

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

**Untersuchungen zur Lasersicherheit für
Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen**

Stefan Rainer Johann Braunreuther

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen
Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Tim Lüth

Die Dissertation wurde am 25.06.2013 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 09.12.2013 angenom-
men.

Stefan Rainer Johann Braunreuther

**Untersuchungen zur Lasersicherheit für
Materialbearbeitungsanwendungen mit
brillanten Laserstrahlquellen**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 283

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2013

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2014

ISBN 978-3-8316-4348-6

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München. Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern des Instituts, für die wohlwollende Förderung und die großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Tim Lüth, dem Leiter des Lehrstuhles für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik an der Technischen Universität München, bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferates und für die aufmerksame Durchsicht der Arbeit.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Instituts, bei meinen Freunden sowie bei meinen ehemaligen Studenten Daniel Roschanek, Peter Föhr, Adrian Ehrsam, Bernhard Horn, Philip Scherer, Devin Basbilar, Kamil Rogotz und Maximilian Stephan, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Besonderer Dank gilt Stefan Krug, Markus Schweier, Jan Musiol, Robert Wiedenmann und Harald Kleinschmid für die kritische Begutachtung des Manuskriptes und für die vielen wertvollen Anregungen.

Ich danke ebenso meinen Eltern Sylvia und Johann Braunreuther, die mir das Studium ermöglichten und somit den Grundstein für meine Promotion legten, sowie meiner Freundin Tanja Hinrichsen, die mich stets zur Arbeit an der Dissertation anhielt.

Garching, im Januar 2014

Stefan Braunreuther

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungsverzeichnis	VII
Griechische Buchstaben	XI
Lateinische Buchstaben	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Ziel der Arbeit	4
1.3 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise	4
2 Grundlagen	7
2.1 Laserstrahlung	7
2.1.1 Erzeugung	7
2.1.2 Eigenschaften und Propagation	8
2.1.3 Strahl-Stoff-Wechselwirkung	9
2.2 Laser-Materialbearbeitung	16
2.2.1 Wärmeleitungsschweißen	16
2.2.2 Tiefschweißschwelle	17
2.2.3 Tiefschweißen	19
2.2.4 Abtragen	20
2.3 Biologische Wirkung von Laserstrahlung	20
2.4 Rechtsnormen	22
2.4.1 Allgemeines	22
2.4.2 EG-Richtlinien	23
2.4.3 Nationales Recht	23
2.4.4 Berufsgenossenschaftliche Vorschriften	23
2.4.5 Normen	24
2.5 Risiko und Risikoakzeptanz	25
2.6 Risikobeurteilung	29

2.6.1	Methode der Risikobeurteilung	29
2.6.2	Grenzenbestimmung	30
2.6.3	Gefährdungsidentifikation	30
2.6.4	Risikoeinschätzung	31
2.6.5	Risikobewertung	32
2.6.6	Risikominderung	32
2.7	Stand der Forschung und Technik	34
2.7.1	Allgemeines	34
2.7.2	Technische Laserschutzmaßnahmen	35
2.7.3	Organisatorische Laserschutzmaßnahmen	41
2.7.4	Persönliche Laserschutzmaßnahmen	41
2.7.5	Laserstrahlungswirkung und -quantifizierung	42
2.8	Defizitanalyse und Handlungsbedarf	44
3	Lösungsansatz	47
3.1	Zentrales aktives Lasersicherheitskonzept	47
3.2	Wirtschaftliche Betrachtung	47
3.3	Ableitung von Betrachtungsbereichen	50
4	Charakterisierung der Streustrahlung bei Laserstrahl-Schweißprozessen	53
4.1	Zweck	53
4.2	Vorgehensweise	53
4.3	Modellbildung der Propagation von Reflexionen	54
4.3.1	Allgemeines	54
4.3.2	Beschreibung des einfallenden Laserstrahls	54
4.3.3	Leistungsverhältnisse im Brennfleck	56
4.3.4	Auswirkungen von Prozesszonengeometrien auf Reflexionen	56
4.3.5	Leistungsverhältnisse in den reflektierten Anteilen	57
4.3.6	Intensitätsverhältnisse der Reflexionen in Polarkoordinaten	58

4.3.7	Gesamtmodell zur Propagation der Streustrahlung	61
4.4	Experimentelle Untersuchung und Messung	61
4.4.1	Versuchsaufbau	61
4.4.2	Messtechnik	63
4.5	Messdaten	67
4.6	Vergleich und Bewertung	70
4.6.1	Bestimmung der Parameter	70
4.6.2	Validierung	72
4.7	Fazit	75
5	Auslegungsmethode für Hohlkammer-Schutzwände	77
5.1	Zweck	77
5.2	Vorgehensweise	77
5.3	Schutzwandbelastung durch Laserstrahlung	78
5.3.1	Strahl-Stoff-Wechselwirkung an der Schutzwand	78
5.3.2	Laserstrahlungs-Intensitätsprofil an der Schutzwand	81
5.3.3	Energieeintrag	81
5.3.4	Erwärmung	83
5.3.5	Wärmeleitung	83
5.3.6	Thermische Strahlung	83
5.3.7	Schmelzen und Verdampfen	84
5.3.8	Konvektion	84
5.3.9	Durchbrandausbildung	84
5.4	Gesamtmodell zur Schutzzeitberechnung	90
5.5	Einflüsse auf die Berechnungsergebnisse	94
5.6	Validierung der Auslegungsmethode	95
5.6.1	Experimentelle Untersuchung und empirisches Modell	95
5.6.2	Berechnung	105
5.6.3	Vergleich und Beurteilung	109

5.7	Betrachtung anderer Strahlformen	112
5.8	Fazit	114
6	Zentrales aktives Sensorkonzept	115
6.1	Zweck	115
6.2	Funktionsprinzip	115
6.3	Soll-Ist-Überprüfung	116
6.3.1	Sensorprinzip	116
6.3.2	Bildauswertung	120
6.3.3	Soll-Pixelkoordinaten	122
6.3.4	Flexibilität zur Laufzeit	124
6.3.5	Überwachung der Führungskinematik	125
6.3.6	Auswertelogik	126
6.3.7	Kalibrierung	127
6.4	Funktionsprototyp und Funktionsnachweis des Sensorkonzepts	127
6.5	Sicherheitsgerichtete Auslegung	131
6.5.1	Allgemeines	131
6.5.2	Sicherheitsmaßnahmen	132
6.5.3	Sicherheitstechnische Kennzahlen	135
6.5.4	Angestrebte Sicherheitskategorie	138
6.5.5	Bewertung des Systems	139
6.6	Fazit	141
7	Zusammenfassung	143
8	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	145
9	Literaturverzeichnis	147
10	Firmen-, Einrichtungs- und Institutsverzeichnis	169
Anhang		173
A1	Gemessene Schutzzeiten	173
A2	Intensitäts-Mittelwertkarten	177
A3	Intensitäts-Standardabweichungskarten	183

A4	Kalorimetermesswerte	189
A5	Prozesszonengeometrien	192

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
ALARP	as low as reasonably practicable (so niedrig, wie vernünftigerweise praktikabel)
BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BGG	berufsgenossenschaftliche Grundsätze
BGI	berufsgenossenschaftliche Informationen
BGR	berufsgenossenschaftliche Regeln
BGV	berufsgenossenschaftliche Unfallverhütungsvorschriften
bzw.	beziehungsweise
CCF	common cause failures (Ausfälle infolge gemeinsamer Ursache)
CMOS	complementary metal oxide semiconductor (komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter)
cw	continuous wave (kontinuierlich emittierend)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DC	Diagnosedeckungsgrad
DC _{avg}	durchschnittlicher Diagnosedeckungsgrad
DOF	degrees of freedom (Freiheitsgrade)
EG	Europäische Gemeinschaft
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
FIT	failure in time (Ausfälle in 10 ⁹ Stunden)
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse

Abkürzung	Bedeutung
FTCS	forward time, centered space (Lösungsverfahren; zeitlich voran, räumlich zentriert)
GAMAB	globalement au moins aussi bon (im Allgemeinen mindestens so gut)
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LED	lichtemittierende Diode
LLK	Lichtleitkabel
MEM	minimale endogene Mortalität
MTTF	mittlere Zeit bis zum Ausfall
MTTF _d	mittlere Zeit bis zum gefahrbringenden Ausfall
MZB	maximal zulässige Bestrahlung
Nd	Neodym
PC	Personal Computer (Einzelplatzrechner)
PIN	positive intrinsic negative (positiv intrinsisch negativ); hier: Anwendung bei PIN-Fotodiode; Funktion: größere Band- breite gegenüber einer PN-Fotodiode
PL	Performance-Level
PL _r	geforderter Performance-Level
PSA	persönliche Schutzausrüstung
pw	pulsed wave (gepulst emittierend)
ROI	region of interest (Suchregion)
TS	Tiefschweißen
TUM	Technischen Universität München

Abkürzung	Bedeutung
USB	Universal Serial Bus (Rechnerschnittstelle)
WLS	Wärmeleitungsschweißen
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat
YLF	Yttrium-Lithium-Fluorid
Yt	Ytterbium

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	°	Umlaufwinkel
α_L	°	Einstrahl-Umlaufwinkel des Laserstrahls
$\alpha_{\bar{A}}$	-	Absorptionskoeffizient
$\alpha_{\bar{A},\perp}$	-	Absorptionskoeffizient für senkrecht polarisierte Strahlung
$\alpha_{\bar{A},\parallel}$	-	Absorptionskoeffizient für parallel polarisierte Strahlung
$\alpha_{\bar{A},\odot}$	-	Absorptionskoeffizient für parallel unpolarisierte Strahlung
$\alpha_{\bar{A},Ers}$	-	Ersatzabsorptionskoeffizient
β	°	Winkel zur Flächennormale
β_L	°	Einstrahlwinkel des Laserstrahls gegenüber der Flächennormale
δ_{SR}	°	abweichende Auslenkung der spiegelnden Reflexion
ε	-	Emissionskoeffizient
η	-	Brechungsindex
θ_0	mrاد	Laserstrahl-Fernfeld-Divergenzwinkel
κ	-	Absorptionsindex
λ	nm	Wellenlänge
λ_d	FIT	gefährbringende Ausfallrate
λ_{dd}	FIT	erkennbare gefährbringende Ausfallrate
λ_{th}	W/m·K	Wärmeleitzahl
μ	s	Mittelwert; hier bzgl. Schutzzeiten
π	-	Kreiszahl
ρ	kg/m ³	Dichte

Symbol	Einheit	Bedeutung
ρ_{St}	kg/m ³	Dichte des Werkstoffs 1.0332 (unlegierter Stahl)
ρ_{Al}	kg/m ³	Dichte des Werkstoffs 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung)
σ	s	Standardabweichung; hier bzgl. Schutzzeiten
σ_A	N/m	Oberflächenspannung
$\sigma_{A,St}$	N/m	Oberflächenspannung für die Schmelze des Werkstoffs 1.0332 (unlegierter Stahl)
$\sigma_{A,Al}$	N/m	Oberflächenspannung für die Schmelze des Werkstoffs 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung)
σ_{SB}	W/m ² ·K ⁴	Stefan-Boltzmann-Konstante
χ	-	Verzeichnungsfaktor

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	m^2/s	Temperaturleitfähigkeit
A	mm^2	Fläche
$[A]$	-	Abbildungsmatrix
\bar{A}	-	Absorptionsgrad
\bar{A}_I	-	Absorptionsgrad innerhalb r_G
\bar{A}_A	-	Absorptionsgrad außerhalb r_G
b	mm	Hohlkammerbreite
\tilde{b}	mm	Hilfsvariable der Regression
b_F	-	Weibull-Formparameter
$b_{F,\text{Einzel}}$	-	Weibull-Formparameter für die Einzelplatten-Schutzwände
$b_{F,\text{Hohl}}$	-	Weibull-Formparameter für die Hohlkammer-Schutzwände
c_p	$\text{J/kg}\cdot\text{K}$	spezifische Wärmekapazität
c_{db}	mm^{-2}	Koeffizient der Regression
c_{pb}	$\text{kW}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$	Koeffizient der Regression
c_{pd}	$\text{kW}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$	Koeffizient der Regression
$c_{wd,\text{Alu}}$	mm^{-1}	Koeffizient der Regression, gültig für den Werkstoff 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung)
$c_{wd,\text{Stahl}}$	mm^{-1}	Koeffizient der Regression, gültig für den Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl)
$c_{wp,\text{Alu}}$	kW^{-1}	Koeffizient der Regression, gültig für den Werkstoff 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung)
$c_{wp,\text{Stahl}}$	kW^{-1}	Koeffizienten der Regression, gültig für den Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl)

Symbol	Einheit	Bedeutung
C_1	N/m ²	Integrationskonstante
C_2	N/m	Integrationskonstante
C_3	N	Integrationskonstante
d	mm	Materialdicke
\tilde{d}	mm	Hilfsvariable der Regression
d_0	μm	86%-Laserstrahl-Taillendurchmesser
d_{BF}	mm	Brennfleck-Durchmesser
df	-	Qualitätsverlust bei einer Reflexion
df_{RR}	-	Qualitätsverlust bei der rückspiegelnden Reflexion
df_{SR}	-	Qualitätsverlust bei der spiegelnden Reflexion
d_R	mm	Distanz eines Punkts einer Reflexion zu ihrem Mittelpunkt
d_{SR}	mm	Distanz eines Punkts der spiegelnden Reflexion zu ihrem Mittelpunkt
d_{RR}	mm	Distanz eines Punkts der rückspiegelnden Reflexion zu ihrem Mittelpunkt
e_p	kW ⁻¹	Koeffizient der Regression
e_z	mm ⁻¹	Koeffizient der Regression
$E_{Strecke}$	kJ/m	Streckenenergie
f	mm	Brennweite
Δf	%	Gesamtmessabweichung
Δf_s	%	gesamte systematische Messabweichung
Δf_z	%	gesamte zufällige Messabweichung
$\Delta f_{s,i}$	%	einzelne systematische Messabweichung

Symbol	Einheit	Bedeutung
$\Delta f_{z,i}$	%	einzelne zufällige Messabweichung
g	m/s ²	Ortsfaktor/Erdbeschleunigung
g_N	s ⁻¹	Dichtefunktion einer Normalverteilung, hier bzgl. Schutzzeiten
g_W	s ⁻¹	Dichtefunktion einer Weibull-Verteilung, hier bzgl. Schutzzeiten
G_N	-	Verteilungsfunktion einer Normalverteilung, hier bzgl. Schutzzeiten
G_W	-	Verteilungsfunktion einer Weibull-Verteilung, hier bzgl. Schutzzeiten
h	mm	Schmelzhöhe
h_{krit}	mm	kritische Schmelzhöhe
h_S	J/kg	Schmelzenthalpie
h_V	J/kg	Verdampfungsenthalpie
$[H]_{B-BF}$	-	Transformationsmatrix; Basis zu Brennfleck
$[H]_{B-R}$	-	Transformationsmatrix; Basis zu Roboterflansch
$[H]_{R-S}$	-	Transformationsmatrix; Roboterflansch zu Sensor
$[H]_{S-BF}$	-	Transformationsmatrix; Sensor zu Brennfleck
i	-	Laufvariable
I	W/cm ²	Strahlungsintensität
I_0	W/cm ²	Strahlungsintensität in der Strahltaille
I_{max}	W/cm ²	maximale Strahlungsintensität
I_G	W/cm ²	Schwellintensität zum Tiefschweißen
I_{DR}	W/cm ²	Strahlungsintensität der diffusen Reflexion
I_L	W/cm ²	Laserstrahlungsintensität

Symbol	Einheit	Bedeutung
$I_{\bar{R},ges}$	W/cm ²	Strahlungsintensität der Gesamtreflexion
I_{RR}	W/cm ²	Strahlungsintensität der rückspiegelnden Reflexion
I_{SR}	W/cm ²	Strahlungsintensität der spiegelnden Reflexion
K	€	Kosten
K_{da}	€	Kosten eines dezentralen aktiven Schutzkonzepts
K_p	€	Kosten eines passiven Schutzkonzepts
K_{za}	€	Kosten eines zentralen aktiven Schutzkonzepts
l_b	mm ⁻¹	Koeffizient der Regression
l_d	mm ⁻¹	Koeffizient der Regression
l_k	-	Koeffizient der Regression
l_p	kW ⁻¹	Koeffizient der Regression
l_z	mm ⁻¹	Koeffizient der Regression
$l_{w,Alu}$	-	Koeffizient der Regression, gültig für den Werkstoff 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung)
$l_{w,Stahl}$	-	Koeffizient der Regression, gültig für den Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl)
L	m	Abstand
m	kg	Masse
n	-	Anzahl; Ganzzahl
ND	-	Neutraldichte
o	s	Koeffizient der Regression
p_h	N/mm ²	hydrostatischer Druck
p_A	N/mm ²	oberflächenspannungsbedingter Druck
\tilde{P}	kW	Hilfsvariable der Regression

Symbol	Einheit	Bedeutung
P_A	kW	Laserleistung außerhalb von r_G
$P_{\bar{A}}$	kW	absorbierte Laserleistung
P_{DR}	kW	Laserleistungsanteil der diffusen Reflexion
Pe	-	Péclet-Zahl
P_I	kW	Laserleistung innerhalb von r_G
P_L	kW	Laserleistung
$P_{\bar{R}}$	kW	reflektierte Laserleistung
P_{RR}	kW	Laserleistungsanteil der rückspiegelnden Reflexion
P_{SR}	kW	Laserleistungsanteil der spiegelnden Reflexion
P_T	kW	transmitteerte Laserleistung
\dot{q}_{ein}	W/m ³	zusätzlicher Wärmestrom pro Volumeneinheit
q_b	mm ⁻²	Koeffizient der Regression
q_p	kW ⁻²	Koeffizient der Regression
q_z	mm ⁻²	Koeffizient der Regression
$\dot{Q}_{\bar{A}}$	W	absorptionsbedingter Wärmestrom
\dot{Q}_K	W	konvektionsbedingter Wärmestrom
\dot{Q}_{th}	W	strahlungsbedingter Wärmestrom
\dot{Q}_{λ}	W	wärmeleitungsbedingter Wärmestrom
r	μm	Strahlradius
r_{krit}	mm	kritischer Aufschmelzradius
Δr	mm	Diskretisierungsweite
r_0	mm	86%-Strahlradius in der Strahltaille
$r_{86\%}$	mm	86%-Strahlradius

Symbol	Einheit	Bedeutung
$r_{86\%,RR}$	μm	86%-Strahlradius der rückspiegelnden Reflexion
$r_{86\%,SR}$	μm	86%-Strahlradius der spiegelnden Reflexion
r_G	mm	Strahlradius bei I_G
r_{krit}	mm	kritischer Aufschmelzradius
r_V	Pixel	Abstand zum Verzeichnungszentrum
R	mm	Hemisphärenradius
$R_{t,Einzel}^2$	-	Bestimmtheitsmaß der Regression der Schutzzeiten der Einzelplatten-Schutzwände
$R_{t,Hohl}^2$	-	Bestimmtheitsmaß der Regression der Schutzzeiten der Hohlkammer-Schutzwände
$R_{bF,Einzel}^2$	-	Bestimmtheitsmaß der Regression der Weibull-Formparameter der Einzelplatten-Schutzwände
$R_{bF,Hohl}^2$	-	Bestimmtheitsmaß der Regression der Weibull-Formparameter der Hohlkammer-Schutzwände
\bar{R}	-	Reflexionsgrad
$\bar{R}_{D,I}$	-	Reflexionsgrad der diffusen Reflexion für $r < r_G$
$\bar{R}_{D,A}$	-	Reflexionsgrad der diffusen Reflexion für $r \geq r_G$
R_k	m	Kinematikreichweite
$R_{K,ges}$	m	Gesamtkrümmungsradius
$R_{K,x}$	m	Krümmungsradius um die x-Achse
$R_{K,y}$	m	Krümmungsradius um die y-Achse
S	-	Sicherheit
S_{za}	€	Sensorkosten, zentrales aktives Schutzkonzept
S_{da}	€/m ²	flächenbezogene Sensorkosten, dezentrales aktives Schutzkonzept

Symbol	Einheit	Bedeutung
SPP	mm·mrad	Strahlparameterprodukt
SW_a	€/m ²	flächenbezogene passive Schutzwandkosten, aktives Schutzkonzept
SW_p	€/m ²	flächenbezogene passive Schutzwandkosten, passives Schutzkonzept
S_z	mm	Zusatzstrecke
t	s	Zeit
Δt	ms	Zeitschritt
$t_{99\%}$	s	zu 99% sichere Schutzzeit
t_{Einzel}	s	Schutzzeit einer Einzelplatte
t_{Hohl}	s	Schutzzeit einer Hohlkammer-Schutzwand
t_m	s	Aufschmelzzeit
t_s	s	Schutzzeit
t_0	s	Zeitpunkt des Versagensbeginns einer Laserschutzwand (Lageparameter bei Weibull-Verteilung)
t_1, t_2, t_3	s	aufeinanderfolgende Zeitpunkte
T	K	Temperatur
ΔT	K	Temperaturunterschied
T_c	s	charakteristische Lebensdauer
T_s	K	Schmelztemperatur
T_v	K	Verdampfungstemperatur
T_∞	K	Umgebungstemperatur
\bar{T}	-	Transmissionsgrad
u	mm/s	Abtragsgeschwindigkeit

Symbol	Einheit	Bedeutung
U	J	innere Energie
ΔU	J	Unterschied in der inneren Energie
$v_{Schweiß}$	m/min	Schweißgeschwindigkeit
$[V]$	-	Verzeichnungsmatrix
X	-	Punkt im Raum
X_{BF-S-K}	-	Brennfleck-Soll-Koordinaten
X_{P-S-K}	-	Pixel-Soll-Koordinaten
X_G	-	Zentrum des nach Gauß verteilten Laserstrahls
X_{RR}	-	Zentrum des rückspiegelnd reflektierten Laserstrahls
X_{SR}	-	Zentrum des spiegelnd reflektierten Laserstrahls
x, y, z	mm	Koordinaten
x_{Min}	mm	Koordinate des lokalen Minimums der Funktion der Schmelzekontur
\bar{z}	mm	Hilfsvariable der Regression
z_{Min}	mm	Wert der Funktion der Schmelzekontur am lokalen Minimum
z_1, z_2	mm	aufeinanderfolgende Abstände vom Laserfokuspunkt
z_r	mm	Rayleigh-Länge
sonstige:		
\parallel	-	parallel
\perp	-	senkrecht
\odot	-	zirkular

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die wirtschaftliche Fertigung qualitativ hochwertiger Produkte erfordert leistungsfähige Bearbeitungstechnologien (BRECHER ET AL. 2009). Laseranlagen bzw. Laserprozesse zur Materialbearbeitung werden aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften, wie einer hohen Prozessgeschwindigkeit und einer präzisen Energieeinbringung, verstärkt in der industriellen Massenfertigung eingesetzt. Der technologische Fortschritt in der Laserfertigungstechnologie zeichnet sich sowohl durch stetig höhere Laserleistungen als auch durch verbesserte Strahlqualitäten aus (THIEME 2008, KESSLER 2009). Ihre Kombination wird mit der *Brillanz* ausgedrückt. Die heute bereits verfügbaren brillanten Strahlquellen ermöglichen große Arbeitsabstände und somit die Übertragung hoher Laserstrahlungsintensitäten über weite Entfernungen im Freistrah. Bei einer maximalen Laserleistung von derzeit bis zu 30 kW und bei gleichzeitiger Fokussierung der Laserstrahlung auf einige zehn bis wenige Hundert Mikrometer sind Arbeitsabstände im Bereich mehrerer Meter möglich (vgl. Abbildung 1).

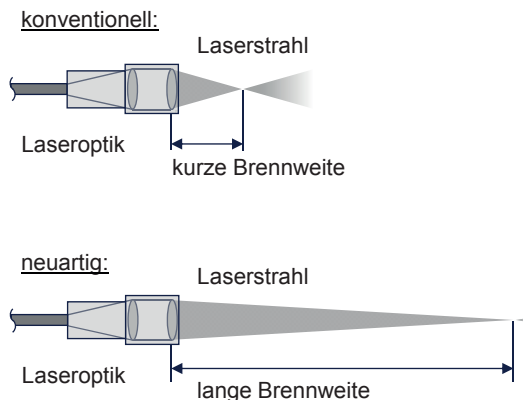


Abbildung 1: Gesteigerte Bearbeitungsreichweite durch lange Brennweiten bei brillanten Lasersystemen

Die typischen Wellenlängen der modernen Laserstrahlquellen liegen im Nahinfrarot-Bereich. Aus diesem Grund kann ihre Laserstrahlung sehr gut mittels Lichtleitkabeln (LLK) über weite Entfernungen und sehr flexibel geleitet werden. Durch die Verfügbarkeit von Laserstrahlquellen mit diesen Eigenschaften lassen sich hochflexible Strahlpositionierungssysteme aufbauen. (THIEME 2008, ZÄH ET AL. 2008, BRAUNREUTHER 2009, ZÄH ET AL. 2009A, ZÄH ET AL. 2009B, ZÄH & BRAUNREUTHER 2010A)

Ihren Einsatzort finden die über eine Distanz operierenden, sogenannten Remote-Laser-Materialbearbeitungsanlagen zumeist in der Verarbeitung von Metallblechen. Die Spanne reicht von Dünnblechen für die Herstellung von beispielsweise Konsumgütern und Automobilen bis hin zu Dickblechen im Schiffs- und im Schienenfahrzeugbau. Zunehmend Einzug erhält der Laserstrahl ebenfalls als Bearbeitungswerkzeug in der Luftfahrzeugindustrie. (BRAUNREUTHER ET AL. 2012)

Die neuen Möglichkeiten führen, neben den produktionstechnischen Vorteilen, zu einem erhöhten Gefährdungspotential. Der Laserstrahl kann nahezu jeden Ort innerhalb einer Laseranlage, beispielsweise hervorgerufen durch einen Softwarefehler oder durch eine Fehlbedienung, fokusnah oder sogar fokussiert treffen. Die hohe Strahlungsintensität, welche ursprünglich zur Materialbearbeitung bestimmt war, kann dann eine die Anlage umhausende Schutzwand beschädigen (HEBERER 2009A, ZÄH ET AL. 2009B). Bei konventionellen Systemen, wie beispielsweise bei Flachbettanlagen oder bei handgeführten Lasersystemen mit eingeschränkten Strahlrichtungen oder gar ortsfest montierten Optiken, ist dieses Gefährdungspotential nicht in diesem Ausmaß vorhanden. Sicherheitstechnisch sind diese konventionellen Anlagen gut beherrschbar (vgl. Abbildung 2). Mit der steigenden Anzahl an räumlichen Freiheitsgraden eines Laserstrahls geht meist eine Vergrößerung des Arbeitsabstands einher. Diese Kombination ist, unter den Aspekten der Lasersicherheit, kritisch zu betrachten. *Lasersicherheit* ist in diesem Zusammenhang als die Vermeidung von laserstrahlungsbezogener Gefährdung von Menschen zu verstehen.

Positionierungs- art	Translation			Translation und Rotation
	Optik fest (0 DOF)	Optik fliegend (≤ 3 DOF)		3D-Optik (4 - 6 DOF)
Flexibilität/ Positionierung des Brennflecks	Werkstück bewegt	Werkstück ruhend	Werkstück bewegt	Werkstück ruhend
Gefährdungs- potenzial	gering	mittel		hoch
Erläuterung	Brennfleckposition und Laserstrahlorien- tierung konstant	Brennfleckposition variabel, Laserstrahlorien- tierung eingeschränkt		flexible Brennfleck- position im Raum

Abbildung 2: Sicherheitstechnische Einordnung verschiedener Applikationsarten von Laserstrahlanlagen (in Anlehnung an STEEN 2003)

Bei der Konzeption von Remote-Laser-Materialbearbeitungsanlagen mit großen Bearbeitungsreichweiten wird die Thematik der Lasersicherheit zu einer Kernfrage. Die wesentliche Lasersicherheitsmaßnahme bei Lasersystemen in der Materialbearbeitung ist, wie in der BGFE (2007) und der Normengruppe DIN EN 60825 ff. vorgeschrieben, eine Umhausung. Sie soll den Anlagenbediener und Dritte vor der Laserstrahlung der Anlage schützen.

Konventionelle Umhausungen sind, vor allem aufgrund der heute möglichen hohen Strahlungsintensitäten auf den Schutzwänden, an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit. Sie halten bei fokussierter Bestrahlung meist gerade noch für wenige Sekunden stand (BRAUNREUTHER 2009, ZÄH ET AL. 2009A). In dieser Zeitspanne muss der Anlagenbediener den Not-Halt der Anlage einleiten, ansonsten tritt die Laserstrahlung aus. Durch die hohe Strahlungsintensität und die Wellenlänge im Nahinfrarot-Bereich ist in einem solchen Fall, in der Regel bis in Abstände von mehreren Kilometern, eine akute Erblindungs- bzw. Verletzungsgefahr gegeben (BGFE 2007, BGETF 2009). Die geforderte Umhausung bietet dann keinen adäquaten Schutz. In Bezug auf einen Fehlerfall mit fokussierter Bestrahlung täuscht sie gar eine nicht vorhandene Sicherheit vor, da der Mensch die Wand nicht passieren, die Strahlung diese Barriere jedoch leicht überwinden kann.

Der eingangs erwähnte Trend der steigenden Laseranlagenanzahlen in der Laser-Materialbearbeitung (THIEME 2008, KESSLER 2009) führt auch zu einer stetig größer werdenden Zahl von gefährdeten Personen. Diese gilt es durch präventive Sicherheitsmaßnahmen zu schützen.

Die immer größer werdenden Arbeitsräume durch die wachsenden Arbeitsabstände ziehen einen überproportionalen Zuwachs der Umhausungsoberfläche nach sich. Hohe Laserstrahlungsintensitäten benötigen große Wandstärken. Daraus ergibt sich ein hoher Materialeinsatz für die Schutzwände. Die folglich resultierenden Kosten bewegen Unternehmen in der Regel dazu, die Sicherheitsvorkehrungen nicht adäquat auszuführen.

Aus diesen Problemstellungen ergibt sich ein Handlungsbedarf, damit moderne Laser-Materialbearbeitungsanlagen mit brillanten Laserstrahlquellen sicher in der industriellen Fertigung eingesetzt werden können.

1.2 Ziel der Arbeit

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein technisches Sicherheitskonzept und zugehörige Auslegungsmethoden für die laserstrahlungsspezifische Gefahr brillanter Laserstrahlquellen und zugehöriger Anlagen zur Verfügung zu stellen. Dies bedeutet eine neuartige Technologie auszuarbeiten, damit die gefahrbringende Strahlung niemals auf Menschen treffen kann. Eine wesentliche Randbedingung ist dabei die geforderte Wirtschaftlichkeit. Das neue Sicherheitskonzept soll nicht zu Mehrkosten im Vergleich zu konventionellen Lösungen führen. Inwieweit hier neue Technologien, der bereits vorhandene Stand der Technik oder die Kombination dieser untereinander Verwendung finden, muss dem Anwender nach einer entsprechenden Opportunitätsbeurteilung überlassen bleiben. Daher ist ein sekundäres Ziel, die Lasersicherheit auch bei bereits beherrschbaren Systemen zu steigern bzw. zu helfen, sie gezielter herzustellen. Allgemeine, nicht laserstrahlungsspezifische Gefahren, wie beispielsweise die elektrische oder die thermische Einwirkung auf Menschen, werden in dieser Arbeit dagegen nicht berücksichtigt.

1.3 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise

Zum besseren Verständnis des Kerns der Arbeit werden im folgenden Kapitel ausgewählte Grundlagen dargestellt. Es wird zunächst auf das zentrale Element bei der Laserstrahl-Materialbearbeitung, die Laserstrahlung selbst, sowie deren Erzeugung und deren Eigenschaften eingegangen. Die physikalischen Vorgänge beim Auftreffen der Strahlung auf Materie, d. h. die Reflexion, die Transmission, die Absorption und der nachgeschaltete Wärmetransport, sind essentiell. Sie machen eine Materialbearbeitung durch Laserstrahlung erst möglich. Im positiven Fall kann damit ein

Werkstück bearbeitet, beispielsweise geschweißt, werden. Im negativen Fall hingegen erfolgt eine Beschädigung der Anlagenumhausung. Ein Strahlungsdurchbruch kann dabei die Folge sein. Die physikalischen Effekte an der Schutzwand sind dabei dieselben wie auf dem Werkstück. Aus diesen Gründen sind die Laserregime, das Wärmeleitungs- und das Tiefschweißen sowie das Laserstrahlabtragen, näher zu beleuchten. Anschließend wird die biologische Wirkung von Laserstrahlung erläutert. Sie ist der Grund für die Notwendigkeit von Sicherheitstechnik an Laseranlagen. Diese Notwendigkeit ist überdies in Rechtsnormen verankert. Die Wichtigsten, d. h. diejenigen, die die Laserstrahlung betreffen, werden vorgestellt. Die konkrete Ausgestaltung und die Güte der Sicherheitstechnik werden über das akzeptierte Restrisiko bestimmt. Es werden Methoden geschildert, dieses zu bestimmen und daraus wiederum die geforderte Sicherheit zu definieren. Die Rechtsnormen schreiben – nicht nur für Laseranlagen – eine Risikobeurteilung zur systematischen und umfassenden Herstellung der geforderten Sicherheit vor. Da diese im Schadensfall juristisch beurteilt wird, wird das zugehörige normativ definierte Erstellungsschema erläutert. Eine weitere wesentliche Grundlage für die Arbeit stellt der Stand der Technik und der Forschung dar. Die Schwerpunkte liegen hier auf den Möglichkeiten, die Laserstrahlung mittels passiven Opfermaterialien abzuschirmen, durch Sensoren in einer Umhausung einen Fehlerfall zu detektieren und daraufhin die Anlage abzuschalten, wie auch auf medizinischen Aspekten. Bisherige Arbeiten werden diskutiert und das Defizit gegenüber dem Ziel dieser Arbeit herausgestellt.

Im Anschluss an die Grundlagen wird in Kapitel 3 der Handlungsbedarf in Bezug auf die Sicherheit an hochbrillanten Laseranlagen hergeleitet. Es wird ein unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten zu erstellendes, zentrales aktives Lasersicherheitskonzept benötigt. Hierfür sind ein neues Sensorkonzept samt Auslegungsrichtlinien und ein Schutzzeitmodell für die dazu verwendeten passiven Hohlkammerschutzwände nötig. Da von Laserschweißprozessen auch immer intensive Streustrahlung ausgeht, wird auch ein Modell zu deren Charakterisierung und Quantifizierung benötigt.

Die Kapitel 4 bis 6 bilden den Kern der Arbeit. Es werden die drei im Handlungsbedarf genannten Themen bearbeitet. In Kapitel 4 wird das Modell zur Charakterisierung der Propagation von Streustrahlung bei Laserprozessen, in Kapitel 5 die Auslegungsmethode für passive Hohlkammer-Schutzwände und in Kapitel 6 das zentrale aktive Sensorkonzept dargestellt.

In Kapitel 7 werden die Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst. Die im Rahmen dieser Arbeit entstandenen und eingeflossenen Studienarbeiten sind in Kapitel 8

gelistet, während in Kapitel 9 die verwendete Literatur angegeben ist. Abschließend sind im Anhang der Arbeit die zugrundeliegenden Messergebnisse dokumentiert, soweit dies nicht im Hauptteil geschehen ist.

2 Grundlagen

2.1 Laserstrahlung

2.1.1 Erzeugung

Laserstrahlung wird in einem laseraktiven Medium einer Laserstrahlquelle erzeugt. In diesem sind laseraktive Teilchen, wie beispielsweise Ionen oder Moleküle, enthalten. Eine äußere Anregung des festen, flüssigen oder gasförmigen laseraktiven Mediums, durch eine optische Bestrahlung, durch Elektronen- oder Teilchenstöße, durch ein elektrisches Feld oder durch einen chemischen Prozess, hebt einen Teil der aktiven Teilchen auf ein höheres Energieniveau an. Dieser Vorgang wird als *Pumpen* bezeichnet. Ein angeregtes Teilchen wird mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit durch eine spontane Emission eines Photons auf ein niedrigeres Energieniveau zurückkehren. Dieses Photon kann mit einem weiteren angeregten Teilchen wechselwirken und es dadurch ebenfalls zum Rückgang in ein energetisch tieferes Niveau stimulieren. Diese Strahlungsverstärkung (original „Lichtverstärkung“) durch die stimulierte Emission von Strahlung, deren Theorie bereits EINSTEIN (1916) erarbeitete und die von MAIMAN (1960) erstmals realisiert wurde, wird als *Laserprozess* (engl. light amplification of stimulated emission of radiation) bezeichnet. Ein Einfachdurchgang der Strahlung durch das laseraktive Medium reicht nach GRAF (2009) nur in den seltensten Fällen für eine weitere Verwendung aus. Mithilfe eines optischen Resonators, einer speziellen Anordnung von Spiegeln, kann die erzeugte Strahlung, abgesehen von Verlusten, beliebig oft durch das laseraktive Medium gesendet und der Laserprozess somit wiederholt durchgeführt werden. Durch das ständige Pumpen des laseraktiven Mediums werden permanent aktive Teilchen auf entsprechende Energieniveaus gehoben. Ein Teil der im Resonator befindlichen Strahlung wird aus dem System ausgekoppelt. Er verlässt ihn als Laserstrahlung über einen teildurchlässigen Spiegel und kann der Verwendung zur Verfügung gestellt werden (vgl. Abbildung 3).

