

Abschlussbericht zum Vorhaben

„UV-Strahlung bei der
Handlasermaterialbearbeitung“
(DGUV-FP439)

Laufzeit

01.07.2019 – 30.09.2021

Bericht vom 28.01.2022

Autoren

Alexander Hilck, M.Sc.

Dr. rer. nat. Michael Hustedt

Dr.-Ing. SFI Jörg Hermsdorf

Prof. Dr.-Ing. Stefan Kaierle

(Laser Zentrum Hannover e.V.)

Amadeus Aurin, B.Eng.

Prof. Dr.-Ing. Steffen Keitel

(SLV Halle GmbH)

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung deutsch.....	4
Kurzfassung englisch.....	5
1 Problemstellung	6
2 Forschungszweck/-ziel	7
3 Methodik	8
4 Ergebnisse des Gesamtvorhabens	10
4.1 Im Projekt verwendete Messgeräte (TAP 1.1)	10
4.2 Genutzte künstliche Strahlquellen für den UV-VIS-Bereich (TAP 1.1).....	11
4.3 Genutzte pulsfähige Lasersysteme (TAP 1.1)	12
4.4 Versuchsaufbau zum definierten Pulsen der Strahlquellen (TAP 1.2)	14
4.5 Messungen an der Deuterium-Strahlquelle und der Halogen-Lichtquelle mit den Geräten aus TAP 1.1 sowie Auswertung der Messungen (TAP 1.3 und 1.4)	16
4.6 Messsystemkopfentwicklung und triggerbare Datenakquisition (TAP 1.5)	22
4.7 Beschreibung der Messroutine für spätere Messaufgaben (TAP 1.6)	26
4.8 Beschaffung und Vorbereitung der Schweißproben (TAP 2.1)	26
4.9 Einrichtung der Versuchsstände zur Parametervariation (TAP 2.2).....	28
4.10 Einrichtung exemplarischer Schweißprozesse an relevanten Metallen (Baustahl, Edelstahl, Al, Ti und Cu) (TAP 2.3)	30
4.11 Prüfung der Nutzbarkeit von statistischer Versuchsplanung (DoE) und Aufstellung von Versuchsplänen für TAP 2.5 - TAP 2.8 (TAP 2.4).....	31
4.12 UV- und VIS-Strahlungsmessung – Stufe 1: Variation der Schweißparameter und des Messabstands (TAP 2.5)	31
4.13 UV- und VIS-Strahlungsmessung – Stufe 2: Variation der Messgeometrie (TAP 2.6)	36
4.14 UV- und VIS-Strahlungsmessung – Stufe 3: Variation des Werkstoffes (TAP 2.7)	40
4.15 UV- und VIS-Strahlungsmessung – Stufe 4: Einfluss der Laserstrahlquelle (TAP 2.8)	42
4.15.1 Blindschweißungen mit Laser 2	43
4.15.2 Blindschweißungen mit Laser 3	47
4.15.3 Gegenüberstellung der Messergebnisse an Titan für die drei verwendeten Lasersysteme	49
4.15.4 Gegenüberstellung der Messergebnisse an Edelstahl für drei verschiedene Lasersysteme.....	53
4.15.5 Gegenüberstellung der Messergebnisse an Baustahl für drei verschiedene Lasersysteme	53
4.15.6 Spektrometrische Untersuchung der von verschiedenen Werkstoffen emittierten Sekundärstrahlung.....	54
4.15.7 Abstandsabhängigkeit der UV-Strahlungsemission für verschiedene Werkstoffe.....	57
4.16 Auswertung der Messergebnisse gemäß TROS IOS, begleitend zur Durchführung der Messungen (TAP 2.9).....	59

4.17	Gemeinsame Bewertung der Ergebnisse mit den beratenden Partnern und der DGUV (TAP 2.10)	62
4.18	UV- und VIS-Strahlungsmessungen an ausgewählten realen Schweißprozessen bei industriellen Anwendern (TAP 3.1) inkl. Auswertung der Messungen auf Basis der Ergebnisse aus AP 1 und AP 2 (TAP 3.2)	63
4.18.1	Laserauftragschweißen mit Nickel-Basis-Werkstoff auf Gussbauteil	63
4.18.2	Verbindungsschweißen von Titan.....	64
4.18.3	Verbindungsschweißen von nichtrostendem Stahl	65
4.19	Erarbeitung von Informationen und praktischen Handlungsempfehlungen für industrielle Anwender (TAP 3.3).....	65
4.20	Projektbegleitende Mitarbeit bei der Überarbeitung der EN ISO 11553-1/2 (TAP 4.1).....	67
5	Auflistung der für das Vorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen.....	68
6	Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Forschungszwecks/-ziels, Schlussfolgerungen	69
7	Aktueller Umsetzungs- und Verwertungsplan	70
8	Danksagung	71
9	Anhänge	72
9.1	Abbildungsverzeichnis	72
9.2	Tabellenverzeichnis	77
9.3	Liste der verwendeten Abkürzungen und Symbole	78
9.4	Referenzen.....	83
9.5	Unterschriftenseite (verpflichtend für Kooperationsprojekte)	87

Kurzfassung deutsch

Ziel des Forschungsvorhabens war die Ermittlung und Bewertung von Informationen zum Ausmaß der Emission potenziell gefährlicher inkohärenter ultravioletter und sichtbarer Sekundärstrahlung (UV und VIS) inkl. der spektralen Charakteristik aus den Prozesszonen von Laserstrahlschweißprozessen. Aufgrund des hohen spezifischen Gefährdungspotenzials erfolgte eine Fokussierung auf die handgeführte bzw. handpositionierte Lasermaterialbearbeitung. Generell sind die erzielten Ergebnisse aber auch für automatisierte Laserstrahlschweißprozesse relevant, sofern sich Personen im Arbeitsbereich aufhalten. Die Ergebnisse dienen der Verbesserung der momentan defizitären Datenlage und stellen eine Basis zur Durchführung von Gefährdungsbeurteilungen durch die Betreiber der Lasereinrichtungen dar. Schließlich soll zeitnah die Einbringung der Ergebnisse in die Normung initiiert werden.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten wurde zunächst die Auswahl des Messsystems mit einer kalibrierten Deuterium-Strahlquelle an einem typischen Laserstrahlschweißprozess verifiziert. Die Entwicklung eines kompakten Messsystemkopfes ermöglichte die deckungs- und zeitgleiche Messung der aus der Prozesszone emittierten Sekundärstrahlung in den Spektralbereichen UV-A, UV-B und UV-C (180 und 400 nm) sowie VIS (300 und 700 nm), so dass eine Bewertung hinsichtlich der relevanten Expositionsgrenzwerte gemäß Richtlinie 2006/25/EG erfolgen konnte. In systematischen Parameterstudien an Blindschweißungen wurde der Einfluss des Werkstoffs, der Laserstrahlquelle und der Schweißparameter auf Intensität und räumliche Verteilung der Sekundärstrahlungsemission evaluiert. Die Messergebnisse wurden zu den Expositionsgrenzwerten in Relation gesetzt. Zwecks Verifizierung der Ergebnisse an den Blindschweißungen wurden drei reale Laserstrahlschweißprozesse nachgestellt. Auf Basis der ermittelten Daten wurden Empfehlungen zum Schutz des Bedienpersonals vor der Sekundärstrahlung erarbeitet.

Durch die erhaltenen Ergebnisse wurde die Relevanz der Thematik für die Gewährleistung der Arbeitssicherheit in den betroffenen Branchen bestätigt und entsprechender Handlungsbedarf identifiziert. Generell hat sich Titan als der Werkstoff mit den stärksten Sekundärstrahlungsemissionen beim gepulsten Laserstrahlschweißen erwiesen. Dies gilt insbesondere für die UV-Strahlungsemission, weniger für die Emission von sichtbarem Licht (sog. Blaulichtgefährdung). Es folgen Edelstahl und Baustahl, während die Belastung bei der Bearbeitung von Aluminium und Messing offenbar vergleichsweise gering ist. Die Sekundärstrahlung wird im Allgemeinen bei allen betrachteten Werkstoffen sehr stark divergent in die Hemisphäre über der jeweils bearbeiteten Werkstoffprobe emittiert.

Mit den verwendeten Lasersystemen sind UV-Sekundärstrahlungsexpositionswerte, die für die Haut und die Hornhaut kritisch sind, in einer ähnlichen Größenordnung zu beobachten. Der relevante Expositionsgrenzwert H_{eff} wird vor allem im Fall von Titan bei geringem Abstand von der Laserprozesszone teilweise nach weniger als einer Minute erreicht. Dies ist für die Gewährleistung der Arbeitssicherheit beim handgeführten bzw. handpositionierten Laserstrahlschweißen hochgradig relevant, weil sich die Hände des Bedienpersonals sehr dicht an der Prozesszone befinden müssen. Entsprechend sind lichtdichte Arbeitshandschuhe zu tragen. Dabei sollte der Schutz der Hände gegen emittierte Laserstrahlung nicht unberücksichtigt bleiben. Ebenso ist die Abdeckung der Haut vor allem an den Armen, welche der Prozesszone noch relativ nah kommen, durch lichtdichte Kleidung dringend zu empfehlen. Für die Augen hat sich die potenzielle Belastung der Netzhaut durch aus der Schweißprozesszone emittiertes Blaulicht als stärker relevant im Vergleich zur Belastung der Linse durch emittierte UV-Strahlung erwiesen, was dadurch erklärbar ist, dass das spektrale Maximum der Sekundärstrahlung aus dem UV-Bereich heraus in den VIS-Bereich verschoben ist. Abhängig vom bearbeiteten Werkstoff und vom Abstand von der Prozesszone wird der Expositionsgrenzwert E_B unter Umständen ebenfalls in weniger als einer Minute erreicht. Besonders kritisch ist offenbar wiederum die Bearbeitung von Titan. Generell muss das Bedienpersonal während des Betriebs eines Handlasergerätes zum Schutz der Augen gegen die aus der Prozesszone freigesetzte Laserstrahlung eine geeignete Laserschutzbrille tragen. Dabei ist darauf zu achten, dass diese Brille auch den Anforderungen an den Schutz gegen UV-Strahlung sowie vor allem sichtbares Licht genügt. Die Schutzbrille muss demnach ähnlich wie bei einer Schweißerschutzbrille abgedunkelt sein, wenn auch nicht so stark, um die Transmission breitbandig zu reduzieren.

Kurzfassung englisch

The aim of the research project was to determine and evaluate information on the extent of emission of potentially hazardous incoherent ultraviolet and visible secondary radiation (UV and VIS), including the spectral characteristics, from the process zones of laser-beam welding processes. Due to the high specific hazard potential, the focus was on hand-guided or hand-positioned laser material processing. In general, however, the results obtained are also relevant for automated laser beam welding processes, provided that persons are present in the working area. The results serve to improve the currently deficient data situation and provide a basis for carrying out risk assessments by the operators of the laser equipment. Finally, the introduction of the results into standardization is to be initiated in the near future.

In the course of the work carried out, the selection of the measurement system was first verified with a calibrated deuterium beam source on a typical laser-beam welding process. The development of a compact measuring-system head enabled the congruent and simultaneous measurement of the secondary radiation emitted from the process zone in the spectral ranges UV-A, UV-B and UV-C (180 and 400 nm) as well as VIS (300 and 700 nm), so that an evaluation could be made with regard to the relevant exposure-limit values according to Directive 2006/25/EC. In systematic parameter studies on blind welds, the influence of the material, the laser-beam source and the welding parameters on the intensity and spatial distribution of the secondary radiation emission was evaluated. The measurement results were related to the exposure limits. To verify the results on the blind welds, three real laser-beam welding processes were simulated experimentally. Based on the data obtained, recommendations for the protection of operators from secondary radiation were developed.

The results obtained confirmed the relevance of the topic for ensuring occupational safety in the industries concerned and identified a corresponding need for action. In general, titanium has proven to be the material with the strongest secondary radiation emissions during pulsed laser-beam welding. This applies in particular to UV radiation emission, and less so to visible light emission (so-called blue light hazard). Stainless steel and mild steel follow, while the exposure during the processing of aluminum and brass appears to be comparatively low. In general, the secondary radiation emission shows a very strong divergence into the hemisphere above the respective processed material sample for all materials considered.

With the laser systems used, UV secondary radiation exposure values critical for the skin and cornea are observed in a similar order of magnitude. At a short distance from the laser process zone, the relevant exposure limit H_{eff} is in some cases reached after less than one minute, especially in the case of titanium. This is highly relevant for ensuring occupational safety in hand-held or hand-positioned laser beam welding, because the hands of the operating personnel must be very close to the process zone. Accordingly, lightproof work gloves must be worn. Protection of the hands against emitted laser radiation should not be ignored. It is also urgently recommended to cover the skin, especially on the arms, which are still relatively close to the process zone, with lightproof clothing. For the eyes, the potential exposure of the retina to blue light emitted from the welding process zone has proven to be more relevant compared to the exposure of the lens to emitted UV radiation, which can be explained by the fact that the spectral maximum of the secondary radiation is shifted out of the UV range into the VIS range. Depending on the material being processed and the distance from the process zone, the exposure limit E_B may also be reached in less than one minute. Obviously, the processing of titanium is particularly critical. In general, the operating personnel must wear suitable laser safety goggles during the operation of a hand-held laser device to protect their eyes against the laser radiation released from the process zone. Care must be taken to ensure that these goggles also meet the requirements for protection against UV radiation and, above all, visible light. The safety goggles must therefore be darkened in a similar way to welding safety goggles, although not as much, in order to reduce the transmission over a wide spectral range.

1 Problemstellung

Mit handgeführten bzw. handpositionierten Lasergeräten (HLG) gemäß DIN EN ISO 11553-2 [1] lassen sich unterschiedlichste Anwendungen aus dem Bereich der Materialbearbeitung unter Nutzung der bekannten Vorteile des Werkzeugs Laser, vor allem der großen erreichbaren Flexibilität bei präziser, lokal begrenzter Energieeinbringung, realisieren. Beispiele finden sich im Werkzeugbau (z.B. Härten von Oberflächen, Reparatur großer Werkzeuge), in der Dentaltechnik (z.B. Schweißen kieferorthopädischer Konstruktionen), bei der Schmuckherstellung und im Bereich der Reinigung/Entschichtung von Bauteil- und Werkzeugoberflächen. Gemeinsam ist den betrachteten Anwendungen die für das Schweißen und für die trennende Bearbeitung ausreichend hohe Laserleistung (Laser Klasse 4 gemäß DIN EN 60825-1 [2]). Dabei emittieren die meistens genutzten Laserstrahlquellen (Festkörper-, Dioden-, Faser-, Scheibenlaser) ihre Strahlung im nahinfraroten Spektralbereich (NIR) oberhalb des sichtbaren Bereiches (VIS), während CO₂-Laser mit einer Wellenlänge von 10,6 µm mit feststehendem Laserstrahl und bewegtem Bauteil immer weniger zum Einsatz kommen. Bedingt durch die manuelle Führung von HLG bzw. Werkstück und die damit verbundene Nähe der offenen oder teilabgeschirmten Prozesszone zu einzelnen Körperteilen, vor allem den Händen, oder den Augen des Bedieners ist mit einer signifikanten Exposition gegenüber spiegelnd oder diffus reflektierter Laserstrahlung und folglich mit irreversiblen Schädigungen zu rechnen. Daher sind Risikoanalyse und Gefährdungsbeurteilung sowie die Realisierung adäquater Schutzmaßnahmen inkl. persönlicher Schutzmaßnahmen für die potenziell bestrahlten Körperteile und die Augen zwingend erforderlich. Das Gefährdungsausmaß lässt sich dabei als Worst-Case-Betrachtung unter Berücksichtigung der Eigenschaften bzw. der eingestellten Parameter der verwendeten Laserstrahlung durch eine Messung oder Berechnung der relevanten Bestrahlungsstärken sowie den Vergleich mit den geltenden Expositionsgrenzwerten (EGW) für Laserstrahlung gemäß Richtlinie 2006/25/EG [3] bzw. TROS Laserstrahlung [4] ermitteln.

Im Gegensatz zu den primären Gefährdungen bei der Materialbearbeitung mit HLG lagen bis dato kaum Erkenntnisse zum Ausmaß der sekundären Gefährdungen durch aus der Prozesszone emittierte inkohärente ultraviolette Strahlung (UV-Strahlung) sowie sichtbare Strahlung (VIS-Strahlung, sogenannte Blaulichtgefährdung, formal nach TROS IOS Teil 2 [5] zwischen 300 nm und 700 nm) vor. Neben der unmittelbaren physikalisch-thermischen Wirkung sind im Fall der Strahlungsexposition je nach Wellenlänge (UV-A, UV-B, UV-C, VIS) auch die kumulativen fotochemischen Wirkungen (Beeinflussung des Erbguts) von Bedeutung. Aus diesem Grund schreibt die OStrV [6] die Aufbewahrung der Unterlagen zur Gefährdungsbeurteilung für 30 Jahre vor. Einzelne stichprobenartige Messungen der BAuA zusammen mit dem Institut für Arbeitsschutz (IFA) der DGUV und der SLV Halle an Laserstrahlschweißprozessen [7,8] sowie exemplarische Messungen von BAuA und BG ETEM an handgeführten Laserstrahlschweißprozessen [9-11] legten nahe, dass es beim HLG-Einsatz schnell zu einer Überschreitung der gemäß [3,5] im UV- und VIS-Bereich geltenden EGW für Auge und Haut kommen kann. Bekannt war, dass die aus der Strahlungsemission resultierende Bestrahlungsstärke von dem bearbeiteten Werkstoff und seiner Oberflächenbeschaffenheit, den Einstrahlbedingungen (Wellenlänge, Leistung, Pulsparameter) und der Plasmabildung sowie dem Abstand und der Abstrahlrichtung relativ zur Laserprozesszone abhängt. So ist die UV- und VIS-Strahlungsemission beim Schweißen mit CO₂-Laserstrahlung infolge der verstärkten Plasmabildung offenbar stärker als bei Verwendung von NIR-Lasern [7]. Systematische Untersuchungen waren zu den Sekundärstrahlungsemissionen beim Laserstrahlschweißen vor Beginn des hier beschriebenen Forschungsvorhabens nicht erfolgt. Daraus ergab sich Handlungsbedarf zur signifikanten Verbesserung der Datenlage als Grundlage für die Empfehlung notwendiger Schutzmaßnahmen für die Nutzer von HLG.

2 Forschungszweck/-ziel

Die in diesem Bericht beschriebenen Untersuchungen betreffen das handgeführte bzw. handpositionierte Laserstrahlschweißen, wie es z.B. in der Dentalindustrie, aber auch bei der Schmuckherstellung oder beim Reparaturschweißen im Maschinenbau eingesetzt wird. Hier bewegt sich der Bediener des betrachteten Handlaserschweißgeräts vor allem mit seinen Händen und evtl. auch mit anderen Körperteilen in der Nähe der Schweißprozesszone, aus welcher je nach den herrschenden Prozessbedingungen UV- und VIS-Sekundärstrahlung emittiert wird.

Ziel des Forschungsvorhabens war die Ermittlung und Bewertung von Informationen zum Ausmaß der Emission potenziell gefährlicher inkohärenter UV- und VIS-Sekundärstrahlung inkl. der spektralen Charakteristik aus den Prozesszonen von Laserstrahlschweißprozessen. Die Ergebnisse sollen der signifikanten Verbesserung der momentan defizitären Datenlage dienen und eine Basis zur Durchführung von Gefährdungsbeurteilungen durch die Betreiber der betrachteten Lasereinrichtungen darstellen. Aufgrund des zuvor bereits erläuterten hohen spezifischen Gefährdungspotenzials erfolgte in diesem Vorhaben eine Fokussierung auf die handgeführte bzw. handpositionierte Lasermaterialbearbeitung. Generell sind die erzielten Ergebnisse aber auch für automatisierte Laserstrahlschweißprozesse relevant, wenn sich Personen im Arbeitsbereich aufhalten. Systematisch identifiziert und untersucht wurden die Schweißprozessgrößen, die die Strahlungsemission wesentlich beeinflussen. Dazu gehören vor allem der bearbeitete metallische Werkstoff unter Berücksichtigung seiner Oberflächenbeschaffenheit, die Laserwellenlänge (Betrachtung typischer Wellenlängen im nahinfraroten Spektralbereich), die applizierte Laserleistung und die Pulsparameter (für Pulsdauern hinunter bis in den unteren Millisekundenbereich) sowie der Abstand von der Prozesszone und der Abstrahlwinkel (zur Bewertung der räumlichen Charakteristik der UV- und VIS-Strahlungsemission). Grundlegend für die geplanten Untersuchungen war die Auswahl und Verifizierung der Messtechnik zur Erfassung der Sekundärstrahlung im niederwelligen Spektralbereich, welche darüber hinaus einem geeigneten Kalibrationsprozess unterzogen werden musste. Eine praxisnahe Beschreibung der Messroutine sowie der nachfolgenden Datenverarbeitung soll nicht zuletzt späteren Anwendern helfen, ihre spezifischen Gefährdungspotenziale zu erkennen und entsprechende Schutzmaßnahmen einzuleiten.

Die Projektergebnisse sollen von der DGUV in erster Linie genutzt werden, um industriellen Anwendern geeignete Informationsmaterialien und Handlungsempfehlungen, z.B. als Teil einer DGUV-Information für HLG, zur Verfügung stellen zu können, welche zur erleichterten Realisierung geeigneter Schutzmaßnahmen bei der handgeführten bzw. handpositionierten Lasermaterialbearbeitung nutzbar sind. Darüber hinaus ist das Ziel, zeitnah die Einbringung der Ergebnisse in die Normung für handgeführte und handpositionierte Laserbearbeitungsgeräte zu initiieren.

3 Methodik

Ursprünglich vorgesehener Arbeitsplan laut Antrag:

Nr.	Arbeitsinhalte		Projektmonat																		Dauer
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
1		Prüfung und Vorbereitung der UV- und VIS-Strahlungsmesstechnik (Beschaffung, Eignung, Kalibration)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	6
	1	Bereitstellung der nutzbaren Messgeräte: Integralverfahren (Photodiode (BAuA), Halbleitersensoren (Gigahertz, Coherent)), Spektralverfahren (Radiometer (Gigahertz, Instrument Systems), Spektrometer (LZH))	■																		1
	2	Definiertes Pulsen der Deuterium-Strahlquelle und der Halogen-Lichtquelle mittels optischem Chopper	■	■																	3
	3	Messungen an der Deuterium-Strahlquelle und der Halogen-Lichtquelle mit den Geräten aus TAP 1.1		■	■	■															3
	4	Auswertung, Vergleich mit geeigneten Biosensoren und Kalibration für Pulse und Abstand, Bewertung und Validierung der Eignung anhand eines exemplarischen Schweißprozesses aus der Dentaltechnik		■	■	■															3
	5	Messsystemkopfentwicklung und triggerbare Datenakquisition				■	■														2
	6	Beschreibung der Messroutine für spätere Messaufgaben					■	■													1
2		Durchführung system. Parameterstudien an nachgestellten Schweißungen (Versuchsstände, Schweißungen, Messungen, Auswertung)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	8
	1	Beschaffung und Vorbereitung der Schweißproben						■	■												2
	2	Einrichtung der Versuchsstände zur Parametervariation						■	■												2
	3	Einrichtung exemplarischer Schweißprozesse an relevanten Metallen (Baustahl, Edelstahl, Al, Ti und Cu)						■	■												1
	4	Prüfung der Nutzbarkeit von statistischer Versuchsplanung (DoE) und Aufstellung von Versuchsplänen für TAP 2.5 - TAP 2.8						■	■												2
	5	UV- und VIS-Strahlungsmessung – Stufe 1: 1 Metall – 1 Laser – 1 Messgeometrie, Variation von mittlerer Leistung, Pulsdauer, Pulsfrequenz, Energiedichte, Vorschub und Abstand								■	■	■									3
	6	UV- und VIS-Strahlungsmessung – Stufe 2: Variation der Messgeometrie: Abstrahl- und Einstrahlrichtung inkl. Abstand								■	■	■									3
	7	UV- und VIS-Strahlungsmessung – Stufe 3: Variation des Werkstoffes								■	■	■									3
	8	UV- und VIS-Strahlungsmessung – Stufe 4: Einfluss der Laserstrahlquelle (Wellenlänge und Strahlkaustik)								■	■	■									3
	9	Auswertung der Messergebnisse gemäß TROS IOS, begleitend zur Durchführung der Messungen								■	■	■	■								6
	10	Gemeinsame Bewertung der Ergebnisse mit den beratenden Partnern und der DGUV												■							1
3		Durchführung von Feldversuchen an realen Schweißprozessen (Validierung) und Erstellung von Handlungsempfehlungen	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	4
	1	UV- und VIS-Strahlungsmessungen an ausgewählten realen Schweißprozessen bei industriellen Anwendern																			3
	2	Auswertung der Messungen auf Basis der Ergebnisse aus AP 1 und AP 2																			3
	3	Erarbeitung von Informationen und praktischen Handlungsempfehlungen für industrielle Anwender																			4
4		Projektbegleitende Normungsarbeit	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	14
	1	Projektbegleitende Mitarbeit bei der Überarbeitung der EN ISO 11553-1/2 im TC 76 der IEC	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	14

4 Ergebnisse des Gesamtvorhabens

Als Ausgangspunkt wurde zunächst vom LZH eine Recherche im Hinblick auf im Projekt nutzbare Messgeräte zur Detektion von UV- und VIS-Strahlung durchgeführt (TAP 1.1). Zum einen wurden die aktuell am Markt verfügbaren Geräte in Betracht gezogen, zum anderen wurde verfügbares Messequipment im Eigenbestand und von den Partnern ermittelt.

4.1 Im Projekt verwendete Messgeräte (TAP 1.1)

Vom LZH wurde das Optometer X1-3 mit den beiden integral arbeitenden Messköpfen XD-45-HUV und XD-45-HB der Fa. Gigahertz Optik GmbH, Türkenfeld, Deutschland, bereitgestellt. Die Messköpfe werden speziell zur Bestimmung der Gefährdung durch UV-Strahlung und Blaulicht gemäß nationalen und internationalen Standards eingesetzt. Sie werden mit einer rückführbaren Kalibration ausgeliefert und sind somit gut für die Messungen und Bewertungen im Forschungsvorhaben geeignet. Im späteren Verlauf des Projektes (TAP 1.2 und TAP 1.3) wurde zusätzlich das Optometer P-9801 V3 bereitgestellt, da diese Messeinheit in Verbindung mit den beiden Messköpfen XD-45-HUV und XD-45-HB gepulste Strahlung mit einer Messauflösung von einem Messwert pro 2 ms erfassen und darstellen kann. Sämtliche Messwerte werden im Gegensatz zu dem Optometer X1-3 parallel von den beiden angeschlossenen Messköpfen mit einer Triggerfunktion aufgezeichnet.

- Der Messkopf XD-45-HUV enthält drei Detektorelemente. Zur Bewertung des Risikos für das Auge wird ein UV-A-Detektor verwendet. Dieser misst die ungewichtete Bestrahlungsstärke von 315 nm bis 400 nm. Weiterhin können zwei gefilterte Detektorelemente die effektive, gewichtete Bestrahlungsstärke (auch als aktinische Bestrahlungsstärke bezeichnet) im UV-A-Spektralbereich (320 nm – 400 nm) sowie im UV-B- und UV-C-Bereich (200 nm – 320 nm) zur Bewertung des Risikos für Auge und Haut gemäß ICNIRP/ACGIH [12,13] angeben.
- Der Messkopf XD-45-HB dient zur Bewertung der Blaulichtgefährdung für das Auge und ist mit vier Detektorelementen ausgestattet. Drei Elemente messen die effektive Bestrahlungsstärke im UV-A-Bereich (300 nm – 400 nm), im Blaulicht-Bereich (400 nm – 600 nm) und im roten Bereich (600 nm – 700 nm). Ein zusätzliches Detektorelement dient zur integralen Messung der Beleuchtungsstärke von 0,2 lx bis 1.000.000 lx.



Abbildung 1. Optometer P-9801 V3 und X1-3 mit den Messköpfen XD-45-HUV und XD-45-HB.

Zum Abgleich der Messungen mit dem Gigahertz Messsystem wurden dem LZH von einem beratenden Partner (BG ETEM) verschiedene Dosimeter des Typs VioSpor der Fa. Biosense bereitgestellt [14]. Das Empfindlichkeitsprofil der Sensoren ähnelt dem der menschlichen Haut. Das integrale Messsystem ist im UV-A- und im UV-B-Bereich (285 nm – 400 nm) einsetzbar und gibt die Strahlungsenergie pro Fläche [J/m^2] an. Darüber hinaus wurde kurzzeitig von der BG ETEM ein Strahldichtemesskopf Typ LDM-9805 der Fa. Gigahertz-Optik GmbH bereitgestellt.



Abbildung 2. VioSpor Biosensor, Biosense, Bornheim, sowie Strahldichtemesskopf LDM-9805, BG ETEM, Köln.

Für die Detektion schneller Lichtpulse diente eine Highspeed Photodiode des Typs DET210 der Fa. Thorlabs. Die Diode besteht aus dem Halbleiter Silizium und hat eine spektrale Empfindlichkeit von 200 nm bis 1100 nm und eine Reaktionszeit von 1 Nanosekunde. Somit kann diese Photodiode gut zur Detektion schnell gepulster UV-Strahlung genutzt werden. Des Weiteren standen verschiedene Leistungsmessköpfe der Fa. Coherent zur Verfügung. Zu erwähnen ist insbesondere der Messkopf Coherent PowerMax-Pro 150F HD, welcher schnelle Lichtpulse ($\tau > 20 \mu\text{s}$) mit integrierten Leistungen von 150 mW – 150 W messen und anschließend mittels Software das aufgezeichnete Signal hinsichtlich der Pulseigenschaften Repetitionsrate, Pulshöhe, Pulsbreite etc. analysieren kann. Für geringere Leistungen von 10 μW – 100 mW stand ein Leistungsmesskopf Coherent PowerMax USB UV-VIS zur Verfügung. Bei der Photodiode und den Leistungsmessköpfen ist zu beachten, dass diese nur zur qualitativen Bewertung einzusetzen sind und für die Nutzung zur quantitativen Bewertung zunächst eine entsprechende Kalibration durchgeführt werden muss. Mit den UV-Lichtquellen wurden die genannten Detektoren jeweils ohne optische Filter verwendet.



Abbildung 3. Unterschiedliche Leistungsmessköpfe der Fa. Coherent.

Zur Ermittlung der Wellenlängenspektren der verwendeten künstlichen Lichtquellen und der Laserstrahlschweißprozesse stand ein mobiles, USB-betriebenes Gitterspektrometer AvaSpec-Mini4096CL der Fa. Avantes zur Verfügung. Die Spektren werden damit von 200 nm bis 1100 nm mittels eines Gitters von 300 Linien/mm aufgezeichnet.



Abbildung 4. Spektrometer AvaSpec-Mini4096CL.

4.2 Genutzte künstliche Strahlquellen für den UV-VIS-Bereich (TAP 1.1)

Zur Erzeugung definierter UV- und VIS-Strahlungspulse mittels Deuterium- bzw. Halogen-Lichtquellen wurde vom LZH u.a. eine kalibrierte Deuterium-Strahlquelle beschafft. Die Strahlquelle SL3 der Fa. Stellarnet Inc. beinhaltet eine 30 W Deuterium-Lampe mit einem Spektralbereich der Emission von 190 nm bis 450 nm. Zwei weitere Strahlquellen der Fa. Ocean Optics konnten im LZH ebenfalls genutzt werden. Die Strahlquelle DH-2000-BAL beinhaltet eine 25 W Deuterium-Lampe sowie eine 20 W Halogen-Lampe, welche einzeln oder zusammen betrieben werden

können. Hier beträgt der komplette Spektralbereich 190 nm – 2500 nm. Die Strahlquelle HPX 2000 besitzt mit einer 35 W Xenon-Lampe einen Spektralbereich von 190 nm – 2000 nm. Von den beratenden Partnern konnte wie oben erläutert keine Strahlquelle zur Verfügung gestellt werden. In der Abbildung 5 sind die genannten Strahlquellen dargestellt.



Abbildung 5: Deuterium-Strahlquelle – SL3 (A), Deuterium- und Halogen-Strahlquelle – DH-2000-BAL (B), Xenon-Strahlquelle – HPX-2000 (C).

4.3 Genutzte pulsfähige Lasersysteme (TAP 1.1)

Nachfolgend sind die nutzbaren Lasersysteme mit den entsprechenden Parametern und Eigenschaften aufgelistet, welche im Rahmen des Projektes für die Nachstellung von handgeführten Laserstrahlschweißprozessen genutzt werden konnten.

- a) AlphaLaser AL300, gepulster Festkörperlaser (SLV Halle) (Laser 1)
 Durchschnittsleistung bis 300 W, $\lambda = 1064 \text{ nm}$, SPP = 3,3 mm-mrad, minimale Pulsdauer $\tau = 0,5 \text{ ms}$,
 Pulsfolgefrequenz 0,1 Hz – 100 Hz, maximale Pulsenergie 90 J



Abbildung 6. AlphaLaser AL300, gepulster Festkörperlaser (Laser 1).

b) Trumpf TruPulse 103, gepulster Festkörperlaser (LZH) (Laser 2)

Maximale Durchschnittsleistung: 95 W, Pulsspitzenleistung bis 8 kW, $\lambda = 1064 \text{ nm}$, SPP = 12 mm·mrad, Pulsdauer $\tau = 0,3 \text{ ms} - 50 \text{ ms}$, Pulsfrequenz 1 Hz – 20 Hz, maximale Pulsenergie 90 J, LWL $\varnothing 400 \mu\text{m}$



Abbildung 7. Trumpf TruPulse 103, gepulster Festkörperlaser (Laser 2).

c) Coherent HighLight FL6000-ARM (Adjustable Ring Mode), pulsbarer Faserlaser (LZH) (Laser 3)

Maximale Leistung: 2 kW (Center), 4 kW (Ring), insgesamt 6 kW, $\lambda = 1070 \text{ nm}$, SPP = 8 mm·mrad, maximale Pulsfrequenz 5 kHz (quasi-cw), LWL $\varnothing 70 \mu\text{m}$ (Center), 100/180 μm (innerer Ring/Ring), $f_k = 100 \text{ mm}$,

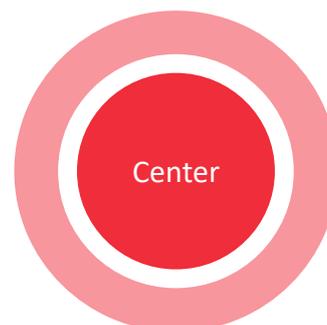


Abbildung 8. Coherent HighLight FL6000-ARM, pulsbarer Faserlaser (Laser 3). Rechts ist schematisch das Strahlprofil des Lasers dargestellt.

4.4 Versuchsaufbau zum definierten Pulsen der Strahlquellen (TAP 1.2)

Für ein definiertes Pulsen der von der Strahlquelle emittierten UV- bzw. VIS-Strahlung wurde ein optischer Versuchsaufbau erstellt. Darin wurde die UV-/VIS-Strahlung von der Strahlquelle über eine Lichtleitfaser mit einem Faserkerndurchmesser von 600 µm zu den Fokussiereinheiten, welche aus Quarzglas-Linsen (Durchmesser jeweils 1“) bestanden, geführt. Der Strahlung wurde über ein Chopper-System zum periodischen Öffnen und Blockieren des Strahlengangs zu einer Detektionseinheit bzw. dem jeweiligen Messkopf (siehe Kapitel 4.1) geleitet. Abbildung 9 zeigt schematisch den Aufbau zum definierten Pulsen der Strahlung mittels des Chopper-Systems.

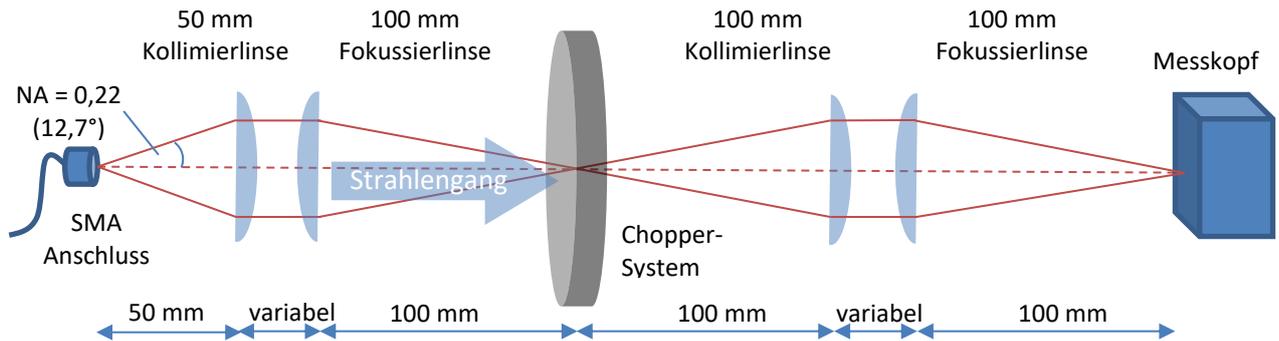


Abbildung 9. Schematische Darstellung des optischen Versuchsaufbaus zum Erzeugen von Pulsen aus der von der betrachteten Quelle emittierten kontinuierlichen Strahlung.

Je nach geometrischer Auslegung der Chopper-Scheibe und der darauf befindlichen Öffnungen (Durchmesser, Anzahl und Größe der Öffnungen, Bahnlänge der Öffnungen) sowie der Rotationsfrequenz der Scheibe lassen sich unterschiedliche Pulsdauern erzeugen. Dabei wird zwischen einer Pulsdauer mit voller Strahlungsleistung und einer gesamten Pulsdauer unterschieden. Einen theoretisch berechneten zeitlichen Verlauf der Überlappfläche von Lichtspot und Chopper-Öffnung und somit des zu erwartenden Leistungssignals zeigt Abbildung 10. Mit der Annahme, dass der Lichtspot mit einem Durchmesser \varnothing von 10 mm auf die Chopper-Scheibe trifft und die Scheibe kreisförmige Öffnungen von 3 mm Durchmesser besitzt, gibt es bei einer Rotation der Scheibe einen bestimmten zeitlichen Verlauf der durch die Öffnung gelassen Leistung des Lichtpulses. Je nach Durchmesser der Öffnung ändert sich die Überlappungsfläche mit dem Lichtspot und demnach auch die Pulsdauer mit voller Strahlungsleistung.

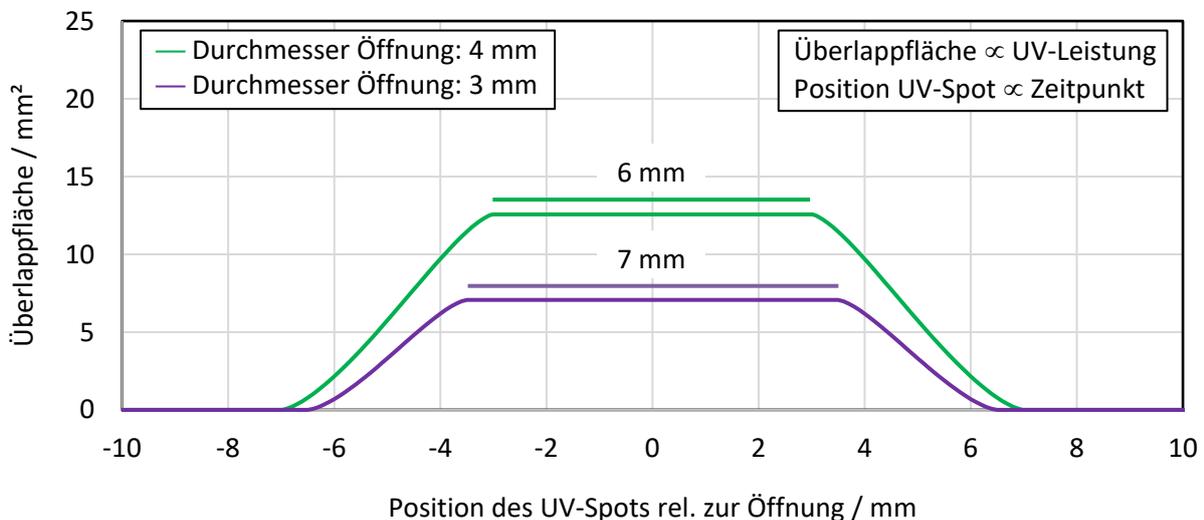


Abbildung 10. Berechneter zeitlicher Verlauf der durchgelassenen Leistung eines Lichtpulses.

Bei gleichbleibenden Parametern des optischen Aufbaus lässt sich über die Rotationsfrequenz eine definierte Pulsdauer einstellen. Abbildung 11 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit der Pulsdauer τ bei maximaler Leistung im Vergleich zur Gesamtpulsdauer von der Rotationsfrequenz der Chopper-Scheibe.

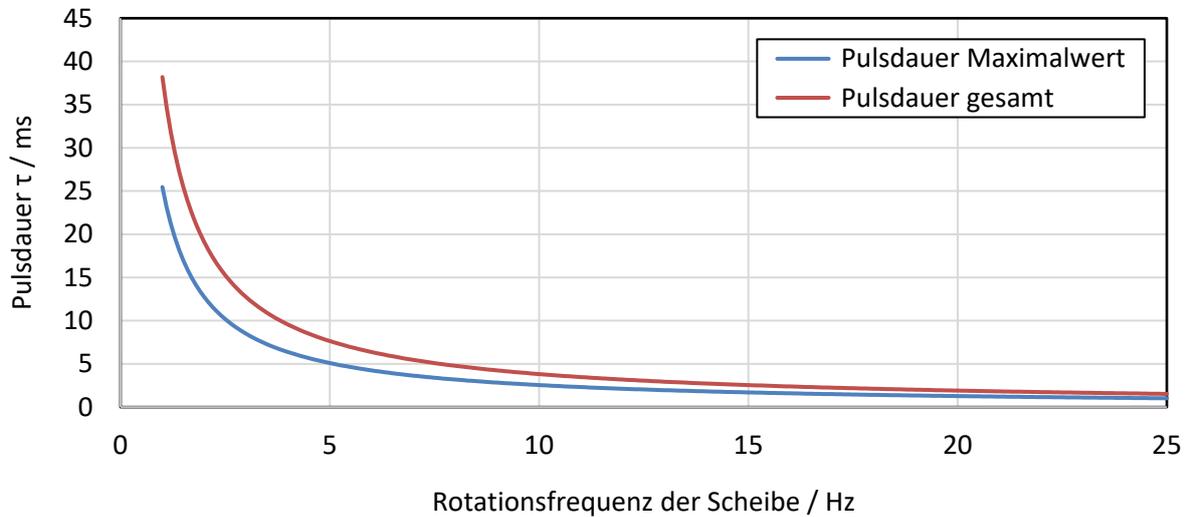


Abbildung 11. Abhängigkeit der Pulsdauer τ von der Rotationsfrequenz (Lichtspot mit $\varnothing = 2$ mm und 10 Bohrungen auf der Chopper-Scheibe von jeweils $\varnothing = 10$ mm).

Zur Erzeugung von gepulster UV- und VIS-Strahlung dient ein optisches Chopper-System MC2000B-EC der Fa. Thorlabs in Kombination mit drei unterschiedliche Chopper-Scheiben des Typs MC1F2, MC1F10A und MC1F10HP. Somit lassen sich Rotationsfrequenzen von 4 Hz bis 10 kHz realisieren.

Auf der Grundlage des in Abbildung 9 schematisch dargestellten Versuchsaufbaus wurde eine Messstrecke aufgebaut, welche mit unterschiedlichen Strahlquellen und Messgeräten betrieben werden konnte. In Abbildung 12 ist die Messstrecke mit dem beschriebenen Chopper-System zum definierten Pulsen von UV- bzw. VIS-Strahlung dargestellt.

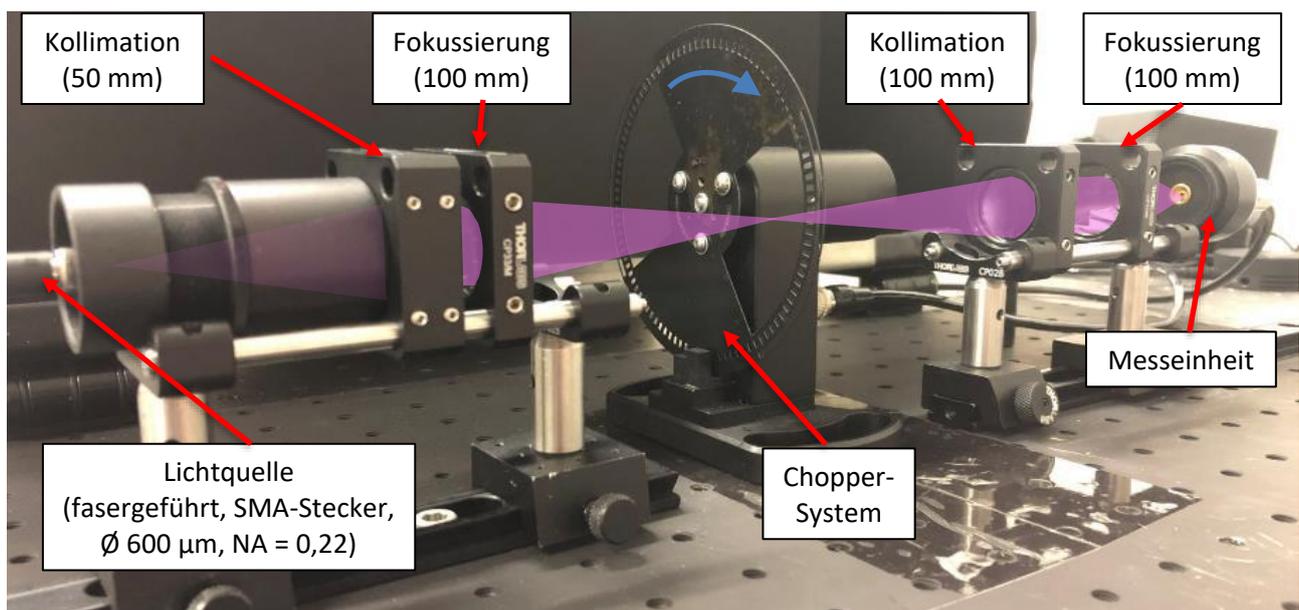


Abbildung 12. Foto der Messstrecke zum definierten Pulsen von UV- bzw. VIS-Strahlung (der Strahlengang wurde in violetter Farbe in das Foto eingezeichnet).

