

Emission von UV-Strahlung beim Elektroschweißen

1 Einleitung

Im Berufskrankheiten(BK)-Geschehen ist die Erkrankung „Hautkrebs durch ultraviolette (UV-) Strahlung“ in den Blickpunkt gerückt. Bei der Feststellung der arbeitstechnischen Voraussetzungen zur BK-Anerkennung spielt die Ermittlung der UV-Strahlungsexposition einer erkrankten Person eine wesentliche Rolle. Insbesondere bei Schweißarbeiten können Beschäftigte einer hohen UV-Strahlungsexposition ausgesetzt sein. Eine Messung der UV-Exposition ist in diesen Fällen zwar möglich, häufig aber sehr zeit- und kostenintensiv. Daher wurde nach anderen Möglichkeiten gesucht, die UV-Strahlungsexposition beim Schweißen mit der für BK-Ermittlungen ausreichenden Genauigkeit abzuschätzen. Dazu bot sich eine Grundsatzuntersuchung der UV-Strahlungsemission von verschiedenen Schweißverfahren und bei unterschiedlichen Schweißparametern an.

In Zusammenarbeit mit der Berufsgenossenschaft Metall Nord Süd (jetzt: BG Holz und Metall) und dem Deutschen Verband für Schweißen und verwandte Verfahren (DVS) führte das Institut für Arbeitsschutz der DGUV (IFA) UV-Strahlungsmessungen bei Schweißarbeiten durch. In einer Schweißkabine der Schweißtechnischen Kursstätte des DVS wurde während der Anwendung verschiedener Elektro-Schweißverfahren die UV-Strahlungsemission gemessen.

2 Beschreibung der Messorte und der Schweißverfahren

Die Messungen wurden in einer etwa 2,4 m x 2,7 m großen Schweißkabine durchgeführt. Die Wände dieser Schweißkabine bestanden an jeweils zwei Seiten aus grau gestrichenem Beton bzw. aus einem Aluminiumgeflecht (siehe Bild 1 in Abschnitt 3.2). Der Zugang zur Schweißkabine war mit einem Schweißerschutzvorhang verschlossen. In der Schweißkabine stand ein 0,75 m hoher Schweißtisch zur Verfügung. Dort wurden folgende Schweißverfahren angewendet:

- Wolfram-Inertgasschweißen (Kurzbezeichnung: WIG-Schweißen)
- Metall-Inertgasschweißen (Kurzbezeichnung: MIG-Schweißen)
- Metall-Aktivgasschweißen (Kurzbezeichnung: MAG-Schweißen)
- Elektroden-Handschiessen (Kurzbezeichnung: Elektrodenschweißen)

Folgende Schweißgeräte kamen zum Einsatz:

- Fronius TransPuls Synergic 2700: für MIG-, MAG- und Elektrodenschweißen
- Fronius Magic Wave 3000: für WIG-Schweißen

Für die Strahlungsmessungen wurden mit den genannten Schweißgeräten folgende Schweißarbeiten durchgeführt:

- WIG-Schweißen von CrNi und Al
- MIG-Schweißen von Al (gepulst und ungepulst)
- MAG-Schweißen von Baustahl (St-37) und CrNi
- Elektrodenschweißen von Baustahl (St-37)

Die Schweißarbeiten erfolgten jeweils auf einer Metallplatte, die auf dem Schweißstisch lag. Dabei wurde der Schweißort auf der Platte so gewählt, dass der Abstand zu den Messgeräten weitgehend konstant blieb. Alle Angaben zum Schweißstrom, Schweißdraht, Schutzgas usw. sind in [Tabelle 1](#) (Messergebnisse) aufgeführt.

3 Messungen

3.1 Verwendete Messgeräte

Strahlungsspektrum

Spektralradiometer CAS 140 CT der Firma Instrument Systems:
Dieses mit einem Diodenarray ausgestattete Spektrometer hat in Verbindung mit der Optik EOP 120 einen Wellenlängen-Messbereich von 200 nm bis 800 nm.

Effektive Bestrahlungsstärke im UV-A/B/C-Bereich (bewertet)

Radiometer X1 Nr. 2447M-0 mit Messkopf XD 9506-4 Nr. 4636/4607 (UV-A) und 4612 (UV-B/C) der Firma Gigahertz-Optik:

Mit dem im Messkopf XD 9506-4 integrierten zwei Detektoren misst dieses Gerät die effektive Bestrahlungsstärke mit einer spektralen Wichtung $S(\lambda)$ nach Tabelle 1.2 der Richtlinie 2006/25/EG [1] im Wellenlängenbereich zwischen 200 nm und 400 nm (UV-A/B/C). Der Messbereich beträgt für die effektive Bestrahlungsstärke im UV-A-Bereich 50 nW/m² bis 1 W/m² und im UV-B/C-Bereich 0,8 mW/m² bis 16 kW/m².

Bestrahlungsstärke im UV-A-Bereich (unbewertet)

Radiometer P9710-2 Nr. 4667M mit Detektor UV-3701-1 Nr. 1007 der Firma Gigahertz-Optik:
Mit dem Detektor UV-3701-1 misst dieses Gerät die Bestrahlungsstärke im Wellenlängenbereich von etwa 315 nm bis 400 nm (UV-A). Die Ansprechempfindlichkeit ist in diesem Wellenlängenbereich nahezu konstant. Der Messbereich für die UV-A-Bestrahlungsstärke beträgt 0,02 mW/m² bis 390 kW/m².

Folgende relative Messunsicherheiten lagen bei der letzten Kalibrierung vor:

- Detektor UV-3701-1 (UV-A): $\pm 5 \%$ (Dezember 2009)
- Detektor XD 9506-4 (UV-A/B/C): $\pm 10 \%$ (Dezember 2009)
- Spektralradiometer CAS 140 CT: $\pm 10 \%$ (Juli 2010)

3.2 Durchführung der Messungen

Zur Durchführung der Strahlungsmessungen in der Schweißkabine wurden die in Abschnitt 2 genannten Schweißverfahren nacheinander bei verschiedenen Schweißströmen betrieben. Die dabei verwendeten Schweißdraht- bzw. Elektrodendurchmesser waren jeweils dem eingestellten Schweißstrom angepasst. Während der Schweißvorgänge wurden dann in Anlehnung an die DIN EN 14255-1 [2] jeweils das Strahlungsspektrum sowie die Bestrahlungsstärken E_{eff} und $E_{\text{UV-A}}$ gemessen. Alle Detektoren der dazu verwendeten Strahlungsmessgeräte befanden sich gleichzeitig links neben dem Schweißtisch in einer Höhe von 1,0 m über dem Boden, sie waren in einem Abstand von 0,6 m zum Lichtbogen auf den Schweißort ausgerichtet. Während der einzelnen Schweißvorgänge wurden alle Messungen zur Bestimmung der Bestrahlungsstärke und des Strahlungsspektrums gleichzeitig gestartet. Die Bestrahlungsstärken wurden dabei jeweils als Mittelwert während einer Dauer von 10 s bestimmt. Die Messung der Strahlungsspektren erfolgte dagegen als Mittelwert über 100 Einzelmessungen. Die Messdauer dieser Einzelmessungen wurde automatisch von der Spektrometer-Software gesteuert und variierte – je nach Strahlungsintensität – zwischen etwa 10 ms und 60 ms. Alle Messungen wurden – soweit möglich – einmal wiederholt. Die Durchführung oder Wiederholung von Messungen war jedoch beim MAG/MIG-Schweißen nicht immer möglich, da bei Schweißströmen von 60 A (MAG, MIG) und 250 A (MIG) der Schweißlichtbogen teilweise nicht lange genug aufrecht erhalten werden konnte, um eine Messung zu realisieren.