Laserstrahlquellen haben zwei grundsätzlich verschiedene Betriebsarten. Einerseits können sie kontinuierlich angeregt werden und im Dauerstrichbetrieb (engl. continuous wave, cw) Laserstrahlung emittieren, andererseits kann die Strahlung die Quelle auch in Form von Pulsen (engl. pulsed wave, pw) verlassen. Diese Arbeit beschränkt sich auf cw-Laserstrahlquellen, da für die Makro-Materialbearbeitung fast ausschließlich diese eingesetzt werden.

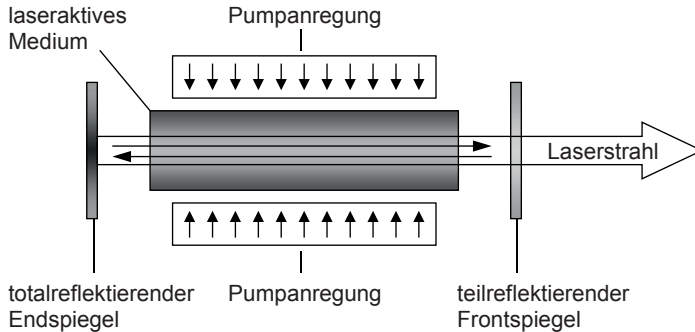


Abbildung 3: Schematischer Aufbau einer Laserstrahlquelle mit stabförmigem laseraktiven Medium

2.1.2 Eigenschaften und Propagation

Nach HÜGEL & GRAF (2009) sind die grundlegenden Eigenschaften von Laserstrahlung die hohe zeitliche und örtliche Kohärenz. Konventionelle Strahlquellen emittieren ein breites Spektrum an unabhängigen elektromagnetischen Wellen mit unterschiedlichen Wellenlängen. Im Gegensatz dazu emittieren Laserstrahlquellen nur Strahlung mit gleicher oder annähernd gleicher Wellenlänge. Zwei Wellenfelder, bzw. zwei Anteile eines Wellenfelds, heißen *kohärent*, wenn sie einen gleichen, definierten Phasen- oder Gangunterschied aufweisen. Ändern sich hingegen die Phasen der Felder relativ zueinander, so sind sie *inkohärent*. Laserstrahlen bestehen aus ähnlichen Wellenformen. Die in der Strahlung möglichen unterschiedlichen Wellenformen werden als *Schwingungsmoden* bezeichnet. Eine Verringerung der Modenzahl beim Laser ist gleichbedeutend mit der Erhöhung der Kohärenz (HÜGEL & GRAF 2009).

Nach DAUSINGER (1995) ist die Laserstrahlung in der Materialbearbeitung durch folgende fünf Parameter charakterisierbar:

- Laserleistung
- Strahldurchmesser
- Wellenlänge
- Polarisation
- Strahlparameterprodukt

Die Laserleistung ist „die optische Leistung des nutzbaren Laserstrahls“ (DIN 32532, S. 14). Der Strahldurchmesser ist der „kleinste(r) Durchmesser einer kreisförmigen Öffnung in einer Ebene senkrecht zur Strahlachse, die [einen bestimmten Teil] der gesamten Strahlleistung enthält.“ (DIN 32532, S. 16). Die Norm weist für diesen Teil in einer Anmerkung 86% als gängig aus, weshalb er auch so in dieser Arbeit verwendet wird. Die Wellenlänge resultiert aus der Differenz der Energieniveaus des angeregten Zustands und des Grundzustands. Die Polarisation ist die „Beschränkung der elektromagnetischen Wellenbewegung auf bestimmte Richtungen“ (DIN 32532, S. 15). Das Strahlparameterprodukt (*SPP*) beschreibt die Ausbreitung der Laserstrahlung (Strahlpropagation). Es errechnet sich als „Produkt aus dem Durchmesser der Strahltaile d_0 und dem Divergenzwinkel θ_0 , geteilt durch 4“ (DIN 32532, S. 16, siehe Formel (1)):

$$SPP = \frac{d_0 \cdot \theta_0}{4} \quad (1)$$

Als weitere Größe für die Strahlpropagation kann die Rayleigh-Länge z_r herangezogen werden. Sie ist der „Abstand von der Strahltaile in Ausbreitungsrichtung, bei dem der Strahldurchmesser oder die Strahlabmessungen das $\sqrt{2}$ -fache des Taillen-durchmessers oder der Taillenabmessungen betragen“ (DIN 32532, S. 16). Abbildung 4 zeigt diese Zusammenhänge am Laserstrahl, welcher durch eine Linse fokussiert wird (HÜGEL & GRAF 2009).

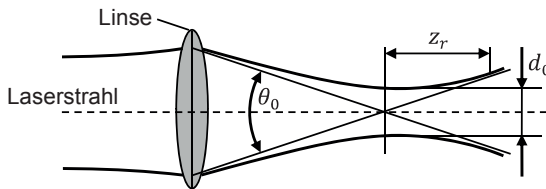


Abbildung 4: Strahlpropagation von Laserstrahlung nach HÜGEL & GRAF (2009)

2.1.3 Strahl-Stoff-Wechselwirkung

2.1.3.1 Allgemeines

Trifft ein Laserstrahl auf eine Materialoberfläche, so wird ein Teil der Strahlungsleistung reflektiert (P_R). Die nicht reflektierte Leistung dringt in das Werkstück ein und wird dort in den meisten Fällen absorbiert (P_A). In bestimmten Fällen kann die Strahlungsleistung (P_T) aber auch teilweise transmittiert werden. Betracht-

tet man das einmalige Auftreffen eines Laserstrahls mit der Laserleistung P_L auf Materie, so können folgende Zusammenhänge für die Energieeinbringung definiert werden (siehe Formeln (2) bis (5)):

$$\frac{P_{\bar{R}}}{P_L} \stackrel{\text{def}}{=} \bar{R} \quad (2)$$

$$\frac{P_{\bar{A}}}{P_L} \stackrel{\text{def}}{=} \bar{A} \quad (3)$$

$$\frac{P_{\bar{T}}}{P_L} \stackrel{\text{def}}{=} \bar{T} \quad (4)$$

$$\bar{R} + \bar{A} + \bar{T} = 1 \quad (5)$$

Mit dem Reflexionsgrad \bar{R} , dem Absorptionsgrad \bar{A} und dem Transmissionsgrad \bar{T} werden die Verhältnisse von Leistungen, Leistungsdichten bzw. Intensitäten oder Energien bezeichnet. Welcher dieser Vorgänge (Reflexion, Absorption, Transmission) zu welchem Anteil beteiligt ist, hängt von der Wellenlänge der Laserstrahlung, ihrer Polarisation, dem Einfallswinkel, den Stoffwerten des Materials und seiner Temperatur sowie der Beschaffenheit der Oberfläche ab. (HÜGEL & GRAF 2009)

2.1.3.2 Reflexion

Beim Auftreffen von Strahlung auf die Grenzfläche eines optisch dichteren Mediums streut jedes Atom, welches unter dem Einfluss der Strahlung steht. In der Praxis ist jedoch vor allem eine dünne Schicht mit einer Dicke der halben Strahlungswellenlänge in der Grenzfläche für die Reflexion verantwortlich (HECHT 2009). Die Reflexion der Laserstrahlung an der Materialoberfläche ist auf die elastische Anregung der Atome in dieser Fläche zurückzuführen. Jedes der Atome verhält sich hierbei selbst wie ein Oszillator, dessen Elektronenwolke durch ein ankommendes Photon in Schwingungen versetzt wird. Unmittelbar nach dem Einsetzen dieser Schwingung beginnt das Atom seinerseits Strahlung auszusenden. Ein Photon wird absorbiert und sofort wird ein anderes Photon emittiert. Die ursprüngliche Ausbreitungsrichtung geht bei diesem Vorgang verloren. Betrachtet man ein einzelnes Atom in einer Materialoberfläche, das durch einen Laserstrahl angeregt wird, so sendet dieses als Antwort auf die Anregung eine halbkugelförmige Welle aus (siehe Abbildung 5, links). (HECHT 2009)

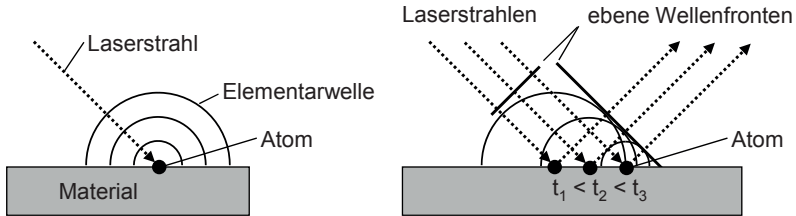


Abbildung 5: Streuung einer Welle an einer Materialoberfläche (links); spiegelnde Reflexion einer Wellenfront als Folge der Streuung (rechts); (nach HECHT 2009)

Durch das Auftreffen eines Laserstrahls auf eine Materialoberfläche werden mehrere Atome gleichzeitig angeregt. Verfolgt man eine Wellenfront, die den Atomen an der Oberfläche begegnet, zeigt sich, dass die Front beim Eindringen ein Streuzentrum nach dem anderen mit einer zeitlichen Verzögerung ($t_1 < t_2 < t_3$) anregt (siehe Abbildung 5, rechts). Jedes Streuzentrum hiervon emittiert einen Strom von Photonen, der als halbkugelförmige Elementarwelle betrachtet werden kann. Es kommt zu einer Überlagerung der emittierten Strahlung. Die Laserstrahlung ist kohärent und deren Wellenlänge ist deutlich größer als die Abstände zwischen den Atomen. Deshalb überlagern sich die gestreuten Elementarwellen konstruktiv in einer einzigen Richtung. Es entsteht ein definierter reflektierter Strahl, wobei der Ausfallswinkel der emittierten Strahlung dem Einfallswinkel der anregenden Strahlung entspricht. (HECHT 2009)

Überdies beeinflusst die Geometrie der Materialoberfläche die Reflexion. Die Beschreibung der Art der Reflexion aus Abbildung 5 trifft nur für glatte Oberflächen zu. *Glatt* bedeutet in diesem Fall, dass die Unebenheiten der Fläche, im Vergleich zur Wellenlänge der Strahlung, klein sind. Das Entstehen eines definierten reflektierten Strahls mit dem Ausfallswinkel gleich dem Einfallswinkel, jeweils gegenüber der Flächennormale, nennt man *spiegelnde Reflexion*.

Ist die Oberfläche zwar glatt, aber in sich nicht eben, beispielsweise konkav oder konvex, entstehen spiegelnde Reflexionen mit anderen Vorzugsrichtungen. Solche, welche dem einfallenden Strahl entgegen propagieren, werden deshalb in dieser Arbeit als *rückspiegelnde Reflexion* bezeichnet (siehe Abbildung 6, links).

Ist die Oberfläche im Vergleich zur Wellenlänge der Strahlung rau, werden die Strahlen in undefinierten Richtungen zurückgeworfen (siehe Abbildung 6, rechts). Man nennt dies *diffuse Reflexion*. (HECHT 2009)

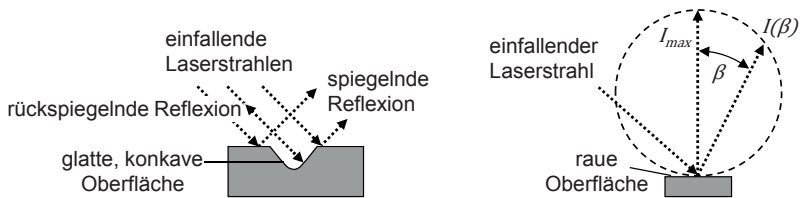


Abbildung 6: Spiegelnde und rückspiegelnde Reflexion an einer glatten Oberfläche (links) und Intensitätsverteilung der diffusen Reflexion an einer rauhen Oberfläche (rechts); (nach HECHT 2009)

Die Summe der zurückgeworfenen Strahlungen folgt hierbei der Charakteristik eines Lambert-Strahlers. Ein ideal diffus reflektierendes Flächenstück (Lambert-Fläche) gibt die eingestrahlte Leistung winkelhabhängig wieder ab (siehe Abbildung 6, rechts). Die ausgesandte Strahlungsintensität I ist proportional zum Kosinus des Winkels β zur Flächennormale des Flächenstücks (vgl. Formel (6)):

$$I(\beta) \sim \cos(\beta) \quad (6)$$

Das Verhältnis von Strahlungsintensität und der auf die Betrachtungsrichtung reduzierten Fläche ergibt einen konstanten Proportionalitätsfaktor (HECHT 2009).

2.1.3.3 Absorption und Transmission

Trifft eine elektromagnetische Welle auf Material, so wird der nicht reflektierte Anteil der Schwingungsenergie des elektrischen Felds in Schwingungen der Teilchen des Materials überführt und breitet sich im Material weiter aus. Wird diese Ausbreitung nicht behindert und die Welle durchdringt das Material vollständig, spricht man von *Transmission*. Breitet sich eine elektromagnetische Welle in einem absorbierenden Medium aus, so wird ein Teil ihrer Leistung an das Medium übertragen und führt dort in der Regel zur Entstehung von Wärme. (HÜGEL & GRAF 2009)

Nach einer gewissen Strecke ist die Intensität im Material auf den Bruchteil $1/e$ des an der Oberfläche vorhandenen Werts abgefallen. Diese Strecke wird *Absorptionslänge* genannt. Bei Metallen und den in der Lasermaterialbearbeitung gebräuchlichen Laserwellenlängen liegt die Absorptionslänge im Bereich von einem bis zu einigen zehn Nanometern (MACKWOOD & CRAFER 2005). Die Wärmefreisetzung findet somit in einer äußerst dünnen Schicht an der Oberfläche statt. Eine Transmission der Laserstrahlung erfolgt praktisch nicht. Innerhalb der Absorptionslänge

entstehen oberflächennahe Gitterschwingungen (Wärme), die bei niedrigen eingestrahnten Leistungsdichten im Bereich einiger 10^3 W/cm^2 bis 10^4 W/cm^2 und einem ausreichend großen Werkstückvolumen die Temperatur nicht über die Schmelztemperatur des Werkstoffs anheben können. Bei einer Intensität der Laserstrahlung von 10^5 W/cm^2 kann der Energieeintrag durch Wärmetransportmechanismen nicht mehr ausreichend kompensiert werden. Als Folge wird in der Wechselwirkungszone die Schmelztemperatur des Werkstoffs erreicht oder sogar überschritten. Das Material wird durch fortschreitende Erwärmung aufgeschmolzen und ggf. schließlich verdampft. Wirkt der Laserstrahl über eine längere Zeit auf diese Stelle ein, kommt es, wie in Abbildung 7 dargestellt, zum Durchbruch des Laserstrahls.

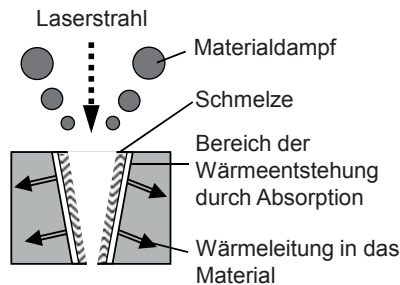


Abbildung 7: Durchbruch des Laserstrahls durch Material bei Langzeiteinwirkung (in Anlehnung an HÜGEL & GRAF 2009)

Bei einer höheren Leistungsdichte von einigen 10^5 W/cm^2 bis hin zu 10^6 W/cm^2 , wird nach HÜGEL & GRAF (2009) die Verdampfungstemperatur von z. B. Metallwerkstoffen erreicht. Der Dampfdruck des Materials bildet im Schmelzbad eine Kapillare aus, welche in das Werkstück eindringt. Der Durchmesser der Dampfkapillare entspricht nach den bisherigen Modellvorstellungen in etwa dem des Brennflecks des Laserstrahls. Bei einer weiteren Steigerung der Leistungsdichte ist eine Erhöhung der Verdampfungsrate zu erwarten. (HÜGEL & GRAF 2009)

2.1.3.4 Wärmetransportmechanismen

An der Energiebilanz der Strahl-Stoff-Wechselwirkung sind neben der bereits beschriebenen grundsätzlichen Aufteilung der Strahlungsenergie weitere Mechanismen beteiligt. Nicht die gesamte innerhalb der Absorptionslänge freigesetzte Leistung kann für einen Temperaturanstieg in der Wechselwirkungszone bilanziert werden. Verantwortlich hierfür ist der Verlust von Wärme durch Wärmeleitung in

das Material, welche aus der Wärmeabgabe des erwärmten Bereichs in das Werkstück resultiert. Der Wärmefluss ist abhängig von der Temperaturdifferenz zwischen der Wechselwirkungszone und dem umgebenden Material, den thermophysikalischen Werkstoffkennwerten und der Geometrie des Werkstücks. Weitere Verluste treten durch thermische Strahlung und konvektive Wärmeabfuhr an der Oberfläche der Wechselwirkungszone auf. Beiträge zur Energiebilanz aufgrund chemischer Reaktionen werden hier vernachlässigt. In Abbildung 8 sind diese Zusammenhänge schematisch dargestellt. (HÜGEL & GRAF 2009)

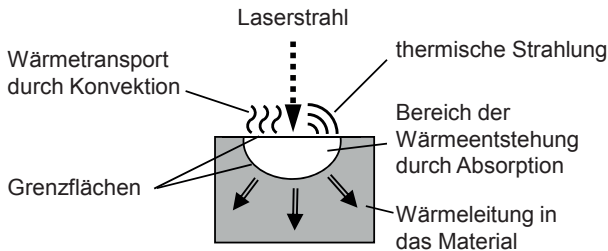


Abbildung 8: Transport von mittels Laserstrahlung eingebrachter Wärme in das Material und in die Umgebung (in Anlehnung an HÜGEL & GRAF 2009)

2.1.3.5 Prozessleistung

Die Prozessleistung entspricht der absorbierten Leistung abzüglich der Leistungsabgabe. Sie ist letztendlich für das Aufschmelzen und das Verdampfen des Materials verantwortlich. In Abbildung 9 ist die Leistungsbilanz der Strahl-Stoff-Wechselwirkung schematisch dargestellt.



Abbildung 9: Schematische Darstellung der Leistungsbilanz der Strahl-Stoff-Wechselwirkung

2.1.3.6 Absorptionsgrad von Metallen

Das Aufschmelzen und Verdampfen des Materials ist hauptsächlich vom Absorptionsgrad \bar{A} abhängig. Dieser besagt, welcher Anteil der eingestrahnten Laserleistung vom Material absorbiert wird (vgl. Formel (3), S. 10). Mit Hilfe der Fresnel'schen Gleichungen kann für parallel (\parallel) und senkrecht (\perp) polarisierte Strahlung in Abhängigkeit des Einstrahlwinkels β gegenüber der Flächennormale, der Wellenlänge λ und der zugehörigen Materialkennwerte (Brechungsindex η und Absorptionsindex κ) ein entsprechender Absorptionskoeffizient $\alpha_{\bar{A}}$ berechnet werden (siehe Formeln (7) und (8)):

$$\alpha_{\bar{A},\perp} = \frac{4 \cdot \eta \cdot \cos \beta}{(1 + \kappa^2) \cdot \eta^2 + 2 \cdot \eta \cdot \cos \beta + \cos^2 \beta} \quad (7)$$

$$\alpha_{\bar{A},\parallel} = \frac{4 \cdot \eta \cdot \cos \beta}{(1 + \kappa^2) \cdot \eta^2 \cdot \cos^2 \beta + 2 \cdot \eta \cdot \cos \beta + 1} \quad (8)$$

Der Absorptionskoeffizient stellt den beim einmaligen Auftreffen des Strahls auf eine Oberfläche eingebrachten Energieanteil, im Vergleich zu dessen Gesamtenergie, dar. Bei unpolarisierter (\odot) Strahlung gilt das arithmetische Mittel $\alpha_{\bar{A},\odot}$ aus den beiden Koeffizienten $\alpha_{\bar{A},\perp}$ und $\alpha_{\bar{A},\parallel}$ (siehe Formel (9)):

$$\alpha_{\bar{A},\odot} = (\alpha_{\bar{A},\perp} + \alpha_{\bar{A},\parallel})/2 \quad (9)$$

Für unpolarisierte Strahlung steigt der Gesamtabsorptionskoeffizient bei Metallen in der Regel bis zu einem Einfallswinkel von ca. $\beta = 80^\circ$ gegenüber der Flächennormale an und fällt dann bis zum Winkel von $\beta = 90^\circ$ auf null ab. In Abbildung 10 sind die Verläufe der mit den Formeln (7) bis (9) berechenbaren Absorptionskoeffizienten am Beispiel von Eisen dargestellt. Der Brechungsindex beträgt hier $\eta = 3$ und der Absorptionsindex $\kappa = 1,33$ für eine Wellenlänge der Laserstrahlung von 1070 nm. (in Anlehnung an HÜGEL & GRAF 2009)

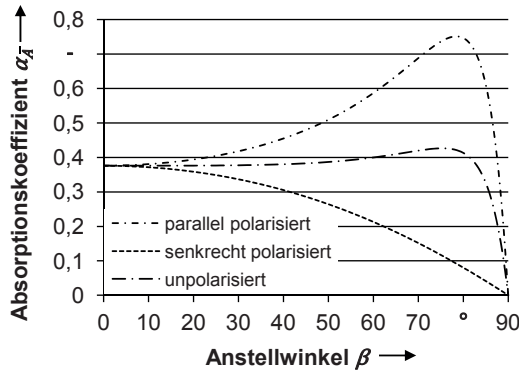


Abbildung 10: Verlauf der Absorptionskoeffizienten über dem Einstrahlwinkel für parallel und senkrecht polarisierte sowie unpolarisierte Laserstrahlung der Wellenlänge 1070 nm für Eisen; $\eta = 3$; $\kappa = 1,33$; nach Formeln (7) bis (9)

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Oberflächenrauigkeit. Sind die Abmessungen der Strukturmerkmale einer Oberfläche gleich oder größer als die Wellenlänge des einfallenden Laserstrahls, so kann es durch Mehrfachreflexion zu erhöhter Absorption kommen. POPRAWE ET AL. (2004) zeigen zu verschiedenen Metallen und Oberflächenrauigkeiten Absorptionskoeffizienten bei Raumtemperatur auf. Des Weiteren ist der Koeffizient auch temperaturabhängig. POPRAWE ET AL. (2004) stellen ebenfalls die Temperaturabhängigkeit für verschiedene Material- und Laserstrahlungs-paarungen linearisiert dar und weisen dafür Werte aus. Oberflächenbeschichtungen wie Oxide können sich zudem in der Absorption bemerkbar machen.

2.2 Laser-Materialbearbeitung

2.2.1 Wärmeleitungsschweißen

Beim Wärmeleitungsschweißen erfolgt die Energieeinkopplung an der Oberfläche des erzeugten Schmelzbads. Ausschlaggebend für die Aufnahme der Laserleistung ist hierbei der Absorptionsgrad. Kennzeichnend für das Wärmeleitungsschweißen sind glatte Nahtberrauen, die durch den ruhig ablaufenden Schweißprozess entstehen. Nach BEYER (1995) wird die Oberfläche der Schmelzzone durch fluid-dynamische Effekte leicht eingedellt. Wärmeleitungs-Schweißnähte (vgl. Abbildung

11) weisen ein Verhältnis zwischen Nahttiefe und Nahtbreite (Aspektverhältnis) von bis zu 1:1 auf. (HÜGEL & GRAF 2009)

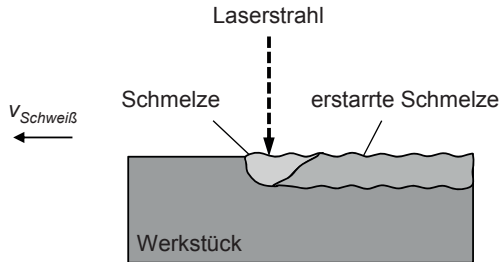


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Wärmeleitungsschweißens (in Anlehnung an HÜGEL & GRAF 2009)

2.2.2 Tiefschweißschwelle

Durch das Erreichen der Verdampfungstemperatur im Zentrum des fokussierten Laserstrahls wird die Oberfläche des Schmelzbads durch den abströmenden Materialdampf eingedrückt. Mit zunehmender Leistung verstärkt sich dieser Effekt und die entstandene Mulde deltt sich weiter ein. Durch die Verformung der Schmelzbadoberfläche ändern sich auch die Reflexionsvorgänge. Sobald die Mulde im Schmelzbad so tief ist, dass die daran reflektierte Laserstrahlung ein zweites Mal auf diese Oberfläche auftrifft, kommt es zur erneuten Absorption und die Energieeinkopplung steigt damit sprunghaft an. Der Verdampfungsprozess verstärkt sich, was sich wiederum auf die Verdrängung des Schmelzbads auswirkt. Abhängig von den Strahleigenschaften und den Prozessparametern bildet die Mulde innerhalb weniger Millisekunden eine tiefe Geometrie aus. Diese wird *Dampfkapillare* oder *Keyhole* genannt. (HÜGEL & GRAF 2009)

Der Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen erfolgt sehr abrupt innerhalb einer geringen Variation der Leistung bei sonst konstanten Parametern und wird im Allgemeinen als *Tiefschweißschwelle* bezeichnet (STRITT ET AL. 2011). Im Wesentlichen ist diese Schwelle nach HÜGEL & GRAF (2009) von dem *Strahlparameterquotienten* P_L/d_0 abhängig, dessen Größenordnung sich vereinfacht mit der Péclet-Zahl Pe , der Verdampfungstemperatur T_V , der Wärmeleitzahl λ_{th} und dem Absorptionsgrad \bar{A} durch die Formel (10) berechnen lässt:

$$\frac{P_L}{d_0} = \frac{T_V \cdot \lambda_{th}}{\bar{A}} \cdot \sqrt{\frac{Pe}{4} + 1}, 1 \quad (10)$$

Die Kenntnis dieser Schwelle ist für die Auslegung von Schweißprozessen sehr wichtig und es wird deutlich, dass die ausschlaggebenden Parameter mit ausreichendem Abstand zur Schwelle gewählt werden sollten, um stabile Prozesse zu gewährleisten. Abbildung 12 zeigt schematisch das Verhalten von Absorptionsgrad und Tiefschweißschwelle beim Überschreiten der Schwelle als Funktion des Strahlparameterquotienten.

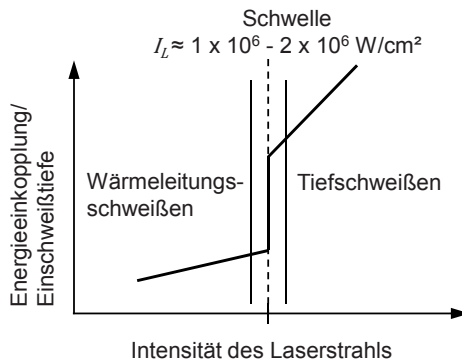


Abbildung 12: Verhalten von Absorptionsgrad und Schweißtiefe beim Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen als Funktion der Intensität des Laserstrahls

Bei der Bearbeitung der metallischen Werkstoffgruppen Stahl und Edelstahl mit Gas- oder Festkörperlasern liegt die Schwelle bei Strahlungsintensitäten im Größenbereich von $1 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ bis $2 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$. Sie ist hierbei unter anderem auch von der Wellenlänge des Bearbeitungslasers und der genauen Zusammensetzung des Werkstoffs abhängig. (POPRAWA 2005)

Für den Werkstoff Aluminium (AlMgSi1) geben HÜGEL & GRAF (2009) bei der Bearbeitung mit Strahlung der Wellenlänge $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ und Fokusbereich von $d_0 = 300 \mu\text{m}$, $450 \mu\text{m}$ und $600 \mu\text{m}$ für den Strahlparameterquotienten P_L/d_0 im Bereich der Schwelle Werte zwischen $4,5 \text{ kW/mm}$ und $5,0 \text{ kW/mm}$ an. Hieraus lässt sich analog zu den o. g. Stahlwerkstoffen eine Schwellintensität im Bereich von $1 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ bis $2 \cdot 10^6 \text{ W/cm}^2$ berechnen. Im Allgemeinen wird die Schwelle bei Aluminiumwerkstoffen nach STRITT ET AL. (2011) bei gleichen Bearbeitungsbe-

dingungen aufgrund des geringeren Absorptionsgrads (bei Verdampfungstemperatur) und der höheren Wärmeleitfähigkeit erst bei etwas höheren Intensitäten als bei Stahlwerkstoffen erreicht.

2.2.3 Tiefschweißen

Charakteristisch für das Tiefschweißen ist die Ausbildung der Dampfkapillare innerhalb des Schmelzbads durch die Überschreitung der Tiefschweißschwelle. Die obere Öffnung der Dampfkapillare entspricht in etwa dem Brennfleckdurchmesser des Laserstrahls auf der Werkstückoberfläche. Hieraus resultieren grundlegende Unterschiede zum Wärmeleitungsschweißen bezüglich der Einkopplung, des Transports und der Verteilung der Energie im Schmelzbad. Die Energieeinkopplung erfolgt an der Wand der Dampfkapillare im Zuge von Mehrfachreflexionen und Plasmaabsorption. Von der Grenzfläche zwischen Metaldampf und Schmelze erfolgt dann, wie beim Wärmeleitungsschweißen, ein Wärmetransport an die Phasengrenze zum festen Werkstoff. Durch eine relative Bewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück wird kontinuierlich Material aufgeschmolzen. Das Material umströmt die Kapillare und erstarrt am hinteren Ende des Schmelzbads. Abbildung 13 zeigt eine schematische Darstellung des Tiefschweißprozesses.

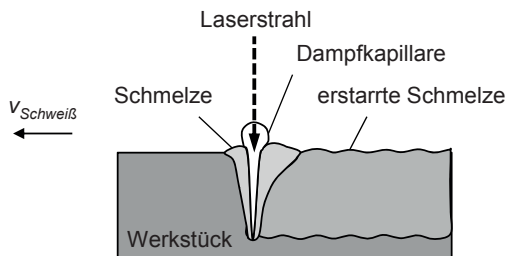


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Tiefschweißens (in Anlehnung an HÜGEL & GRAF 2009)

Im Inneren der Dampfkapillare entsteht durch die strömungsmechanischen Bedingungen der Dampf- und Plasmaströmungen ein Druck, welcher kontinuierlich den schließenden Kräften entgegen wirkt. Diese resultieren wiederum aus der Oberflächenspannung der Schmelze, dem fluiddynamischen Druck der Kapillarumströmung und dem statischen Druck der Umgebung. Eine Tiefschweißnaht reicht im Vergleich zu Wärmeleitungs-Schweißnähten deutlich tiefer in das Werkstück hinein. Tiefschweißnähte sind mit einem Aspektverhältnis zwischen 1:1 und 15:1

schlank. Die Form des Nahtquerschnitts hängt im Wesentlichen von dem Zusammenwirken der Prozessparameter, der Fügegeometrie, der Nahtform und den Werkstoffeigenschaften ab. (HÜGEL & GRAF 2009)

2.2.4 Abtragen

READY & FARSON (2001), POPRAWIE (2005) und HÜGEL & GRAF (2009) weisen als Grundmodelle zum Abtragen von Material durch Laserbestrahlung das Abdampf- und das Kolbenmodell aus. Bei Ersterem führt die von der Laserstrahlung in das Material eingebrachte Energie zu einer Verdampfung über den vollen Strahlquerschnitt. Dieser Dampf tritt durch die entstandene Materiallücke, der Einstrahlrichtung entgegengesetzt, aus. Beim Kolbenmodell hingegen geht man zunächst vom Aufschmelzen des bestrahlten Materials aus. Der Dampfdruck, bedingt durch eine teilweise Verdampfung der Schmelze, treibt diese dann seitlich aus der Prozesszone heraus. Die Abtraggeschwindigkeit u , mit der sich der Strahl maximal durch das Material hindurcharbeitet, kann nach HÜGEL & GRAF (2009) mit Formel (11) abgeschätzt werden:

$$u = \frac{I_L \cdot \bar{A}}{\rho \cdot (c_p \cdot \Delta T + h_s + h_v)} \quad (11)$$

I_L stellt dabei die Laserstrahlungsintensität, \bar{A} den Absorptionsgrad, ρ die Materialdichte, c_p dessen spezifische Wärmekapazität, ΔT die Temperaturdifferenz bis zum Verdampfen, h_s die Schmelz- und h_v die Verdampfungsenthalpie dar.

2.3 Biologische Wirkung von Laserstrahlung

Je nach Wellenlänge, Dauer und Leistungsdichte der eingestrahnten Laserstrahlung und der Art des biologischen Materials lassen sich nach BAHMER & SEIPP (1996) folgende grundsätzliche Vorgänge unterscheiden:

- Es treten photochemische Prozesse bei niedrigen Leistungsdichten und langen Bestrahlungszeiten (Minuten),
- thermische Veränderungen bei höheren Leistungsdichten und in der Regel kurzen Einwirkungszeiten (Sekunden) und
- nichtlineare Effekte bei sehr hohen Leistungsdichten und extrem kurzen Bestrahlungszeiten (Nanosekunden) auf.

Nach BROSE & HAUKE (2010) muss beim Menschen zwischen der Bestrahlung der Augen und der Haut unterschieden werden. Fällt ein Laserstrahl auf das Auge, so trifft er zunächst auf die Hornhaut. Dieser Teil des Auges und die sich dahinter befindende Linse sind nicht nur für Wellenlängen des sichtbaren Lichts (400 nm bis 700 nm), sondern auch für die des nicht sichtbaren Nahinfrarot-Bereichs (700 nm bis 1.400 nm) durchlässig. Laserstrahlung dieser Wellenlängen wird somit von der Linse im Auge fokussiert und auf der Netzhaut abgebildet. Der Durchmesser des auf die Linse auftreffenden Laserstrahls ist auf den maximal möglichen Pupillendurchmesser begrenzt. Bei jungen Menschen beträgt dieser ungefähr 7 mm, bei älteren weniger. Die resultierende Abbildung des Strahls auf der Netzhaut besitzt einen Durchmesser von nur noch 15 μm , was einem Intensitätsverstärkungsfaktor von etwa 200.000 entspricht (vgl. Abbildung 14). Die meisten Materialbearbeitungslaser rufen somit aufgrund ihrer Wellenlänge bereits bei sehr geringen Leistungsdichten und kurzen Expositionszeiten irreversible Netzhautschäden hervor. Die maximal zulässige Bestrahlungsintensität (MZB) liegt hier im Bereich von wenigen Milliwatt pro Quadratzentimeter. Laserstrahlung außerhalb der die Hornhaut durchdringenden Wellenlängen (kleiner als 400 nm und größer als 1.400 nm) ruft am Auge Hornhautentzündungen oder -verbrennungen hervor.

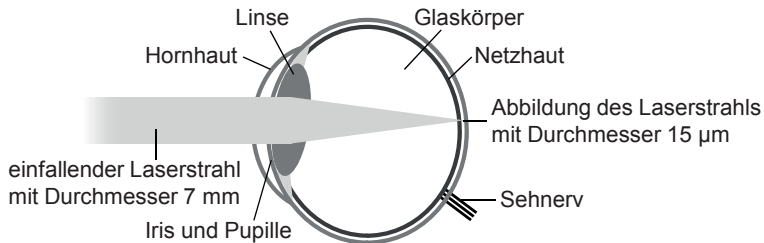


Abbildung 14: Schematischer Aufbau des menschlichen Auges mit einfallendem Laserstrahl im Wellenlängenbereich zwischen 400 nm und 1.400 nm (nach BROSE & HAUKE 2010)

Da die Haut keine strahlungsbündelnden Eigenschaften besitzt, kann sie wesentlich höheren Strahlungsintensitäten als das Auge ausgesetzt werden. Die Strahlungswirkung variiert zwischen sonnenbrandartiger Reizung oder Entzündung über Verbrennung bis hin zur Verkohlung der Haut (PÜSTER 2009A, PÜSTER 2009B, ZÄH & BRAUNREUTHER 2010B). Die Größenordnung der MZB-Werte für die Haut liegt im

Watt-pro-Quadratcentimeter-Bereich (BGFE 2007). Abbildung 15 fasst die biologische Wirkung von Laserstrahlung auf das Auge und auf die Haut zusammen.

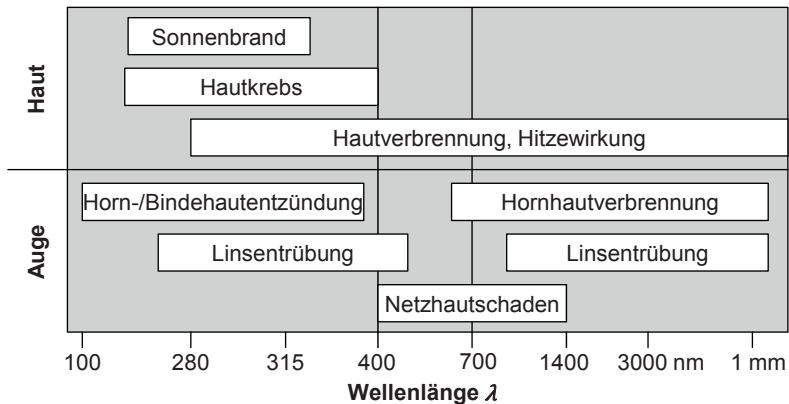


Abbildung 15: Mögliche biologische Folgen von Laserstrahlung für das menschliche Auge und für die Haut (nach BGFE 2009)

2.4 Rechtsnormen

2.4.1 Allgemeines

Um Menschen vor der gewebschädigenden Wirkung der Laserstrahlung zu schützen, wird der Umgang mit ihr in Rechtsnormen geregelt. Diese Regelwerke der Lasersicherheit werden, aufgrund der in der Europäischen Gemeinschaft (EG) geltenden Rechtshierarchie, maßgeblich durch die EG-Richtlinien geprägt (vgl. Abbildung 16). Sie müssen in allen Mitgliedsstaaten der EG in nationales Recht umgesetzt werden, was sich dann in allgemeingültigen Rechtsvorschriften niederschlägt. Im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus verlangen sie die Gewährleistung von Maschinensicherheit und stellen somit eine Forderung nach der Einhaltung von detaillierten und maschinengattungsspezifischen Sicherheitsrichtlinien und -normen. Sie werden von den Unfallversicherungsträgern der öffentlichen Hand und von Vertretern der Industrie und Wirtschaft erstellt.



