Occupational Hygiene* **41**(1), 95-104, 1997.
- (DGUV Regel 100-500) DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG (DGUV), DGUV Regel 100-500 - Betreiben von Arbeitsmitteln. 2008.
- (DIN 1910-100) DIN 1910-100:2008-02: Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe - Teil 100: Metallschweißprozesse mit Ergänzungen zu DIN EN 14610:2005.
- (DIN 5031-102013) Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 10: Photobiologisch wirksame Strahlung, Größen, Kurzzeichen und Wirkungsspektren. 1-116, 2013.
- (DIN 8593-6) DIN 8593-6:2003-09: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 6: Fügen durch Schweißen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- (DIN EN 62471) DIN EN 62471:2009-03: Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen (IEC 62471:2006, modifiziert); Deutsche Fassung EN 62471:2008.
- (DIN EN ISO 4063) DIN EN ISO 4063:2011-03: Schweißen und verwandte Prozesse - Liste der Prozesse und Ordnungsnummern (ISO 4063:2009, Korrigierte Fassung 2010-03-01); Dreisprachige Fassung EN ISO 4063:2010.
- (DIXON2004) DIXON, A. J. and DIXON, B. F., Ultraviolet Radiation from Welding and Possible Risk. *The Medical Journal of Australia* **181**(3), 155-157, 2004.
- (EMMETT1976) EMMETT, E. A. and HORSTMAN, S. W., Factors Influencing the Output of Ultraviolet Radiation During Welding. *Journal of Occupational Medicine* **18**(1), 41-44, 1976.

- (EU-KOMMISSION2010) EUROPÄISCHE KOMMISSION, Ein unverbindlicher Leitfaden zur Richtlinie 2006/25/EG über künstliche optische Strahlung. 1-151, 2010.
- (FERRY1954) FERRY, J., Ultraviolet Emission During Inert-Arc Welding. *American Industrial Hygiene Association Quarterly* **15**(1), 73-77, 1954.
- (FISCHER1985) FISCHER, P., Gefährdungsmöglichkeiten durch UV-Strahlung im Betrieb. *Sicher ist sicher* **36**(4), 200-204, 1985.
- (FRONIUS2013) FRONIUS INTERNATIONAL GMBH, *Schweißpraxis aktuell: CMT-Technologie Cold Metal Transfer - ein neuer Metall-Schutzgas-Schweißprozess*. WEKA Media, 2013.
- (GARCIA-GUINEA2004) GARCIA-GUINEA, J., CORRECHER, V., LOMBARDELO, M. and GONZALEZ-MARTIN, R., Study of the Ultraviolet Emission of the Electrode Coatings of Arc Welding. *International Journal of Environmental Health Research* **14**(4), 285-294, 2004.
- (HECHT2014) HECHT, E., *Optik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, 2014.
- (HIETANEN1998) HIETANEN, M. and VON NANDELSTADH, P., Measurements of Optical Radiation Emitted by Welding Arcs. In: *Measurements of Optical Radiation Hazards*. Gaithersburg, Maryland, USA, 553-557, 1998.
- (HINRICHS1978) HINRICHS, J., Radiation and Arc Welding: New Data to Enhance Safety. *Welding and Metal Fabrication* **51**(2), 102-103, 1978.
- (HÖLSKEN1975) HÖLSKEN, H., Schweißen und Schneiden im Stahl- und Behälterbau, Teil III: Gefahren durch Strahlen. *Der Praktiker* **27**(1), 15-16, 1975.
- (HORSTMAN1976) HORSTMAN, S. W., EMMETT, E. A. and KREICHEL, T. E., Field Study of Potential Ultraviolet Exposure from Arc Welding. *Welding Research Supplement* **55**(5), 121-126, 1976.
- (HORSTMAN1979) HORSTMAN, S., A Critical Evaluation of the Protection Provided by Common Safety Glasses from UV Emissions in Welding Operations. *American Industrial Hygiene Association Journal* **40**(9), 770-780, 1979.
- (ICNIRP2004) INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION, Guidelines on Limits of Exposure to Ultraviolet Radiation of Wavelengths between 180nm and 400nm. *Health Physics* **87**(2), 171-186, 2004.
- (ICNIRP2010) INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION, ICNIRP Statement - Protection of Workers Against Ultraviolet Radiation. *Health Physics* **99**(1), 66-87, 2010.
- (ICNIRP2013) INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION, ICNIRP Guidelines on Limits of Exposure to Incoherent Visible and Infrared Radiation. *Health Physics* **105**(1), 74-96, 2013.

- (IFA2011) INSTITUT FÜR ARBEITSSCHUTZ DER DEUTSCHEN GESETZLICHEN UNFALLVERSICHERUNGEN, Emission von UV-Strahlung beim Elektroschweißen. 1-13, 2011.
- (INGRAM1977) INGRAM, J. W. and HORSTMAN, S. W., A Field Study of Near Ultraviolet Welding Irradiance. *American Industrial Hygiene Association Journal* **38**(9), 456-461, 1977.
- (KÄLBLE2013) KÄLBLE, B., Sich und andere effektiv schützen. *Sicherheitsbeauftragter* **48**(3), 6-8, 2013.
- (KANT2013) KANT, B., MARX, M. and WEIKERT, F., Die unsichtbaren Gefahren beim Schweißen - Gefahr durch den elektrischen Strom, durch Gase/Schweißrauch. *sicher ist sicher - Arbeitsschutz aktuell* **64**(4), 190-194, 2013.
- (KEGEL1998) KEGEL, W. H., *Plasmaphysik: Eine Einführung*. Springer Verlag, 1998.
- (KINSEY1943) KINSEY, V. E., COGAN, D. G. and DRINKER, P., Measuring Eye Flash from Arc Welding. *Journal of the American Medical Association* **123**(7), 403-404, 1943.
- (KRODER2003) KRODER, K., Mit Energie und Umsicht. *Akzente* **1**, 4-7, 2003.
- (LI2001) LI, P. and ZHANG, Y., Robust Sensing of Arc Length. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* **50**(3), 697-704, 2001.
- (LUDWIG2002) LUDWIG, T., Strahlenschutz bei Arbeiten mit thoriumhaltigen Elektroden. *Strahlenschutz-Praxis* **8**(4), 33-35, 2002.
- (LYON1976) LYON, T., Evaluation of the Potential Hazards from Actinic Ultraviolet Radiation Generated by Electric Welding and Cutting Arcs. 1976.
- (MARIUTTI1988) MARIUTTI, G. and MATZEU, M., Measurement of Ultraviolet Radiation Emitted from Welding Arcs. *Health Physics* **54**(5), 529-532, 1988.
- (MARSCHNER2012) MARSCHNER, W., Der neue DGUV-Grundsatz G17 - Künstliche optische Strahlung. *Arbeitsmed. Sozialmed. Umweltmed.* **47**(10), 568-575, 2012.
- (MARZEC2013) MARZEC, S., MATUSIAK, J., NOWICKA, J. and WYCIŚLIK, J., Optical Radiation During CMT and ColdArc Welding and Braze Welding. *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa* (5), 21-31, 2013.
- (MATTHES2016) MATTHES, K. J. and RICHTER, E., *Schweißtechnik – Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2016.