In Ergänzung zu den beschriebenen Messungen der direkten Strahlung des Schweißlichtbogens wurde auch die von den Wänden der Schweißkabine ausgehende Streustrahlung gemessen. Hierfür waren die Detektoren der Messgeräte bei unverändertem Standort und bei Anwendung des Elektrodenschweißens auf die umgebenden Wandflächen gerichtet (siehe Bild 1).

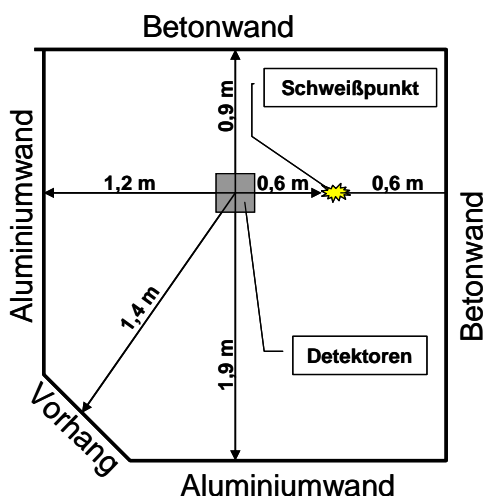


Bild 1: Aufbau der Schweißkabine mit Position des Schweißpunktes und der Detektoren. Die Pfeilrichtung gibt jeweils die Richtung an, in die die Detektoren während der Messungen ausgerichtet waren.

3.3 Messergebnisse

3.3.1 Strahlungsspektrum

Die bei den verschiedenen Schweißverfahren im Wellenlängenbereich von 200 nm bis 800 nm gemessenen Strahlungsspektren sind für Schweißströme von $I = 180$ A in den Abbildungen 2 bis 9 dargestellt. Die darin dargestellten Strahlungsintensitäten sind folgenden Strahlungsbereichen zuzuordnen:

- UV-C-Strahlung: 200 nm bis 280 nm
- UV-B-Strahlung: 280 nm bis 315 nm
- UV-A-Strahlung: 315 nm bis 400 nm
- sichtbare Strahlung: 400 nm bis 780 nm
- Infrarot(IR)-Strahlung: 780 nm bis 800 nm

Die bei höheren und niedrigeren Schweißströmen sowie in verschiedenen Abständen zum Lichtbogen gemessenen Strahlungsspektren unterscheiden sich zwar in der absoluten Höhe der spektralen Bestrahlungsstärke. Die relativen Änderungen der spektralen Bestrahlungsstärke in Abhängigkeit von der Wellenlänge bleiben aber weitgehend gleich. Deshalb sind diese Spektren nicht dargestellt.

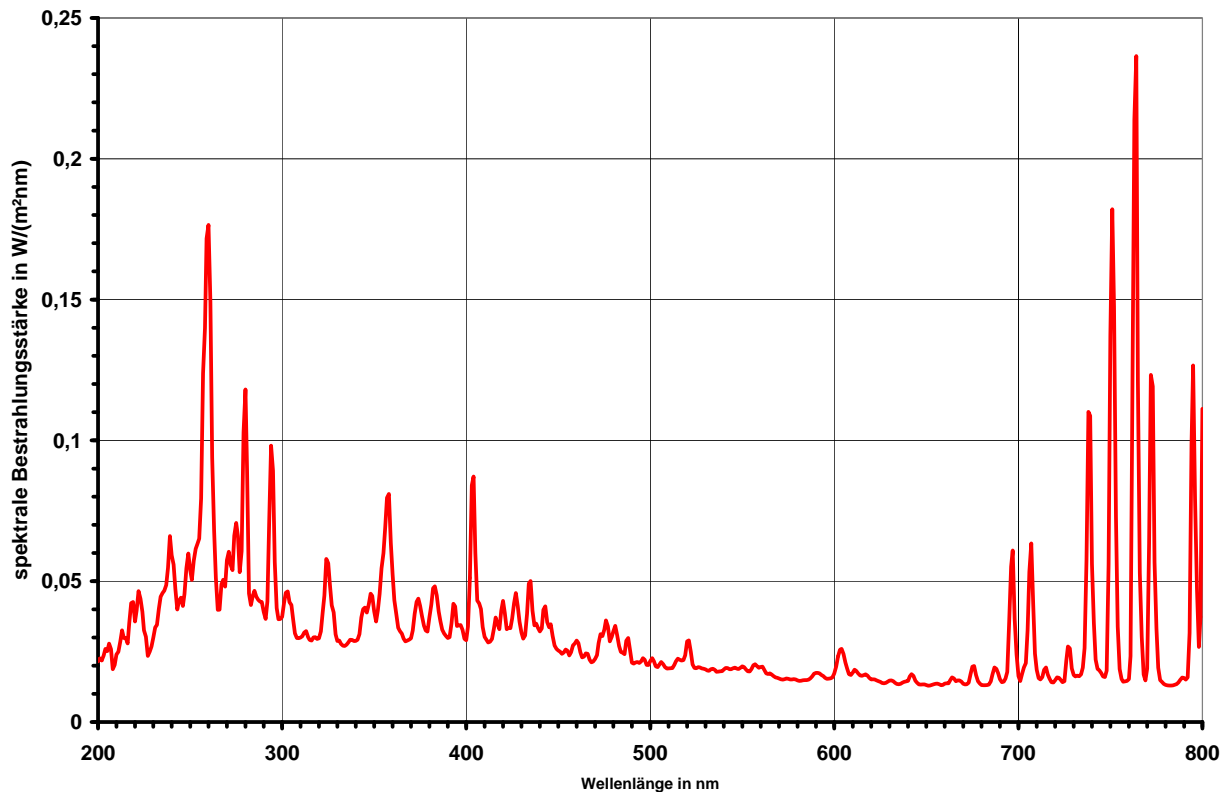


Bild 2: Strahlungsspektrum beim WIG-Schweißen von CrNi (Schweißstrom: 180 A)