Abbildung 16: Schematische Darstellung der Rechtshierarchie in unterschiedlichen Detaillierungsgraden

2.4.2 EG-Richtlinien

Die Maschinenrichtlinie (EUROPÄISCHES PARLAMENT 2006A) regelt ein einheitliches Schutzniveau zur Unfallverhütung an Maschinen. Handelshemmnisse in der Europäischen Union sollen durch Vereinheitlichung von Sicherheitsniveaus abgebaut werden. Das Ziel der Maschinenrichtlinie ist der freie Warenverkehr für sichere Maschinen im europäischen Wirtschaftsraum. Des Weiteren stellt die Richtlinie zur künstlichen optischen Strahlung (EUROPÄISCHES PARLAMENT 2006B) Mindestvorschriften zum Schutz der Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch elektromagnetische Einwirkungen dar. Sie betrifft insbesondere die Gefährdungen der Augen und der Haut von Menschen.

2.4.3 Nationales Recht

Die genannten EG-Richtlinien sind sowohl durch das Produktsicherheitsgesetz (BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND 2011) als auch durch das Arbeitssicherheitsgesetz (BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND 1973, BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND 2010) im nationalen Recht verankert. Sie fordern die Gewährleistung von Maschinensicherheit und somit die Einhaltung der Richtlinien und -normen.

2.4.4 Berufsgenossenschaftliche Vorschriften

Die berufsgenossenschaftlichen Vorschriften (BGV) sind die von den deutschen Berufsgenossenschaften erlassenen Vorschriften zur Unfallverhütung. Sie müssen von den Mitgliedern der Berufsgenossenschaften eingehalten werden. Die für die

Lasersicherheit maßgebende BGV ist die BGV B2 - Laserstrahlung (BGFE 2007). Sie beinhaltet wesentliche Informationen zu:

- Begriffsbestimmungen im Themenfeld von Laseranlagen,
- Fragen der Laseranlagenklassifizierung,
- zu Gefahrenpotentialen von Laserstrahlung und den zulässigen Grenzwerten,
- Regelungen zum Bau und zur Ausrüstung von Laseranlagen mit den dazugehörigen Auflagen und Verantwortungen und
- Regelungen zum Betrieb von Laseranlagen.

Neben den BGV werden von den Berufsgenossenschaften weiterhin die Berufsgenossenschaftlichen Informationen (BGI), die Berufsgenossenschaftlichen Regeln (BGR) und die Berufsgenossenschaftlichen Grundsätze (BGG) mit dem Ziel der Unfallprävention herausgegeben.

2.4.5 Normen

Sicherheitsbezogene Normung in der Technik erfolgt auf nationaler, auf europäischer und auf internationaler Ebene. Hierzu existieren Normungsgremien und -komitees auf allen diesen Ebenen. Normen können neben ihrem Geltungsbereich in verschiedene Typen eingeteilt werden, was die Rechtshierarchie in weitere Stufen gliedert (vgl. Abbildung 16 und Abbildung 17).

Für die Lasersicherheit ist, wie im gesamten Maschinen- und Anlagenbau, die Norm DIN EN ISO 12100 gültig. Sie ist eine Sicherheitsgrundnorm (Typ-A-Norm), behandelt die Sicherheit von Maschinen im Allgemeinen, erläutert Grundbegriffe und definiert allgemeine Gestaltungsleitsätze. Die Normengruppen DIN EN ISO 13849 ff. und DIN EN 61508 ff. definieren als Sicherheitsgruppennormen (Typ-B-Normen) der funktionalen Sicherheit Anforderungen sowie einzuhaltende maximale Ausfallraten von Steuerungssystemen und geben Lösungsvorschläge zur Ausgestaltung von Sicherheitskonzepten, welche auf Steuerungstechnik beruhen (HAUKE & SCHAEFER 2008). Die Normengruppe DIN EN ISO 11553 ff. stellt als Sicherheitsfachnorm (Typ-C-Norm) ein Regelwerk dar, welches sich auf eine gesamte Lasermaschinen-Gruppe bezieht. Sie beschreibt allgemeine Sicherheitsanforderungen an stationäre Laserbearbeitungsanlagen wie auch an handgeführte Lasersysteme (BROSE & GOMOLKA 2006, PÜSTER 2009B). Die Normengruppe DIN EN 60825 ff. definiert, wie auch in der BGV B2 dargestellt, maximale zulässige Bestrahlungen und

Laserklassifizierungen. Insbesondere geht der vierte Teil der Norm auf Laserschutzwände und Umhausungen für Laseranlagen ein. Persönliche Schutzausrüstung für den Laserschutz wird in den Normen DIN EN 207 und DIN EN 208 behandelt. Sie beschreiben die Anforderungen sowie den Test von Laserschutzbrillen und Laserjustierbrillen.

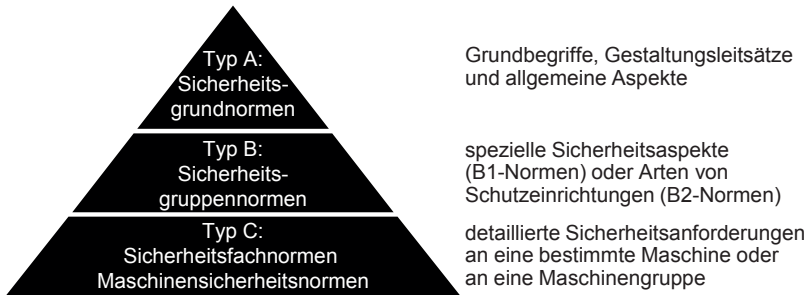


Abbildung 17: Hierarchie bei Sicherheitsnormen und deren Einteilung

2.5 Risiko und Risikoakzeptanz

Jeder Mensch ist über sein ganzes Leben hinweg zahlreichen Risiken ausgesetzt. Risiken werden in nahezu allen wissenschaftlichen Disziplinen definiert. Sie können zum Beispiel Finanz- (FÖLLMER 2007) oder auch Entscheidungsrisiken für Planungsprozesse (KREBS ET AL. 2009) sein. Im Rahmen dieser Arbeit steht das betrachtete Risiko immer in Zusammenhang mit einem potentiellen physischen Schaden eines Menschen. Analog ist dies beispielsweise auch im Straßenverkehr der Fall. FLUTHWEDEL (2008, S. 45) definiert Risiko als „Kombination der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Schadens und seines Ausmaßes.“ Sicherheit wird in diesem Kontext als Zustand angesehen, in dem das Risiko innerhalb eines definierten Bereichs liegt (REIF 2007).

Jede Tätigkeit birgt ein Risiko, in diesem Zusammenhang beim Arbeiten an und mit einer Laser-Materialbearbeitungsmaschine. Dieses muss so gering sein, dass es vom betroffenen Individuum, also dem Werker selbst, und der Gesellschaft akzeptiert wird. Liegt das Risiko über diesem Grenzniveau, so muss es reduziert werden. Das kann einerseits durch Maßnahmen geschehen, die das Schadensausmaß verringern, wie beispielsweise durch Schutzkleidung. Andererseits kann, vor allem durch technische und organisatorische Maßnahmen – bis zum Verbot der Tätigkeit – die Ein-

trittswahrscheinlichkeit des schadenbringenden Ereignisses gesenkt werden (vgl. Abbildung 18).

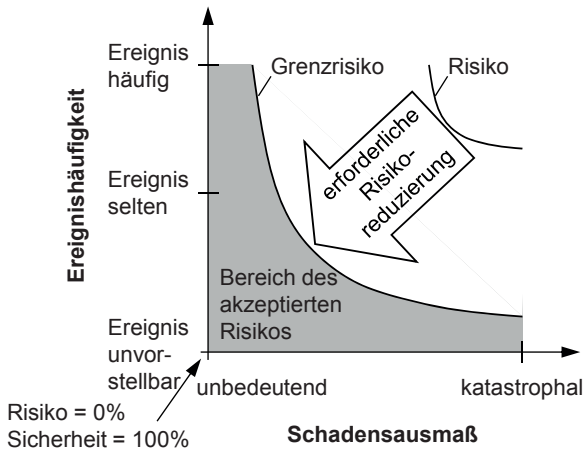


Abbildung 18: Darstellung des Risikos als Funktion des Schadensausmaßes und der Ereignishäufigkeit (in Anlehnung an LIGGESMEYER 2011)

Die Quantifizierung des Grenzrisikos stellt einen ethischen und moralischen Zwierspalt dar. Möglichkeiten zur Lösung dieses Problems stammen aus dem Themenbereich der Ethik. Die hier zu nennenden Extreme sind der *Deontologismus* und der *Konsequentialismus*. Mit einem deontologischen Ansatz ist bereits jede Tätigkeit mit einem möglichen Schaden für den Menschen, auch wenn die Eintrittswahrscheinlichkeit dafür sehr gering ist, zu verbieten. Die entsprechende Begründung für diese Handlung ist aus den ersten Seiten unseres höchsten deutschen Gesetzes, dem Grundgesetz, abzuleiten. Die Artikel 1 bis 19 definieren die Grundrechte, insbesondere die Individualrechte (vgl. NIDA-RÜMELIN 2007). Nach Artikel 2 hat jeder Mensch das Recht auf Leben und körperliche Unversehrtheit (vgl. DEUTSCHER BUNDESTAG 2010). Dieser Passus ist im Falle eines Schadens nicht erfüllt. Die dem Deontologismus widersprechende Möglichkeit der Auslegung des Grenzrisikos entspringt dem Konsequentialismus. Das Akzeptieren eines Risikos wird hierbei nach dem erwarteten oder bereits erzielten Ergebnis beurteilt. Das Individuum und sein mögliches Leid werden somit vollkommen ausgeblendet. Finanzielle Aspekte ließen sich mit diesem Ansatz optimieren.

Die Risikokosten, welche durch ein immer geringeres Risiko, also höhere Sicherheit, verursacht werden, fallen nach LIGGESMEYER (2011) stetig. Die Kosten, um die Sicherheit zu erhöhen, sind anfangs auf einem niedrigen Niveau. Sobald allerdings Anstrengungen unternommen werden müssen, um eine immer höhere Sicherheit zu erhalten, steigen diese Kosten überproportional. Die Summe dieser Kostenfunktionen besitzt ein Minimum (vgl. Abbildung 19).

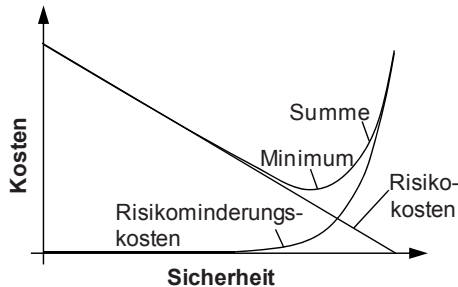


Abbildung 19: Kosten-Nutzen-Verhältnis von Sicherheit unter dem Aspekt der Gesamtkostenreduzierung (nach LIGGESMEYER 2011)

Diese Diskrepanz kann mit den folgenden von der Gesellschaft akzeptierten Prinzipien aufgelöst werden. Die Ergebnisse daraus stellen immer Kompromisse dar.

Minimale endogene Mortalität (MEM):

Die Todesrate, welche aus einem neuen technischen System resultiert, darf nicht nennenswert zur Steigerung der natürlichen Sterblichkeit beitragen. Die statistische Mortalität eines europäischen Jungen wird nach DIN EN 50126 mit 0,0002 Todesfällen pro Jahr angegeben. Ein Zwanzigstel dieses Werts wird bereits als nennenswerter Beitrag angesehen.

Globalement au moins aussi bon (GAMAB):

Das Risiko, welches von einem neuen System ausgeht, muss geringer sein als das bereits akzeptierte Risiko eines Vergleichssystems.

As low as reasonably practicable (ALARP):

Dieses Prinzip strebt die Minimierung des Risikos unter Berücksichtigung wirtschaftlicher und sozialer Aspekte an. Es kann nach dieser Methode als gering, allgemein akzeptabel oder unakzeptabel groß gelten. Die Vergleichswerte sind auf das jeweilige Individuum und dessen Vergleichsgruppe und Branche bezogen. Einem

Spezialisten wird daher ein höheres Risiko zugemutet, da er auf das Geschehen besser Einfluss nehmen kann, als ein Unwissender oder ein Novize.

In den Normen werden diese Methoden angewandt und helfen damit bei der Abschätzung des akzeptablen Risikos für technische Systeme. Für den Maschinen- und Anlagenbau soll hier stellvertretend die Methodik nach DIN EN ISO 13849-1 erläutert werden. Sie weist einen Risikographen (vgl. Abbildung 20) zur Auslegung von Sicherheitssystemen aus. Andere Normen beschreiben beispielsweise eine Risikomatrix (DIN EN 954-1). Hinter allen Schemata verbirgt sich aber derselbe Grundgedanke.

Bei der Abschätzung des Risikos ist die Entscheidung zu treffen, ob aus einer Gefährdungssituation eine leichte, üblicherweise reversible (S1) oder eine schwere Verletzung (S2) resultiert. Daraufhin folgt als zweite Entscheidung die Einschätzung der Häufigkeit bzw. der Dauer der Gefährdungsexposition, wobei F1 eine seltene und F2 eine häufige bis andauernde Exposition angibt. Bei der dritten Entscheidung wird die Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung bestimmt. Der Spezialist kann hier wiederum leichter einen Schaden vermeiden als der Unwissende oder der Novize (vgl. ALARP). Unter P1 bleibt dem Benutzer genügend Zeit, die Gefahr zu verhindern, in P2 ist dies kaum möglich.

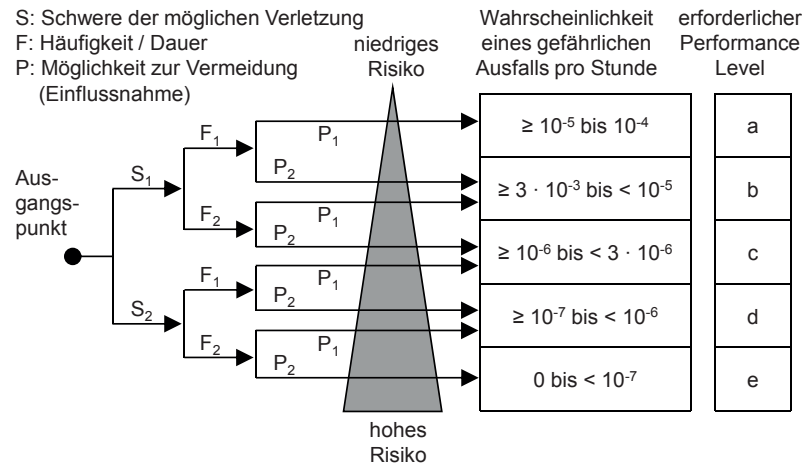


Abbildung 20: Graph zur Beurteilung eines Risikos und Identifikation eines erforderlichen Performance Levels (in Anlehnung an DIN EN ISO 13849-1)

Je nach Risiko und Pfad im Graphen wird die maximal erlaubte Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls einer Sicherheitsfunktion angegeben. Diese Werte entsprechen also dem gesellschaftlich gerade noch akzeptierten Risiko. Um daraus einen Rückschluss auf die Auslegung der Sicherheitssysteme zu ziehen, die eine Gefährdungssituation abwenden sollen, sind den Ausfallwahrscheinlichkeiten erforderliche Performance Levels (PL_r) zugeordnet. Sie beschreiben die geforderte Güte der Sicherheitsfunktion oder des -systems.

2.6 Risikobeurteilung

2.6.1 Methode der Risikobeurteilung

Nach DIN EN ISO 12100 stellt die Risikobeurteilung die Gesamtheit der Verfahren zur Risikoanalyse und Risikobewertung dar (vgl. Abbildung 21). Die Risikoanalyse beinhaltet die Festlegung der Grenzen der Maschine oder der Anlage, die Identifikation der Gefährdungen und die Risikoeinschätzung. Die Norm DIN EN ISO 12100-2 behandelt die zugehörige Risikominderung, welche beispielsweise mit der Norm DIN EN ISO 13849-1 in die Praxis umgesetzt werden kann. Ergibt die Bewertung der einzelnen Risiken, dass die Anlage sicher genug ist, muss keine Risikominderung eingeleitet werden und der Vorgang ist beendet.

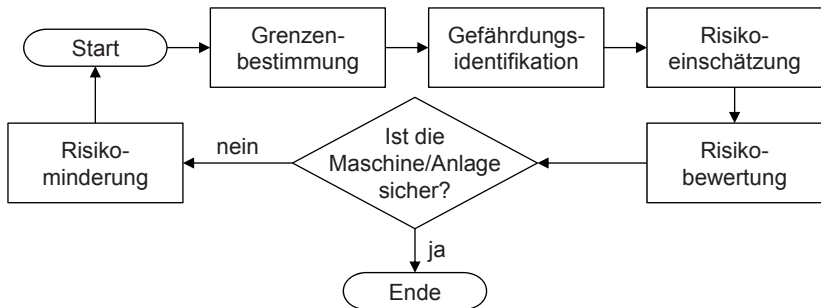


Abbildung 21: Ablauf der Risikoanalyse und -beurteilung (in Anlehnung an DIN EN ISO 12100)

Um Gefährdungen so weit wie möglich zu beseitigen, werden Schutzmaßnahmen umgesetzt. Wenn eine Risikominderung durchgeführt wird, müssen eventuell die Grenzen neu festgelegt und es muss die Maschine oder die Anlage auf eventuell neu entstehende Gefährdungen untersucht werden. Liegen solche dann noch immer vor,

ist eine Wiederholung des Vorgangs der Risikoanalyse und -beurteilung erforderlich.

2.6.2 Grenzenbestimmung

Das Verfahren zur Risikominderung beginnt mit der Festlegung der Grenzen der Maschine oder Anlage. Es werden nicht nur räumliche und zeitliche Grenzen betrachtet, sondern auch insbesondere die Verwendungsgrenzen. Hierzu muss die bestimmungsgemäße Verwendung genauso wie die vernünftigerweise vorhersehbare Fehlanwendung der Maschine berücksichtigt werden. Zudem sind in der Nähe arbeitende Personen zu beachten, die den Gefährdungen im Zusammenhang mit der betrachteten Maschine ausgesetzt sein können.

2.6.3 Gefährdungsidentifikation

Sind die Grenzen der Maschine festgelegt, folgt die systematische Identifikation der Gefährdungen, die den wichtigsten Schritt bei jeder Risikobeurteilung darstellt. Dabei werden vernünftigerweise vorhersehbare Gefährdungen, Gefährdungssituationen und Gefährdungsereignisse in sämtlichen Phasen der Lebensdauer einer Maschine betrachtet.

Mit einer Gefährdung ist die potentielle Schadensquelle und mit der Gefahr die mögliche Schadenswirkung der Gefahrenquelle gemeint. Es wird davon ausgegangen, dass eine an der Maschine vorhandene Gefahr im zeitlichen Verlauf auch zu einem Schaden führt, sofern keine Gegenmaßnahmen eingeleitet werden, um sie zu beseitigen. In jedem Fall sollten alle diese Risiken dokumentiert werden.

Für die systematische Identifikation der Gefährdung gibt es verschiedene Verfahren. Einige Beispiele finden sich in der Norm DIN EN ISO 12100. Eine besonders wichtige Informationsquelle sind die Erkenntnisse mit ähnlichen Systemen aus früheren Analysen. STOLDT (2009) postuliert ein systematisches Vorgehen zur Gefährdungsidentifikation im Bereich der Lasersicherheit an Laser-Materialbearbeitungsanlagen. Bei diesem werden zunächst die primären Gefahren, welche durch den Laserstrahl entstehen, betrachtet (vgl. Abbildung 22).

Diese Gefahren können durch direkte, reflektierte und gestreute Laserstrahlung auftreten. Der Einwirkungsort der Strahlung kann am Auge oder auf der Haut des Anwenders oder auch eines Dritten sein. Des Weiteren werden in diesem Schema

die sekundären Gefahren, welche nicht primär durch den Laserstrahl entstehen, mit in die Beurteilung einbezogen.

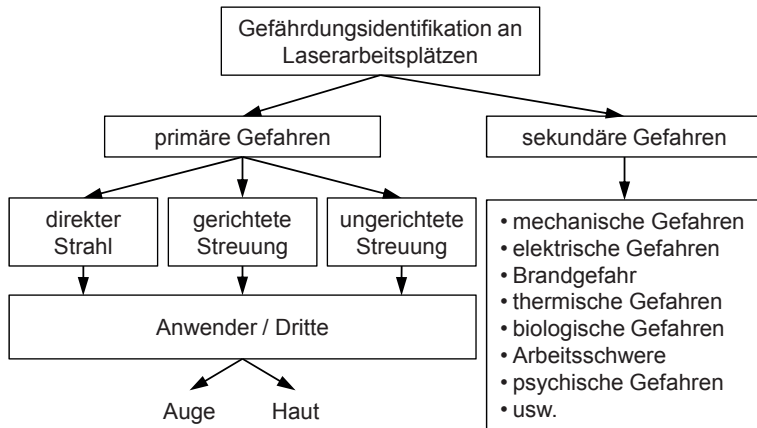


Abbildung 22: Schema zur Gefährdungsidentifikation an Laserarbeitsplätzen (in Anlehnung an STOLDT 2009)

Im Anhang B der Norm DIN EN ISO 12100, in Tabelle B.1, sind solche Gefährdungen entsprechend ihrer Art (mechanische, elektrische, thermische Gefährdung usw.) und mögliche Ursprünge (sich bewegende Teile usw.) bzw. Folgen (Quetschen, Erfassen usw.) aufgelistet. Nachdem die Gefährdungen an der Maschine identifiziert sind, sind die Gefährdungssituationen zu betrachten (vgl. DIN EN ISO 12100, Tabelle B.3), in denen eine Person einer Gefährdung ausgesetzt ist. Die Analyse der Aufgaben, bzw. die Tätigkeiten der an der Maschine arbeitenden Person, helfen diese Situation zu definieren. Bei der Beschreibung einer Gefährdungssituation sollte sichergestellt werden, dass die analysierte Situation eindeutig durch die verfügbaren Informationen definiert wurde. Zuletzt werden durch die Tabelle B.4 Gefährdungsereignisse mit unterschiedlichen Ursachen dargestellt, die beispielsweise mit einer Fehlerbaumanalyse detaillierter analysiert werden können.

2.6.4 Risikoeinschätzung

Nach der Identifikation der Gefährdungen und der dazugehörigen Gefährdungssituationen ist eine Risikoeinschätzung durchzuführen. Für jede Gefährdungssituation ist, beispielsweise mittels des in Abschnitt 2.5 dargestellten Risikographen, das Risi-

ko abzuschätzen. Als weitere Hilfen können statistische Zuverlässigkeitsdaten, Unfallhergänge, Risikovergleiche mit ähnlichen Maschinen oder Daten über Gesundheitsschädigungen und deren Eintrittswahrscheinlichkeiten verwendet werden.

2.6.5 Risikobewertung

Im Anschluss an die Risikoeinschätzung erfolgt die Risikobewertung, um zu entscheiden, ob eine Risikominderung notwendig ist. Eine hinreichende Risikominderung nach DIN EN ISO 12100 ist erreicht, wenn

- alle Betriebsbedingungen und alle Eingriffsmöglichkeiten berücksichtigt wurden,
- die Gefährdungen durch angemessene Schutzmaßnahmen beseitigt oder die Risiken soweit vermindert wurden, wie dies praktisch umsetzbar ist,
- sichergestellt ist, dass die durchgeführten Maßnahmen nicht neue Gefährdungen schaffen,
- die Benutzer über Restrisiken ausreichend informiert und gewarnt wurden,
- sichergestellt ist, dass die Arbeitsbedingungen der Bedienpersonen und die Benutzerfreundlichkeit der Maschine durch die ergriffenen Schutzmaßnahmen nicht konterkariert werden,
- die durchgeführten Schutzmaßnahmen miteinander vereinbar sind,
- die Folgen ausreichend berücksichtigt werden, die sich durch den Gebrauch einer für den gewerblichen/industriellen Einsatz konstruierten Maschine im nicht gewerblichen/nicht industriellen Bereich ergeben können und
- die durchgeführten Schutzmaßnahmen die Arbeitsbedingungen der Bedienpersonen oder die Benutzerfreundlichkeit der Maschine nicht negativ beeinflussen.

Mit diesen acht notwendigen Bedingungen kann die Risikominderung beschriftet werden. Falls die Anlage nicht sicher ist, muss eine geeignete Schutzmaßnahme gewählt werden, die in der Risikominderung genauer betrachtet wird.

2.6.6 Risikominderung

Wurde ein Risiko als nicht akzeptabel bewertet, sind Schutzmaßnahmen vorzusehen. Generell gibt es drei Arten von Schutzmaßnahmen, die nach DIN EN ISO 12100-2 in hierarchischer Reihenfolge das Risiko mindern sollen:

1. Risikominderung durch inhärent sichere Konstruktion

2. Risikominderung durch technische Schutzmaßnahmen
3. Risikominderung durch Benutzerinformation

Mit der inhärent sicheren Konstruktion soll die Anlage so ausgelegt werden, dass Unfälle von vornherein vermieden werden. Damit sollen Bemühungen vorangestellt werden, die mit einer konstruktiven Veränderung der Maschine oder Anlage Gefährdungssituationen vermeiden oder zumindest weitgehend reduzieren. Oft werden aber zusätzliche Schutzeinrichtungen erforderlich, die mit einer der beiden gängigsten Typ-B-Normen (vgl. Abschnitt 2.4.5, S. 24) in diesem Bereich, DIN EN ISO 13849 ff. oder DIN EN 62061 ff., entwickelt werden können. Schlussendlich ist eine Risikominderung auch durch Benutzerinformation möglich, die den Anwender für die Anlage oder Maschine qualifiziert, wobei diese dritte Schutzmaßnahme nur in solchen Ausnahmefällen akzeptabel wird, in denen keine wirtschaftlich angemessene technische Schutzmaßnahme umsetzbar ist.

In Abbildung 23 ist der iterative Prozess zur Risikominderung dargestellt. Sobald eine Risikominderung für eine Gefährdungssituation vorgenommen wurde, erfolgt die Risikoanalyse erneut. Sie untersucht das System auf neu auftretende Gefährdungen. Wenn alle Gefährdungssituationen als akzeptabel bewertet wurden, wird nach der Risikobeurteilung (siehe Abbildung 21) die Maschine als *sicher* bezeichnet. Kann mit allen drei Schutzmaßnahmen das Risiko nicht vermieden oder genügend vermindert werden, gilt die Maschine als unsicher. In diesem Fall wird nach der Maschinenrichtlinie (EUROPÄISCHES PARLAMENT 2006A, Anhang I) eine neue Auslegung der Maschine gefordert.

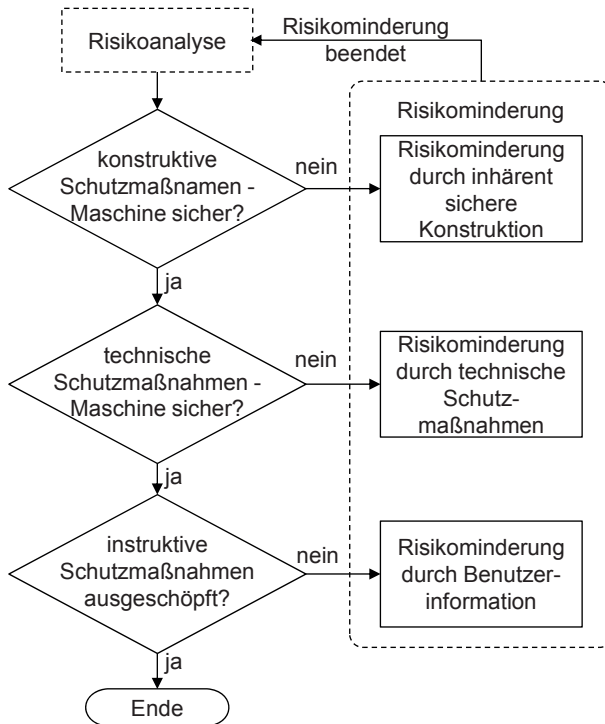


Abbildung 23: Ablauf der Risikominderung (nach DIN EN ISO 12100-2)

2.7 Stand der Forschung und Technik

2.7.1 Allgemeines

Die derzeit üblichen technischen Lasersicherheitsmaßnahmen sind trennende Schutzeinrichtungen, ausgebildet als Umhausungen um die Laseranlage. Sie werden in aktive und passive Schutzwände unterschieden. Weitere Lasersicherheitsmaßnahmen sind im Bereich der Steuerungstechnik vorhanden. Bei Laser-Materialbearbeitungsanlagen sind dies elektrische Verriegelungen und Not-Halt-Systeme sowie Zutrittsbeschränkungen und -kontrollen zu den Anlagen. Sie vervollständigen die Sicherheitstechnik. Persönliche und organisatorische Schutzmaßnahmen stehen ergänzend zur Verfügung.

Zur Entwicklung und begründeten Auswahl von Schutzmaßnahmen sind Daten zur Wirkung von Laserstrahlung sowie zu den daraus resultierenden Produkten wie Rauchen und Dämpfen, aber auch zu der entstehenden Streustrahlung nötig. Auf diese Teilgebiete wird nachfolgend eingegangen.

2.7.2 Technische Laserschutzmaßnahmen

2.7.2.1 Passive Laserschutzkonzepte

Die Funktionsweise von passiven Laserschutzwänden (siehe Abbildung 24) basiert auf ihren physikalischen Eigenschaften. Diese Wände sollen einen auftreffenden Laserstrahl absorbieren und die Umgebung vor ihm abschirmen. Ist die passive Schutzwand in der Art ausgelegt, dass sie der Strahl niemals durchdringen kann, so ist die Anlage als *inhärent sicher* (vgl. Abschnitt 2.6.6) einzustufen. Die einfachste passive Bauart ist Vollmaterial, wie z. B. Stahlbeton.

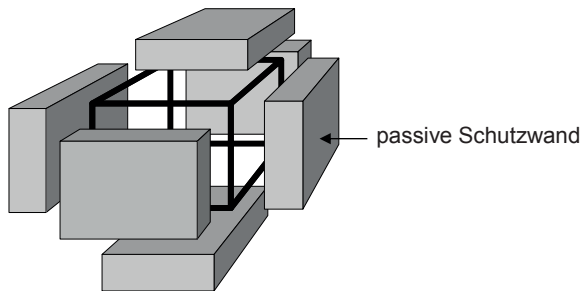


Abbildung 24: Schema (Explosionsdarstellung) einer passiven Laserschutzkabine

Überdies können Laserschutzwände als Hohlkammerwände auf Basis von Platten aus Metall, wie z. B. aus Stahl- oder Aluminiumwerkstoffen, aufgebaut sein (HEBERER 1996). Diese Schutzwandart ist im Vergleich zu den Vollmaterialwänden leicht und i. d. R. mobil. Die Hohlkammerbauart eignet sich auch für Türen und Tore. Ihre Funktionsweise ist durch ihre Materialeigenschaften und den geometrischen Aufbau der abschirmenden Platten bedingt. Wird beispielsweise die Innenseite der Wand durch den fokussierten Laserstrahl zerstört, so ist der Strahl auf der nächsten Platte bereits aufgeweitet und besitzt dort eine geringere Intensität. Die Firma Paletti Profilsysteme GmbH & Co. KG beschreibt in zwei Patenten (KAHL 1998, KAHL 2002) Laserschutzwände aus Blechen, wobei zwischen flächigen Au-

Benwänden und wellblechartigen Innenwänden unterschieden wird (vgl. Abbildung 25). Die flächigen Elemente bestehen aus eloxiertem oder aus chromatiertem Leichtmetall, welches einen hohen Schmelzpunkt aufweist. Der Laserstrahl kann in das Material eindringen und wird dann durch oftmalige Spiegelung an den wellblechartigen Innenwänden abgeschwächt.

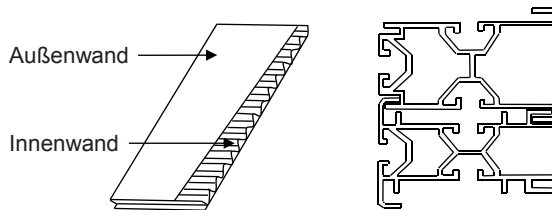


Abbildung 25: Laserschutzwand-Konzept nach KAHL (2002)

Die Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. zeigt eine Hohlkammerwand auf, welche im Inneren einen Beutel beinhaltet. Dieser ist mit einer losen Schüttung aus Granulat mit Partikeln einer Größe von mehr als 0,5 mm gefüllt (vgl. Abbildung 26). Als Schüttgut wird beispielsweise Blähton eingesetzt, der bei vorherrschendem Unterdruck in eine Folie eingeschlossen wird. Ein zusätzlich integrierter Temperatursensor und/oder ein optischer Detektor kann eine vorzeitige Anlagenabschaltung herbeiführen. (KLOTZBACH 2006)

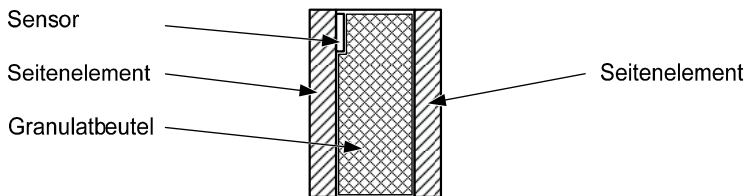


Abbildung 26: Laserschutzwand-Konzept mit loser Schüttung und integrierten Sensoren (in Anlehnung an KLOTZBACH 2006)

Im Patent der Firma Buck Chemisch-Technische Werke GmbH & Co. KG (SCHROETER 1987) wird eine Schutzwandbauart mit Lanthaniden (Feststoff) und/oder Xenon oder Krypton beschrieben. Beim Auftreffen des Laserstrahls soll

sich ein hochionisiertes Plasma bilden, welches die Energie des Laserstrahls absorbiert.

Zu den passiven Systemen zählen auch Laserschutzvorhänge und Laserschutzfenster (FRÖHLICH 2005). Diese sind auch als mobile Barrieren für leistungsschwache Laser einsetzbar.

Im Zusammenhang mit den passiven Laserschutzwänden untersuchten ALUNOVIC & KREUTZ (1996) in dem Forschungsvorhaben „Abschirmungen von Laserarbeitsplätzen“ unterschiedliche Schutzwand-Werkstoffe mit verschiedenen Laserstrahlquellen (cw-CO₂-, pw-CO₂-, Nd:YAG-, Nd:YLF-, Dioden-, Argon-Ionen-, Excimer-Laser). Sie ermittelten Abtrags- und Eindringtiefen in Abhängigkeit der Zeit bei verschiedenen Laserstrahlungsintensitäten und -wellenlängen. Bei einem Nd:YAG-Laser mit einer Wellenlänge von 1064 nm, einem Strahldurchmesser am Werkstück von 4 mm und einer Lasermaximaleistung von 1,5 kW waren bis zu einer maximalen Strahlintensität von 10^7 W/m^2 alle untersuchten Werkstoffe (Kalksandstein, Keramikfliesen, Bodenbelag, Holz, Wärmeabsorptionsglas usw.) tauglich für den Einsatz an Laser-Arbeitsplätzen. Bei höheren Intensitäten kam es jedoch bei allen Materialien schnell zum Durchbrand. Ein vergleichbares Verhalten wurde auch bei der Bestrahlung mit einem 12-kW-CO₂-Laser beobachtet. Heutige Werkstoffe für Laserschutzwände sind vorwiegend Metallwerkstoffe. Diese wurden in der Untersuchung von ALUNOVIC & KREUTZ (1996) nicht betrachtet.

N. N. (2008B) nannte Holzwerkstoffe als passives Schutzwandmaterial und STRITT ET AL. (2012) untersuchten diese. Sie stellten sie Gipswerkstoffen und auch dünnen Platten aus Metallwerkstoffen gegenüber. Die Holzwerkstoffe wiesen dabei in Versuchen mit 3,8-kW-CO₂- und 5-kW-Yt:YAG-Laserbestrahlung bei den verwendeten Strahldurchmessern an den Probekörpern zwischen 30 mm und 60 mm die höchsten Schutzzeiten auf, was auf eine Verkohlung der Oberfläche zurückgeführt wurde. Bereits bei weniger als den oben genannten Intensitäten von 10^7 W/m^2 liegen die größten veröffentlichten Schutzzeiten im Bereich von nur noch 20 s. Darüber hinaus erhöhen brennbare Materialien, wie Holz, die Brandlast an den Anlagen, was in der Risikobewertung (siehe Abschnitt 2.6.5) eine neue Gefährdung darstellt.

FRANEK & HEBERER (2006), FRANEK & HEBERER (2007) und HEBERER (2009B) untersuchten die Auswirkungen von gepulsten und von kontinuierlich strahlenden Lasern auf passive Abschirmungen dar. Dabei wurden einzelne physikalische Effekte getrennt voneinander, hauptsächlich an Plattenmaterialien, betrachtet. FRANEK (2011) erkannte den Zusammenhang der Strahlbrillanz und der schädigenden Wir-

kungsweise von Laserstrahlung bezüglich mehrteiliger Schutzwände. Er führte eine der Brillanz ähnliche Kennzahl ein, nannte sie Gefährdungsmaßzahl und berechnete sie aus dem Quotienten von Laserleistung und Strahlparameterprodukt.