- (MOOS2013) MOOS, W., JANßEN-TIMMEN, R., KLÖPPER, J. and LEONENKO, N., Gesamtwirtschaftliche und sektorale Wertschöpfung aus der Produktion und Anwendung von Fügetechnik in Deutschland und Europa. *Schweißen und Schneiden* **65**(9), 1-13, 2013.
- (NAKASHIMA2016) NAKASHIMA, H., UTSUNOMIYA, A., FUJII, N. and OKUNO, T., Hazard of Ultraviolet Radiation Emitted in Gas Tungsten Arc Welding of Aluminium Alloys. *Industrial Health* **54**, 149-156, 2016.
- (NIST) *NIST Atomic Spectra Database Lines Form*. National Institute of Standards and Technology [Zugriff am: 12. August 2016]. Verfügbar unter: http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html
- (OKUNO1985) OKUNO, T., Spectra of Optical Radiation from Welding Arcs. *Industrial Health* **23**(1), 53-70, 1985.
- (OKUNO1986) OKUNO, T., Measurement of Blue-Light Effective Radiance of Welding Arcs. *Industrial Health* **24**(4), 213-226, 1986.
- (OKUNO1987) OKUNO, T., Measurement of Ultraviolet Radiation from Welding Arcs. *Industrial Health* **25**(3), 147-156, 1987.
- (OKUNO2001) OKUNO, T., OJIMA, J. and SAITO, H., Ultraviolet Radiation Emitted by CO₂ Arc Welding. *The Annals of Occupational Hygiene* **45**(7), 597-601, 2001.
- (OKUNO2002) OKUNO, T., SAITO, H. and OJIMA, J., Evaluation of Blue-Light Hazards from Various Light Sources. *Developments in Ophthalmology* **35**(2), 104-112, 2002.
- (OKUNO2010) OKUNO, T., Blue-Light Hazard from CO₂ Arc Welding of Mild Steel. *The Annals of Occupational Hygiene* **54**(3), 293-298, 2010.
- (OStrV) Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung vom 19. Juli 2010 (BGBl. I S. 960) - OStrV). 2010.
- (PANGERT2007) PANGERT, R., Handlungsanleitung "Schutzmaßnahmen zur Minimierung der Gefahrstoffexposition beim Schutzgasschweißen" - LASI-Veröffentlichung LV 42. *sicher ist sicher - Arbeitsschutz aktuell* (6), 279-287, 2007.
- (PENG2007a) PENG, C., LIU, H., CHANG, C., SHIEH, J. and LAN, C., Evaluation and Monitoring of UVR in Shield Metal Arc Welding Processing. *Health Physics* **93**(2), 101-108, 2007a.
- (PENG2007b) PENG, C., Exposure Assessment of Aluminum Arc Welding Radiation. *Health Physics* **93**(4), 298-306, 2007b.
- (RADESPIEL-TRÖGER2011) RADESPIEL-TRÖGER, M., Berufliche UV-Belastung und Hautkrebs. *Zentralblatt für Arbeitsmedizin, Arbeitsschutz und Ergonomie* **61**(4), 112-125, 2011.

- (REICHEL1998) REICHEL, A. and REINEKING, A., Die Messung freigesetzter dosisrelevanter Radionuklide beim Wolfram-Inertgas-Schweißen mit thorierten Elektroden. In: *Radioaktivität in Mensch und Umwelt*. Lindau: 30. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V., 33-38, 1998.
- (REKUS1991) REKUS, J. F., Strike an Arc. *Occupational Health & Safety* **60**(10), 24-25, 27-28, 30, 1991.
- (ROSSI2010) ROSSI, M. L. and VILARINHO, L. O., Measurement of Visible Ultraviolet Radiation During Arc Welding for Issues of Health and Safety at Work. *Welding International* **24**(6), 432-438, 2010.
- (SCHELLHASE1985) SCHELLHASE, M., *Der Schweißlichtbogen - ein technologisches Werkzeug*. 1985.
- (SIEKMANN2011) SIEKMANN, H., Instrumente zur UV-Expositionsermittlung aus Sicht der Prävention. *Dermatologie in Beruf und Umwelt* **59**(2), 60-66, 2011.
- (SLINEY1980) SLINEY, D. and WOLBARSHT, M., Welding Arcs. In: *Safety with Lasers and other Optical Sources*. New York: Plenum Press, 801-859, 1980.
- (SPIEGEL-CIOBANU2011) SPIEGEL-CIOBANU, V. E., Arbeitsschutzregelungen beim Schweißen - Bewertung der Schweißrauchexposition und deren Wirkung. *Schweißen und Schneiden* **63**(9), 528-535, 2011.
- (SUTTER1995a) SUTTER, E. and SCHIRMACHER, A., Der zeitliche Verlauf der Leuchtdichte beim Zünden von Schweißlichtbögen - Teil 1. *Technische Überwachung* **36**(10), 383-388, 1995a.
- (SUTTER1995b) SUTTER, E. and SCHIRMACHER, A., Der zeitliche Verlauf der Leuchtdichte beim Zünden von Schweißlichtbögen - Teil 2. *Technische Überwachung* **36**(11/12), 446-448, 1995b.
- (SUTTER2008) SUTTER, E., *Schutz vor optischer Strahlung*. Berlin und Offenbach: VDE Verlag, 2008.
- (TENKATE1997) TENKATE, T. S. D. and COLLINS, M. J., Personal Ultraviolet Radiation Exposure of Workers in a Welding Environment. *American Industrial Hygiene Association Journal* **58**(1), 33-38, 1997.
- (TENKATE1998) TENKATE, T. D., Optical Radiation Hazards of Welding Arcs. *Reviews on Environmental Health* **13**(3), 131-146, 1998.
- (TIETZE1998) TIETZE, A., WITKOWSKI, N., BIEHL, R. and PILWAT, G., Strahlenexposition durch Inhalation von Thoriumisotopen beim Schweißen mit Wolframelektroden mit Thoriumdioxid. *Schweißen und Schneiden* **50**(2), 109-110, 112, 1998.
- (TRGS528) AUSSCHUSS FÜR GEFAHRSTOFFE (AGS), Technische Regeln für Gefahrstoffe, Schweißtechnische Arbeiten (TRGS 528). 1-29, 2009.