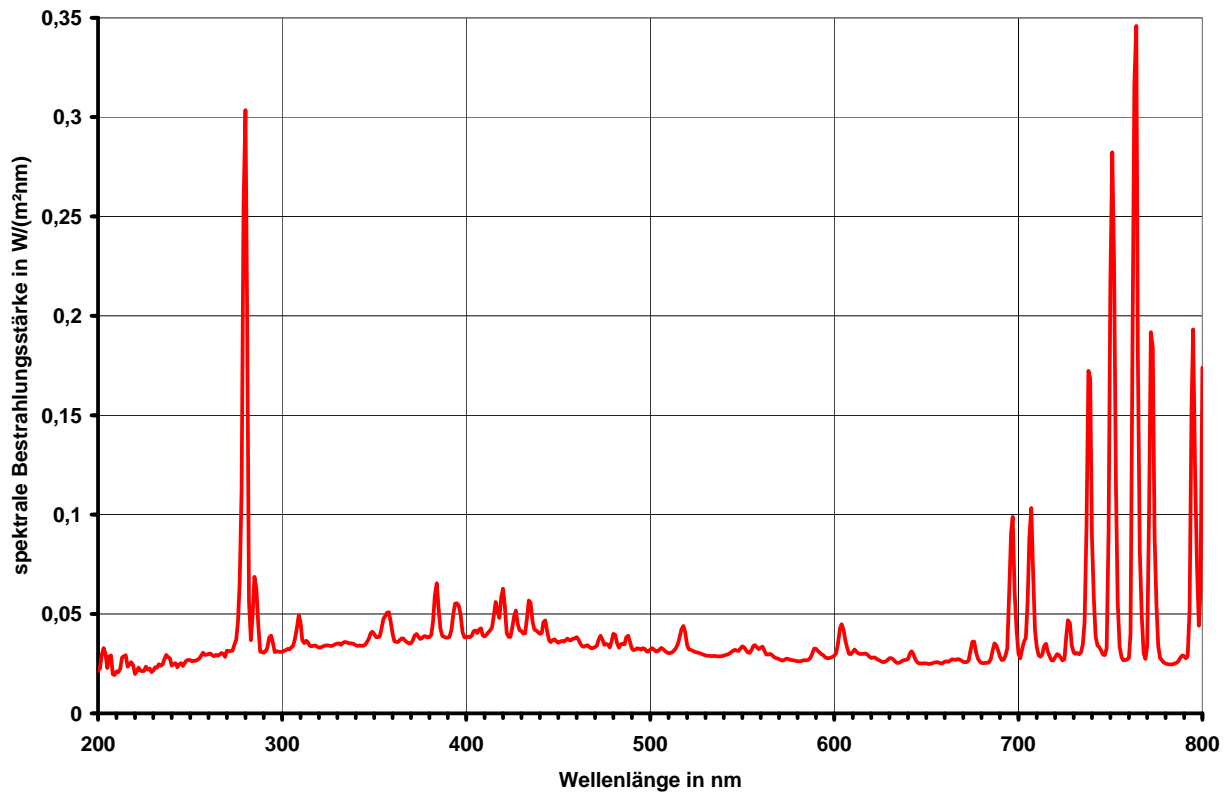


Bild 3: Strahlungsspektren beim WIG-Schweißen von Al (Schweißstrom: 180 A)

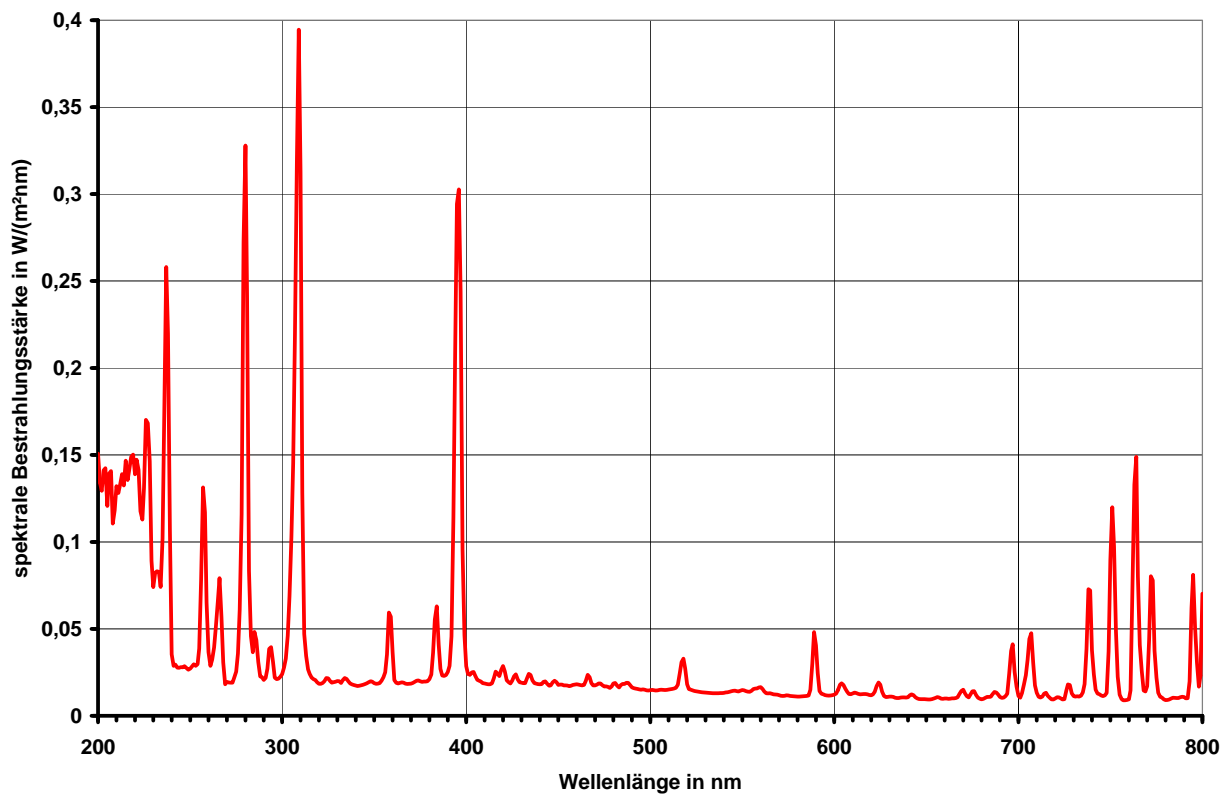


Bild 4: Strahlungsspektren beim MIG-Schweißen von Al (gepulster Schweißstrom: 180 A)