4.5 Messungen an der Deuterium-Strahlquelle und der Halogen-Lichtquelle mit den Geräten aus TAP 1.1 sowie Auswertung der Messungen (TAP 1.3 und 1.4)

Zunächst wurde mit dem Spektrometer AvaSpec-Mini4096CL die spektrale Leistungsdichteverteilung der Deuterium-Strahlquelle SL3 untersucht. Hierbei wurde die Deuterium-Strahlquelle sowohl ohne als auch mit einem vorgeschalteten Filter vom Typ U330 vermessen. Darüber hinaus wurden keine optischen Komponenten verwendet, welche das von der Quelle emittierte Strahlungsspektrum durch wellenlängenabhängige Absorption verfälschen könnten. In Abbildung 13 sind diese zwei spektralen Messungen als Einkanalspektren [Counts] zu finden (rote und grüne Kurve). Zusätzlich ist in der Abbildung die spektrale Transmissionskurve des Filters dargestellt (blaue Kurve, spektraler Transmissionsgrad [%] auf der Sekundärachse). Zu erkennen ist, dass bei Einsatz des Filters erst ab einer Wellenlänge von ca. 240 nm Strahlung detektiert und somit ein Teil der UV-C-Strahlung herausgefiltert wird. Um das ganze Spektrum der Strahlquelle verwenden zu können, wurde in den weiteren hier dargestellten Messungen auf den Filter, der im Wesentlichen zur Filterung des „Deuterium-Peaks“ bei 485 nm dient, verzichtet.

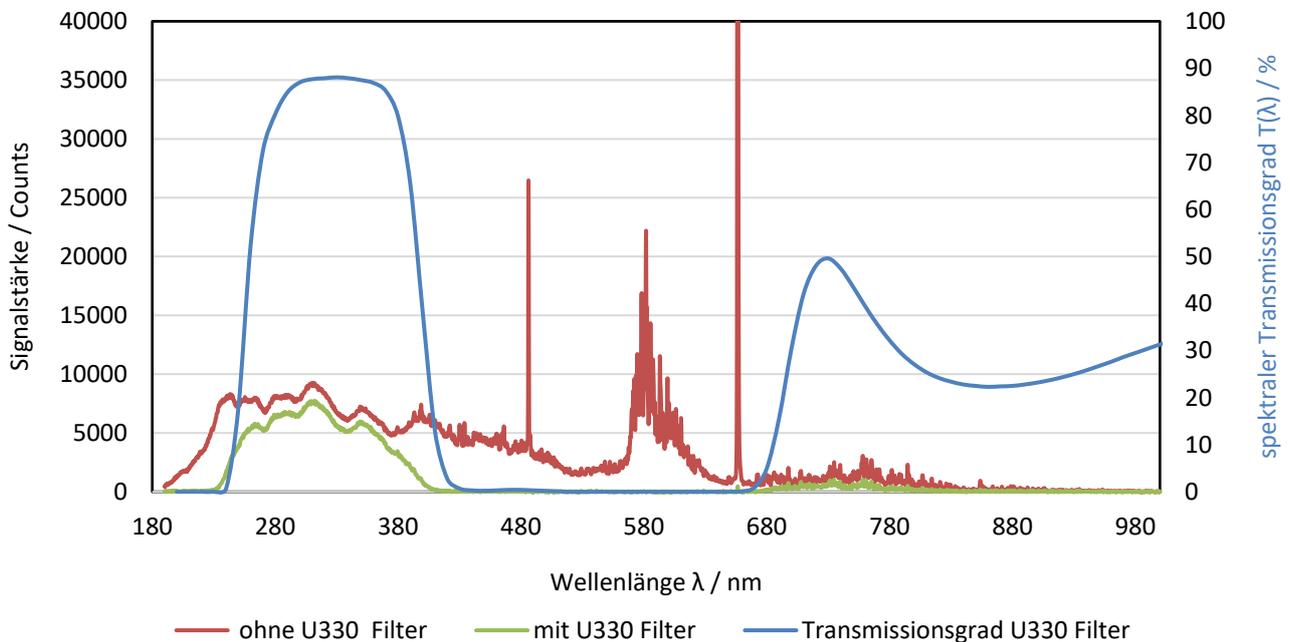


Abbildung 13. Gemessene spektrale Leistungsdichteverteilung der Deuterium-Strahlquelle SL3, ohne (rote Kurve) und mit Filter (grüne Kurve), jeweils als Einkanalspektrum (ungewichtet), sowie die spektrale Transmissionskurve des Filters U330 (blaue Kurve).

Im nächsten Schritt wurde das aufgenommene Einkanalspektrum der Deuterium-Strahlquelle (ohne Filter) durch die Kalibrationskurve des Herstellers in der Einheit $W/(m^2 \cdot nm)$ dividiert, so dass eine gewichtete spektrale Aufnahme erzeugt wurde, die der spektralen Detektionsempfindlichkeit des Spektrometers entspricht (vgl. dazu auch [15]). Diese Kurve sollte normalerweise die Einheit $Counts \cdot m^2 \cdot nm/W$ tragen. Da jedoch für die verwendete Messkonfiguration nicht genau festzustellen war, welcher Anteil der von der Quelle emittierten Strahlung vom Spektrometer erfasst wurde, kann die Detektionsempfindlichkeit lediglich mittels relativer Einheiten, z.B. bezogen auf den ermittelten Maximalwert, angegeben werden. Die Empfindlichkeitskurve des Spektrometers lässt sich wiederum nutzen, um das Signal der aufgezeichneten Einkanalspektren von anderen Strahlquellen in eine spektrale Bestrahlungsstärkekurve ebenfalls in relativen Einheiten umzurechnen. Abbildung 14 zeigt die Kalibrationskurve der Deuterium-Strahlquelle (links) sowie die ungewichtete spektrale Leistungsdichteverteilung (grüne Kurve in Counts) und die gewichtete spektrale Empfindlichkeitskurve (blaue Kurve in rel. Einheiten) der Strahlquelle. Das vor allem bei größeren Wellenlängen vergleichsweise starke Rauschen der Empfindlichkeitskurve ist auf die dort absolut sehr geringe spektrale Leistungsdichte zurückzuführen.

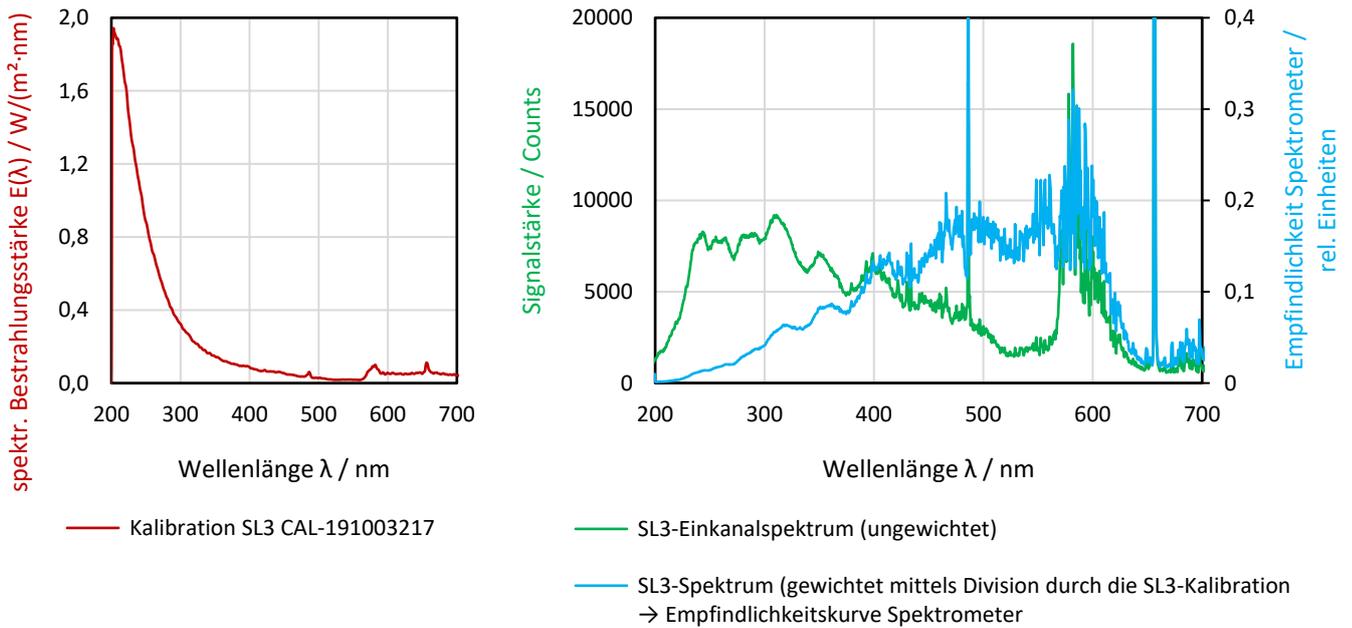


Abbildung 14. Kalibrationskurve der Strahlquelle SL3 als absolute spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ (links), spektrale Charakteristik der Strahlquelle SL3 ohne (grüne Kurve) und mit (blaue Kurve) Berücksichtigung der Kalibrationskurve (rechts).

In Abbildung 15 sind die ungewichteten Einkanalspektren sowie die gewichteten Spektren mit der Angabe der jeweiligen spektralen Bestrahlungsstärken für die Strahlquelle DH-2000-BAL dargestellt. Im linken Diagramm sind die Spektren unter Verwendung der Deuterium- und Halogenlampe abgebildet, im rechten Diagramm wurde nur die Deuterium-Lampe der Strahlquelle verwendet. Bei der mit Hilfe der Empfindlichkeitskurve aus Abbildung 14 (rechts) errechneten gewichteten Kurve in Abbildung 15 (links) ist bei größeren Wellenlängen, wenigstens ab etwa 550 nm, ein sehr starkes Rauschen wahrzunehmen. Dieses lässt sich letztlich auf die Kalibrationskurve in Abbildung 14 (links) zurückführen, welche bei größeren Wellenlängen keine hinreichend große Signalstärke und damit nicht genügend Informationen aufweist, so dass die erzeugte Empfindlichkeitskurve des Spektrometers verfälscht wird.

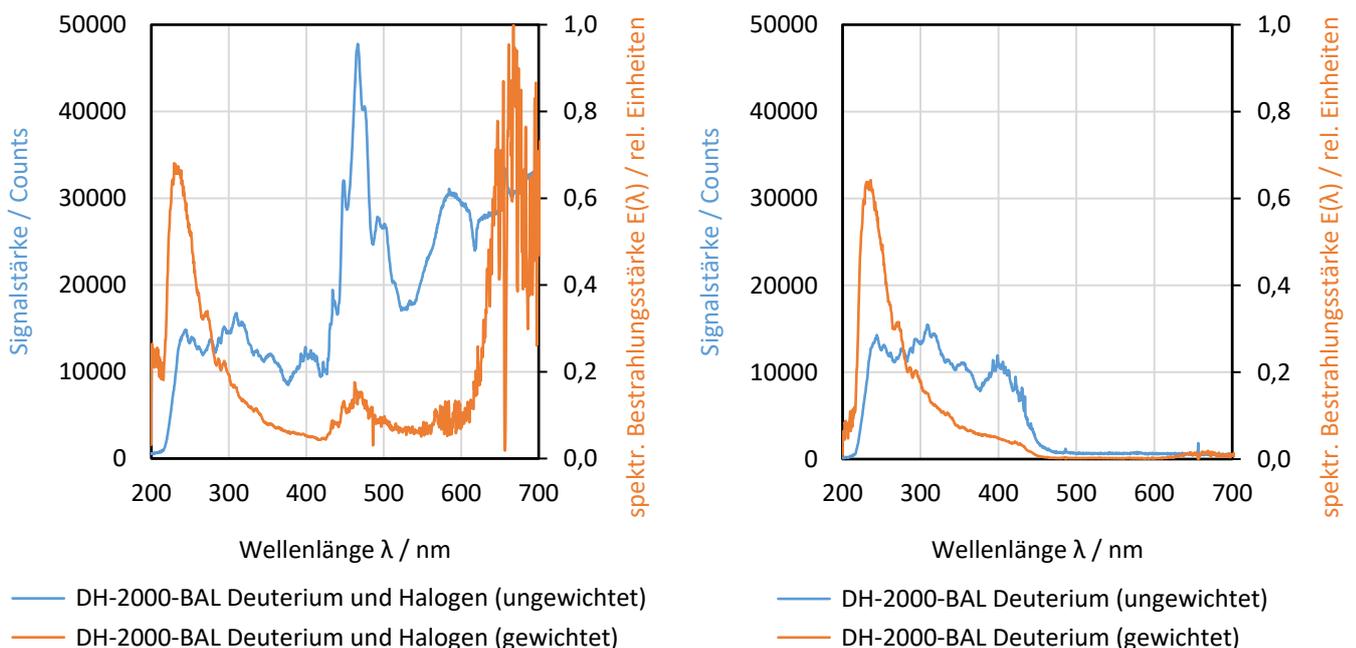


Abbildung 15. Ungewichtete Einkanalspektren und gewichtete Spektren (spektrale Bestrahlungsstärken $E(\lambda)$) der Strahlquelle DH-2000-BAL (links: Deuterium plus Halogen, rechts: nur Deuterium).

Zur Validierung der Funktionalität des Chopper-Systems im Hinblick auf das definierte Erzeugen von Pulsen der hindurchtretenden UV-Strahlung mit Hilfe der Deuterium-Strahlquelle SL3 zur Evaluierung der Eigenschaften der Gigahertz-Detektoren wurden Messungen mit der Highspeed Photodiode DET210 für unterschiedliche Pulsdauern durchgeführt. Abbildung 16 zeigt Ergebnisse der Messungen.

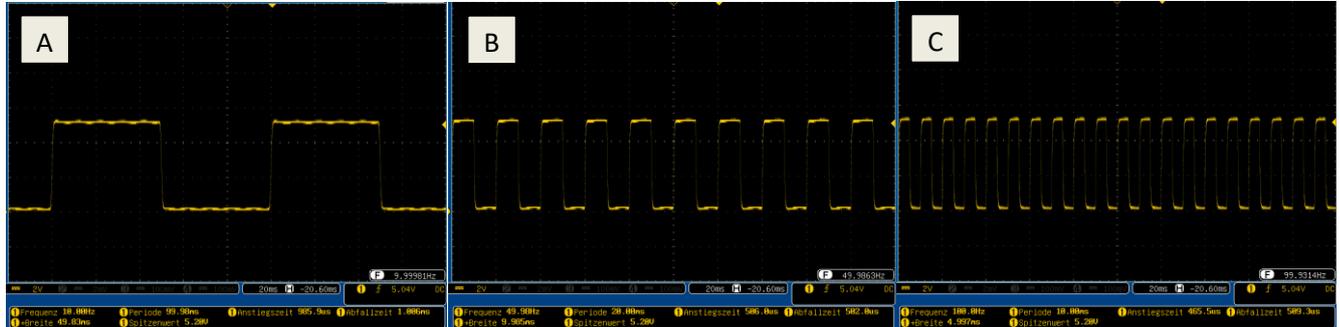


Abbildung 16. Validierung der Funktionalität des aufgebauten Chopper-Systems mit der Highspeed Photodiode DET210, Pulsfrequenzen von 10 Hz (A), 50 Hz (B) und 100 Hz (C), aufgezeichnet mit einem Speicher-Oszilloskop.

Für die Messungen wurden 10 Hz, 50 Hz und 100 Hz als Rotationsfrequenz des Choppers eingestellt. Parallel hierzu konnten Pulsdauern (Plateaulänge des Rechtecksignals) von 50 ms, 10 ms und 5 ms gemessen werden. Erst ab einer Rotationsfrequenz von ca. 100 Hz war zu beobachten, dass die Flanken des Rechtecksignals verschliffen wurden.

Das zusammen mit den Detektoren beschaffte Optometer X1-3 dient laut Hersteller für Anwendungen bei zeitlich stabiler Bestrahlung und weist Integrationszeiten von 1 ms bis 1 s auf. Den Effekt der Messung von gepulster Strahlung bei stark unterschiedlichen Integrationszeiten zeigt unmittelbar der Vergleich der Messaufzeichnungen der Highspeed Photodiode DET210 und des UV-Messkopfes XD-45-HUV (zusammen mit dem Optometer X1-3) mit den gleichen Drehfrequenzen des Choppers von 10 Hz in Abbildung 17. Hier entsteht offenbar eine starke Verzerrung des zu erwartenden Quasi-Rechtecksignals zu einem quasi sinusförmigen Signal.

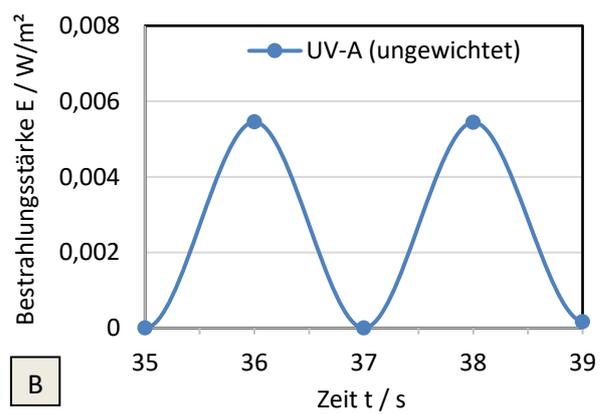
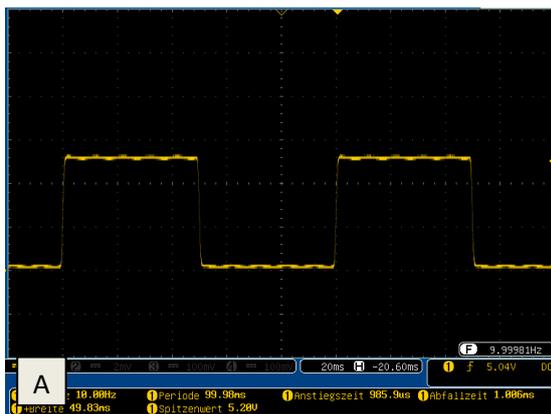


Abbildung 17. Vergleich der Messsignale der Photodiode DET210, aufgezeichnet mit einem Speicher-Oszilloskop (A), und des Messkopfes XD-45-HUV zusammen mit dem Optometer X1-3 (B). Deutlich ist im rechten Diagramm (B) die Verzerrung des zu erwartenden Quasi-Rechtecksignals zu einem quasi sinusförmigen Signal zu erkennen.

Bei zeitlich instabiler Strahlung und Lichtpulsen wird nach Aussage des Herstellers der Messköpfe das Optometer P-9801 empfohlen, welches einstellbare Integrationszeiten von 1 ms bis zu 999 s aufweist und durch Mittelung von 100 μs Messpunkten über die Messzeit t auflöst. Speziell für Messungen mit Lichtpulsen und Experimenten mit gepulster Laserstrahlung war demnach die zusätzliche Bereitstellung des Optometers P-9801 erforderlich, was die Projektgesamtkosten nicht erhöht hat.

Mit dem Optometer P-9801 wurden analog zu den zuvor dargestellten Untersuchungen mit dem Optometer X1-3 Versuche zur Evaluierung der Möglichkeiten der Aufzeichnung gepulster Strahlung durchgeführt. Die prinzipielle Gerätekonfiguration für diese Versuche mit Lichtquelle und Chopper-System ist in Abbildung 18 dargestellt.

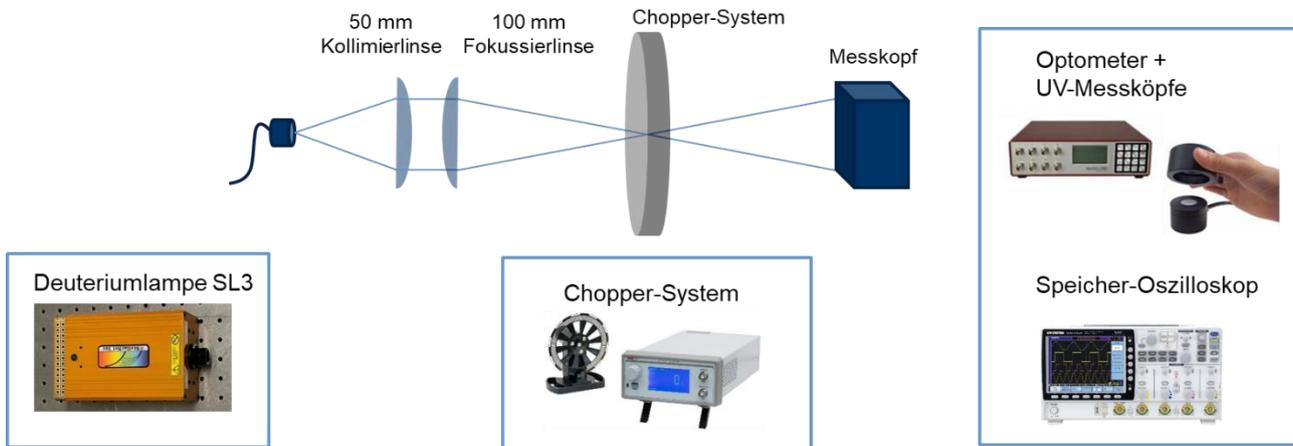


Abbildung 18. Versuchsaufbau mit dem Optometer P-9801 zur Messungen von Lichtpulsen.

Abbildung 19 zeigt für zwei unterschiedlichen Chopper-Einstellungen (Duty-Cycle von 50 % (A) bzw. 20 % (B)) mit entsprechender Gesamtpulsdauer von 25 ms bzw. 10 ms die mit einem Speicher-Oszilloskop aufgezeichneten Signale des UV-Messkopfes XD-45-HUV und des Chopper-Triggers für einen Zeitraum von 0,5 s (A) bzw. 0,2 s (B). Die einzelnen UV-Pulse werden zeitlich eindeutig aufgelöst, jedoch ist insbesondere bei der kurzen Pulsdauer eine deutliche Verzerrung der Pulsform in Form einer asymmetrischen Abschrägung der Signalkanten zu beobachten. Dies führt im Fall der kürzeren Pulse (B) zu einer Verlängerung der gemessenen Gesamtpulsdauer auf knapp 20 ms. Aus der Pulsverlängerung wird der Einfluss einer zu langsamen Messelektronik ersichtlich. Dieser Umstand ist allerdings im Hinblick auf die Auswertung der späteren Messungen während des gepulsten Schweißens unerheblich, da für die Bewertung im Hinblick auf die geltenden Grenzwerte lediglich die integrierten Signale entscheidend sind.

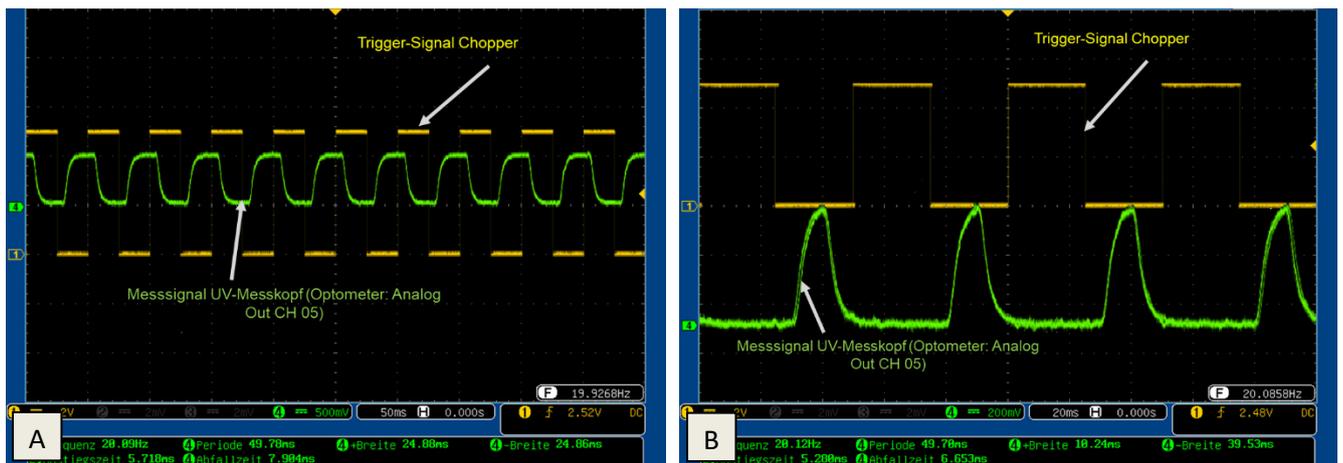


Abbildung 19. Erfassung der analogen Signale des UV-Messkopfes XD-45-HUV (hier: UV-A ungewichtet) auf einem Speicher-Oszilloskop bei gepulster Bestrahlung (jeweils Pulsfrequenz 20 Hz entsprechend der Pulsperiode 50 ms) mit unterschiedlichen Parametereinstellungen (A: Duty-Cycle 50 % entsprechend der theoretischen Gesamtpulsdauer 25 ms, B: Duty-Cycle 20 % entsprechend der theoretischen Gesamtpulsdauer 10 ms).

Weiterführend wurde die Software des Optometers P-9801 dahingehend konfiguriert, dass im Modus „Fast Datalogging“ die Aufzeichnung gepulster Signale mit dem Optometer möglich war. Auf diese Weise ließ sich ein

Messpunkt innerhalb von minimal 2 ms aufnehmen, so dass die Aufzeichnung von aus der Laserprozesszone emittierten UV-Strahlungspulsen mit Pulsdauern im unteren Millisekundenbereich erfolgen konnte. Abbildung 20 zeigt exemplarisch das Ergebnis einer Messung von UV-A-Strahlung mit dem an das Optometer angeschlossenen Messkopf XD-45-HUV in Form der Bestrahlungsstärke als Funktion der Messnummer bei der maximalen Repetitionsrate von einem Messpunkt pro 2 ms für eine Pulsperiode von 50 ms entsprechend einer UV-Pulsfrequenz von 20 Hz (\rightarrow 25 Messpunkte pro Periode) und eine Einzelpulsdauer von 25 ms entsprechend einem Duty-Cycle von 50 %.

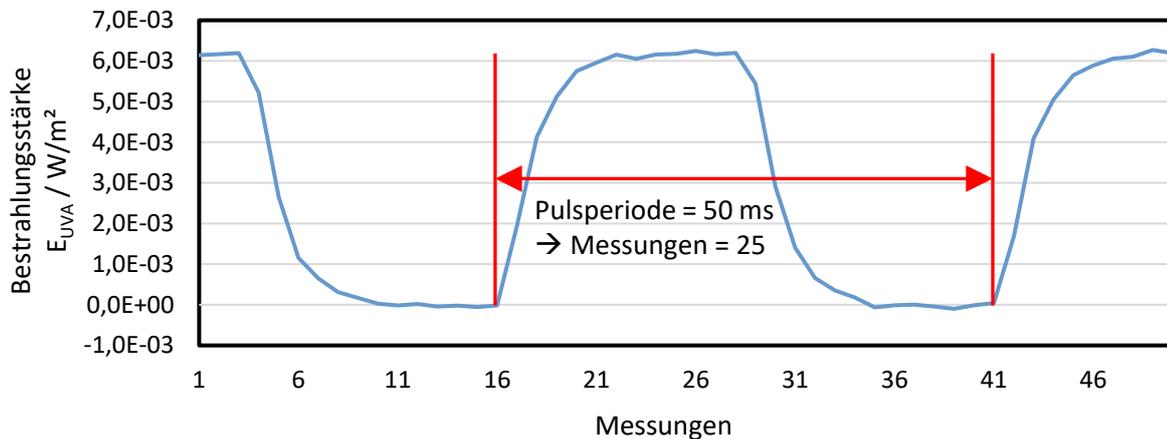


Abbildung 20. Messung und Aufzeichnung gepulster UV-A-Strahlung (ungewichtet) mit dem Optometer P-9801 (Strahlungsquelle: Deuterium-Lampe SL3, Pulserzeugung mittels Chopper, Integrationszeit des Optometers: 1 ms, weitere Messparameter im Text).

Die Messfunktionalität der Messköpfe Gigahertz XD-45-HUV und XD-45-HB in Verbindung mit dem Optometer P-9801 wurde an einem gepulsten Blindschweißprozess mit dem Laser 2 validiert. Die Blindschweißung erfolgte an Baustahl mit der Pulsspitzenleistung 1.000 W, der Pulsdauer $\tau = 25$ ms, der Pulsfrequenz 3 Hz sowie einer mittels Triggersignal definierten zeitlichen Pulsform. Der Versuch ist in Abbildung 21 dargestellt.



Abbildung 21. Versuch zur Validierung der Messfunktionalität der Gigahertz-Detektoren XD-45-HUV und XD-45-HB in Verbindung mit dem Optometer P 9801 (Blindschweißung an Baustahl, Parameter im Text).

Das Ergebnis der Messung der UV-A-Strahlung (ungewichtet) mit dem XD-45-HUV bei einem Messabstand von $r = 100$ mm und einem Höhenwinkel von $\theta = 45^\circ$ ist in Abbildung 22 zu sehen. Die Messkurven wurden mit einem Speicheroszilloskop aufgezeichnet. Das Triggersignal entspricht der blauen, das Messsignal der roten Kurve.

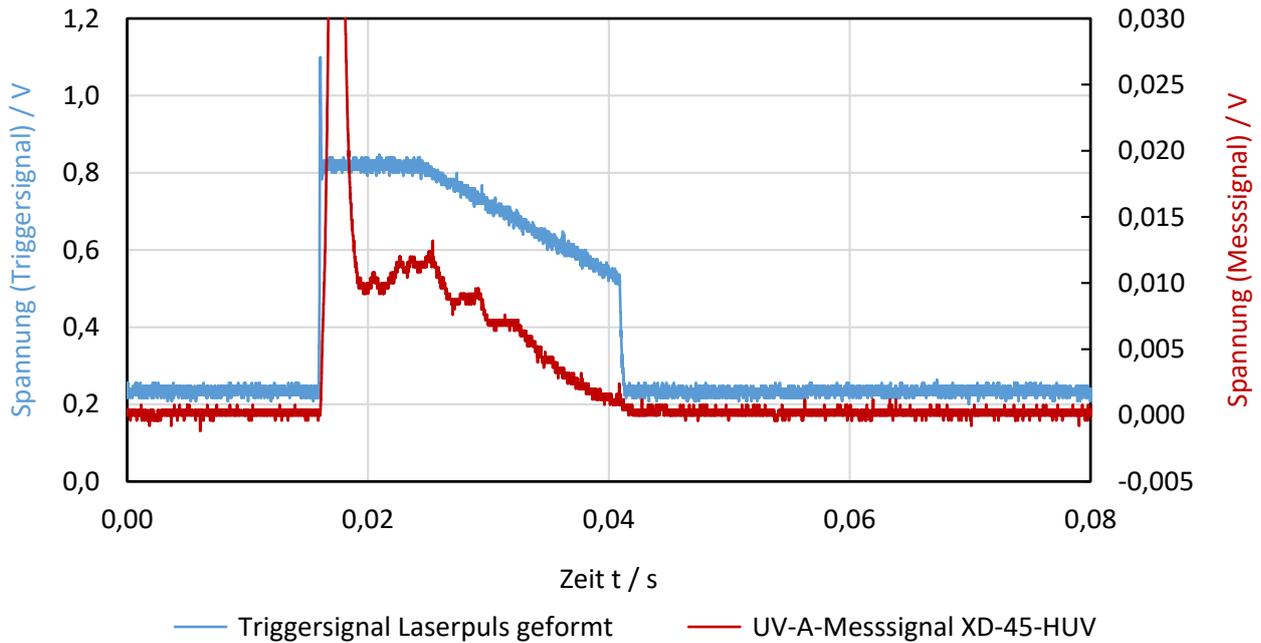


Abbildung 22. Ergebnis der Messung der UV-A-Bestrahlungsstärke (ungewichtet) mit dem Detektor XD-45-HUV an der in Abbildung 21 gezeigten Blindschweißung, aufgezeichnet mit dem Speicheroszilloskop (Parameter im Text).

Das analoge Messsignal des UV-Messkopfes folgt offenbar näherungsweise der programmierten Laserpulsform.

Mit dem Optometer wurden im Modus „Fast Datalogging“ von dem Blindschweißprozess mit den verschiedenen Sensoren der Detektoren XD-45-HUV und XD-45-HB die in Abbildung 23 dargestellten Signale erfasst.

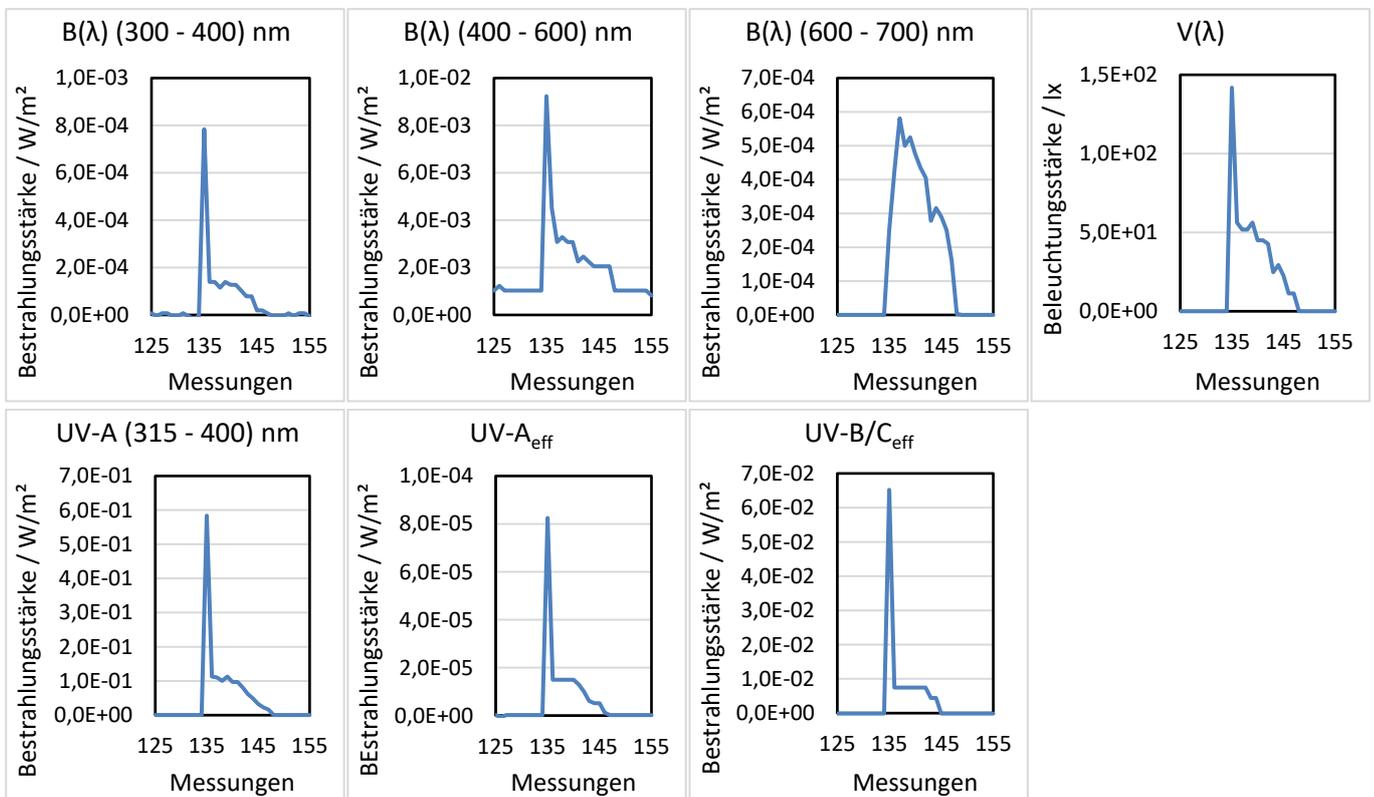


Abbildung 23. Mit dem Optometer P 9801 erfasste Signale der Detektoren XD-45-HB (Blaulichtgefährdung, obere Zeile von Diagrammen) und XD-45-HUV (UV-Strahlungsgefährdung, untere Zeile von Diagrammen) während der in Abbildung 21 gezeigten Blindschweißung (Parameter im Text).

Dabei wurden analog zu der in Abbildung 20 dargestellten Messung eine Messrate von einer Messung pro 2 ms bei insgesamt 250 Messungen und aktiver Triggerung auf die fallende Flanke sowie eine Integrationszeit von 1 ms eingestellt. Als Ergebnis ist festzuhalten, dass für alle in den Detektoren erhalten Sensoren aussagekräftige Messergebnisse erhalten wurden. Abhängig von der Größe des Hintergrundsignals (vgl. z.B. das Messsignal für Blaulichtgefährdung zwischen 400 und 600 nm, 3. Diagramm in der oberen Zeile in Abbildung 23) ergab sich die Notwendigkeit der Durchführung einer Basislinienkorrektur für alle auszuwertenden Sensoraufzeichnungen.

4.6 Messsystemkopfentwicklung und triggerbare Datenakquisition (TAP 1.5)

Für die beiden Messköpfe XD-45-HUV und XD-45-HB wurden Handhabung und Genauigkeit der Messung mit dem mobilen Optometer X1-3 untersucht. Dafür wurden die Messflächen der Sensoren mit unterschiedlich großen Spots der Deuterium-Lampe ausgeleuchtet (Verschiebung der Messeinheit im Messaufbau der Abbildung 12 ohne Verwendung von Fokussier- und Kollimierlinse) und die unterschiedlichen Bestrahlungsstärken in Abhängigkeit vom Abstand des Messkopfes zur Deuterium-Lampe erfasst (Abbildung 24 und Abbildung 25).

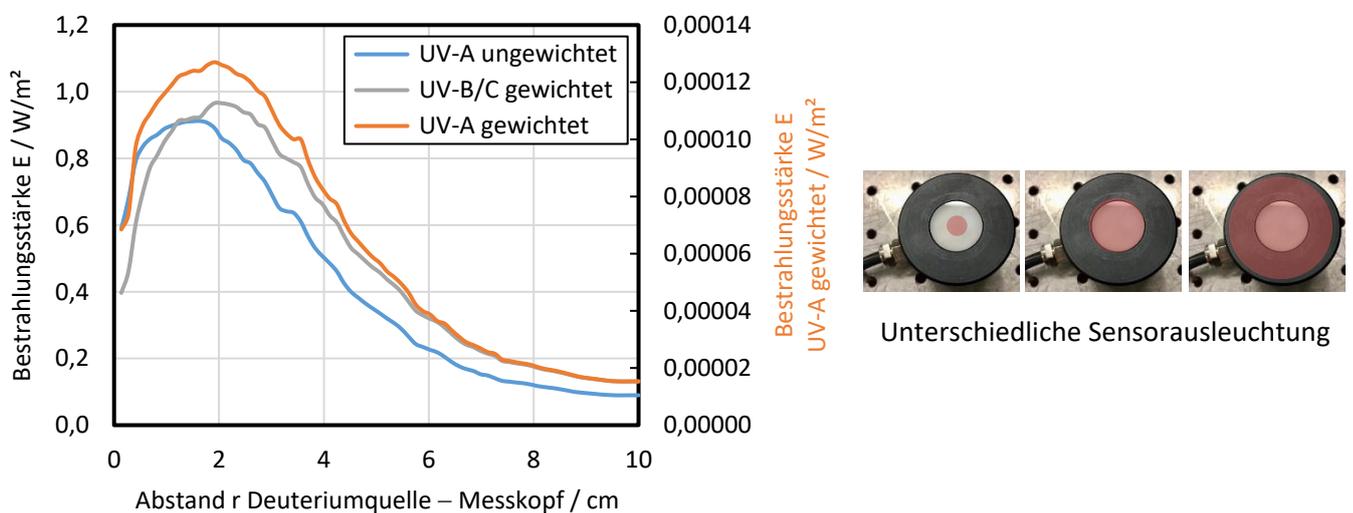


Abbildung 24. Bestrahlungsstärke E in Abhängigkeit von der Ausleuchtung des UV-Messkopfes XD-45-HUV mit der Deuterium-Lampe (E im Diagramm für UV-A gewichtet auf der Sekundärachse dargestellt).

Die Messergebnisse sind demnach abhängig von der Ausleuchtung des betrachteten Sensors. In Abbildung 24 ist deutlich ein Maximum der Bestrahlungsstärke für die drei integrierten Photodioden bei voller Ausleuchtung (siehe Abbildung 24, rechts, mittleres Foto) zu beobachten.

Analog hierzu wurde der Messversuch mit dem Messkopf XD-45-HB durchgeführt, wobei auch in Abbildung 25 ein Maximum aller Messwerte der drei integrierten Photodioden bei kompletter Ausleuchtung der weißen Sensorfläche zu erkennen ist.

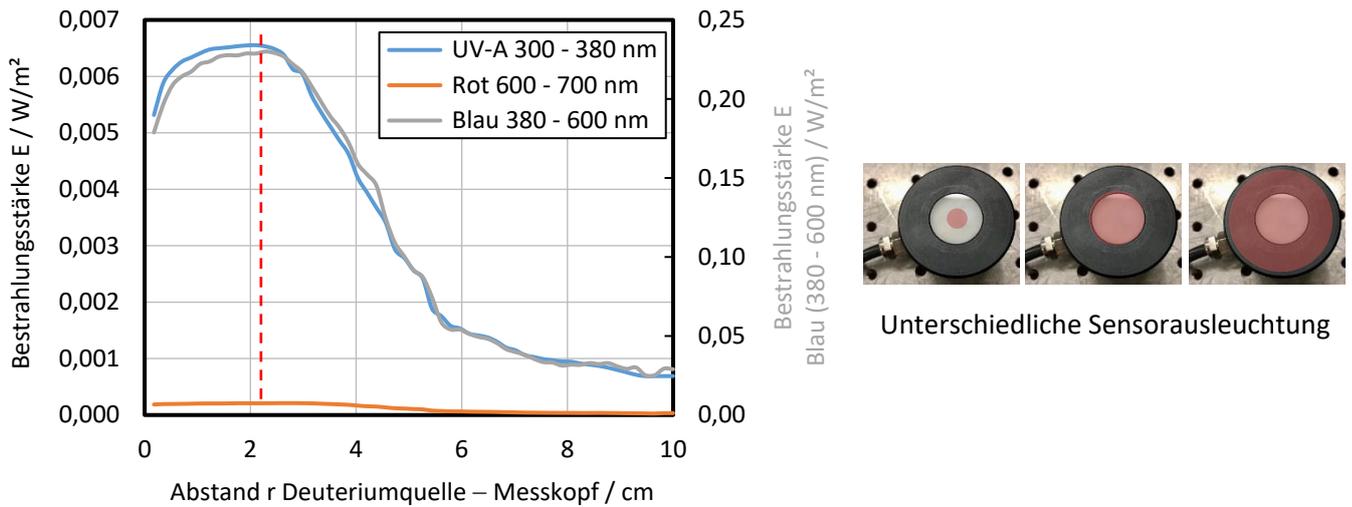


Abbildung 25. Bestrahlungsstärke E in Abhängigkeit von der Ausleuchtung des Blaulichtmesskopfes XD-45-HB mit der Deuterium-Lampe (E im Diagramm für UV-A gewichtet auf der Sekundärachse dargestellt).

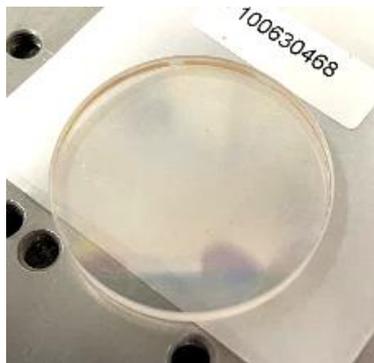
Entsprechend musste bei der Nachstellung von Schweißprozessen und der Vermessung dieser Prozesse mit den Gigahertz-Sensoren darauf geachtet werden, dass die Sensorflächen von der zu messenden Strahlung ausreichend ausgeleuchtet wurden. Wie sich später zeigte, wurden in verschiedenen Fällen bei geringen Messabständen verhältnismäßig zu kleine Messsignale erfasst. Dies wird allerdings nur bedingt auf eine unvollständige Sensorausleuchtung während der jeweiligen Schweißung zurückgeführt. Eine andere Erklärung wird in einer gerichteten UV-Strahlungsemission gesehen, welche zunächst zumindest teilweise am Sensor vorbeifällt. Bei größeren Messabständen werden dann offenbar zusätzlich Reflexionen der am Sensor vorbeifallenden Emission aus der Umgebung der Beobachtungseinheit detektiert. Die Messsignale bei größeren Abständen von der Prozesszone werden generell als zuverlässiger erachtet. Eine Rückrechnung der bei größeren Abständen erfassten Messsignale auf kleinere Abstände anhand des Abstandsquadrat-Gesetzes erscheint hier sinnvoller.