2.7.2.2 Aktive Laserschutzkonzepte

Eine aktive Laserschutzwand (siehe Abbildung 27) ist Teil eines Sicherheitssystems, bestehend aus einer passiven Schutzwand und mindestens einem Sensor, der bei Bestrahlung der dem Laserstrahl zugewandten Seite ein Abschaltsignal (Not-Halt) erzeugt. (DIN EN 60825-4)

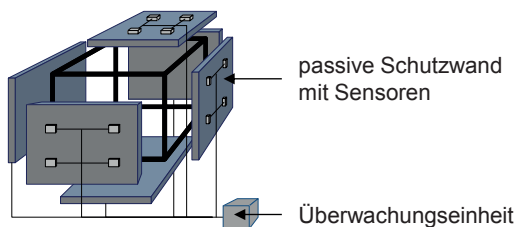


Abbildung 27: Schema (Explosionsdarstellung) einer aktiven Laserschutzwand

Der passive Teil der Schutzeinrichtung verhindert bis zum Ansprechen des Sensors und während der Abschaltzeit der Laseremission ein Durchdringen des Laserstrahls durch die Schutzwand (siehe Abbildung 28).

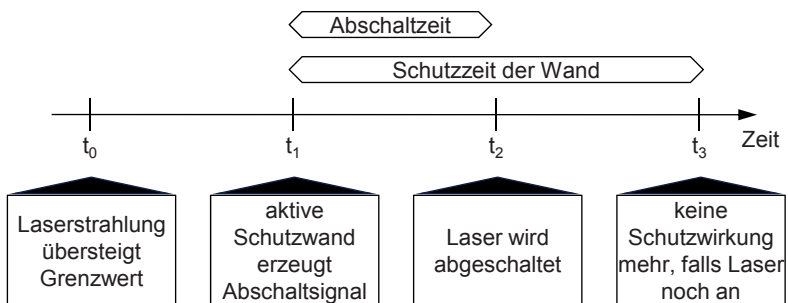


Abbildung 28: Zeitliche Sequenz der Laserabschaltung durch eine aktive Schutzwand (in Anlehnung an DIN EN 60825-4)

Im Bereich dieser aktiven Systeme existieren einige Konzepte, bei welchen in eine Hohlwand Sensoren oder auch sensitive Folien (WILHELM 2007) integriert sind. Diese erkennen optische Signale (vgl. Abbildung 29, FÜCHTENKÖTTER 2005, GOEBEL 2006, N. N. 2008A), Druck- (WILHELM 2007, N. N. 2008A) und Temperaturänderungen (SCHUBERT & SILVANUS 2000) oder auch Rauche (vgl. Abbildung 30, HEBERER 1996). Damit soll eine Reaktion beim Eintritt des Laserstrahls in die Hohlkammer erkannt und das Abschaltsignal für die Laserstrahlquelle erzeugt werden.

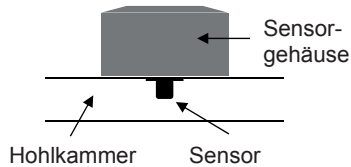


Abbildung 29: Beispiel eines optischen Lasersicherheitssensors, integriert in eine Hohlkammer-Schutzwand (in Anlehnung an GOEBEL 2006)

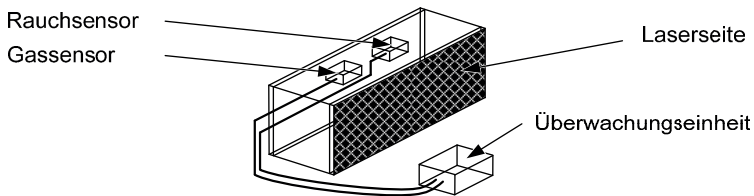


Abbildung 30: Laserschutzwand-Konzept mit einer Hohlkammerwand inklusive integrierter Gas- und Rauchsensoren (in Anlehnung an HEBERER 1996)

Eine weitere Gruppe von aktiven Laserschutzwand-Bauarten ergibt sich durch eine sehr dicht auf einem Trägermaterial aufgebrachte elektrische Leiterbahn, welche großflächig und engmaschig die Innenseite der Laserzelle bedeckt. Die Art des Trägermaterials kann variieren. Dies können Glas- oder Kunststoffscheiben sowie Gewebe und Geflechte sein (vgl. Abbildung 31). (BERARDI & MONCALIERI 1986, GOEBEL 2011, N. N. 2009)

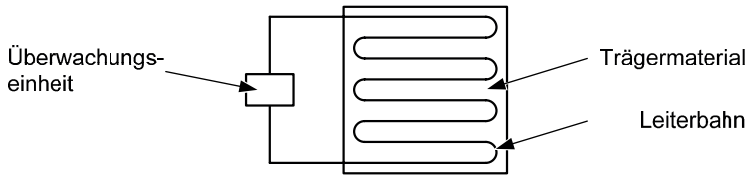


Abbildung 31: Laserschutzwand-Konzept mit elektrischem Leiter auf Trägerplatte (in Anlehnung an GOEBEL 2011 und BERARDI & MONCALIERI 1986)

In einem Patent der Fraunhofer-Gesellschaft (IWS/Dresden) wird eine Schutzwand, bestehend aus zwei elektrisch leitenden Platten und einer Zwischenplatte mit Heißleitereigenschaften, beschrieben (vgl. Abbildung 32). Eine Überwachungseinheit misst permanent die Leitfähigkeit dieser Zwischenplatte. Diese ändert sich mit dem Wärmeeintrag durch den Laserstrahl im Heißleiter. Die Abschaltung der Laserstrahlung erfolgt beim Anstieg der Leitfähigkeit über einen Schwellwert. (HANNWEBER ET AL. 2007)

Ein ähnliches System bietet auch LASERMET LTD. (2012) mit plattenförmigen Schutzelementen zur Auskleidung von Umhausungen kommerziell an. Die Elemente registrieren ebenso das Auftreffen von Strahlung und leiten daraufhin den Not-Halt ein. Das Funktionsprinzip ist hier jedoch nicht offenbart.

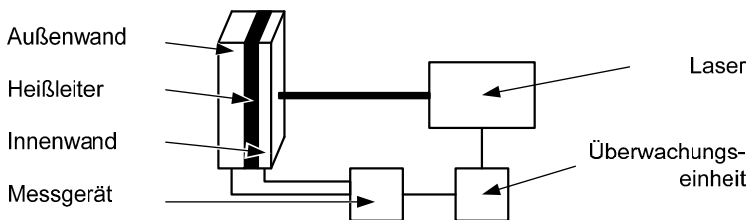


Abbildung 32: Laserschutzwand-Konzept mit Heißleitereigenschaften und angelegter Laserbestrahlung (in Anlehnung an HANNWEBER ET AL. 2007)

Zu den aktiven Systemen gehören auch Systeme, welche den Laserstrahl bzw. den korrekten Einsatz des Strahls überwachen. Hierzu kann der Bereich, in dem das zu bearbeitende Werkstück liegt, statisch mit Hilfe von Kameras und bildverarbeitenden Systemen überwacht werden (EDAG GMBH & CO. KGAA 2009, HEBERER 2009A). Falls der Laserstrahl die vorgegebene Bahn verlässt, so liegt ein Fehlerfall

vor. TAYLOR ET AL. (1990) verfolgen einen ähnlichen Weg. Hier wird nicht der Laserspot auf dem Bauteil beobachtet, sondern ein mögliches Auftreffen des Strahls auf der Schutzwand mittels eines fest im Raum installierten scannerbasierten Detektors erkannt. Leichte passive Schutzwände sollen hier die Reaktionszeit überbrücken.

2.7.3 Organisatorische Laserschutzmaßnahmen

Organisatorische Maßnahmen, als weitere Schutzmaßnahmen, sind Verhaltensregeln, welche vom Arbeitgeber für die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Betriebs erlassen werden. Sie werden u. a. in der Betriebsanweisung für die Lasieranlagen niedergeschrieben. Ein wesentlicher Bestandteil der organisatorischen Schutzmaßnahmen ist die Pflicht zur Unterweisung jedes Bedieners einer Laser-Materialbearbeitungsanlage. Zutrittsrechte, Beschränkungen und Sicherheitsauflagen stellen weitere Maßnahmen dar.

Im europäischen Forschungsprojekt „Dock-Laser“ sollte die Flexibilität der Strahlführung bei Festkörperlasern für verschiedene mobile Anwendungsfälle, vor allem im Schiffsbau, genutzt werden. Hierbei wurden hauptsächlich manuell geführte Laserstrahl-Schweißsysteme oder Traktor-Schweißsysteme eingesetzt. Die Lasersicherheit konnte bei diesen Geräten nur durch organisatorische Maßnahmen, Risiko-beurteilungen, die ständige Beobachtung der Anlage durch den Bediener und den Einsatz von persönlichen Laserschutzmaßnahmen gewährleistet werden. (RASMUSSEN & JASNAU 2006)

2.7.4 Persönliche Laserschutzmaßnahmen

Die letzte Stufe der Schutzmaßnahmen ist die persönliche Schutzausrüstung (PSA). Sie muss bei gefährlichen Arbeiten und Tätigkeiten vom Arbeitgeber zur Verfügung gestellt und von den betroffenen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern verwendet werden, um Verletzungen zu vermeiden oder zu minimieren, die durch andere Maßnahmen nicht verhindert werden können. PSA in der Laser-Materialbearbeitung sind vor allem Laserschutz- und Laserjustierbrillen, welche für das Auge zu intensive Laserstrahlung auf ein akzeptables Niveau abschwächen. Bei zu hoher Intensität für die Schutzfilter versagen jedoch selbst diese (SCHIRMACHER ET AL. 1999B, ZÄH & BRAUNREUTHER 2011).

MEIER ET AL. (2008) und PÜSTER (2009B) erforschten in den von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) finanzierten Forschungsprojekten

„Qualifizierung konstruktiver technischer Schutzmaßnahmen für handgeführte Lasergeräte zur Materialbearbeitung“ und „Qualifizierung persönlicher Schutzausrüstung für handgeführte Lasergeräte zur Materialbearbeitung“ Sicherheitsfunktionen bei handgeführten Lasergeräten. Es wurden verschiedene Arten von Sicherheitsbauteilen wie Auflagesensoren, Neigungsschalter oder auch Beschleunigungsmesser auf die Tauglichkeit in diesen Lasersystemen getestet. Ebenso wurde PSA für diese Laseranlagen entwickelt und getestet und es wurden Prüfkriterien dafür definiert. Schutzbekleidung, vor allem für handgeführte Laserstrahl-Materialbearbeitungsprozesse, befindet sich derzeit in der Entwicklung (PÜSTER 2009A, PÜSTER 2009B).

Im laufenden Forschungsvorhaben „Prosys Laser“ wird die Funktionsweise von aktiven Laserschutzwänden auf Schutzkleidung, im Speziellen für die handgeführte Laserstrahl-Materialbearbeitung, übertragen. Diese Kleidung, vorwiegend Handschuhe, ist mit Sensoren ausgestattet, die einen auftreffenden Laserstrahl erkennen und daraufhin den Not-Halt auslösen. (HUSTEDT 2012)

Für den Bereich der Femtosekunden-Technologie, im Laserpulsbereich von 5 fs bis 10 ps, wurden in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekt „SAFEST“ Regeln für die Arbeitssicherheit und insbesondere für den Augenschutz erarbeitet. Schwerpunkte lagen vor allem in der Untersuchung von standardisierten Qualitätsanforderungen und Prüfverfahren für Schutzeinrichtungen wie Schutzbrillen, Schutzfenster, Schutzvorhänge und Schutzwandmaterialien. Die Projektergebnisse zeigen, dass je nach verwendetem Werkstoff unterschiedliche Schutzzeiten bei gleicher Bestrahlungssituation zu beobachten sind. Demnach ermöglicht nur eine auf wissenschaftlichen Daten basierende Gefährdungsbewertung und Qualifizierung der jeweiligen Schutzmaßnahme, angepasst an das verwendete Lasersystem, einen sicheren Umgang mit dieser Lasertechnologie. (KRÜGER 2004)

2.7.5 Laserstrahlungswirkung und -quantifizierung

Weitere Forschungsarbeiten aus dem arbeitsmedizinischen Bereich untersuchten die Wechselwirkung von Laserstrahlung mit organischem Gewebe. Daraus resultierten Grenzwerttabellen von Laserstrahlungsintensitäten bzw. -energiemengen für das Auge und die Haut (EUROPÄISCHES PARLAMENT 2006B, BGFE 2007, VDE EN 60825-1), welche für die weitere Entwicklung von Laser-Schutz- und Laser-Justierbrillen von Bedeutung sind (SCHIRMACHER ET AL. 1999A, SCHIRMACHER ET AL. 1999B). Andere Projekte prüften im Bereich der Arbeitsmedizin die Rauch- und

Emissionsbildung bei verschiedenen Laserprozessen als direkten Einfluss auf den menschlichen Organismus (VDI 1995, VDI 1997).

In Bezug auf die bei Laserprozessen unweigerlich auftretende schädigende Streustrahlung ist keine Forschung bekannt. Ob die Laserstrahlung von der Anlage direkt auf das menschliche Gewebe bzw. auf Schutzwände emittiert wird oder ob sie als reflektierte Strahlung wirkt, spielt hierbei nach STOLDT (2009) keine Rolle. Daher ist auch die Quantifizierung gestreuter und reflektierter Strahlung relevant.

Für die Unterstützung der Prozessoptimierung wurden in diesem Themengebiet Arbeiten durchgeführt. So wurde von XIE & KAR (1999) die Reflektivität von kaltgewalzten Stahlblechen bei der Bearbeitung mit einem CO₂-Laser gemessen. Hierzu wurde ein Laser-Leistungsmessgerät in den Strahlengang des direkt reflektierten Laserstrahls platziert. Die Reflektivität konnte so als Verhältnis von eingestrahelter zu reflektierter Strahlung berechnet werden.

MEHMETLI ET AL. (1996) beschrieb eine einfache Methode zur Ermittlung der Reflektivität von verschiedenen Aluminiumlegierungen bei der Bearbeitung mit einem CO₂-Laser. Mit pyroelektrischen Detektoren wurden hierzu die Intensitäten der reflektierten Laserstrahlung an vorbestimmten Orten auf einer halbkugelförmigen Begrenzungsfläche über der Prozesszone gemessen.

MÜLLER (2002) zeigte Möglichkeiten für die Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch die Auswertung der reflektierten Laserleistung auf. Auf der Basis einer industriellen Anwendung stand die Überwachung von Qualitätsmerkmalen wie Einschweißtiefe, Anbindung an den Fügepartner, Prozesssporen und Nahtauswürfen im Vordergrund. Durch ein vorwiegend aus Photodioden bestehendes Mehrdetektorensystem konnten diese Merkmale während des Schweißprozesses überwacht werden und boten so eine Möglichkeit zur In-Process-Überwachung.

MÜLLER-BORHANIAN (2009) stellte die kamerabasierte In-Process-Überwachung beim Laserstrahlschweißen vor. Durch die Verwendung von verschiedenen Kamerasystemen und Filtern zur Einschränkung des Spektralbereichs konnten die Schmelzbad- und die Keyholegeometrie bei Tiefschweißprozessen aufgezeichnet werden. Hochgeschwindigkeitskameras ermöglichten durch Bildfolgefrequenzen im Kilohertz-Bereich die Untersuchung des dynamischen Verhaltens von Schmelzbad- und Keyholegeometrie.

Eine weitere Methode zur Ermittlung der reflektierten Laserleistung ist die Berechnung mit dem Kirchhoff'schen Gesetz. Hierzu wird die absorbierte Leistung gemes-

sen und von der eingestrahlten Gesamtleistung subtrahiert. Dies führt näherungsweise zu der reflektierten Leistung, eine örtliche Auflösung ist damit aber nicht möglich. (BAEHR & STEPHAN 2006)

2.8 Defizitanalyse und Handlungsbedarf

Die meisten vorgestellten Lasersicherheitsmaßnahmen und -konzepte basieren ausschließlich auf einer Umhausung der Anlage. Im Fall einer rein passiven Schutzwand kann eine ausreichende Schutzwirkung nur mit einem großen Abstand vom möglichen Laserstrahl-Fokuspunkt realisiert werden. Der Laserstrahl weitet sich, insofern er nicht kollimiert ist, dann durch seine Divergenz bis zur Schutzwand auf und verliert an Strahlungsintensität. Nach FRANEK & HEBERER (2006) ist eine Intensität von bis zu $1,2 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$ für beispielsweise eine nicht weiter spezialisierte Stahl-Schutzwand dauerhaft zulässig. Bei modernen Remote-Laserstrahlanlagen bedeutet dies jedoch einen zusätzlichen benötigten Abstand der Schutzwand von der ungünstigsten möglichen Optikposition von mehreren Metern. Da sich damit der Flächeninhalt der Schutzwand stark vergrößert, steigen der Materialverbrauch und die Kosten dadurch überproportional. Die reine Verstärkung einer passiven Schutzwand verlängert zwar ihre Schutzzeit, jedoch wird sich der Laserstrahl immer in endlicher Zeit durch die Wand hindurch bohren können.

Bei aktiven Laserschutzwänden werden Sensoren dezentral in Wänden verbaut, die den auftreffenden Laserstrahl erkennen und das System abschalten sollen. Diese Sensoren müssen somit die gesamte Schutzwandfläche überwachen. Der allgemeine Trend in der Laser-Materialbearbeitung zu immer größeren Bearbeitungsabständen führt unweigerlich zu ebenfalls größeren Umhausungen der Laserstrahlanlagen. Sie müssen wiederum mit Sensortechnik ausgestattet werden, was sich in überproportional hohen Investitionskosten für die Lasersicherheit bemerkbar macht.

Zu den aktiven Systemen gehören auch Systeme, welche den Laserstrahl bzw. den korrekten Einsatz des Strahls überwachen (EDAG GMBH & CO. KGAA 2009, HEBERER 2009A, ZÄH ET AL. 2009B). Sie liefern ein In-Ordnung-Signal, solange der Auftreffpunkt des Laserstrahls innerhalb des Überwachungsbereichs liegt. Die Brennfleckdetektion erfolgt hierbei kamerabasiert. Das Aufnahmefeld ist dabei statisch und lässt sich nur auf einen bestimmten Bereich im Raum ausrichten. Bei dieser Ausrichtung muss darauf geachtet werden, dass der Laserprozess immer eingesehen werden kann. Hinterschneidungen stellen somit ein grundlegendes Problem dar. Die hohe Strahlpositionierungsfreiheit moderner Anlagen und die heutige,

komplexe Spanntechnik führen jedoch häufig zu Hinterschneidungen. Diesen geometrischen Einschränkungen kann in letzter Konsequenz wiederum nur mit einem Paralleleinsatz der Überwachungssysteme begegnet werden. Dann sind die Laserbearbeitungspunkte über die unterschiedlichen Blickwinkel der einzelnen Überwachungssysteme einsehbar. Auch hier ist deshalb die Dezentralität gegeben. Des Weiteren darf sich keine Schutzwand-Innenseite im Blickfeld befinden, da sonst bei ihrer Bestrahlung die Fehlersituation nicht als solche erkannt werden würde. Bisher ist kein derartiges System einsatztauglich und nach sicherheitstechnischen Vorgaben (beispielsweise nach DIN EN ISO 13849 ff.) ausgelegt und aufgebaut.

Die Betrachtungen zum Stand der Forschung und Technik erlauben als Schlussfolgerung: Derzeit existiert keine für die Industrie wirtschaftlich einsetzbare Risikominderungsstrategie in Bezug auf hochbrillante Laserstrahlquellen. Die verfügbaren Laserschutzmaßnahmen genügen den heutigen Sicherheitsstandards in unseren Produktionsstätten im Allgemeinen nicht. Die Entwicklung der Lasersystemtechnik, der vermehrte Einsatz von Remote-Lasersystemen in den verschiedensten Branchen, die stetige Zunahme der Laserleistung bei gleichzeitig immer brillanter werdender Strahlung und die somit immer größer werdenden Bearbeitungsabstände verschärfen die Problematik des Laserschutzes weiter. Ohne fähige technische Lösungen werden Personen an den Anlagen dadurch zunehmend großen Gefahren ausgesetzt. Es besteht daher Handlungsbedarf für die Erstellung eines unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten fähigen Lasersicherheitskonzepts. Dazu wird im nachfolgenden Kapitel zunächst ein Konzept beziehungsweise ein Lösungsansatz vorgestellt.

3 Lösungsansatz

3.1 Zentrales aktives Lasersicherheitskonzept

Für die Realisierung der Lasersicherheit bei Anwendungen mit hochbrillanten Laserstrahlquellen ist eine neuartige, zukunftsorientierte und den Trends in der Laser-Materialbearbeitung und im Laserstrahlquellen-Bau gerecht werdende Lösung gefordert. Sie sollte derart gestaltet sein, dass sich die Laserleistung und die Anlagen- und Umhausungsgröße bei vollkommener räumlicher Positionierungsfreiheit des Laserstrahls möglichst wenig auf die Sicherheitssystemkosten auswirken. Die Lasersicherheitstechnologie muss an diese neuen Herausforderungen angepasst sein. Ein wesentlicher Anspruch ist daher die Abkehr von der besonders materialintensiven passiven Schutzwand und dem großflächigen dezentralen Sensoreinsatz bei bisherigen aktiven Lasersicherheitskonzepten. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass das wandbasierte und somit dezentrale Sensorkonzept in ein zentrales Sensorkonzept überführt werden muss (vgl. Abbildung 33).

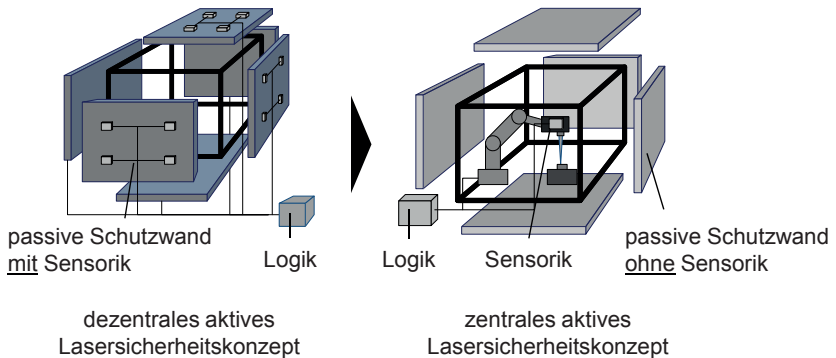


Abbildung 33: Anpassung der konventionellen aktiven Lasersicherheitskonzepte (links) an neue Herausforderungen; zentrales aktives Lasersicherheitskonzept (rechts)

3.2 Wirtschaftliche Betrachtung

Unter der Hypothese, dass die steigende Strahlbrillanz zukünftiger Laserstrahlquellen hauptsächlich zur Vergrößerung des Arbeitsabstands verwendet wird, können

für die im Stand der Forschung und Technik erläuterten passiven, für die dezentralen aktiven sowie für die neuartigen zentralen aktiven Laserschutzkonzepte aufgrund von Ähnlichkeitsbeziehungen nach MÜLLER (2006) Kostenwachstumsgesetze für ein vorgegebenes Szenario definiert werden. Hierzu wird der häufig eingesetzte Typ der robotergestützten Laser-Materialbearbeitungsanlage betrachtet.

Die Laserstrahloptik kann hierin mittels eines Industrieroboters bis zur Reichweite R_k , näherungsweise halbkugelförmig, um einen Koordinatenursprung mittig am Boden der Zelle frei im Raum bewegt werden. Der Arbeitsabstand liegt von der Optik wiederum um eine Brennweite f entfernt. Der verfügbare Arbeitsraum ist in diesem Szenario nicht künstlich eingeschränkt.

Im Fall des passiven Konzepts wird von einer zusätzlichen Strecke S_z nach der Strahlfokusposition bis zur Schutzwand ausgegangen. Innerhalb dieser soll der Strahl soweit divergieren, dass die resultierende Strahlungsintensität die Schutzwand nicht durchdringen kann. Bei konventionellen Anlagen mit mittleren Laserleistungen sind typische Werte für diese Strecke etwa drei Brennweiten. Bei hohen Leistungen, wie sie mit bereits verfügbaren modernen Strahlquellen darstellbar sind, werden weitaus größere zusätzliche Abstände benötigt. Es ergibt sich somit ein Abstand L vom Koordinatenursprung von $L = R_k + f + S_z$. Bei aktiven Schutzkonzepten ist zwar auch ein Sicherheitsabstand sinnvoll, technisch aber nicht unbedingt nötig. Aus diesem Grund wird er bei diesen Systemen nicht mit abgebildet. Der Abstand beträgt hier $L = R_k + f$.

Die Schutzumhausung folgt aus konstruktiven Gründen nicht der Halbkugelform, sondern ist i. d. R. quaderförmig ausgebildet. Der Boden wird hier nicht berücksichtigt, weil sich unterhalb einer Laseranlage in einer Werkhalle üblicherweise kein Stockwerk befindet. Kann aufgrund einer Durchstrahlung des Bodens eine Gefahr resultieren, so ist er auch zu berücksichtigen. Mit dem Abstand L vom Ursprung beträgt die seitliche Wandfläche somit $4 \cdot 2 \cdot L^2$ und $4 \cdot L^2$ für die Deckenfläche. Die mindestens erforderliche Gesamtfläche ergibt sich damit zu $12 \cdot L^2$.

Die Kosten für die reinen Schutzwände sind flächenbezogen. Im passiven Konzept werden sie mit SW_p und bei den aktiven Konzepten mit SW_a angegeben. Die aktiven Konzepte unterscheiden sich in der Art der Sensoren. Im dezentralen aktiven Fall sind diese in den Wandflächen verteilt, deren Kosten hier ebenso flächenbezogen mit S_{da} angegeben sind. Im zentralen aktiven Konzept wird nur ein Sensor verwendet. Seine Kosten sind mit S_{za} benannt. Zusätzliche Logikkomponenten wie ein Not-Halt-System oder eine Sicherheitssteuerung bleiben in dieser Kostenab-

schätzung nicht berücksichtigt, da sie ohnehin in der Anlagentechnik enthalten sein müssen.

Die Kostenwachstumsgesetze des passiven (K_p), des dezentralen aktiven (K_{da}) und des zentralen aktiven Konzepts (K_{za}) ergeben sich in der Abhängigkeit des Arbeitsabstands f mit den Formeln (12) bis (14):

$$K_p(f) = [12 \cdot (R_k + f + S_z)^2] \cdot SW_p \quad (12)$$

$$K_{da}(f) = [12 \cdot (R_k + f)^2] \cdot [SW_a + S_{da}] \quad (13)$$

$$K_{za}(f) = \{[12 \cdot (R_k + f)^2] \cdot SW_a\} + S_{za} \quad (14)$$

Die Kostenfaktoren in diesen Gleichungen unterliegen dem Markt und können nicht allgemein angegeben werden. Im Folgenden sind daher im Sinne einer konservativen Betrachtung niedrige Werte für die derzeitigen Faktoren der bereits bestehenden Schutzkonzepte genannt und dagegen hohe Kosten für die neuen ausgewiesen. Die Parameter werden mit $R_k = 3 \text{ m}$, $S_z = 3f$, $SW_p = 100 \text{ €/m}^2$, $SW_a = 50 \text{ €/m}^2$, $S_{da} = 100 \text{ €/m}^2$ und $S_{za} = 20.000 \text{ €}$ angenommen. Die resultierenden Kostenverläufe sind in Abbildung 34 dargestellt.

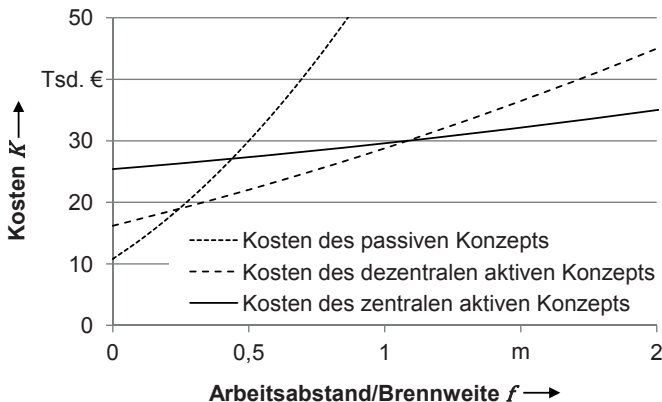


Abbildung 34: Kostenverläufe der verschiedenen Sicherheitskonzepte über dem Arbeitsabstand für das Szenario der robotergestützten Anlage

Je nach Kostenfaktoren und gewähltem Arbeitsabstand ergeben sich unterschiedliche kostengünstige Sicherheitskonzepte. Es ist aber auch ersichtlich, dass das zent-

rale aktive Sicherheitskonzept im Hinblick auf immer größere Arbeitsabstände die geringsten Kosten verursacht und somit zukunftsfähig ist.

3.3 Ableitung von Betrachtungsbereichen

Der Zweck einer jeden Laser-Materialbearbeitungsanlage ist die Ausführung einer Bearbeitungsaufgabe. Hierzu wird ein Laserprozesses ausgewählt. Dieser Prozess erfordert eine passende Systemtechnik, welche wiederum erst zum Prozess befähigt. Im Kontext dieser Arbeit sind vor allem Laserschweißprozesse bei großen Arbeitsabständen adressiert. Im Normalbetrieb geht von der Prozesszone Streustrahlung ungerichtet in den Raum. Weiterhin treten aber auch gerichtete Reflexionen auf. Kommt es zu einem Fehlerfall, beispielsweise während einer Fehlfunktion bei der die Optik führenden Kinematik, so kann dies zur unkontrollierten Direktstrahlung führen. Die ersten beiden Fälle stellen hierbei eine eventuell zyklisch auftretende *normale Last* dar. Diese ist als eine vom Fehlerfall bis zum Abschalten der Strahlung *temporäre Last* zu betrachten.

In Hinsicht auf die Sicherheit bezüglich Laserstrahlung müssen gegen diese Strahlungsarten im Zuge der Risikominderung (vgl. Abschnitt 2.6.6) Schutzmaßnahmen getroffen werden. Bei dem im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigten Lösungsansatz des zentralen aktiven Lasersicherheitskonzepts sind dies die bereits aus Abschnitt 2.7 bekannten, leichten passiven Hohlkammer-Schutzwände. Um diese Schutzwände in einem definierten Abstand von der Streustrahlungs- bzw. Reflexionsquelle gegen diese normale Last auszulegen, werden für die verschiedenen adressierten Laser-Materialbearbeitungsprozesse Charakterisierungen der Strahlungsverteilungen in einer parametrischen Form benötigt. Dies definiert den ersten Betrachtungsbereich dieser Arbeit. Die Bestimmung der konkreten Last, welche durch die Direktstrahlung, ebenfalls bei gegebenen geometrischen Verhältnissen, appliziert wird, kann mittels bekannter Verfahren der geometrischen Optik durchgeführt werden. Die Hohlkammer-Schutzwand muss gegenüber der permanenten Last dauerhaft und bei der temporären Last für einen gewissen Zeitraum sicheren Schutz bieten. Hierzu muss sie sicher auf diese möglichen Lastfälle abgestimmt werden, sie soll jedoch aufgrund der geforderten Wirtschaftlichkeit auch nicht überdimensioniert sein. Dies stellt derzeit ein grundlegendes Problem dar. Schutzwände können bisher nur auf ihre Schutzwirkung mit einem bestimmten Lasersystem im Realversuch getestet werden. Für eine Vorab-Auslegung auf einen gegebenen Belastungsfall fehlen derzeit geeignete Berechnungsverfahren. Eine Methode hierzu muss auf nachvollziehbare physikalische Gesetze aufgebaut sein und eine Validierung mit

Experimenten bestehen, was den zweiten Betrachtungsbereich begründet. Damit die Last der Direktstrahlung auf die Umhausung im Fehlerfall als temporär angenommen werden kann, wird der Überwachungssensor benötigt. Er ist, wie im vorangegangenen Abschnitt begründet, zentral zu gestalten. Dieser neuartige Sensor soll mithilfe einer Logik eine anhaltende und schädigende direkte Bestrahlung der Schutzwand verhindern. Das Sicherheitssystem soll eine Strahlfehlpositionierung erkennen und einen Laserstrahlungs-Abschaltbefehl (Not-Halt) erzeugen. Nach Ausführung dieses Befehls muss die Strahlungsemission gestoppt werden. Die dafür anzunehmenden drei Zeitspannen können als Reaktionszeit des Sicherheitssystems zusammengefasst werden. Es gilt zu beachten, dass diese Zeitspanne immer kürzer sein muss als die Schutzzeit des passiven Teils der Sicherheitseinrichtung (vgl. Abbildung 35).

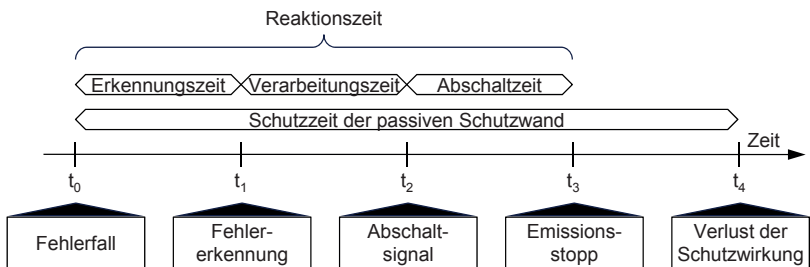


Abbildung 35: Zeitlich kritischer Pfad beim Fehlerfall an einer Laseranlage (in Anlehnung an DIN EN 60825-4)

Das zentrale aktive Sensorkonzept stellt den letzten Betrachtungsbereich dar. Die einzelnen Strahlungsarten und deren Zusammenspiel mit den jeweiligen Schutzmaßnahmen im zentralen aktiven Lasersicherheitskonzept sowie die Ableitung der einzelnen Betrachtungsbereiche ist in Abbildung 36 veranschaulicht. Es sind darin die jeweiligen Kapitel zugeordnet.

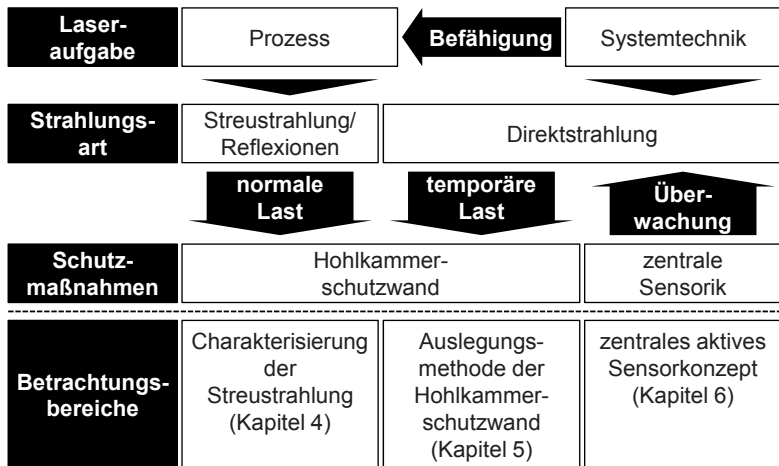


Abbildung 36: Ableitung der Betrachtungsbereiche der vorliegenden Arbeit bei gegebenen Laserprozessen mit moderner Systemtechnik unter Berücksichtigung des zentralen aktiven Lasersicherheitskonzepts

4 Charakterisierung der Streustrahlung bei Laserstrahl-Schweißprozessen

4.1 Zweck

Aufgrund der in Abschnitt 2.1.3.2 erläuterten optischen Zusammenhänge treten bei der Laserstrahl-Materialbearbeitung Reflexionen der Laserstrahlung am Werkstück auf. Um diese bei der Erstellung von Schutzsystemen für Anlagen zur Laserstrahl-Materialbearbeitung berücksichtigen zu können und in eine konstruktive Auslegung mit einfließen zu lassen, werden diese Reflexionen im Folgenden, abhängig von verschiedenen Laserstrahl-Materialbearbeitungsmechanismen, modelliert und quantifiziert. Erste Erkenntnisse hieraus wurden bereits in ZÄH ET AL. (2010) vorgestellt.

4.2 Vorgehensweise

Zur Beschreibung der Streustrahlung, d. h. der Gesamtheit aller Reflexionen, bei Remote-Laserstrahl-Schweißprozessen mit brillanten Festkörperlasern werden die auf der Materialoberseite auftretenden Absorptions- und Reflexionsverhältnisse der Strahlung betrachtet, in Einzelmodelle überführt und schließlich in ein Modell der gesamten Streustrahlung zusammengefasst. Zur Beurteilung der Validität dieses Modells wurden Experimente durchgeführt und Streustrahlungsmesswerte aufgenommen. Die jeweiligen Versuchsparameter dienen wiederum als Eingangswerte für das Modell, um Streustrahlungswerte zu berechnen. Die berechneten und gemessenen Werte werden daraufhin einander gegenübergestellt und miteinander verglichen. Abbildung 37 illustriert dieses Vorgehen.