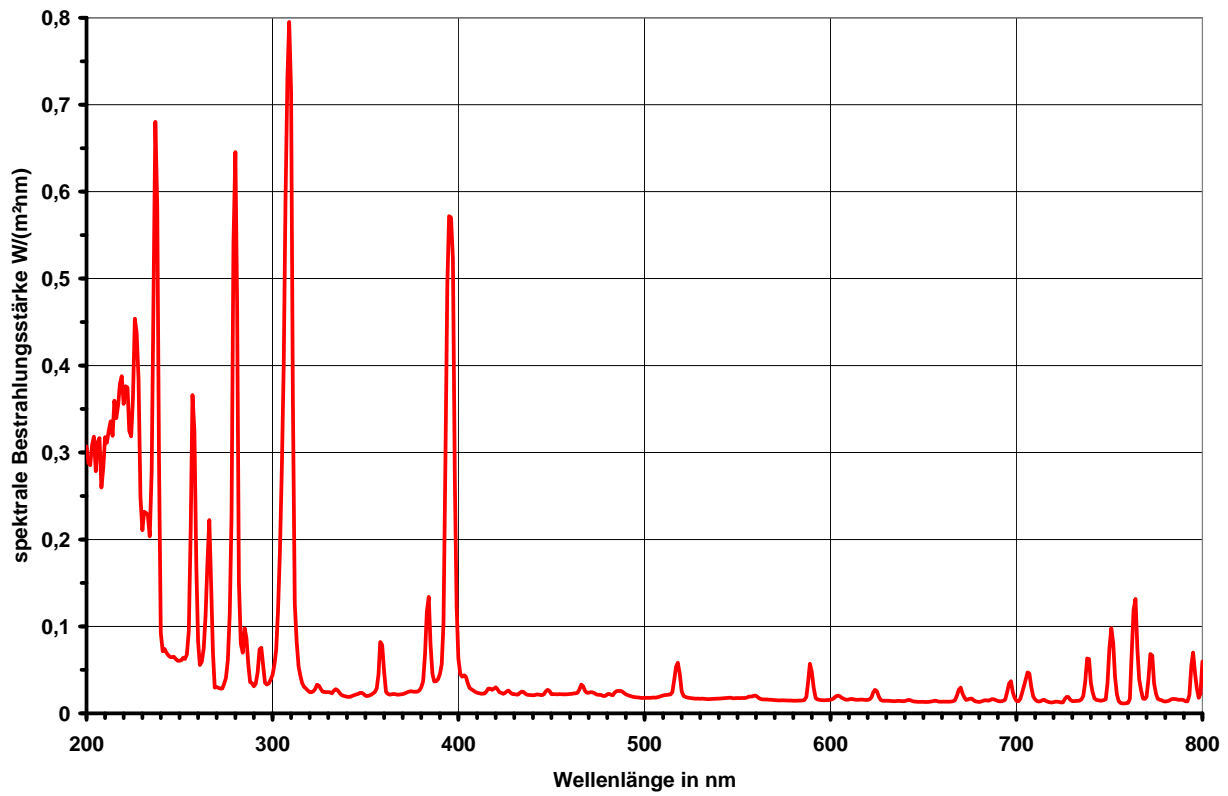


Bild 5: Strahlungsspektren beim MIG-Schweißen von Al (ungepulster Schweißstrom: 180 A)

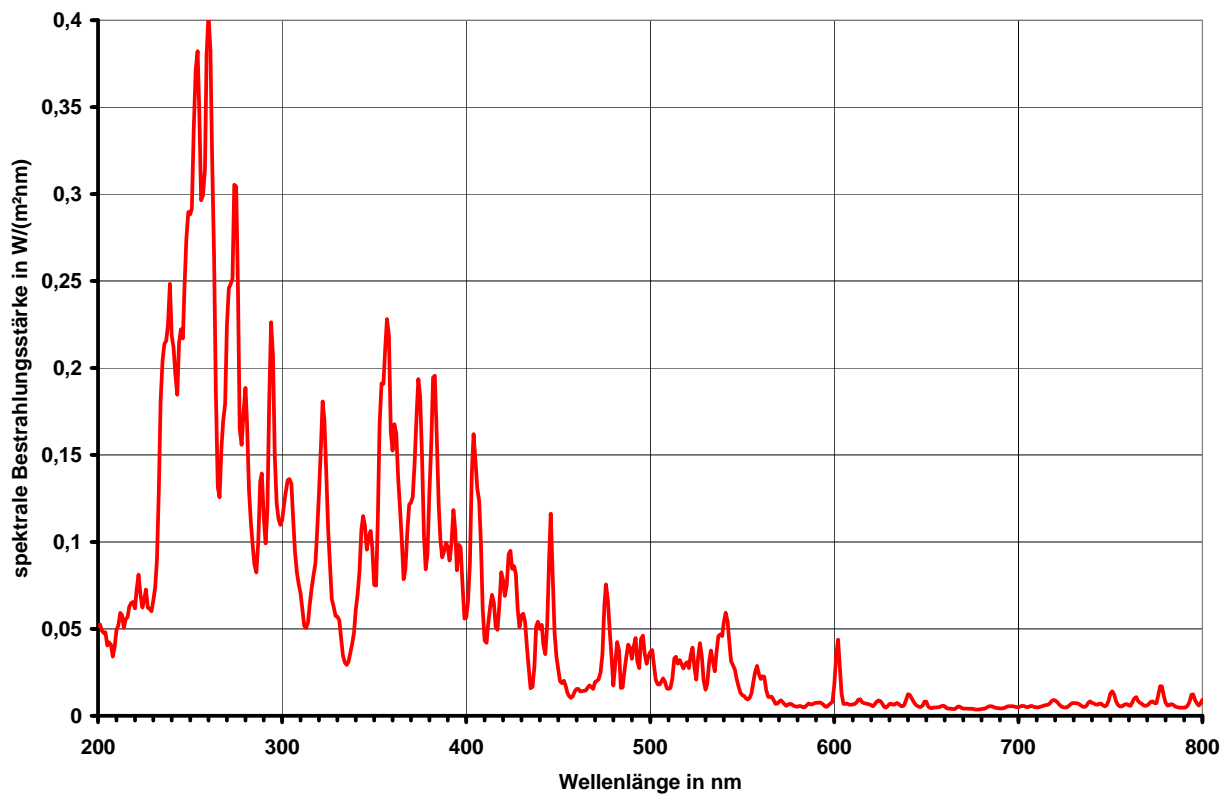


Bild 6: Strahlungsspektren beim MAG-Schweißen von St-37 (Schweißstrom: 180 A)