Bei der späteren Prozessnachstellung war mit Schweißspritzern zu rechnen. Aus diesem Grund wurde eine Untersuchung bzgl. der gemessenen Signale in Verbindung mit verschiedenen Schutzgläsern durchgeführt. Im Versuch erfolgte eine komplette Ausleuchtung des UV-Messkopfes mit der Deuterium-Lampe unter der Verwendung unterschiedlicher Schutzgläser. Abbildung 26 zeigt die Schutzgläser, die für die Untersuchungen zur Verfügung standen.

Schutzglas #1



Schutzglas #2
(AR coated im NIR)



Schutzglas #3
(unbeschichtet)



Abbildung 26. Schutzgläser mit unterschiedlicher Beschichtung zur Untersuchung der UV-Durchlässigkeit.

Abbildung 27 zeigt die Messergebnisse der UV-A-Sensoren (ungewichtet und gewichtet) und des UV-B/C-Sensors (gewichtet). Das Schutzglas #3, welches eigentlich als Substrat für Beschichtungen dient (das aber noch nicht beschichtet wurde), zeigte im Vergleich zu den Messungen ohne Schutzglas nur sehr geringe Unterschiede. Demnach ist das Schutzglas #3 sehr gut zum Schutz der Sensorflächen bei gleichbleibender Messsignalstärke geeignet.

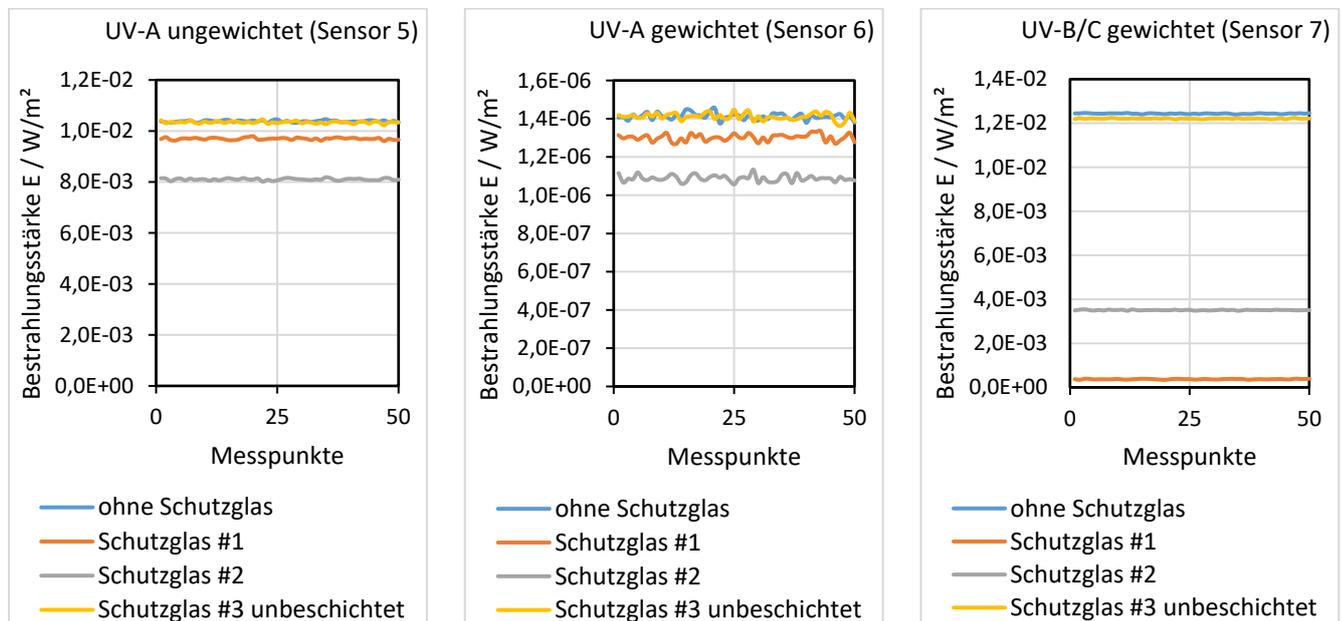


Abbildung 27. Messergebnisse der Untersuchungen zur UV-Durchlässigkeit unterschiedlicher Schutzgläser.

Die befähigten UV-Sensoren wurden in den vorangegangenen Teilarbeitspaketen bestimmt und bezüglich ihrer Anwendbarkeit getestet. Für die systematischen Untersuchungen sollten letztlich die Messköpfe XD-45-HUV und XD-45-HB der Gigahertz Optik GmbH eingesetzt werden. Die Datenerfassung der UV-Pulse erfolgte dabei über das Optometer P-9801 desselben Herstellers, welches über die RS232-Schnittstelle mit der passenden Anwendersoftware S-P9801 auf einem Windows-PC verbunden war.

Darüber hinaus sollte die UV-Strahlungsemission ausgewählter Laserstrahlschweißprozesse in ihrer integralen Wirkung mit Hilfe sogenannter künstlicher Haut (Biosensor) des Typs VioSpor blue line des Herstellers BioSense (Bornheim, Deutschland) überprüft werden. Bei diesen Sensoren handelt es sich um Einwegprodukte, die nach der UV-Strahlungsexposition zur Auswertung an den Hersteller zurückgesandt werden müssen.

Für die drei genannten Sensoren wurde ein gemeinsamer Messsystemkopf entwickelt, um die Reproduzierbarkeit der erzeugten Bestrahlungssignale über alle Vergleichsmessungen zu gewährleisten. Hierfür wurden die Sensorgehäuse zunächst vermessen. Zur gemeinsamen Befestigung wurde ein Konzept entworfen. Über CAD-Software und einen 3D-Drucker vom Typ Ultimaker S5 (Ultimaker B.V., Utrecht, Niederlande) konnte schließlich ein Messsystemkopf aus ABS-Kunststoff gedruckt werden, welcher in Abbildung 28 dargestellt ist.

In den Kunststoffkörper wurden M5-Gewindeeinätze eingebracht, welche zur rückseitigen Befestigung des Kopfes an einem Haltesystem (siehe TAP 2.2), zur Montage des Biosensors und für das Festklemmen der Gigahertz-Sensoren mittels Gewindestiften mit PTFE-Zapfen genutzt wurden. In Abbildung 29 ist der einsatzbereite Messsystemkopf dargestellt.

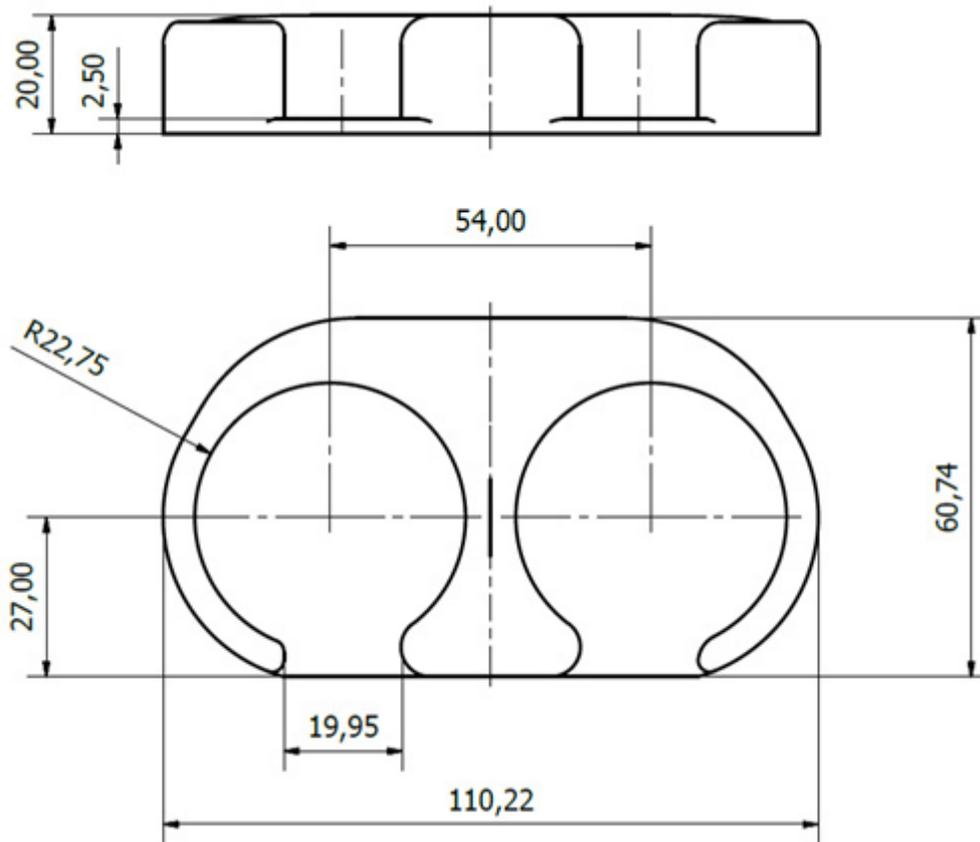


Abbildung 28. Zeichnungsansicht für den im 3D-Druck aus ABS-Kunststoff gefertigten Messsystemkopf (Längenangaben in mm).



Abbildung 29. Einsatzbereiter Messsystemkopf mit montierten Sensoren XD-45-HUV und XD-45-HB von Gigahertz Optik GmbH. Das zusätzliche Gewinde oben im Bild ist für die Aufnahme der Biosensoren vorgesehen.

4.7 Beschreibung der Messroutine für spätere Messaufgaben (TAP 1.6)

Gemäß den abgestimmten Arbeitspaketen 2.5 bis 2.8 sollten Laserstrahlschweißprozesse unter spezifischen Randbedingungen mit dem entwickelten Messsystemkopf beobachtet werden. Unabhängig von den einzustellenden Laserparametern war darunter vor allem die räumliche Lage der Sensoren zur Prozesszone zu verstehen. Deren Koordinaten wurden über die Parameter Messabstand r , Höhenwinkel θ und den Seitenwinkel (Azimutwinkel) φ beschrieben. Eine weitere Einstellmöglichkeit bot der Einstrahlwinkel β der Laserstrahlung auf die Werkstoffprobe.

Das Nachempfinden von Laserstrahlschweißprozessen erforderte zusätzliche eine Relativbewegung zwischen dem Laserstrahl und der Werkstoffprobe. Hierfür wurde eine automatische Drehvorrichtung genutzt, in welche die rotationssymmetrischen Proben eingespannt wurden. Die Prozesszone verblieb somit statisch, weshalb die Sensoren nicht bewegt werden mussten. Prozesszone und Sensoren verfügten demnach über eine gemeinsame Basis, auf welche im TAP 2.2 die Messanordnung konstruiert wurde.

Die Messroutine für die nachfolgenden Teilarbeitspakete lässt sich demzufolge mit Hilfe der folgenden Auflistung beschreiben:

1. Montage des Messsystemkopfes an der räumlichen Koordinate r , θ und A
2. Einstellung der Laserparameter über das jeweilige Interface
3. Einspannen der Werkstoffprobe und Justieren der Fokusslage sowie der Schutzgaszufuhr
4. Vorbereitung der Messtechnik am Optometer und in der Software (Sensorparameter, Messzeit)
 - a. Trigger deaktiviert (manueller Start der Messung)
 - b. Trigger aktiviert (Pulsausgang des Lasers am Triggereingang des Optometers, automatischer Start der Messung)
5. Starten der Drehbewegung der Probe über Motorsteuerung (und ggf. Schutzgaszufuhr öffnen)
6. Anforderung des Laserstrahls
7. Start der Messung (manuell oder automatisch getriggert)
8. Deaktivieren des Laserstrahls
9. Schließen Schutzgaszufuhr und Beendigung der Drehbewegung der Werkstoffprobe
10. Überprüfung der Messergebnisse und ggf. Wiederholung der Messung mit veränderten Parametern auf konzentrischer Spur (durch Verschiebung der Probenaufnahme unter dem Laserstrahl)
11. Abspeichern der Messresultate in Datenbank der S-P9801Software bzw. Exportieren in Excel-Format

4.8 Beschaffung und Vorbereitung der Schweißproben (TAP 2.1)

Das Forschungsvorhaben zielte auf Anwendungen im industriellen Umfeld ab, worunter die Schmuckindustrie, die allgemeine Medizin-, die Dental- und die Sensortechnik sowie die Kleinserienfertigung oder Reparaturschweißung im Maschinen- und Anlagenbau zählen. Daraus wurden die gängigen Werkstoffe abgeleitet, deren UV-Strahlungsemission bei der gepulsten Lasermaterialbearbeitung ermittelt werden sollten (Tabelle 1). Von den genannten fünf Werkstoffen wurde Stangenmaterial mit dem Durchmesser 70 mm beschafft. Die Werkstatt der SLV Halle GmbH hat daraus zunächst Abschnitte gesägt und anschließend mechanisch nachbearbeitet, um den Oberflächenanforderungen des Laserstrahlschweißens gemäß DVS-Merkblatt 3203-4 (Ausgabe 01/2015) zu entsprechen. Beim ferromagnetischen Baustahl kam eine CNC-Bandschleifmaschine mit Magnetspannsystem zum Einsatz. Nicht-rostender Stahl, Aluminium und Kupfer wurden auf einer Drehmaschine überarbeitet. Die Ausnahme bildete der Titanwerkstoff. Dieser wurde auf einer CNC-Drahterodiermaschine in die gewünschte Form gebracht.

Tabelle 1. Im Rahmen des Forschungsvorhabens für die UV-Strahlungsemissionsmessungen betrachtete metallische Werkstoffe.

Werkstoff	Beschreibung
Baustahl	Die Applikationen dieser Werkstoffgruppe erstrecken sich über den Anlagen- und Maschinenbau bis zum Baugewerbe. Die Handlaser werden hierbei vorrangig für die Reparatur mittels Laserauftragschweißungen von hochwertigen bzw. komplexen Bauteilen aus dem Werkzeug-, Vorrichtungs- und Apparatebau eingesetzt. Die Wahl fiel darum auf den unlegierten Baustahl S355J2+N (Werkstoffnummer 1.0570), welcher sowohl über eine gute Schweißbeignung als auch Zerspanbarkeit verfügt.
Nichtrostender Stahl	Viele Elemente aus der Sensor- und Medizintechnik werden aufgrund der geforderten Korrosionsbeständigkeit aus nichtrostendem Stahl (umgangssprachlich Edelstahl) gefertigt. Laserstrahlschweißungen werden an diesen Bauteilen vor allem zur Abdichtung von Gehäusen oder zum Fügen von Baugruppen eingesetzt. Recht häufig findet der austenitische Chrom-Nickel-Stahl X5CrNi18-10 (Werkstoffnummer 1.4301) Anwendung.
Aluminium	In der Luftfahrt, Lebensmittel- oder Kühltechnik sowie im Anlagenbau wird aufgrund der geringeren Dichte und der natürlichen Passivierungsschicht auf Aluminiumwerkstoffe gesetzt. Das Laserstrahlschweißen wird hierbei für ähnliche Anwendungsfelder wie die vorangegangenen Werkstoffe genutzt. Eine gute Schweißbeignung und mechanische Verarbeitbarkeit bietet die aushärtbare Aluminiumlegierung AlMgSi1 (Werkstoffnummer 3.2315 bzw. EN AW-6082).
Kupfer/Messing	Der Anwendungsbereich für Kupfer und seine Legierungen liegt im Bereich des Armaturenbau sowie in der Herstellung von Formteilen für den Maschinen- und Anlagenbau. Eine gute Zerspanbarkeit trifft auf eine eher mäßige Schweißbeignung. Darum wird das gepulste Handlaserstrahlschweißen kaum in der eigentlichen Fertigung von Kuper- und Messingbauteilen eingesetzt, sondern vermehrt in deren Reparatur unter Nutzung eines geeigneten Zusatzwerkstoffs. Eine der häufigsten Legierungen ist Messing CuZn39Pb3 (Werkstoffnummer 2.0401).
Titan	Titan wird aufgrund seiner relativ geringen Dichte bei gleichzeitig hoher Festigkeit, guter Zähigkeit und Schweißbeignung sowie der guten Korrosionsbeständigkeit in der Luft- und Raumfahrttechnik und in der Medizintechnik verwendet. Die für chirurgische Implantate meistgenutzte Legierung Titan Grade 5 / Ti6Al4V (Werkstoffnummer 3.7164) wird häufig mittels gepulster Lasersysteme geschweißt.

Die resultierenden rotationssymmetrischen Proben mit dem Durchmesser 70 mm und der Dicke 10 mm konnten ausgezeichnet von der Apparatur des einzurichtenden Messplatzes (vgl. TAP 2.2) aufgenommen werden und boten ausreichend Oberfläche für die Messaufgaben ab TAP 2.5. Eine Übersicht über die vorbereiteten Schweißproben gibt Abbildung 30.



Abbildung 30. Vorbereitete Schweißproben mit Durchmesser 70 mm und Dicke 10 mm; Werkstoffe Baustahl, nichtrostender Stahl, Aluminium, Messing und Titan (von links).

4.9 Einrichtung der Versuchsstände zur Parametervariation (TAP 2.2)

Im TAP 2.1 wurde bereits darauf eingegangen, dass die Materialproben für die Schweißproben rotationssymmetrisch hergestellt wurden. Probengeometrie und Versuchsstand wurden als Einheit betrachtet und gleichzeitig bearbeitet. Es ergab sich die Vorgabe der rotatorischen Bewegung, wodurch lange Schweißnähte auf kompakten Proben erzeugt werden konnten. Weitere Anforderungen an das Probenhandling des Versuchsstandes waren:

1. Aufnahme der rotationssymmetrischen Proben
2. Bewegungssteuerung der Rotation (Antrieb der Relativbewegung Laserstrahl-Schweißprobe)
3. Ankippen der Schweißprobe für Variation des Einfallswinkels des Laserstrahls
4. Manuelle Linearbewegung der Probenaufnahme zur Erzeugung einer Vielzahl von koaxialen Schweißbahnen auf der Probenoberfläche bei feststehendem Laserstrahl

Eine Marktrecherche zu Herstellern von mechanischen und elektrischen Antrieben führte zu den Firmen isel Germany AG (Eichenzell, Deutschland) und igus GmbH (Köln, Deutschland). Erstere fertigt CNC-Maschinen bzw. Antriebe und dazugehörige Steuerungen. Aus diesem Portfolio konnte die Dreh-Schwenkeinheit vom Typ ZDS 2030 (siehe Abbildung 31) mit passendem Miniatur-Dreibackenfutter die gestellten Anforderungen 1 bis 3 erfüllen. Das vorkonfigurierte System kombiniert eine $\pm 135^\circ$ -Schwenkachse und eine endlos drehende Achse. Eine zugehörige CNC-Steuerung für beide Achsen ermöglicht den einfachen Handbetrieb oder das Erstellen von Automatikprogrammen für komplexe Bahngeometrien sowie das Verarbeiten von digitalen Ein- und Ausgängen.

Ein Linearmodul vom Typ drylin® SLW-1080 der igus GmbH mit 100 mm Führungslänge wurde für die Montage unterhalb der Dreh-Schwenkeinheit vorgesehen. Das Augenmerk in der Auswahl hierfür lag vor allem in der Größe des Schlittens sowie der statischen Tragfähigkeit des Moduls.

Zur Verbindung beider Elemente wurde eine Adapterplatte konstruiert und aus Stahl gefertigt. Das Bewegungssystem wurde anschließend auf einer quadratischen Aluminiumplatte mit der Kantenlänge 500 mm und der Dicke 6 mm befestigt (Grundplatte) und unterhalb der Bearbeitungsoptik von Laser 1 platziert. Dort wurde die Inbetriebnahme der Achsen über die zugehörige CNC-Steuerung inkl. serieller Verbindung zu einem Windows-Laptop mit der isel-Software PAL-PC erfolgreich durchgeführt.

Im nächsten Schritt galt es, die Aufnahme des Messkopfes aus TAP 1.5 an das Achsensystem anzupassen. Die nachfolgenden Teilarbeitspakete zur systematischen räumlichen Vermessung der UV-Strahlung aus dem Schweißprozess heraus gaben die geometrischen Abhängigkeiten zwischen dem statischen Prozessort und dem variabel positionierbaren Messkopf vor:

- Abstand $r = 50 \dots 500 \text{ mm}$
- Höhenwinkel $\theta = 0 \dots 60^\circ$
- Seitenwinkel (Azimutwinkel) $\varphi = 0 \dots 90^\circ$

Als Basis für die Abstandseinstellung wurde auf ein aus der Optiktechnologie bekanntes Aluminiumschienenprofil SYS40 von der OWIS GmbH (Staufen im Breisgau, Deutschland) zurückgegriffen. Hiervon wurden drei Schienen der Länge 500 mm auf der Grundplatte derart befestigt, dass diese unter Azimutwinkeln φ von 0° , 45° und 90° zur Kippachse standen. Dadurch konnte die seitliche Abstrahlungscharakteristik der inkohärenten UV-Emission auch unter dem Einfluss des Einstrahlwinkels β der Laserstrahlung ermittelt werden. Zur Verringerung des Messumfangs wurde in einem Projektmeeting eine fünfstufige Einteilung der zu nutzenden Abstände r auf 50 mm, 100 mm, 150 mm, 200 mm und 500 mm festgelegt. Entsprechende schmale und beschriftete Schienenreiter dienten als Anschläge für reproduzierbare Messungen.

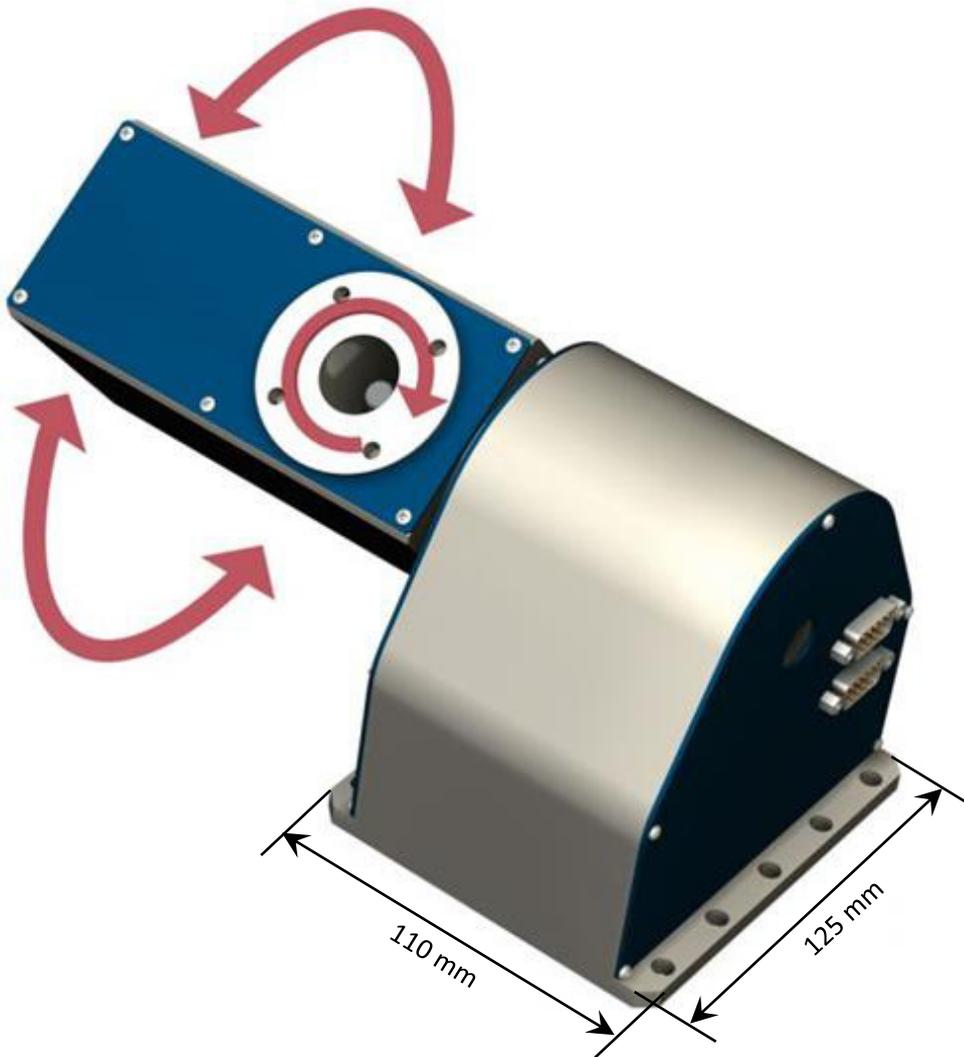


Abbildung 31. Dreh-Schwenkeinheit isel ZDS 2030; Quelle: isel Germany AG.

Auf passenden, 40 mm breiten OWIS-Schienenreitern wurden über zu fertigende Adapter senkrecht stehende Aluminiumprofile vom Typ Profil 5 40x40 der item Industrietechnik GmbH (Solingen, Deutschland) befestigt. Diese sollten der Einstellung des Höhenwinkels θ dienen. Da jedoch bei gleichem Abstand von der Basis und senkrechter Variation der Höhe der Messabstand r zwischen den Randbedingungen 0° und 60° für den Höhenwinkel θ stark abweichen würde, musste eine Winkelanpassung konstruiert werden. Diese wurde zwischen die senkrechten item-Profile und weitere Schienenprofile von OWIS zur eigentlichen Messkopfjustierung montiert. Um die Kollision der Schienenprofile mit der Bearbeitungsoptik des Lasers zu vermeiden, mussten fünf verschieden lange Schienen an separaten senkrechten Stützen befestigt werden. Eine Beschriftung auf den Stützen gewährleistete die Zuordnung zum jeweiligen Messabstand r .

Zuletzt wurde die Befestigung des Messkopfes aus TAP 1.5 am Schienensystem umgesetzt. Hierfür wurde wiederum ein OWIS-Schienenreiter der Breite 40 mm genutzt, an dem per Adapterplatte eine feststellbare Kugelkopfaufnahme für den Messkopf befestigt wurde. Damit konnten kleine Winkelabweichungen, z.B. aus der Höheneinstellung θ , ausgeglichen werden und die Sensoren blieben stets auf die Prozesszone bzw. die Plasmafackel ausgerichtet.

Ein Foto des Messaufbaus am Laserhandarbeitsplatz in Abbildung 32 soll die vorangegangenen Beschreibungen besser veranschaulichen. Darin ist eine Schweißprobe aus Baustahl im Drehfutter eingespannt und die Messkopfhalterung in dem Abstand $r = 150$ mm, dem Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$ sowie dem Höhenwinkel $\theta = 30^\circ$ ausgerichtet. Daneben ist die CNC-Steuerung für die Dreh-Schwenkeinheit mit dem angeschlossenen Laptop zu sehen.



Abbildung 32. Messaufbau am Laserhandarbeitsplatz der SLV Halle GmbH.

4.10 Einrichtung exemplarischer Schweißprozesse an relevanten Metallen (Baustahl, Edelstahl, Al, Ti und Cu) (TAP 2.3)

An den Schweißproben aus TAP 2.1 wurden am Messplatz bzw. in der Einspannung an der SLV Halle Schweißversuche mit dem Laser 1 vorgenommen, um die Randbedingungen der einzustellenden Laser- und Prozessparameter in den nachgelagerten Teilarbeitspaketen abzustecken.

Zunächst sollte die Schweißgeschwindigkeit überprüft werden. Hierfür wurde die kinematische Vorgabe der Rotationsachse v_{teach} innerhalb des Handbetriebs der CNC-Steuerung in der Einheit Hz variiert. Über die gestoppte Gesamtzeit für mindestens 10 Umdrehungen konnte die effektive Rotationsgeschwindigkeit berechnet werden. Da der Prozessort nicht im Zentrum der Schweißprobe lag, sondern auf dem radialen Abstand von ca. 20 mm, konnte die wahre Schweißgeschwindigkeit v_s in Abhängigkeit von den CNC-Vorgaben ermittelt werden (15 bis 2661 mm/min). Als sinnvolle Schweißgeschwindigkeit für die Versuche wurde $v_s = 350$ mm/min gewählt (entspricht $v_{\text{teach}} = 750$ Hz). Anschließend wurden am Laser 1 die Variationsmöglichkeiten der Parameter ermittelt:

- | | |
|---------------------|--|
| • Vorgabespannung | $U = 200 \dots 350$ V (entspricht Pulsspitzenleistung $P_{\text{max}} = 536 \dots 4850$ W) |
| • Pulsdauer | $\tau = 3 \dots 20$ ms |
| • Pulsfolgefrequenz | $f_{\text{rep}} = 2,5 \dots 15$ Hz |
| • Pulsform | Rechteckpuls* |
| • Spotdurchmesser | $d_{86} = 1,0$ mm* |
| • Fokusslage | auf Oberfläche* |
| • Schutzgas | Argon (10 l/min)* |
| • Pulsenergie | $Q = 1,6 \dots 164$ J |
| • Mittlere Leistung | $P_{\text{av}} = 4 \dots 300$ W |

* Diese Einstellungen werden in den nächsten TAPs nicht verändert.

Die letzten beiden Parameter Pulsenergie und mittlere Leistung ergaben sich lediglich aus den ersten drei Parametern und wurden im Display der Lasersteuerung angezeigt. Hierbei ist zu beachten, dass der Laser Vorgaben, die zu einer mittleren Leistung von mehr als 300 W führen, nicht annimmt. Somit waren im höheren Frequenzbereich keine Kombinationen aus langer Pulsdauer und hoher Vorgabespannung möglich.

Für den Baustahl werden die exemplarischen Parameter für eine gute Blindschweißung angegeben:

- Vorgabespannung $U = 300 \text{ V}$ (entspricht hier einer Pulsspitzenleistung P_{\max} von 3,0 kW)
- Pulsdauer $\tau = 5 \text{ ms}$
- Pulsfolgefrequenz $f_{\text{rep}} = 10 \text{ Hz}$
- Pulsenergie $Q = 15,0 \text{ J}$
- Mittlere Leistung $P_{\text{av}} = 150 \text{ W}$

4.11 Prüfung der Nutzbarkeit von statistischer Versuchsplanung (DoE) und Aufstellung von Versuchsplänen für TAP 2.5 - TAP 2.8 (TAP 2.4)

Aus dem abgesteckten Parameterfeld aus TAP 2.2 bzw. 2.3 für die räumliche Charakteristik der UV-Emission und deren Abhängigkeit von den Laserparametern sollten zunächst an einem Werkstoff alle grundsätzlichen Einstellmöglichkeiten überprüft werden. Daraus sollten zunächst Trends abgeleitet werden. Hatten einige Parameter beispielsweise keinen Einfluss auf die UV-Messungen, mussten diese später nicht mehr variiert werden. Ebenso waren lineare bzw. stetige Verläufe als günstig zu erachten, da hierbei die Messungen nicht mehr das gesamte Parameterfeld umfassten, sondern nur noch einen stichprobenartigen Umfang besaßen.

Aufgrund der Unwägbarkeiten und der fehlenden Datenlage zur UV-Messung an gepulster Laserstrahlung, haben sich die Kooperationspartner darauf geeinigt, in TAP 2.5 alle in der Vorhabenbeschreibung angegebenen Parameter zu berücksichtigen. In einer kurzfristigen Auswertung der Messungen sollten die Anpassungen am Versuchsplan für die nachfolgenden Teilarbeitspakete vorgenommen werden.

4.12 UV- und VIS-Strahlungsmessung – Stufe 1: Variation der Schweißparameter und des Messabstands (TAP 2.5)

Das UV-Messsystem aus AP 1, bestehend aus den zwei Strahlungsdetektoren XD-45-HUV und XD-45-HB sowie dem Optometer P9801, wurde mit dem eingerichteten Messaufbau am Laserhandarbeitsplatz der SLV Halle GmbH (Laser 1) verbunden. Der entstandene Messplatz ist in der Totalen in Abbildung 49 festgehalten.

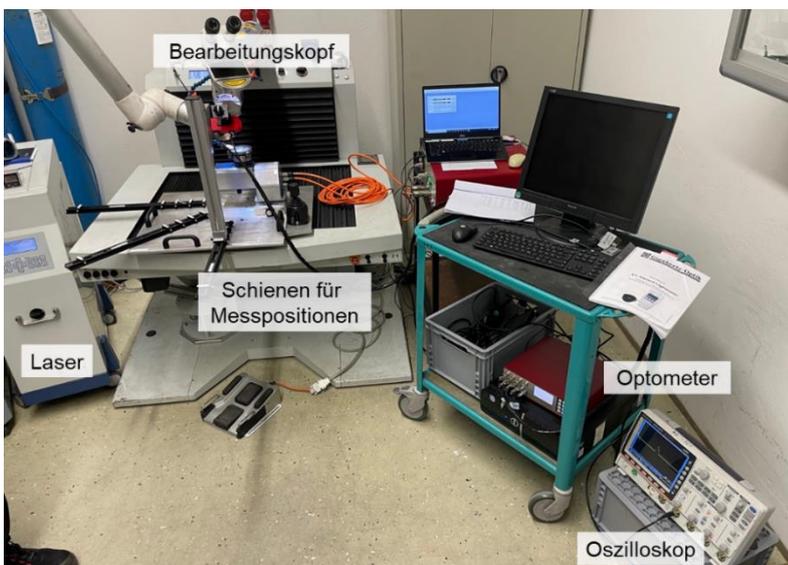


Abbildung 33. Einsatzbereiter Messplatz inkl. UV-Messung am Laserhandarbeitsplatz der SLV Halle GmbH.

In TAP 2.5 wurde lediglich der Werkstoff Baustahl betrachtet, auf den der Laserstrahl lotrecht appliziert wurde. Die Schweißgeschwindigkeit betrug konstant 350 mm/min, der Messkopf schaute im Abstand $r = 100$ mm unter dem Höhenwinkel $\theta = 30^\circ$ auf die Prozesszone. Zur Veranschaulichung des Schweißprozesses soll Abbildung 34 dienen.

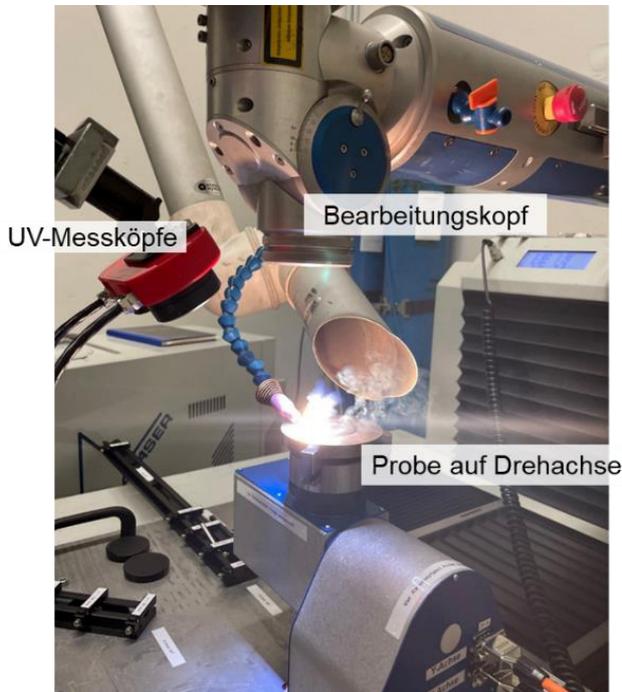


Abbildung 34. Laserstrahlschweißen von Baustahl am Messplatz zur Erfassung der UV-Sekundärstrahlungsemission.

In Messreihe 1 wurden die Laserpulsp Parameter gemäß dem folgenden Schema verändert und alle möglichen Kombinationen in einzelnen Messungen erfasst:

- Vorgabespannung $U = 200$ V, 250 V, 300 V und 350 V
- Pulsdauer $\tau = 3$ ms, 5 ms, 10 ms, 15 ms und 20 ms
- Pulsfolgefrequenz $f_{rep} = 2,5$ Hz, 5 Hz, 10 Hz und 15 Hz

Mit der Vorgabespannung U und der Pulsdauer τ wurde das in Abbildung 35 dargestellte Feld von Pulsenergien Q generiert. Über die Pulsfolgefrequenz f_{rep} wurde dann die mittlere Leistung P_{av} variiert.

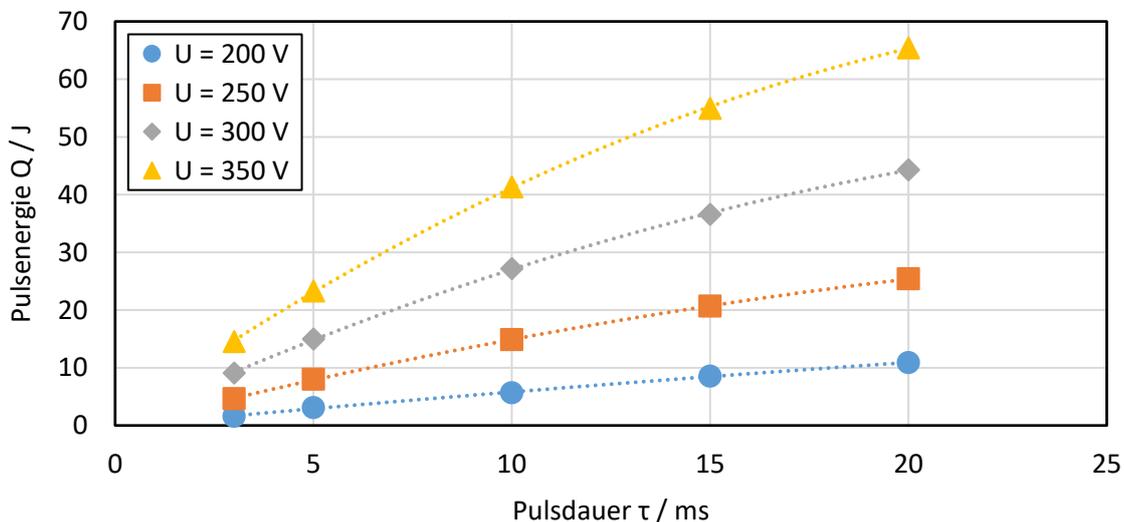


Abbildung 35. Mit dem Laser 1 durch Variation von Pulsdauer τ und Vorgabespannung U generierte Pulsenergien Q .

Die Integrationszeit des Optometers wurde auf 1 ms bei einer Messrate von 500 Hz festgelegt. Daraus ergab sich die zeitliche Auflösung der Messungen zu 2 ms. Jede Messung bestand aus insgesamt 200 Messpunkten (entspricht Messdauer 400 ms). Die Messwerte wurden anschließend in Excel-Tabellen exportiert, aus denen die Bestrahlungsstärken (Leistungsdichten am Ort der Bestrahlung) der Sensoren für UV-A ungewichtet, UV-A_{eff} gewichtet und UV-B/C_{eff} gewichtet separiert werden konnten. Über zeitliche Integrationen wurden daraus die einzelnen Pulsenergien pro Flächeneinheit, die Bestrahlungen pro Puls, gewonnen, deren Abhängigkeiten in Abbildung 36 dargestellt sind. Je nach eingestellter Pulsfolgefrequenz (ab 5 Hz) wurde die Bestrahlung pro Puls über 2 bis 6 erfasste Pulse gemittelt. Dabei ergab sich typischerweise eine Standardabweichung zwischen 5 und 20 % des Mittelwertes. Aus den Diagrammen ließ sich ableiten, dass die höchsten UV-Bestrahlungswerte pro Puls bei einer Spannungsvorgabe von 350 V und einer Pulsfolgefrequenz von 2,5 Hz und somit bei den höchstenergetischen Laserpulsen auftraten.

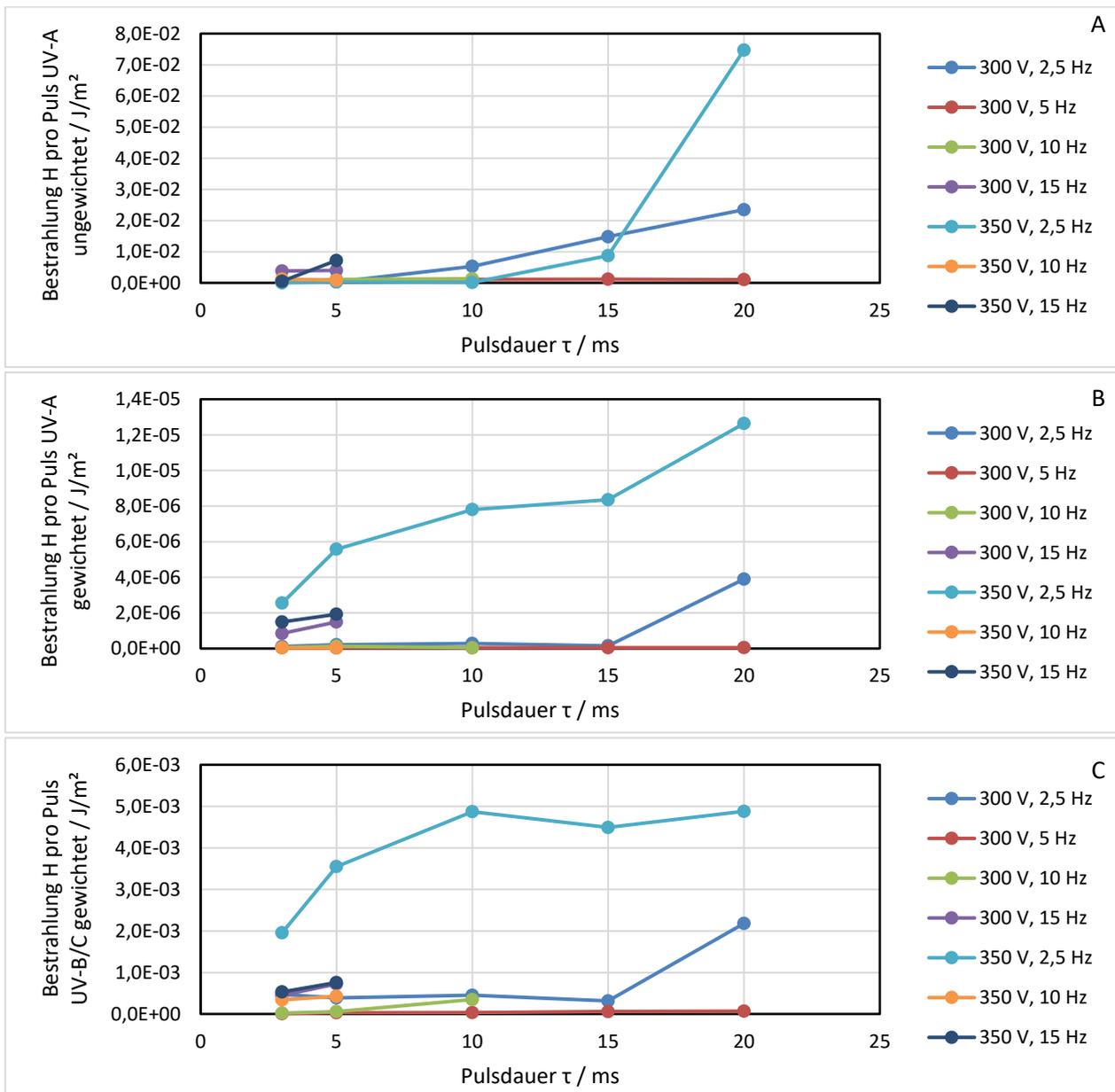


Abbildung 36. Messreihe 1 (TAP 2.5) – Bestrahlung H pro Puls UV-A ungewichtet (A), UV-A gewichtet (B) und UV-B/C gewichtet (C) in Abhängigkeit von der Pulsdauer τ für verschiedene Pulsfolgefrequenzen f_{rep} [Hz] und Spannungsvorgaben U [V] für den Werkstoff Baustahl.

Anhand der visuellen Begutachtung der Schweißungen wurden für Messreihe 2 zwei Parametersätze P1 und P2 ausgewählt, welche eine ausreichende Einschweißung bewirken:

- P1: $U = 300 \text{ V}$; $f_{\text{rep}} = 10 \text{ Hz}$; $\tau = 5 \text{ ms}$
- P2: $U = 350 \text{ V}$; $f_{\text{rep}} = 5 \text{ Hz}$; $\tau = 10 \text{ ms}$

Parametersatz P1 erzeugte eine geringe Pulsenergie Q von ca. 15 J bei einer mittleren Leistung P_{av} von 150 W, wohingegen Parametersatz P2 $Q = 41 \text{ J}$ bei einer mittleren Leistung P_{av} von 206 W lieferte. Wiederum an Baustahl wurden nun die Abhängigkeiten vom Messabstand r für die fünf in Abschnitt 4.9 angegebenen Werte bei gleichbleibendem Höhenwinkel θ überprüft. Die abgeleiteten Diagramme in Abbildung 37 zeigen die erwartete Abhängigkeit der UV-Bestrahlung pro Puls vom Messabstand r (Proportionalität zu $1/r^2$) vor allem für Parametersatz P2 recht gut. Bei den geringen Abständen 50 und 100 mm kam es für Parametersatz P1 zu unerwarteten Signalsprüngen bzw. Kurvenverläufen, da unter den entsprechenden Messbedingungen evtl. einzelne Sensoren im großflächigen Detektorgehäuse an der Plasmafackel vorbeischaute, die Beobachtungsrichtung partiell abgeschirmt war oder bei stärker gerichteter Emission störende Reflexionen auftraten, deren Strahlung erst bei größerem Messabstand zu den Sensoren gelangte. Die Abstandsabhängigkeit der Sekundärstrahlungsemission wird im Zusammenhang mit der Untersuchung unterschiedlicher Werkstoffe nochmals betrachtet (vgl. Abschnitt 4.15.7).