- (TROSIOS) BUNDESMINISTERIUM FÜR ARBEIT UND SOZIALES (BMAS), Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS IOS). *Gemeinsames Ministerialblatt* **65-67**, 1302-1379, 2013.
- (TROSLASER) BUNDESMINISTERIUM FÜR ARBEIT UND SOZIALES (BMAS), Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS). *Gemeinsames Ministerialblatt* **12-15**, 211-305, 2015.
- (ULLRICH1976) ULLRICH, O. A. and EVANS, R. M., *Ultraviolet Reflectance of Paint*. American Welding Society, 1976.
- (WEIKERT2010a) WEIKERT, F., *Sicherheitshandbuch Schweissarbeiten*. Erich Schmidt Verlag, 2010a.
- (WEIKERT2010b) WEIKERT, F., Unfälle und Brände durch Schweißarbeiten in der Land- u. Forstwirtschaft. *sicher ist sicher - Arbeitsschutz aktuell* (4), 167-170, 2010b.
- (WEIKERT2013) WEIKERT, F., MARX, M., SCHETTLER, P. and WEBER, C., Arbeitsunfälle beim Schweißen - Verletzungen an Hand und Fuß. *sicher ist sicher - Arbeitsschutz aktuell* (7-8), 362-365, 2013.
- (WEIKERT2014) WEIKERT, F., Arbeitsunfälle der Berufsgruppe Schweißer und Brennschneider einschließlich Lötter. *sicher ist sicher - Arbeitsschutz aktuell* (6), 332-335, 2014.
- (WILKINSON1985) WILKINSON, F. J., Radiation Hazards with Welding. *Safety in Australia*, 18-24, 1985.
- (WITTLICH2011) WITTLICH, M., Expositionsermittlung beim Schweißen und bei Gasbrennern. *Dermatologie in Beruf und Umwelt* **59**(2), 67-69, 2011.
- (ZHANG2009) ZHANG, Z. and ZHANG, F., Spectral Analysis of Welding Plasma of Magnesium Alloy Using Flux Coated Wire. *Materials Transactions* **50**(8), 1909-1914, 2009.

Anhang

A. Stromstärkenabhängigkeit der spektralen Bestrahlungsstärke

Im vorliegenden Forschungsbericht wurden Schweißspektren verschiedener Verfahren, Prozessvarianten und Werkstoffe zum besseren Vergleich untereinander stets nur bei einer Schweißstromstärke I_M gezeigt, mit dem Hinweis auf eine von I_M unabhängige spektrale Verteilung. Der Beweis dafür fehlte aber bisher und wird nun exemplarisch für gepulstes MAG-Schweißen von Baustahl in Abb. A. 1 nachgeholt.

Soweit es die spektrale Auflösung zulässt, ist in Abb. A. 1 keine Veränderung der spektralen Verteilung durch eine Veränderung der Schweißstromstärke zu erkennen. Dies ist plausibel, da es sich um Emissionslinien eines Plasmas handelt und zumindest im zugänglichen Leistungsbereich der Schweißstromquelle keine zusätzlichen Emissionslinien angeregt werden.

Eine deutliche Änderung ist aber im Absolutwert der Bestrahlungsstärke zu erkennen, die, wie in Kapitel 8 umfangreich erläutert, mit steigender Schweißstromstärke zunimmt.

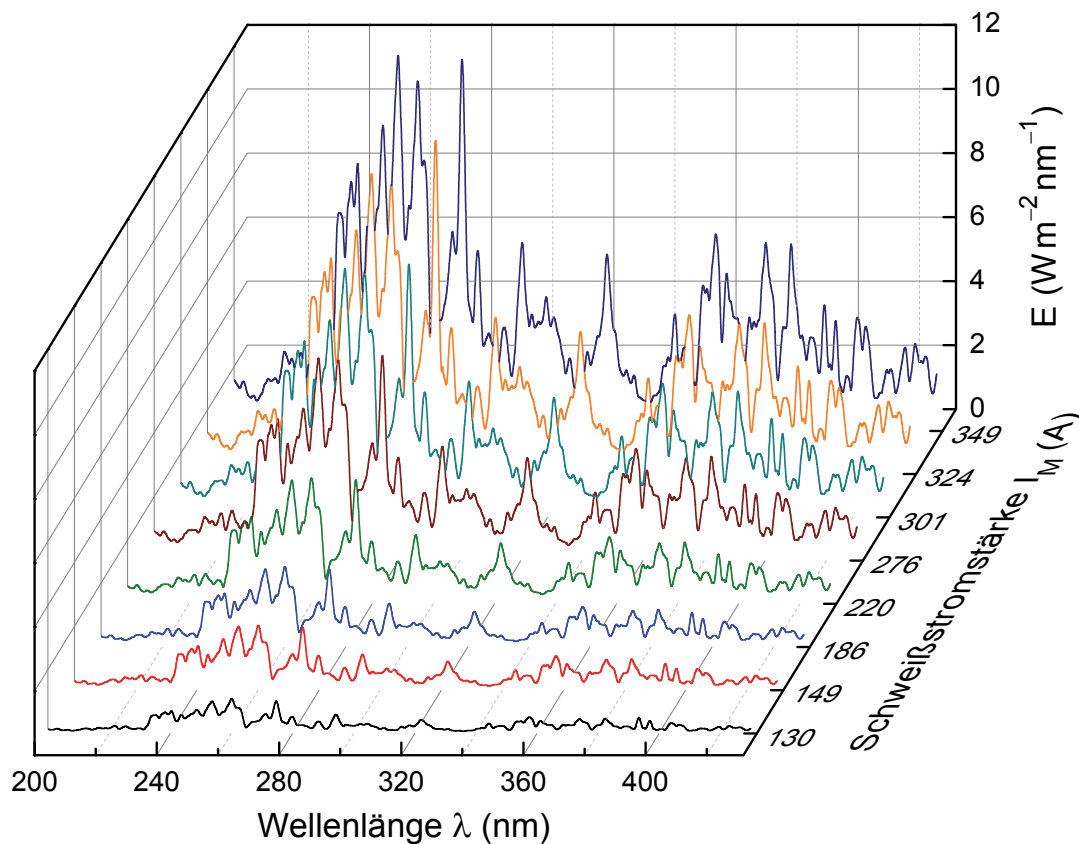


Abb. A. 1 Spektrale Bestrahlungsstärke beim gepulsten MAG-Schweißen von Baustahl (S235) als Funktion der mittleren Schweißstromstärke I_M . Zur besseren Übersicht ist nur der UV-Spektralbereich zwischen 200 und 430 nm sowie eine Auswahl an Schweißstromstärken gezeigt.