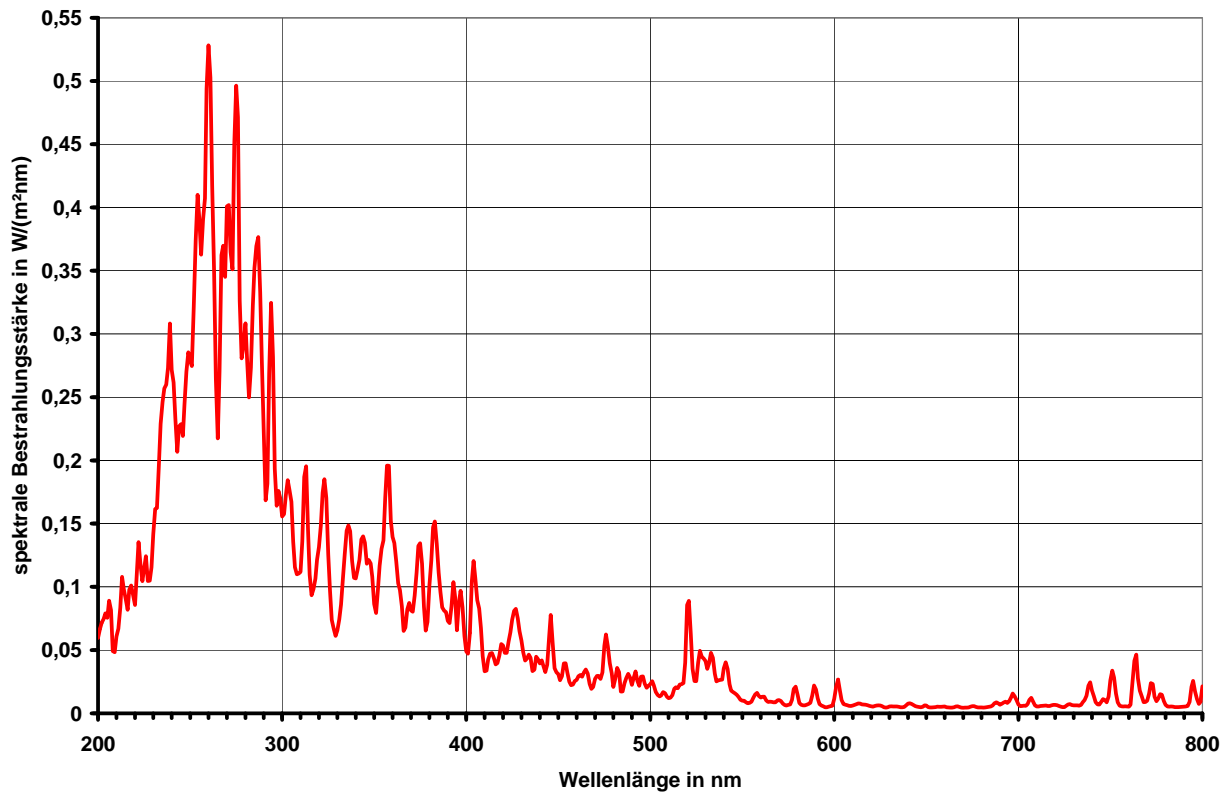


Bild 7: Strahlungsspektren beim MAG-Schweißen von CrNi (Schweißstrom: 180 A)

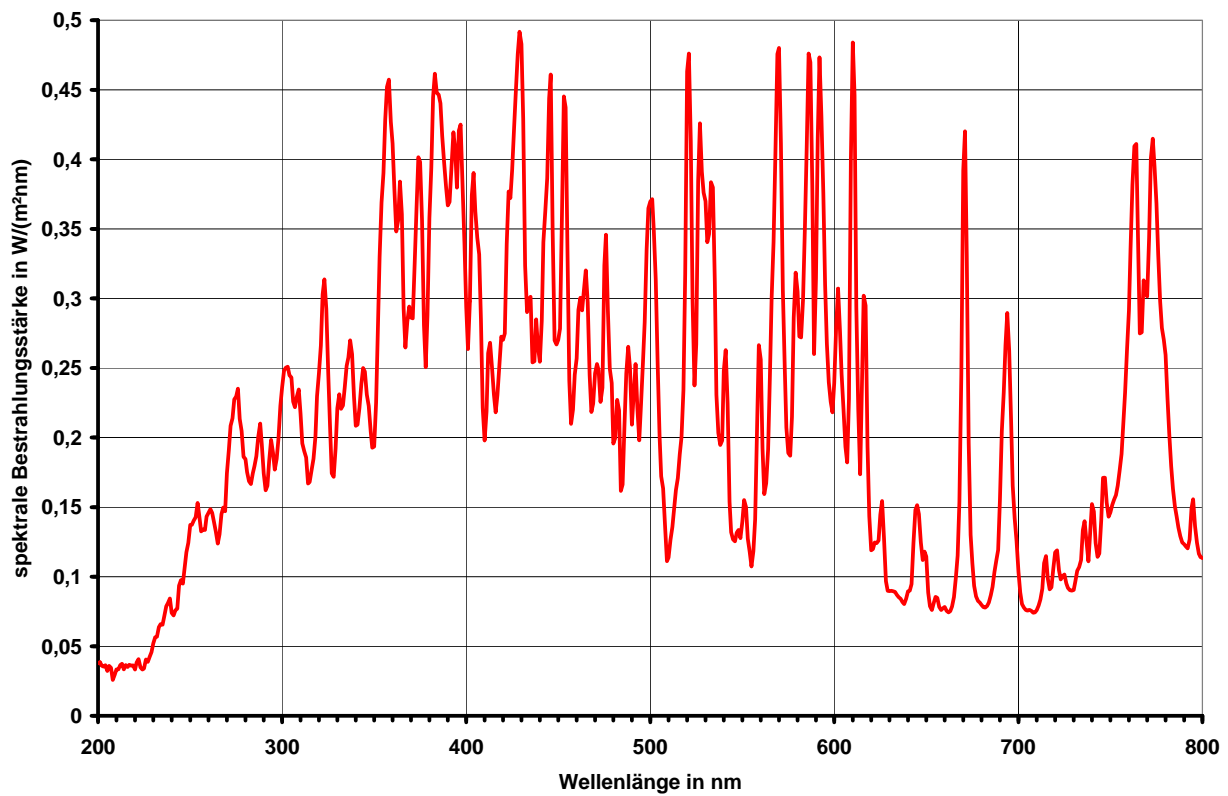


Bild 8: Strahlungsspektren beim Elektrodenschweißen von St-37 (Schweißstrom: 180 A)