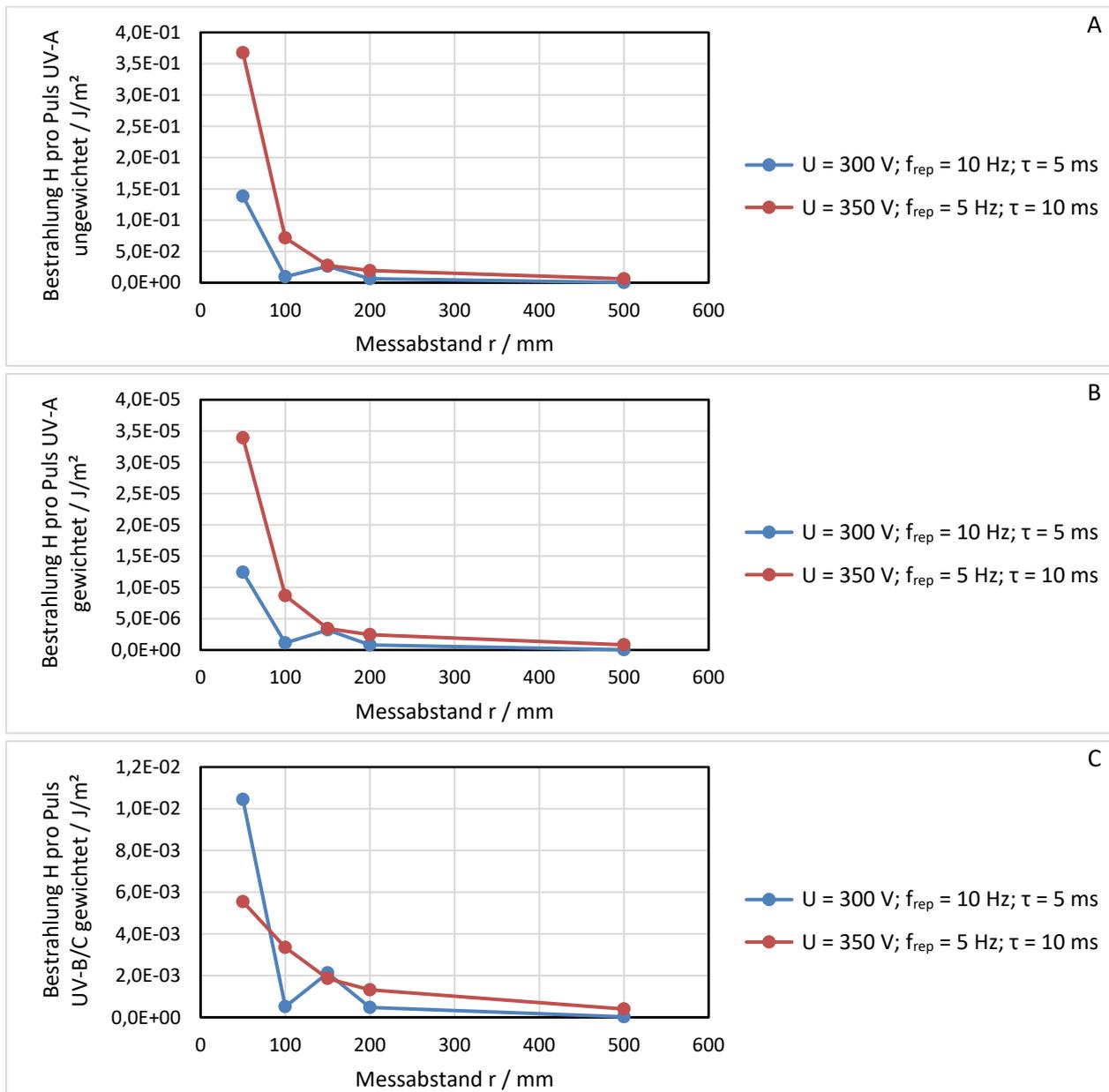


Abbildung 37. Messreihe 2 (TAP 2.5) – Bestrahlung H pro Puls UV-A ungewichtet (A), UV-A gewichtet (B) und UV-B/C gewichtet (C) in Abhängigkeit vom Messabstand r bei 2 Parametersätzen für Baustahl.

Die Messreihe 3 sollte die Variation der Vorschubgeschwindigkeit näher beleuchten. Der Messkopf wurde wie in Messreihe 1 im Abstand $r = 100$ mm und dem Höhenwinkel $\theta = 30^\circ$ auf die Prozesszone gerichtet. Die Laserparameter für die Einschweißungen in den Baustahl entsprachen P1 und P2. Geometrisch entspricht die Geschwindigkeitsänderung einer sich verändernden Pulsüberlappung. Da P1 kleinere Spots bei höherer Frequenz als P2 erzeugte, glichen sich die Überlappungen einander an und folgten grob diesen Werten:

- Geschwindigkeit v_s [mm/min] 15 115 230 350 465
- Überlappung [%] 90 70 50 30 10

In Abbildung 38 offenbaren sich stetige Verläufe für die Bestrahlung pro Puls, welche mit höherer Geschwindigkeit und somit sinkendem Überlapp steigt. Das Schweißen in den „kalten“ Werkstoff mit evtl. noch vorhandenen Oberflächenverunreinigungen erzeugt somit höhere UV-Strahlungsemissionen als eine Bestrahlung in das heiße Schweißgut hinein.

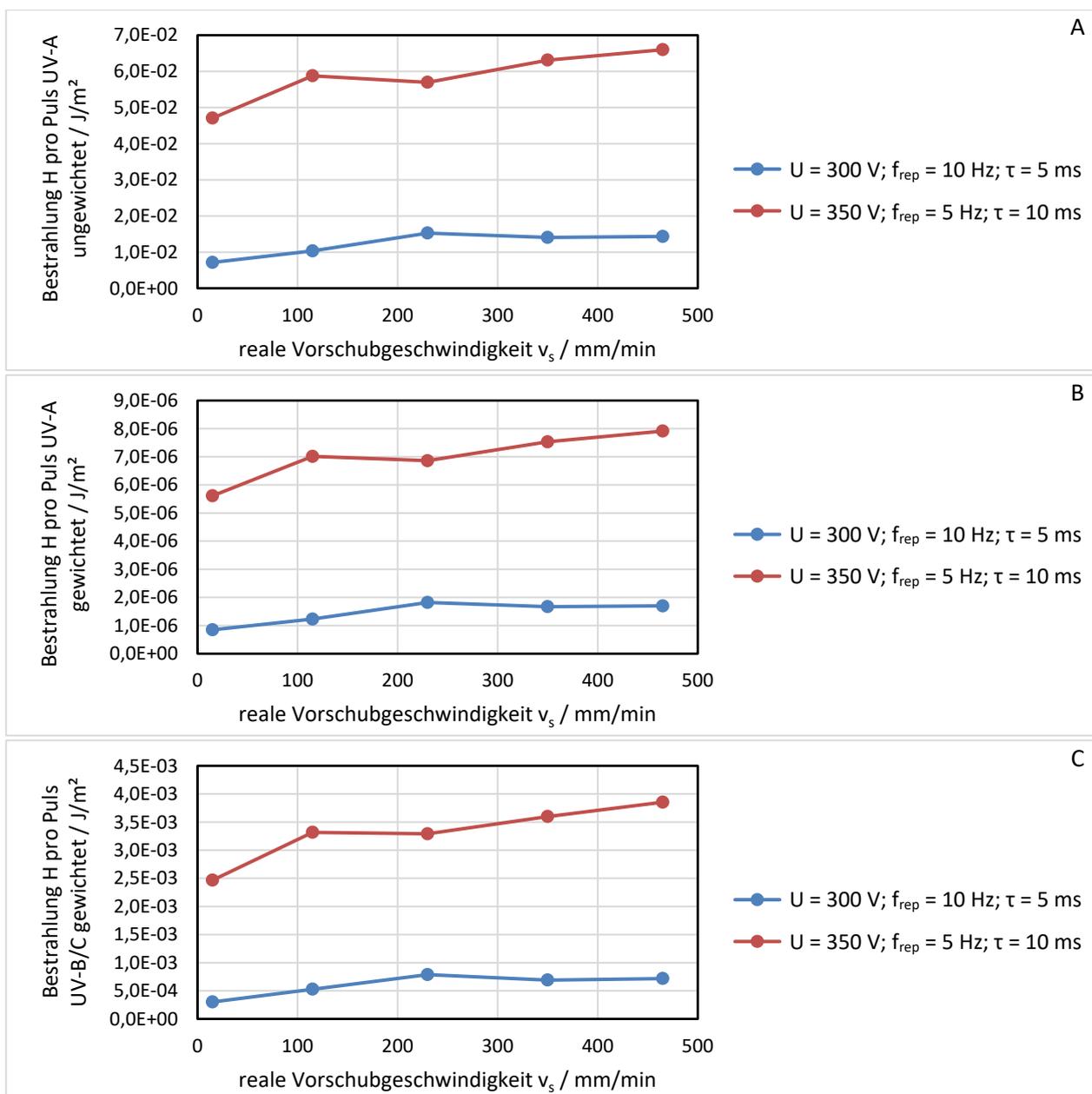


Abbildung 38. Messreihe 3 (TAP 2.5) – Bestrahlung H pro Puls UV-A ungewichtet (A), UV-A gewichtet (B) und UV-B/C (C) gewichtet in Abhängigkeit von der Schweißgeschwindigkeit v_s bei 2 Parametersätzen für Baustahl.

4.13 UV- und VIS-Strahlungsmessung – Stufe 2: Variation der Messgeometrie (TAP 2.6)

Nachdem im TAP 2.5 vermehrt das Ansprechverhalten der UV-Detektoren auf die veränderten Laserparameter nachgewiesen wurde, sollte im TAP 2.6 die räumliche Abstrahlungscharakteristik untersucht werden.

Zunächst wurde in Messreihe 1 die UV-Strahlungsemission bei den gleichbleibenden Laserparametern P1 für Blindschweißungen in Baustahl mit einer Prozessgeschwindigkeit von 350 mm/min räumlich vermessen (Abbildung 39):

- Höhenwinkel $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ und 60°
- Messabstand $r = 50 \text{ mm}, 100 \text{ mm}, 150 \text{ mm}, 200 \text{ mm}$ und 500 mm

Es sei auf die logarithmische Skalierung der y-Achse (Bestrahlung pro Puls) in Abbildung 39 hingewiesen.

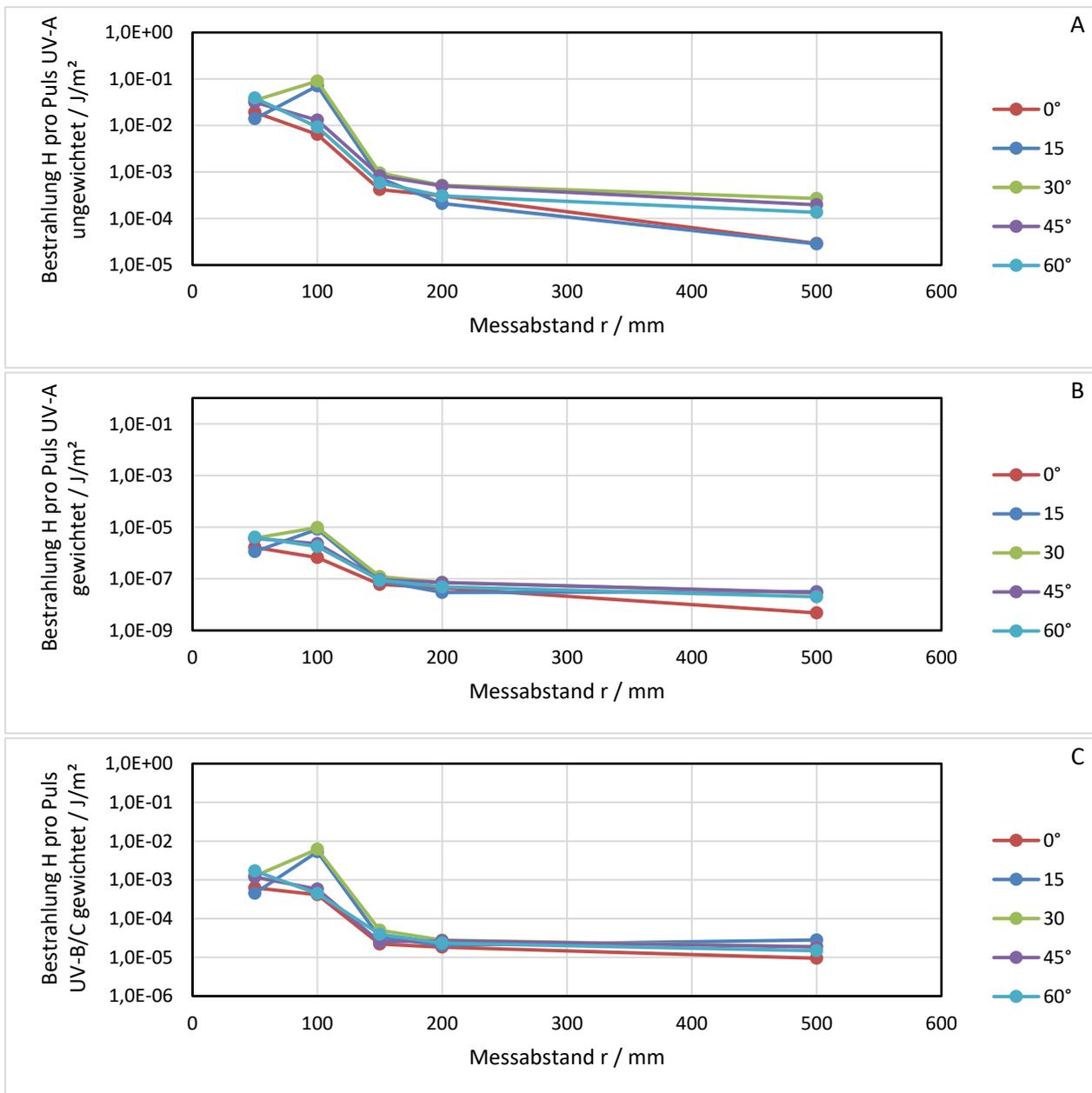


Abbildung 39. Messreihe 1 (TAP 2.6) – Bestrahlung H pro Puls UV-A ungewichtet (A), UV-A gewichtet (B) und UV-B/C gewichtet (C) in Abhängigkeit von Messabstand r und Höhenwinkel θ für Parametersatz P1 für Baustahl (logarithmische Skalierung der y-Achse).

Die Datenlage der Messreihe 2 aus TAP 2.5 wurde somit auf eine Vielzahl von Beobachtungswinkeln θ ausgeweitet, wobei die Messwerte in der Regel wiederum dem Abstandsquadrat-Gesetz (Proportionalität der Bestrahlung pro Puls zu $1/r^2$) folgten. Lediglich bei einem Messabstand von 50 mm versagte das Messsystem vermutlich aufgrund seiner geometrischen Abmessungen, denn der Detektor ist für derart geringe Messabstände zu großflächig aufgebaut. Die zugehörigen Messwerte sollten deutlich höher ausfallen.

Damit die zu detektierenden UV-Einzelpulse über eine höhere Pulsenergie verfügen und nach Möglichkeit die Sensoren besser ansprechen, wurde die vorangegangene Messreihe mit den Laserparametern P2 wiederholt. Die ermittelten UV-Bestrahlungswerte pro Puls in Abbildung 40 sind nur geringfügig höher als in den Vergleichsmessungen mit den P1-Laserparametern. Die Unstetigkeiten bei kleinem Messabstand r bleiben erhalten.

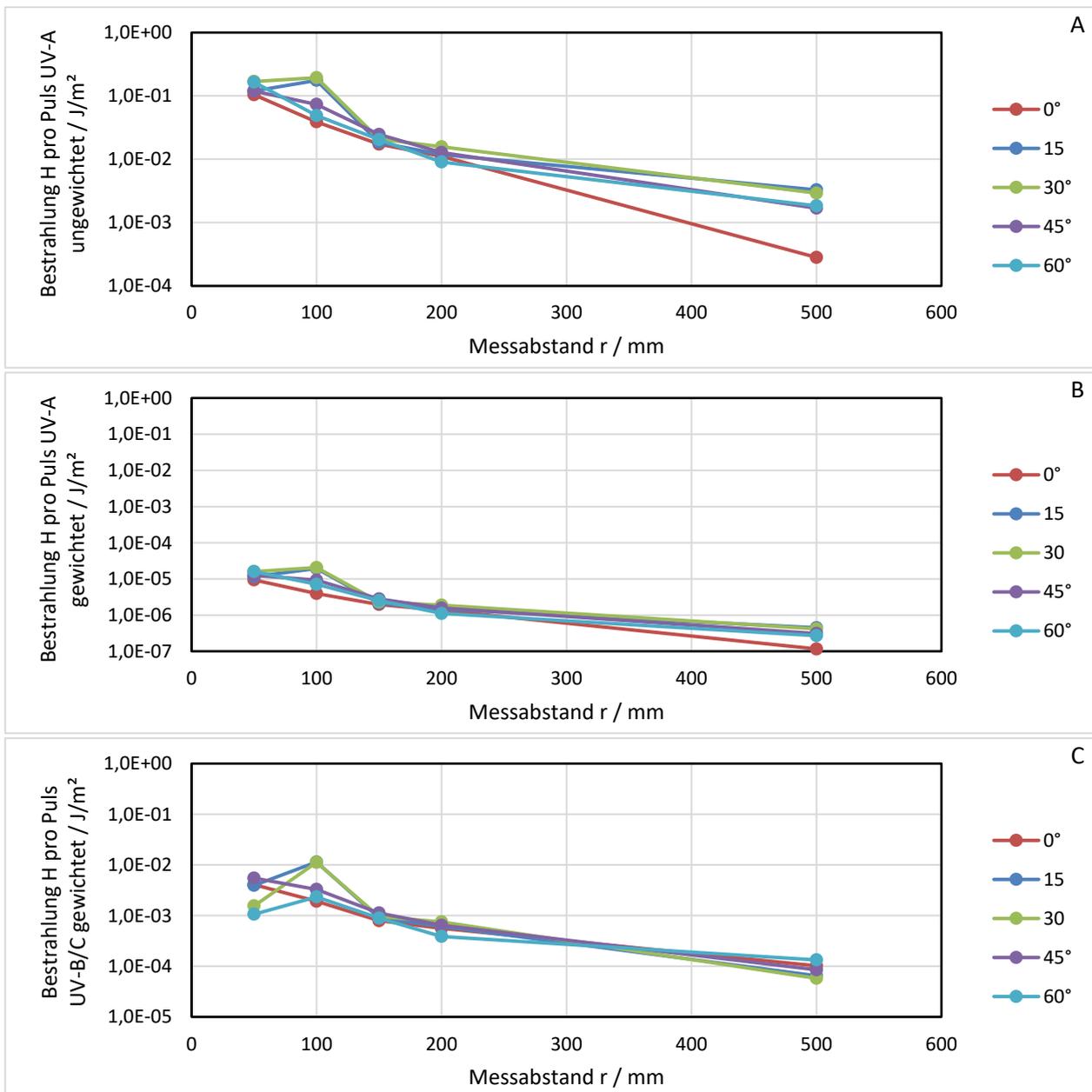


Abbildung 40. Messreihe 1 (TAP 2.6) – Bestrahlung H pro Puls UV-A ungewichtet (A), UV-A gewichtet (B) und UV-B/C gewichtet (C) in Abhängigkeit von Messabstand r und Höhenwinkel θ für Parametersatz P2 für Baustahl (logarithmische Skalierung der y-Achse).

Nachdem die bis dato durchgeführten Messungen stets nur aus einer Richtung aufgenommen wurden, sollte nun der Seiten- bzw. Azimutwinkel φ in die Betrachtungen einfließen. Die installierten Schienen für $\varphi = 45^\circ$ und 90°

fanden im Rahmen dieser Messreihe Anwendung. Das gesamte Spektrum der Höhenwinkel des Messkopfes θ von 0° bis 60° wurde bei den festen Messabständen $r = 50$ mm und 200 mm eingestellt. Zur Wahrung der Vergleichbarkeit wurden der Laser mit den bekannten Parametersätzen P1 und P2 für die Lasereinschweißungen in Baustahl bei 350 mm/min betrieben.

Da die Kurvenverläufe der Bestrahlung pro Puls für die einzelnen Sensoren eine hohe Ähnlichkeit aufwiesen, soll zum besseren Verständnis lediglich die Bestrahlung pro Puls für den UV-A-Spektralbereich (gewichtet) gezeigt werden.

Bemerkenswert ist in Abbildung 41 die Änderung des Kurvenverlaufs zwischen den gewählten Messabständen $r = 50$ mm und 200 mm. Steilere Beobachtungswinkel führen zu geringeren Bestrahlungswerten pro Puls. Beim geringen Abstand führen kleine Höhenwinkel um 0° jedoch zum Maximum, bei 200 mm liegt das Maximum bei einem Höhenwinkel von $\theta = 30^\circ$. Dieser Umstand wird vermutlich in Kombination der Reflexion der UV-Strahlung an der Bauteiloberfläche sowie der bereits genannten Abweichung des Messsystems für geringe Abstände erzeugt.

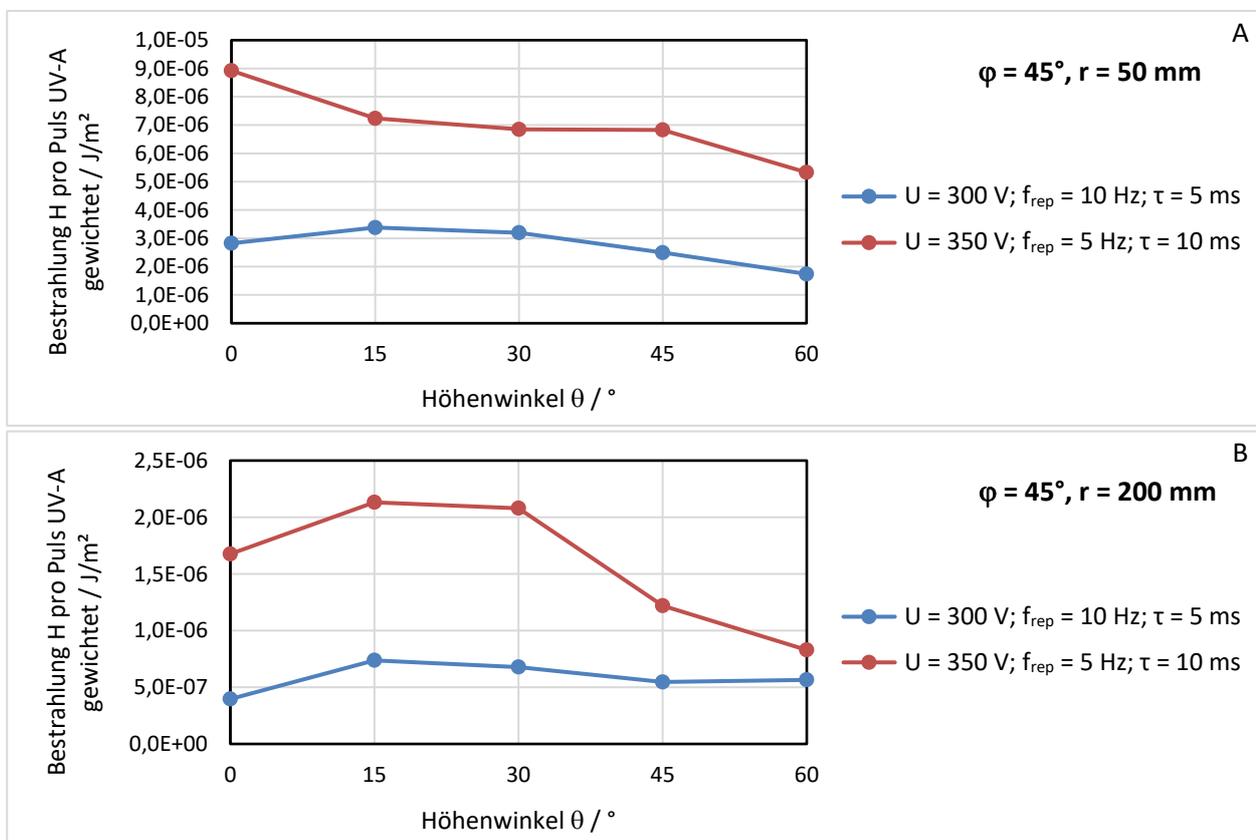


Abbildung 41. Messreihe 2 (TAP 2.6) – Bestrahlung H pro Puls UV-A gewichtet in Abhängigkeit vom Höhenwinkel θ für die Parametersätze P1 und P2 für Baustahl, Messabstände $r = 50$ mm (A) und 200 mm (B) sowie Azimutwinkel $\varphi = 45^\circ$.

In der nachfolgenden Abbildung 42 sind die analogen Bestrahlungswerte pro Puls für den Azimutwinkel $\varphi = 90^\circ$ aufgetragen. Für den kleinen Messabstand $r = 50$ mm wird der Kurvenverlauf bei $\varphi = 90^\circ$ gegenüber dem Azimutwinkel $\varphi = 45^\circ$ beinahe umgekehrt, erreicht jedoch bei $\theta = 60^\circ$ dieselben Bestrahlungen pro Puls (gewichtet) wie beim Azimutwinkel $\varphi = 45^\circ$. Bei dem größeren Messabstand ähneln sich die Bestrahlungswerte pro Puls bezüglich der seitlichen Betrachtungswinkel und das Maximum wird bei $\theta = 30^\circ$ erreicht. Für die beiden Parametersätze P1 und P2 ähneln sich die Kurvenverläufe in Abbildung 42 jeweils qualitativ. Die Bestrahlungswerte pro Puls liegen für P2 wie nach den in Abbildung 41 dargestellten Diagrammen zu erwarten signifikant über den Werten für P1.

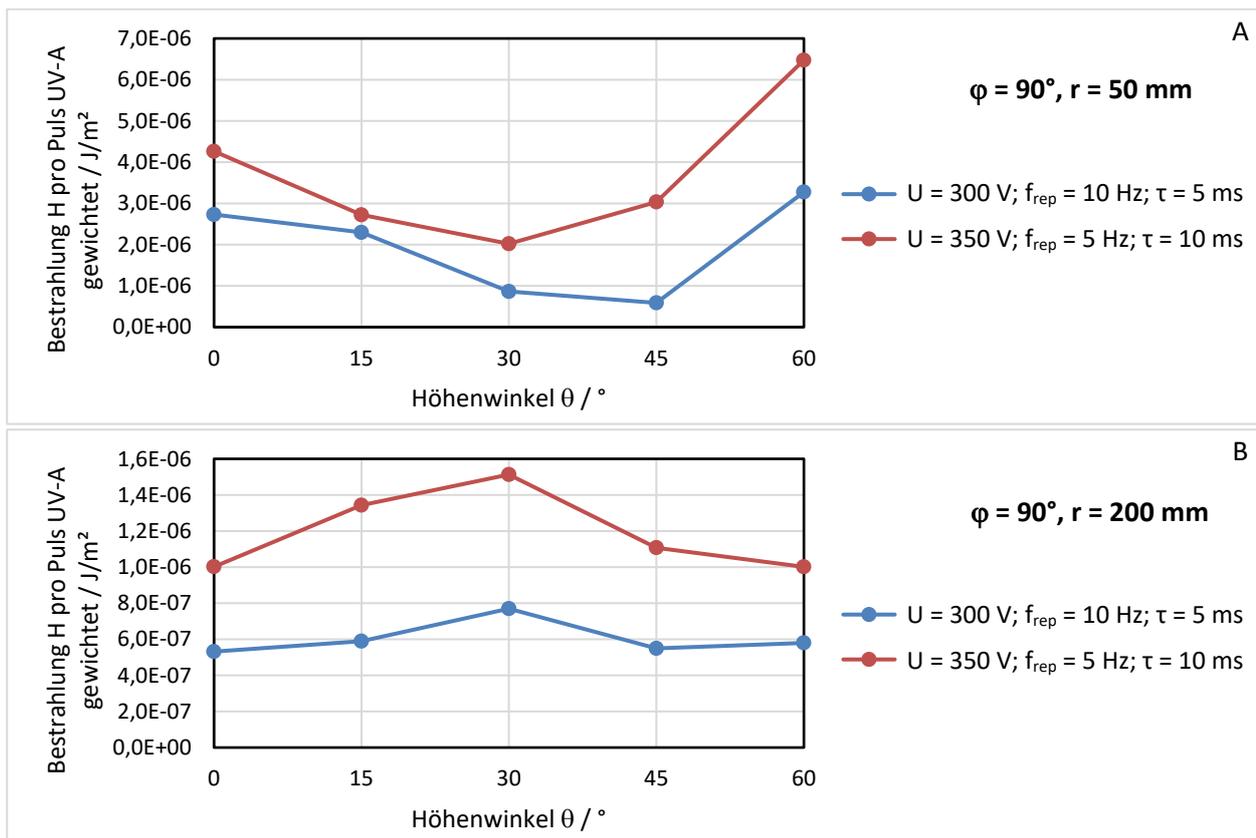


Abbildung 42. Messreihe 2 (TAP 2.6) – Bestrahlung H pro Puls UV-A gewichtet in Abhängigkeit vom Höhenwinkel θ für die Parametersätze P1 und P2 für Baustahl, Messabstände $r = 50 \text{ mm}$ (A) und 200 mm (B) sowie Azimutwinkel $\varphi = 90^\circ$.

Aus der Praxis des Laserstrahlschweißens ergab sich die Notwendigkeit der Variation des Einstrahlwinkels β der Laserstrahlung auf das Werkstück. Der Einstrahlwinkel β (in Relation zum Lot) sollte auf 10° , 20° und 30° eingestellt werden. Unter diesem Einfluss musste natürlich ebenso das räumliche Verhalten der Emission ermittelt werden:

- Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ, 45^\circ$ und 90°
- Höhenwinkel $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ und 45°
- Messabstand $r = 50 \text{ mm}$ und 200 mm

Als Laserparameter in dieser Messreihe 3 wurde lediglich der Satz P1 in Verbindung mit Baustahl als Werkstoff sowie der Schweißgeschwindigkeit von 350 mm/min gewählt, um die Datenmenge zu verringern.

Die Bestrahlungswerte pro Puls für den niedrigen Messabstand $r = 50 \text{ mm}$ zeigen unterschiedliche Kurvenverläufe in Abhängigkeit vom Höhenwinkel θ für die verschiedenen Azimutwinkel φ . Das sollte jedoch nicht zu stark bewertet werden: Die Messung mit dem Sensor ist für geringe Abstände fehleranfällig. Für alle drei Azimutwinkel φ wurde jeweils bei dem Höhenwinkel $\theta = 30^\circ$ der höchste Bestrahlungswert pro Puls gemessen, wofür der konstruktive Aufbau der Sensorköpfe als wesentlicher Grund erachtet wird. Für $\varphi = 0^\circ$ wurde der höchste Bestrahlungswert pro Puls für $\beta = 10^\circ$ ermittelt, während für $\varphi = 45^\circ$ und $\varphi = 90^\circ$ der Bestrahlungswert pro Puls für $\beta = 30^\circ$ heraussticht. Im Mittel nimmt offenbar die Bestrahlung pro Puls mit wachsendem Azimutwinkel signifikant ab. Die ist besonders auffällig in dem Diagramm für $\varphi = 90^\circ$, wonach die Bestrahlung pro Puls hier um mehrere Größenordnungen kleiner ist als für $\varphi = 0^\circ$ und $\varphi = 45^\circ$. Die erhöhten Bestrahlungswerte für $\varphi = 0^\circ$ deuten auf nennenswerte reflektierte Anteile an den Messsignalen hin, was darauf zurückgeführt wird, dass das Werkstück zur Einstellung von β in diese Richtung gekippt wurde. Dadurch neigte sich das Lot in Richtung $\varphi = 0^\circ$. Für die größeren Azimutwinkel entfielen die reflektierten Anteile und das ungestörte räumliche Abstrahlverhalten aus der Prozesszone heraus überwog.

Der Ansatz der Beeinflussung der UV-Strahlungsemission analog zur Reflexion der Laserstrahlung scheint sich in abgeschwächter Ausprägung zu bewahrheiten.

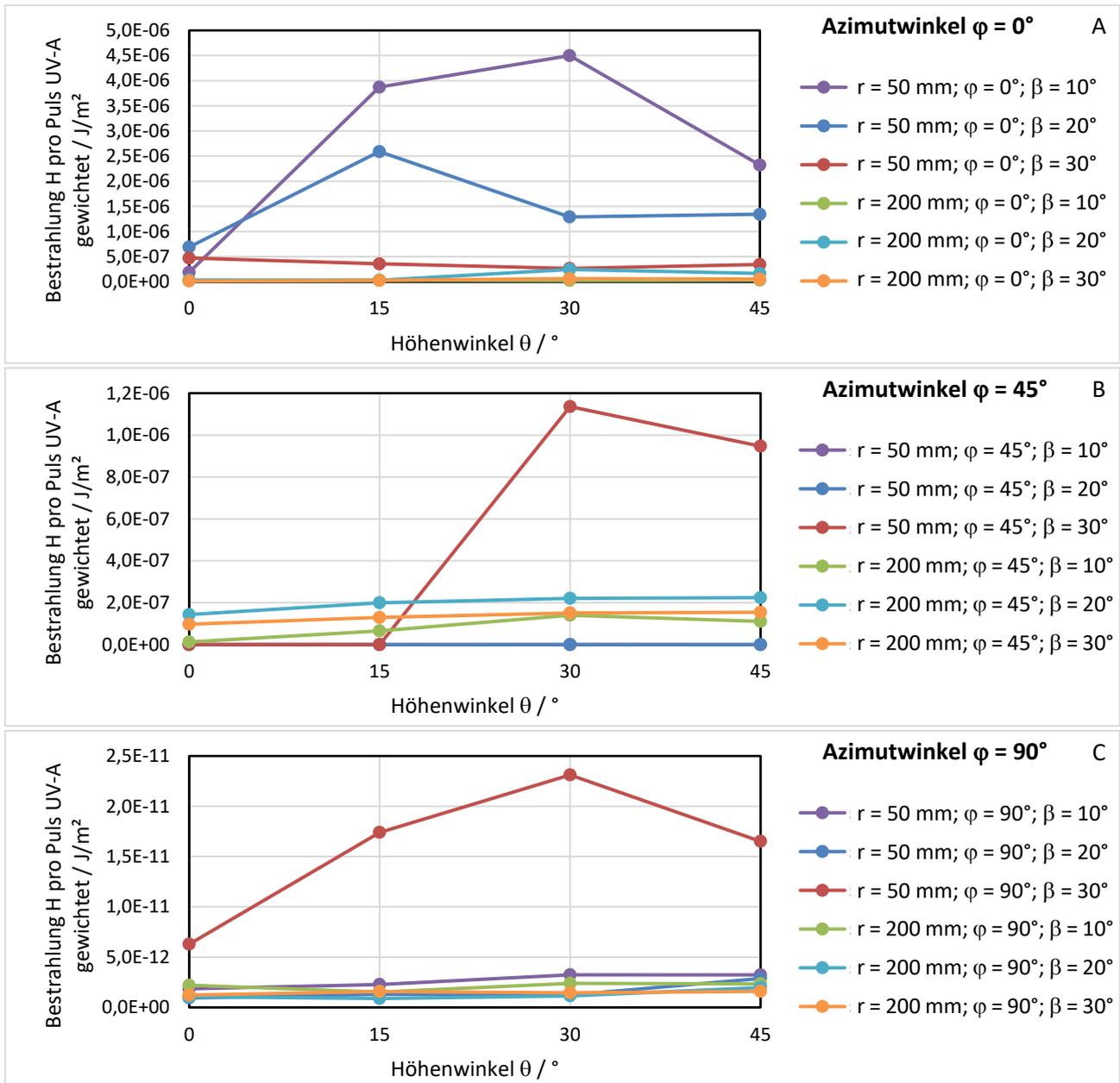


Abbildung 43. Messreihe 3 (TAP 2.6) – Bestrahlung H pro Puls UV-A gewichtet in Abhängigkeit vom Höhenwinkel θ und vom Einstrahlwinkel β für Parametersatz P1 für Baustahl, Messabstände $r = 50$ mm und 200 mm sowie Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$ (A), $\varphi = 45^\circ$ (B) und $\varphi = 90^\circ$ (C).

4.14 UV- und VIS-Strahlungsmessung – Stufe 3: Variation des Werkstoffes (TAP 2.7)

In den Teilarbeitspaketen 2.5 und 2.6 wurde die Beeinflussung der UV-Strahlungsemission durch die Laserstrahlparameter sowie die räumliche Abstrahlcharakteristik im UV- und Blaulichtbereich unter der Applizierung auf Baustahl untersucht. Die in TAP 2.1 herausgearbeiteten weiteren vier Werkstoffe und deren Einfluss auf die UV-Sekundärstrahlung wurden im Teilarbeitspaket 2.7 näher beleuchtet.

Dafür wurden die in den TAPs 2.5 und 2.6 vorausgewählten Messabstände $r = 50$ mm und $r = 200$ mm sowie die Laserparameter P1 und P2 genutzt. Die Höhenwinkel beschränkten sich auf die Werte $\theta = 15^\circ$, 30° und 45° und der

Azimutwinkel auf $\varphi = 0^\circ$ (Betrachtung von vorn). Die Messergebnisse sind in Abbildung 44 am Beispiel der UV-A-Bestrahlung pro Puls (ungewichtet) dargestellt.

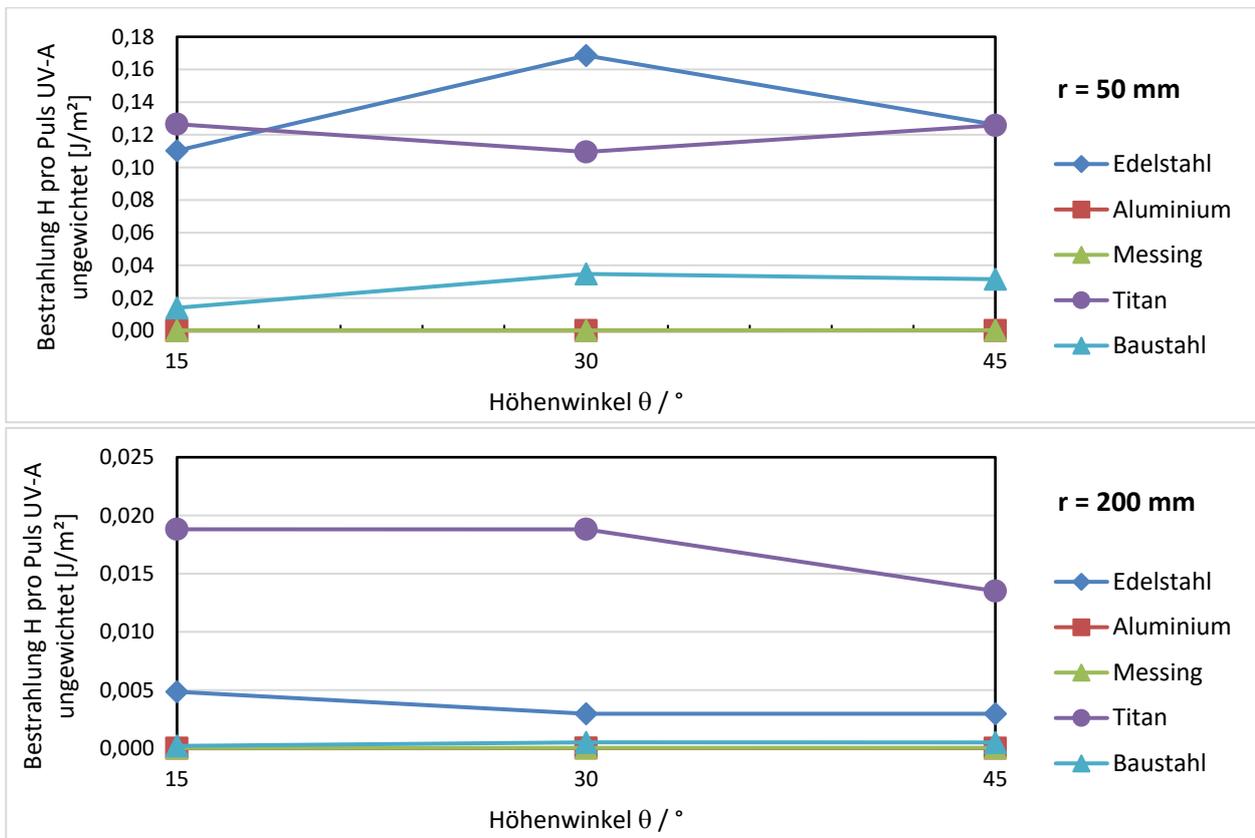


Abbildung 44. Bestrahlung H pro Puls UV-A ungewichtet in Abhängigkeit vom Werkstoff und vom Höhenwinkel θ für Parametersatz P1, Messabstände $r = 50 \text{ mm}$ (A) und 200 mm (B).

Die erzeugten Laserpulse des energieärmeren Parametersatzes P1 verursachten bereits eine starke Variation der gemessenen UV-Pulse. Titan und nichtrostender Stahl zeigen in den abgeleiteten Diagrammen in Abbildung 44 die höchsten Emissionen.

In Erwartung stärkerer Kurvenabweichungen wurden die Messungen mit den höheren Laserleistungen des bekannten Parametersatzes P2 wiederholt. Die ungewichteten Bestrahlungen pro Puls für den UV-A-Spektralbereich sind der Abbildung 45 zu entnehmen.

Die Steigerung der UV-Emission konnte durch die Anhebung der Laserparameter für alle Werkstoffe nachgewiesen werden. Den höchsten Anstieg offenbarte die Bearbeitung von Titan mit einer 10fachen Emission gegenüber dem Parametersatz P1 (andere Werkstoffe: Faktor ≈ 3).

Das Besondere am Titan ist dessen elektromagnetisches Emissionsspektrum, welches über sehr stark ausgeprägte Linien bei etwa 323 und 335 nm im UV-A sowie diverse Nebenmaxima im gesamten UV-Spektrum verfügt. Das Gegenbeispiel Aluminium besitzt dahingegen im Spektrum von 300 bis 400 nm nur zwei separate Emissionslinien. Über die unterschiedlich ausgeprägten Emissionsspektren [16] lässt sich das Vermögen der Werkstoffe erklären, beim Laserstrahlschweißen eine Plasmafackel mit hohem UV-Wellenlängenanteil zu erzeugen.

Die UV- und Blaulichtbelastung der untersuchten Werkstoffe kann ausgehend von den durchgeführten Messungen in folgender Reihenfolge von niedrig zu hoch angegeben werden:

Aluminium \rightarrow Messing \rightarrow Baustahl \rightarrow Nichtrostender Stahl \rightarrow Titan

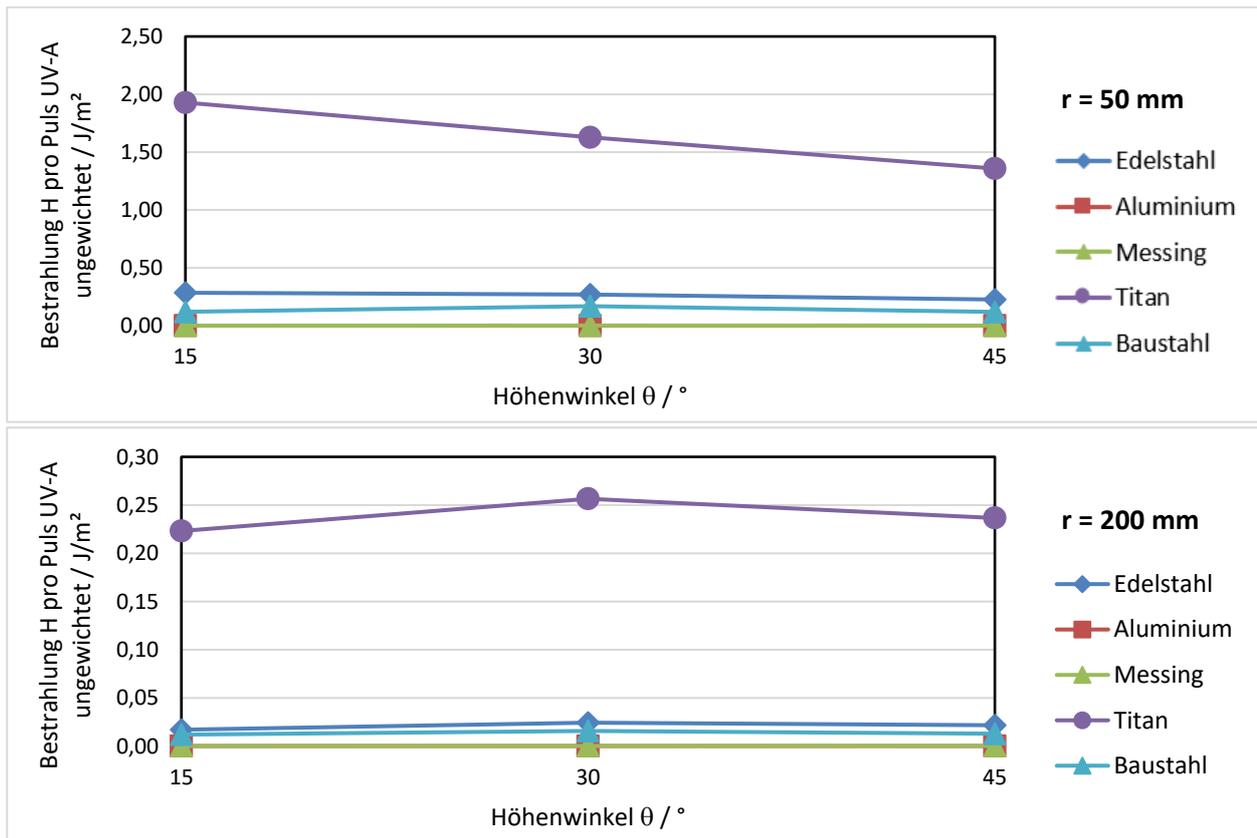


Abbildung 45. Bestrahlung H pro Puls UV-A ungewichtet in Abhängigkeit vom Werkstoff und vom Höhenwinkel θ für Parametersatz P2, Messabstände $r = 50$ mm (A) und 200 mm (B).