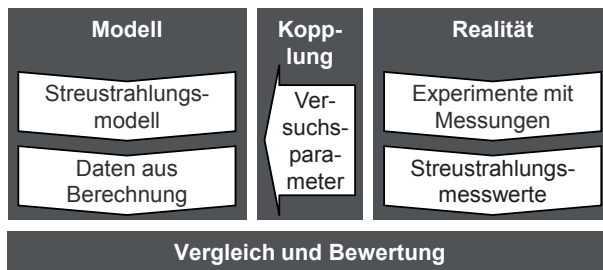


Abbildung 37: Vorgehen zur Modellierung der Streustrahlung bei Remote-Laserstrahl-Schweißprozessen und Abgleich mit Experimenten

4.3 Modellbildung der Propagation von Reflexionen

4.3.1 Allgemeines

Die Laserstrahlung wird in Abhängigkeit von den wichtigsten Prozessparametern, wie der Laserleistung und dem Einstrahlwinkel, und den materialspezifischen Parametern, wie dem Absorptionsgrad und dem Reflexionsgrad am Werkstück, zu Teilen absorbiert und reflektiert. Grundsätzlich lassen sich die entstehenden Reflexionen nach Abschnitt 2.2 (S. 16) in dieser Betrachtung in eine spiegelnde, in eine rückspiegelnde und in eine diffuse Reflexion unterteilen. Diese Reflexionen werden in den nächsten Abschnitten mathematisch beschrieben und verschiedenen Bereichen der Prozesszone beim Laserschweißen zugeordnet. Sowohl der einfallende Laserstrahl als auch die spiegelnde und die rückspiegelnde Reflexion werden hierbei als Strahl mit einer Gauß'schen Intensitätsverteilung, jedoch mit unterschiedlichen Strahlqualitäten, angenommen. Die diffuse Reflexion an der Werkstückoberfläche folgt der in Abschnitt 2.1.3.2 (S. 10) vorgestellten Charakteristik eines Lambert-Strahlers und verteilt sich in alle Raumrichtungen. Beginnend von dem auf das Werkstück gerichteten Laserstrahl werden die mathematischen Zusammenhänge bis zum Erhalt der Intensitäten der Reflexionen nachfolgend erläutert.

4.3.2 Beschreibung des einfallenden Laserstrahls

Der einfallende Laserstrahl wird als konzentrisch und nach Gauß, wie in Abbildung 38 dargestellt, angenommen. Er appliziert über seinen Brennfleck die Laserleistung P_L auf die Prozesszone.

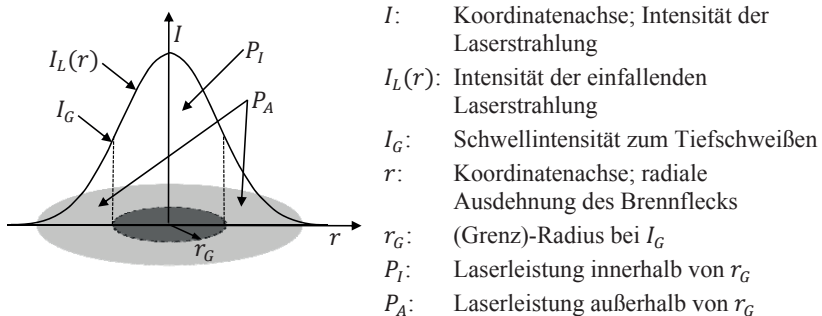


Abbildung 38: Angenommene konzentrische Gauß'sche Intensitätsverteilung des einfallenden Laserstrahls im Streustrahlungsmodell

Die Intensität der Laserstrahlung $I_L(r)$ nimmt bei dieser Verteilung mit dem Abstand vom Brennfleck-Mittelpunkt des Laserstrahls ab. Im Fall eines Tiefschweißprozesses weist ein Teil des Laserstrahls eine Intensität $I_L(r)$ oberhalb der benötigten Schwellintensität I_G zum Erreichen der Tiefschweißschwelle auf (vgl. Abschnitte 2.2.2, S. 17 und 2.2.3, S. 19). Der Radius r_G ist demnach jener, an dem die Schwellintensität I_G unterschritten wird. Durch Umstellen der Gauß'schen Intensitäts-Funktion lässt sich der Radius r_G in Abhängigkeit der Laserleistung P_L und des 86%-Strahlradius r_0 bei verschiedenen Schwellintensitäten I_G berechnen (siehe Formel (15)):

$$r_G = \sqrt{\frac{\ln \left[\frac{I_G \cdot r_0^2 \cdot \pi}{2 \cdot P_L} \right] \cdot r_0^2}{-2}} \quad (15)$$

In Abbildung 39 ist r_G für verschiedene Schwellintensitäten in Abhängigkeit der Laserleistung dargestellt. Der 86%-Strahlradius ist hier beispielhaft zu $r_0 = 298 \mu\text{m}$ angenommen. Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, liegt die Tiefschweißschwelle bei Aluminium- wie auch bei Stahlwerkstoffen zwischen $I_G = 1 \text{ MW/cm}^2$ und 2 MW/cm^2 .

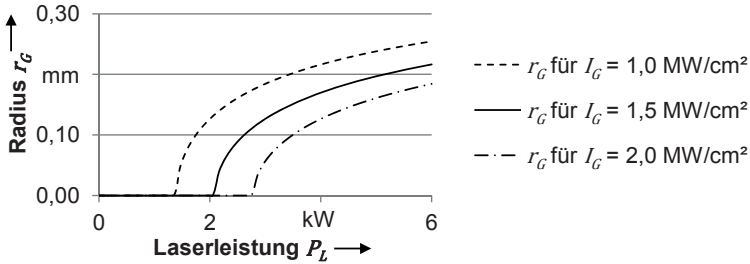


Abbildung 39: Radius r_G in Abhängigkeit verschiedener Schwellintensitäten I_G ; Plot von Formel (15) mit $r_0 = 298 \mu\text{m}$

Bei der Betrachtung von Abbildung 39 ist ersichtlich, dass für einen gegebenen Laserstrahl bei geringen Laserleistungen die Schwellintensität zum Tiefschweißen nicht überschritten werden kann. Bei dem dann vorherrschenden Schweißregime des Wärmeleitungsschweißens (vgl. Abschnitt 2.2.1 und BEYER 1995) beginnt das Eindellen der Schmelzoberfläche jedoch bereits unterhalb der Tiefschweißschwelle. Deshalb wird in dieser Betrachtung tendenziell mit den niedrigeren Schwellen und damit größeren Grenzzadien r_G gerechnet.

4.3.3 Leistungsverhältnisse im Brennfleck

Die bis zum Radius r_G um die Strahlachse im Strahl enthaltene, innenliegende Leistung wird mit P_I bezeichnet. P_I kann in Abhängigkeit von r_G entsprechend dem Integral nach Formel (16) berechnet werden:

$$P_I = 2\pi \cdot \int_0^{r_G} r \cdot I_L(r) dr \quad (16)$$

Der restliche äußere Leistungsanteil P_A des Laserstrahls liegt unterhalb der Schwellintensität I_G . P_A berechnet sich somit als Differenz der Gesamtleistung P_L und der innenliegenden Leistung P_I (vgl. Formel (17)):

$$P_A = P_L - P_I \quad (17)$$

4.3.4 Auswirkungen von Prozesszonengeometrien auf Reflexionen

Die Geometrie der Prozesszone hängt maßgeblich von der eingebrachten Intensität ab. Bei geringer Strahleinkopplung kommt es zu keiner signifikanten Delle bzw. geometrischen Deformation der Prozesszone. Mit einer Steigerung der Intensität ist auch mit einer Verformung zu rechnen. Solange es noch nicht zur Mehrfachreflexion kommt, ist das vorherrschende Regime ein Wärmeleitungs-Schweißprozess. r_G existiert hier nicht oder ist sehr klein. Bei Intensitäten oberhalb der Tiefschweißschwelle wird sich eine Dampfkapillare ausbilden. Das Aspektverhältnis der Prozesszonengeometrie nimmt zu. In schleppender Einstrahlung wird der angestellte Laserstrahl die Prozesszone weit öffnen, während er sich stechend unter das noch feste Material schiebt (WEBERPALIS 2010, OEFELE 2012). Das Zusammenlaufen der verdrängten Schmelze führt zu unruhigen Oberflächenverhältnissen (FABBRO ET AL. 2006). Es muss davon ausgegangen werden, dass sich die Propagationsrichtungen aller Reflexionen durch geometrisch freie Strahlwege definieren. Je nach der Prozesszonengeometrie können Hinterschnidungen vorliegen. Sie schotten die Reflexionen teilweise ab. Diese Modellvorstellung wird in Tabelle 1 illustriert.

Bei dieser Betrachtungsweise liegt für die spiegelnde Reflexion bei ebener Prozesszone, wie auch bei schleppender Einstrahlung, keine Hinterschnidung vor. Dieser Reflexionsanteil ist damit aufgrund der Bedingung, dass der Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel ist, auf der dem Laserstrahl gegenüberliegenden Seite anzutreffen (vgl. Abschnitt 2.1.3.2, S. 10). Ist dieser Strahlweg aufgrund einer Hinterschnidung verschlossen, so propagiert diese Reflexion dem einfallenden Strahl entgegen. Dem Umlenken dieses Reflexionsanteils wird in der Modellbildung mit

einer Fallunterscheidung Rechnung getragen. Hierfür wird die Variable n verwendet. Es gilt daher $n = 1$ für die schleppende und $n = 0$ für die stechende Einstrahlung. Beim oberflächlichen Anschmelzen ist bei stechender Einstrahlung ebenfalls $n = 0$ zu verwenden. Je nach Schweißprozess und -geschwindigkeit ist nach OEFFLE (2012) mit einer Winkelanstellung der Prozesszone gegenüber dem Einstrahlwinkel zu rechnen. Diese führt zu einer Ablenkung δ_{SR} der spiegelnden Reflexion gegenüber ihrem idealen Ausfallswinkel.

Einstrahlung	schleppend	stechend
oberflächliches Anschmelzen		
Wärmeleitungs-schweißen		
Tiefschweißen		

Tabelle 1: Modellvorstellungen zu den Prozesszonen verschiedener Laser-Schweißregime und Einstrahlungen; die Laserleistung P_L nimmt von oben nach unten zu

4.3.5 Leistungsverhältnisse in den reflektierten Anteilen

Aufgrund von unterschiedlichen Vorgängen in der Prozesszone und ihrer daraus resultierenden Geometrie wird sie durch den Radius r_G in zwei unterschiedliche Bereiche geteilt (siehe Abbildung 38). Dabei tragen die beiden Bereiche unter-

schiedlich zu den Reflexionen bei. Der innere Bereich besitzt eine Delle, die sich in einer Rückspiegelung auswirkt. Dagegen ist der äußere Bereich eben. Von hier aus wird spiegelnd reflektiert. Beide Bereiche reflektieren ebenso mit einem diffusen Anteil. Der innere Absorptionsgrad \bar{A}_I und der äußere \bar{A}_A sowie die Reflexionsgrade für die innere diffuse Reflexion $\bar{R}_{D,I}$ und äußere diffuse Reflexion $\bar{R}_{D,A}$ werden für die Leistungsanteile P_I und P_A somit gesondert benötigt. P_I und P_A werden in Abhängigkeit von diesen Koeffizienten reflektiert und können in die Leistungsanteile der spiegelnden Reflexion P_{SR} , der rückspiegelnden Reflexion P_{RR} und der diffusen Reflexion P_{DR} aufgeteilt werden. Die gesamte reflektierte Leistung in der Hemisphäre oberhalb der Prozesszone $P_{\bar{R}}$ ist die Summe der genannten Einzelleistungen. Die Berechnungen hierzu erfolgen nach den Formeln (18) bis (21):

$$P_{SR} = (1 - \bar{A}_A - \bar{R}_{D,A}) \cdot P_A \quad (18)$$

$$P_{RR} = (1 - \bar{A}_I - \bar{R}_{D,I}) \cdot P_I \quad (19)$$

$$P_{DR} = \bar{R}_{D,I} \cdot P_I + \bar{R}_{D,A} \cdot P_A \quad (20)$$

$$P_{\bar{R}} = P_{SR} + P_{RR} + P_{DR} \quad (21)$$

4.3.6 Intensitätsverhältnisse der Reflexionen in Polarkoordinaten

Zur Berechnung der Intensitäten der Reflexionen auf einer Hemisphäre über der Prozesszone werden die Intensitätsverteilungen der drei Reflexionsarten als Funktion von räumlichen Koordinaten betrachtet. In einem sphärischen System sind hierzu polare Koordinaten zu bevorzugen. Sie werden wie in Abbildung 40 dargestellt definiert.

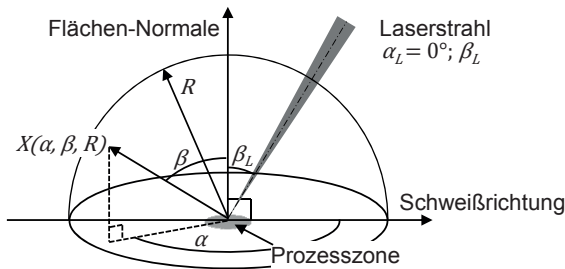


Abbildung 40: Ortsangabe auf der Hemisphäre über der Prozesszone mittels Polarkoordinaten

Der Laserstrahl sei mit $\alpha_L = 0^\circ$ und β_L auf die Prozesszone gerichtet. Die Reflexionen können dann für jeden beliebigen Punkt X durch die Koordinaten α , β und R eindeutig beschrieben werden. Abbildung 41 stellt die spiegelnde, die rückspiegelnde und die diffuse Reflexion in diesem Modell in der Schnittebene durch die Hemisphäre für $\alpha = 0^\circ$ bzw. für $\alpha = 180^\circ$ dar.

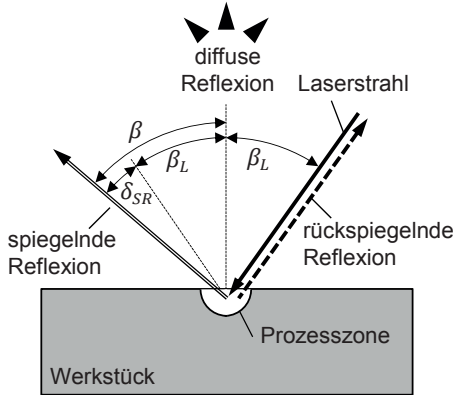


Abbildung 41: Schema der Propagation der spiegelnden, der rückspiegelnden und der diffusen Reflexion beim Laserschweißvorgang

Das Zentrum des spiegelnd reflektierten Laserstrahls ist auf der Oberfläche der Hemisphäre wegen des Gesetzes der spiegelnden Reflexion im Punkt X_{SR} mit den Koordinaten $X_{SR}(\alpha = \alpha_L + (n \cdot 180^\circ), \beta = \beta_L + \delta_{SR}, R)$ zu erwarten. Die Hauptachse der rückspiegelnden Reflexion schneidet die Oberfläche der Hemisphäre im Punkt $X_{RR}(\alpha = \alpha_L, \beta = \beta_L, R)$.

Die Intensität der spiegelnden und der rückspiegelnden Reflexion wird, wie bei dem einfallenden Laserstrahl, mit einer rotationsymmetrischen Gauß'schen Verteilung angenommen. Mit Formel (22) lässt sich die Intensität der Laserstrahlungsreflexion in einem Abstand d_R zum Zentrum bzw. zur Strahlachse des Laserstrahls mit einem 86%-Strahlradius $r_{86\%}$ allgemein berechnen:

$$I = \frac{2 \cdot P_L}{r_{86\%}^2 \cdot \pi} \cdot \exp\left(-2 \cdot \frac{d_R^2}{r_{86\%}^2}\right); \quad (22)$$

mit: $I, r_{86\%}, d_R = \begin{cases} I_{SR}, r_{86\%,SR}, d_{SR} & \text{für die spiegelnde Reflexion} \\ I_{RR}, r_{86\%,RR}, d_{RR} & \text{für die rückspiegelnde Reflexion} \end{cases}$

In der Betrachtung ist der Fokus des einfallenden Laserstrahls auf der Werkstückoberfläche positioniert. Auf der Hemisphäre kann der Strahlradius r eines reflektierten Laserstrahls im Abstand R zum Fokuspunkt für die spiegelnde und die rückspiegelnde Reflexion individuell durch die geometrische Optik mit der Formel (23) berechnet werden. Hierbei wird die Definition des Strahlparameterprodukts (siehe Formel (1), Seite 9) verwendet:

$$r_{86\%} = \tan\left(\frac{df \cdot SPP}{r_0}\right) \cdot R ; \quad (23)$$

$$\text{mit: } r_{86\%}, df = \begin{cases} r_{86\%,SR}, df_{SR} & \text{für die spiegelnde Reflexion} \\ r_{86\%,RR}, df_{RR} & \text{für die rückspiegelnde Reflexion} \end{cases}$$

Der Faktor df beschreibt in dieser Formel den erwarteten Qualitätsverlust des Laserstrahls, welcher durch die Reflexion auf der Werkstückoberfläche als einem nicht-idealen Spiegel entsteht.

Als Vereinfachung wird angenommen, dass auf der Hemisphäre der Abstand d_R (vgl. Formel (22)) eines Punkts X zum Zentrum X_G des nach Gauß verteilten Laserstrahls gleich der Orthodrome von Punkt X zu Punkt X_G ist (siehe Abbildung 42). Diese Vereinfachung ist zulässig und sinnvoll für den Fall, dass R mindestens eine Größenordnung (Zehnerpotenz) höher als r ist ($R \gg r$).

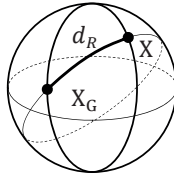


Abbildung 42: Orthodrome als kürzeste Distanz zwischen X_G und X auf einer Kugeloberfläche (nach MEEUS 1998)

Unter dieser Annahme wird der Abstand d_R entsprechend der Berechnung einer Orthodrome für die spiegelnde d_{SR} und die rückspiegelnde Reflexion d_{RR} nach den Formeln (24) und (25) individuell berechnet (nach MEEUS 1998):

$$d_{SR} = \arccos(\sin(\beta_L + \delta_{SR} + 90^\circ) \cdot \sin(\beta) + \cos(\beta_L + \delta_{SR} + 90^\circ) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(n \cdot 180^\circ - \alpha)) \cdot R \quad (24)$$

$$d_{RR} = \arccos(\sin(\beta_L) \cdot \sin(\beta) + \cos(\beta_L) \cdot \cos(\beta) \cdot \cos(\alpha)) \cdot R \quad (25)$$

Die Intensitäten der spiegelnden Reflexion I_{SR} und der rückspiegelnden Reflexion I_{RR} können durch die Kombination der Formeln (15) bis (25) berechnet werden.

Es wird angenommen, dass sich die Intensität der diffusen Reflexion I_{DR} in alle Raumrichtungen nach dem Gesetz eines Lambert-Strahlers verteilt (GERTHSEN & MESCHÉDE 2004). Die zu erwartende Intensität der diffus reflektierten Laserstrahlung berechnet sich demnach für jeden Punkt auf der Hemisphäre nach Formel (26):

$$I_{DR} = \frac{P_{DR}}{8 \cdot \pi^2 \cdot R^2} \cdot \cos \beta \quad (26)$$

4.3.7 Gesamtmodell zur Propagation der Streustrahlung

Die Intensität $I_{\bar{R},ges}$ der gesamten Streustrahlung in der Hemisphäre oberhalb der Prozesszone ist durch eine Superposition der drei Reflexionsarten I_{SR} , I_{RR} und I_{DR} zu betrachten. Sie wird als Funktion der polaren Koordinaten beschrieben und berechnet sich dann nach der Formel (27):

$$I_{\bar{R},ges}(\alpha, \beta, R) = I_{SR} + I_{RR} + I_{DR} \quad (27)$$

4.4 Experimentelle Untersuchung und Messung

4.4.1 Versuchsaufbau

Zur Bestätigung des im vorigen Abschnitt erstellten Modells zur Beschreibung der Streustrahlung bei Laser-Materialbearbeitungsprozessen, im Speziellen bei Remote-Laserschweißprozessen mit brillanten Strahlquellen, wurden zugehörige messtechnische Untersuchungen durchgeführt. Dafür wurde ein Faserlasersystem mit einer Wellenlänge von $\lambda = 1070$ nm, einer maximalen Laserleistung von $P_L = 8$ kW und einem Strahlparameterprodukt von $SPP = 7,4$ mm·mrad verwendet. Die Laseroptik hatte eine Brennweite von $f = 460$ mm und konnte mithilfe eines Industrieroboters flexibel positioniert werden. Die Optik fokussierte den Laserstrahl auf einen Fokushdurchmesser von $d_0 = 596$ µm bei einer Rayleigh-Länge von $z_r = 13,5$ mm. Es wurden Schweißversuche auf drei exemplarisch ausgewählten Blechhalbzeugen vorgenommen. Diese bestanden aus einem unlegierten Stahlwerkstoff (1.0332), einem Edelstahlwerkstoff (1.4301) und einem Aluminiumwerkstoff (3.3206), jeweils 3 mm dick. Der Einstrahlwinkel wurde in den Abstufungen 20°, 30° und 40° gegenüber der Flächennormale, jeweils stechend und schleppend, variiert. Die Pro-

bekörper wurden für alle Versuche im Laserstrahl-Fokuspunkt platziert, um eine maximale Intensität der Laserstrahlung für die Schweißprozesse zu erzielen. Alle Bewegungen für die Schweißprozesse wurden mittels einer Linearachse bei stillstehender Laseroptik realisiert.

Für jeden Werkstoff wurden mit jedem Einstrahlwinkel je zwei Wärmeleitungs- wie auch zwei Tiefschweißnähte mit jeweils unterschiedlichen Schweißgeschwindigkeiten erzeugt. In Vorversuchen wurden die dafür notwendigen Laserleistungen P_L und Geschwindigkeiten $v_{Schweiß}$ ermittelt. Hierbei wurde beim Wärmeleitungsschweißen auf eine gleichmäßige Nahtoberfläche ohne offene Porenbildung geachtet. Beim Tiefschweißen wurde hingegen auf das Durchschweißen Wert gelegt. Die somit ermittelten Streckenenergien $E_{Strecke}$ wurden bei einer Variation der Geschwindigkeit annähernd konstant belassen. Die Nähte zu allen Versuchsparametern wurden mittels Querschleifen überprüft. In der folgenden Tabelle 2 sind die resultierenden Schweißparameter aufgelistet.

Werkstoff	Schweißprozess	P_L	$v_{Schweiß}$	$E_{Strecke}$	I_L
		kW	m/min	kJ/m	MW/cm ²
1.0332 (unlegierter Stahl)	Tiefschweißen	4,5	4	67,5	1,59
		3,5	3	70,0	1,24
	Wärmeleitungsschweißen	2,5	7	21,4	0,88
		1,5	4	22,5	0,53
1.4301 (Edelstahl)	Tiefschweißen	4,5	4	67,5	1,59
		3,5	3	70,0	1,24
	Wärmeleitungsschweißen	2,0	7	17,1	0,71
		1,5	5	18,0	0,53
3.3206 (Aluminium-Knetlegierung)	Tiefschweißen	6,0	4	90,0	2,12
		4,5	3	90,0	1,59
	Wärmeleitungsschweißen	3,0	4	45,0	1,06
		2,5	3	50,0	0,88

Tabelle 2: Übersicht über die Schweißparameter für die Streustrahlungsmessungen

4.4.2 Messtechnik

4.4.2.1 Strahlungsmessbogen

Zur Untersuchung der Reflexionen wurde ein Strahlungsmessbogen über dem Schweißprozess verwendet. Abbildung 27 zeigt schematisch den Versuchsaufbau.

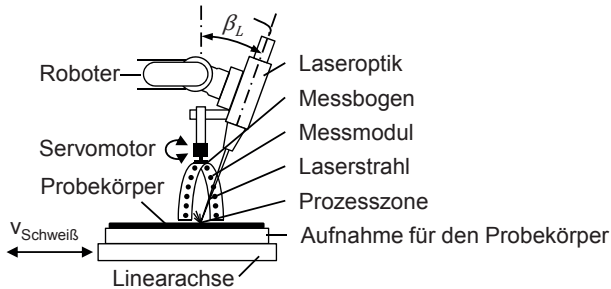


Abbildung 43: Versuchsaufbau zur Strahlungsmessung (schematisch)

Der halbkreisförmige Strahlungsmessbogen mit einem Radius von $R = 125 \text{ mm}$ war mit 16 in 15° -Schritten angeordneten Messmodulen ausgestattet. Diese bestanden jeweils aus einer Silizium-PIN-Photodiode (engl. positive intrinsic negative, PIN) mit Tageslicht-Sperrfilter vom Typ BPW-34-F (OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH 2007) und einem nachgeschalteten Präzisions-Metallschicht-Widerstand mit $4,7 \text{ k}\Omega$ (YAGEO CORPORATION 2013), aufgelötet auf eine Trägerplatine.

Jedes der Messmodule war hinter einer Blendenöffnung mit einem Durchmesser von $0,5 \text{ mm}$ fest auf dem Strahlungsmessbogen installiert. Die optischen Achsen der Messmodule zeigten auf den Kreismittelpunkt des Strahlungsmessbogens. Der Tageslichtfilter blockte alle Wellenlängen bis 780 nm ab. Das Spektrum der detektierten Strahlung wurde somit auf den nahinfraroten Wellenlängenbereich eingeschränkt. Einflüsse durch die thermische Strahlung vom Prozess und externe Lichtquellen wurden dadurch ausgeschlossen.

Um die Strahlungsintensität zu messen, wurden die Photodioden im Sperrbereich betrieben. Hierzu wurde jeweils eine positive Spannung von 10 V an die Kathoden angelegt. Die Photodioden wurden bei Bestrahlung in Sperrrichtung leitend und es floss ein von der Strahlungsintensität und von ihrer Kennlinie abhängiger Sperrstrom. Über den jeweils in Reihe geschalteten Widerstand und den gemeinsamen

Minuspole wurde das Signal, eine zu der Intensität proportionale Spannung, gemessen und mit einer Messkarte zyklisch mit einer Abtastfrequenz von 100 Hz in ein Labview[®]-Programm eingelesen. Die gemessenen Spannungen wurden mit einem Kalibrierfaktor multipliziert und somit in Bestrahlungsintensitäten umgerechnet. Die einzelnen Messmodul-Kalibrierfaktoren wurden durch vergleichende Messungen mit einem geeichten Intensitätssensor (PD300-3W, OPHIR OPTRONICS SOLUTIONS LTD. 2012) ermittelt. Mit diesem Aufbau können in einer durchschnittlich 3 s andauernden Bestrahlungssequenz 300 Messwerte aufgezeichnet werden.

Der Strahlungsmessbogen wurde durch einen Servomotor über der Prozesszone um seine Hochachse rotiert, um die Aufnahme von Messdaten auf einer halbkugelförmigen Hemisphäre über der Prozesszone zu erhalten. Es konnten aufgrund der geometrischen Anordnung, je nach Anstellwinkel der Laseroptik, nur Teile dieser Hemisphäre erfasst werden. Die Rotation des Strahlungsmessbogens erfolgte in 15°-Schritten. Die Positionen bei 0° und 180° wurden beim Schweißprozess nicht zur Messung angefahren, da sich der Strahlungsmessbogen bei diesen Positionen im Laserstrahl befunden hätte.

Jede Messung mit einem Messaufbau, wie beispielsweise hier mit dem Strahlungsmessbogen, ist immer mit einer Messabweichung verbunden. Sie „ist die Differenz aus dem Mess[wert] und dem wahren Wert der Messgröße“ (ADUNKA 2000, S. 48). Die Messergebnisse aus einer Vielzahl von Messungen sind um den wahren Wert normalverteilt und ihr Mittelwert μ konvergiert mit zunehmender Anzahl gegen ihn. Die Gesamtmessabweichung Δf setzt sich aus unterschiedlichen Anteilen, den einzelnen systematischen $\Delta f_{s,i}$ und den einzelnen zufälligen Messabweichungen $\Delta f_{z,i}$, zusammen. Erstere besitzen eine bekannte Ursache und haben einen konstanten Einfluss auf die Messergebnisse. Sie können beispielsweise durch einen genaueren Messaufbau verringert werden. Bei letzteren sind die Ursachen der Abweichungen unbekannt und sie sind somit auch nicht korrigierbar. Beim Messaufbau des Strahlungsmessbogens sind mehrere Messabweichungen bekannt und sie sind den verwendeten Einzelkomponenten zuzuordnen. Die Komponentenhersteller geben den jeweiligen Wert der Messabweichung typischerweise als einfache Standardabweichung und relativ zum gemessenen Wert an. Da Komponenten untereinander wechselwirken, kommt es zur Fortpflanzung der Messabweichungen. Zur Berechnung der gesamten systematischen Messabweichung Δf_s wird das lineare Fortpflanzungsgesetz angewandt:

$$\Delta f_s = \sum_{i=1}^n \Delta f_{s,i} \quad (28)$$

Die gesamte zufällige Messabweichung Δf_z wird mit dem quadratischen Fortpflanzungsgesetz bestimmt:

$$\Delta f_z = \sqrt{\sum_{i=1}^n \Delta f_{z,i}^2} \quad (29)$$

n ist hierbei die Anzahl der jeweiligen Abweichungen. Die Gesamtmessabweichung Δf bildet sich nach ADUNKA (2000) aus der Summe der gesamten systematischen und der gesamten zufälligen Messabweichung:

$$\Delta f = \Delta f_s + \Delta f_z \quad (30)$$

Die erste bei diesem Messaufbau zu betrachtende Abweichung rührt von der mangelnden Stabilität der Leistung der Laserstrahlung her. Sie wird von der IPG LASER GMBH (2005) mit 2 % angegeben. Die reflektierte Strahlung wird von der Fotodiode empfangen. Nach der OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH & CO. OHG (2001) ist der resultierende Strom bei einer Silizium-Photodiode, wie sie hier verwendet wurde, mit einer relativen Abweichung von 5 % behaftet. Der nachfolgende Präzisionswiderstand ist zu 0,1 % genau (YAGEO CORPORATION 2013). Für die Komponenten der Analog-digital-Umrechnung der Messkarte wird von der NATIONAL INSTRUMENTS CORP. (2008) ein Wert von 0,0184 % bescheinigt. Da der Messaufbau kalibriert wurde, ist hier die Messabweichung des Referenzsensors ebenso zu betrachten. OPHIR OPTRONICS SOLUTIONS LTD. (2012) gibt sie mit 7 % an. Da auf sämtliche Komponenten kein Einfluss genommen werden kann, sind alle einzelnen Messabweichungen als zufällig zu kategorisieren. Mit den oben angegebenen Gleichungen (29) und (30) ergibt sich die gesamte relative Standard-Messabweichung für den Aufbau zur Streustrahlungsmessung zu $\Delta f = 8,8 \%$.

Aufgrund der normalverteilten Messwerte bedeutet dies, dass der jeweilige gemessene Wert mit einer Wahrscheinlichkeit von 68,27 % in einem Konfidenzintervall von $\pm 1 \cdot \Delta f$ um den wahren Wert liegt. Bei $\pm 2 \cdot \Delta f$ beträgt die Wahrscheinlichkeit 95,45 % und bei $\pm 3 \cdot \Delta f$ 99,73 %. Im Hinblick auf die Sicherheit ist die Größe des Konfidenzintervalls mit Bedacht zu wählen.

4.4.2.2 Kalorimeter

Zur Vervollständigung des Messrasters wurden drei mit dem Messbogen unzugängliche Messpositionen innerhalb der spiegelnden Reflexion mit einem Kalorimeter untersucht. Hierzu wurde das Kalorimeter P-20-Y der Firma Lasercraft Inc. (OPTICAL ENGINEERING 1987) verwendet. Es besteht aus einem Absorber mit einer rechteckigen Fläche mit den Kantenlängen von 40 mm und 25 mm zur Detektion der Laserstrahlung und einer analogen Messuhr zur Anzeige der eingebrachten Energie. Zur Messung wurde das Kalorimeter ausgerichtet und anschließend für ein festgelegtes Zeitintervall den Reflexionen ausgesetzt. Durch den Bezug der eingestrahlen Leistung auf die Fläche des Absorbers ließ sich somit die durchschnittliche Intensität I der Strahlung auf diese Fläche berechnen.

Das Maximum der Intensität der reflektierten Strahlung war jeweils im Ausfallswinkel der Laserstrahlung zu erwarten. Dieser ist nach dem Gesetz der spiegelnden Reflexion gleich dem Einfallswinkel der Laserstrahlung. Da eine Variation der Winkelanstellung der Laseroptik β_L in den drei Stufen 20° , 30° und 40° erfolgte, wurde das Kalorimeter ebenfalls in den Winkelstellungen $\beta = 20^\circ$, 30° und 40° platziert. Abbildung 44 zeigt das Kalorimeter bei der Einrichtung für eine Winkelstellung von 40° , gemessen von der Normalen. Das Kalorimeter musste nach jedem durchgeführten Versuch auf Raumtemperatur abgekühlt werden, was über einen Kühlluftstrom beschleunigt wurde. In Abbildung 44 ist ebenso die Versuchsanordnung, bestehend aus Laseroptik und Werkstück sowie dem Messbogen und dem Kalorimeter samt der Einrichthilfe, zu sehen.

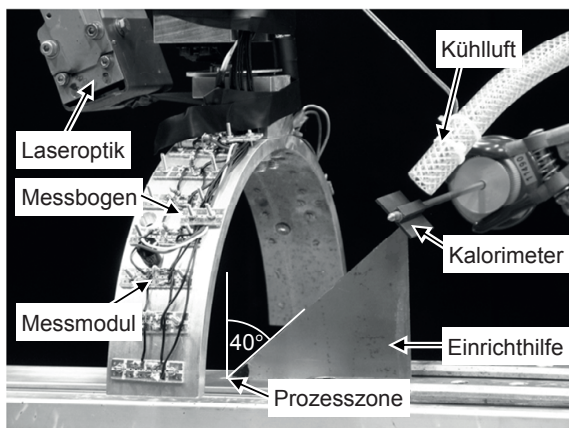


Abbildung 44: Strahlungsmessbogen und Kalorimeter in der Versuchsanordnung

Diese Untersuchungsmethode mit dem Kalorimeter liefert zeitlich gemittelte Intensitätswerte beim jeweiligen Laserprozess. Die Aufzeichnung von Werten mit dem Kalorimeter ist, analog zum Messbogen, mit Messfehlern verbunden. Die Einzelmessabweichungen lassen sich hier ebenfalls mit der mangelnden Stabilität der Laserleistung von 2 % (IPG LASER GMBH 2005) und mit der Messabweichung des Kalorimeters von 5 % (OPTICAL ENGINEERING 1987), jeweils ausgedrückt als Standardabweichung, angeben. Beide Unsicherheiten sind auch hier wieder als zufällig zu werten. Der gesamte Messfehler lässt sich analog zu Abschnitt 4.4.2.1 zu $\Delta f = 5,4 \%$ berechnen.

4.4.2.3 Hochgeschwindigkeitskamera

Um die Modellvorstellungen der Prozesszonengeometrien (siehe Tabelle 1, S. 57) zu validieren, wurde eine digitale Hochgeschwindigkeitskamera vom Typ Phantom v5.1 der Firma Vision Research verwendet. Sie besitzt einen monochromen CMOS-Chip mit einer Auflösung von 1024 x 1024 Pixeln. Die Hochgeschwindigkeitskamera wurde mit einem *SIGMA-EX-24-105-mm*-Makroobjektiv mit einem Brennweitebereich von 24 mm bis 105 mm, einem Blendenbereich von 22 bis 8 und einer Lichtstärke von 2,8 ausgestattet. Die Schweißprozesse wurden aus der seitlichen Ansicht aufgezeichnet. Die Prozesszone wurde mit einer externen Lichtquelle beleuchtet. Hierzu wurde ein CAVILUX-HF-Beleuchtungslaser der Firma CAVITAR Ltd. mit der Wellenlänge von $810 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$ verwendet. Um den Prozess sichtbar zu machen, wurde ein Filter für die Kamera verwendet. Dieser schirmte alle Wellenlängen außerhalb des Wellenlängenbereichs des Beleuchtungslasers, also auch das Prozessleuchten, ab.

4.5 Messdaten

Zur Auswertung der gemessenen Einzeldaten der Messmodule beim jeweiligen Schweißprozess bietet sich eine statistische Betrachtung an. In Abschnitt 4.4.2.1 wurde bereits erwähnt, dass Messwerte normalverteilt um ihren wahren Wert (gleich dem Mittelwert) auftreten. Dieser Zusammenhang wurde für alle mit dem Strahlungsmessbogen aufgezeichneten Datenreihen mit einem Kolmogorov-Smirnov-Test (RADE ET AL. 2000) mit einem Signifikanzniveau von 5 % mit Hilfe der Software MATLAB® der Firma MathWorks Inc. überprüft und auch bestätigt. Dies bedeutet, dass die Annahme der Normalverteilung der Messwerte mit einer Wahrscheinlichkeit von mindestens 95 % zutrifft. Die Strahlungsintensität kann

somit zu jeder Schweißung mit dem Mittelwert und der zugehörigen Standardabweichung angegeben werden. In einem Intervall von einer Standardabweichung um den Mittelwert liegen 68,27 % aller Messwerte, bei zweien sind es 95,45 % und bei dreien 99,73 %. Die beiden Werte, nämlich der Mittelwert und die Standardabweichung, können für jeden Versuch und jeden untersuchten Werkstoff in Karten der Hemisphäre im Radius von 125 mm über der Prozesszone eingetragen werden. Als Darstellungsform eignet sich hierfür jeweils das Polar-Konturdiagramm. Die nicht mit dem Messbogen erfassbaren Winkelbereiche sind im Diagramm durch eine Cubic-Spline-Fläche interpoliert und auch als Interpolation gekennzeichnet. Tabelle 3 zeigt beispielhaft eine Karte der Mittelwerte der Strahlungsintensitäten und eine Karte der zugehörigen Standardabweichungen für einen Tiefschweißversuch bei schleppender Einstrahlung auf dem Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl) mit $\beta_L = 30^\circ$ und $P_L = 4,5 \text{ kW}$. Die Karten sind hierbei in polare Koordinaten eingeteilt. Der Winkel α ist umlaufend und reicht von 0° bis 360° . Der Winkel β zeigt die Abweichung von der Normalen durch den Mittelpunkt der Prozesszone bzw. durch den der Karte. Ebenso ist hier exemplarisch der Kalorimeter-Messbereich in der Position $\alpha = 180^\circ$ und $\beta = 30^\circ$ in die Karte der Mittelwerte mit einem Rechteck eingetragen. Die Größe ist entsprechend skaliert.