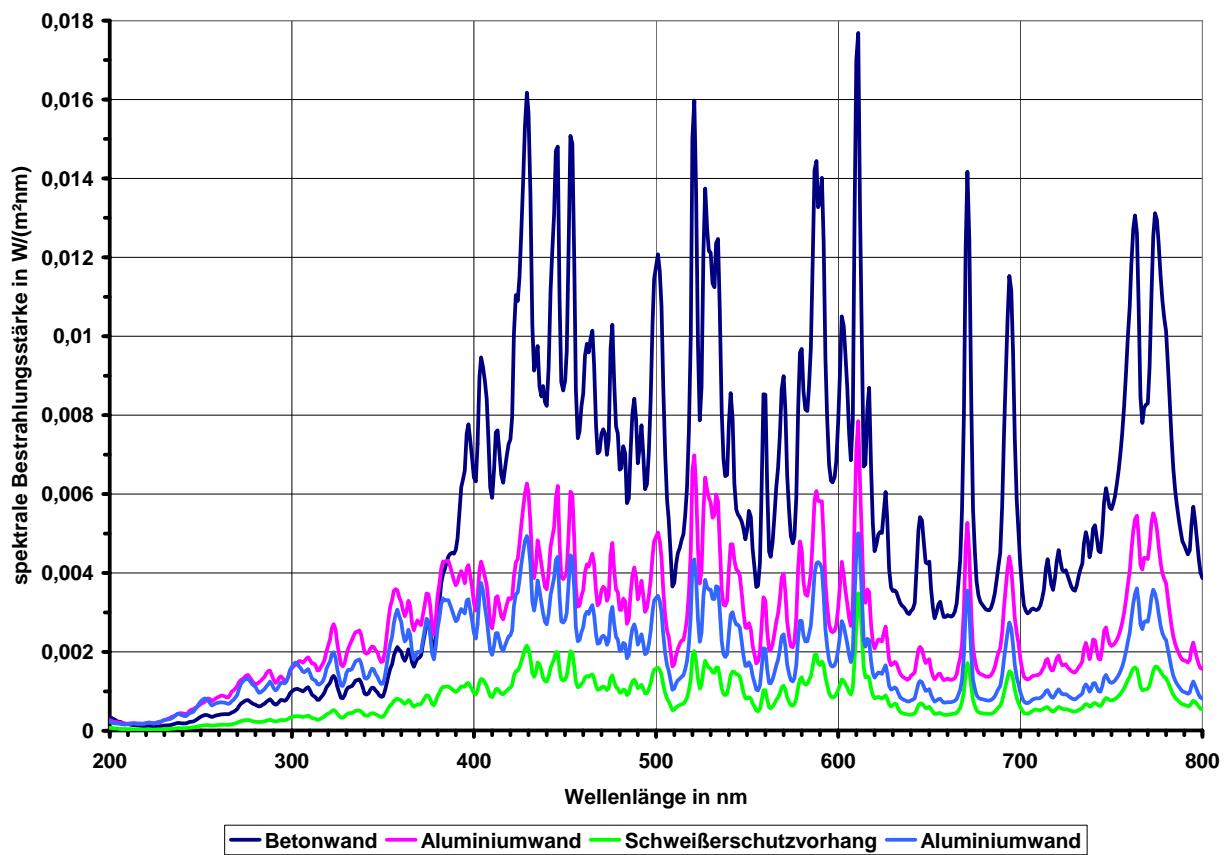


Bild 9: Strahlungsspektren der Streustrahlung beim Elektrodenschweißen von St-37 (Schweißstrom: 250 A)

3.3.2 Bestrahlungsstärke

Direkte Strahlung des Schweißlichtbogens:

Die in Abhängigkeit vom Schweißstrom gemessenen Werte der effektiven Bestrahlungsstärke E_{eff} sind in Bild 10 dargestellt. Jeder der darin eingetragenen Messpunkte wurde mit dem Radiometer als 20-s-Mittelwert in einem Abstand von 60 cm zum Lichtbogen gemessen.

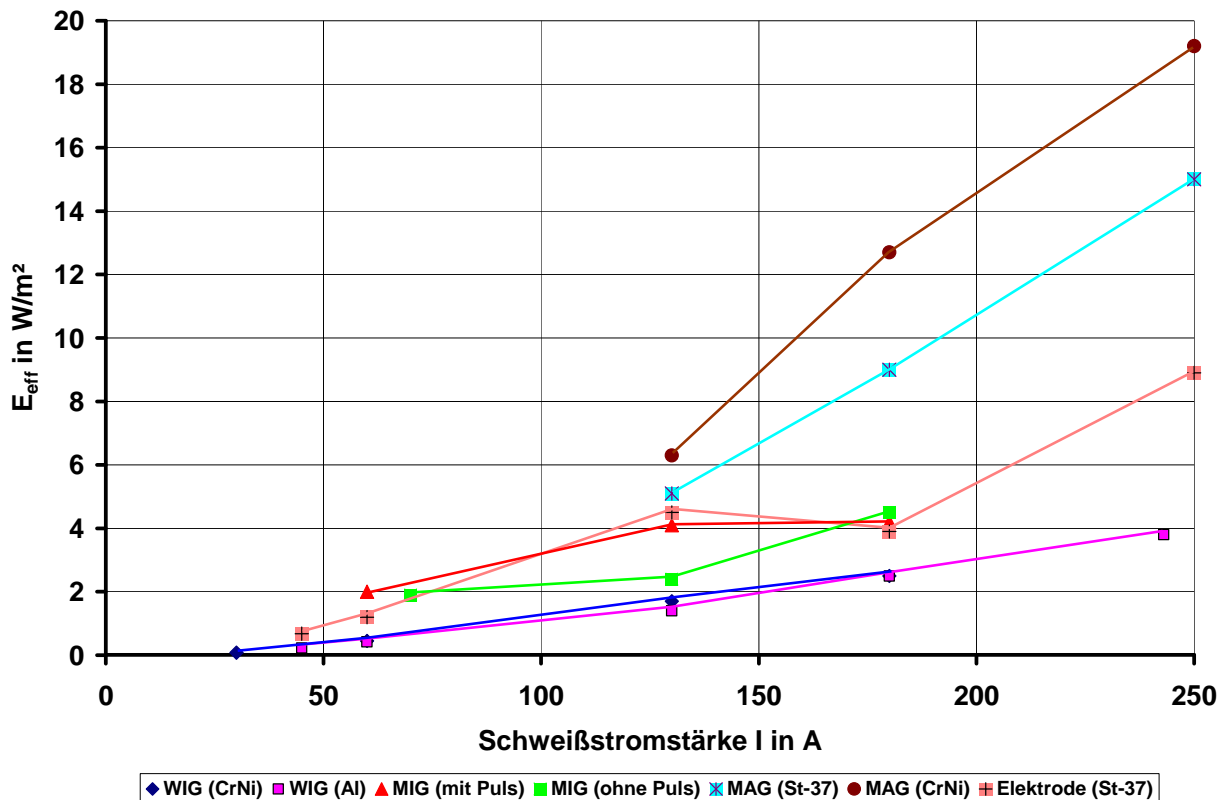


Bild 10: Effektive Bestrahlungsstärke in 60 cm Abstand vom Lichtbogen bei verschiedenen Schweißverfahren (Radiometer-Messwerte)

Hinweis: Die Feststellung der arbeitstechnischen Voraussetzungen zur BK-Anerkennung erfordert die Ermittlung der nmsc-gewichteten UV-Strahlungsexposition (siehe [3]). Diese kann aus den Werten der effektiven Bestrahlungsstärke E_{eff} berechnet werden (siehe Abschnitt 4.4). Informationen über die UV-A-Bestrahlungsstärke werden in diesem Zusammenhang nicht benötigt. Deshalb sind die gemessenen Werte der UV-A-Bestrahlungsstärke hier nicht wiedergegeben.

Streustrahlung:

Die von den Raumwänden der Schweißkabine reflektierte Strahlung des Schweißlichtbogens ergab bei Messung mit dem Radiometer effektive Bestrahlungsstärken E_{eff} zwischen 0,3 % und 1,3 % der effektiven Bestrahlungsstärke, die von der direkten Strahlung des Lichtbogens ausgeht.