4.15 UV- und VIS-Strahlungsmessung – Stufe 4: Einfluss der Laserstrahlquelle (TAP 2.8)

Das TAP 2.8 wurde mit zwei weiteren pulsfähigen Laserstrahlquellen (Laser 2 und 3) im LZH bearbeitet, wobei die Wellenlängen ähnlich derjenigen des Lasers 1 waren. Beide zusätzlich verwendeten Systeme konnten mit dem Optometer P-9801 so verwendet werden, dass sich über eine Triggerfunktion einzelne Pulse aufzeichnen ließen.

Für die nachfolgend dargestellten Arbeiten wurde das Messequipment von der SLV Halle im Versuchslabor des LZH eingerichtet. Abbildung 46 zeigt den Versuchsaufbau mit den einzelnen Komponenten im Versuchslabor des LZH. Die Schweißuntersuchungen in TAP 2.8 wurden mit den bereits in den vorherigen Arbeitspaketen herausgearbeiteten zwei Parametersätzen durchgeführt (Tabelle 2).

Tabelle 2. Parametersätze 1 und 2, die für die nachfolgend dargestellten Schweißuntersuchungen an den beiden verwendeten Lasersystemen eingestellt wurden.

Parametersatz	1	2
Pulsspitzenleistung P_{max}	3,0 kW	4.1 kW
Pulsenergie Q	15,0 J	41,3 J
Repetitionsrate f_{rep}	10 Hz	5 Hz
Pulsdauer τ	5 ms	10 ms

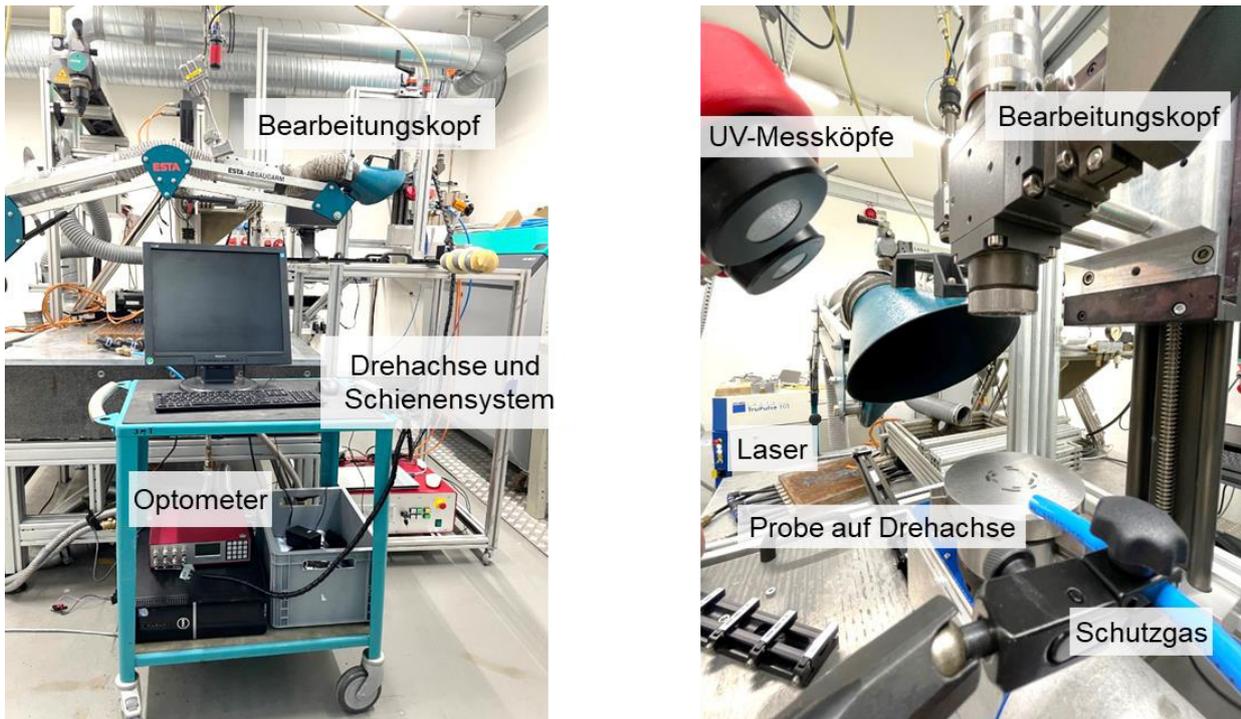


Abbildung 46. Messaufbau für die UV-Sekundärstrahlungsmessungen beim gepulsten Laserstrahlschweißen im Versuchslabor des LZH.

Zwecks Vereinfachung werden nachfolgend stets die Bezeichnungen „Parametersatz 1“ und „Parametersatz 2“ für die eingestellten Lasersystemparameter verwendet.

4.15.1 Blindschweißungen mit Laser 2

Mit dem Laser 2 wurden für die Schweißuntersuchungen an verschiedenen Werkstoffen die nachfolgend zusammengefassten gleichbleibenden Einstellungen bzw. Konfigurationen vorgenommen.

Tabelle 3. Gleichbleibende Einstellungen beim Blindschweißen verschiedener Werkstoffe mit dem Laser 2.

Laser	Trumpf TruPulse 103
Pulsform	Rechteckpulse
Wellenlänge	1.064 nm
Faserkerndurchmesser	400 μm
Kollimierbrennweite	100 mm
Fokussierbrennweite	100 mm
minimaler Strahldurchmesser d_{86}	0,4 mm
Strahldurchmesser d_{86} auf Probe	1,0 mm (bei Fokuslage + 5 mm)
Fokuslage	variabel bzw. + 5 mm
Einfallswinkel Laserstrahl	lotrecht (0°)
Schutzgas	Argon
Schweißgeschwindigkeit v_{teach}	750 Hz (entspricht ca. 350 mm/min)
Azimutwinkel φ	0° (von vorn)

Um mit allen verwendeten Lasersystemen annähernd die gleiche Leistungsdichte auf das Werkstück bringen zu können, wurde an dem Laser 2 eine Strahlkaustik-Messung durchgeführt. Auf diese Weise konnten die das System charakterisierenden Größen Strahlparameterprodukt, Rayleigh-Länge und Divergenz ermittelt werden. Daraus ließ sich rechnerisch der einzustellende Abstand des Bearbeitungskopfes vom Werkstück bestimmen, bei welchem der Spotdurchmesser gerade 1 mm betrug. Abbildung 47 zeigt den Messaufbau für die Kaustik-Messung sowie die anhand der gemessenen Rohdaten abgeleitete Strahlkaustik.

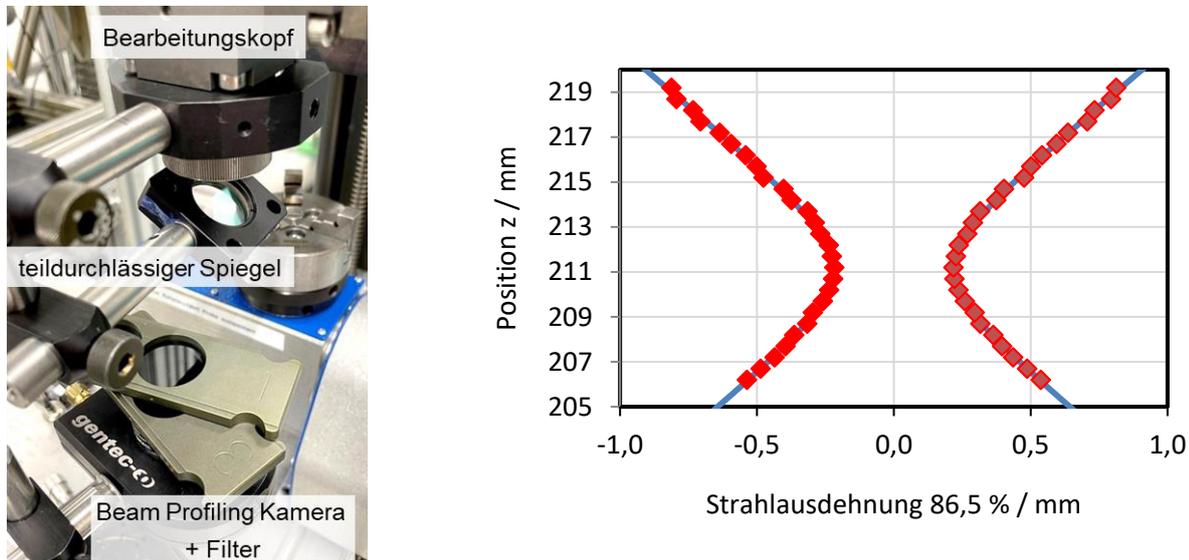


Abbildung 47. Messaufbau für die Kaustikbestimmung am Laser 2 (links) sowie anhand der gemessenen Rohdaten abgeleitete Strahlkaustik (rechts).

Um den Einfluss der Spotgröße und der sich daraus ergebenden Leistungsdichte auf dem Werkstück zu untersuchen, wurde auf Basis der Ergebnisse der Kaustik-Messung bei fixierter Positionierung der UV-Messköpfe die z-Position des Bearbeitungskopfes und damit der Abstand zur Probenoberfläche verstellt. So erfolgte eine mehr oder weniger starke Defokussierung der Laserstrahlung auf dem Werkstück. Mit den sich ergebenden unterschiedlichen Spotdurchmessern wurden Blindschweißungen durchgeführt. Dabei wurde die UV-Strahlungsemission gemessen. Das Ergebnis dieser Versuche ist in Abbildung 48 für feste Beobachtungsbedingungen (Abstand zur Prozesszone $r = 100$ mm, Höhenwinkel $\theta = 30^\circ$, Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$) dargestellt.

Anhand der Abbildung 48 ist zu erkennen, dass im Bereich des Laserstrahlfokus offenbar weniger UV-Strahlung aus der Prozesszone in Richtung der UV-Messköpfe emittiert wurde als im defokussierten Bereich ($\sim \pm 5$ mm). Als Ergebnis der Bestrahlung wurde auf dem Werkstück eher ein Einschneiden in die Probe als ein Aufschmelzen bzw. Schweißen an der Probenoberfläche festgestellt. Hieraus ist zu schließen, dass bei Einschnitten entweder insgesamt weniger Sekundärstrahlung in die Umgebung freigesetzt wird als beim oberflächigen Wärmeleitungsschweißprozess oder die Sekundärstrahlung stärker in Richtung der eingestrahnten Laserstrahlung emittiert wird. Zu unterscheiden ist dies experimentell nicht, da in der Richtung der Lasereinstrahlung generell keine UV-Sekundärstrahlungsmessung erfolgen kann, denn der Bearbeitungskopf schirmt die dorthin freigesetzte Strahlung ab. Das stärkste UV-Strahlungssignal wurde in der gegebenen Messkonfiguration für einen defokussierten Spot bei der Position 121 mm (vor Erreichen des Fokus, d.h. der Fokus liegt im Werkstück) gemessen. Die genannte Position entsprach einer Defokussierung um etwa 6 mm. Hinter dem Fokus lag das Maximum der UV-Strahlungsemission bei einer z-Position zwischen 130 und 133 mm, wobei die Signalstärke hier offenbar etwas geringer ausfiel als vor dem Fokus. Für die weiteren Untersuchungen wurde eine z-Achsenposition des Bearbeitungskopfes relativ zum Werkstück von 132 mm gewählt, da der Bearbeitungskopf dort weiter von der Prozesszone entfernt und somit besser vor Schweißspritzern geschützt war.

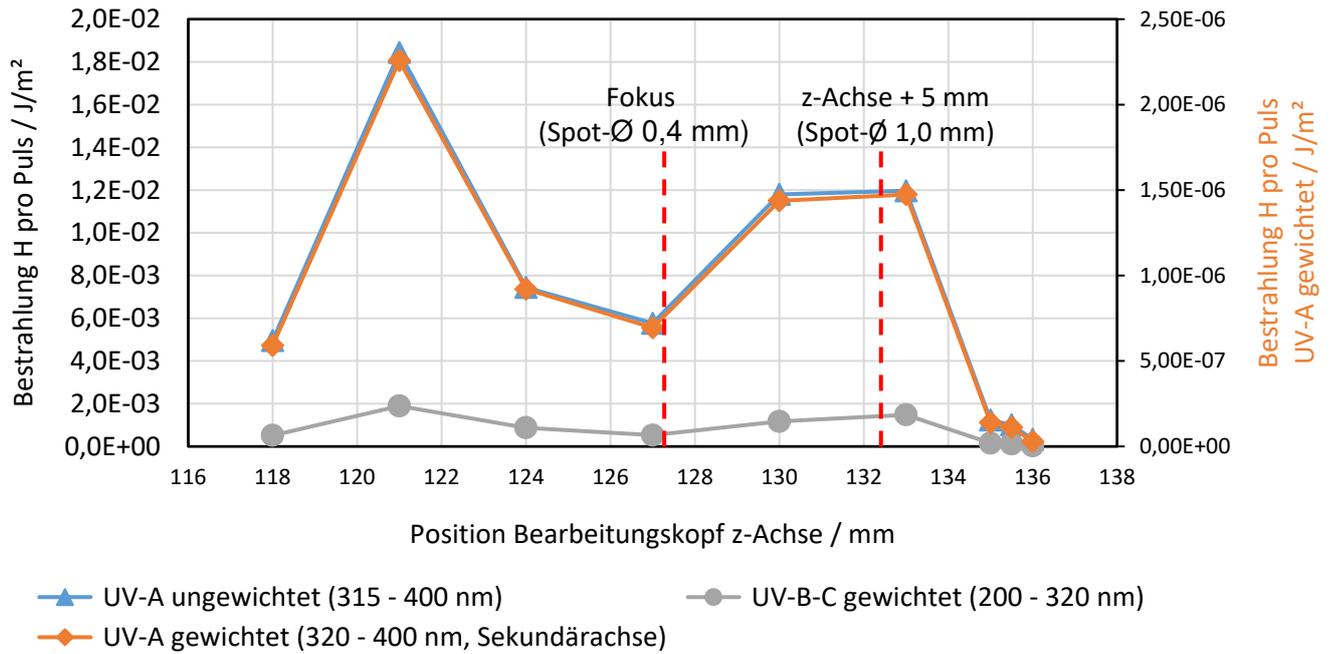


Abbildung 48. UV-Sekundärstrahlungsmessungen mit unterschiedlichen Spotgrößen bei Blindschweißungen mit dem Laser 2 auf einem Baustahl-Werkstück.

Für die Parametersätze 1 und 2 gemäß Tabelle 2 sowie für zwei verschiedene Abstände der Sensoren von der Prozesszone (50 und 200 mm) wurden während des Blindschweißens mit dem Laser 2 an fünf verschiedenen Werkstoffen (Baustahl (S355J2), Edelstahl (1.4301), Aluminium (3.2315), Messing (2.0401), Titan (3.7164)) bei einem Azimutwinkel φ von 0° (Messung von vorn entgegen der Richtung des Laserstrahlvorschubs) UV-Sekundärstrahlungsmessungen für die Strahlungsanteile UV-A (ungewichtet) sowie UV-A_{eff} und UV-B/C_{eff} (jeweils gewichtet) durchgeführt. Angemerkt sei, dass der Laser hier zum größten Teil außerhalb der Herstellerspezifikationen für nicht zeitlichen begrenzten Pulsbetrieb verwendet wurde. In den Versuchen wurden drei verschiedene Höhenwinkel θ (15° , 30° und 45°) berücksichtigt. Die Messergebnisse für die UV-Bestrahlungen pro Puls [J/m^2], die mittels Integration der Bestrahlungsstärkekurven und Bildung der Mittelwerte über mehrere Pulse bestimmt wurden, sind in Abbildung 49 und Abbildung 50 am Beispiel der UV-A-Strahlung (ungewichtet) dargestellt.

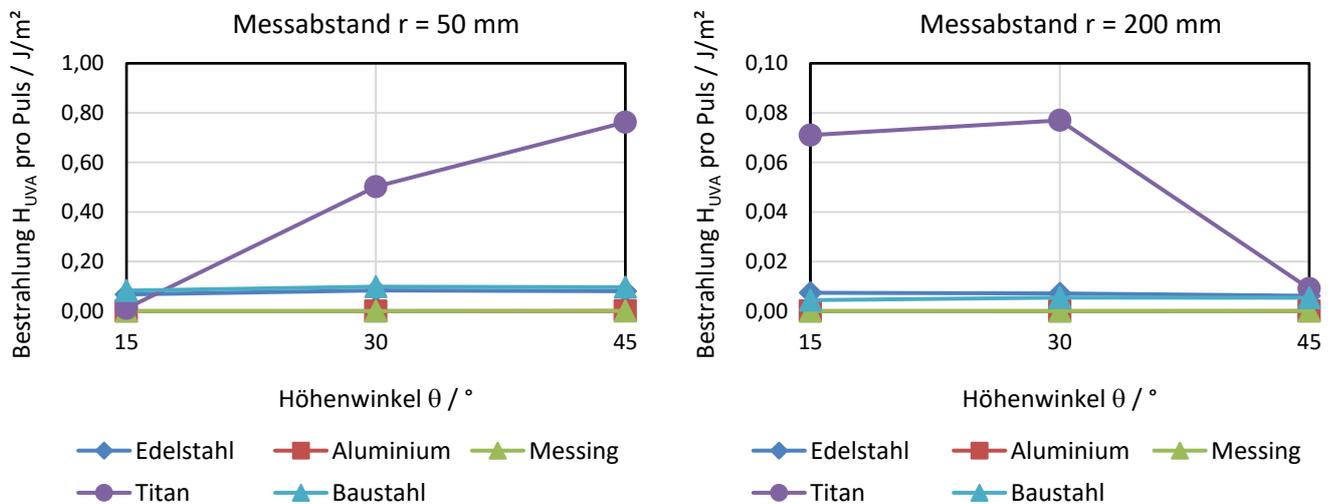


Abbildung 49. Ergebnisse der UV-A-Bestrahlungsmessungen (ungewichtet) beim Blindschweißen verschiedener Werkstoffe mit dem Laser 2 unter Verwendung von Parametersatz 1 gemäß Tabelle 2 für drei Höhenwinkel θ und einen Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$ (weitere Parameter im Text).

Für Parametersatz 1 gemäß Tabelle 2 (Abbildung 49) ergeben sich mit dem Laser 2 bei den meisten Werkstoffen und Höhenwinkeln θ etwas größere ungewichtete UV-A-Bestrahlungswerte pro Puls als mit dem Laser 1. Wesentliche Unterschiede sind beim Schweißen von Stahl und Titan zu beobachten: Mit dem Laser 2 liegen die Bestrahlungen bei Edelstahl und Baustahl in der gleichen Größenordnung, während die Bestrahlungen mit dem Laser 1 bei Edelstahl deutlich größer als bei Baustahl sind. Im Fall von Titan sind die Bestrahlungen mit dem Laser 2 deutlich größer als bei den anderen bearbeiteten Werkstoffen, was sich zumindest für den kleineren Messabstand von der Situation mit dem Laser 1 unterscheidet. Da außerdem mit dem Laser 2 die UV-Bestrahlung bei Titan offenbar stark vom Höhenwinkel θ abhängt, sofern fehlerhafte Messungen z.B. durch unvollständige Sensorausleuchtung, unbeabsichtigte abstandsabhängige Abschirmung des Sensors durch Schweißrauche oder Hardware-Komponenten in der Betrachtungsrichtung oder störende Reflexionen von aus der Prozesszone emittierten Strahlungsanteilen auszuschließen sind, ist infolge der veränderten Laserleistungsdichteverteilung von einer gegenüber dem Laser 1 deutlich stärker gerichteten UV-Strahlungsemission auszugehen.

Die Messergebnisse zeigen, dass die Abhängigkeit der emittierten UV-Strahlung vom bestrahlten Werkstoff, aber auch von den Messbedingungen komplex ist. Insgesamt ist festzustellen, dass Titan beim gepulsten Laserstrahlschweißen offenbar gegenüber den anderen bestrahlten Werkstoffen eine deutlich erhöhte UV-Emission aufweist. Für die meisten Messbedingungen ist die Abhängigkeit vom verwendeten Lasersystem relativ gering.

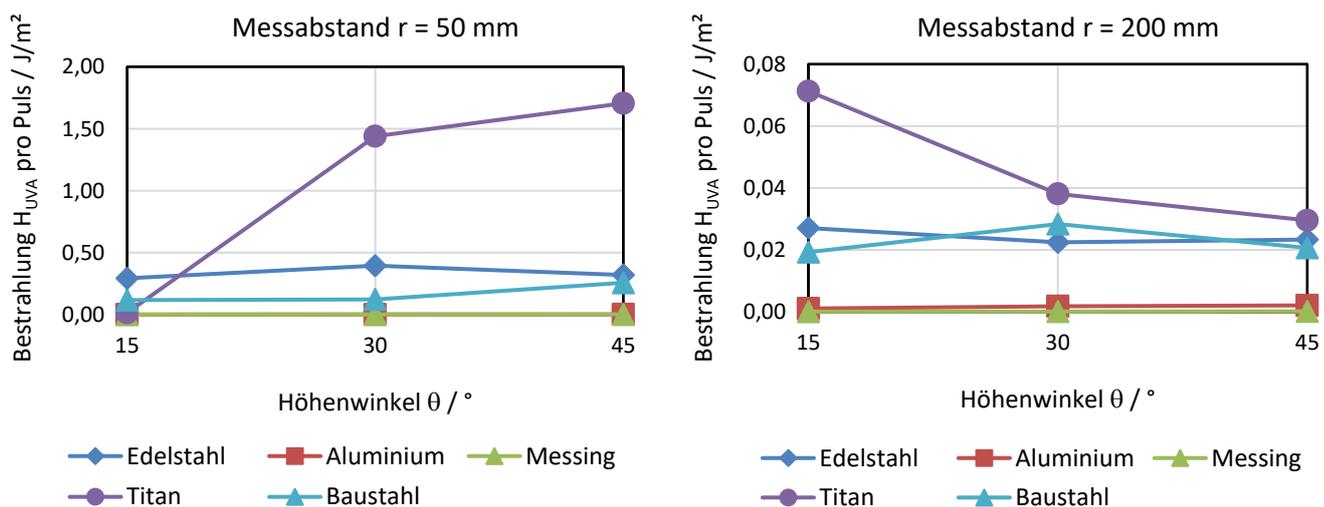


Abbildung 50. Ergebnisse der UV-A-Bestrahlungsmessungen (ungewichtet) beim Blindschweißen verschiedener Werkstoffe mit dem Laser 2 unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2 für drei Höhenwinkel θ und einen Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$ (weitere Parameter im Text).

Für Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2 (Abbildung 50) wurden mit dem Laser 2 weitgehend UV-Bestrahlungswerte in der gleichen Größenordnung wie mit dem Laser 1 ermittelt. Lediglich im Fall von Titan fielen die Messwerte vor allem bei dem größeren der beiden Messabstände mit dem Laser 2 deutlich kleiner aus als mit dem Laser 1.

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass beim Schweißen von Titan offenbar die größten UV-Strahlungsemissionen entstehen. Danach folgen Edelstahl und Baustahl. Die geringsten UV-Bestrahlungswerte entstehen bei der Bearbeitung von Aluminium und Messing. Dies gilt sowohl für den Laser 1 als auch für den Laser 2. Abgesehen davon hat die Laserspotgröße und somit die Laserbestrahlungsstärke einen signifikanten Einfluss auf die UV-Strahlungsemission: Bei sehr hohen Laserbestrahlungsstärken führt die sich verändernde Schmelzbadgeometrie infolge der Vergrößerung der Wechselwirkungstiefe in der Werkstoffoberfläche offenbar zu kleineren erfassbaren UV-Bestrahlungsstärken. Ist die Laserbestrahlungsstärke dagegen vergleichsweise klein, ist die Wechselwirkung erwartungsgemäß zu schwach, um nennenswerte UV-Strahlungsemission zu erzeugen.

4.15.2 Blindschweißungen mit Laser 3

Analog zu den Untersuchungen mit dem Laser 2 wurden mit dem Laser 3 für die Schweißuntersuchungen an verschiedenen Werkstoffen die nachfolgend zusammengefassten gleichbleibenden Einstellungen bzw. Konfigurationen vorgenommen (Tabelle 4). Der Laser emittiert Laserstrahlung bei der Wellenlänge 1070 nm in Form eines zentralen Spots (Center – C), welcher von einem Laserstrahlungsring (Ring – R) umgeben ist. Die relevanten Kaustik-Informationen der Laserstrahlung dieses Lasersystems wurden aus Herstellerdaten übernommen. Hervorgehoben sei an dieser Stelle, dass Laser für die hier betrachtete Anwendung im gepulsten Modus bei relativ niedriger Repetitionsrate f_{rep} betrieben wurde.

Tabelle 4. Gleichbleibende Einstellungen beim Blindschweißen verschiedener Werkstoffe mit dem Laser 3.

Laser	Coherent HighLight FL6000-ARM (Adjustable Ring Mode)
Pulsform	Rechteckpulse
Wellenlänge	1.070
Faserkerndurchmesser	70 μm (Center), 100 μm / 180 μm (innerer Ring / Ring)
Kollimierbrennweite	200 mm
Fokussierbrennweite	100 mm
minimaler Strahldurchmesser d_{86}	200 μm (Center), 650 μm (Ring)
Fokuslage	+ 14 mm
Einfallswinkel Laserstrahl	lotrecht (0°)
Schutzgas	Argon
Schweißgeschwindigkeit	$v_{\text{teach}} = 750 \text{ Hz}$ (entspricht ca. 350 mm/min)
Azimutwinkel φ	0° (von vorn)

Analog zu den Untersuchungen mit dem Laser 2 wurden für die Parametersätze 1 und 2 gemäß Tabelle 2 sowie für zwei verschiedene Abstände der Sensoren von der Prozesszone (50 und 200 mm) während des Blindschweißens mit dem Laser 3 an fünf verschiedenen Werkstoffen (Baustahl (S355J2), Edelstahl (1.4301), Aluminium (3.2315), Messing (2.0401), Titan (3.7164)) bei einem Azimutwinkel φ von 0° (Messung von vorn entgegen der Richtung des Laserstrahlvorschubs) UV-Sekundärstrahlungsmessungen für die Strahlungsanteile UV-A (ungewichtet) sowie UV-A_{eff} und UV-B/C_{eff} (jeweils gewichtet) durchgeführt. Die Gesamtlaserstrahlleistung wurde dabei wie in Tabelle 5 angegeben zwischen Center und Ring aufgeteilt, um ein Quasi-Top-Hat-Laserstrahlungsprofil zu generieren. Außerdem wurde die Laserstrahlung entsprechend der Kaustik geringfügig defokussiert, um einen Spotdurchmesser d_{86} von 1,0 mm auf der Werkstoffoberfläche einzustellen.

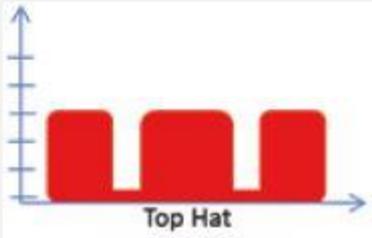
Wie zuvor mit dem Laser 2 wurden drei verschiedene Betrachtungswinkel relativ zur Probenoberfläche (Höhenwinkel $\theta = 15^\circ, 30^\circ$ und 45°) berücksichtigt. Die Messergebnisse für die UV-Bestrahlungen pro Puls [J/m^2], die mittels Integration der Bestrahlungsstärkekurven und Bildung der Mittelwerte über mehrere Pulse bestimmt wurden, sind in Abbildung 49 und Abbildung 50 am Beispiel der UV-A-Strahlung (ungewichtet) dargestellt.

Für Parametersatz 1 gemäß Tabelle 2 in Verbindung mit Tabelle 5 (Abbildung 51) wurden mit dem Laser 3 überwiegend kleinere UV-Bestrahlungswerte als mit dem Laser 2 gemessen, wobei die Abhängigkeit vom Höhenwinkel θ tendenziell bei beiden Lasersystemen gering war. Lediglich beim Werkstoff Titan lagen die Messwerte in einer ähnlichen Größenordnung. Dabei war eine andere Abhängigkeit vom Höhenwinkel θ festzustellen, wofür eine plausible Begründung nicht erkennbar ist.

Tabelle 5. Aufteilung der Laserleistung auf Center (C) und Ring (R) analog einem Top-Hat-Strahlprofil zur Einstellung der Parametersätze 1 und 2 gemäß Tabelle 2 mit dem Laser 3.

Parametersatz	1	2
Pulsspitzenleistung (Ring + Center) P_{max}	3,0 kW	4,1 kW
Anteil Center 33 %	1,0 kW	1,4 kW
Anteil Ring 67 %	2,0 kW	2,7 kW

Strahlprofil schematisch für die gewählten Leistungsanteile im Querschnitt



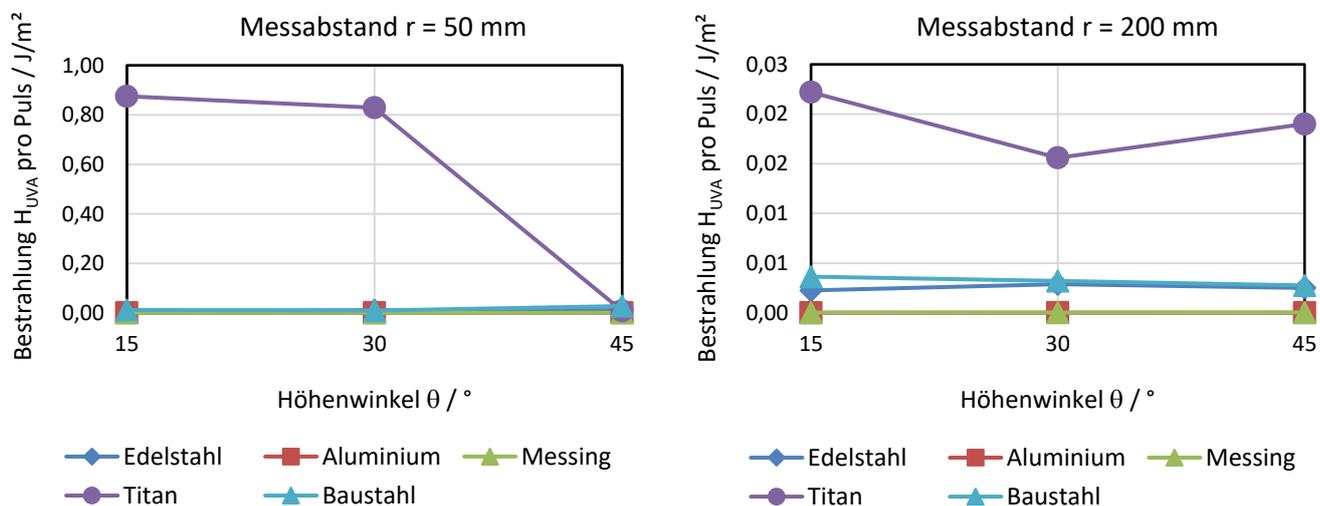


Abbildung 51. Ergebnisse der UV-A-Bestrahlungsmessungen (ungewichtet) beim Blindschweißen verschiedener Werkstoffe mit dem Laser 3 unter Verwendung von Parametersatz 1 gemäß Tabelle 2 sowie einem Strahlprofil gemäß Tabelle 5 für drei Höhenwinkel θ sowie einen Azimutwinkel von $\varphi = 0^\circ$ (weitere Parameter im Text).

Für Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2 in Verbindung mit Tabelle 5 (Abbildung 52) liegen die Messwerte für die UV-A-Bestrahlung (ungewichtet) erwartungsgemäß deutlich höher als für Parametersatz 1. Die Abhängigkeit der Messwerte vom Höhenwinkel θ ist weitgehend ähnlich, lediglich im Fall des Werkstoffes Titan ändert sich die Bestrahlung pro Puls mit dem Höhenwinkel eher weniger. Auffällig ist, dass die Maximalwerte mit dem Laser 3 im Vergleich zum Laser 2 beim Titan für den kleineren der beiden Messabstände signifikant kleiner sind, während die Werte für den größeren Messabstand über den mit dem Laser 2 erhaltenen Werten liegen. Unter Berücksichtigung der stärkeren Abhängigkeit vom Höhenwinkel θ bei Verwendung des Lasers 2 deuten die gemachten Beobachtungen darauf hin, dass durch die im Fall des Lasers 3 gleichmäßigere Leistungsdichteverteilung eine weniger stark gerichtete UV-Strahlungsemission erzeugt wird, vermutlich weil die Wechselwirkungszone mit der Laserstrahlung nicht so tief in das Material reicht wie beim Laser 2. In den meisten Fällen, besonders für den kleineren Messabstand, liegen die mit dem Laser 3 erzeugten UV-Bestrahlungen etwas unter denen der beiden anderen verwendeten Lasersysteme, aber immer noch in der gleichen Größenordnung.

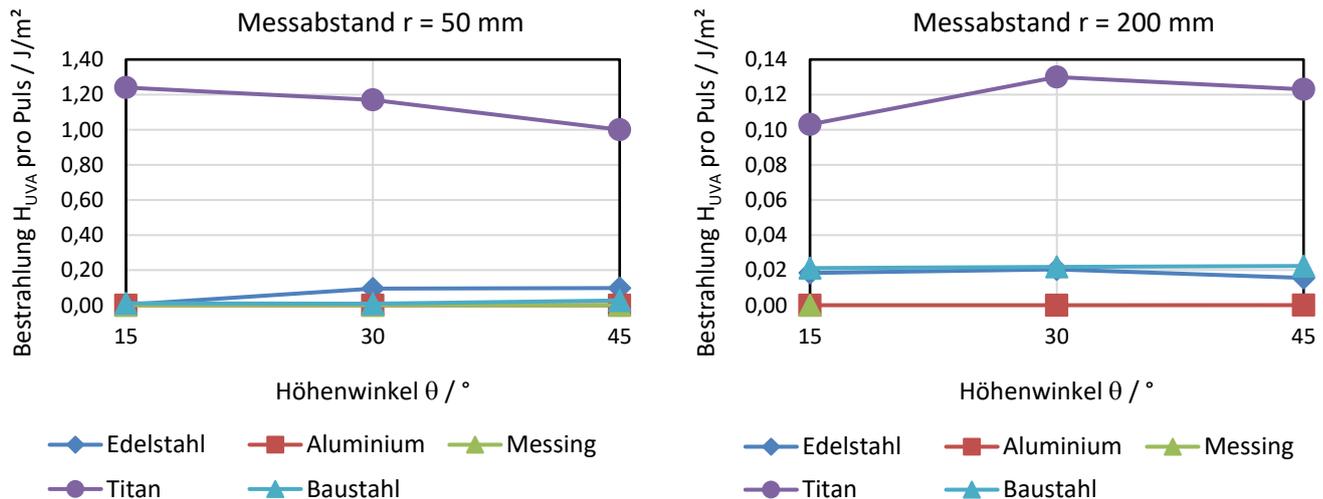


Abbildung 52. Ergebnisse der UV-A-Bestahlungsmessungen (ungewichtet) beim Blindschweißen verschiedener Werkstoffe mit dem Laser 3 unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2 sowie einem Strahlprofil gemäß Tabelle 5 für drei Höhenwinkel θ sowie einen Azimutwinkel von $\varphi = 0^\circ$ (weitere Parameter im Text).

Die Reihenfolge hinsichtlich der Stärke der UV-Strahlungsemission für die fünf verschiedenen Werkstoffe ist mit allen drei verwendeten Lasersystemen vergleichbar, d.h. die höchsten Messwerte werden für Titan und die geringsten Messwerte werden für Messing und Aluminium beobachtet. In den nachfolgenden Unterabschnitten werden die mit den drei Lasersystemen unter Verwendung der Parametersätze 1 und 2 erhaltenen Messergebnisse für die Werkstoffe Titan, Edelstahl und Baustahl am Beispiel noch einmal direkt gegenübergestellt.

4.15.3 Gegenüberstellung der Messergebnisse an Titan für die drei verwendeten Lasersysteme

Im Weiteren werden die Messergebnisse für den Titanwerkstoff unter Verwendung der verschiedenen Laserstrahlquellen unmittelbar gegenübergestellt. Abbildung 53 (oben) zeigt das Probenmaterial nach Durchführung der Blindschweißungen mit unterschiedlich langen Blindschweißnähten je Lasersystem. Bei allen Schweißungen wurde Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2 verwendet, wobei der Laser 2 unter diesen Bedingungen nur eine begrenzte Pulsfolge pro Schweißung emittieren konnte und entsprechend kurze Blindschweißnähte entstanden.

In den Diagrammen in Abbildung 53 (unten) ist nochmals zu erkennen, dass sich für die Abhängigkeit der Messergebnisse vom Höhenwinkel θ , hier exemplarisch anhand des UV-A-Anteils (ungewichtet) dargestellt, kein einheitliches Bild ergibt. In den meisten Fällen ist die Abhängigkeit der Bestrahlung pro Puls vom Höhenwinkel θ eher gering. Lediglich bei einem Messabstand von 50 mm fallen die Messwerte mit dem Laser 2 bei $\theta = 15^\circ$ stark ab. Bei beiden Messabständen 50 mm und 200 mm liegen die Bestrahlungswerte pro Puls für die drei Lasersysteme ansonsten jeweils in der gleichen Größenordnung, abgesehen von den Werten für den Laser 1 bei einem Messabstand von 200 mm, die für alle drei betrachteten Höhenwinkel mindestens doppelt so groß sind wie für die beiden anderen Laser.

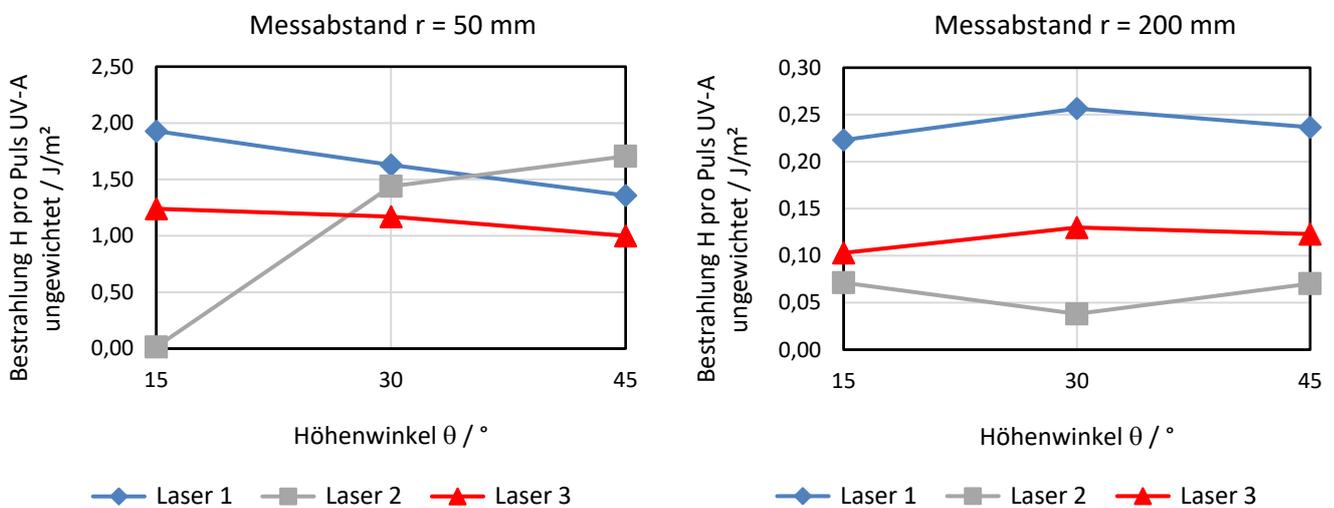
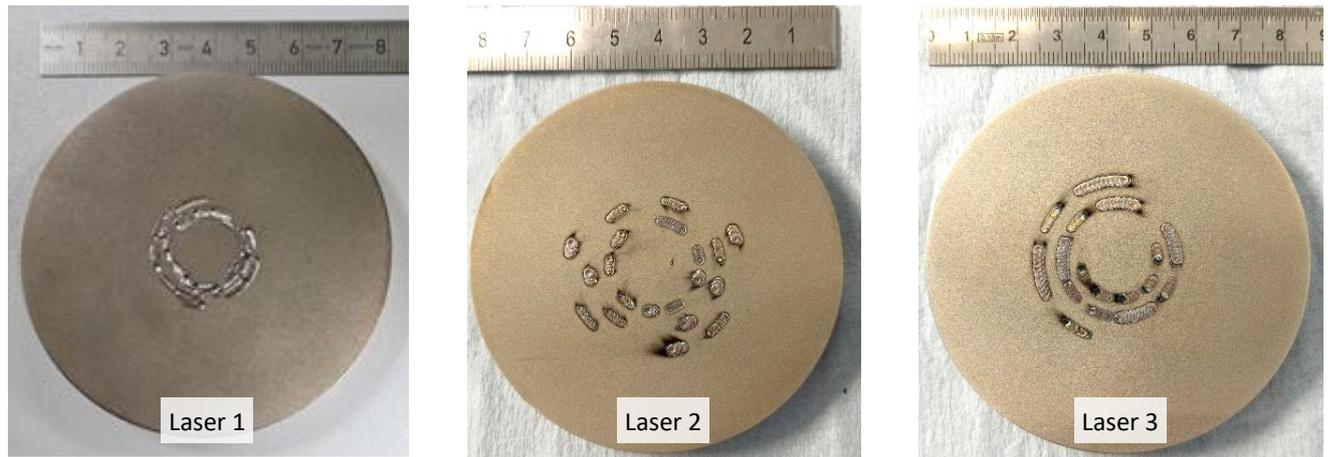


Abbildung 53. Ergebnisse der UV-Sekundärstrahlungsmessungen (hier UV-A ungewichtet) beim Blindschweißen von Titan mit den drei Lasersystemen unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2 für drei verschiedene Höhenwinkel θ sowie einen Azimutwinkel φ von 0° (weitere Parameter im Text).

Abgesehen von den Messungen mit den UV-Messköpfen von Gigahertz-Optik wurde an den Titanproben die emittierte UV-Sekundärstrahlung mittels Biosensoren gemessen. Die verwendeten Biosensoren des Typs VioSpor „Blue line“ bestehen aus einem biologischen Detektorfilm und sind im Hinblick auf die UV-Sensibilität der menschlichen Haut nachempfunden. Die einfallende UV-Strahlung durchdringt die immobilisierten Sporen im Detektorfilm. Je stärker die Strahlungs-dosis auf den Sensor einwirkt, desto mehr Sporen werden geschädigt bzw. abgetötet und können sich nicht mehr zu Bakterien entwickeln, was als Auswertungsmethode fotometrisch detektiert wird. Das Maß geschädigter Bakteriensporen ist also direkt korreliert mit der Qualität und Intensität der einfallenden UV-Strahlung [14]. Gemäß CIE MED weisen die Sensoren eine nutzbare Empfindlichkeit zwischen 290 und 380 nm auf und können UV-Strahlung in einem Bestrahlungsbereich von 50 – 2250 J/m² detektieren [14]. Abbildung 54 zeigt den Messaufbau mit einem adaptierten VioSpor-Sensor.

Für die Versuche wurden zwei Laser verwendet, welche mit unterschiedlichen Repetitionsraten und unterschiedlichen Gesamtpulszahlen UV-Sekundärstrahlung aus dem Prozess freigesetzt haben. Zunächst wurde am Laser 3 der Parametersatz 2 eingestellt. Hiermit wurden 10 Schweißbahnen mit jeweils 30 Pulsen auf dem Werkstück angefertigt, was einer Prozessdauer von 60 s entspricht. Gemessen wurde jeweils bei einem Messabstand r von 50 mm und 200 mm. Abbildung 56 zeigt links die ermittelten Messwerte pro Messabstand für die gewählte Bestrahlungsdauer von 60 s. Rechts sind die verwendeten Bestrahlungs- und Beobachtungsparameter zusammengestellt.