B. Tabellarische Übersicht der Schweißparameter

In den folgenden Tabellen Tab. A. 1 - Tab. A. 11 sind alle Stromstärken und Spannungen (sofern verfahrenstechnisch vorhanden) sowie die daraus resultierenden Schweiß- und Schneideleistungen für die in diesem Forschungsprojekt untersuchten Schweiß- und Schneideverfahren in der SLV Halle aufgeführt. Weitere bisher noch nicht thematisierte Parameter bzw. Einstellmöglichkeiten, die im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen nicht variiert wurden, nicht durchgestimmt werden konnten oder einer automatischen Regelung durch die Stromquelle unterlagen, sind ebenfalls aufgeführt. Dazu zählen (sofern beim jeweiligen Verfahren vorhanden)

- der Elektrodenabstand E_A ,
- die Schweißgeschwindigkeit v_S ,
- die Drahtvorschubgeschwindigkeit v_D ,

beim Schweißen mit Impulslichtbogen

- der mittlere Pulsstrom I_P ,
- der mittlere Grundstrom I_G ,
- die Pulsfrequenz f_P sowie

beim Plasmaschneiden

- die Schneidhöhe h_S .

Die tabellarische Übersicht dient neben dem Zweck der Dokumentation vor allem auch zum Ablesen der elektrischen Lichtbogenleistung bei bekannter Stromstärke. Auch wenn die Schweißspannung von der Stromquelle automatisch geregelt wird und diese Regelung zu einem gewissen Maß herstellerspezifisch ist, gestatten die folgenden Tabellen dennoch eine Abschätzung der optischen Strahlenbelastung durch Vergleich mit Kapitel 8 „Optische Strahlung beim Lichtbogenschweißen“.

Tab. A. 1 Auflistung zusätzlicher Schweißparameter beim WIG-Schweißen mit Gleichstrom: mittlerer Schweißstrom I_M (in A), mittlere Schweißspannung U_M (in V), mittlere Leistung P_M (in kW) und Elektrodenabstand E_A (in mm). Die Schweißgeschwindigkeit v_s betrug beim Schweißen auf S235 37 cm min⁻¹ und auf CrNi 27 cm min⁻¹.

	I_M	U_M	P_M	E_A
S235	80,8	12,4	1,0	2,4
	81,6	12,5	1,0	
	101,2	12,8	1,3	
	120,4	13,6	1,6	
	141,4	14,3	2,0	
	161,2	14,6	2,4	
	181,4	15,3	2,8	
	199,1	15,8	3,1	
	222,8	16,3	3,6	
	221,4	16,4	3,6	
	242,1	17,2	4,2	
	260,6	17,6	4,6	
	282,6	18,3	5,2	
	282,6	18,2	5,1	
	282,6	18,2	5,1	
	302,4	19,4	5,9	
	242,3	18,5	4,5	
	242,2	18,8	4,6	
	302,0	19,2	5,8	
	301,9	18,8	5,7	
	301,9	18,8	5,7	
	301,9	18,8	5,7	
	302,0	19,0	5,7	
	302,0	18,9	5,7	
	302,0	18,5	5,6	
	302,0	18,5	5,6	
	301,9	18,6	5,6	
	161,1	13,95	2,2	
161,1	14,38	2,3	2,3	
161,1	14,81	2,4	2,6	
161,0	14,80	2,4	2,9	
161,0	15,02	2,4	3,2	
160,9	15,27	2,5	3,5	
160,9	15,40	2,5	3,8	
S235	160,9	15,42	2,5	4,1
	161,0	15,65	2,5	4,4
	160,9	15,73	2,5	4,7
	160,9	16,09	2,6	5,0
	160,9	14,52	2,3	2,1
	160,9	14,72	2,4	2,4
	160,9	14,94	2,4	2,7
	160,9	15,15	2,4	3,0
	160,9	15,35	2,5	3,3
	160,8	15,53	2,5	3,6
	160,8	15,73	2,5	3,9
	160,9	15,88	2,6	4,2
	160,8	15,97	2,6	4,5
	160,8	16,08	2,6	4,8
	160,8	16,21	2,6	5,1
	161,4	15,5	2,5	2,4
	161,3	16,6	2,7	
	161,3	16,9	2,7	
	161,3	16,3	2,6	
	161,4	15,7	2,5	
161,4	15,2	2,5		
161,4	16,4	2,6		
161,4	17,0	2,7		
CrNi	80,8	11,4	0,9	2,4
	100,9	12,7	1,3	
	121,4	12,4	1,5	
	141,0	13,5	1,9	
	161,5	14,9	2,4	
	181,4	14,5	2,6	
	201,7	15,7	3,2	
	222,3	17,1	3,8	
	243,2	16,9	4,1	
	262,3	17,9	4,7	
242,0	18,1	4,4		

Tab. A. 2 Auflistung zusätzlicher Schweißparameter beim WIG-Schweißen mit 50 Hz-Wechselstrom: effektiver mittlerer Schweißstrom I_M (in A), effektive mittlere Schweißspannung U_M (in V) und effektive mittlere Leistung P_M (in kW). Die Schweißgeschwindigkeit betrug $v_S = 33 \text{ cm min}^{-1}$ und der Elektrodenabstand $E_A = 2,4 \text{ mm}$.