4 Auswertung

4.1 Vergleich der UV-Strahlungsspektren der verschiedenen Schweißverfahren

In den Bildern 2 bis 8 sind die UV-Strahlungsspektren der Schweißverfahren bei einer einheitlichen Schweißstromstärke von 180 A dargestellt. Aus den Darstellungen ergibt sich Folgendes:

- Beim WIG-Schweißen (Bilder 2 und 3) liegt eine breite Verteilung über den gesamten Bereich der UV-Strahlung vor. Dieser breiten Verteilung sind einige Linien überlagert. Beim WIG-Schweißen von Aluminium (Bild 3) wird die Emission von einer Linie bei einer Wellenlänge von ca. 280 nm dominiert. Beim WIG-Schweißen von CrNi-Stahl (Bild 2) liegt die höchste Emission dagegen bei einer Wellenlänge von ca. 260 nm sowie in geringerer Intensität auch bei anderen Wellenlängen.

- Die beim MIG-Schweißen (Bilder 4 und 5) gemessenen Strahlungsspektren zeigen eine deutliche Linienstruktur. Diese Linien befinden sich überwiegend im UV-B- und UV-C-Bereich. Dabei ist die Strahlungsemission beim Pulsschweißen etwas geringer als beim Schweißen ohne Puls.
- Beim MAG- und Elektrodenschweißen (Bilder 6 bis 8) liegt eine breite Verteilung über den gesamten UV-Bereich vor. Die spektrale Verteilung der Emission ist beim MAG-Schweißen von St-37- und CrNi-Stahl (Bilder 6 und 7) ähnlich, wobei der Schwerpunkt der Emission im Wellenlängenbereich von etwa 230 nm bis 300 nm (UV-B und UV-C) liegt. Beim Elektrodenschweißen von St-37-Stahl (Bild 8) steigt die Emission dagegen mit zunehmender Wellenlänge immer weiter an und erreicht im UV-A-Bereich die höchsten Werte.

4.2 UV-Strahlungsemission von den Lichtbögen der verschiedenen Schweißverfahren (direkte Strahlung)

Die Darstellung in Bild 10 zeigt einerseits, dass die Strahlungsemission aller untersuchten Verfahren mit zunehmender Stromstärke ansteigt und andererseits, dass bei gleicher Stromstärke deutliche Unterschiede in der Strahlungsemission der verschiedenen Verfahren bestehen. Nimmt man für die verschiedenen Schweißverfahren jeweils einen linearen Zusammenhang zwischen der UV-Strahlungsemission und der Schweißstromstärke an, ergeben sich aus den Messwerten nach Durchführung einer linearen Regression die in Tabelle 1 angegebenen Funktionen. Mit diesen Funktionen kann die effektive Bestrahlungsstärke der untersuchten Schweißverfahren für beliebige Schweißströme im angegebenen Gültigkeitsbereich näherungsweise berechnet werden.

Tabelle 1: Aus den Radiometer-Messwerten ermittelte Zusammenhänge zwischen Schweißstromstärke und UV-Strahlungsemission

| Schweißverfahren | Material | Anzahl Messwerte | Funktion | Korrelationskoeffizient | Gültigkeitsbereich I [A] |
|------------------|----------|------------------|--|-------------------------|--------------------------|
| WIG | CrNi | 4 | $E_{\text{eff}} [\text{W}/\text{m}^2] = -0,4661[\text{W}/\text{m}^2] + 0,0165[\text{W}/\text{m}^2\text{A}] * I [\text{A}]$ | 0,999 | 30 bis 180 |
| WIG | Al | 5 | $E_{\text{eff}} [\text{W}/\text{m}^2] = -0,6951[\text{W}/\text{m}^2] + 0,0180[\text{W}/\text{m}^2\text{A}] * I [\text{A}]$ | 0,995 | 45 bis 243 |
| MIG (mit Puls) | Al | 3 | $E_{\text{eff}} [\text{W}/\text{m}^2] = 1,0798[\text{W}/\text{m}^2] + 0,0191[\text{W}/\text{m}^2\text{A}] * I [\text{A}]$ | 0,926 | 60 bis 180 |
| MIG (ohne Puls) | Al | 3 | $E_{\text{eff}} [\text{W}/\text{m}^2] = 0,0033[\text{W}/\text{m}^2] + 0,0231[\text{W}/\text{m}^2\text{A}] * I [\text{A}]$ | 0,923 | 70 bis 180 |
| MAG | St-37 | 3 | $E_{\text{eff}} [\text{W}/\text{m}^2] = -5,7385[\text{W}/\text{m}^2] + 0,0827[\text{W}/\text{m}^2\text{A}] * I [\text{A}]$ | 0,999 | 130 bis 250 |
| MAG | CrNi | 3 | $E_{\text{eff}} [\text{W}/\text{m}^2] = -7,1578[\text{W}/\text{m}^2] + 0,1066[\text{W}/\text{m}^2\text{A}] * I [\text{A}]$ | 0,996 | 130 bis 250 |
| Elektrode | St-37 | 5 | $E_{\text{eff}} [\text{W}/\text{m}^2] = -1,0455[\text{W}/\text{m}^2] + 0,0367[\text{W}/\text{m}^2\text{A}] * I [\text{A}]$ | 0,953 | 45 bis 250 |

4.3 Strahlungsemission von den reflektierenden Wandflächen (Streustrahlung)

Aus den Spektren der Streustrahlung (Bild 9) ergibt sich, dass die spektrale Verteilung der reflektierten Strahlung und der direkten Strahlung (siehe Spektrum in Bild 8) im sichtbaren Bereich ähnlich sind. Auffällig ist, dass von der Betonwand im Bereich der langwelligen UV-Strahlung und der sichtbaren Strahlung (390 nm bis 800 nm) mehr reflektiert wird als von den übrigen Wandflächen der Kabine. Der aus diesen Spektren berechnete prozentuale Anteil der UV-Reflexion ist in Bild 11 dargestellt.

In dem für die Ermittlung der effektiven Bestrahlungsstärke relevanten Wellenlängenbereich um ca. 270 nm wird gemäß Bild 11 von den Wänden der Schweißkabine zwischen etwa 0,06 % und 0,4 % der direkten Strahlung des Schweißlichtbogens reflektiert. Die mit dem Radiometer gemessenen Anteile der reflektierten effektiven Bestrahlungsstärke liegen dagegen zwischen 0,3 % und 1,3 % (siehe Abschnitt 3.3.2). Diese unterschiedlichen Ergebnisse der Radiometer- und Spektrometer-Messwerte können einerseits darauf zurückgeführt werden, dass mit dem Spektrometer wellenlängenselektiv und mit dem Radiometer integral über den gesamten UV-Wellenlängenbereich gemessen wurde. Andererseits waren die Messzeiten der beiden Messsysteme unterschiedlich (siehe Abschnitt 3.2). Dadurch tragen die üblichen Intensitätsschwankungen des Schweißlichtbogens bei den beiden Messverfahren in unterschiedlicher Höhe zum Messwert bei. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Intensität der reflektierten Strahlung nicht nur von den Eigenschaften der reflektierenden Oberfläche sondern auch vom Abstand zu dieser Fläche bestimmt wird (siehe Bild 1 in Abschnitt 3.2).