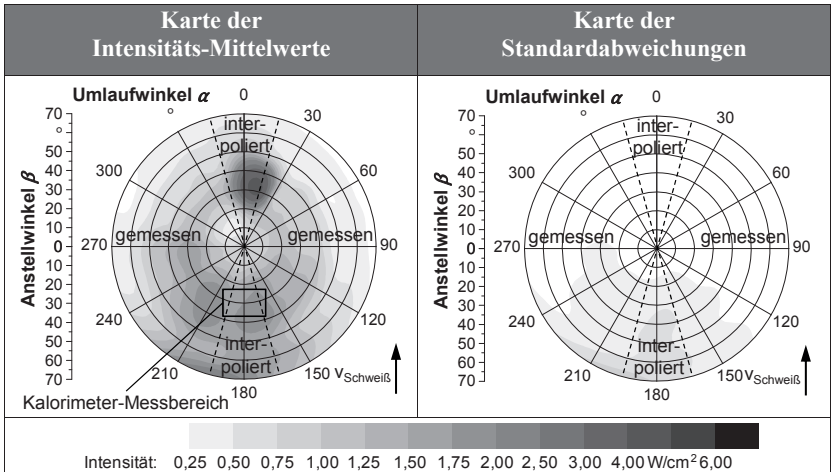


Tabelle 3: Karten der Intensitäts-Mittelwerte und der zugehörigen Standardabweichungen für einen Tiefschweißversuch; Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl); Einstrahlung schleppend; $\beta_L = 30^\circ$; $P_L = 4,5 \text{ kW}$; Kalorimeter in der Karte der gemessenen Mittelwerte bei $\alpha = 180^\circ$ und $\beta = 30^\circ$

Die ergänzenden Messungen mit dem Kalorimeter wurden pro Schweißparameterkombination an drei Stellen ($\alpha = 180^\circ$, $\beta = 20^\circ$, 30° und 40°) durchgeführt. In Abbildung 45 ist zu obiger Mittelwertkarte die zugehörige Kalorimetermessreihe dargestellt und es sind die von der Kalorimeter-Sensorfläche abgedeckten interpolierten Werte der Karte gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass die kalorimetrisch gemessenen Werte mit denen der Interpolation in den nicht messbaren Bereichen in der Hemisphäre korrelieren. Die Interpolation wird deshalb als zulässig erachtet.

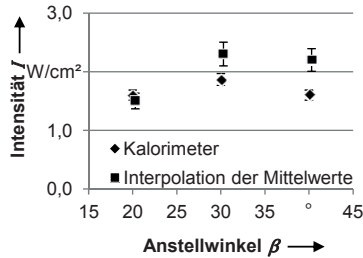


Abbildung 45: Kalorimetermessungen der Intensitäten für einen Tiefschweißversuch in Gegenüberstellung zu den interpolierten Mittelwerten; Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl); Einstrahlung schleppend; $\beta_L = 30^\circ$; $P_L = 4,5 \text{ kW}$; Messabweichungsbalken Δf nach den Abschnitten 4.4.2.1 und 4.4.2.2

Die visuellen Untersuchungen der Schweißprozesse mit der digitalen Hochgeschwindigkeitskamera lieferten Aufschlüsse über das dynamische Verhalten der Prozesszonen und deren geometrische Ausprägungen. Abbildung 46 a) zeigt eine seitliche Momentaufnahme des in diesem Absatz als Beispiel dienenden Schweißprozesses mit der Vorderflanke (dicke Einzellinie) und der Rückflanke (dünne Linien) der Prozesszone. Abbildung 46 b) stellt die zugehörige Annahme der geometrischen Ausprägung der Prozesszone dar (vgl. Tabelle 1). In der Filmaufnahme als oszillierend erkannte Flanken sind durch mehrere Linien dargestellt. Die Hauptpropagationsrichtungen der einfallenden (volle Linie), der rückspiegelnden (Strichlinie) und der direkt spiegelnden Strahlung (Doppellinie) sind eingezeichnet und sie belegen in Verbindung mit den absoluten Messwerten (siehe Tabelle 3, Intensitäts-Mittelwertkarte) die getroffene Modellvorstellung.

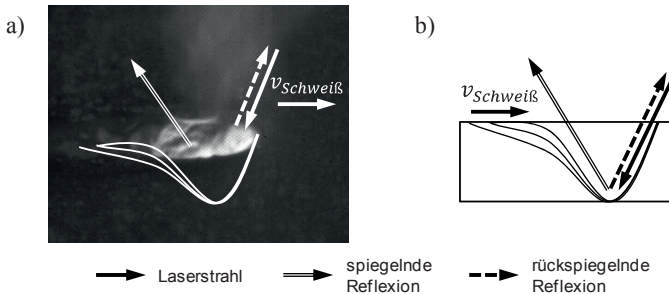


Abbildung 46: a) Momentaufnahme bei einem Tiefschweißversuch; Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl); Einstrahlung schleppend; $\beta_L = 30^\circ$; $P_L = 4,5 \text{ kW}$;
 b) zugehörige Annahme der geometrischen Ausprägung der Prozesszone nach der Modellvorstellung (siehe Tabelle 1, S. 57)

Die Intensitäts-Mittelwert-, die Intensitäts-Standardabweichungskarten und die Kalorimetermesswerte aller Versuche sind im Anhang in Form von Diagrammen beigelegt. Ebenso können dort die Beobachtungen der Prozesszonengeometrie für die Kombinationen aller verwendeten Werkstoffe sowie für die beiden Schweißregime (Wärmeleitungs- und Tiefschweißen) und für die Einstrahlungsarten (stechend und schleppend) nachgeschlagen werden.

4.6 Vergleich und Bewertung

4.6.1 Bestimmung der Parameter

Die zur Berechnung der Streustrahlung gemäß der Modellvorstellung für die Prozesszone benötigten Werte sind aus einschlägiger Fachliteratur (beispielsweise aus HÜGEL & GRAF 2009 oder POPRAWA 2005) bekannte Absorptions- und Reflexionsgrade auf verschiedenen Oberflächenformen (ebene Fläche und Kapillare). Die Laser- und die Laseranlagenparameter liegen ohnehin vor. Die Modellparameter der Verschlechterung der Strahlqualität der reflektierten Strahlung und der Differenzwinkel der spiegelnden Reflexion können hingegen so nicht direkt aus der Fachliteratur oder aus Datenblättern entnommen werden. Es gibt lediglich Indikatoren für die Festlegung von Werten. So ist damit zu rechnen, dass eine Schmelzeoberfläche mit hoher Dynamik den auftreffenden Strahl stärker streuen lässt als eine glatte, was sich in einer Strahlqualitätsverschlechterung der Reflexion gegenüber dem ursprünglichen Strahl ausdrückt. Die letztendlichen zahlenmäßigen Werte hierfür sind

nur aus dem Abgleich des Modells mit den Messwerten aus den Experimenten zu gewinnen. Die Werte der Strahlqualitätsverschlechterung und der Differenzwinkel sind so kalibriert, dass das Modell die Realität gut annähert. In Tabelle 4 sind die in der folgenden Berechnung verwendeten Werte für alle untersuchten Werkstoffe und Schweißparameter angegeben. Die Parameter für den Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl) und für den Werkstoff 1.4301 (Edelstahl) sind gleich. In der Tabelle werden sie daher zusammengefasst.

		Ein- strahlung	schleppend		stechend	
		Prozess- regime	Tief- schweißen	Wärme- leitungs- schweißen	Tief- schweißen	Wärme- leitungs- schweißen
Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl) und Werkstoff 1.4301 (Edelstahl)	aus Literatur	\bar{A}_I	0,96 - 0,98	0,35 - 0,40	0,96 - 0,98	0,35 - 0,40
		\bar{A}_A	0,35 - 0,40	0,35 - 0,40	0,35 - 0,40	0,35 - 0,40
		$\bar{R}_{D,I}$	0	0,30 - 0,33	0	0,30 - 0,33
		$\bar{R}_{D,A}$	0,30 - 0,33	0,30 - 0,33	0,30 - 0,33	0,30 - 0,33
		r_G	0,12 mm	0,01 mm	0,12 mm	0,01 mm
	kalibriert	df_{SR}	40 - 45	32 - 37	40 - 45	40 - 45
		df_{RR}	13 - 15	12 - 13	13 - 15	13 - 15
		δ_{SR}	0° - 5°	30° - 35°	0° - 5°	0° - 10°
Werkstoff 3.3206 (Aluminium-Knetlegierung)	aus Literatur	\bar{A}_I	0,7 - 0,8	0,13	0,7 - 0,8	0,13
		\bar{A}_A	0,01 - 0,13	0,10 - 0,13	0,10 - 0,13	0,10 - 0,13
		$\bar{R}_{D,I}$	0	0,44	0	0,44
		$\bar{R}_{D,A}$	0	0,44	0	0,44
		r_G	0,18 mm	0,05 mm	0,18 mm	0,05 mm
	kalibriert	df_{SR}	45 - 50	< 10	42 - 47	< 10
		df_{RR}	45 - 50	< 10	42 - 47	< 10
		δ_{SR}	0°	0°	0°	0°

Tabelle 4: Wertebereiche der Faktoren und Parameter für die Werkstoffe 1.0332 (unlegierter Stahl), 1.4301 (Edelstahl) und 3.3206 (Aluminium-Knetlegierung)

4.6.2 Validierung

Zur Validierung des Streustrahlungsmodells werden die berechneten Intensitäts-Mittelwertkarten den gemessenen gegenübergestellt. In Tabelle 5 sind exemplarisch für einen Einstrahlwinkel der Laseroptik von $\beta_L = 30^\circ$ die gemessenen und die mittels des in Abschnitt 4.3 (S. 54) dargestellten Modells der Propagation der Reflexionen berechneten Intensitäts-Mittelwertkarten für das Wärmeleitungs- und das Tiefschweißen mit schleppender und stechender Einstrahlung für den Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl) und für den Werkstoff 1.4301 (Edelstahl) abgebildet. Die Intensitäts-Mittelwertkarten zeigen für diese artverwandten Werkstoffe nahezu identische Streustrahlungsverteilungen. Die Berechnungen der Intensitäten der Reflexionen können demnach für die beiden Werkstoffe 1.0332 und 1.4301 mit den gleichen Parametern durchgeführt werden. Die zugehörigen Intensitäts-Mittelwertkarten sind mit den gemessenen vergleichbar.

Für den Werkstoff 3.3206 (Aluminium-Knetlegierung) ist die Gegenüberstellung, ebenfalls für $\beta_L = 30^\circ$, in Tabelle 6 dargestellt. Diese Intensitäts-Mittelwertkarten weisen bezüglich der charakteristischen Verteilung der Reflexionen ebenso eine gute Übereinstimmung auf.

Da das Streustrahlungsmodell die jeweiligen statistischen Streuungen der Intensitätswerte um ihren Mittelwert nicht abbildet, können die Karten der Standardabweichungen nicht zur Validierung des Modells herangezogen werden.

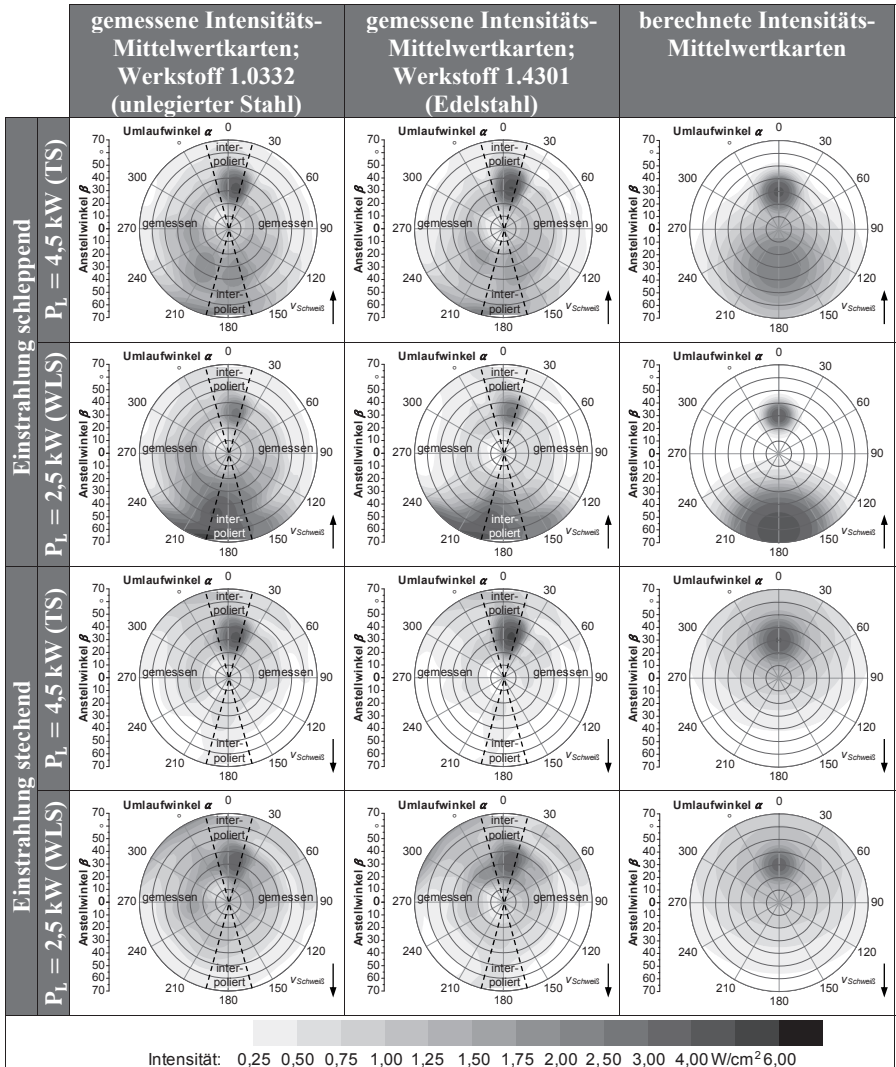


Tabelle 5: Gemessene Intensitäts-Mittelwertkarten für die Werkstoffe 1.0332 (unlegierter Stahl) und 1.4301 (Edelstahl) mit den zugehörigen mittels des in Abschnitt 4.3 (S. 54) erarbeiteten Modells berechneten Intensitäts-Mittelwertkarten; Lasereinstrahlwinkel $\beta_L = 30^\circ$; Schweißgeschwindigkeiten, -energien und -intensitäten nach Tabelle 2 (S. 62)

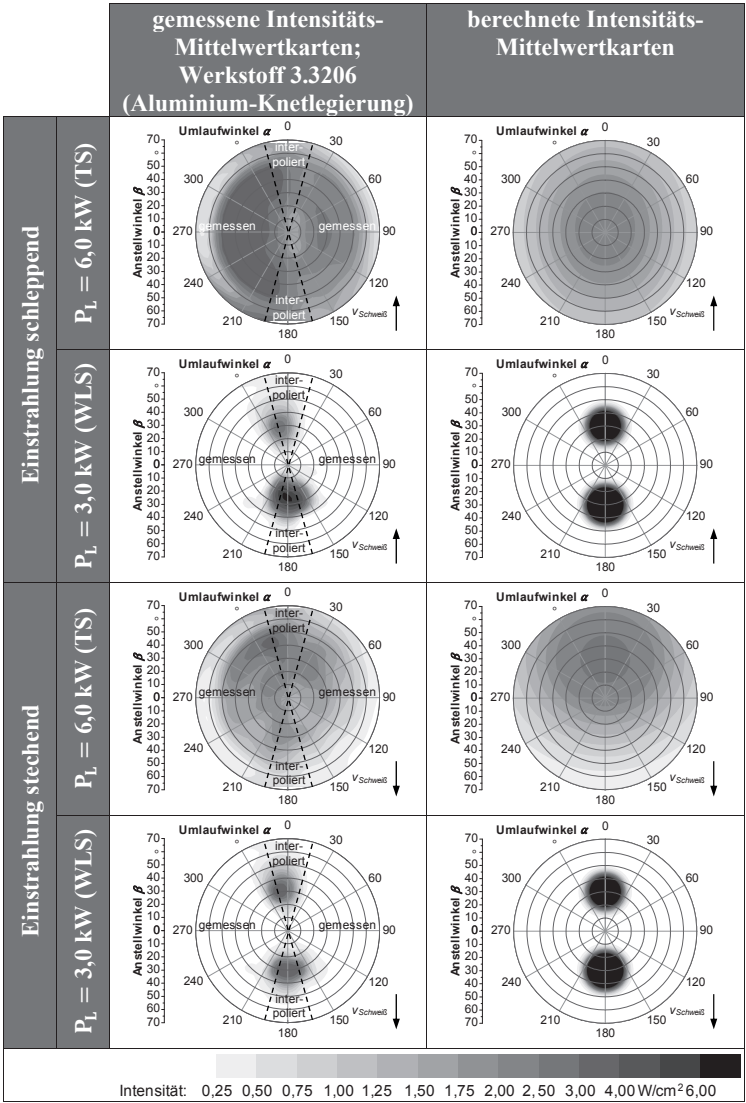


Tabelle 6: Gemessene Intensitäts-Mittelwertkarten für den Werkstoff 3.3206 (Aluminium-Knetlegierung) mit den zugehörigen mittels des in Abschnitt 4.3 (S. 54) erarbeiteten Modells berechneten Intensitäts-Mittelwertkarten; Lasereinstrahlwinkel $\beta_L = 30^\circ$; Schweißgeschwindigkeiten, energien und -intensitäten nach Tabelle 2 (S. 62)

4.7 Fazit

Die bisher rein qualitativ bekannte Streustrahlung beim Remote-Laserstrahlschweißen kann mit der in diesem Kapitel erarbeiteten Modellvorstellung und den dazu experimentell ermittelten Modellparametern in den räumlichen Richtungen quantitativ berechnet werden. Die hier dargestellten Werte der Parameter für die Berechnungsformeln decken Werkstoffgruppen ab, welche derzeit u. a. mittels des Remote-Laserstrahlschweißens in der Massenproduktion verarbeitet werden. Für gänzlich andere Werkstoffe, wie z. B. Kupferlegierungen, können die Wertebereiche für die Berechnung ebenso aus der Literatur entnommen bzw. abgeschätzt werden. Die in den Messergebnissen auftretenden Maximalwerte in den Reflexionen liegen im Messabstand oftmals im Bereich zwischen 5 W/cm^2 und 10 W/cm^2 . Diese Intensitätswerte stellen in der Regel für eine Umhausung keine hohe Last dar. Bestrahlungen dieser Größenordnung wirken sich bei den gängigen Metall-Schutzwandwerkstoffen zwar in einer Erwärmung aus, können das Material aber nicht aufschmelzen (FRANEK & HEBERER 2006). Somit bleibt die Schutzwirkung erhalten.

Sollten sich durch gravierende Parameteränderungen, wie beispielsweise ein demgegenüber stark verringerter Betrachtungsabstand vom Strahlfokus bzw. von der Prozesszone, weitaus höhere Werte ergeben, so sind diese als Belastungen für die Schutzwand ebenso zu berücksichtigen. Diese Werte können in die im folgenden Kapitel aufgezeigte Berechnungsmethode der Schutzzeiten von Hohlkammer-Schutzwänden einfließen.

Da die soeben beschriebenen gemessenen Intensitätswerte den Grenzwert für das menschliche Auge (BGFE 2007) um weit mehr als das Tausendfache überschreiten, ist eine Schutzwand alternativlos.

5 Auslegungsmethode für Hohlkammer-Schutzwände

5.1 Zweck

Jedes bisherige Lasersicherheitskonzept für die Materialbearbeitung mit Laserstrahlung basiert auf passiven Schutzwänden. Für die Beurteilung der Sicherheit der entsprechenden Anlagen ist die Kenntnis der Schutzzeiten dieser Wände essentiell. Im Folgenden wird eine Methode vorgestellt, mit welcher die Schutzzeit der in industriellen Laseranlagen häufig verbauten Hohlkammerschutzwände aus zwei Metallplatten, typischerweise aus Stahl- oder Aluminiumwerkstoffen, berechnet werden kann. Mithilfe dieser Methode lassen sich solche Wände hinsichtlich einer gegebenen Laserstrahlungsbelastung auch gezielt auslegen. Die Anzahl von Schutzwand-Bestrahlungsversuchen kann damit reduziert werden. Neben einer Zeitersparnis für die Fertigung von Probekörpern und für die zugehörigen Tests geht damit auch eine Kostenersparnis einher.

5.2 Vorgehensweise

Zur analytischen Modellierung des Durchbrands von passiven Hohlkammer-Schutzwänden bei Laserbestrahlung mit dem Ziel des Erhalts der Schutzzeit wird zunächst die Strahl-Stoff-Wechselwirkung an der Schutzwand von Beginn der Bestrahlung bis zu einem eventuellen Strahldurchbrand aufgrund von Voruntersuchungen geschildert. Die auftretenden Mechanismen werden mathematisch gefasst und zu einem Gesamtmodell integriert. Bevor das Modell als Entwurfs- und Analysewerkzeug Verwendung finden kann, muss es nach ZIRN & WEIKERT (2006) auf Richtigkeit und ausreichende Genauigkeit für die zu betrachtenden Lastfälle überprüft werden. Hierzu wurden mittels statistischer Versuchsplanung in einem gegebenen Parameterfeld reale Versuche geplant und durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche, die Schutzzeiten von Hohlkammerwänden bei unterschiedlichen Laserstrahlungsbelastungen, wurden mittels linearer Regression in ein empirisches Modell überführt. In dieses Modell, wie auch in das analytische Auslegungsmodell, wurden definierte Lastfälle innerhalb des vorher abgesteckten Parameterfelds eingegeben und daraus jeweils eine Schutzzeit errechnet. Der Vergleich dieser mittels der zwei unterschiedlichen Wege erhaltenen Schutzzeiten liefert eine Aussage über die Qualität der analytischen Auslegungsmethode (siehe Abbildung 47).

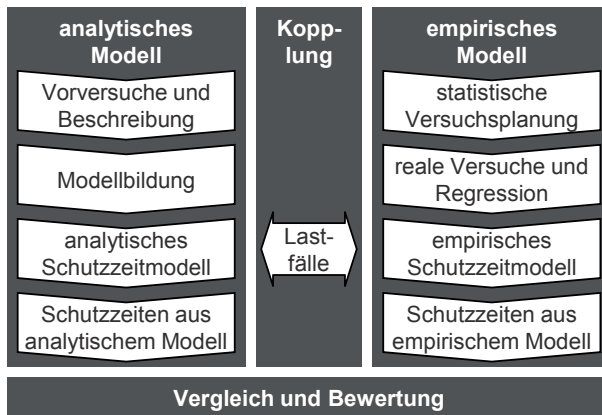


Abbildung 47: Vorgehen zur Erarbeitung und zur Validierung der Auslegungsmethode für passive Hohlkammer-Schutzwände

5.3 Schutzwandbelastung durch Laserstrahlung

5.3.1 Strahl-Stoff-Wechselwirkung an der Schutzwand

Durch einen in Richtung der Hohlkammer-Schutzwand gerichteten konzentrischen Laserstrahl wird, unter der Annahme eines senkrechten Auftreffens, in Abhängigkeit der geometrischen Gegebenheiten und der Laserstrahlparameter auf der ersten Platte der Schutzwand ein Laserstrahlungs-Intensitätsprofil $I(z, r)$ ausgebildet (siehe Abbildung 48). Dies führt zu einem radiusabhängigen Energieeintrag der Laserstrahlung auf der Schutzwandoberfläche, analog zu den Vorgängen bei den Laser-Schweißprozessen gemäß den Abschnitten 2.2.1 (S. 16) bis 2.2.3 (S. 19). Die absorbierte und in das Material übergehende Laserleistung, entsprechend der Prozessleistung bei den Materialbearbeitungsprozessen (vgl. Abschnitt 2.1.3.5, S. 14), erwärmt das Schutzwandmaterial. Unter der Prämisse, dass der Brennfleckdurchmesser d_{BF} erheblich größer als die Plattendicke d ist kann davon ausgegangen werden, dass die Temperatur in Richtung der Plattendicke konstant ist. In radialer Richtung bildet sich dagegen ein ortsabhängiger Temperaturgradient aus, welcher eine Wärmeleitung in radialer Plattenrichtung zur Folge hat. Darüber hinaus wird durch thermische Strahlung Wärme von der Plattenoberfläche an die Umgebung abgegeben. Je nach baulicher Ausführung kann zudem Konvektion die Platte kühlen.

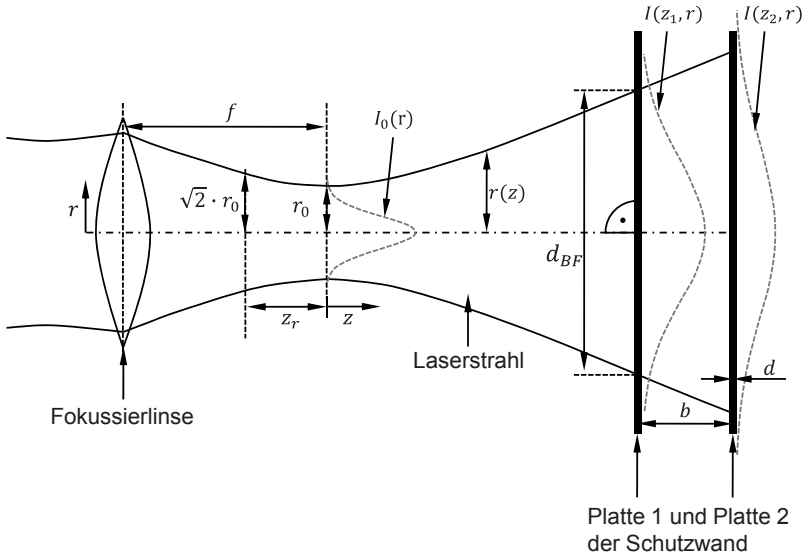


Abbildung 48: Konzentrischer Laserstrahl trifft senkrecht auf Hohlkammer-Schutzwand

Bei ausreichender Strahlungsintensität erreicht das Schutzwandmaterial zunächst in den Bereichen der höchsten Strahlungsbelastung die Schmelztemperatur T_S , dann weitet sich dieser Bereich radial aus. Um vom festen Aggregatzustand in den flüssigen überzugehen, muss die Schmelzenthalpie h_S aufgebracht werden. Die Temperatur steigt in dieser zeitlichen Phase nicht mehr an. Der aufgeschmolzene Bereich vergrößert sich, wiederum vom Strahlungszentrum ausgehend, und kann sich weiter bis zum Verdampfen aufheizen. Solange die Schmelze mit dem Feststoff verbunden bleibt, ist die Schutzwand versiegelt. Ab dem Zeitpunkt des Versagens dieses Schmelzefilms wird die sich dahinter befindende Platte bestrahlt oder die Strahlung gelangt, im Falle einer einfachen Schutzwand, ins Freie.

Die Bilderserie in Abbildung 49 illustriert exemplarisch den oben theoretisch aufgezeigten Hergang eines Laserstrahlungs-Durchbrands durch eine senkrecht stehende Schutzwandplatte. Sie bestand hier aus dem Werkstoff 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung) und wies eine Dicke von $d = 3 \text{ mm}$ auf. Die Laserstrahlung wurde mit dem bereits aus dem vorigen Kapitel (vgl. Abschnitt 4.4.1, S. 61) bekannten Faserlasersystem auf die Schutzwand aufgebracht. Der Brennfleck war dabei wesentlich über die dargestellte Bildgröße aufgeweitet. Die Strahlungsintensität muss

dabei lediglich so intensiv sein, dass das Material überhaupt aufgeschmolzen wird. Nach FRANKE & HEBERER (2006) muss sie dazu nur eine Intensität von ca. $1,2 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$ aufweisen. Eine höhere Laserleistung bzw. -intensität wirkt sich nur in einer geringeren Durchbrandzeit aus. Die bestrahlte Stelle der Schutzwand wurde mit der im vorigen Kapitel beschriebenen Hochgeschwindigkeitskamera samt dem Beleuchtungslaser (vgl. Abschnitt 4.4.2.3, S. 67) beobachtet, wodurch die einzelnen Bilder in Abbildung 49 entstanden. Die Strahlung des Faserlasers ist darin nicht zu sehen, da sie mittels eines Filters in der Kamera geblockt wurde, um Überblendungen zu vermeiden. Die hellen Reflexionen sind dem Beleuchtungslaser zuzuordnen. In Bild a) ist in der Mitte bereits ein kleiner aufgeschmolzener Bereich zu erkennen, der über die Bilderserie hinweg stetig im Durchmesser zunimmt. In Bild b) ist dieser Bereich gerade so groß, dass noch keine sichtbare geometrische Deformation der Schmelzeoberfläche aufgrund der Schwerkraft einsetzt. Dies ist in Bild c) bereits der Fall. Die Schmelze rutscht ab und deltet sich im oberen aufgeschmolzenen Bereich ein. Beim Durchbrand ist das Eindellen so weit fortgeschritten, bis ein optischer Durchgang durch die Platte entsteht. Dieser ist in Bild d) als kleines Loch zu sehen. Nach dem Zeitpunkt des Strahlungsdurchbrands wurde die Laserstrahlung abgestellt und die Schmelze erstarrte wieder, was beispielsweise an den Heißrissen, ausgehend von der Durchbrandstelle, in Bild e) erkennbar ist.

Im Folgenden werden die einzelnen zu dem Hergang des Laserstrahlungsdurchbrands genannten physikalischen Effekte, Vorgänge und Größen erläutert.

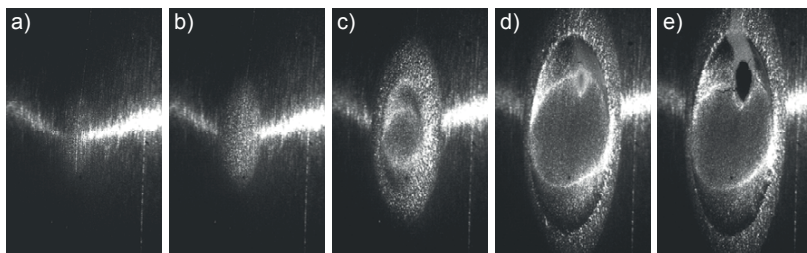


Abbildung 49: Hergang eines Laserstrahlungsdurchbrands; eine Platte; Werkstoff 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung); $d = 3 \text{ mm}$; Faserlasersystem nach Abschnitt 4.4.1 (S. 61); Beobachtung mit Hochgeschwindigkeitskamera und Beleuchtungslaser nach Abschnitt 4.4.2.3 (S. 67); a) und b) wachsender Schmelzbereich ohne Deformation; c) geometrische Deformation des aufgeschmolzenen Bereichs; d) Strahlungsdurchbrand im oberen aufgeschmolzenen Bereich; e) erstarrte Schmelze der Schutzwandplatte

5.3.2 Laserstrahlungs-Intensitätsprofil an der Schutzwand

Mit Hilfe von gängigen Laserstrahl-Vermessungsgeräten können für einen Laserstrahl die Strahlungsintensitäten in Abhängigkeit des Strahlradius r in der Fokusebene ($z = 0$) ermittelt werden. Unter der Annahme eines Gauß'schen Strahlenbündels liefern die Gleichungen (31) und (32) eine Korrelation zwischen der Intensitätsverteilung in der Strahltaile $I_0(r)$ und der entsprechenden Intensitätsverteilung $I(z, r)$ im Abstand z von der Taille zur Schutzwand. Als Parameter für die Strahlaufweitung wird darin die Rayleigh-Länge z_r verwendet. Es gilt nach BECK (1996), EICHLER ET AL. (2004) und HÜGEL & GRAF (2009):

$$r(z) = r(z = 0) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_r}\right)^2} \quad (31)$$

$$I(z) = \frac{I(z = 0)}{1 + \left(\frac{z}{z_r}\right)^2} \quad (32)$$

5.3.3 Energieeintrag

Die auf die Schutzwand auftreffende Laserstrahlung wird teilweise absorbiert und teilweise reflektiert (siehe Abschnitte 2.1.3.3, S. 12 und 2.1.3.6, S. 15). Der Leistungsanteil der Laserstrahlung, welcher von der Schutzwand absorbiert wird und diese erhitzt, entspricht dem Absorptionsgrad \bar{A} . Bei der üblicherweise in der Laser-Materialbearbeitung verwendeten unpolarisierten Strahlung kann der Absorptionskoeffizient $\alpha_{\bar{A}, \odot}$ wellenlängen-, material- und einfallswinkelabhängig nach den Formeln (7) bis (9) berechnet werden. Bei der Auslegung einer Laserschutzwand sind die Wellenlänge der Laserstrahlung sowie der Brechungs- und der Absorptionsindex des Schutzwandmaterials als konstant anzunehmen. Ein Auftreffen des Laserstrahls auf einer geeigneten Materialoberfläche führt in der Regel nach den Fresnel'schen Gleichungen zu einem höheren Absorptionskoeffizienten gegenüber normaler Einstrahlung. Die Strahlungsintensität verringert sich jedoch dabei aufgrund der Zunahme der bestrahlten Fläche mit dem Kosinus des Einfallswinkels β der Strahlung gegenüber der Flächennormalen. Es kann somit ein Ersatzabsorptionskoeffizient $\alpha_{\bar{A}, Ers} = \alpha_{\bar{A}, \odot}(\beta) \cdot \cos \beta$ angegeben werden. Mittels numerischer Berechnungen lässt sich zeigen, dass dieser Ersatzabsorptionskoeffizient für alle werkstoffabhängigen Brechungs- und Absorptionsindizes η und κ bei senkrechter

Einstrahlung am größten ist. Somit kann die folgende mathematische Ungleichung angegeben werden:

$$\alpha_{\bar{A},\odot}(\beta = 0^\circ, \eta, \kappa) \geq \alpha_{\bar{A},\odot}(\beta, \eta, \kappa) \cdot \cos \beta \mid 0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ; \eta, \kappa \geq 0 \quad (33)$$

In Abbildung 50 wird der Zusammenhang zwischen dem Absorptionskoeffizienten für die unpolarisierte Strahlung und dem zugehörigen Ersatzabsorptionskoeffizienten in einem Diagramm am Beispiel der Absorption von Strahlung der Wellenlänge $\lambda = 1064 \text{ nm}$ durch Eisen aufgezeigt. Der für die Berechnung nötige Brechungsindex wird von HÜGEL & GRAF (2009) mit $\eta = 3$ angegeben. Der zugehörige Absorptionsindex wird mit $\kappa = 1,33$ beziffert.

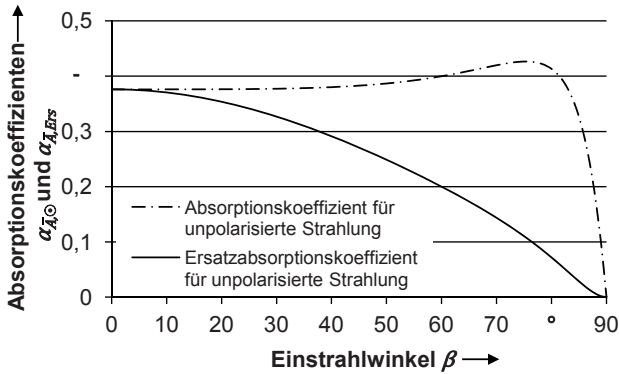


Abbildung 50: Diagramm des Absorptionskoeffizienten $\alpha_{\bar{A},\odot}$ und des Ersatzabsorptionskoeffizienten $\alpha_{\bar{A},ErS}$ für unpolarisierte Strahlung über dem Einstrahlwinkel β ; Wellenlänge $\lambda = 1064 \text{ nm}$; reines Eisen; Brechungsindex $\eta = 3$; Absorptionsindex $\kappa = 1,33$

Da $\alpha_{\bar{A},\odot}(\beta = 0^\circ)$ im Sinne eines konservativen Sicherheitsansatzes den gravierendsten Fall darstellt, wird dieser Absorptionskoeffizient für die weiteren Berechnungen verwendet. Andere Einflüsse, wie die Materialoberflächentemperatur und -rauigkeit, können mit den in Abschnitt 2.1.3.6 dargestellten Methoden zum Absorptionsgrad $\bar{A}(T)$ zusammengeführt werden.