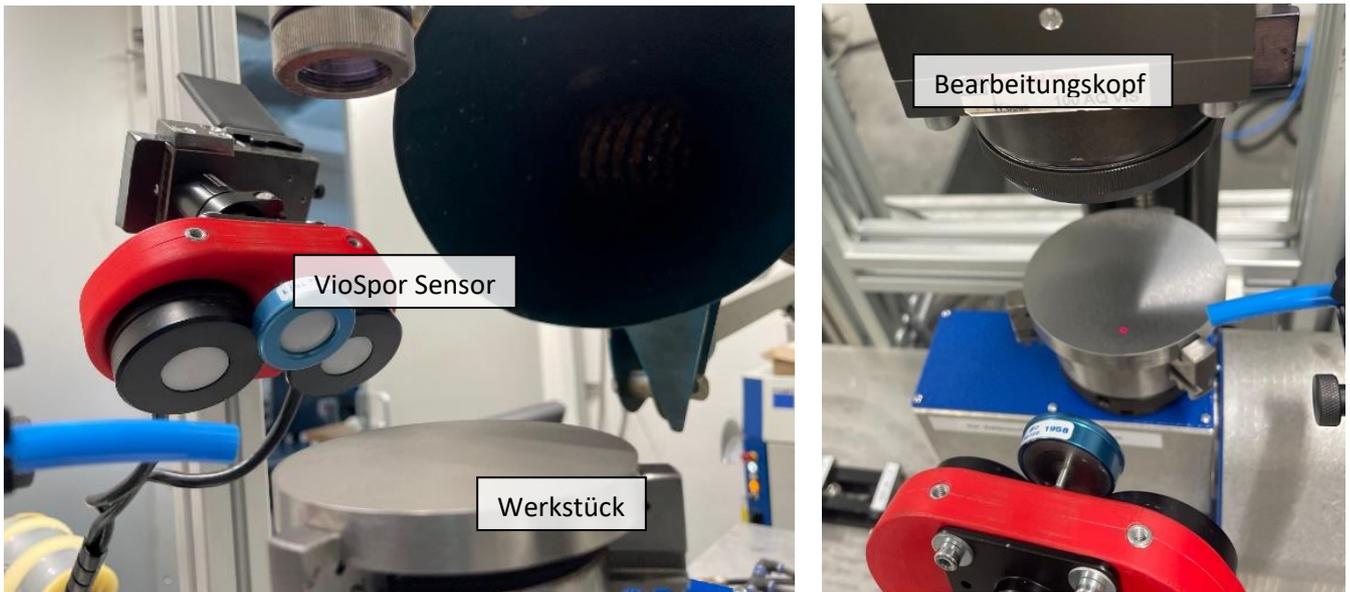


Abbildung 54. Messaufbau zur Detektion von UV-Strahlung mit Hilfe eines Biosensors „VioSpur blue line“.

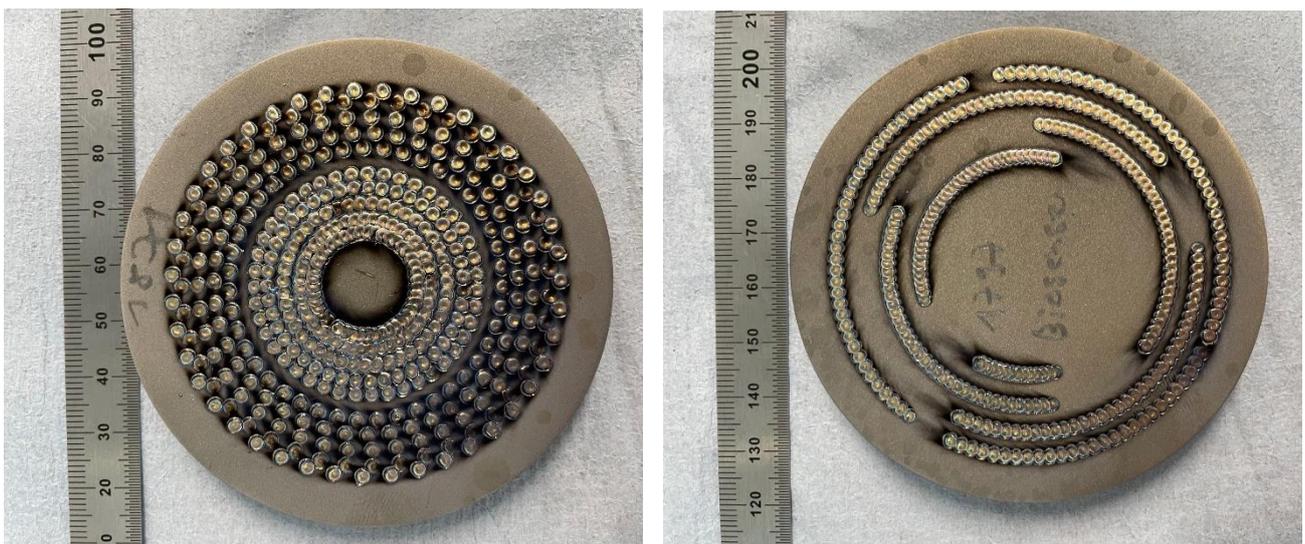
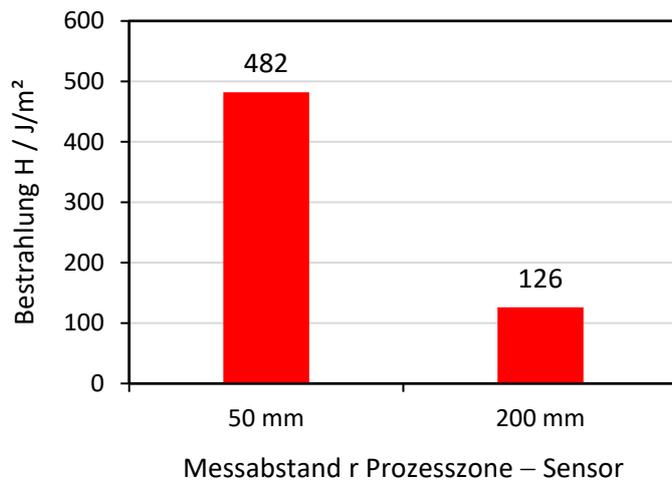


Abbildung 55. Fotos der für die Messung mit den Biosensoren bearbeiteten Titan-Proben.

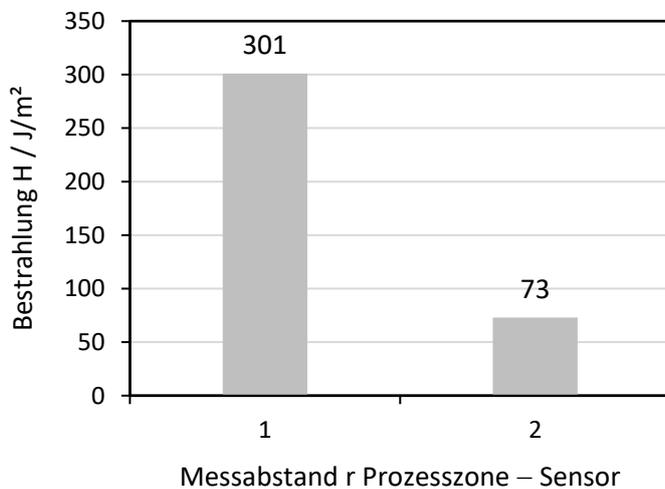
Um Rückschlüsse auf die Auswirkungen auf die menschliche Haut zu ziehen, kann die minimale Erythemdosis (MED) betrachtet werden, welche als Maß für die Toleranz der menschlichen Haut gegenüber der Sonnenstrahlung, speziell des UV-Anteils, wiedergibt. Für den sog. Hauttyp II (helle, empfindliche Haut) entspricht 1 MED ca. 250 J/m^2 [17,18] als Grenzwert. In diesem Fall wäre bei einem Abstand von 50 mm nach einer Prozessdauer von 60 s der Grenzwert bereits um fast das Doppelte überschritten (1,9 MED). Das korrespondiert in guter Näherung mit der Zeit von etwa 0,5 min, nach welcher bei der höchsten UV-Sekundärstrahlungsbelastung, die mit den Gigahertz-Detektor XD-45-HUV bei einem Messabstand r von 50 mm während der Bearbeitung von Titan ermittelt wurde (vgl. Tabelle 8 in Abschnitt 4.16), die Überschreitung des Expositionsgrenzwertes für die aktinische Bestrahlungsstärke H_{eff} gemäß [3] festgestellt wurde. Bei einer Entfernung r von 200 mm wurde nach 60 s ein kleinerer MED-Wert von ca. 0,5 ermittelt. Dieser Wert ist allerdings deutlich größer, als mit dem bei $r = 50 \text{ mm}$ gemessenen Wert nach dem Abstandsquadrat-Gesetz zu erwarten wäre.



Parametersatz	2
Laser	3
Wellenlänge	1070 nm
Pulsspitzenleistung P_{max}	4,1 kW
Pulsenergie Q	41,4 J
Repetitionsrate f_{rep}	5 Hz
Pulslänge τ	10 ms
Messabstand r	50 mm / 200 mm
Betrachtungswinkel θ	15°
Prozessdauer	60 s
Pulsanzahl	300

Abbildung 56. Links: ermittelte Bestrahlung H für die Messabstände $r = 50\text{ mm}$ und 200 mm bei einer Prozessdauer von 60 s. Rechts: Prozessparameter mit Angabe der Gesamtprozessdauer und der Pulsanzahl.

Abbildung 57 zeigt die mit dem Laser 2 erhaltenen Ergebnisse. Hier wurde der verwendete Parametersatz 2 leicht abgewandelt, indem eine Repetitionsrate von 2 Hz eingestellt wurde, so dass sich eine mittlere Leistung P_{av} von 83 W ergab. Es wurden 10 Schweißbahnen mit jeweils 60 Pulsen angefertigt. Die reine Prozessdauer betrug 300 s.



Parametersatz	2 (modifiziert)
Laser	2
Wellenlänge λ	1064 nm
Pulsspitzenleistung P_{max}	4,1 kW
Pulsenergie Q	41,6 J
Repetitionsrate f_{rep}	2 Hz
Pulslänge τ	10 ms
Messabstand r	50 mm / 200 mm
Betrachtungswinkel θ	45°
Prozessdauer	300 s
Pulsanzahl	600

Abbildung 57. Links: ermittelte Bestrahlung H für die Messabstände $r = 50\text{ mm}$ und 200 mm bei einer Prozessdauer von 300 s. Rechts: Prozessparameter mit Angabe der Gesamtprozessdauer und Pulsanzahl.

Beim Messabstand $r = 50\text{ mm}$ wurde der Wert 1 MED nach ca. 250 s überschritten (1,2 MED bzw. 301 J/m² nach 300 s). Um die Ergebnisse im Hinblick auf die Grenzwertüberschreitung mit den Ergebnissen der mit dem Gigahertz-Detektor XD-45-HUV durchgeführten Messungen vergleichen zu können, muss die hier prozessbedingt eingestellte geringere Repetitionsrate ($f_{rep} = 2\text{ Hz}$) berücksichtigt werden. Entsprechend würde sich die Zeit bis zum Erreichen des Grenzwertes bei $f_{rep} = 5\text{ Hz}$ um den Faktor 2,5 auf ca. 100 s reduzieren. Diese Zeit ist lediglich drei- bis viermal so groß wie die Zeit (ca. 0,5 min) bis zum Erreichen von 1 MED, welche in dem zuvor dargestellten Versuch mit dem Laser 3 ermittelt wurde. Auch dieser Wert ist aus Sicht des Arbeits- und Gesundheitsschutzes unbedingt relevant.

4.15.4 Gegenüberstellung der Messergebnisse an Edelstahl für drei verschiedene Lasersysteme

Abbildung 58 (oben) zeigt die bestrahlten Werkstoffproben aus Edelstahl.

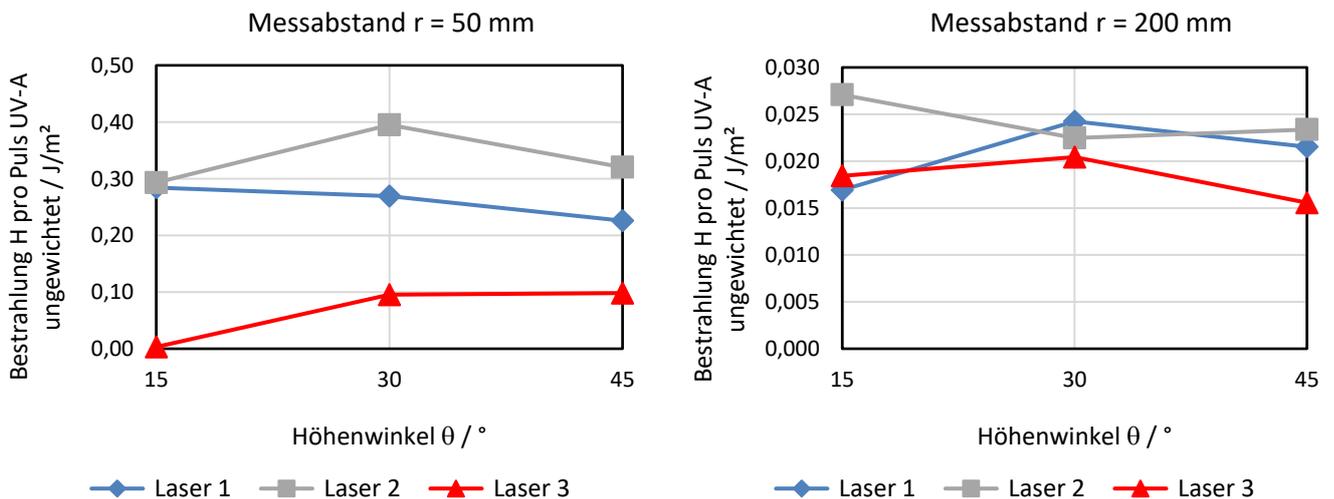
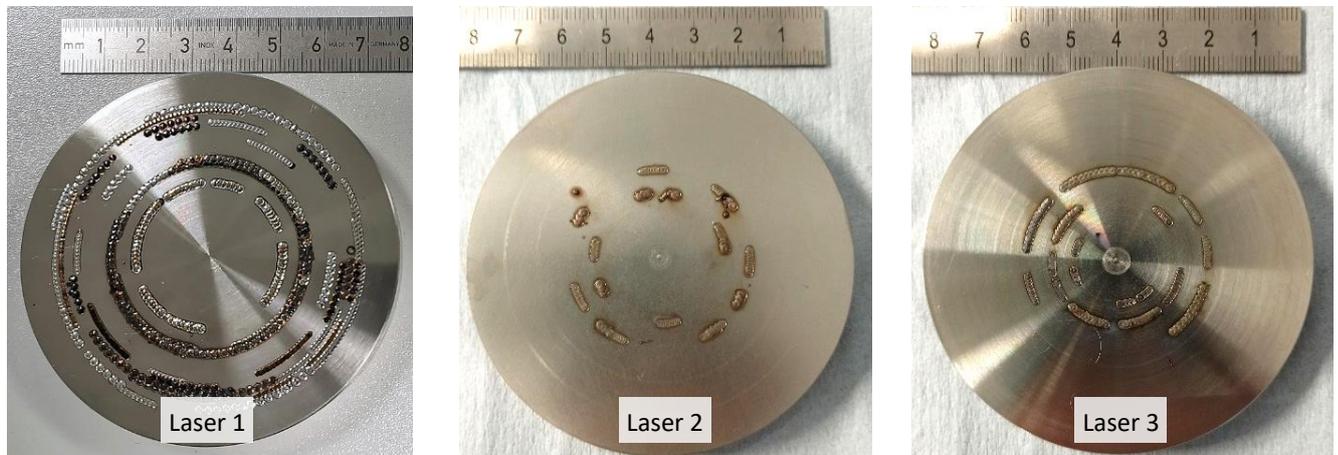


Abbildung 58. Ergebnisse der UV-Sekundärstrahlungsmessungen (hier UV-A ungewichtet) beim Blindschweißen von Edelstahl mit den drei Lasersystemen unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2 für drei verschiedene Höhenwinkel θ sowie einen Azimutwinkel φ von 0° (weitere Parameter im Text).

Hier sind wiederum die unterschiedlich langen Blindschweißnähte aufgrund von unterschiedlichen maximalen Laserleistungen zu erkennen. Unabhängig vom Höhenwinkel θ wurden für den UV-A-Strahlungsanteil (ungewichtet), dargestellt in Abbildung 58 (unten), bei einem Messabstand von 200 mm für die drei Lasersysteme ähnliche Bestrahlungswerte pro Puls gemessen. Bei einem Messabstand von 50 mm waren dagegen die Messwerte für den Laser 3 im Vergleich zu den Werten für die Laser 1 und 2 deutlich kleiner (Größenordnung ungefähr ein Drittel).

4.15.5 Gegenüberstellung der Messergebnisse an Baustahl für drei verschiedene Lasersysteme

Abbildung 59 zeigt schließlich die Ergebnisse für Baustahl anhand von Fotos der verwendeten Werkstoffproben (oben) sowie Bestrahlungswerten pro Puls für den UV-A-Sekundärstrahlungsanteil (ungewichtet), gemessen bei drei Höhenwinkeln θ mit den drei in diesem Vorhaben verwendeten Lasersystemen (unten). Das sich ergebende Bild ist ähnlich wie für die beiden Werkstoffe Titan und Edelstahl.

Die höchsten Bestrahlungen pro Puls wurden in diesem Fall mit dem Laser 2 gemessen, die von den anderen beiden Lasern verursachten Bestrahlungswerte waren aber nicht wesentlich kleiner. Die Abhängigkeit vom Höhenwinkel ist hier offenbar uneinheitlich und insgesamt eher gering.

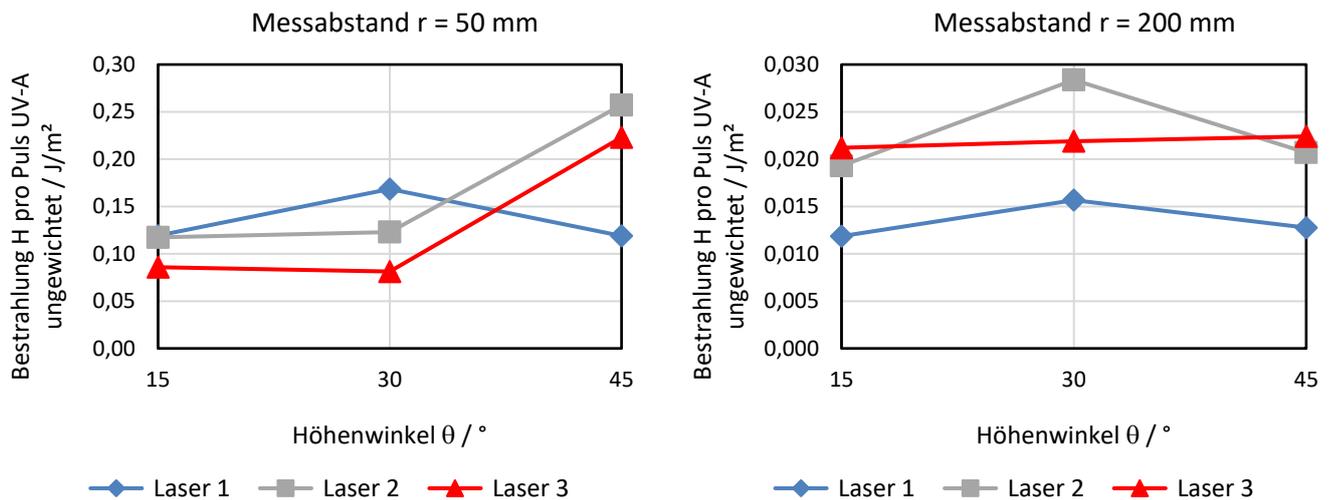
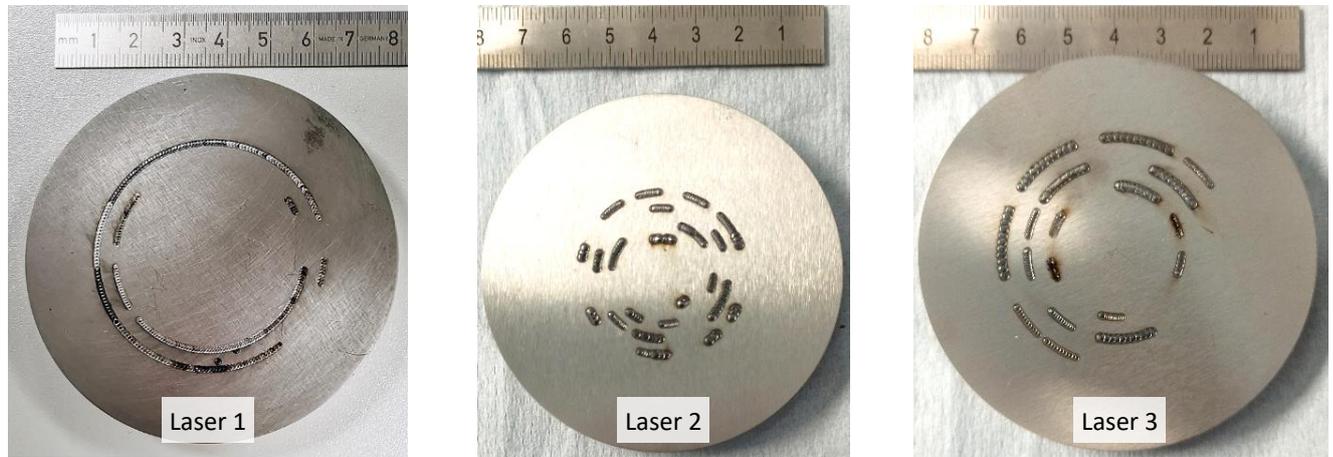


Abbildung 59. Ergebnisse der UV-Sekundärstrahlungsmessungen (hier UV-A ungewichtet) beim Blindschweißen von Baustahl mit den drei Lasersystemen unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2 für drei verschiedene Höhenwinkel θ sowie einen Azimutwinkel φ von 0° (weitere Parameter im Text).

4.15.6 Spektrometrische Untersuchung der von verschiedenen Werkstoffen emittierten Sekundärstrahlung

Um die Messergebnisse für die verschiedenen Werkstoffe besser bewerten zu können, wurde eine ergänzende spektrometrische Untersuchung der UV-Sekundärstrahlungsemission durchgeführt. Dafür wurden mit dem Gitterspektrometer Avantes AvaSpec-Mini4096CL die Emissionsspektren während des Blindschweißens an Baustahl, Edelstahl und Titan mit dem Laser 2 unter Verwendung von Parametersatz 2 für 3 verschiedene Messabstände r von der Prozesszone (200, 800 und 1000 mm) bei ansonsten festen Beobachtungsbindungen (Höhenwinkel $\theta = 45^\circ$, Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$) erfasst. Die für die Messabstände 200 und 1.000 mm nach Subtraktion des Dunkelsignals erhaltenen Einkanalspektren sowie die daraus anhand der Spektrometerempfindlichkeitskurve (vgl. Abbildung 14 (rechts)) abgeleiteten spektralen Bestrahlungsstärken (ungewichtet in relativen Einheiten) sind in Abbildung 60 sowie Abbildung 62 gezeigt. In den Einkanalspektren für den Messabstand 1.000 mm ist bei einer Wellenlänge um 1.064 nm der von der gestreuten Laserstrahlung hervorgerufene Peak zu erkennen.

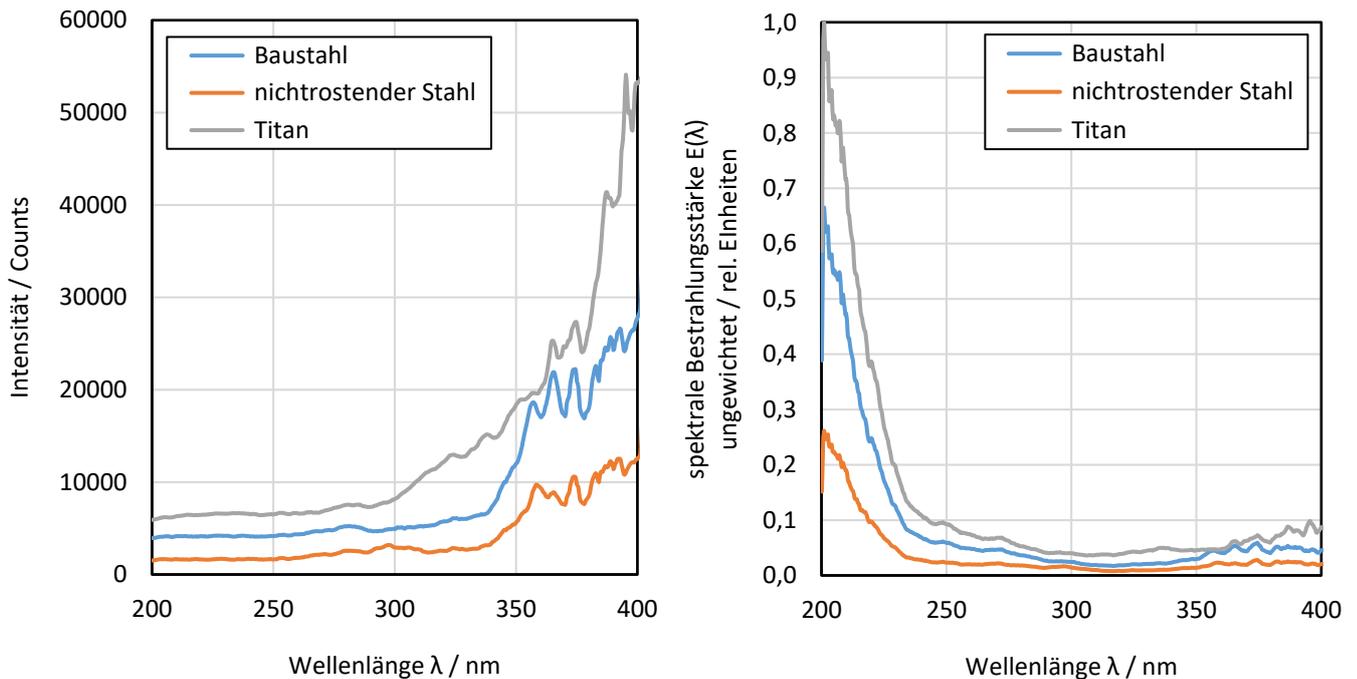


Abbildung 60. Nach Subtraktion des Dunkelsignals erhaltene Einkanalspektren (links) sowie daraus anhand der Spektrometerempfindlichkeitskurve (vgl. Abbildung 14 (rechts)) abgeleitete spektrale Bestrahlungsstärken $E(\lambda)$ (rechts) für einen Messabstand von 200 mm bei ansonsten festen Beobachtungsbedingungen (Höhenwinkel $\theta = 45^\circ$, Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$), aufgezeichnet mit dem Gitterspektrometer Avantes AvaSpec-Mini4096CL während des Blindschweißens von Baustahl, Edelstahl und Titan mit dem Laser 2 unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2.

Nach Abbildung 60 (links) ist in den im Abstand von 200 mm gemessenen Einkanalspektren von kleinen Wellenlängen herkommend ein weitgehend unspezifischer Anstieg der gemessenen Intensität zu beobachten. Dabei ist die Signalstärke für den Werkstoff Titan analog zu den integralen Messungen mit den Gigahertz-Detektoren größer als für Baustahl und Edelstahl. Im direkten Vergleich zeigt hier Baustahl die stärkere UV-Sekundärstrahlungsemission. Durch die Wichtung mit der Spektrometerempfindlichkeitskurve erhält man Kurven für die spektrale Bestrahlungsstärke (rechtes Diagramm in Abbildung 60), die von kleinen Wellenlängen her zunächst stark abfallen, um knapp unterhalb des sichtbaren Bereichs wieder einen leichten Anstieg zu zeigen.

Die Wichtung der in Abbildung 60 (rechts) gezeigten spektralen Bestrahlungsstärke mit der Wichtungsfunktion $S(\lambda)$ gemäß TROS IOS Teil 2 [5], die in Abbildung 61 (links) dargestellt ist, ergibt schließlich die effektive spektrale Bestrahlungsstärke [rel. Einheiten] in Abbildung 61 (rechts). Man erkennt in Übereinstimmung mit den in den vorhergehenden Abschnitten präsentierten Ergebnissen, dass bei den diskutierten handgeführten und handpositionierten Laserstrahlschweißprozessen der UV-A-Strahlungsanteil (im Diagramm oberhalb von 320 nm) für die Gefährdung der Haut und der Hornhaut, die durch die effektive Bestrahlung H_{eff} beschrieben wird, praktisch keine Rolle spielt. Die Gefährdung wird hier offenbar vielmehr durch den UV-B- und UV-C-Strahlungsanteil hervorgerufen.

In den im größeren Abstand von 1.000 mm gemessenen Einkanalspektren (Abbildung 62 (links)) fällt vor allen Dingen die große Intensität für den Werkstoff Titan im sichtbaren Spektralbereich im Vergleich zu den beiden anderen Werkstoffen auf (in einem Messabstand von 200 mm geht das Spektrometer dort aufgrund der großen Signalstärken in die Sättigung). In den Kurven für die spektrale Bestrahlungsstärke (Abbildung 62 (rechts)) ist der UV-Strahlungsanteil oberhalb von 200 nm kaum noch zu erkennen. Auch hier sticht vor allem die große spektrale Bestrahlungsstärke bei Titan im sichtbaren Spektralbereich hervor.

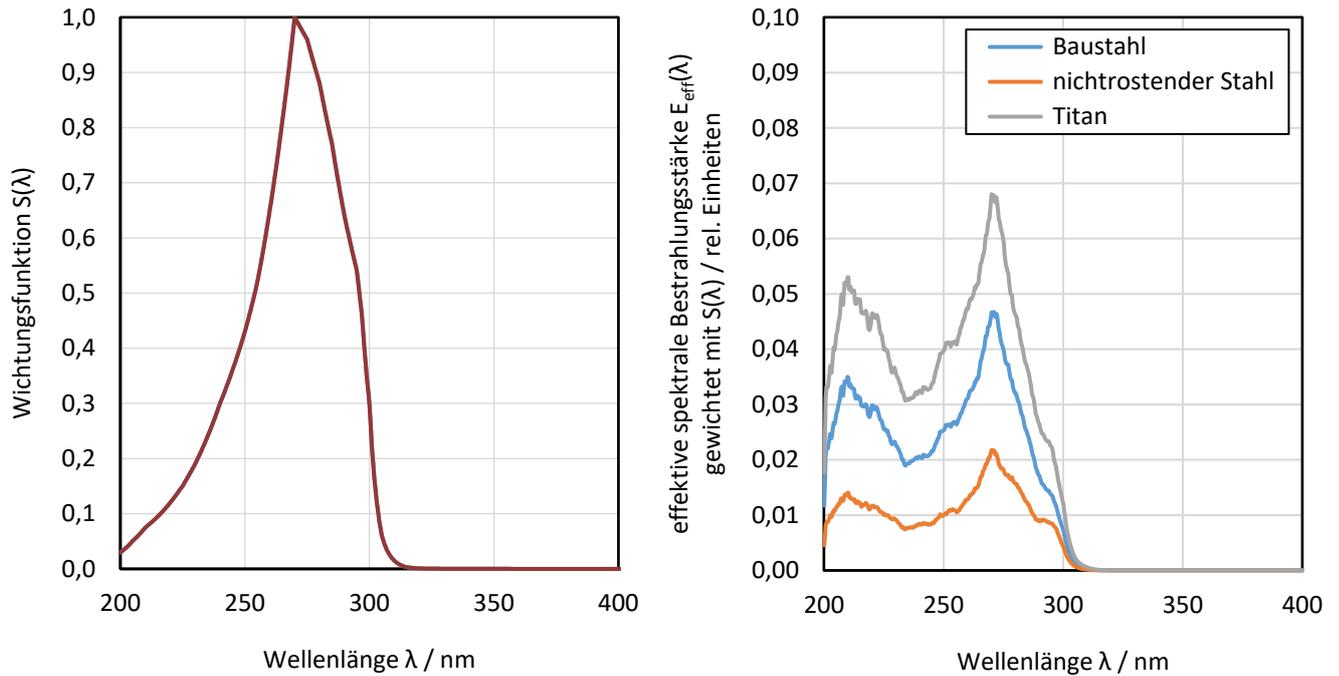


Abbildung 61. Wichtungsfunktion $S(\lambda)$ gemäß TROS IOS Teil 2 [5] (links) sowie daraus abgeleitete effektive spektrale Bestrahlungsstärken $E_{\text{eff}}(\lambda)$ im UV-Spektralbereich zwischen 200 und 400 nm (rechts) für einen Messabstand von 200 mm bei ansonsten festen Beobachtungsbedingungen (Höhenwinkel $\theta = 45^\circ$, Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$), aufgezeichnet mit dem Gitterspektrometer Avantes AvaSpec-Mini4096CL während des Blindschweißens von Baustahl, Edelstahl und Titan mit dem Laser 2 unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2.

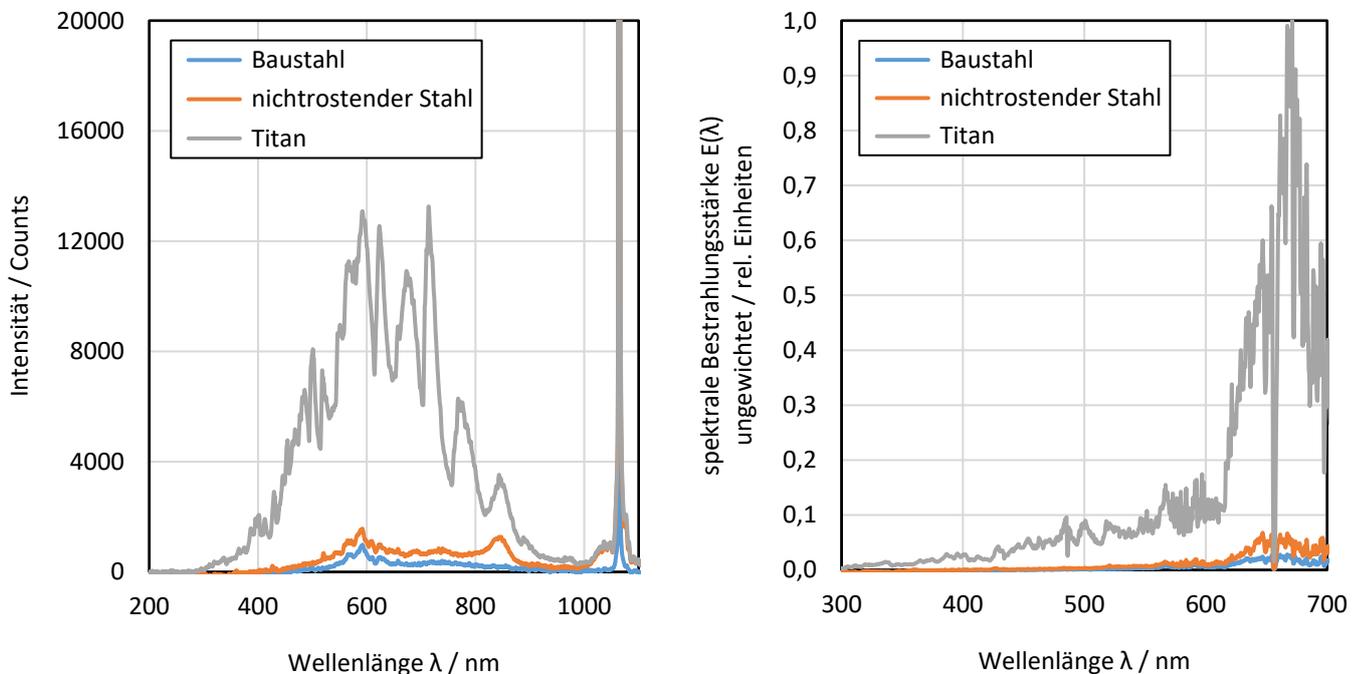


Abbildung 62. Nach Subtraktion des Dunkelsignals erhaltene Einkanalsspektren (links) sowie daraus anhand der Spektrometerempfindlichkeitskurve (vgl. Abbildung 14 (rechts)) abgeleitete spektrale Bestrahlungsstärken $E(\lambda)$ (rechts) für einen Messabstand von 1.000 mm bei ansonsten festen Beobachtungsbedingungen (Höhenwinkel $\theta = 45^\circ$, Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$), aufgezeichnet mit dem Gitterspektrometer Avantes AvaSpec-Mini4096CL während des Blindschweißens von Baustahl, Edelstahl und Titan mit dem Laser 2 unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2.

Führt man in Analogie zur Vorgehensweise für die Ermittlung der effektiven spektralen Bestrahlungsstärke $E_{\text{eff}}(\lambda)$, die in Abbildung 61 (rechts) dargestellt ist, eine spektrale Wichtung von $E(\lambda)$, dargestellt in Abbildung 62 (rechts), mit der Funktion $B(\lambda)$ in Abbildung 63 (links) durch, mit welcher gemäß TROS IOS Teil 2 [5] die Wellenlängenabhängigkeit der fotochemischen Schädigung des Auges durch sichtbare Strahlung zwischen 300 und 700 nm berücksichtigt wird, dann erhält man die effektiven spektralen Bestrahlungsstärken $E_B(\lambda)$ für die Werkstoffe Baustahl, Edelstahl und Titan in Abbildung 63 (rechts).

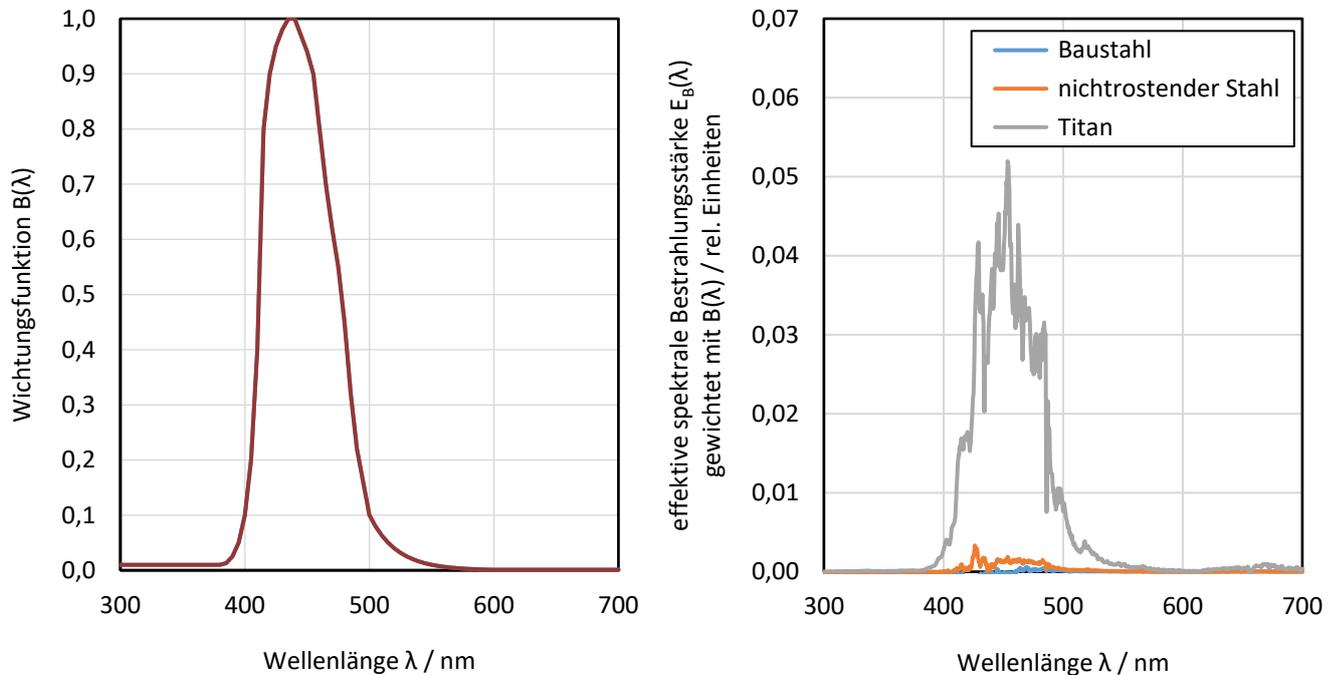


Abbildung 63. Wichtungsfunktion $B(\lambda)$ gemäß TROS IOS Teil 2 [5] (links) sowie daraus abgeleitete effektive spektrale Bestrahlungsstärken $E_B(\lambda)$ im Spektralbereich zwischen 300 und 700 nm (rechts) für einen Messabstand von 1.000 mm bei ansonsten festen Beobachtungsbedingungen (Höhenwinkel $\theta = 45^\circ$, Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$), aufgezeichnet mit dem Gitterspektrometer Avantes AvaSpec-Mini4096CL während des Blindschweißens von Baustahl, Edelstahl und Titan mit dem Laser 2 unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2.

In dem Diagramm für $E_B(\lambda)$ ist für Titan sehr gut die im Vergleich zu den beiden anderen hier betrachteten Werkstoffen hohe effektive Belastung durch Blaulicht zwischen 400 und 500 nm zu erkennen. Dies korrespondiert mit den Ergebnissen der Auswertung der Messergebnisse gemäß TROS IOS im Hinblick auf die Blaulichtgefährdung beim gepulsten Laserstrahlschweißen in Abschnitt 4.16, wonach Titan im Hinblick auf die Zeit bis zur Überschreitung des Expositionsgrenzwertes für die Blaulichtgefährdung den kritischsten der fünf untersuchten Werkstoffe darstellt. Wie in Abschnitt 4.5 erläutert wird das bei größeren Wellenlängen vor allem für Titan erkennbare, vergleichsweise starke Rauschen der $E(\lambda)$ - und $E_B(\lambda)$ -Kurven auf die Kalibrationskurve in Abbildung 14 (links) zurückgeführt. Diese weist bei größeren Wellenlängen keine hinreichend große Signalstärke und damit nicht genügend Informationen auf, so dass die Empfindlichkeitskurve des Spektrometers in Abbildung 14 (rechts) verfälscht wird.

4.15.7 Abstandsabhängigkeit der UV-Strahlungsemission für verschiedene Werkstoffe

Exemplarisch wurde die Abhängigkeit der Sekundärstrahlungsemission vom Messabstand r von der Laserprozesszone beim Blindschweißen unter Verwendung von Laser 2 bei einer festen Beobachtungsrichtung (Höhenwinkel $\theta = 45^\circ$, Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$) für die 3 Werkstoffe Baustahl, Edelstahl und Titan vermessen, um die erwartete Proportionalität der Bestrahlung pro Puls zu r^{-2} zu überprüfen. Die Messergebnisse sind in Abbildung 64 exemplarisch

für den UV-A-Strahlungsanteil (gewichtet) zu sehen. Bei den gestrichelten Linien in dem Diagramm handelt es sich um angepasste Kurven entsprechend $H_{\text{UV-A-eff}} \propto r^{-2}$. Für die anderen Sensoren ergeben sich ähnliche Kurvenverläufe.

Wie bereits in Abschnitt 4.12 für Baustahl dargestellt ist die erwartete Abstandsabhängigkeit in guter Näherung gegeben. Allerdings sind bei kleinen Messabständen signifikante Abweichungen zu beobachten. Dies gilt besonders im Fall des Werkstoffs Titan: Hier ist die gemessene Bestrahlung pro Puls bei den kleinen Messabständen 50 und 100 mm (dunkelgraue Messpunkte) entgegen der Erwartung deutlich kleiner als bei dem größeren Messabstand 150 mm (erster hellgrauer Messpunkt). Ein solches Verhalten wurde vor allem bei Titan wiederholt beobachtet. Da sich bei der Abstandsvariation die Blickrichtung nicht verändert hat und keine potenziell abschirmenden Komponenten im Strahlengang bewegt wurden, lässt sich dieses Verhalten nur erklären, wenn man von einer stärker gerichteten Emission ausgeht, von welcher bei kleinen Messabständen Anteile am Sensor vorbei gestrahlt werden, die bei größeren Abständen den Sensor erst nach einer Reflexion an Komponenten in der Umgebung erreichen. Die Beobachtungen korrespondieren mit der Interpretation der zuvor in den Abschnitten 4.15.1 und 4.15.2 dargestellten Messergebnisse im Sinne von prozessbedingt unterschiedlich stark gerichteten Sekundärstrahlungsemissionen.

Im UV-C-Spektralbereich unterhalb von 240 nm wird Luft durch die Bildung von Ozon aus dem enthaltenen Sauerstoff mit kleiner werdender Wellenlänge immer stärker absorbierend [19]. Dieser Effekt wurde bei den Kurvenanpassungen ergänzend mittels Multiplikation mit einem für die Wellenlängenbereiche UV-A und UV-B/C jeweils vereinfachend wellenlängenunabhängigen Exponentialfaktor entsprechend einer Lambert-Beer'schen Abschwächung der Intensität [20] mit wachsendem Messabstand berücksichtigt. Hierdurch konnte jedoch noch keine signifikant verstärkte Abschwächung des UV-C-Strahlungsanteils durch den Luftsauerstoff im Vergleich zum UV-A-Strahlungsanteil nachgewiesen werden.

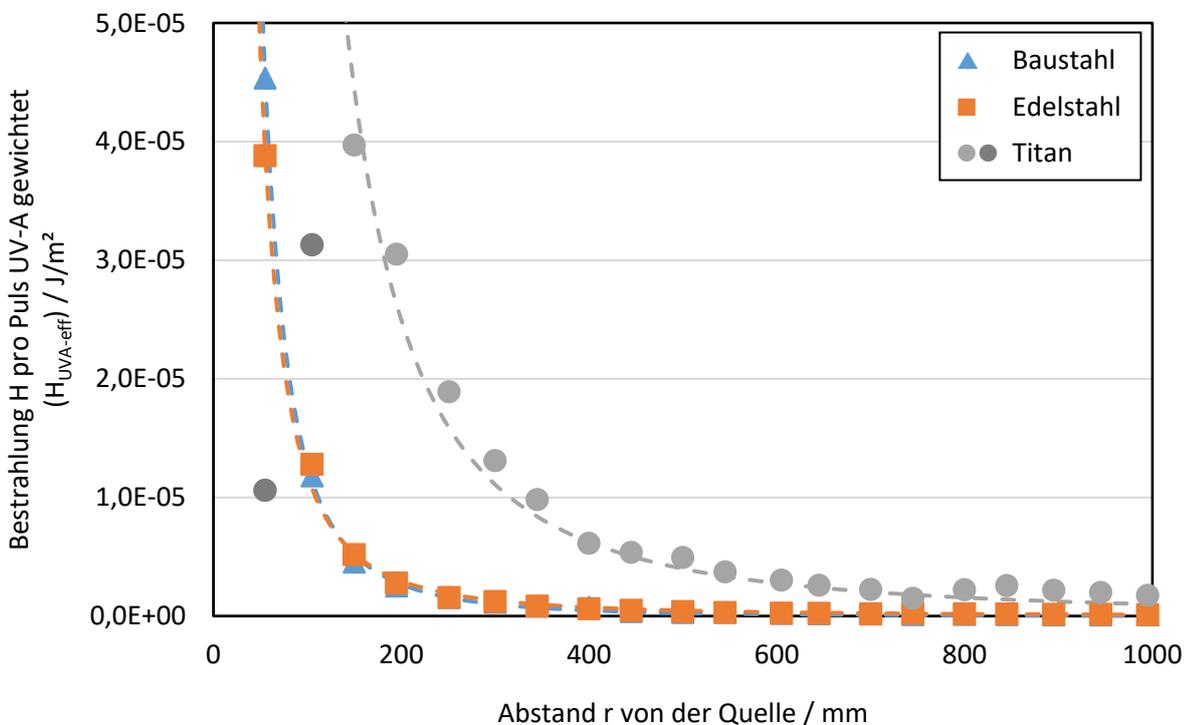


Abbildung 64. UV-Sekundärstrahlungsemission (Bestrahlung H pro Puls) am Beispiel des UV-A-Strahlungsanteils (gewichtet) als Funktion des Messabstands r von der Prozesszone bei ansonsten festen Beobachtungsbedingungen (Höhenwinkel $\theta = 45^\circ$, Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$) beim Blindschweißen von Baustahl, Edelstahl und Titan mit dem Laser 2 unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2.