	I_M	U_M	P_M
Al-11	144,7	16,3	2,4
	156,2	16,6	2,6
	167,2	17,8	3,0
	178,3	17,1	3,0
	189,7	16,9	3,2
	201,0	16,8	3,4
	211,3	18,1	3,8
	221,7	17,8	3,9
	229,5	17,9	4,1
	237,3	18,2	4,3
	237,3	18,3	4,3
	228,6	18,3	4,2
	228,7	18,2	4,2
	228,5	19,0	4,3
	236,4	18,4	4,3

	I_M	U_M	P_M
Al-13	145,6	16,7	2,4
	157,0	17,5	2,7
	168,0	17,8	3,0
	179,4	18,4	3,3
	190,2	18,5	3,5
	201,5	19,0	3,8
	211,8	19,7	4,2
	220,1	18,6	4,1
	229,0	18,8	4,3
	237,8	19,5	4,6
	219,8	19,3	4,2
	219,8	19,3	4,2
	219,9	19,9	4,4

Tab. A. 3 Auflistung zusätzlicher Schweißparameter beim MAG-Schweißen mit Gleichstrom: mittlerer Schweißstrom I_M (in A), mittlere Schweißspannung U_M (in V), mittlere Leistung P_M (in kW) und Drahtvorschubgeschwindigkeit v_D (in m min^{-1}). Die Schweißgeschwindigkeit betrug $v_S = 42 \text{ cm min}^{-1}$. (Teil 1)

	I_M	U_M	P_M	v_D	
S235 - 1	136,4	17,5	2,4	3,2	
	157,5	18,8	3,0	3,7	
	157,4	18,7	2,9	3,7	
	182,4	19,7	3,6	4,5	
	208,8	20,0	4,2	5,5	
	229,8	21,6	5,0	6,4	
	246,5	23,9	5,9	7,1	
	268,7	26,4	7,1	7,8	
	287,1	28,9	8,3	8,5	
	310,7	29,8	9,3	9,5	
	338,4	31,2	10,6	10,5	
	135,3	17,5	2,4	3,2	
	159,5	18,7	3,0	3,7	
	183,2	19,7	3,6	4,5	
	207,7	20,0	4,2	5,5	
	231,0	21,6	5,0	6,4	
	253,6	23,8	6,0	7,1	
	269,2	26,4	7,1	7,8	
	290,0	28,9	8,4	8,5	
	S235 - 2	316,3	29,7	9,4	9,5
341,0		30,8	10,5	10,5	
137,2		17,5	2,4	3,2	
183,4		19,7	3,6	4,5	
229,8		21,6	5,0	6,4	
269,7		26,4	7,1	7,8	
315,4		29,7	9,4	9,5	
342,6		30,7	10,5	10,5	
257,6		26,7	6,9	7,8	
259,0		26,7	6,9	7,8	
260,2		26,7	6,9	7,8	
256,5		26,8	6,9	7,8	
S235 - 1		258,3	26,7	6,9	7,8
		265,6	26,5	7,0	7,8
		255,0	26,8	6,8	7,8
		256,2	26,7	6,8	7,8
		257,8	26,7	6,9	7,8
		256,0	26,8	6,9	7,8
		255,4	26,8	6,8	7,8
		256,3	26,8	6,9	7,8
	135,3	17,5	2,4	3,2	
	159,5	18,7	3,0	3,7	
S235 - 2	183,2	19,7	3,6	4,5	
	207,7	20,0	4,2	5,5	
	231,0	21,6	5,0	6,4	
	253,6	23,8	6,0	7,1	
	269,2	26,4	7,1	7,8	
	290,0	28,9	8,4	8,5	
	316,3	29,7	9,4	9,5	
	341,0	30,8	10,5	10,5	
	253,8	26,8	6,8	7,8	
	252,8	26,8	6,8	7,8	
S235 - 2	253,2	26,8	6,8	7,8	
	254,6	26,8	6,8	7,8	
	255,1	26,7	6,8	7,8	
	257,3	26,7	6,9	7,8	
	250,9	26,8	6,7	7,8	
	253,6	26,8	6,8	7,8	
	255,7	26,7	6,8	7,8	
	254,7	26,7	6,8	7,8	
	255,1	26,8	6,8	7,8	
	253,6	26,8	6,8	7,8	

Tab. A. 4 Auflistung zusätzlicher Schweißparameter beim MAG-Schweißen mit Gleichstrom: mittlerer Schweißstrom I_M (in A), mittlere Schweißspannung U_M (in V), mittlere Leistung P_M (in kW) und Drahtvorschubgeschwindigkeit v_D (in m min^{-1}). Die Schweißgeschwindigkeit betrug $v_S = 42 \text{ cm min}^{-1}$. (Teil 2)

	I_M	U_M	P_M	v_D
S235 - 3	137,2	17,5	2,4	3,2
	183,4	19,7	3,6	4,5
	229,8	21,6	5,0	6,4
	269,7	26,4	7,1	7,8
	315,4	29,7	9,4	9,5
	342,6	30,7	10,5	10,5
	258,4	26,7	6,9	7,8
	257,4	26,7	6,9	7,8
	256,3	26,7	6,8	7,8
	254,0	26,7	6,8	7,8
	258,9	26,7	6,9	7,8
	CNI	124,3	17,3	2,2
140,8		17,6	2,5	3,7
160,1		18,6	3,0	4,5
178,8		19,4	3,5	5,3

	I_M	U_M	P_M	v_D
CNI	200,9	20,6	4,1	6,2
	213,7	22,4	4,8	7,0
	228,9	24,0	5,5	7,7
	246,6	25,7	6,3	8,5
	260,1	27,3	7,1	9,2
	278,9	29,0	8,1	10,0
	230,7	24,9	5,7	8,1
	244,3	26,9	6,6	8,9
	262,5	28,3	7,4	9,6
	282,0	29,5	8,3	10,6
	292,6	29,8	8,7	11,2
	302,0	30,1	9,1	11,8
	302,8	30,6	9,3	12,4
	313,2	30,8	9,6	13,0
	225,1	25,0	5,6	8,1

Tab. A. 5 Auflistung zusätzlicher Schweißparameter beim gepulsten MAG-Schweißen mit Gleichstrom: mittlerer Schweißstrom I_M (in A), mittlere Schweißspannung U_M (in V), mittlere Leistung P_M (in kW), mittlerer Pulsstrom I_P (in A), mittlerer Grundstrom I_G (in A), Pulsfrequenz f_P (in Hz) und Drahtvorschubgeschwindigkeit v_D (in m min^{-1}). Die Schweißgeschwindigkeit betrug $v_S = 42 \text{ cm min}^{-1}$.