Der Wärmestrom von der Plattenoberfläche in das Material $\dot{Q}_{\bar{A}}(r, T)$ kann jetzt mit Gleichung (34) berechnet werden, wobei $A(r)$ die mit der Strahlungsintensität $I(r)$ bestrahlte Fläche darstellt:

$$\dot{Q}_{\bar{A}}(r, T) = \bar{A}(T) \cdot I(r) \cdot A(r) \quad (34)$$

5.3.4 Erwärmung

Die über eine Zeitdauer in einen Körper der Masse m eingebrachte Leistung erhöht die innere Energie im System. In Abhängigkeit eines Temperaturunterschieds ΔT und der spezifischen Wärmekapazität c_p des energienehmenden Körpers bzw. eines Volumenelements, für das eine homogene Temperatur angenommen wird, kann der Unterschied der inneren Energie ΔU nach POLIFKE & KOPITZ (2005) mit Gleichung (35) dargestellt werden:

$$\Delta U = \Delta T \cdot m \cdot c_p \quad (35)$$

5.3.5 Wärmeleitung

Örtliche Temperaturgradienten in Materialien induzieren einen Energietransport durch Wärmeleitung. Nach dem Fourier'schen Gesetz ergibt sich für den hier auftretenden Fall der radialen Wärmeleitung durch eine Platte mit zusätzlichem Wärmeeintrag $\dot{q}_{ein}(r)$ durch die Laserstrahlung ein örtlich und zeitlich veränderliches Temperaturprofil, welches der Differentialgleichung (36) genügt (POLIFKE & KOPITZ 2005). Der Parameter a stellt darin die Temperaturleitfähigkeit dar und berechnet sich mit der Wärmeleitzahl λ_{th} , der spezifischen Wärmekapazität c_p und der Dichte ρ zu $a = \frac{\lambda_{th}}{\rho \cdot c_p}$. Es gilt:

$$\frac{\partial T(r)}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r)}{\partial r} \right) + \frac{\dot{q}_{ein}(r)}{\rho \cdot c_p} \quad (36)$$

5.3.6 Thermische Strahlung

Die erhitzten Bereiche der Schutzwand geben Wärme durch thermische Strahlung aufgrund des Unterschieds ihrer Temperatur $T(r)$ zur Temperatur der Umgebung T_∞ ab (POLIFKE & KOPITZ 2005). Durch die Annahme der dünnen Plattenstärke wird von einer gleichen Vorder- und Rückwandtemperatur ausgegangen. Es folgt daraus in kartesischen Koordinaten eine zweidimensionale, in mathematischen Polarkoordinaten eine eindimensionale (radiale) Wärmeleitung. Die Emissionsflächen bezüglich der thermischen Strahlung $A(r)$ weisen von der Vorder- und von der Rückwand der jeweiligen Schutzwandplatte weg. Mit Gleichung (37) kann die thermische Strahlung $\dot{Q}_{th}(r, T)$ berechnet werden. Der Parameter ε stellt darin den materialabhängigen Emissionskoeffizienten und σ_{SB} die Stefan-Boltzmann-Konstante dar:

$$\dot{Q}_{th}(r, T) = \varepsilon \cdot \sigma_{SB} \cdot 2 \cdot A(r) \cdot (T(r)^4 - T_{\infty}^4) \quad (37)$$

Solange der in die Platte eingebrachte Wärmestrom $\dot{Q}_{\bar{A}}$ durch die emittierte thermische Strahlung \dot{Q}_{th} ausgeglichen werden kann, herrscht nach (FRANEK & HEBERER 2006, FRANEK & HEBERER 2007) ein Strahlungsgleichgewicht. Die Schutzwand gilt dann für die gegebenen Belastungsparameter als eigensicher.

5.3.7 Schmelzen und Verdampfen

Der Übergang eines Stoffs vom festen in den flüssigen Aggregatzustand wird als Schmelzen bezeichnet, vom flüssigen in den gasförmigen Zustand als Verdampfen. Für diese Vorgänge ist die spezifische Schmelz- h_s bzw. die spezifische Verdampfungsenthalpie h_v für die Überwindung der Bindungskräfte zwischen den Atomen oder Molekülen aufzubringen. Der konkrete Wert der jeweiligen Enthalpie kann für ein Volumenelement aus dem Produkt seiner Masse m und der spezifischen Schmelz- h_s bzw. der spezifischen Verdampfungsenthalpie h_v berechnet werden. Die Temperatur T bleibt während des Schmelz- bzw. Verdampfungsvorgangs konstant. (POLIFKE & KOPITZ 2005)

5.3.8 Konvektion

Der Wärmeübergang von der bestrahlten Stelle der Schutzwand an die umgebende Luft verursacht zusätzlich zu einem eventuell vorhandenen Luftstrom, wie er beispielsweise aufgrund einer Raumluftabsaugung vorliegen kann, ein Aufsteigen der erwärmten und ein Nachfließen von kalter Luft. Dabei ist der Wärmeübergang proportional zum Temperaturunterschied. Ist diese Konvektion durch bauliche Gegebenheiten behindert, so verschlechtert sich der Wärmefluss an die Umgebungsluft. Des Weiteren liegt er für einen Schutzwand-Bestrahlungsfall lediglich im Bereich von wenigen Watt, weshalb sie in Relation zu den eingebrachten Leistungen vernachlässigbar klein ist. Aus diesen Gründen kann der Effekt der konvektiven Kühlung \dot{Q}_K der Schutzwand vernachlässigt werden, ohne den konservativen Ansatz der Schutzzeitberechnung zu verletzen.

5.3.9 Durchbrandausbildung

Schutzwandelemente können als Seitenteile einer Umhausung senkrecht stehen oder als Deckenelemente waagrecht angebracht sein. Werden diese Elemente mit Laserstrahlung beaufschlagt, so wird es, je nach Strahlungsintensität, zu unterschiedlichen Schädigungsmechanismen kommen. Liegt die Intensität oberhalb der Tief-

schweißschwelle (vgl. Abschnitt 2.2.2, S. 17), so kommt es zu einem sprunghaften Anstieg des Absorptionsgrads und einer Ausbildung einer Dampfkapillare. Es kann dann mit dem Modell des Laserstrahlabtrags (vgl. Abschnitt 2.2.4, S. 20) gerechnet werden. Dies ist bei gängigen Laserstrahlen der Materialbearbeitung allerdings nur in einem kleinen Längenbereich des Laserstrahls um den Strahlfokuspunkt entlang der Strahlachse möglich. In der Praxis wird für diesen Längenbereich die Rayleigh-Länge verwendet. Vor oder nach der Rayleigh-Länge ist die Strahlungssintensität um mindestens die Hälfte des Werts im Fokuspunkt abgefallen.

Der Bereich des Tiefschweißens, in dem mit der Ausbildung einer Kapillare in die Schutzwand gerechnet werden muss, ist nicht scharf von dem des Wärmelitungsschweißens getrennt (STRITT ET AL. 2011). Im Übergangsbereich ist zugunsten der Sicherheit besser konservativ mit dem Fall des Tiefschweißens zu rechnen.

Für den Fall einer Bestrahlung unterhalb der Tiefschweißschwelle ist in der Literatur kein Modell verfügbar. Im Folgenden wird dieser Schadensmechanismus für eine senkrechte Platte, wie es für den Test von passiven Schutzwänden nach der Norm DIN EN 60825-4 gefordert ist, mit Hilfe von physikalischen Gesetzen und geometrischen Gegebenheiten hergeleitet.

Der bei Laserbestrahlung aufschmelzende und somit flüssige Teil einer senkrechten Schutzwandplatte wird sich, bei einem feststehenden und waagerechten Laserstrahl, kreisrund ausbilden und sich vom Brennfleckzentrum ausgehend vergrößern (vgl. Bilderserie der Abbildung 49). Das die Schmelze umgebende Material ist bis zur Schmelztemperatur T_S erwärmt, aber dennoch in festem Zustand. In der Schmelze mit der Höhe h und der Dichte ρ bildet sich nach dem Pascal'schen Gesetz (GERTHSEN & MESCHÉDE 2004) aufgrund der Gravitation g ein hydrostatischer Druck aus, welcher den unteren Teil der Schmelze-Luft-Grenzfläche nach außen wölben lässt. Der dortige Volumenzuwachs wird durch nachfließendes Material aus dem oberen Teil ausgeglichen. Die zugehörige obere Grenzfläche deltet sich dadurch ein. Diese Verformung der Oberfläche der Schmelze findet an beiden Seiten der Schutzwandplatte statt. Sobald sich beide Grenzflächen durch ihre jeweilige Einwölbung berühren, ist die verbleibende Dicke des Schmelzebereichs an dieser Stelle $d = 0$ mm und der Schmelzfilm reißt auf. Der Strahl hat dann die Schutzwand durchdrungen und es kommt zum Durchbrand.

In Abbildung 51 ist der Durchbrand beispielhaft für zwei Metallplatten aus dem Werkstoff 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung, vgl. Abbildung 51a) und aus dem Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl, vgl. Abbildung 51b), jeweils mit der Dicke

$d = 1,5$ mm dargestellt. Die Proben wurde in einem Versuch mit Laserstrahlung beaufschlagt und zeitgleich mittels einer Kamera beobachtet (vgl. Bilderserie der Abbildung 49). Beim Erkennen des Durchbrands wurde die Laserstrahlung abgeschaltet. Die vorherrschende Form der Schmelze fror dabei sofort ein, da die Wärme wegen der Wärmeleitung in die kälteren Randbereiche der Platten abgeführt wurde. Die Dellen nach innen in den oberen Teilen der aufgeschmolzenen Bereiche und die ausgewölbten unteren Teile sind gut zu erkennen. Die Fotografien beider Platten wurden mit Durchlicht (Beleuchtung der Plattenrückseite) vorgenommen, um die sich in der Eindellung befindenden gerissenen Schmelzefilme darzustellen. Ebenso sind die Querschliffe dieser beiden Proben abgebildet. In ihnen lässt sich die Schmelzekontur längs des in den Bildern angegebenen Schnitts erkennen.

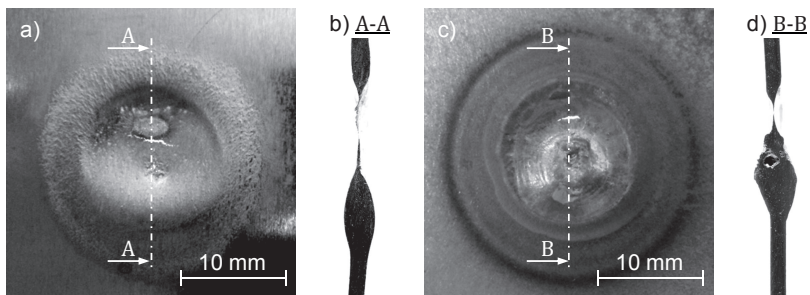


Abbildung 51: Durchbrandausbildung bei Platten mit unterschiedlichen Werkstoffen; $d = 1,5$ mm; unmittelbar nach dem Durchbrand;
a) Werkstoff 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung);
b) zugehöriger Querschliff zu Bild a); Schnitt A-A;
c) Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl)
d) zugehöriger Querschliff zu Bild c); Schnitt B-B

Im Folgenden wird der oben aufgezeigte Durchbrandprozess mit einem analytischen, physikalisch-mathematischen Zusammenhang beschrieben. Das Ziel ist hierbei die Berechnung der kritischen Schmelzehöhe h_{krit} , bei welcher der Schmelzefilm gerade noch nicht aufreißt und der Strahlweg durch die Platte noch nicht freigegeben ist.

Für die folgenden Überlegungen und Berechnungen wird ein Koordinatensystem mit den Achsen x , y und z eingeführt. Der Koordinatenursprung befindet sich am oberen Punkt des aufgeschmolzenen Bereichs und auf der Oberfläche des ursprünglich festen Materials. Die x - y -Ebene liegt parallel zur Platte, die z -Achse zeigt aus der Ebene heraus (siehe Abbildung 52a). Die Gravitation g ist parallel zur x -Achse

und besitzt an dieser gleiches Vorzeichen. Die maximale Eindellung der Schmelze in die Platte befindet sich in der x - z -Ebene (vgl. Abbildung 51 und Abbildung 52). Daher ist die Kenntnis der Geometrie der Schmelze-Luft-Grenzfläche $z(x, y = 0)$ in dieser Ebene nötig. Die folgenden Berechnungen beziehen sich deshalb ausschließlich auf die x - z -Ebene.

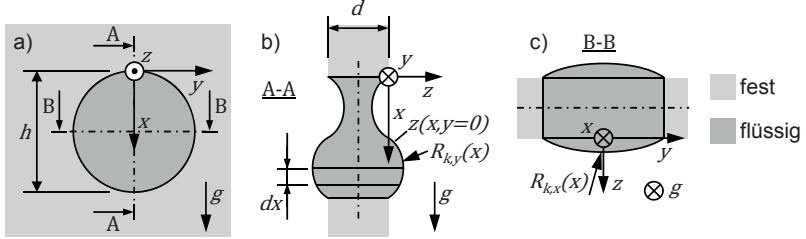


Abbildung 52: Schematische Zeichnung des aufgeschmolzenen Bereichs bei der Durchbrandausbildung mit Koordinatensystem;
 a) Scheibenförmige Schmelze in festem Material (Vorderansicht);
 b) Schnittansicht A-A mit infinitesimalem Volumenelement der Höhe dx ;
 c) Schnittansicht B-B

Jeder Teil der Schmelze mit der Dichte ρ und mit der infinitesimalen Höhe dx (siehe Abbildung 52b) bewirkt nach dem Pascal'schen Gesetz (GERTHSEN & MESCHKE 2004) einen infinitesimalen hydrostatischen Druck dp_h :

$$dp_h = \rho \cdot g \cdot dx \quad (38)$$

Der hydrostatische Druck der Schmelze $p_h(x)$ in Abhängigkeit der Höhe x kann durch die Integration von dp_h über x erhalten werden:

$$p_h(x) = \int dp_h dx = \rho \cdot g \cdot x + C_1 \quad (39)$$

Der Druck $p_h(x)$ wirkt auf die Grenzfläche der Schmelze mit der Luft ein und führt zu einer Eindellung oder einer Auswölbung dieser Fläche an der Stelle x . Die dann vorherrschende Krümmung führt zu einem Oberflächendruck $p_A(x)$ (Young-Laplace-Gleichung, HÜGEL & GRAF 2009). $p_A(x)$ wirkt $p_h(x)$ entgegen. Das resultierende Druckgleichgewicht an der Schmelze-Luft-Grenzfläche folgt demnach zu:

$$p_h(x) = -p_A(x) \quad (40)$$

Der Gesamtkrümmungsradius $R_{K,ges}(x)$ der Schmelzeoberfläche ist von den einzelnen Krümmungsradien um die x - ($R_{K,x}(x)$) wie auch um die y -Achse ($R_{K,y}(x)$)

an der jeweiligen Stelle (x, z) abhängig. Wie in Abbildung 51a) und b) und in Abbildung 52b) zu sehen ist, stellt sich längs der x -Achse eine S-förmige Kontur der Oberfläche ein. Längs der y -Achse (siehe Abbildung 52c) ist es eine einfache Wölbung. Aus dieser Betrachtung heraus wird für die weitere Herleitung vereinfachend angenommen, dass $R_{K,x}(x)$ an jeder Stelle der Kontur $z(x)$ die doppelte Größe von $R_{K,y}(x)$ aufweist:

$$R_{K,x}(x) = 2 \cdot R_{K,y}(x) \quad (41)$$

Mit diesem Radienverhältnis und mit der Oberflächenspannung σ_A kann $p_A(x)$ unter der Zuhilfenahme der Young-Laplace-Gleichung angegeben werden:

$$p_A(x) = \frac{\sigma_A}{R_{K,ges}(x)} = \sigma_A \cdot \left(\frac{1}{R_{K,x}(x)} + \frac{1}{R_{K,y}(x)} \right) = \frac{3}{2} \cdot \sigma_A \cdot \frac{1}{R_{K,y}(x)} \quad (42)$$

Der Krümmungsradius einer Kurve ist nach RADE ET AL. (2000) der Kehrwert ihrer zweiten Ableitung. Angewandt auf $z(x)$ bedeutet dies:

$$R_{K,y}(x) = \left(\frac{d^2 z(x)}{dx^2} \right)^{-1} \quad (43)$$

Unter der Anwendung der Formeln (39) bis (43) folgt:

$$\frac{d^2 z(x)}{dx^2} = -\frac{2}{3 \cdot \sigma_A} \cdot (\rho \cdot g \cdot x + C_1) \quad (44)$$

Durch eine doppelte Integration der Formel (44) über x liegt die Kontur der Schmelze $z(x)$ in der x - z -Ebene vor:

$$z(x) = -\frac{2}{3 \cdot \sigma_A} \cdot \left(\rho \cdot g \cdot \frac{x^3}{6} + C_1 \cdot \frac{x^2}{2} + C_2 \cdot x + C_3 \right) \quad (45)$$

Formel (45) enthält die Integrationskonstanten C_1 , C_2 und C_3 . Diese können durch die Angabe von drei Randbedingungen bestimmt werden. Die Schmelze-Luft-Grenzfläche muss an ihren Rändern, d. h. hier bei $x = 0$ und $x = h$, an die feste Plattenoberfläche anschließen.

Da die Temperatur der Schmelze weit von der Verdampfungstemperatur entfernt ist, liegt keine Volumenänderung durch eine Verdampfung vor. Eine Volumenänderung durch eine Gefügeveränderung wird hier nicht betrachtet. Das Volumen der Schmelze ist damit konstant. Für die betrachtete Kurve $z(x)$ in der x - z -Ebene muss daher das Integral von $x = 0$ bis $x = h$ gleich null sein.

Diese Randbedingungen können wie folgend dargestellt werden:

$$z(x = 0) = 0 \quad (46)$$

$$z(x = h) = 0 \quad (47)$$

$$\int_0^h z(x) dx = 0 \quad (48)$$

Die drei Integrationskonstanten ergeben sich damit zu:

$$C_1 = -\frac{h}{2} \cdot \rho \cdot g \quad (49)$$

$$C_2 = \frac{h^2}{12} \cdot \rho \cdot g \quad (50)$$

$$C_3 = 0 \quad (51)$$

Der Punkt der sich berührenden Grenzflächen beim Durchbrand durch die Platte liegt beim lokalen Minimum von $z(x)$ im Intervall $0 \leq x \leq h$ vor. An diesem Punkt der Kurve muss ihre Ableitung gleich 0 betragen. Die Gleichung $dz(x)/dx$ weist zwei Nullstellen auf. Ihre Lösungen sind das lokale Minimum und das lokale Maximum von $z(x)$. Ersteres ergibt sich zu $x_{Min} = (1/2 - \sqrt{1/12}) \cdot h$.

Unter der Einbeziehung der Integrationskonstanten und $x = x_{Min}$ in Formel (45) kann zu jeder Schmelzehöhe h die maximale Eindellung $z_{Min}(h)$ in die Platte angegeben werden:

$$\begin{aligned} z_{Min}(h) &= -\frac{2 \cdot \rho \cdot g}{3 \cdot \sigma_A} \cdot \left(\frac{x_{Min}^3}{6} - \frac{x_{Min}^2 \cdot h}{4} + \frac{x_{Min} \cdot h^2}{12} \right) \\ &= -\frac{1}{\sqrt{3} \cdot 108} \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot h^3}{\sigma_A} \approx -0,0053 \cdot \frac{\rho \cdot g \cdot h^3}{\sigma_A} \end{aligned} \quad (52)$$

Da sich die Platte von beiden Seiten symmetrisch nach innen deltt, darf sich $z_{Min}(h)$ nicht über die halbe Plattendicke d erstrecken, sonst berühren sich die beiden Schmelzegrenzflächen. Ab einer kritischen Schmelzehöhe h_{krit} tritt dieser Fall auf, dann beträgt $z_{Min}(h = h_{krit}) = d/2$ – es kommt zum Durchbrand.

Im Folgenden werden für die beiden Werkstoffe 1.0332 (unlegierter Stahl) und 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung) Diagramme der kritischen Schmelzehöhe h_{krit} über der Plattendicke d nach der oben hergeleiteten Berechnungsmethode angegeben (siehe Tabelle 7). Die zugehörigen Materialwerte und Parameter sind $\sigma_{A,St} = 1,3 \text{ N/m}$, $\rho_{St} = 7874 \text{ kg/m}^3$, $\sigma_{A,Al} = 0,9 \text{ N/m}$, $\rho_{Al} = 2700 \text{ kg/m}^3$ und $g = 9,81 \text{ N/kg}$. Zur Bestätigung der Validität der analytischen Methode sind in

beide Diagramme Mittelwerte von Messwerten der kritischen Schmelzhöhen mit ihrer zugehörigen einfachen positiven und negativen Standardabweichung (Fehlerbalken) für die jeweiligen Werkstoffe und für verschiedene Plattendicken eingezeichnet. Eine gute Übereinstimmung der Messwerte mit den berechneten Werten ist in beiden Diagrammen ersichtlich.

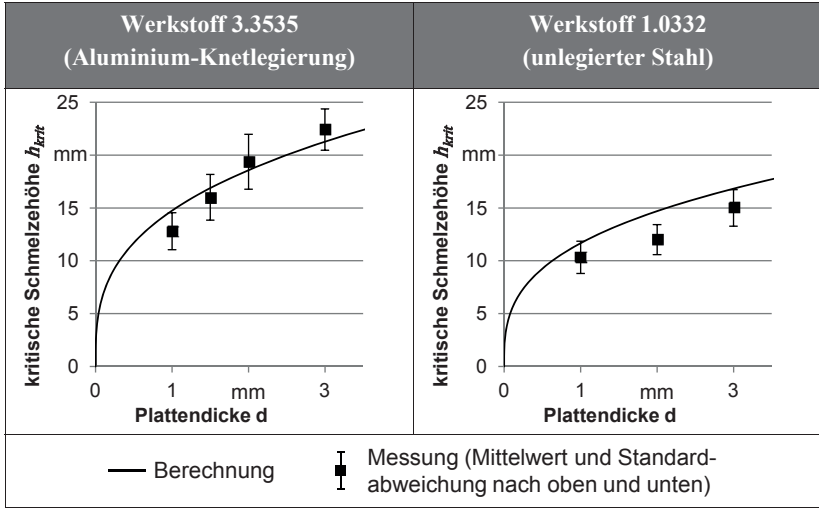


Tabelle 7: Berechnete kritische Schmelzhöhen über der Plattendicke für die Werkstoffe 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung) und 1.0332 (unlegierter Stahl) mit den zugehörigen Messwerten

Für das weitere Berechnungsverfahren wird aufgrund der Rotationssymmetrie des Brennflecks bei der Bestrahlung (vgl. Abbildung 48, S. 79) der kritische Aufschmelzradius r_{krit} verwendet. Dieser ergibt sich als die halbe kritische Schmelzhöhe h_{krit} :

$$r_{krit} = h_{krit}/2 \quad (53)$$

5.4 Gesamtmodell zur Schutzzeitberechnung

Die aufgezeigten physikalischen Einzeleffekte des Aufheizens finden zeitgleich statt und sind über die Temperatur gekoppelt. Der Gesamtvorgang des Aufheizens kann somit für einen rotationssymmetrischen Brennfleck mit folgender zusammenfassenden Differenzialgleichung beschrieben werden:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\overbrace{\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)}^{\text{Wärmeleitung}} \right) + \overbrace{\left(\frac{\bar{A} \cdot I_L(r)}{d \cdot \rho \cdot c_p} \right)}^{\text{Einstrahlung}} - \overbrace{\left(\frac{2 \cdot \varepsilon \cdot \sigma_{SB} \cdot (T^4(r) - T_\infty^4)}{d \cdot \rho \cdot c_p} \right)}^{\text{thermische Abstrahlung}} \quad (54)$$

Nach POLIFKE & KOPITZ (2005) ist diese Differenzialgleichung nicht analytisch lösbar. Ein häufig verwendetes Verfahren zur Lösung von Wärmeleitungsproblemen ist das numerische FTCS-Verfahren (forward time, centered space). Dabei werden die Ableitungen im Raum durch zentrale Differenzenquotienten und die Ableitung nach der Zeit durch den Vorwärts-Differenzenquotienten approximiert (GLÜCK 1990, POLIFKE & KOPITZ 2005). Das Schutzwandmaterial wird dafür um den Brennfleck herum in ringförmige Elemente (Δr) diskretisiert (siehe Abbildung 53a) und über diskrete Zeitschritte (Δt) betrachtet. Abbildung 53b) zeigt die Energiebilanz für ein beliebiges ringförmiges Element mit den einwirkenden Wärmeströmen zum diskreten Zeitpunkt t . In Abbildung 53c) ist dasselbe Element im nachfolgenden Zeitpunkt $t + \Delta t$ mit den dann anliegenden Wärmeströmen dargestellt. Die Temperatur dieses Elements kann für diesen Zeitpunkt mit den Wärmeströmen und der Elementtemperatur des vorhergehenden Zeitpunkts t berechnet werden.

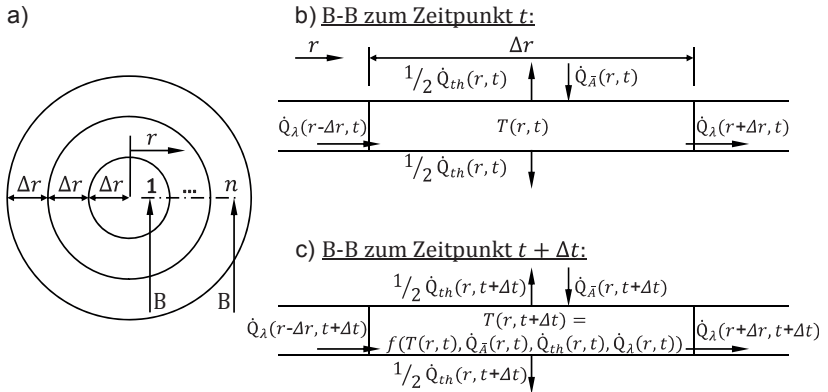


Abbildung 53: a) Diskretisierung der Schutzwandplatte in ringförmige Elemente (Frontalansicht);
 b) Energiebilanz am diskreten Element zum Zeitpunkt t und
 c) zum nachfolgenden Zeitpunkt $t + \Delta t$; (Schnittdarstellungen)

Die Lösung von Gleichung (54) für die eindimensionale Wärmeleitung nach dem FTCS-Verfahren ist in Gleichung (55) aufgezeigt:

$$T(r, t + \Delta t) = T(r, t) + \Delta t \cdot a \cdot \left(\frac{T(r + \Delta r, t) - T(r - \Delta r, t)}{2 \cdot \Delta r \cdot r} + \frac{T(r - \Delta r, t) - 2 \cdot T(r, t) + T(r + \Delta r, t)}{\Delta r^2} \right) + \frac{\Delta t \cdot \Delta \dot{q}_{ein}(r)}{\rho \cdot c_p} \quad (55)$$

Der Netto-Wärmeeintrag $\Delta \dot{q}_{ein}(r)$ in ein Element am Radius r , bedingt durch die Einstrahlung $\dot{Q}_{\bar{A}}(r, T)$ und durch die thermische Abstrahlung $\dot{Q}_{th}(r, T)$, wird in Gleichung (55) als spezifische Größe $\Delta \dot{q}_{ein} = (\dot{Q}_{\bar{A}}(r, T) - \dot{Q}_{th}(r, T)) / (A(r) \cdot d)$ berücksichtigt.

Aufgrund des rotationssymmetrischen Energieeintrags in die Platte besteht im Zentrum der bestrahlten Stelle kein Temperaturgradient ($\partial T / \partial r |_{r=0} = 0$). Dieser Sachverhalt wird im Folgenden als Randbedingung (Symmetriebedingung) zur Lösung des Wärmeleitungsproblems verwendet. In Bezug auf Formel (55) muss deshalb die Temperatur $T(r = 0, t)$ im Mittelpunkt immer gleich der Temperatur $T(r = 1, t)$ des Nachbarelements sein. Dies kann bei der Implementierung leicht durch eine Zuweisung von $T(r = 0, t) = T(r = 1, t)$ für jeden Zeitschritt erfolgen.

Mittels dieser Gleichung kann die Temperatur jedes Elements in den jeweiligen Zeitpunkten beim Erwärmungsvorgang berechnet werden. Zu der Zeit, bei der das Element am kritischen Aufschmelzradius r_{krit} die Schmelztemperatur erreicht (vgl. Abschnitt 5.3.9, S. 84), ist seine Aufschmelzzeit $t_m(r)$ zu addieren. Sie berechnet sich nach Gleichung (56):

$$t_m(r) = \frac{d \cdot h_s \cdot \rho}{I(r) \cdot \bar{A}(T) - 2 \cdot \varepsilon \cdot \sigma_{SB} \cdot (T(r)^4 - T_{\infty}^4)} \quad (56)$$

Während des Aufschmelzens bleibt die Temperatur konstant gleich der Schmelztemperatur, da die zusätzlich eingebrachte Energie für die Phasenumwandlung verwendet wird. Innerhalb des Bereichs der Phasenumwandlung liegt dann kein Temperaturgradient und damit keine Wärmeleitung mehr vor.

Diese Berechnung kann für jede Platte einer Hohlkammer-Schutzwand angewendet werden. Für eine zu berechnende Platte stellen sich alle vorangestellten Platten als sich mit der Zeit öffnende Blenden dar. Dies hat zur Folge, dass die Intensitätsverteilung ab der zweiten Platte nicht mehr nur orts-, sondern auch zeitabhängig ist. Beugungseffekte an den so entstandenen Lochblenden werden in diesem Modell nicht berücksichtigt. Die Startzeiten für die Bestrahlung der jeweiligen hinter einer Lochblende liegenden Elemente werden immer bei der vorherigen Platte mit berechnet. Diese Berechnungen ergeben die Zeiten, an denen die Elemente der vorher-

rigen Platte die Schmelztemperatur erreicht haben und auf- bzw. weggeschmolzen sind. Mit dieser aufgehenden Lochblende kommen auf der Folgeplatte immer mehr bestrahlte Elemente hinzu. Die Starttemperatur jeder Folgeplatte wird durch die thermische Strahlung der jeweiligen Vorgängerplatte erhöht. Der Berechnungsvorgang ist für jedes Element und alle Zeitschritte gleich. Er kann beispielsweise in Tabellenkalkulationen (vgl. Darstellungsschema in Abbildung 53b) oder anderen Software-Hilfsmitteln automatisiert werden. Der Arbeits- und Berechnungsablauf hierzu ist in Abbildung 54 in Form eines Flussdiagramms dargestellt.

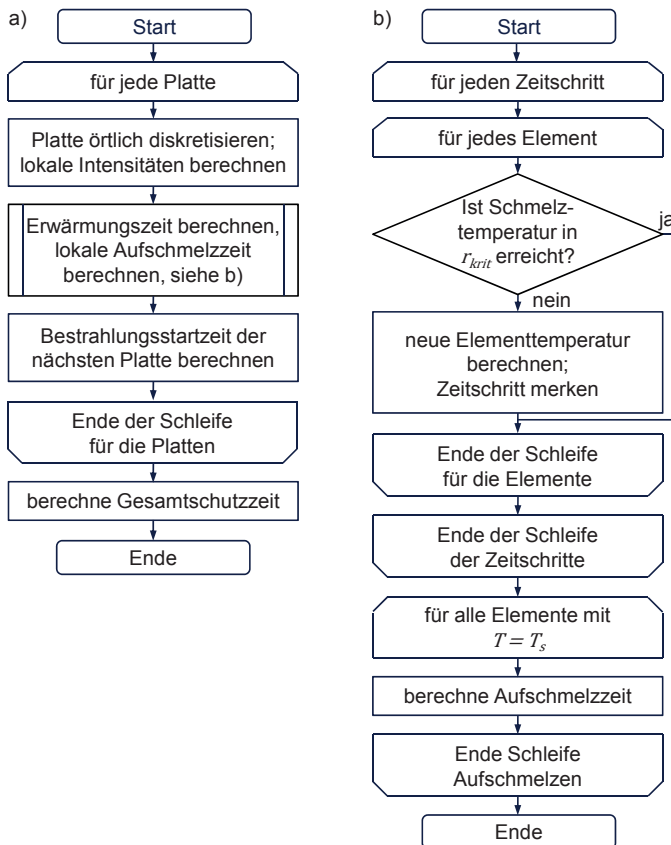


Abbildung 54: a) Flussdiagramm des Ablaufs zur Schutzzeitberechnung;
b) Subroutine zur Berechnung der Erwärmungs- und der Aufschmelzzeit (Darstellung nach DIN 66001)

Die beiden Modellparameter Δr und Δt beeinflussen die Genauigkeit des Ergebnisses des Lösungsverfahrens. Je kleiner diese Werte gewählt sind, desto genauer ist das Ergebnis, jedoch steigt damit auch der Rechenaufwand.

5.5 Einflüsse auf die Berechnungsergebnisse

Für die Berechnung der Schutzzeit nach Abschnitt 5.4 sollen nur die physikalischen Effekte betrachtet werden, welche die Schutzzeit der Schutzwand tatsächlich erhöhen. Die Effekte, welche zwar die Schutzzeiten erhöhen, aber nicht reproduzierbar eintreten, wie beispielsweise Partikel im Strahlengang, sind für diese sicherheitskritische Berechnung nicht zulässig. Aus diesem Grund ist die Methode als konservativ anzusehen. Die berechnete Schutzzeit ist von den Eingangsparametern der Berechnung abhängig. Diese können wiederum selbst von anderen Faktoren, wie beispielsweise der Temperatur, abhängig sein. Je genauer diese Parameter bzw. ihre Verläufe bekannt sind und in die Berechnung integriert werden, desto besser sind die Ergebnisse.

Die verschiedenen Eingangsgrößen können in Gruppen eingeteilt werden. Geometrieparameter der Schutzwand und Abstände können mit einfachen Mitteln leicht aufgenommen werden oder liegen in Form von Konstruktionsdaten vor. Modellparameter wie die Diskretisierungsweite Δr oder der Zeitschritt Δt sind selbst zu definieren und verursachen dadurch ebenfalls keinen Ermittlungsaufwand. Für den Erhalt der Daten der Laserstrahlung, wie des Intensitätsprofils oder der Rayleigh-Länge, müssen meist Messungen durchgeführt werden. Schutzwand-Materialparameter können in aller Regel mit Hilfe von Materialdatenblättern und Fachliteratur abgeleitet werden. Gerade hier sind oftmals große Wertebereiche angegeben. Es ist aufgrund des Sicherheitsanspruchs der Berechnung zu empfehlen, dass die Parameter konservativ gewählt werden. Dies bedeutet hohe Werte bei allen schutzzeitverkürzenden Parametern (I_L, z_r, \bar{A}) und niedrige Werte bei den schutzzeitverlängernden Einflussgrößen ($z, b, d, \lambda_{th}, \varepsilon, \rho, c_p, T_m, h_S$) zu verwenden. Die gemessenen Schutzzeiten variieren bei hohen Laserleistungen kaum. Im Bereich nahe der Eigensicherheit sind hingegen große Schwankungen zu beobachten.

5.6 Validierung der Auslegungsmethode

5.6.1 Experimentelle Untersuchung und empirisches Modell

5.6.1.1 Validierungskonzept und Versuchsplanung

Zur Validierung der Berechnungsmethode wurde ein empirisches Modell aufgebaut. Dieses basiert auf einer Regression der Ergebnisse von Schutzzeitversuchen, die mit dem bereits aus Kapitel 4 (siehe Abschnitt 4.4.1, S. 61) bekannten Faserlasersystem durchgeführt wurden. Die hierbei relevanten Laserstrahlparameter waren eine Wellenlänge von $\lambda = 1070$ nm, eine Laserleistung von bis zu $P_L = 8$ kW, ein Strahlparameterprodukt von $SPP = 7,4$ mm-mrad, ein Fokusedurchmesser von $d_0 = 596$ μ m bei einer Rayleigh-Länge von $z_r = 13,5$ mm und einer Brennweite von $f = 460$ mm.

Die Probekörper bestanden einerseits aus einer einzelnen Platte, wie auch andererseits aus zwei Platten, der Werkstoffe 1.0332 (unlegierter Stahl) und 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung), jeweils ohne weitere Oberflächenbehandlung. Die Bestrahlung der Einplatten-Probekörper erfolgte mit den Laserleistungen $P_L = 1$ kW, 4,5 kW und 8 kW im Abstand von $z = 380$ mm, 590 mm und 800 mm vom Strahlfokuspunkt. Bei den Zweiplatten-Hohlkammerstrukturen wurde mit $P_L = 2$ kW, 5 kW und 8 kW bestrahlt und der Bestrahlungsabstand wurde konstant bei $z = 380$ mm belassen. Die Abstände zwischen den Platten wurden von $b = 25$ mm über 50 mm bis zu 75 mm variiert. Die Plattendicken betrugen $d = 1$ mm, 2 mm und 3 mm. Zum Bestrahlungsbeginn hatten die Probekörper jeweils Raumtemperatur ($T_\infty = 298$ K). Die bei den Bestrahlungen entwichenen Rauche und Dämpfe wurden unmittelbar über den Probekörpern abgesaugt. Ein auftretender Schutzwand-Durchbrand wurde mit einer PIN-Fotodiode registriert und es wurde somit die Schutzzeit für den jeweiligen Bestrahlungsfall aufgezeichnet.

Zum Aufbau des empirischen Modells wurde ein Versuchsplan erstellt. Für diesen wurden die genannten möglichen Einflussfaktoren auf die Schutzzeit als Versuchsparameter definiert. Dabei ergab sich ein Zielkonflikt bezüglich der Anzahl der Versuche und der Aussagegenauigkeit des auf den Versuchsergebnissen basierenden empirischen Modells. Zur Lösung dieses Problems wird üblicherweise ein sogenannter Determinanten-optimaler Versuchsplan gewählt (KLEIN 2007). Dieser wurde auch hier verwendet. Er ermöglichte die Abbildung der Schutzzeit als Funktion der Einflussfaktoren und ihrer Wechselwirkungen unter minimalem Versuchsaufwand. Dieser Versuchsplantyp wird im Allgemeinen durch die Anwendung einer

mathematischen Optimierung erzeugt. Diese wurde hier mittels der Statistik-Software Visual-XSel® (RONNINGER 2012) durchgeführt. Die resultierenden Versuchsparameter des Versuchsplans sind in der Tabelle 11 und in der Tabelle 12 zusammen mit den zugehörigen Versuchsergebnissen, beschrieben im folgenden Absatz, aufgezeigt.