4.16 Auswertung der Messergebnisse gemäß TROS IOS, begleitend zur Durchführung der Messungen (TAP 2.9)

Um die messtechnisch ermittelten UV- und Blaulicht-Bestrahlungswerte pro Puls im Hinblick auf das damit verbundene Gefährdungspotenzial zu bewerten, wurden die gemäß Richtlinie 2006/25/EG geltenden Expositionsgrenzwerte herangezogen. Ein Auszug aus der Richtlinie mit den für dieses Vorhaben relevanten Expositionsgrenzwerten ist in Tabelle 6 zu sehen. Dabei wurden die Grenzwerte für Blaulicht in Form der Strahldichte L_B , welche für Quellen mit einer großen Winkelausdehnung (≥ 11 mrad) zu verwenden sind, außer Acht gelassen, weil die Augen bei den handgeführten und handpositionierten Laserstrahlschweißprozessen einen vergleichsweise großen Abstand von der Prozesszone haben und die Winkelausdehnung der Emissionsquelle aus diesem Abstand hinreichend klein ist (bei einer angenommenen Quellenausdehnung von 5 mm und einem typischen Augenabstand von der Quelle von 500 mm erhält man eine Winkelausdehnung von 10 mrad).

Tabelle 6. Expositionsgrenzwerte für inkohärente optische Strahlung (IOS) als Bestrahlungen (H_{eff} bzw. H_{UVA} in $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$), Strahldichten (L_B in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$) und Bestrahlungsstärken (E_B in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) im Ultraviolett-Spektralbereich (180 – 400 nm) sowie im sichtbaren Spektralbereich (300 – 700 nm, sog. Blaulicht) gemäß Richtlinie 2006/25/EG (Auszug) [3].

Wellenlänge [nm]	Expositionsgrenzwert	Einheit	Anmerkung	Körperteil	Gefährdung
100 – 400 (UV-A, UV-B und UV-C)	$H_{\text{eff}} = 30$ Tageswert 8 Stunden	$[\text{J}/\text{m}^2]$		Auge Hornhaut Bindehaut Linse Haut	Photokeratitis Konjunktivitis Kataraktogenese Erythem Elastose Hautkrebs
315 – 400 (UV-A)	$H_{\text{UVA}} = 10^4$ Tageswert 8 Stunden	$[\text{J}/\text{m}^2]$		Auge Linse	Kataraktogenese
300 – 700 Blaulicht siehe Anmerkung 1	$L_B = \frac{10^6}{t}$ bei $t \leq 10.000$ s	$L_B: [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}]$ $t: [\text{Sekunden}]$		Auge Netzhaut	Photoretinitis
300 – 700 Blaulicht siehe Anmerkung 1	$L_B = 100$ bei $t > 10.000$ s	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}]$			
300 – 700 Blaulicht siehe Anmerkung 1	$E_B = \frac{100}{t}$ bei $t \leq 10.000$ s	$E_B: [\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$ $t: [\text{Sekunden}]$	bei $\alpha < 11$ mrad siehe Anmerkung 2		
300 – 700 Blaulicht siehe Anmerkung 1	$E_B = 0,01$ bei $t > 10.000$ s	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$			

H_{eff} effektive Bestrahlung: Bestrahlung, spektral gewichtet mit $S(\lambda)$, Einheit J/m^2

H_{UVA} Bestrahlung: Integral der Bestrahlungsstärke über die Zeit und die Wellenlänge bzw. die Summe der spektralen Bestrahlungsstärkewerte im UV-A-Wellenlängenbereich von 315 bis 400 nm, Einheit J/m^2

Anmerkung 1: Der Bereich von 300 bis 700 nm deckt Teile der UV-B-Strahlung, die gesamte UV-A-Strahlung und den größten Teil der sichtbaren Strahlung ab; die damit verbundene Gefährdung wird gemeinhin als Gefährdung durch „Blaulicht“ bezeichnet. Blaulicht deckt jedoch streng genommen nur den Bereich von ca. 400 bis 490 nm ab.

Anmerkung 2: Bei stetiger Fixierung von sehr kleinen Quellen mit einer Winkelausdehnung von weniger als 11 mrad kann L_B in E_B umgewandelt werden. Dies ist normalerweise nur bei ophthalmischen Instrumenten oder einer Augenstabilisierung während einer Betäubung der Fall. Die maximale „Starrzeit“ errechnet sich anhand der Formel $t_{\text{max}} = 100/E_B$, wobei E_B in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ausgedrückt wird. Wegen der Augenbewegungen bei normalen visuellen Anforderungen werden 100 s hierbei nicht überschritten.

Bei den Expositionsgrenzwerten für UV-Strahlung handelt es sich um sog. Tageswerte, welche auf eine Expositionszeit von 8 Stunden bezogen sind. Für den Vergleich der gemessenen UV-Bestrahlungen wurden daher die gemessenen UV-Bestrahlungswerte pro Puls jeweils durch Multiplikation mit der Gesamtzahl der UV-Strahlungspulse auf eine Prozesszeit von 8 Stunden extrapoliert. Außerdem wurden die Zeiten bis zum Erreichen des jeweiligen Expositionsgrenzwertes beim gepulsten Schweißen berechnet. Da die höchsten UV-Bestrahlungen unter den Prozessbedingungen entsprechend Parametersatz 2 (vgl. Tabelle 2) ermittelt wurden, erfolgte der Grenzwertvergleich mit diesen Werten im Sinne einer Worst-Case-Betrachtung. Unter den ausgewählten Bedingungen werden innerhalb von 8 Stunden insgesamt 144.000 Pulse emittiert. Im Fall der gewichteten, effektiven Bestrahlung H_{eff} (primäre Gefährdung der Haut bei einem von Grenzwert 30 J/m^2 bezogen auf 8 Stunden) wurden für den Grenzwertvergleich die messtechnisch ermittelten gewichteten Bestrahlungen für UV-A und UV-B/C summiert. Ausgewertet wurden die Ergebnisse für die Messabstände 50 und 200 mm.

Tabelle 8 enthält den Grenzwertvergleich für die drei Werkstoffe mit den im Allgemeinen höchsten gemessenen Sekundärstrahlungsemissionswerten (Edelstahl, Titan und Baustahl) für den Messabstand $r = 50 \text{ mm}$, in Tabelle 9 ist analog der Grenzwertvergleich für den Messabstand 200 mm zusammengestellt. Die aufgeführten Werte entsprechen jeweils dem Fall, der unter den ausgewählten Bestrahlungs- und Messbedingungen der ungünstigste ist.

Tabelle 7. Laserparameter entsprechend Parametersatz 2 und Beobachtungsparameter zur Auswahl der dem Grenzwertvergleich zugrunde gelegten Messwerte (vgl. auch Tabelle 2).

Parameter	Wert und Einheit
Schweißgeschwindigkeit v_s	350 mm/min
Pulsspitzenleistung P_{max}	4,1 kW
Pulsenergie Q	41,4 J
Pulsfrequenz f_{rep}	5 Hz
Pulsdauer τ	10 ms
Messabstand	$r = 50 \text{ mm}, 200 \text{ mm}$
Höhenwinkel θ	45°
Azimutwinkel φ	0°

Tabelle 8. Grenzwertbetrachtung bei einem Messabstand von 50 mm für die UV-Sekundärstrahlungsexposition.

$H_{\text{UVA}} = 10^4 \text{ J/m}^2$ $H_{\text{eff}} = 30 \text{ J/m}^2$	Expositionswert nach 8 Std.		Expositionsgrenzwert erreicht nach	
	H_{UVA} für 315 – 400 nm (UV-A)	H_{eff} für 100 – 400 nm (UV-A,-B,-C)	H_{UVA} für 315 – 400 nm (UV-A)	H_{eff} für 100 – 400 nm (UV-A,-B,-C)
Edelstahl	$4,61 \cdot 10^4 \text{ J/m}^2$	$5,56 \cdot 10^3 \text{ J/m}^2$	1,7 Std.	2,6 min
Titan	$2,46 \cdot 10^5 \text{ J/m}^2$	$2,76 \cdot 10^4 \text{ J/m}^2$	0,3 Std.	0,5 min
Baustahl	$3,70 \cdot 10^4 \text{ J/m}^2$	$2,00 \cdot 10^3 \text{ J/m}^2$	2,2 Std.	7,2 min

Es zeigt sich, dass vor allem für die Haut (Betrachtung der gewichteten Bestrahlungswerte H_{eff}) eine nennenswerte Gefährdung vorliegt. Diese ist wie nach den durchgeführten Messungen zu erwarten besonders stark beim Werkstoff Titan ausgeprägt: In einem Abstand von 50 mm, der für eine handgeführte oder handpositionierte Lasermaterialbearbeitung durchaus repräsentativ ist, wird der Expositionsgrenzwert im ungünstigsten Fall bereits nach

etwa 30 Sekunden erreicht, so dass die Verwendung von geeigneter persönlicher Schutzausrüstung (PSA) z.B. in Form von lichtundurchlässigen Schutzhandschuhen zwingend erforderlich ist.

Tabelle 9. Grenzwertbetrachtung bei einem Messabstand von 200 mm für die UV-Sekundärstrahlungsexposition.

$H_{\text{UVA}} = 10^4 \text{ J/m}^2$ $H_{\text{eff}} = 30 \text{ J/m}^2$	Expositionswert nach 8 Std.		Expositionsgrenzwert erreicht nach	
	H_{UVA} für 315 – 400 nm (UV-A)	H_{eff} für 100 – 400 nm (UV-A,-B,-C)	H_{UVA} für 315 – 400 nm (UV-A)	H_{eff} für 100 – 400 nm (UV-A,-B,-C)
Edelstahl	$3,37 \cdot 10^3 \text{ J/m}^2$	$3,78 \cdot 10^2 \text{ J/m}^2$	23,8 Std.	38,1 min
Titan	$3,41 \cdot 10^4 \text{ J/m}^2$	$3,62 \cdot 10^3 \text{ J/m}^2$	2,3 Std.	4,0 min
Baustahl	$3,23 \cdot 10^3 \text{ J/m}^2$	$1,56 \cdot 10^2 \text{ J/m}^2$	24,8 Std.	92,4 min

In einem größeren Abstand von 200 mm wurde für den ungünstigsten Fall immer noch eine sehr geringe Zeit von nur 4 Minuten bis zum Erreichen des Expositionsgrenzwertes H_{eff} ermittelt. Die Gefährdung der Augen ist demgegenüber als vergleichsweise gering einzuschätzen. Hier wird der Expositionsgrenzwert $H_{\text{UVA}} = 10^4 \text{ J/m}^2$ nach den erhaltenen Messergebnissen im ungünstigsten Fall erst nach etwa 18 Minuten (in einem untypischen Abstand von 50 mm) bzw. nach etwa 138 Minuten (in einem für die Augen immer noch kleinen Abstand von 200 mm) erreicht.

Für einen Messabstand von 200 mm wurde ergänzend zur Gefährdung durch UV-Strahlung die Blaulichtgefährdung für die Augen (Netzhaut) bewertet. Bei den entsprechenden Grenzwerten in Tabelle 6 handelt es sich wie bei H_{eff} für UV-A, UV-B und UV-C um gewichtete Größen, die unter Berücksichtigung einer Wichtungsfunktion $B(\lambda)$ gemäß Tabelle 1.3 der Richtlinie 2006/25/EG zu verwenden sind. Für den Grenzwertvergleich wurden analog zur Betrachtung von H_{eff} die Messergebnisse für die Bestrahlung H_B pro Puls der drei in den Detektor XD-45-HB integrierten Sensoren für die Bereiche 300 – 400 nm, 400 – 600 nm und 600 – 700 nm summiert. Betrachtet wird in diesem Fall die mittlere Bestrahlungsstärke E_B (in W/m^2), die sich durch Multiplikation der Bestrahlung H_B pro Puls (in J/m^2) mit der Pulsfrequenz (in s^{-1}) ergibt. Die Zeit t_{lim} bis zum Erreichen des Expositionsgrenzwertes erhält man, indem man gemäß der nachfolgenden Gleichung die aus der Sekundärstrahlungsmessung abgeleitete mittlere Bestrahlungsstärke dem Grenzwert gleichsetzt und nach t_{lim} auflöst. Dies gilt, sofern die Expositionszeit bis zum Erreichen des Grenzwertes $< 10.000 \text{ s}$ ist.

$$E_B / \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = \frac{100}{t_{\text{lim}}/\text{s}} \quad (\text{gemäß Richtlinie 2006/25/EG}) \quad \rightarrow \quad t_{\text{lim}}/\text{s} = \frac{100 \text{ W}}{E_B \text{ m}^2}$$

Die Ergebnisse des Grenzwertvergleichs für die festgestellten ungünstigsten Fälle der Blaulicht-Emission sind nachfolgend in Tabelle 10 zusammengestellt. Demnach kann der Expositionsgrenzwert für die Augen (Netzhaut) in dem betrachteten Abstand von 200 mm von der Prozesszone bereits nach wenigen Minuten erreicht werden (im Fall von Titan wurde ein minimaler t_{lim} -Wert von nur 42 s bestimmt).

Tabelle 10. Grenzwertbetrachtung bei einem Messabstand von 200 mm für die Blaulicht-Exposition unter Annahme einer Winkelausdehnung der Quelle (Prozesszone) $< 11 \text{ mrad}$.

	Gemittelter Expositionswert E_B für 300 – 700 nm (Blaulicht)	Expositionsgrenzwert erreicht nach Zeit t_{lim}
Edelstahl	$0,25 \text{ W/m}^2$	6,6 min
Titan	$2,3 \text{ W/m}^2$	0,7 min
Baustahl	$0,29 \text{ W/m}^2$	5,7 min

Nach dem Abstandsquadrat-Gesetz ist die Bestrahlung beispielsweise in einem Abstand von 600 mm, einem für die industrielle Praxis durchaus relevanten Wert, im Vergleich zu den Ergebnissen in Tabelle 10 um den Faktor 9 geringer und entsprechend die Zeit bis zum Überschreiten des Blaulicht-Expositionsgrenzwertes um den Faktor 9 größer. Dennoch liegt diese Zeit im ungünstigsten Fall bei der Bearbeitung von Titan nur knapp oberhalb von 6 Minuten, was beim direkten Beobachten eines Schweißprozesses schnell erreicht wird. Auch hieraus ergibt sich die zwingende Notwendigkeit des Tragens geeigneter PSA, d.h. einer geeigneten Schutzbrille.

4.17 Gemeinsame Bewertung der Ergebnisse mit den beratenden Partnern und der DGUV (TAP 2.10)

Die Ergebnisse der durchgeführten Sekundärstrahlungsmessungen wurden mit den beratenden Partnern ausführlich diskutiert. Ausgehend von den erhaltenen Ergebnissen wurde dabei die Relevanz der Thematik für die Gewährleistung der Arbeitssicherheit in den betroffenen Branchen hervorgehoben. Die grundsätzlichen Erkenntnisse aus den Messungen an den verschiedenen Blindschweißprozessen sind nachfolgend kurz zusammengefasst.

Generell erweist sich im Zuge der Auswertungen Titan als der Werkstoff, der beim gepulsten Laserstrahlschweißen mit den höchsten potenziell gefährlichen Sekundärstrahlungsemissionen verbunden ist. Dies gilt insbesondere für die UV-Strahlungsemission, weniger allerdings für die Blaulichtemission. Es folgen Edelstahl und Baustahl, während die Belastung bei der Bearbeitung von Aluminium und Messing offenbar relativ gering ist. Die Sekundärstrahlung wird im Allgemeinen bei allen betrachteten Werkstoffen und mit allen verwendeten Laserstrahlquellen sehr stark divergent in die Hemisphäre über der jeweils bearbeiteten Werkstoffprobe emittiert.

Für die Haut und die Hornhaut kritische Sekundärstrahlungsexpositionswerte sind mit allen betrachteten Lasersystemen zu beobachten. Im Fall der UV-Strahlungsexposition fällt lediglich der Laser 1 etwas ab, wobei die Größenordnung der gemessenen Bestrahlungswerte bei allen Lasern die gleiche ist. Der Expositionsgrenzwert für die Haut und die Hornhaut wird vor allem im Fall des Werkstoffes Titan bei geringem Abstand von der Quelle, d.h. der Laserprozesszone, bereits nach wenigen Minuten, teilweise sogar nach weniger als einer Minute erreicht. Dieser Umstand ist für die Gewährleistung der Arbeitssicherheit beim handgeführten bzw. handpositionierten gepulsten Laserstrahlschweißen hochgradig relevant, weil die Hände des Bedienpersonals sich bedingt durch die manuelle Arbeitsweise sehr dicht an der Prozesszone befinden müssen. Entsprechend sind lichtdichte Arbeitshandschuhe zu tragen. Dabei sollte der Schutz der Hände gegen aus der Prozesszone emittierte Laserstrahlung nicht vernachlässigt werden (vgl. DIN SPEC 91250 [21]). Ebenso ist die Abdeckung der Haut insbesondere an den Armen, welche der Prozesszone noch relativ nah kommen, durch lichtdichte Kleidung dringend zu empfehlen.

Für die Augen erweist sich die Sekundärstrahlungsexposition während des gepulsten Laserstrahlschweißens entsprechend den Grenzwerten H_{UVA} (UV-A-Strahlung) und E_B (Blaulicht) als weniger kritisch im Vergleich zur Belastung der Haut und der Hornhaut durch emittierte UV-A-, UV-B- und UV-C-Strahlung. Hier stellt sich die potenzielle Belastung der Netzhaut durch Blaulicht aus der Schweißprozesszone als erheblich stärker relevant heraus. Dies ist erklärbar, da das Maximum des Emissionsspektrums der Sekundärstrahlung aus dem UV-Spektralbereich heraus in den sichtbaren Spektralbereich verschoben ist, wie die spektrometrische Messung an einem Blindschweißprozess an Titan gezeigt hat (vgl. Abschnitt 4.15.6). Hier genügen teilweise wenige Minuten, um den Expositionsgrenzwert zu erreichen. Besonders kritisch ist die hier offenbar die Schweißung mit dem Laser 1 am Werkstoff Titan. Generell muss das Bedienpersonal während des Betriebs eines HLG zum Schutz der Augen gegen die aus der Prozesszone freigesetzte Laserstrahlung ohnehin eine Laserschutzbrille mit den Anforderungen gemäß DIN EN 207 [22] tragen. Auf jeden Fall ist dabei darauf zu achten, dass diese Laserschutzbrille auch den Anforderungen an den Schutz gegen UV-Sekundärstrahlung zwischen 180 und 400 nm (DIN EN 170 [23]) sowie insbesondere sichtbares Licht (Blaulicht) im Bereich zwischen 300 und 700 nm (DIN EN 169 [24]) genügt. Für die Blaulichtgefährdung heißt das,

dass die Laserschutzbrille ähnlich wie bei einer Schweißerschutzbrille abgedunkelt sein muss, um die Transmission breitbandig zu reduzieren. Außerdem ist ggf. eine Beschichtung zur Minimierung der UV-Transmission sinnvoll.

4.18 UV- und VIS-Strahlungsmessungen an ausgewählten realen Schweißprozessen bei industriellen Anwendern (TAP 3.1) inkl. Auswertung der Messungen auf Basis der Ergebnisse aus AP 1 und AP 2 (TAP 3.2)

Ziel der Blindschweißungen in AP 2 war die Charakterisierung des Emissionsverhaltens infolge der Interaktion von Werkstoffen mit gepulster Laserstrahlung. Einstellungen für die Laserstrahlung sowie die Messkoordinaten wurden vor allem aufgrund der zu erwartenden Trends und der Differenzierung der Messwerte gewählt. Somit wurden zur Wahrung der Vergleichbarkeit in TAP 2.7 Werkstoffe mit nicht optimalen Laserparametern geschweißt. Ebenfalls entspricht das Einschweißen in massive Körper nicht dem allgemeinen Applikationsumfang der handgeführten Lasermaterialbearbeitung. Somit mussten reale Anwendungen untersucht werden, um das wahre Gefährdungspotenzial durch inkohärente UV-Sekundärstrahlung aus dem Schweißprozess heraus zu bestimmen.

In weiten Zeiträumen während des Vorhabens gestalteten sich Besuche und Messungen bei industriellen Anwendern infolge der Auswirkungen der Corona-Pandemie als äußerst schwierig. In Gesprächen konnten dennoch Informationen zu den Applikationen gewonnen werden. Reale Bauteile durften nicht für dieses Forschungsvorhaben verwendet bzw. in ihrer Gesamterscheinung gezeigt werden. Daher wurden am Handarbeitsplatz mit der gepulsten Laserstrahlquelle von AlphaLaser (Laser 1) an der SLV Halle GmbH drei industrielle Laserstrahlschweißprozesse nachempfunden. In diesem Zusammenhang wurde auch eine eigene Applikation der SLV Halle vermessen.

4.18.1 Laserauftragschweißen mit Nickel-Basis-Werkstoff auf Gussbauteil

Diese Anwendung entspricht einer Reparaturschweißung an großvolumigen Bauteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit GJS-400-12. Aufgetretene oberflächliche Risse werden ausgeschliffen und anschließend mittels Laserauftragschweißen mit einem geeigneten drahtförmigen Zusatzwerkstoff (Nickel-Basis, \varnothing 0,4 mm) ausgeglichen. Der Bediener muss hierbei den Draht händisch führen. Die zweite Hand wird zur Steuerung der Verfahrbewegung genutzt und über einen Fußschalter wird die Laserstrahlung angefordert. Das Verfahren und der positionierte UV-Messkopf werden in Abbildung 65 gezeigt. Aufgrund der Zugänglichkeit und der zu erwartenden Verlässlichkeit der Messwerte wurde der Messabstand r auf 100 mm bei dem Höhenwinkel $\theta = 45^\circ$ eingestellt. Die folgenden Laserparameter wurden für die Laserauftragschweißung genutzt:

- Vorgabespannung $U = 290 \text{ V}$
- Pulsdauer $\tau = 9 \text{ ms}$
- Pulsfrequenz $f_{\text{rep}} = 9 \text{ Hz}$
- Spotdurchmesser $d_{86} = 1,3 \text{ mm}$
- Schutzgas Argon (10 l/min)
- Pulsenergie $Q = 22,5 \text{ J}$
- Mittlere Leistung $P_{\text{av}} = 203 \text{ W}$

Aus den Messkurven wurden die Daten für die gewichteten Bestrahlungsstärken im UV-A (320 – 400 nm) sowie im UV-B-C (200 – 320 nm) separiert und analog zu TAP 2.9 ausgewertet. Daraus ergaben sich für die Einzelpulse die effektiven UV-Bestrahlungen pro Puls $H_{\text{UVA-eff}} = 3,751 \cdot 10^{-5} \text{ J/m}^2$ und $H_{\text{UVBC-eff}} = 1,923 \cdot 10^{-2} \text{ J/m}^2$. Für die besonders gefährdete Haut wird der Effektivwert H_{eff} für das gesamte UV-Spektrum herangezogen, welcher sich als Summe aus $H_{\text{UVA-eff}}$ und $H_{\text{UVBC-eff}}$ ergibt und einen Wert von $1,923 \cdot 10^{-2} \text{ J/m}^2$ annimmt. $H_{\text{UVA-eff}}$ fällt an dieser Stelle jedoch aufgrund der spektralen Charakteristik praktisch nicht ins Gewicht.



Abbildung 65. Auftragschweißung auf Eisenguss mit Nickel-Basis-Zusatzwerkstoff, Messabstand $r = 100 \text{ mm}$, Höhenwinkel $\theta = 45^\circ$ (weitere Parameter im Text).

Als Expositionsgrenzwert für die Haut gilt laut TROS IOS eine über einen Zeitraum von 8 Stunden integrierte Bestrahlung von $H_{\text{eff}} = 30 \text{ J/m}^2$. Durch den vorliegenden Prozess wird der Grenzwert jedoch schon nach 1556 Pulsen bzw. 173 s (für die gegebene Pulsfolgefrequenz) überschritten. Nach diesen Erkenntnissen muss für das äußerst langwierige Verfahren zwingend PSA für die Hände und Unterarme genutzt werden.

Die Augen werden durch die aus der Laserprozesszone emittierte UV-Strahlung weniger gefährdet, da der Bediener ohnehin zunächst eine Laserschutzbrille gemäß DIN EN 207 [22] zu tragen hat und der Abstand der Augen von der Laserprozesszone außerdem erheblich größer als zu den Händen ist. Unabhängig davon wird der Expositionsgrenzwert für die ungewichtete UV-A-Strahlung, der gemäß Richtlinie 2006/25/EG bei 10^4 J/m^2 bei einer Gesamtexpositionszeit von 8 Stunden liegt, bei der betrachteten Schweißapplikation bei einem Messabstand von 100 mm erst nach etwa 6,5 Stunden erreicht (gemessene ungewichtete UV-A-Bestrahlungsstärke $H_{\text{UVA},8h} = 12.377 \text{ J/m}^2$). Für einen angenommenen Augenabstand von 500 mm entsprechend dem fünffachen Messabstand wäre die Bestrahlungsstärke um den Faktor 25 kleiner, womit sich eine erlaubte Bestrahlungsdauer von etwa 161 Stunden ergäbe.

4.18.2 Verbindungsschweißen von Titan

Diese Anwendung richtet sich nach einem Fügeprozess aus der Medizintechnik. Metallische Implantate, welche im Körper verbleiben, werden vorrangig aus Titanwerkstoffen gefertigt. Ist deren Aufbau zu komplex für eine rein mechanische Fertigung, muss ein energiearmes Fügeverfahren angewandt werden. Mit Hilfe gepulster Laserstrahlung mit niedriger Pulsfolgefrequenz kann der Wärmeeintrag in das Titan verringert werden. Oxidationen und resultierende Versprödungen außerhalb der Schutzgasabdeckung werden dadurch weitgehend vermieden. Die Abmessungen dieser Implantate sind in der Regel gering und somit auch die benötigten Einschweißstiefen von ca. 1 mm für Stumpfstöße als I-Stoßnaht mit technischem Nullspalt. Diese Vorgaben wurden an Probekörpern untersucht und konnten mit folgenden Laserparametern erfüllt werden:

- Vorgabespannung $U = 320 \text{ V}$
- Pulsdauer $\tau = 4,5 \text{ ms}$
- Pulsfolgefrequenz $f_{\text{rep}} = 5 \text{ Hz}$
- Spotdurchmesser $d_{86} = 0,9 \text{ mm}$
- Schutzgas Argon (10 l/min)
- Pulsenergie $Q = 16,4 \text{ J}$
- Mittlere Leistung $P_{\text{av}} = 82 \text{ W}$

Der Messsystemkopf wurde wiederum unter dem Höhenwinkel $\theta = 45^\circ$ im Messabstand $r = 100$ mm montiert und konnte die erzeugten UV-Pulse in geeigneter Weise detektieren. Die Auswertung der Messdaten erfolgte analog zur zuvor beschriebenen Applikation und ergab effektive UV-Bestrahlungen pro Puls von $H_{\text{UVA-eff}} = 1,801 \cdot 10^{-3} \text{ J/m}^2$ und $H_{\text{UVBC-eff}} = 9,254 \cdot 10^{-1} \text{ J/m}^2$ ($H_{\text{eff}} = 9,257 \cdot 10^{-1} \text{ J/m}^2$). Der Expositionsgrenzwert für Haut für die über einen Zeitraum von 8 Stunden integrierte UV-Strahlung $H_{\text{eff}} = 30 \text{ J/m}^2$ wird demnach bereits mit dem 33. Puls und somit nach nur 6,5 s überschritten. Eine Teilautomation oder PSA für die Hände und Unterarme ist somit zwingend erforderlich.

Der UV-A-Spektralanteil, welcher in erster Linie das Auge schädigen könnte, erreicht ausgehend von den durchgeführten Messungen nach 8 Stunden eine summierte Bestrahlung (ungewichtet) von $1,62 \cdot 10^6 \text{ J/m}^2$. Folglich überschreitet die tatsächliche Exposition den Expositionsgrenzwert $H_{\text{UVA}} = 10^4 \text{ J/m}^2$ um ein Vielfaches. Der Grenzwert wird bereits nach 178 s erreicht und auch unter der Annahme einer Vergrößerung des Abstands r von der Prozesszone auf 500 mm beträgt diese Zeitdauer lediglich 74 Minuten. Ein Augenschutz zusätzlich zur Laserschutzbrille ist dringend zu empfehlen.

4.18.3 Verbindungsschweißen von nichtrostendem Stahl

Ein großes Anwendungsgebiet für das Schweißen mit Handlasergeräten ist in der Sensortechnik zu finden. Hierbei müssen korrosionsbeständige Sensorgehäuse aus Chrom-Nickel-Stahl hermetisch abgeschlossen werden. Dabei werden nur geringe Einschweißiefen von maximal 1 mm am Stumpfstoß in I-Nahtvorbereitung mit technischen Nullspalt benötigt.

Parameterstudien an geeigneten Probekörpern ergaben folgende Laserparameter:

- Vorgabespannung $U = 300 \text{ V}$
- Pulsdauer $\tau = 3,5 \text{ ms}$
- Pulsfolgefrequenz $f_{\text{rep}} = 8 \text{ Hz}$
- Spotdurchmesser $d_{86} = 0,8 \text{ mm}$
- Schutzgas Argon (10 l/min)
- Pulsenergie $Q = 10,6 \text{ J}$
- Mittlere Leistung $P_{\text{av}} = 85 \text{ W}$

Die aus den erhaltenen Messdaten gewonnenen effektiven UV-Bestrahlungen pro Puls $H_{\text{UVA-eff}} = 3,926 \cdot 10^{-4} \text{ J/m}^2$ und $H_{\text{UVBC-eff}} = 3,379 \cdot 10^{-1} \text{ J/m}^2$ ($H_{\text{eff}} = 3,379 \cdot 10^{-1} \text{ J/m}^2$) offenbarten wiederum eine starke Gefährdung der Haut. Die Hürde des Expositionsgrenzwerts $H_{\text{eff}} = 30 \text{ J/m}^2$ wird demnach mit dem 89. Puls nach nur 11,1 s überschritten. Eine Teilautomation oder Nutzung von PSA für die Hände und Unterarme ist zwingend erforderlich.

Für die Augen ist die auftretende UV-A-Strahlung abermals nicht als ungefährlich einzuschätzen, da nach einer Schicht von 8 Stunden dem Expositionsgrenzwert $H_{\text{UVA}} = 10^4 \text{ J/m}^2$ eine tatsächliche integrale UV-A-Belastung (ungewichtet) von $H_{\text{UVA,8h}} = 6,7 \cdot 10^5 \text{ J/m}^2$ gegenübersteht. Demnach wird der Grenzwert für die Augen bereits nach ca. 7 Minuten überschritten. Für einen angenommenen Augenabstand von 500 mm steigt die Zeit bis zum Erreichen des Expositionsgrenzwertes auf etwa 3 Stunden an. Analog zum Werkstoff Titan ist daher auf jeden Fall ein zusätzlicher Augenschutz gegen UV-A-Strahlung zu verwenden.

4.19 Erarbeitung von Informationen und praktischen Handlungsempfehlungen für industrielle Anwender (TAP 3.3)

Im Hinblick auf die Handlungsempfehlungen für industrielle Anwender von handgeführten oder handpositionierten Laserstrahlschweißprozessen ist die Gefährdung sowohl der Augen als auch der Haut zu berücksichtigen.

Die Augen der HLG-Bediener und der in der Nähe befindlichen Personen, welche die Arbeiten und den Schweißprozess beobachten, müssen ohnehin mittels geeigneter Schutzbrillen oder äquivalenter Vorrichtungen gegen vagabundierende und aus der Prozesszone gestreute Laserstrahlung geschützt werden, da hier mit Laserstrahlung entsprechend der Klasse 4 gearbeitet wird und die Prozesszone prinzipiell zugänglich ist. Da sich aus den Ergebnissen des hier beschriebenen Forschungsvorhabens eine relevante Gefährdung der Augen durch Sekundärstrahlungsemissionen ergibt, muss der Laserschutz mit einem geeigneten Schutz gegen die zugängliche Sekundärstrahlung kombiniert werden. Die Gefährdung resultiert nach Abschnitt 4.16 dabei einerseits für die Netzhaut aus dem Blaulichtanteil der Sekundärstrahlung, für den im ungünstigsten Fall Zeiten im unteren Minutenbereich ermittelt wurden, in welchen eine Exposition mit den gemessenen Bestrahlungsstärken noch zulässig ist. Andererseits verursacht der UV-B- und UV-C-Strahlungsanteil eine Gefährdung von Hornhaut, Bindehaut und Linse des Auges, wobei nach den erhaltenen Messergebnissen der Expositionsgrenzwert für die aktinische bzw. effektive Bestrahlung H_{eff} im ungünstigsten Fall bereits nach deutlich weniger als einer Minute erreicht wird. Demgegenüber dauert es bis zum Erreichen des Grenzwertes für den ungewichteten UV-A-Strahlungsanteil H_{UVA} wenigstens mehrere Stunden.

Ein adäquater Schutz gegen die Blaulicht- und UV-Strahlungsexposition bei der HLG-Nutzung kann erreicht werden, indem die erforderlichen Laserschutzbrillen analog zur Vorgehensweise zur Gewährleistung des Schutzes bei konventionellen Lichtbogenschweißprozessen mit Schweißerschutzvisieren oder -brillen unter Berücksichtigung der Anforderungen der DIN EN 170 [23] abgedunkelt werden, um die Transmission breitbandig zu reduzieren. Hier bietet sich eine adaptive Abdunkelung an. Diese kann schnell genug nach Beginn des Strahlungseinfalls die Transmission im relevanten Spektralbereich hinreichend stark verringern, denn die Expositionshöhe beim gepulsten Laserstrahlschweißen ist deutlich geringer als bei den konventionellen Schweißprozessen, bei denen laut [7,25] je nach den Prozessbedingungen bereits nach wenigen Sekunden die Expositionsgrenzwerte erreicht werden können. Alternativ dazu gibt es von einschlägigen Herstellern bereits Lösungen für Laserschutzbrillen, die mit zusätzlichen Filtern versehen sind, welche bei Bedarf manuell vor die Laserschutzgläser geklappt werden können.

Die Gefährdung der Haut der betroffenen HLG-Bediener wird insgesamt als kritischer eingeschätzt. Zum einen wird H_{eff} wie erläutert im ungünstigsten Fall bereits nach deutlich weniger als einer Minute erreicht. Dabei wird die Gefährdung nahezu vollständig durch den UV-B- und UV-C-Anteil der Sekundärstrahlung hervorgerufen, während der UV-A-Anteil hier praktisch keine Rolle spielt. Zum anderen können sich insbesondere die Hände der HLG-Bediener sehr dicht an der Prozesszone befinden, weil dort prozessspezifische Aktionen wie das Führen eines Zusatzwerkstoffdrahtes oder das Bewegen des zu bearbeitenden Bauteils auszuführen sind. Die Auswirkungen der auf die Haut fallenden UV-B- und UV-C-Strahlung reichen von einem Sonnenbrand (Erythem) über charakteristische Hautveränderungen (Elastose) bis hin zu Hautkrebs [26]. Die Notwendigkeit eines adäquaten Schutzes ist angesichts der ermittelten Expositionswerte offensichtlich. Problematisch ist dabei, dass bislang keine speziell für den Laserschutz geeigneten und entsprechend zertifizierten Schutzhandschuhe und -bekleidungen verfügbar sind, die um einen adäquaten Schutz gegen die UV-B- und UV-C-Strahlung aus der Prozesszone ergänzt werden könnten. Als Ansatz existiert lediglich die Vornorm DIN SPEC 91250 [21], in der die Anforderungen an passive Laserschutzhandschuhe und die zugehörigen laserspezifischen Prüfungen behandelt werden. Hier besteht eindeutig Handlungsbedarf im Sinne der Entwicklung von persönlicher Laserhautschutzausrüstung, die einen Schutz gegen UV-Sekundärstrahlung enthält. Bis derartige zertifizierte Schutzausrüstung, insbesondere Schutzhandschuhe, verfügbar sind, muss auf konventionelle Schutzhandschuhe und Bekleidungen zurückgegriffen werden, welche zum Schutz gegen gestreute Laserstrahlung thermisch ausreichend stabil [27] und gleichzeitig für UV-Strahlung undurchlässig sind (vgl. dazu auch [28-30]). Diese Vorgehensweise sollte von den betroffenen Unternehmen generell mit der zuständigen Berufsgenossenschaft abgestimmt werden. Besonders wichtig ist in diesem Zusammenhang eine entsprechend angepasste Ausbildung bzw. Unterweisung, in welcher auf die Gefährdungen durch die UV-Sekundärstrahlung, die insbesondere vom zu bearbeitenden Werkstoff abhängen, sowie das obligatorische Tragen von optisch dichten Handschuhen und Kleidung zum Schutz gegen die UV-Strahlungsexposition hingewiesen wird.

Abgesehen davon muss für die Durchführung des Laserstrahlschweißprozesses ein Laserbereich eingerichtet werden, an dessen Grenzen die Laserstrahlung sicher abgeschirmt wird, so dass außerhalb dieses Bereiches die Laserstrahlungsexpositionsgrenzwerte für Haut und Auge gemäß Richtlinie 2006/25/EG [3] bzw. TROS Laserstrahlung [4] nicht überschritten werden und keine Gefährdungen für sich dort aufhaltende Personen entstehen. Der Laserbereich ist optisch dicht zu gestalten, so dass gleichzeitig die aus der Prozesszone emittierte Sekundärstrahlung sicher abgeschirmt wird. In dem abgeschirmten Bereich dürfen sich während des Schweißprozesses nur im Hinblick auf die Arbeitssicherheit unterwiesene und mit geeigneter PSA ausgerüstete Personen aufhalten. Ergänzende Maßnahmen zum Schutz gegen UV-Strahlungsexposition beim Schweißen lassen sich aus diversen Veröffentlichungen zur Realisierung der Arbeitssicherheit bei konventionellen Schweißverfahren ableiten (vgl. z.B. [31-36]).

4.20 Projektbegleitende Mitarbeit bei der Überarbeitung der EN ISO 11553-1/2 (TAP 4.1)

Ursprünglich war geplant worden, noch während der Laufzeit des Forschungsvorhabens die Einbringung der erhaltenen Ergebnisse in die Normungsarbeit zu initiieren. Speziell sollte diese Initiative im Zuge der Überarbeitung der EN ISO 11553-1/2 im ISO/TC 172 (Optics and photonics), SC 9 (Laser and electro-optical systems) / WG 3 (Safety), in Kooperation mit dem IEC/TC 76 (Optical radiation safety and laser equipment) in der JWG 10 IEC/ISO (Safety of lasers and laser equipment in an industrial materials processing environment) erfolgen [37]. Jedoch wurde die Überarbeitung der EN ISO 11553-1 abgeschlossen, bevor relevante Ergebnisse im Hinblick auf die mit dem handgeführten bzw. handpositionierten Laserstrahlschweißen verbundene Sekundärstrahlungsemission generiert werden konnten, was größtenteils auf die in Abschnitt 3 erläuterten Verzögerungen im Projektverlauf zurückzuführen ist. In der am 14. Oktober 2020 von CEN angenommenen Fassung der Norm [38] werden andere Gefährdungen als Gefährdungen durch Laserstrahlung nicht berücksichtigt; diese sind jedoch in Anhang A des Dokuments aufgelistet. Die EN ISO 11553-2 [1] befindet sich derzeit in der Überarbeitung. Bedingt durch die Auswirkungen der Corona-Pandemie waren die Aktivitäten der zuständigen Gremien in diesem Zusammenhang jedoch stark eingeschränkt, so dass dort bis zum Ende des Forschungsvorhabens keine Ergebnisse aus dem Vorhaben diskutiert werden konnten. Im Januar 2022, d.h. nach Redaktionsschluss dieses Berichtes, soll eine Online-Sitzung des TC 76 der IEC, dem auch die JWG 10 zugeordnet ist, stattfinden, in welcher eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben vorgestellt werden soll, um die Relevanz für die Überarbeitung der EN ISO 11553-2 prüfen zu können.

Als Alternative zur Einbringung der erhaltenen Ergebnisse zu den Gefährdungen durch Sekundärstrahlung aus den Prozesszonen von Handlaserschweißprozessen in die DIN EN 11553-2 wurde die Möglichkeit diskutiert, die Ergebnisse im Nachgang zum Vorhaben in anderen Regelwerke zu integrieren. Hier wurden in erster Linie drei Normen identifiziert, nämlich die EN 12198-1 [39] mit den weiteren relevanten Teilen 2 und 3 sowie ggf. die EN 14255-1 [40] und die EN 14255-2 [41] mit dem weiteren relevanten Teil 4. Die EN 12198-1, die der Maschinenrichtlinie [42] zuzuordnen ist, wurde vom CEN/TC 114 (Sicherheit von Maschinen und Geräten) des Europäischen Komitees für Normung (CEN) veröffentlicht. Das zuständige nationale Arbeitsgremium im DIN-Normenausschuss Sicherheitstechnische Grundsätze (NASG) ist der Beirat NA 095 BR mit dem Ansprechpartner Herrn Dr. Christian Thom. Die EN 14255-1 und die 14255-2 wurden vom CEN/TC 169 (Licht und Beleuchtung), WG 8 (Photobiologie), veröffentlicht. Das zuständige nationale Arbeitsgremium im DIN-Normenausschuss Lichttechnik (FNL) ist der Arbeitsausschuss NA 058-00-07 AA (Optische Strahlung) mit dem Ansprechpartner Herrn Peer Schrapers. Der in diesem Fall zuständige Unterausschuss, der aktuell allerdings ruht, ist der NA 058-00-07-01 GUA (Geräte mit UV- und IR-Strahlung), ein Gemeinschaftsausschuss von FNL und DKE (Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE) mit dem Ansprechpartner Herr Dipl.-Ing. Kim Ihlow. Vorteilhaft wäre es, die Kooperation mit dem DKE/GK 841 (Optische Strahlungssicherheit und Lasereinrichtungen, DKE-Gemeinschaftskomitee mit dem Normenausschuss Feinmechanik und Optik (NAFuO) im DIN) zu nutzen. Zuständig sind hier Herr Dr. David Urmann und Frau Nicole Winkelmann.

5 Auflistung der für das Vorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen

Während der Laufzeit wurden keine für das Forschungsvorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen identifiziert.

6 Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Forschungszwecks/-ziels, Schlussfolgerungen

Zentrales Ergebnis des hier dargestellten Forschungsvorhabens ist, dass durch Ermittlung von umfangreichen Messdaten zur Sekundärstrahlungsemission aus den Prozesszonen von gepulsten Laserstrahlschweißprozessen auf die hohe Wahrscheinlichkeit einer signifikanten Belastung der Augen und insbesondere der Haut des Bedienpersonals von handgeführten bzw. handpositionierten Lasergeräten geschlossen werden kann. Diese Belastung wird durch UV-Strahlung zwischen 180 und 400 nm sowie sichtbare Strahlung (Blaulicht) zwischen 300 und 700 nm hervorgerufen, sofern keine geeignete persönliche Schutzausrüstung verwendet wird bzw. verfügbar ist. Das Ergebnis entspricht in vollem Umfang der ursprünglichen Zielsetzung des Forschungsvorhabens, welches somit erfolgreich abgeschlossen werden konnte. Die gewonnenen Informationen können in der Dentalindustrie, bei der Schmuckherstellung oder beim Reparaturschweißen im Maschinenbau und darüber hinaus bei allen Laserstrahlschweißprozessen, bei denen Personen anwesend sein müssen, genutzt werden, um Gefährdungspotenziale abzuschätzen und geeignete Schutzmaßnahmen zu definieren.

Ausgehend von der durchgeführten Bewertung der Messergebnisse wurde Handlungsbedarf erkannt. Dieser betrifft die Information potenzieller Nutzerinnen und Nutzer von Handlasergeräten über die identifizierten Gefährdungen der Haut und der Augen sowie die folglich erforderlichen Schutzmaßnahmen, aber insbesondere auch die Entwicklung von persönlicher Hautschutzausrüstung (Handschuhe und Kleidung), welche bis dato nicht in geeigneter Form verfügbar ist. Dabei ist für eine effiziente Durchführbarkeit von handgeführten und handpositionierten Laserstrahlschweißprozessen vor allem im Fall der Schutzhandschuhe eine sehr gute taktile Wahrnehmung durch die Schutzausrüstung hindurch zu gewährleisten. Abgesehen davon konnte noch keine Einbringung der Ergebnisse des Vorhabens in die Normung initiiert werden, was aber erforderlich ist, um für die Herstellung und den Betrieb von Handlasergeräten verbindliche Rahmenbedingungen im Hinblick auf den Schutz gegen Sekundärstrahlung, die aus den Prozesszonen von Laserstrahlschweißprozessen emittiert wird, festzulegen und zu etablieren. Auf Basis des vorliegenden Berichts kann die Initiierung der Einbringung der Ergebnisse in die Normung effizient erfolgen.