	I_M	U_M	P_M	I_P	I_G	f_P	v_D
p-S235	129,5	21,9	2,8	393,2	29,9	102,6	3,8
	148,9	23,0	3,4	387,7	36,3	127,1	4,5
	171,9	24,2	4,2	389,3	38,8	154,9	5,3
	185,7	25,5	4,7	401,0	41,6	170,6	6,0
	219,1	26,7	5,8	416,4	60,7	183,8	7,0
	253,1	28,0	7,1	420,2	82,0	209,8	8,0
	275,6	29,4	8,1	423,4	100,5	220,5	8,9
	300,6	30,8	9,3	428,9	122,3	239,5	9,8
	323,6	32,2	10,4	433,4	143,3	259,4	10,6
	349,4	33,4	11,7	437,8	178,5	282,1	11,5
p-CrNi	112,9	20,0	2,3	362,0	12,5	117,1	3,8
	127,9	21,1	2,7	347,4	22,1	140,0	4,5
	146,2	22,1	3,2	347,3	26,1	157,9	5,2
	165,1	23,2	3,8	350,0	32,1	180,6	5,9
	182,7	24,2	4,4	350,5	36,3	198,6	6,7
	206,4	24,9	5,1	355,3	49,4	225,6	7,5
	225,5	25,9	5,8	356,4	62,1	242,0	8,3
	242,3	27,0	6,5	354,0	77,4	268,3	9,1
	258,2	28,0	7,2	347,9	95,7	283,4	9,9
	290,3	28,4	8,2	368,9	133,6	292,0	11,0
	226,0	26,7	6,0	353,4	63,8	261,4	8,7
	239,5	27,9	6,7	339,4	59,1	275,1	9,5
	255,4	28,8	7,4	355,2	96,3	300,3	10,4
	248,8	28,5	7,1	346,1	81,5	300,8	10,4
	270,7	30,1	8,1	347,5	121,2	323,8	11,6
	286,1	30,6	8,8	357,1	154,4	334,3	12,2
	300,8	31,3	9,4	356,0	176,5	363,3	12,8
	308,6	31,2	9,6	369,3	192,3	343,0	13,3
	326,5	31,7	10,4	361,4	216,2	324,4	13,9
	317,3	32,4	10,3	354,1	221,0	341,1	13,9

Tab. A. 6 Auflistung zusätzlicher Schweißparameter beim gepulsten MIG-Schweißen mit Gleichstrom: mittlerer Schweißstrom I_M (in A), mittlere Schweißspannung U_M (in V), mittlere Leistung P_M (in kW), mittlerer Pulsstrom I_P (in A), mittlerer Grundstrom I_G (in A), Pulsfrequenz f_P (in Hz) und Drahtvorschubgeschwindigkeit v_D (in m min^{-1}). Die Schweißgeschwindigkeit betrug $v_S = 40 \text{ cm min}^{-1}$.

	I_M	U_M	P_M	I_P	I_G	f_P	v_D
Al-11	118,6	20,5	2,4	307,1	57,1	150,8	7,3
	138,7	21,4	3,0	306,8	70,8	168,4	8,4
	157,9	22,4	3,5	309,1	83,8	184,0	9,5
	176,2	23,6	4,2	311,2	94,0	202,5	10,5
	198,6	24,5	4,9	315,4	107,8	225,7	11,6
	217,8	25,6	5,6	317,1	122,2	248,2	12,7
	229,9	26,4	6,1	318,1	137,0	268,3	13,7
	249,1	27,5	6,9	342,0	151,3	268,4	14,9
	268,2	28,6	7,7	365,9	164,6	254,8	16,1
	292,1	29,5	8,6	390,6	181,9	261,4	17,3
Al-13	113,0	21,1	2,4	300,6	50,9	152,0	7,3
	131,1	22,3	2,9	299,6	61,9	170,8	8,4
	148,0	23,5	3,5	298,7	73,7	184,6	9,5
	166,8	24,5	4,1	301,9	84,3	202,7	10,5
	188,1	25,5	4,8	305,1	97,2	225,7	11,6
	207,2	26,6	5,5	306,7	111,5	248,2	12,7
	220,4	27,3	6,0	308,7	127,4	268,3	13,7
	236,4	28,8	6,8	329,4	138,5	268,3	14,9
	252,6	30,2	7,6	350,7	149,2	254,8	16,1
	264,9	30,7	8,1	360,8	159,1	261,4	16,7
	272,2	31,5	8,6	371,1	162,2	261,4	17,3
	282,2	32,0	9,0	382,5	171,7	261,5	17,9

Tab. A. 7 Auflistung zusätzlicher Schweißparameter beim CMT-Schweißen mit Gleichstrom: mittlerer Schweißstrom I_M (in A), mittlere Schweißspannung U_M (in V), mittlere Leistung P_M (in kW), mittlerer Pulsstrom I_P (in A), mittlerer Grundstrom I_G (in A), Pulsfrequenz f_P (in Hz) und Drahtvorschubgeschwindigkeit v_D (in m min⁻¹). Die Schweißgeschwindigkeit v_S betrug bei Schweißungen auf dem Werkstoff S235 42 cm min⁻¹ und auf Aluminium 40 cm min⁻¹.

	I_M	U_M	P_M	I_P	I_G	f_P	v_D
S235	77,1	13,2	1,0	–	–	–	1,6
	77,1	13,1	1,0	–	–	–	1,6
	95,0	14,4	1,4	–	–	–	2,3
	116,0	16,6	1,9	–	–	–	3,2
	137,1	18,4	2,5	–	–	–	4,2
	159,3	19,2	3,1	–	–	–	4,8
	176,8	18,7	3,3	–	–	–	5,6
	192,6	19,5	3,8	–	–	–	6,3
	218,2	21,3	4,6	–	–	–	7,4
	227,2	22,7	5,2	–	–	–	8,6
239,4	23,0	5,5	–	–	–	9,0	
p-S235	77,6	21,4	1,7	453,9	19,9	75,0	2,6
	99,2	23,2	2,3	467,0	19,7	95,5	3,3
	119,6	24,6	2,9	470,0	22,7	116,8	4,0
	133,8	25,8	3,5	450,6	32,3	140,4	4,6
	157,1	26,2	4,1	466,8	33,3	144,0	5,3
	175,2	27,0	4,7	464,6	35,3	157,8	6,1
	188,1	27,6	5,2	465,2	44,5	171,2	7,1
	209,9	28,4	6,0	475,8	54,9	186,7	7,8
	230,0	29,4	6,8	472,2	64,7	206,7	8,6
	251,3	30,1	7,6	475,2	75,2	230,4	9,6
Al-1	66,6	17,2	1,1	357,6	49,9	74,8	4,2
	83,1	19,1	1,6	372,3	64,3	76,6	5,4
	102,1	20,7	2,1	392,6	81,3	81,2	6,6
	122,1	21,6	2,6	419,0	98,6	88,2	7,6
	144,6	22,7	3,3	395,7	122,1	120,5	8,4
	162,8	24,4	4,0	360,4	146,1	140,4	9,2
	183,6	25,3	4,6	375,6	166,3	168,9	10,2
	198,0	25,0	5,0	369,0	186,5	208,9	11,4
	220,3	26,5	5,8	378,6	203,4	221,4	12,2
	239,1	27,4	6,6	385,8	230,9	240,7	13,0