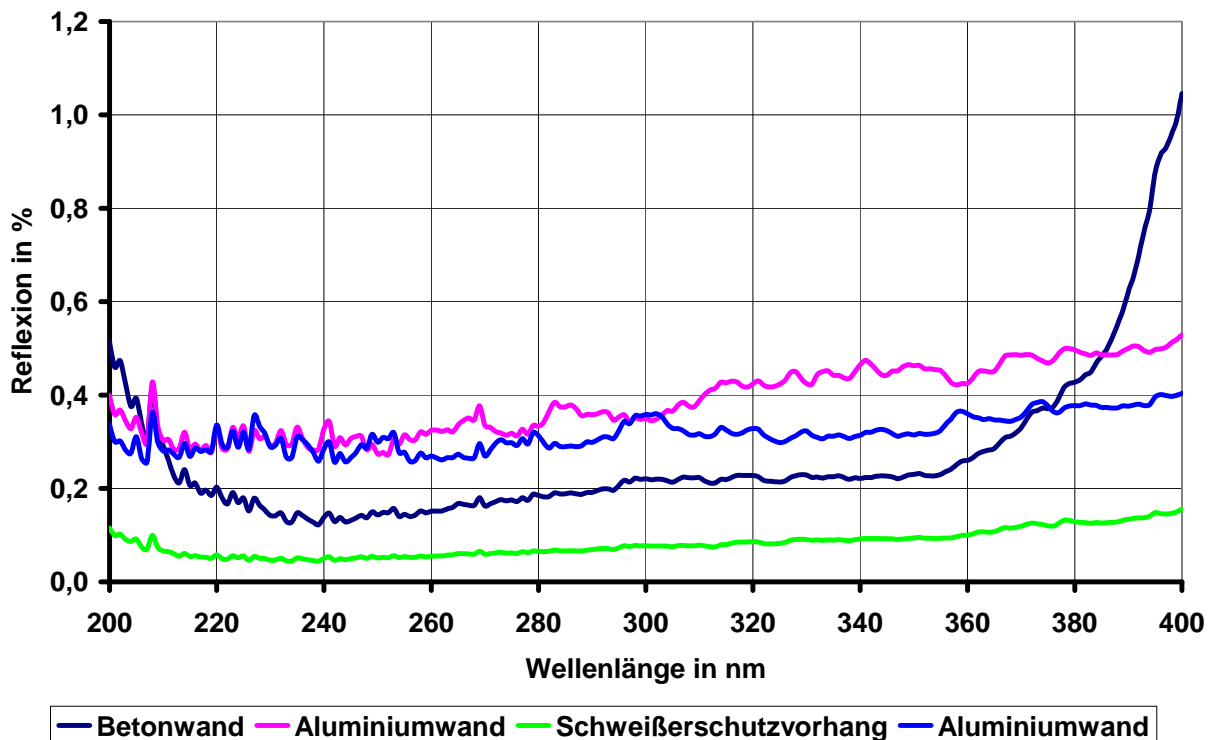


Bild 11: Spektrale Anteile der Reflexion beim Elektroden-Schweißen mit einem Schweißstrom von 250 A

4.4 Umrechnung von E_{eff} auf E_{nmisc}

Die für die verschiedenen Schweißverfahren gemessenen Strahlungsspektren können dazu verwendet werden, effektive Bestrahlungsstärken E_{eff} in nmisc-gewichtete Bestrahlungsstärken E_{nmisc} umzurechnen (siehe [4]). Hierfür wurde aus allen gemessenen Strahlungsspektren jeweils der mittlere Umrechnungsfaktor $f_{\text{eff-nmisc}}$ bestimmt:

- WIG-Schweißen: $f_{\text{eff-nmisc}} = 0,286 \pm 0,027$ (n = 9)
- MIG-Schweißen (mit Puls): $f_{\text{eff-nmisc}} = 0,290 \pm 0,057$ (n = 3)
- MIG-Schweißen (ohne Puls): $f_{\text{eff-nmisc}} = 0,270 \pm 0,054$ (n = 3)
- MAG-Schweißen: $f_{\text{eff-nmisc}} = 0,251 \pm 0,014$ (n = 10)
- Elektroden-Schweißen: $f_{\text{eff-nmisc}} = 0,509 \pm 0,022$ (n = 5)

Unter Verwendung der genannten Umrechnungsfaktoren ergibt sich die nmisc-gewichtete Bestrahlungsstärke E_{nmisc} beim Schweißen zu $E_{\text{nmisc}} = E_{\text{eff}} \cdot f_{\text{eff-nmisc}}$. Weitergehende Umrechnungen können mit der in [5] aufgeführten Excel-Datei vorgenommen werden, sofern das Strahlungsspektrum als spektrale Bestrahlungsstärke in 1-nm-Schritten vorliegt. Zu diesem Zweck sind die in den Bildern 2 bis 8 dargestellten Strahlungsspektren unter [6] im geeigneten Format hinterlegt.

Danksagung

Allen an den Untersuchungen beteiligten Mitarbeitern der Schweißtechnischen Kursstätte des DVS in Mainz sei an dieser Stelle gedankt. Mit der Bereitstellung der Schweißkabine und der Schweißgeräte sowie insbesondere mit der fachkundigen Durchführung der Schweißarbeiten haben die Mitarbeiter des DVS maßgeblich zum Gelingen der UV-Strahlungsmessungen beigetragen.

Autoren: Dipl.-Ing. Detlef Schwaß, Dr. Marc Wittlich, Martin Schmitz, Dr. Harald Siekmann,
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA),
Sankt Augustin

5 Quellenverzeichnis

- [1] 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)
- [2] DIN EN 14255-1: Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung – Teil 1: Von künstlichen Quellen am Arbeitsplatz emittierte ultraviolette Strahlung. Beuth, Berlin 2005
- [3] DGUV-Rundschreiben: Hautkrebs nach UV-Strahlungsexposition; Eine Hilfestellung für die BK-Sachbearbeitung: www.dguv.de/ifa, Webcode [d103710](#)
- [4] IFA-Information: Umrechnung von UV-Strahlungsgrößen: www.dguv.de/ifa, Webcode [d95943](#)
- [5] IFA-Programm: Umrechnung von Strahlungsgrößen: www.dguv.de/ifa, Webcode [d95334](#)
- [6] IFA-Messdaten: Strahlungsspektren verschiedener Schweißverfahren: www.dguv.de/ifa, Webcode [d124926](#)
- [7] Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – OStrV). BGBl. I (2010) Nr. 38
- [8] ISO 28077:2006(E)/CIE S 019/E:2006: Joint ISO/CIE Standard: Photocarcinogenesis Action Spectrum (Non-Melanoma Skin Cancers)
- [9] Sliney, D.; Wolbarsht, M.: Safety with Lasers and Other Optical Sources. Plenum Press, New York and London, 1980