7 Aktueller Umsetzungs- und Verwertungsplan

Angesichts der offensichtlichen Relevanz der ermittelten Gefährdungen für die Gewährleistung der Arbeitssicherheit sollen die erhaltenen Projektergebnisse von der DGUV in erster Linie genutzt werden, um industriellen Anwendern geeignete Informationsmaterialien und Handlungsempfehlungen, z.B. als Teil einer DGUV-Information für HLG, zur Verfügung stellen zu können, welche zur erleichterten Realisierung geeigneter Schutzmaßnahmen bei der handgeführten bzw. handpositionierten Lasermaterialbearbeitung nutzbar sind. Ein entsprechender Dokumententwurf ist in Planung. Darüber hinaus soll entsprechend der Zielsetzung von AP 4 im Nachgang zum Vorhaben die Einbringung der Ergebnisse in die Normung initiiert werden. Im Speziellen wurden Ergebnisse erhalten, die nach Aussage der das Vorhaben begleitenden Partner international in die Normungsarbeit im Zuge der Überarbeitung der EN ISO 11553-1/2 im TC 76 der IEC einfließen könnten [37], was zeitnah evaluiert werden soll. Wie in Abschnitt 4.20 erläutert soll ergänzend die Möglichkeit der Einbringung der gewonnenen Erkenntnisse in die DIN EN 12198-1 [39] sowie die DIN EN 14255-1 und -2 [40,41] geprüft werden. Die Ergebnisse des Vorhabens DGUV-FP439 werden schließlich dazu beitragen zu entscheiden, ob von Arbeitgebern, die HLG betreiben, aufgrund der Überschreitung von Expositionsgrenzwerten für inkohärente ultraviolette Strahlung nicht nur eine Wunschvorsorge gemäß § 5a der ArbMedVV [43] angeboten wird, sondern eine Pflichtvorsorge gemäß § 4 in Verbindung mit Teil 3 Absatz 1 Nr. 6 des Anhangs der ArbMedVV [43] sichergestellt werden muss.

Abgesehen davon werden die Projektergebnisse nach Redaktionsschluss dieses Berichtes auf den Bayerischen Laserschutztagen 2022 im Rahmen eines Vortrags mit dem Titel „Gefährdung durch UV-Strahlung bei der Materialbearbeitung mit Handlasern“ vorgestellt:

Bayerische Laserschutztage 2022

Online-Veranstaltung, 18. – 19. Januar 2022

Themenschwerpunkte:

- Anlagensicherheit
- Gefährdung durch Röntgen- und UV-Strahlung
- Laser sicher betreiben
- Persönliche Schutzausrüstung

Veranstalter: Bayerisches Laserzentrum GmbH, bayern photonics e.V.

Veröffentlichung der Präsentation in einem Tagungsband

Eigene Schutzrechte wurden im Zusammenhang mit dem Vorhaben nicht angemeldet bzw. erteilt.

Abgesehen davon ist geplant, die Entwicklung von geeigneter persönlicher Schutzausrüstung zum Schutz der Haut gegen die UV-Sekundärstrahlungsexposition beim handgeführten bzw. handpositionierten Laserstrahlschweißen anzustoßen. Derartige persönliche Schutzausrüstung ist vor allem für die Haut der Hände in Form von Schutzhandschuhen sowie für die Unterarme relevant, welche der Laserprozesszone ebenfalls vergleichsweise nah kommen. Wichtig ist dabei die adäquate Berücksichtigung des Schutzes zumindest gegen aus der Prozesszone gestreute Laserstrahlung. Gleichzeitig ist eine wesentliche Herausforderung im Hinblick auf eine effiziente Durchführbarkeit handgeführter und handpositionierter Laserstrahlschweißprozesse, vor allem im Fall der Schutzhandschuhe, die Gewährleistung einer sehr guten taktilen Wahrnehmung durch die Schutzausrüstung hindurch. Ein ausreichender Schutz gegen eine unbeabsichtigte direkte Laserbestrahlung lässt sich ausgehend von den Erfahrungen der Kooperationspartner lediglich mittels aktiver Hautschutzausrüstung realisieren, welche die Laseremission bei Detektion einer Bestrahlung oberhalb einer definierten Schwelle umgehend automatisch abschaltet. Die Entwicklung derartiger aktiver Schutzausrüstung lässt sich aufgrund der zu erwartenden komplexen Anforderungen, auch unter Berücksichtigung der erforderlichen hinreichenden taktilen Wahrnehmung, voraussichtlich nur im Rahmen eines eigenständigen Forschungsvorhabens durchführen.

8 Danksagung

Das Vorhaben „UV-Strahlung bei der Handlasermaterialbearbeitung“ (DGUV-FP439) wurde gefördert von der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV), wofür die Autoren herzlichen danken. Der Dank gilt darüber hinaus Herrn Dr. Michael Schmidt von der DGUV für die Betreuung des Vorhabens.



Außerdem danken die Autoren den Projektbegleitern

- Herrn Dipl.-Phys. Martin Brose und Herrn Dipl.-Ing. Malte Gomolka, Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM)
- Herrn Stephan Briel, Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM)
- Herrn Dr. Marc Wittlich, Herrn Martin Schmitz und Herrn Timo Heepenstrick, M.Sc., Institut für Arbeitsschutz (IFA) der DGUV
- Herrn Dr. Stefan Bauer, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)

für Ihre Unterstützung und die fruchtbaren Diskussionen über die Ergebnisse.



9 Anhänge

9.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.	Optometer P-9801 V3 und X1-3 mit den Messköpfen XD-45-HUV und XD-45-HB.	10
Abbildung 2.	VioSpor Biosensor, Biosense, Bornheim, sowie Strahldichtemesskopf LDM-9805, BG ETEM, Köln.	11
Abbildung 3.	Unterschiedliche Leistungsmessköpfe der Fa. Coherent.	11
Abbildung 4.	Spektrometer AvaSpec-Mini4096CL.	11
Abbildung 5:	Deuterium-Strahlquelle – SL3 (A), Deuterium- und Halogen-Strahlquelle – DH-2000-BAL (B), Xenon-Strahlquelle – HPX-2000 (C).....	12
Abbildung 6.	AlphaLaser AL300, gepulster Festkörperlaser (Laser 1).	12
Abbildung 7.	Trumpf TruPulse 103, gepulster Festkörperlaser (Laser 2).	13
Abbildung 8.	Coherent HighLight FL6000-ARM, pulsbarer Faserlaser (Laser 3). Rechts ist schematisch das Strahlprofil des Lasers dargestellt.	13
Abbildung 9.	Schematische Darstellung des optischen Versuchsaufbaus zum Erzeugen von Pulsen aus der von der betrachteten Quelle emittierten kontinuierlichen Strahlung.	14
Abbildung 10.	Berechneter zeitlicher Verlauf der durchgelassenen Leistung eines Lichtpulses.....	14
Abbildung 11.	Abhängigkeit der Pulsdauer τ von der Rotationsfrequenz (Lichtspot mit $\varnothing = 2$ mm und 10 Bohrungen auf der Chopper-Scheibe von jeweils $\varnothing = 10$ mm).....	15
Abbildung 12.	Foto der Messstrecke zum definierten Pulsen von UV- bzw. VIS-Strahlung (der Strahlengang wurde in violetter Farbe in das Foto eingezeichnet).	15
Abbildung 13.	Gemessene spektrale Leistungsdichteverteilung der Deuterium-Strahlquelle SL3, ohne (rote Kurve) und mit Filter (grüne Kurve), jeweils als Einkanalspektrum (ungewichtet), sowie die spektrale Transmissionskurve des Filters U330 (blaue Kurve).	16
Abbildung 14.	Kalibrationskurve der Strahlquelle SL3 als absolute spektrale Bestrahlungsstärke $E(\lambda)$ (links), spektrale Charakteristik der Strahlquelle SL3 ohne (grüne Kurve) und mit (blaue Kurve) Berücksichtigung der Kalibrationskurve (rechts).	17
Abbildung 15.	Ungewichtete Einkanalspektren und gewichtete Spektren (spektrale Bestrahlungs- stärken $E(\lambda)$) der Strahlquelle DH-2000-BAL (links: Deuterium plus Halogen, rechts: nur Deuterium).....	17
Abbildung 16.	Validierung der Funktionalität des aufgebauten Chopper-Systems mit der Highspeed Photodiode DET210, Pulsfrequenzen von 10 Hz (A), 50 Hz (B) und 100 Hz (C), aufge- zeichnet mit einem Speicher-Oszilloskop.	18
Abbildung 17.	Vergleich der Messsignale der Photodiode DET210, aufgezeichnet mit einem Speicher- Oszilloskop (A), und des Messkopfes XD-45-HUV zusammen mit dem Optometer X1-3 (B). Deutlich ist im rechten Diagramm (B) die Verzerrung des zu erwartenden Quasi- Rechtecksignals zu einem quasi sinusförmigen Signal zu erkennen.	18
Abbildung 18.	Versuchsaufbau mit dem Optometer P-9801 zur Messungen von Lichtpulsen.	19
Abbildung 19.	Erfassung der analogen Signale des UV-Messkopfes XD-45-HUV (hier: UV-A ungewichtet) auf einem Speicher-Oszilloskop bei gepulster Bestrahlung (jeweils Pulsfrequenz 20 Hz entsprechend der Pulsperiode 50 ms) mit unterschiedlichen Parametereinstellungen (A: Duty-Cycle 50 % entsprechend der theoretischen Gesamtpulsdauer 25 ms, B: Duty- Cycle 20 % entsprechend der theoretischen Gesamtpulsdauer 10 ms).....	19

Abbildung 20.	Messung und Aufzeichnung gepulster UV-A-Strahlung (ungewichtet) mit dem Optometer P-9801 (Strahlungsquelle: Deuterium-Lampe SL3, Pulserzeugung mittels Chopper, Integrationszeit des Optometers: 1 ms, weitere Messparameter im Text).	20
Abbildung 21.	Versuch zur Validierung der Messfunktionalität der Gigahertz-Detektoren XD-45-HUV und XD-45-HB in Verbindung mit dem Optometer P 9801 (Blindschweißung an Baustahl, Parameter im Text).	20
Abbildung 22.	Ergebnis der Messung der UV-A-Bestrahlungsstärke (ungewichtet) mit dem Detektor XD-45-HUV an der in Abbildung 21 gezeigten Blindschweißung, aufgezeichnet mit dem Speicheroszilloskop (Parameter im Text).	21
Abbildung 23.	Mit dem Optometer P 9801 erfasste Signale der Detektoren XD-45-HB (Blaulichtgefährdung, obere Zeile von Diagrammen) und XD-45-HUV (UV-Strahlungsgefährdung, untere Zeile von Diagrammen) während der in Abbildung 21 gezeigten Blindschweißung (Parameter im Text).	21
Abbildung 24.	Bestrahlungsstärke E in Abhängigkeit von der Ausleuchtung des UV-Messkopfes XD-45-HUV mit der Deuterium-Lampe (E im Diagramm für UV-A gewichtet auf der Sekundärachse dargestellt).	22
Abbildung 25.	Bestrahlungsstärke E in Abhängigkeit von der Ausleuchtung des Blaulichtmesskopfes XD-45-HB mit der Deuterium-Lampe (E im Diagramm für UV-A gewichtet auf der Sekundärachse dargestellt).	23
Abbildung 26.	Schutzgläser mit unterschiedlicher Beschichtung zur Untersuchung der UV-Durchlässigkeit.	23
Abbildung 27.	Messergebnisse der Untersuchungen zur UV-Durchlässigkeit unterschiedlicher Schutzgläser.	24
Abbildung 28.	Zeichnungsansicht für den im 3D-Druck aus ABS-Kunststoff gefertigten Messsystemkopf (Längenangaben in mm).	25
Abbildung 29.	Einsatzbereiter Messsystemkopf mit montierten Sensoren XD-45-HUV und XD-45-HB von Gigahertz Optik GmbH. Das zusätzliche Gewinde oben im Bild ist für die Aufnahme der Biosensoren vorgesehen.	25
Abbildung 30.	Vorbereitete Schweißproben mit Durchmesser 70 mm und Dicke 10 mm; Werkstoffe Baustahl, nichtrostender Stahl, Aluminium, Messing und Titan (von links).	27
Abbildung 31.	Dreh-Schwenkeinheit isel ZDS 2030; Quelle: isel Germany AG.	29
Abbildung 32.	Messaufbau am Laserhandarbeitsplatz der SLV Halle GmbH.	30
Abbildung 33.	Einsatzbereiter Messplatz inkl. UV-Messung am Laserhandarbeitsplatz der SLV Halle GmbH.	31
Abbildung 34.	Laserstrahlschweißen von Baustahl am Messplatz zur Erfassung der UV-Sekundärstrahlungsemission.	32
Abbildung 35.	Mit dem Laser 1 durch Variation von Pulsdauer τ und Vorgabespannung U generierte Pulsenergien Q.	32
Abbildung 36.	Messreihe 1 (TAP 2.5) – Bestrahlung H pro Puls UV-A ungewichtet (A), UV-A gewichtet (B) und UV-B/C gewichtet (C) in Abhängigkeit von der Pulsdauer τ für verschiedene Pulsfolgefrequenzen f_{rep} , [Hz] und Spannungsvorgaben U [V] für den Werkstoff Baustahl.	33
Abbildung 37.	Messreihe 2 (TAP 2.5) – Bestrahlung H pro Puls UV-A ungewichtet (A), UV-A gewichtet (B) und UV-B/C gewichtet (C) in Abhängigkeit vom Messabstand r bei 2 Parametersätzen für Baustahl.	34
Abbildung 38.	Messreihe 3 (TAP 2.5) – Bestrahlung H pro Puls UV-A ungewichtet (A), UV-A gewichtet (B) und UV-B/C (C) gewichtet in Abhängigkeit von der Schweißgeschwindigkeit v_s bei 2 Parametersätzen für Baustahl.	35

Abbildung 39.	Messreihe 1 (TAP 2.6) – Bestrahlung H pro Puls UV-A ungewichtet (A), UV-A gewichtet (B) und UV-B/C gewichtet (C) in Abhängigkeit von Messabstand r und Höhenwinkel θ für Parametersatz P1 für Baustahl (logarithmische Skalierung der y-Achse).	36
Abbildung 40.	Messreihe 1 (TAP 2.6) – Bestrahlung H pro Puls UV-A ungewichtet (A), UV-A gewichtet (B) und UV-B/C gewichtet (C) in Abhängigkeit von Messabstand r und Höhenwinkel θ für Parametersatz P2 für Baustahl (logarithmische Skalierung der y-Achse).	37
Abbildung 41.	Messreihe 2 (TAP 2.6) – Bestrahlung H pro Puls UV-A gewichtet in Abhängigkeit vom Höhenwinkel θ für die Parametersätze P1 und P2 für Baustahl, Messabstände r = 50 mm (A) und 200 mm (B) sowie Azimutwinkel $\phi = 45^\circ$	38
Abbildung 42.	Messreihe 2 (TAP 2.6) – Bestrahlung H pro Puls UV-A gewichtet in Abhängigkeit vom Höhenwinkel θ für die Parametersätze P1 und P2 für Baustahl, Messabstände r = 50 mm (A) und 200 mm (B) sowie Azimutwinkel $\phi = 90^\circ$	39
Abbildung 43.	Messreihe 3 (TAP 2.6) – Bestrahlung H pro Puls UV-A gewichtet in Abhängigkeit vom Höhenwinkel θ und vom Einstrahlwinkel β für Parametersatz P1 für Baustahl, Messabstände r = 50 mm und 200 mm sowie Azimutwinkel $\phi = 0^\circ$ (A), $\phi = 45^\circ$ (B) und $\phi = 90^\circ$ (C).	40
Abbildung 44.	Bestrahlung H pro Puls UV-A ungewichtet in Abhängigkeit vom Werkstoff und vom Höhenwinkel θ für Parametersatz P1, Messabstände r = 50 mm (A) und 200 mm (B).	41
Abbildung 45.	Bestrahlung H pro Puls UV-A ungewichtet in Abhängigkeit vom Werkstoff und vom Höhenwinkel θ für Parametersatz P2, Messabstände r = 50 mm (A) und 200 mm (B).	42
Abbildung 46.	Messaufbau für die UV-Sekundärstrahlungsmessungen beim gepulsten Laserstrahlschweißen im Versuchslabor des LZH.	43
Abbildung 47.	Messaufbau für die Kaustikbestimmung am Laser 2 (links) sowie anhand der gemessenen Rohdaten abgeleitete Strahlkaustik (rechts).	44
Abbildung 48.	UV-Sekundärstrahlungsmessungen mit unterschiedlichen Spotgrößen bei Blindschweißungen mit dem Laser 2 auf einem Baustahl-Werkstück.	45
Abbildung 49.	Ergebnisse der UV-A-Bestrahlungsmessungen (ungewichtet) beim Blindschweißen verschiedener Werkstoffe mit dem Laser 2 unter Verwendung von Parametersatz 1 gemäß Tabelle 2 für drei Höhenwinkel θ und einen Azimutwinkel $\phi = 0^\circ$ (weitere Parameter im Text).	45
Abbildung 50.	Ergebnisse der UV-A-Bestrahlungsmessungen (ungewichtet) beim Blindschweißen verschiedener Werkstoffe mit dem Laser 2 unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2 für drei Höhenwinkel θ und einen Azimutwinkel $\phi = 0^\circ$ (weitere Parameter im Text).	46
Abbildung 51.	Ergebnisse der UV-A-Bestrahlungsmessungen (ungewichtet) beim Blindschweißen verschiedener Werkstoffe mit dem Laser 3 unter Verwendung von Parametersatz 1 gemäß Tabelle 2 sowie einem Strahlprofil gemäß Tabelle 5 für drei Höhenwinkel θ sowie einen Azimutwinkel von $\phi = 0^\circ$ (weitere Parameter im Text).	48
Abbildung 52.	Ergebnisse der UV-A-Bestrahlungsmessungen (ungewichtet) beim Blindschweißen verschiedener Werkstoffe mit dem Laser 3 unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2 sowie einem Strahlprofil gemäß Tabelle 5 für drei Höhenwinkel θ sowie einen Azimutwinkel von $\phi = 0^\circ$ (weitere Parameter im Text).	49
Abbildung 53.	Ergebnisse der UV-Sekundärstrahlungsmessungen (hier UV-A ungewichtet) beim Blindschweißen von Titan mit den drei Lasersystemen unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2 für drei verschiedene Höhenwinkel θ sowie einen Azimutwinkel ϕ von 0° (weitere Parameter im Text).	50

Abbildung 54.	Messaufbau zur Detektion von UV-Strahlung mit Hilfe eines Biosensors „VioSpor blue line“.	51
Abbildung 55.	Fotos der für die Messung mit den Biosensoren bearbeiteten Titan-Proben.	51
Abbildung 56.	Links: ermittelte Bestrahlung H für die Messabstände $r = 50$ mm und 200 mm bei einer Prozessdauer von 60 s. Rechts: Prozessparameter mit Angabe der Gesamtprozessdauer und der Pulsanzahl.	52
Abbildung 57.	Links: ermittelte Bestrahlung H für die Messabstände $r = 50$ mm und 200 mm bei einer Prozessdauer von 300 s. Rechts: Prozessparameter mit Angabe der Gesamtprozessdauer und Pulsanzahl.	52
Abbildung 58.	Ergebnisse der UV-Sekundärstrahlungsmessungen (hier UV-A ungewichtet) beim Blindschweißen von Edelstahl mit den drei Lasersystemen unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2 für drei verschiedene Höhenwinkel θ sowie einen Azimutwinkel φ von 0° (weitere Parameter im Text).	53
Abbildung 59.	Ergebnisse der UV-Sekundärstrahlungsmessungen (hier UV-A ungewichtet) beim Blindschweißen von Baustahl mit den drei Lasersystemen unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2 für drei verschiedene Höhenwinkel θ sowie einen Azimutwinkel φ von 0° (weitere Parameter im Text).	54
Abbildung 60.	Nach Subtraktion des Dunkelsignals erhaltene Einkanalspektren (links) sowie daraus anhand der Spektrometerempfindlichkeitskurve (vgl. Abbildung 14 (rechts)) abgeleitete spektrale Bestrahlungsstärken $E(\lambda)$ (rechts) für einen Messabstand von 200 mm bei ansonsten festen Beobachtungsbedingungen (Höhenwinkel $\theta = 45^\circ$, Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$), aufgezeichnet mit dem Gitterspektrometer Avantes AvaSpec-Mini4096CL während des Blindschweißens von Baustahl, Edelstahl und Titan mit dem Laser 2 unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2.	55
Abbildung 61.	Wichtungsfunktion $S(\lambda)$ gemäß TROS IOS Teil 2 [5] (links) sowie daraus abgeleitete effektive spektrale Bestrahlungsstärken $E_{\text{eff}}(\lambda)$ im UV-Spektralbereich zwischen 200 und 400 nm (rechts) für einen Messabstand von 200 mm bei ansonsten festen Beobachtungsbedingungen (Höhenwinkel $\theta = 45^\circ$, Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$), aufgezeichnet mit dem Gitterspektrometer Avantes AvaSpec-Mini4096CL während des Blindschweißens von Baustahl, Edelstahl und Titan mit dem Laser 2 unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2.	56
Abbildung 62.	Nach Subtraktion des Dunkelsignals erhaltene Einkanalspektren (links) sowie daraus anhand der Spektrometerempfindlichkeitskurve (vgl. Abbildung 14 (rechts)) abgeleitete spektrale Bestrahlungsstärken $E(\lambda)$ (rechts) für einen Messabstand von 1.000 mm bei ansonsten festen Beobachtungsbedingungen (Höhenwinkel $\theta = 45^\circ$, Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$), aufgezeichnet mit dem Gitterspektrometer Avantes AvaSpec-Mini4096CL während des Blindschweißens von Baustahl, Edelstahl und Titan mit dem Laser 2 unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2.	56
Abbildung 63.	Wichtungsfunktion $B(\lambda)$ gemäß TROS IOS Teil 2 [5] (links) sowie daraus abgeleitete effektive spektrale Bestrahlungsstärken $E_B(\lambda)$ im Spektralbereich zwischen 300 und 700 nm (rechts) für einen Messabstand von 1.000 mm bei ansonsten festen Beobachtungsbedingungen (Höhenwinkel $\theta = 45^\circ$, Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$), aufgezeichnet mit dem Gitterspektrometer Avantes AvaSpec-Mini4096CL während des Blindschweißens von Baustahl, Edelstahl und Titan mit dem Laser 2 unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2.	57

Abbildung 64. UV-Sekundärstrahlungsemission (Bestrahlung H pro Puls) am Beispiel des UV-A-Strahlungsanteils (gewichtet) als Funktion des Messabstands r von der Prozesszone bei ansonsten festen Beobachtungsbedingungen (Höhenwinkel $\theta = 45^\circ$, Azimutwinkel $\varphi = 0^\circ$) beim Blindschweißen von Baustahl, Edelstahl und Titan mit dem Laser 2 unter Verwendung von Parametersatz 2 gemäß Tabelle 2.....58

Abbildung 65. Auftragschweißung auf Eisenguss mit Nickel-Basis-Zusatzwerkstoff, Messabstand r = 100 mm, Höhenwinkel $\theta = 45^\circ$ (weitere Parameter im Text)..... 64

9.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1.	Im Rahmen des Forschungsvorhabens für die UV-Strahlungsemissionsmessungen betrachtete metallische Werkstoffe.....	27
Tabelle 2.	Parametersätze 1 und 2, die für die nachfolgend dargestellten Schweißuntersuchungen an den beiden verwendeten Lasersystemen eingestellt wurden.....	42
Tabelle 3.	Gleichbleibende Einstellungen beim Blindschweißen verschiedener Werkstoffe mit dem Laser 2.	43
Tabelle 4.	Gleichbleibende Einstellungen beim Blindschweißen verschiedener Werkstoffe mit dem Laser 3.	47
Tabelle 5.	Aufteilung der Laserleistung auf Center (C) und Ring (R) analog einem Top-Hat-Strahlprofil zur Einstellung der Parametersätze 1 und 2 gemäß Tabelle 2 mit dem Laser 3.	48
Tabelle 6.	Expositionsgrenzwerte für inkohärente optische Strahlung (IOS) als Bestrahlungen (H_{eff} bzw. H_{UVA} in $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$), Strahldichten (L_B in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{sr}^{-1}$) und Bestrahlungsstärken (E_B in $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) im Ultraviolett-Spektralbereich (180 – 400 nm) sowie im sichtbaren Spektralbereich (300 – 700 nm, sog. Blaulicht) gemäß Richtlinie 2006/25/EG (Auszug) [3].....	59
Tabelle 7.	Laserparameter entsprechend Parametersatz 2 und Beobachtungsparameter zur Auswahl der dem Grenzwertvergleich zugrunde gelegten Messwerte (vgl. auch Tabelle 2).	60
Tabelle 8.	Grenzwertbetrachtung bei einem Messabstand von 50 mm für die UV-Sekundärstrahlungsexposition.	60
Tabelle 9.	Grenzwertbetrachtung bei einem Messabstand von 200 mm für die UV-Sekundärstrahlungsexposition.	61
Tabelle 10.	Grenzwertbetrachtung bei einem Messabstand von 200 mm für die Blaulicht-Exposition unter Annahme einer Winkelausdehnung der Quelle (Prozesszone) < 11 mrad.	61

9.3 Liste der verwendeten Abkürzungen und Symbole

3D	dreidimensional
φ	Azimutwinkel
a.s.	Aktiengesellschaft (Tschechien)
AA	Arbeitsausschuss
Abs.	Absatz
ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists
AG	Aktiengesellschaft
AKNIR	Arbeitskreis Nichtionisierende Strahlung
Al	Aluminium
AlMgSi1	Aluminiumlegierung mit der Werkstoffnummer 3.2315 bzw. EN AW-6082
AP	Arbeitspaket
AR	Antireflexionsbeschichtung
ArbMedVV	Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge
Art.	Artikel
β	Einstrahlwinkel (Winkel zwischen Laserstrahl und Oberflächennormale)
B(λ)	spektrale Gewichtung unter Berücksichtigung der Wellenlängenabhängigkeit der dem Auge durch Blaulichtstrahlung zugefügten photochemischen Schädigung (dimensionslos)
B.Eng.	Bachelor of Engineering
B.V.	Gesellschaft mit beschränkter Haftung (Niederlande)
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
Bd.	Band
BG ETEM	Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse
BGBI.	Bundesgesetzblatt
BGHM	Berufsgenossenschaft Holz und Metall
BR	Beirat
bzw.	beziehungsweise
C	Center
CAD	computer-aided design
CEN	Comité Européen de Normalisation (Europäisches Komitee für Normung)
cm	Zentimeter (Längeneinheit)
CNC	Computerized Numerical Control
CO ₂	Kohlen(stoff)dioxid
Cu	Kupfer
CuZn39Pb3	Messing mit der Werkstoffnummer 2.0401
cw	continuous wave (Dauerstrich)

∅	Durchmesser
d.h.	das heißt
d ₈₆	(Laser-)Spotdurchmesser (enthält 86,5 % der Gesamtleistung)
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsche Industrienorm
Dipl.-Verw.	Diplom-Verwaltungswirt
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE
DoE	Design of Experiments (Statistische Versuchsplanung)
Dr.	Doktor
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren
E	Bestrahlungsstärke (eingestrahelte Leistung pro Flächeneinheit)
e.V.	Eingetragener Verein
E _B	effektive Bestrahlungsstärke (Blaulicht)
EC	European Commission
eff	effektiv (Index für die aktinische, also gewichtete, Bestrahlung bzw. Bestrahlungsstärke)
EG	Europäische Gemeinschaft
EGW	Expositionsgrenzwert
EN	Europäische Norm
Fa.	Firma
FH	Fachhochschule (University of Applied Sciences)
f _k	Brennweite der Kollimierlinse
FNL	DIN-Normenausschuss Lichttechnik
FP	Forschungsprojekt
f _{rep}	Repetitionsrate (Pulsfolgefrequenz)
°	Grad (Winkeleinheit)
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GMBI	Gemeinsames Ministerialblatt
θ	Höhenwinkel (Winkel zwischen Betrachtungsrichtung und Oberfläche)
H	Bestrahlung (eingestrahelte Energie pro Flächeneinheit)
H _B	effektive Bestrahlung (Blaulicht)
H _{eff}	effektive (aktinische) Bestrahlung (UV-Spektralbereich)
H _{UVA}	Bestrahlung im UV-A-Spektralbereich ungewichtet
HLG	Handlasergerät
Hz	Hertz (Frequenzeinheit)
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IEC	International Electrotechnical Commission
IFA	Institut für Arbeitsschutz (der DGUV)

Ing.	Ingenieur
inkl.	inklusive
IOS	inkohärente optische Strahlung
IR	Infrarot
IRPA	International Radiation Protection Association
ISBN	International Standard Book Number (Internationale Standardbuchnummer)
ISO	International Organization for Standardization
J	Joule (Energieeinheit)
JWG	Joint Working Group
kHz	Kilohertz (Frequenzeinheit)
kW	Kilowatt (Leistungseinheit)
λ	Wellenlänge
l	Liter (Volumeneinheit)
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
L_B	effektive Strahldichte (Blaulicht): berechnete Strahldichte, spektral gewichtet mit $B(\lambda)$, ausgedrückt in Watt pro Quadratmeter pro Steradian
LWL	Lichtwellenleiter
lx	Lux (Einheit der Beleuchtungsstärke)
LZH	Laser Zentrum Hannover
m	Meter (Längeneinheit)
M.Sc.	Master of Science
MED	minimale Erythemdosis (nach [17])
min	Minute(n) (Zeiteinheit)
μm	Mikrometer (Längeneinheit)
mm	Millimeter (Längeneinheit)
mrad	Milliradian (Winkeleinheit)
μs	Mikrosekunde (Zeiteinheit)
ms	Millisekunde (Zeiteinheit)
MS(1/2)	Meilenstein (1/2)
μW	Mikrowatt (Leistungseinheit)
mW	Milliwatt (Leistungseinheit)
NA	Numerische Apertur
NAFuO	DIN-Normenausschuss Feinmechanik und Optik
NASG	DIN-Normenausschuss Sicherheitstechnische Grundsätze
NIR	Nahes Infrarot / Nahinfrarot
nm	Nanometer (Längeneinheit)
No.	Number

Nr.	Nummer
OStrV	Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung)
§	Paragraph
∞	proportional
%	Prozent (Anteil)
P1 / P2	Parametersatz 1 / 2
P _{av}	Durchschnittsleistung
PC	Personal Computer
pdf	Portable Document Format
P _{max}	Pulsspitzenleistung (Pulshöhe)
Prof.	Professor
PSA	persönliche Schutzausrüstung
Q	Pulsenergie
r	Messabstand
R	Ring
rel.	relative
s	Sekunde (Zeiteinheit)
S(λ)	spektrale Gewichtung unter Berücksichtigung der Wellenlängenabhängigkeit der gesundheitlichen Auswirkungen von UV-Strahlung auf Auge und Haut (dimensionslos)
S.	Seite(n)
S355J2+N	Baustahl mit der Werkstoffnummer 1.0570
SC	Sub Committee
SLV	Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt
SMA	Sub-Miniature-A (Steckverbinder)
sog.	sogenannte(n/r/s)
spektr.	spektrale
SPP	Strahlparameterprodukt
sr	Steradian (Raumwinkeleinheit)
Std.	Stunde(n) (Zeiteinheit)
τ	Pulsdauer
t	Zeit
T(λ)	spektraler Transmissionsgrad
TAP	Teilarbeitspaket
TC	Technical Committee
Ti	Titan
Ti6Al4V	Titanlegierung mit der Werkstoffnummer 3.7164

t_{lim}	Zeit bis zum Erreichen des Expositionsgrenzwertes
t_{max}	maximale Starrzeit (beim Fixieren von Punkten mit den Augen)
TROS	Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung
U	Spannung
USB	Universal Serial Bus
UV	Ultraviolett
UV-A	Wellenlängenbereich zwischen etwa 320 und 400 nm (je nach Referenz)
UV-B	Wellenlängenbereich zwischen etwa 280 und 320 nm (je nach Referenz)
UV-C	Wellenlängenbereich zwischen etwa 100 und 320 nm (je nach Referenz)
V	Volt (Spannungseinheit)
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
vgl.	vergleiche
VIS	Visuelles Spektrum (sichtbarer Spektralbereich)
Vol.	Volume
v_s	Schweißgeschwindigkeit
v_{teach}	kinematische Vorgabe der Rotationsachse
W	Watt (Leistungseinheit)
WG	Working Group (Arbeitsgruppe)
x	kartesische Koordinate
X5CrNi18-10	austenitischer Chrom-Nickel-Stahl mit der Werkstoffnummer 1.4301
y	kartesische Koordinate
z	Koordinate in Strahlausbreitungsrichtung
z.B.	zum Beispiel

9.4 Referenzen

- [1] DIN EN ISO 11553-2:2009-03: Sicherheit von Maschinen – Laserbearbeitungsmaschinen – Teil 2: Sicherheitsanforderungen an handgeführte Laserbearbeitungsgeräte (ISO 11553-2:2007). Deutsche Fassung der EN ISO 11553-2:2008, Beuth Verlag, Berlin, 2009.
- [2] DIN EN 60825-1:2015-07: Sicherheit von Lasereinrichtungen – Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen (IEC 60825-1: 2014). Deutsche Fassung der EN 60825-1:2014, Beuth Verlag, Berlin, 2015.
- [3] Richtlinie 2006/25/EG über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung). Amtsblatt der Europäischen Union, 2006, L114/38 – L114/59.
- [4] TROS Laserstrahlung: Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – TROS Laserstrahlung. GMBI 2018, Nr. 50–53, 9. Juli 2018; Teil Allgemeines, S. 962; Teil 1 – Beurteilung der Gefährdung durch Laserstrahlung, S. 982; Teil 2 – Messungen u. Berechnungen von Expositionen gegenüber Laserstrahlung, S. 1000; Teil 3 – Maßnahmen zum Schutz vor Gefährdungen durch Laserstrahlung, S. 1030.
- [5] TROS IOS: Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – TROS Inkohärente Optische Strahlung. GMBI 2013, Nr. 65–67, Ausgabe: November 2013, Teil Allgemeines, S. 1302, Teil 1 – Beurteilung der Gefährdung durch inkohärente optische Strahlung, S. 1312, Teil 2 – Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung, S. 1325, korrigiert GMBI 2014, Nr. 28/29, S. 630, Teil 3 – Maßnahmen zum Schutz vor Gefährdungen durch inkohärente optische Strahlung, S. 1349, korrigiert GMBI 2014, Nr. 28/29, S. 630.
- [6] OStrV: Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – OstrV). BGBl. I S. 960, 19. Juli 2010, zuletzt geändert durch BGBl. I S. 3584, 18. Oktober 2017.
- [7] S. Bauer, G. Ott, M. Janßen, M. Schmitz, U. Mückenheim: Optische Strahlenbelastung beim Schweißen – Erfassung und Bewertung. Abschlussbericht des Forschungsprojektes BAuA F2368, 1. Auflage, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, 2017.
- [8] G. Ott, S. Bauer: Neue Erkenntnisse zur Belastung durch optische Strahlung beim Schweißen. Technische Sicherheit Bd. 7 (2017), Nr. 3 (März), S. 46 – 51.
- [9] DGUV: Handlungshilfe für die Gefährdungsbeurteilung beim Betrieb von offenen Laser-Einrichtungen zur Materialbearbeitung mit Handführung oder Handpositionierung (HLG). Entwurf einer DGUV-Information, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Sankt Augustin, 2018.
- [10] Mitteilung der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) über exemplarische Messergebnisse zur UV-Sekundärstrahlungsemission an Laserschweißprozessen aus dem Bereich der Dentaltechnik, März 2018.
- [11] S. Bauer: Lasermaterialbearbeitung – Gefährliche inkohärente optische Strahlung. Sicherheitsingenieur Heft 10/2018, S. 18 – 21.
- [12] ICNIRP (IRPA) (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection of the International Radiation Protection Association): Guidelines on Limits of Exposure to Ultraviolet Radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). Health Physics Vol. 87 (No. 2), S. 171-186, 2004.

- [13] ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists): Threshold limit values for chemical substances and physical agents – Biological Exposure Indices. Cincinnati, 1997.
- [14] H. Holtschmidt: VioSpor Blue Line – Technische Daten. BioSense – Labor für Biologische Sensorik, Bornheim, 2021, Internet: <http://www.biosense.de/blue-e.htm>
- [15] M. Janßen, G. Ott: Messverfahren zur Bewertung inkohärenter optischer Strahlung. Abschlussbericht des Forschungsprojektes BAuA F2254, 1. Auflage, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, 2016, ISBN 978-3-88261-170-0.
- [16] AtomTrace: Elements Database. AtomTrace a.s., Koleční, Tschechien, 2022, Internet: <https://www.atom-trace.com/elements-database/>.
- [17] DIN 5050-1:2010-01: Solarien und Heimsonnen – Teil 1: Messverfahren und Kennzeichnung. Beuth Verlag, Berlin, 2010 (Norm zurückgezogen).
- [18] UVSchV:2011-07-20: Verordnung zum Schutz vor schädlichen Wirkungen künstlicher ultravioletter Strahlung (UV-Schutz-Verordnung – UVSV). BGBl. I, S. 1412, 20. Juli 2011.
- [19] SCHEER (Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks): Opinion on Biological effects of UV-C radiation relevant to health with particular reference to UV-C lamps. European Commission, DG Health and Food Safety, Final Version, Luxemburg, 02. Februar 2017, ISBN 978-92-79-80132-7, Internet: https://ec.europa.eu/health/sites/default/files/scientific_committees/scheer/docs/scheer_o_002.pdf.
- [20] A. Beer: Bestimmung der Absorption des rothen Lichts in farbigen Flüssigkeiten. Annalen der Physik und Chemie, Band 86, Erstes Stück, 1852, S. 78 – 88.
- [21] DIN SPEC 91250:2017-04: Schutzhandschuhe gegen Laserstrahlung. Vornorm, Beuth Verlag, Berlin, 2017.
- [22] DIN EN 207:2017-05: Persönlicher Augenschutz – Filter und Augenschutzgeräte gegen Laserstrahlung (Laserschutzbrillen). Deutsche Fassung der EN 207:2017, Beuth Verlag, Berlin, 2017.
- [23] DIN EN 170:2003-01: Persönlicher Augenschutz – Ultraviolettfilter – Transmissionsanforderungen und empfohlene Anwendung. Deutsche Fassung der EN 170:2002, Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [24] DIN EN 169:2003-02: Persönlicher Augenschutz – Filter für das Schweißen und verwandte Techniken – Transmissionsanforderungen und empfohlene Anwendung. Deutsche Fassung der EN 169:2002, Beuth Verlag, Berlin, 2003.
- [25] M. Weber, C. Jeram, K. Schulmeister, E. Kitz, T. Rauch, J. Feichtinger, H. Basalka: Erfassung und Bewertung der direkten und indirekten UV-Exposition bei unterschiedlichen Schweißverfahren. Tagungsband der 50. Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V. für Deutschland und die Schweiz gemeinsam mit der BG ETEM Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (NIR 2018: Wellen – Strahlung – Felder), Dresden, 3. bis 6. September 2018., S. 75 – 85, Internet: https://laser-led-lamp-safety.seibersdorf-laboratories.at/fileadmin/uploads/intranet/dateien/le/laser/nir_2018_weber_et_al_direkte_und_indirekte_uv_exposition_schweissen.pdf.

- [26] M. Brose, H. Brüggemeyer, K. Dollinger, M. Graf, W. Horak, H. Jossen, E. Kitz, P. Knuschke, G. Ott, H.-D. Reidenbach, H. Siekmann, M. Steinmetz, T. Völker, D. Weiskop: Leitfaden „Ultraviolettstrahlung künstlicher Quellen“. Fachverband für Strahlenschutz e.V., Arbeitskreis "Nichtionisierende Strahlung" (AKNIR), FS-2013-157-AKNIR, Köln, März 2013, 46 Seiten, Internet: https://www.fs-ev.org/fileadmin/user_upload/04_Arbeitsgruppen/08_Nichtionisierende_Strahlung/02_Dokumente/Leitfaeden/fs-05-131-aknir_uv_strahlung-1.pdf.
- [27] DIN EN ISO 11611:2015-11: Schutzkleidung für Schweißen und verwandte Verfahren (ISO 11611:2015). Deutsche Fassung der EN ISO 11611:2015, Beuth Verlag, Berlin, 2015.
- [28] S. Bauer, G. Ott: Reflexion und Transmission von künstlicher optischer Strahlung an Schweißarbeitsplätzen. Abschlussbericht des Forschungsprojektes BAuA F2422, 1. Auflage, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, 2019.
- [29] DIN EN 13758-1: 2007-03: Textilien – Schutzeigenschaften gegen ultraviolette Sonnenstrahlung – Teil 1: Prüfverfahren für Bekleidungstextilien. Deutsche Fassung der EN 13758-1:2001+A1:2006, Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [30] DIN EN 13758-2: 2007-03: Textilien – Schutzeigenschaften gegen ultraviolette Sonnenstrahlung – Teil 2: Klassifizierung und Kennzeichnung von Bekleidung. Deutsche Fassung der EN 13758-2:2003+A1:2006, Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [31] Künstliche optische Strahlung - Eine Handlungshilfe für die Gefährdungsbeurteilung. Behörde für Gesundheit und Verbraucherschutz, Amt für Arbeitsschutz, Hamburg, Juni 2013, Internet: https://www.die-verbindungs-spezialisten.de/fileadmin/user_upload/Broschueren/Handlungshilfen/Kuenstliche_optische_Strahlung.pdf.
- [32] F. Kring: Schweißarbeiten: Wie Sie für gesunde und sichere Plätze sorgen. Safety Xperts, mediaforwork, ein Unternehmensbereich der VNR Verlag für die Deutsche Wirtschaft AG, Bonn, 2021, Internet: <https://www.safetyxperts.de/arbeitsschutz/gefaehrungsbeurteilung/gefahren-und-gefaehrungen/schweissarbeiten/>.
- [33] S. Reich: Impulsschweißverfahren – Wirtschaftlichkeit und Arbeitsschutz. Rehm Schweißtechnik, Gütersloh, 05/2016, Internet: https://www.metallbau-magazin.de/artikel/mb_Impulsschweissverfahren_2573444.html.
- [34] IFA der DGUV: Emission von UV-Strahlung beim Elektroschweißen. Institut für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (IFA) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV), Sankt Augustin, Dezember 2011, 13 Seiten, Internet: <https://publikationen.dguv.de/forschung/ifa/allgemeine-informationen/2547/emission-von-uv-strahlung-beim-elektroschweissen-information-des-ifa>.
- [35] DGUV Information 209-010: Lichtbogenschweißen. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV), Sachgebiet „Oberflächentechnik und Schweißen“ des Fachbereichs „Holz und Metall“ der DGUV, Berlin, März 2017, Internet: <https://publikationen.dguv.de/widgets/pdf/download/article/318>.
- [36] Handschweißer: Hautschutz beim Schweißen: 3 Tipps. 4. Januar 2021, Internet: <https://www.handschweissen.eu/hautschutz-beim-schweissen>.
- [37] M. Brose: Schreiben an die DGUV (Dr. Michael Schmidt) per elektronischer Mail vom 19.09.2018, Martin Brose, Technischer Referent Fachgebiet Strahlenschutz, Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (BG ETEM), Köln, 2018.

- [38] DIN EN ISO 11553-1:2021-01: Sicherheit von Maschinen – Laserbearbeitungsmaschinen – Teil 1: Anforderungen an die Lasersicherheit (ISO 11553-1:2020). Deutsche Fassung der EN ISO 11553-1:2020 + A11:2020, Beuth Verlag, Berlin, 2021.
- [39] DIN EN 12198-2:2008-11: Sicherheit von Maschinen – Bewertung und Verminderung des Risikos der von Maschinen emittierten Strahlung – Teil 2: Messverfahren für die Strahlenemission. Deutsche Fassung der EN 12198-2:2002+A1:2008, Beuth Verlag, Berlin, 2008.
- [40] DIN EN 14255-1:2005-06: Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung – Teil 1: Von künstlichen Quellen am Arbeitsplatz emittierte ultraviolette Strahlung. Deutsche Fassung der EN 14255-1:2005, Beuth Verlag, Berlin, 2005.
- [41] DIN EN 14255-2:2006-03: Messung und Beurteilung von personenbezogenen Expositionen gegenüber inkohärenter optischer Strahlung – Teil 2: Sichtbare und infrarote Strahlung künstlicher Quellen am Arbeitsplatz. Deutsche Fassung der EN 14255-2:2005, Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [42] Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Maschinenrichtlinie). Amtsblatt der Europäischen Union, L157/24 – L157/86, 09. Juni 2006.
- [43] ArbMedVV: Verordnung zur arbeitsmedizinischen Vorsorge. BGBl. I, Dezember 2008, S. 2768, zuletzt geändert durch Art. 3 Abs. 1 der Verordnung vom 15.11.2016 (BGBl. I S. 2549).