Tab. A. 8 Auflistung zusätzlicher Schweißparameter beim Lichtbogenhandschweißen mit Gleichstrom: mittlerer Schweißstrom I_M (in A), mittlere Schweißspannung U_M (in V), mittlere Leistung P_M (in kW) und Elektrodendurchmesser D (in mm). Die dick Rutil ummantelte Elektrode war negativ gepolt, die basisch ummantelte Elektrode positiv.

	I_M	U_M	P_M	D
S235 - RR	80,4	25,0	2,0	2,5
	89,8	28,0	2,5	
	98,8	29,7	2,9	
	98,7	29,7	2,9	
	102,2	23,7	2,4	3,2
	120,7	27,2	3,3	
	120,6	27,5	3,3	
	121,6	25,9	3,1	
	138,9	30,9	4,3	
	138,9	31,0	4,3	4,0
	163,3	25,2	3,1	
	178,6	30,5	5,4	
	180,2	27,6	5,0	
	198,8	31,1	6,2	
	198,2	32,1	6,4	5,0
	198,5	33,2	6,6	
	219,5	32,4	7,1	
	236,4	37,8	8,9	
	237,6	35,8	8,5	
	197,7	32,1	6,3	
205,0	36,2	7,4		
216,9	36,4	7,9		
226,5	35,3	8,0		
236,3	37,4	8,8		
237,0	36,2	8,6		

	I_M	U_M	P_M	D
S235 - B	68,8	27,6	1,9	2,5
	79,4	26,7	2,1	
	91,4	25,5	2,3	
	101,4	25,5	2,6	3,2
	122,3	25,0	3,1	
	141,0	27,6	3,9	
	162,7	26,8	4,4	4,0
	180,3	27,8	5,0	
	201,4	27,2	5,5	5,0
	222,7	27,1	6,0	
	223,8	25,5	5,7	
	242,2	28,3	6,9	
	262,5	32,2	8,5	
	283,9	30,4	8,6	
	232,2	25,6	5,9	
	239,2	32,4	7,8	
	251,1	28,1	7,1	
	252,7	25,7	6,5	
	264,8	27,5	7,3	
	272,2	28,5	7,8	
283,1	30,6	8,7		
283,8	29,6	8,4		

Tab. A. 9 Auflistung zusätzlicher Schweißparameter beim PTA-Schweißen mit Gleichstrom und negativ gepolter Elektrode: mittlerer Schweißstrom I_M , mittlere Schweißspannung U_M und mittlere Leistung P_M . Die Schweißgeschwindigkeit betrug $v_S = 18 \text{ cm min}^{-1}$.

	I_M (A)	U_M (V)	P_M (kW)
S235	83,6	27,7	2,3
	103,8	29,1	3,0
	124,5	30,3	3,8
	144,7	31,7	4,6
	164,1	34,0	5,6
	184,5	35,7	6,6
	73,3	26,6	1,9
	93,2	27,9	2,6
	113,3	29,1	3,3
	133,3	30,1	4,0
	153,4	31,0	4,8
	173,4	32,7	5,7
	193,2	34,9	6,7
	203,1	36,9	7,5

Tab. A. 10 Auflistung zusätzlicher Schweißparameter beim Laserschweißen: Einstelleistung P (in kW) und Schweißgeschwindigkeit v_S (in cm min^{-1}).

		P	v_S
Faserlaser	S235	1	184
		2	
		3	
		4	
		5	
		6	
		7	
		8	
		10	
		11	
		12	
		CrNi	
	8		
	10		
	12		
Al	2	236	
	8		
	10		

		P	v_S
CO ₂ -Laser	S235	0,98	50
		1,54	
		2,10	
		2,94	
		3,50	
		0,98	
	CrNi	1,54	
		2,10	
		2,94	
		3,50	
		0,98	
	Al	1,54	

Tab. A. 11 Auflistung zusätzlicher Parameter beim Plasmaschneiden: Einstellschneidestrom I , mittlere Schneidespannung U_M , mittlere Schneideleistung P_M und Schneidhöhe h_S .

	I (A)	U_M (V)	P_M (kW)	h_S (mm)
CrNi	160	110	17,6	4,5
	200	150	30,0	4,5
	280	165	46,2	6,0
	360	178	64,1	6,0
	440	190	83,6	6,0

C. Berechnungsbeispiele der Strahlungsexposition

Im Folgenden soll exemplarisch aufgezeigt werden, wie anhand einiger weniger Überlegungen die Emission optischer Strahlung beim Schweißen abgeschätzt werden kann.

Beispiel 1

Ein Vorarbeiter durchquert jeden Morgen bei seinem Kontrollgang die Schweißhalle und passiert dabei zwei WIG- und zwei MAG-Schweißarbeitsplätze, zu seiner linken und rechten Seite, im Abstand von etwa 2 m. Obwohl Schweißschutzhänge verwendet werden, ist die Abschirmung des Lichtbogens unvollständig und der Vorarbeiter ist der optischen Strahlung jeweils etwa 1 s ausgesetzt (kein direkter Blick in den Lichtbogen). Typischerweise wird Baustahl geschweißt, bei WIG durchschnittlich mit 200 A (DC) und bei MAG mit 300 A (ungepulst). Wie hoch ist seine tägliche Strahlungsexposition?

- WIG:
Durch einen Vergleich mit Abb. 8.1 erhält man bei einer Schweißstromstärke von 200 A (DC) ungefähr eine Lichtbogenleistung von 3,1 kW. Die aktinische Bestrahlungsstärke ist beim Lichtbogenschweißen stets restriktiver als die ungewichtete UVA-Bestrahlungsstärke. Damit sind in Tab. 8.2 die Anpassungsparameter für „UV, gewichtet“ zu wählen und basierend auf einem linearen Emissionsmodell, Formel (10.1), ergibt sich bei 3,1 kW ein E_{eff} von etwa 4 W m^{-2} . Mit Hilfe der Abstandskorrektur aus Gleichung (10.4) folgt in einer Entfernung von 2 m zum Lichtbogen der E_{eff} -Wert zu 1 W m^{-2} . Da der Vorarbeiter zwei WIG-Schweißarbeitsplätze passiert, verdoppelt sich dieser Wert.
- MAG:
Auf gleiche Weise kann die Strahlungsbelastung beim MAG-Schweißen berechnet werden: Aus Abb. 8.7 folgt bei 300 A eine Lichtbogenleistung von ca. 9 kW. Mit Hilfe der Anpassungsparameter aus Tab. 8.5 ergibt sich bei dieser Leistung $E_{\text{eff}} = 100 \text{ W m}^{-2}$. Im Abstand von 2 m tritt nur noch ein Viertel dieser Strahlung auf und bei zwei Schweißarbeitsplätzen ergibt sich schließlich ein E_{eff} -Wert von 50 W m^{-2} .

In Summe bedeutet dies, dass innerhalb der 4 s-Expositionsdauer eine biologisch wirksame Bestrahlungsstärke von $E_{\text{eff}} = 52 \text{ W m}^{-2}$ auf die Haut des Vorarbeiters trifft. Die Gesamtbestrahlung folgt nach Gleichung (4.11) (b) somit zu $H_{\text{eff}} = 208 \text{ J m}^{-2}$, was einer etwa 7-fachen Expositionsgrenzwertüberschreitung entspricht.

Als Konsequenz dieser einfachen Berechnung folgt, dass der Vorarbeiter bei seinem täglichen Kontrollgang besser vor optischer Strahlung geschützt werden muss. Eine einfache aber effektive Schutzmaßnahme wäre, die vom Vorarbeiter passierten Schweißarbeitsplätze besser nach Außen gegenüber optischer Strahlung abzusichern. Gemäß dem STOP-Prinzip sind auch organisatorische Schutzmaßnahmen wie etwa ein Pausieren des Schweißbetriebes bei Anwesenheit des Vorarbeiters denkbar.

Beispiel 2

Bei einer CMT-Schweißstromstärke von 225 A soll ein Lehrling mit gepulster Prozessvariante zwei Aluminiumbauteile miteinander verschweißen. Da die Schweißnaht allerdings nicht richtig hält, bittet er seinen Ausbilder um Hilfe. Dieser nimmt sich

einen Handschild, um den Schweißvorgang verfolgen zu können, wobei allerdings ein Teil seines Handgelenks ungeschützt bleibt. Damit er den Schweißvorgang besser betrachten kann, kniet er sich im Abstand von 50 cm neben das Werkstück und versucht möglichst flach auf die Schweißnaht zu schauen ($\theta = 10^\circ$). Insgesamt dauert die Schweißung etwa 10 s. Wie hoch ist die Strahlenbelastung?

Bei einer Schweißstromstärke von 225 A ergibt sich mit Abb. 8.17 eine Lichtbogenleistung von etwa 6 kW. Basierend auf einem exponentiellen Emissionsmodell, siehe Gleichung (10.3), folgt die aktinische Bestrahlungsstärke mit Hilfe der Anpassungsparameter aus Tab. 8.12 zu $E_{\text{eff}} = 129 \text{ W m}^{-2}$. Da sich der Ausbilder im Abstand von 50 cm befindet, ist keine Abstandskorrektur notwendig. Durch seinen Betrachtungswinkel von 10° (im Vergleich zu 45° der Emissionsmodelle) reduziert sich allerdings die effektive Bestrahlungsstärke um einen Faktor von ungefähr 0,4, siehe Abb. 7.6. Am Ende des Schweißvorganges wurde die ungeschützte Haut mit einer Bestrahlung von $129 \text{ W m}^{-2} \times 0,4 \times 10 \text{ s} = 516 \text{ W m}^{-2}$ belastet, dem 17-fachen des Expositionsgrenzwertes.

Bei diesem Beispiel sind als persönliche Schutzmaßnahme zwingend Schutzhandschuhe zu tragen. Durch geeignete Wahl der persönlichen Schutzausrüstung spielt dann die im obigen Szenario beschriebene Exposition keine Rolle mehr.

Danksagung

Das Forschungsvorhaben F 2368 mit dem vorliegenden Abschlussbericht wäre ohne die tatkräftige Unterstützung einiger Personen nicht möglich gewesen.

Hierbei sind an erster Stelle alle Ansprechpartner in der Schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt in Halle (Saale) zu nennen, sowie die erfahrenen und kompetenten Schweißer, die mit praktischen und pragmatischen Tipps die experimentellen Untersuchungen nicht nur begleiteten sondern auch bereicherten.

Ganz besonderer Dank gilt Herrn Malte Voß (Volkswagen, Wolfsburg) und Herrn Bernd van der Linde (Siemens, Mühlheim a. d. Ruhr), die die Validierung der Emissionsmodelle bei handgeführten Verfahren durch Untersuchungen vor Ort organisierten und für ein gelungenes „Rundherum“ sorgten.

Diese betrieblichen Messungen wären allerdings ohne die Unterstützung von Herrn Martin Brose (BGETEM) und Herrn René Stieper (BGHM), die u. a. Kontakt mit VW und Siemens aufnahmen, nicht zustande gekommen.

Dem Institut für Arbeitsschutz (IFA) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) als Kooperationspartner und Herrn Dr. Marc Wittlich als zuständiger Referatsleiter gebührt ebenfalls großer Dank.

Ein herzliches Dankeschön geht außerdem an alle hausinternen Helfer: Thomas Fehlau für die tatkräftige Unterstützung bei der Datenauswertung und der Erstellung einiger Grafiken, Winfried Janßen für stets schnelle und unkomplizierte, praxisnahe technische Lösungen, Dennis Nowack für die fachliche Begleitung im Labor, Dr. Erik Romanus für die Mit-Initiierung des Forschungsvorhabens und für zahlreiche produktive Gespräche zum Projektverlauf einschließlich diverser Umsetzungsmaßnahmen, sowie Carla Kniewel und Nils Kowalewski für das Korrekturlesen dieses Forschungsberichtes.