5.6.1.2 Statistische Betrachtung von Schutzzeiten

Aus den Arbeiten von ZÄH ET AL. (2009A) und ZÄH & BRAUNREUTHER (2010A) ist bekannt, dass mehrere Schutzzeitmessungen bei konstanten Versuchsparametern unterschiedliche Messwerte ergeben. „Die [...] Streuung der Schutzzeiten in den Versuchen verdeutlicht die Problematik von Testreihen zur Schutzzeitcharakterisierung von Laserschutzwänden mit einer begrenzten Anzahl an Beschussversuchen.“ (ZÄH & BRAUNREUTHER 2010A, S. 468)

Um diese Streuung zu berücksichtigen, wurde jeder Versuch im oben angesprochenen Versuchsplan zwanzigmal wiederholt. In Tabelle 8 sind Beispiele von Histogrammen der gemessenen Schutzzeiten t_{Hohl} aus den jeweils zwanzig Versuchen für eine Zweiplatten-Schutzwand aus dem Werkstoff 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung) und aus dem Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl) jeweils mit Plattendicken (zwei Platten) von je $d = 2$ mm dargestellt. Die Laserleistung betrug $P_L = 5$ kW und der Bestrahlungsabstand vom Fokuspunkt belief sich auf $z = 380$ mm.

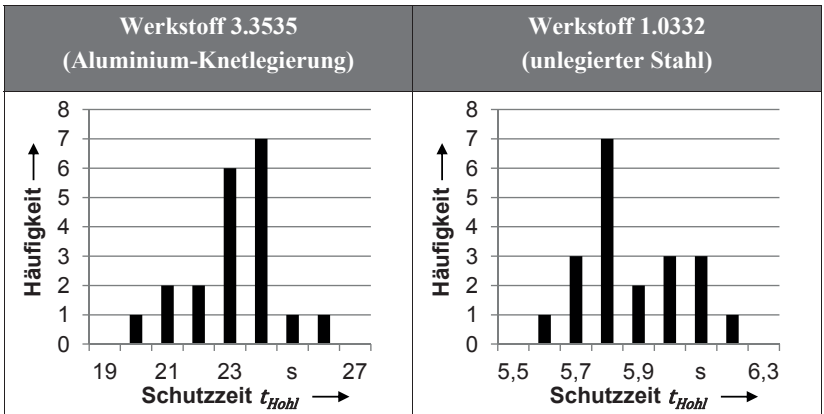


Tabelle 8: Histogramme von gemessenen Schutzzeiten; Zweiplatten-Schutzwände; Werkstoffe 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung) und 1.0332 (unlegierter Stahl); $d = 2$ mm; $P_L = 5$ kW; $z = 380$ mm

Die beiden Histogramme verdeutlichen die Streuung der Schutzzeiten und sie geben den Bereich der Häufung der Messwerte an. Es kann jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, ob die dargestellten Schutzzeiten den möglichen Bereich dieser vollständig angeben. Bei weiteren Beschussversuchen oder in der Praxis bei einem Havariefall mit diesen Schutzwänden und dem angegebenen Belastungsfall könnten die dann resultierenden Schutzzeiten auch unter den hier genannten Zeiten liegen.

Mit Hilfe eines statistischen Ansatzes können Wahrscheinlichkeiten für bestimmte Schutzzeiten angegeben werden. Solche statistischen Lebensdaueruntersuchungen werden meist mit Hilfe der Weibull-Verteilung durchgeführt (DIETRICH 1995). Sie kann die verschiedenen Arten von Ausfällen und Bauteilversagen, die Frühausfälle, die Zufallsausfälle und die Verschleißausfälle, abbilden (KONNOV 2005). Die Weibull-Verteilung ist eine übergeordnete, vielseitig einsetzbare Modellverteilung, die sich aufgrund ihrer mathematischen Eigenschaften jeder in der Praxis auftretenden Form einer Häufigkeitsverteilung anpassen lässt. (DIETRICH 1995)

Die Dichtefunktion der Weibull-Verteilung wird mit folgendem Term beschrieben:

$$g_W(t) = \frac{b_F}{T_c} \cdot \left(\frac{t - t_0}{T_c} \right)^{b_F - 1} \cdot e \left(- \left(\frac{t - t_0}{T_c} \right)^{b_F} \right) \quad (57)$$

Ihre Verteilungsfunktion lautet:

$$G_W(t) = 1 - e \left(- \left(\frac{t - t_0}{T_c} \right)^{b_F} \right) \quad (58)$$

Damit besitzt diese Verteilung drei Parameter (KONNOV 2005):

- t_0 : Lageparameter: Er charakterisiert den Zeitpunkt, an dem das Versagen der Schutzwände beginnt.
- b_F : Formparameter: Durch ihn wird die Kurvenform der Verteilung festgelegt.
- T_c : Maßstabsparameter: Er wird auch *charakteristische Lebensdauer* genannt.

Die Parameter einer Weibull-Verteilung lassen sich für gegebene Messwerte nicht analytisch bestimmen. Sie können beispielsweise iterativ mit der Maximum-Likelihood-Methode berechnet werden (HARTUNG 1995), wofür sich Statistikprogramme wie „MathWorksTM Matlab Statistics Toolbox“ anbieten. Der Lageparameter t_0 repräsentiert hier eine absolut abgesicherte Schutzzeit. Da diese bisher nicht gesichert bestimmt werden kann, muss sie generell konservativ mit $t_0 = 0$ s ange-

nommen werden. Die Parameter der Weibull-Verteilung für die beiden in Tabelle 8 aufgeführten Versuchsreihen ergeben sich somit gemäß Tabelle 9.

Parameter der Weibull-Verteilung	Werkstoff 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung)	Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl)
Lageparameter t_0	0 s	0 s
Formparameter b_F	18,64	37,63
Maßstabsparameter T_c	23,38 s	5,96 s

Tabelle 9: Parameter der Weibull-Verteilung für die in Tabelle 8 aufgeführten Versuchsreihen

Mit diesen Parametern können mit Hilfe der Verteilungsfunktion $G_W(t)$ der Weibull-Verteilung Wahrscheinlichkeiten zu Schutzzeiten angegeben werden. (ZÄH ET AL. 2009A und ZÄH & BRAUNREUTHER 2010A)

Auf Basis der Arbeiten von ZÄH ET AL. (2009A) und ZÄH & BRAUNREUTHER (2010A) wurde in die Ausgabe des Jahres 2011 der Norm DIN EN ISO 60825-4 die statistische Betrachtung bei der Messung einer Schutzzeit aufgenommen. Danach ist für die Angabe der Schutzzeit einer Schutzwand „ein Vertrauensintervall von 99% erforderlich“ (DIN EN ISO 60825-4, S. 29).

Die Schutzzeiten zu der 99-prozentigen Sicherheit betragen für den betrachteten Fall (siehe Tabelle 8 und Tabelle 9) 18,27 s für den Werkstoff 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung) und 5,27 s für den Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl). Der Umkehrschluss der 99-prozentigen Sicherheit bedeutet auch, dass nach der zu 99% sicheren Zeit bereits 1% der Schutzelemente versagt hat. Einem Anwender dieser normativen Regelung ist es natürlich erlaubt, eine höhere Sicherheit zu wählen. Gleichzeitig muss ihm bewusst sein, dass eine 100%-Sicherheit nicht zu realisieren ist. Die dazu korrelierende Schutzzeit wäre 0 s.

Da die Weibull-Verteilung ohne spezielle Programme nicht auf einfachem Wege analytisch bestimmt werden kann, ist eine praxisnahe Methode zur einfachen Berechnung der Verteilung zu bevorzugen. Eine Weibull-Verteilung zeigt ab Werten des Formparameters $b_F \geq 3$ den Charakter einer Normalverteilung (DIETRICH 1995, KONNOV 2005). Auf Grund dieser Ähnlichkeit wird sie bei den o. g. Werten für den Formparameter im Folgenden mit Hilfe der Normalverteilung angenähert.

Die Dichtefunktion der Normalverteilung wird nach KONNOV (2005) mit dem folgenden Term beschrieben:

$$g_N(t) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \cdot e^{\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right)} \quad (59)$$

Die zugehörige Verteilungsfunktion lautet:

$$G_N(t) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma} \cdot \int_{-\infty}^t e^{\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2\right)} dt \quad (60)$$

Damit ist die Form der Normalverteilung von den zwei Parametern Mittelwert μ und Standardabweichung σ abhängig. Diese Parameter sind im Gegensatz zu den Parametern der Weibull-Verteilung durch folgende Formeln analytisch bestimmbar:

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i \quad (61)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (t_i - \mu)^2} \quad (62)$$

n ist hierbei die Anzahl der Schutzzeit-Messwerte t . Für die o. a. Versuchsreihen (siehe Tabelle 8) nehmen die Parameter der Normalverteilung die folgenden Werte der Tabelle 10 an:

Parameter der Normalverteilung	Werkstoff 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung)	Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl)
Mittelwert μ	22,77 s	5,88 s
Standardabweichung σ	1,37 s	0,16 s

Tabelle 10: Parameter der Normalverteilung für die in Tabelle 8 aufgezeigten Versuchsreihen

Die Schutzdauer zu einem bestimmten Wahrscheinlichkeitswert nach der Normalverteilung wird mit Hilfe ihrer Verteilungsfunktion berechnet. $G_N(t)$ stellt den Wahrscheinlichkeitswert und t die Schutzzeit der Schutzwand dar. Zur analytischen Berechnung muss hierbei das Integral von $-\infty$ bis t berechnet werden. Die Schutzdauer, ebenfalls mit 99-prozentiger Sicherheit, beträgt hier 19,59 s für den Werk-

stoff 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung) und 5,50 s für den Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl).

Die beiden nach der Weibull-Verteilung und nach der Normalverteilung zu 99% sicheren Schutzzeiten unterschieden sich für den Werkstoff 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung) um 1,32 s und für den Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl) um 0,22 s. Bezogen auf die jeweilige zu 99% sichere Schutzzeit nach Weibull beträgt die relative Abweichung der nach der Normalverteilung berechneten Zeit im ersten Fall 4,2 % und im zweiten Fall 7,2 %. Diese geringe Abweichung bestätigt die Möglichkeit der Annäherung der Weibull-Verteilung bei $b_F \geq 3$ durch die Normalverteilung. Auch in der Ausgabe 2011 der Norm DIN EN ISO 60825-4 wird daher die Möglichkeit der statistischen Schutzzeitbetrachtung unter der Zuhilfenahme der Normalverteilung genannt.

Ein alternativer in der Norm vorgeschlagener und einfacher Weg der Berechnung der sicheren Schutzzeit besteht darin, vom Mittelwert μ die dreifache Standardabweichung σ abzuziehen. Die damit verbundene Sicherheit beträgt 99,87%. Bei einer starken Streuung der Messwerte ist die Standardabweichung groß. Wie in Tabelle 10 bereits zu erkennen ist, neigen Schutzwände aus Aluminiumwerkstoffen eher zu diesem Verhalten als solche aus Stahlwerkstoffen. Es kann vorkommen, dass die Berechnung $\mu - 3 \cdot \sigma \leq 0$ ergibt. Da die Schutzwand physikalisch bedingt keine negative Schutzzeit oder die Schutzzeit 0 s aufweisen kann, ist dann mittels dieser einfachen Berechnungsvorschrift keine Aussage zu treffen.

Diese o. a. statistischen Methoden der Berechnung der zu 99% sicheren Schutzzeit mittels der Weibull- und der Normalverteilung wurden auf alle im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Schutzzeitmessungen angewendet. Die zugehörigen Parameter der beiden Verteilungen sowie die jeweils zu 99% sicheren Schutzzeiten $t_{99\%}$ sind für die Einzelplatten- in Tabelle 11 und für die Hohlkammer-Schutzwände in Tabelle 12 aufgelistet. Mit den angegebenen Parametern beider Verteilungen kann für den jeweiligen Bestrahlungsfall ebenso eine Schutzzeit mit einer anderen Sicherheit als 99% mit den genannten Verteilungsfunktionen berechnet werden. Die Wahl der Sicherheit sollte unter ethischen und moralischen Gesichtspunkten erfolgen und sie darf nicht geringer sein, als sie in den normativen Regelungen festgeschrieben ist (Stand 2013: 99%).

Versuchsparameter				Normalverteilung			Weibull-Verteilung		
Werkstoff	d in mm	P_L in kW	z in mm	μ in s	σ in s	$t_{99\%}$ in s	b_F	T_c in s	$t_{99\%}$ in s
1.0332 (unlegierter Stahl)	1	1,0	380	13,15	0,77	11,36	21,33	13,49	10,87
	1	4,5	590	2,94	0,55	1,66	4,30	3,17	1,09
	1	4,5	800	3,64	0,15	3,29	28,21	3,71	3,15
	2	1,0	590	37,19	2,86	30,53	13,68	38,51	27,52
	2	4,5	380	3,45	0,14	3,13	26,32	3,52	2,95
	2	4,5	590	3,67	0,24	3,10	15,43	3,78	2,81
	2	8,0	590	2,37	0,12	2,09	25,19	2,42	2,01
	3	1,0	380	71,98	3,33	64,24	25,21	73,48	61,22
	3	4,5	590	5,05	0,21	4,55	26,78	5,14	4,33
	3	4,5	800	7,02	0,19	6,57	37,27	7,11	6,28
	3	8,0	590	2,72	0,21	2,23	15,22	2,81	2,08
	3	8,0	800	3,49	0,13	3,19	30,97	3,54	3,05
3.3535 (Aluminium-Knetlegierung)	1	1,0	380	29,94	6,07	15,81	5,57	32,38	14,17
	1	4,5	590	2,95	0,26	2,33	13,91	3,06	2,20
	1	4,5	800	3,83	0,22	3,30	20,67	3,92	3,14
	1	8,0	590	1,67	0,18	1,24	9,92	1,75	1,10
	2	4,5	590	4,91	0,37	4,04	12,09	5,08	3,48
	3	4,5	380	14,95	0,95	12,75	15,55	15,40	11,45
	3	4,5	800	25,75	3,21	18,29	11,10	27,03	17,86
	3	8,0	590	3,26	0,42	2,29	8,73	3,44	2,03
	3	8,0	800	8,85	0,65	7,33	17,35	9,13	7,00

Tabelle 11: Statistische Auswertung der Einzelplatten-Schutzzeitmessungen für alle verwendeten Werkstoffe und Versuchsparameter; Angabe aller Parameter der Weibull- und der Normalverteilungen

Versuchsparameter				Normalverteilung			Weibull-Verteilung		
Werkstoff	d in mm	P_L in kW	b in mm	μ in s	σ in s	$t_{99\%}$ in s	b_F	T_c in s	$t_{99\%}$ in s
1.0332 (unlegierter Stahl)	1	2,0	25	10,67	0,35	9,85	31,80	10,84	9,38
	1	2,0	75	20,80	1,03	18,40	20,08	21,29	16,93
	1	5,0	75	4,06	0,13	3,76	39,82	4,11	3,66
	1	8,0	75	2,48	0,16	2,11	17,62	2,55	1,96
	2	2,0	25	20,09	0,66	18,55	34,49	20,39	17,85
	2	2,0	25	20,58	1,40	17,31	16,25	21,21	15,98
	2	5,0	25	5,54	0,19	5,10	34,48	5,63	4,93
	2	5,0	50	5,88	0,16	5,50	37,63	5,96	5,27
	2	8,0	75	3,65	0,59	2,27	5,06	3,91	1,57
3.3535 (Aluminium-Knetlegierung)	1	2,0	25	19,03	2,96	12,14	7,84	20,24	11,26
	1	2,0	75	20,43	2,35	14,95	8,50	21,49	12,51
	1	5,0	25	4,36	0,38	3,47	12,38	4,53	3,13
	1	5,0	75	3,62	0,31	2,91	11,10	3,77	2,49
	2	2,0	25	128,06	20,05	81,41	7,27	136,56	72,55
	2	2,0	75	106,32	11,12	80,46	11,26	111,15	73,86
	2	5,0	50	22,77	1,37	19,59	18,64	23,38	18,27
	2	8,0	75	10,54	0,83	8,60	11,23	10,95	7,27

Tabelle 12: Statistische Auswertung der Hohlkammer-Schutzzeitmessungen für alle verwendeten Werkstoffe und Versuchsparameter; Angabe aller Parameter der Weibull- und der Normalverteilungen; die für die Beispiele (siehe Tabelle 8, Tabelle 9 und Tabelle 10) geltenden Zeilen sind grau eingefärbt.

5.6.1.3 Regression zum empirischen Modell

Durch die Messwerte aller Schutzzeitversuche (siehe Anhang) konnte mit der bereits erwähnten Statistik-Software Visual-XSel® (RONNINGER 2012) mit einer linearen Regressionsanalyse und anschließender Box-Cox-Transformation der Zusammenhang der empirisch ermittelten Schutzzeiten und der Versuchsparameter für die einzelnen Platten wie auch für die Zweiplatten-Hohlkammerstrukturen formelmäßig identifiziert werden. Diese Berechnungsmethode stellt ein empirisches Modell der Realität dar und bildet die mittlere Schutzzeit zu den entsprechenden Versuchsparametern ab. Die Funktion mit der besten Annäherung an die Messwerte aus den Realversuchen ist in Gleichung (63) für die Einzelplatten- und in Gleichung (64) für die Zweiplatten-Hohlkammer-Schutzwände gegeben:

$$t_{Einzel} = o \cdot \exp(l_k + l_w + \tilde{P} \cdot l_p + \tilde{d} \cdot l_d + \tilde{z} \cdot l_z + \tilde{P} \cdot c_{wp} + \tilde{d} \cdot c_{wd} + \tilde{P} \cdot \tilde{d} \cdot c_{pd} + \tilde{P}^2 \cdot q_p + \tilde{z}^2 \cdot q_z) \quad (63)$$

$$\text{mit: } \tilde{P} = \frac{P_L - 4,5 \text{ kW}}{3,5}; \quad \tilde{z} = \frac{z - 590 \text{ mm}}{210}; \quad \tilde{d} = (d - 2 \text{ mm});$$

$$t_{Hohl} = o \cdot \exp(l_k + l_w + \tilde{P} \cdot l_p + \tilde{d} \cdot l_d + \tilde{b} \cdot l_b + \tilde{P} \cdot c_{wp} + \tilde{d} \cdot c_{wd} + \tilde{P} \cdot \tilde{d} \cdot c_{pd} + \tilde{P} \cdot \tilde{b} \cdot c_{pb} + \tilde{d} \cdot \tilde{b} \cdot c_{db} + \tilde{P}^2 \cdot q_p + \tilde{b}^2 \cdot q_b) \quad (64)$$

$$\text{mit: } \tilde{P} = \frac{P_L - 5 \text{ kW}}{3}; \quad \tilde{b} = \frac{b - 50 \text{ mm}}{25}; \quad \tilde{d} = (2 \cdot d - 3 \text{ mm});$$

Mit Bestimmtheitsmaßen von $R_{t, Einzel}^2 = 0,97$ und $R_{t, Hohl}^2 = 0,99$ bilden beide Schutzzeit-Regressionen die realen Zusammenhänge gut ab. Die Werte der in diesen beiden Gleichungen verwendeten Koeffizienten sind in Tabelle 13 aufgelistet.

Koeffizient	für t_{Einzel}	für t_{Hohl}
c_{db}	-	-0,026 mm ⁻²
c_{pb}	-	0,102 kW ⁻¹ ·mm ⁻¹
c_{pd}	-0,341 kW ⁻¹ ·mm ⁻¹	-0,072 kW ⁻¹ ·mm ⁻¹
$c_{wd, Alu}$	0,127 mm ⁻¹	0,266 mm ⁻¹
$c_{wd, Stahl}$	-0,127 mm ⁻¹	-0,266 mm ⁻¹
$c_{wp, Alu}$	-0,122 kW ⁻¹	-0176 kW ⁻¹
$c_{wp, Stahl}$	0,122 kW ⁻¹	0,176 kW ⁻¹
l_b	-	0,080 mm ⁻¹
l_d	0,623 mm ⁻¹	0,485 mm ⁻¹
l_k	1,492	2,082
l_p	-1,564 kW ⁻¹	-0,944 kW ⁻¹
l_z	0,266 mm ⁻¹	-
$l_{w, Alu}$	0,378	0,418
$l_{w, Stahl}$	-0,378	-0,418
o	1,000 s	1,000 s
q_b	-	0,085 mm ⁻²
q_p	0,977 kW ⁻²	0,216 kW ⁻²
q_z	0,179 mm ⁻²	-

Tabelle 13: Koeffizienten und zugehörige Werte für die Schutzzeit-Regressionsmodelle für die Einzelplatten- und für die Hohlkammer-Schutzwände

Da das jeweilige Berechnungsergebnis den obigen Gleichungen die mittlere Schutzzeit darstellt, hat innerhalb dieser Zeit bereits die Hälfte der Probekörper versagt. Sie kann daher nicht für sicherheitstechnische Anwendungen verwendet werden. Es wird die Schutzzeit mit einer höheren Sicherheit benötigt. Dies kann, wie im vorigen Abschnitt aufgezeigt, unter der Zuhilfenahme der Weibull-Verteilung erfolgen. Ihr Lageparameter wird dazu weiterhin zu $t_0 = 0$ s gesetzt. Da der Formparameter b_F für alle Versuchsparameter des Regressionsmodells vorliegt (vgl. Tabelle 11 und Tabelle 12), kann er ebenfalls mittels einer Regression angegeben werden. Formel (65) gilt hierbei für die Einzelplatten, Formel (66) für die Zweiplatten-Hohlkammer-Versuchskörper:

$$b_{F,Einzel} = l_k + l_w + \tilde{d} \cdot l_d + \tilde{P} \cdot l_p + \exp(\tilde{z} \cdot e_z) + \exp(\tilde{P} \cdot e_p) \quad (65)$$

$$\text{mit: } \tilde{P} = \frac{P_L - 4,5 \text{ kW}}{3}; \quad \tilde{z} = \frac{z - 590 \text{ mm}}{210}; \quad \tilde{d} = (d - 2 \text{ mm});$$

$$b_{F,Hohl} = l_k + l_w + \tilde{d} \cdot l_d + \tilde{P} \cdot l_p + \exp(\tilde{P} \cdot e_p) \quad (66)$$

$$\text{mit: } \tilde{P} = \frac{P_L - 5 \text{ kW}}{3}; \quad \tilde{d} = (2 \cdot d - 3 \text{ mm});$$

Die Bestimmtheitsmaße der Formparameter-Regressionen ergeben sich hier zu $R_{b_{F,Einzel}}^2 = 0,71$ und $R_{b_{F,Hohl}}^2 = 0,77$. Die Werte der in diesen Formeln verwendeten Koeffizienten sind in Tabelle 14 angegeben.

Koeffizient	für $b_{F,Einzel}$	für $b_{F,Hohl}$
e_p	0,542 kW ⁻¹	0,721 kW ⁻¹
e_z	-1,791 mm ⁻¹	-
l_d	-0,713 mm ⁻¹	-0,569 mm ⁻¹
l_k	13,008	20,176
l_p	0,473 kW ⁻¹	1,811 kW ⁻¹
$l_{w,Alu}$	-3,518	-9,328
$l_{w,Stahl}$	3,518	9,328

Tabelle 14: Koeffizienten und zugehörige Werte für die Formparameter-Regressionen der Einzelplatte und der Hohlkammer-Schutzwand

Mit Hilfe des jetzt bestimmaren Formfaktors b_F und der nach der charakteristischen Lebensdauer T_c umgestellten Verteilungsfunktion der Weibull-Verteilung $G_W(t)$ kann T_c mit den Erwartungswerten t_{Einzel} und t_{Hohl} der Schutzzeitregressio-

nen berechnet werden (vgl. Formel (58)). Die zu diesen Schutzzeiten korrelierende Sicherheit beträgt $S = G_W = 0,5$:

$$T_c = \frac{t}{\{-\ln(0,5)\}^{\frac{1}{b_F}}}; \text{ mit: } t, b_F = \begin{cases} t_{\text{Einzel}}, b_{F,\text{Einzel}} & \text{für eine Platte} \\ t_{\text{Hohl}}, b_{F,\text{Hohl}} & \text{für zwei Platten} \end{cases} \quad (67)$$

Mit demselben Ansatz kann mit den beiden Werten b_F und T_c eine auf eine Sicherheit S (zwischen 0 und 1) bezogene Schutzzeit t_S bestimmt werden:

$$t_S = \{-\ln(S)\}^{\frac{1}{b_F}} \cdot T_c; \text{ mit: } b_F = \begin{cases} b_{F,\text{Einzel}} & \text{für eine Platte} \\ b_{F,\text{Hohl}} & \text{für zwei Platten} \end{cases} \quad (68)$$

5.6.2 Berechnung

5.6.2.1 Allgemeines

Mithilfe des in Abschnitt 5.4 dargestellten analytischen Gesamtmodells zur Schutzzeitberechnung können Schutzzeiten für die Einzel- und Hohlkammer-Schutzwände aus den Werkstoffen 1.0332 (unlegierter Stahl) und 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung) und für das im vorigen Abschnitt aufgezeigte Parameterfenster berechnet werden. Als Eingangswerte der Berechnung werden Laser-, Werkstoff-, Geometrie- und Modellparameter benötigt. Sie können einerseits konstant oder auch voneinander abhängig sein. In den folgenden Abschnitten werden diese Eingangsgrößen näher diskutiert.

5.6.2.2 Laserparameter und deren Aufbereitung

Die für die Berechnung wichtigen und bei der Validierung verwendeten Laserparameter sind, wie bereits bei der Schilderung der Realversuche in Abschnitt 5.6.1 genannt, die Wellenlänge von $\lambda = 1070 \text{ nm}$ und das Strahlprofil im Fokus. Letzteres kann mit heute üblichen Strahlvermessungsgeräten lediglich in einer normierten Form ermittelt und anschließend mit der Laserleistung im Strahl skaliert werden. Im Versuch wurde der Strahl hierzu mit einem Primes[®]-Focusmonitor vermessen. Neben dem Fokusdurchmesser von $d_0 = 596 \mu\text{m}$ und der Rayleigh-Länge von $z_r = 13,5 \text{ mm}$ war die Ausgabe des relativen Laserleistungsabfalls über dem Strahlradius möglich (siehe Abbildung 55). Durch eine Subtraktion dieser Kurve in jedem Punkt von Eins kann die im Strahl verbleibende relative Laserleistung über dem Strahlradius erhalten werden. Die in dem konzentrischen Profil enthaltende Leis-

tung kann leicht numerisch durch das Aufsummieren der relativen Leistungsanteile auf den Flächen von infinitesimalen Kreisscheiben um das Zentrum des Brennflecks erfolgen. Es empfiehlt sich, das Strahlprofil durch eine Multiplikation mit einem Korrekturfaktor so iterativ zu normieren, dass sich eine relative Gesamtlaserleistung von 1 W ergibt. Unter der Prämisse, dass sich das Strahlprofil nicht wesentlich mit der Leistung ändert, kann das reale Profil durch eine weitere Multiplikation mit der im gesamten Laserstrahl befindlichen Laserleistung berechnet werden. Abbildung 56 stellt das aus der Messung resultierende 1-W-Strahlprofil dar.

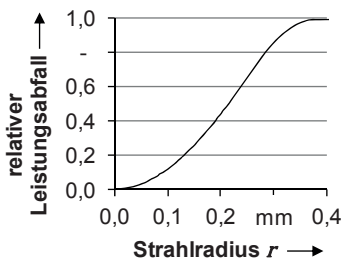


Abbildung 55: Relativer Leistungsabfall im Strahlprofil (Messung)

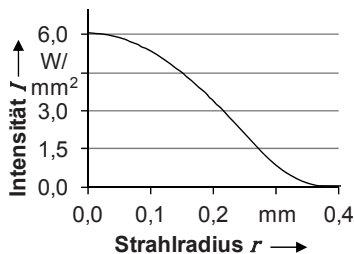


Abbildung 56: Strahlprofil mit 1 W Gesamtleistung (Aufbereitung)

5.6.2.3 Werkstoffparameter

Die Werkstoffparameter können aus Werkstoffdatenblättern oder aus der Fachliteratur (beispielsweise VDI 2006) entnommen werden. Die als konstant angenommenen Parameter sind in Tabelle 15 aufgelistet, solche mit einem temperaturabhängigen Verlauf werden im Anschluss daran diskutiert.

Parameter	Wert	
	Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl)	Werkstoff 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung)
Absorptionsgrad \bar{A}	siehe Absorptionsgrade (nachfolgend)	
Schmelztemperatur T_s	1811 K	878 K
Schmelzenthalpie h_s	247000 J/kg	370000 J/kg
spez. Wärmekapazität c_p	449 J/kg·K	siehe spezifische Wärmekapazität von Aluminium (nachfolgend)
Dichte ρ	7874 kg/m ³	2700 kg/m ³
Emissionskoeffizient ε	0,3	siehe Emissionskoeffizient von Aluminium (nachfolgend)
Wärmeleitzahl λ_{th}	45 W/m ² ·K	170 W/m ² ·K

Tabelle 15: Verwendete Werkstoffparameter als Eingangsgrößen für das Schutzzeit-Gesamtmodell zum Zweck der Validierung durch den Vergleich dessen mit dem empirischen Modell

Absorptionsgrade:

Nach Abschnitt 2.1.3.6 (S. 15) ist der Absorptionsgrad \bar{A} bei den beiden betrachteten Materialien u. a. von der Oberflächenbeschaffenheit abhängig. Die Probekörper weisen eine vom Herstellungsprozess herrührende Oberflächenstruktur auf. Nach Messungen beträgt die gemittelte Rautiefe bei den Stahlprobekörpern 8 μm , die mittlere Rillenbreite 200 μm , die Aluminiumprobekörper weisen hierfür Werte von 2 μm und 50 μm auf. Die Strukturmerkmalsgröße liegt demnach beide Male über der Wellenlänge der Festkörperlaserstrahlung. Es muss somit nach Abschnitt 2.1.3.6 (S. 15) eine verstärkte Absorption durch Mehrfachreflexion in Betracht gezogen werden.

Nach POPRAWE ET AL. (2004) liegt der Absorptionskoeffizient bei Aluminium mit einer gefrästen Oberfläche und bei einer Raumtemperatur von 293 K bei bis zu 11 %. Laut HÜGEL & GRAF (2009) nimmt er bis zur Schmelztemperatur um 0,5 % pro 100 K zu. Bei Erreichen der flüssigen Phase steigt der Koeffizient nochmals sprunghaft an. Er wird ab dann für die Berechnung konstant mit 15 % angenommen.

Für Stahlwerkstoffe werden von POPRAWE ET AL. (2004) Absorptionskoeffizienten von 35 % \pm 5 % für Wellenlängen im zutreffenden Bereich bei 293 K angegeben.

Bis zu 1300 K beträgt der Temperaturfaktor -0,35 % pro 100 K. Ab dann bleibt der Koeffizient konstant.

Spezifische Wärmekapazität von Aluminium:

Die spezifische Wärmekapazität c_p des Aluminiumwerkstoffs wird nach VDI (2006) von 837 J/kg·K bei 273 K bis 1210 J/kg·K bei 873 K linear steigend und ab dann als konstant angenommen.

Emissionskoeffizient von Aluminium:

Der Emissionskoeffizient ε wird nach OMEGA ENGINEERING INC. (1998) für eine leicht oxidierte Aluminiumoberfläche zwischen 11 % bei 473 K und 19 % bei 873 K linear interpoliert. Darunter wird linear extrapoliert.

5.6.2.4 Geometrieparameter

Die Geometrieparameter umfassen die Abstände des Laserstrahl-Fokuspunkts von der Schutzwand, die Kammerbreite der Hohlkammerwand und die Materialdicken. Im Allgemeinen sind diese Parameter gut ermittelbar oder sie sind gar durch die Laserstrahlanwendung selbst vorgegeben. Sie werden deshalb direkt von den Realversuchen übernommen.

5.6.2.5 Weitere Modellparameter

Weitere Modellparameter sind die oben erläuterte zeitliche (Δt) und die örtliche (Δr) Diskretisierungsschrittweite sowie die Anzahl der Elemente n . Sie haben keinen direkten Bezug zu den Realversuchen, sondern werden ausschließlich als Parameter für den Berechnungsalgorithmus benötigt. Um aussagekräftige Berechnungsergebnisse zu erhalten, sollte Δr derart gewählt werden, dass sich $r_{krit}/\Delta r > 10$ (vgl. Abschnitt 5.3.9, S. 84) ergibt. Die geometrische Größe der Schutzwandplatten wird in der Berechnung über das Produkt der Anzahl der Elemente n und ihrer Größe Δr definiert. Zu viele Elemente erhöhen die Rechenzeit unnötig. Es ist ausreichend, wenn die Elementanzahl den Wärmespeicher der Platte beschreibt. Hierzu kann sich von einigen wenigen Elementen iterativ dem Zustand genähert werden, bei dem der Randbereich der Platte annähernd die Ausgangstemperatur beibehält.

Des Weiteren ist das Berechnungsverfahren bei unpassender Parameterwahl von Δr und von Δt instabil und liefert keine Lösung. Nach GLÜCK (1990) arbeitet das Lösungsverfahren stabil, wenn die Temperaturleitfähigkeit $a \cdot \Delta t / \Delta r^2 \leq 0,5$ ist. Hier-

bei ist zu beachten, dass sich dieses Verhältnis eventuell mit der Temperatur verändert. Ein Ausreizen dieses Stabilitätskriteriums ist daher nicht zu empfehlen. Es sollte ein sicherer Abstand zum maximal möglichen Wert eingehalten werden. Die hier verwendeten Werte für Δr , Δt und n sind in Tabelle 16 zusammengefasst.

Parameter	Wert
örtliche Diskretisierungsschrittweite Δr	0,25 mm
zeitliche Diskretisierungsschrittweite Δt	0,5 ms
Anzahl der Elemente n	150

Tabelle 16: Für die Validierung der Berechnungsmethode der Hohlkammer-Schutzwände verwendete Modellparameter

5.6.3 Vergleich und Beurteilung

In den folgenden Diagrammen sind beispielhaft die Graphen des jeweiligen empirischen Modells mit dem Mittelwert, wie auch mit 99-prozentig sicherer Schutzzeit dargestellt. Es ist zu beachten, dass diese Regressionen durch Exponentialfunktionen vorgenommen werden. Regressionsbedingt nähern sich diese in der Mitte ihres Definitionsbereichs den realen Gegebenheiten am besten an. Außerhalb dieses Bereichs ist die Aussagekraft der empirischen Modelle eingeschränkt. Die Graphen der Schutzzeitberechnung sind mittels des in Abschnitt 5.4 (S. 90) dargestellten Berechnungsverfahrens den zugehörigen in Abschnitt 5.6.2 (S. 105) aufgezeigten Eingangsparametern gegenübergestellt. In Tabelle 17 sind die Diagramme für die Einzelplattenschutzwände in unterschiedlichen Bestrahlungsabständen und in Tabelle 18 die der Hohlkammer-Schutzwände mit einer Variation der Hohlkammerbreite aufgezeigt.

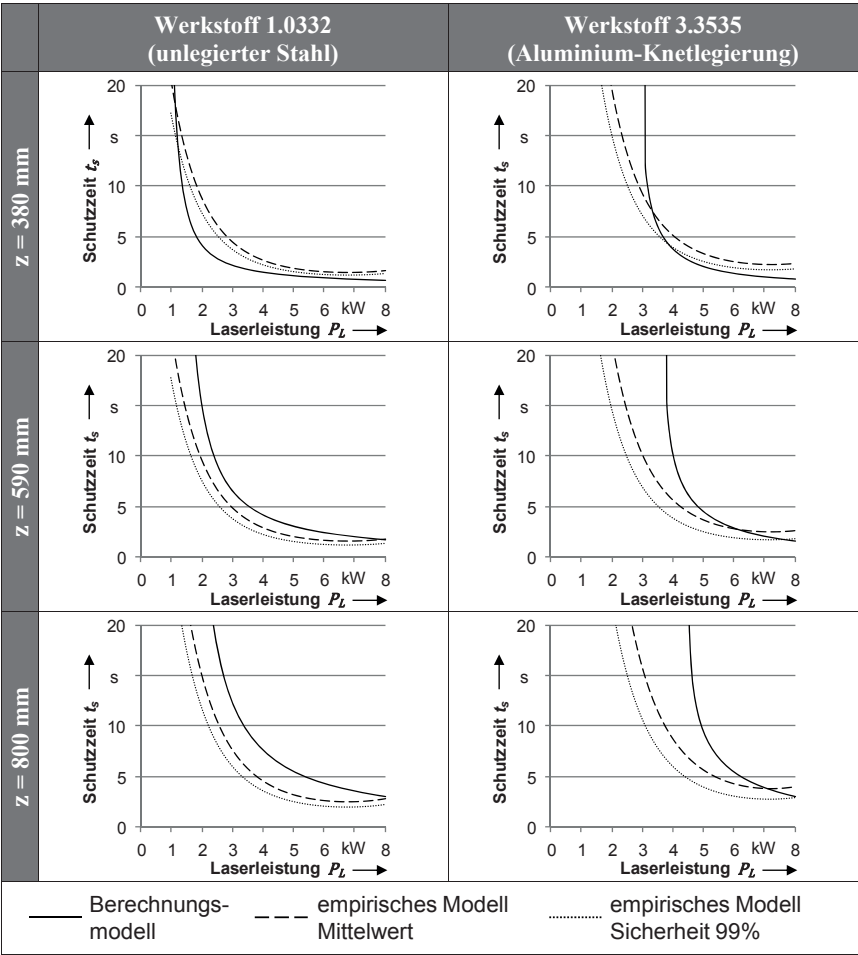


Tabelle 17: Übersicht über Schutzzeitdiagramme der Einzelplatten-Schutzwände; Plattendicke $d = 1,5 \text{ mm}$; Variation des Abstands z ; Parameter nach Abschnitt 5.6.2.2 bis 5.6.2.5

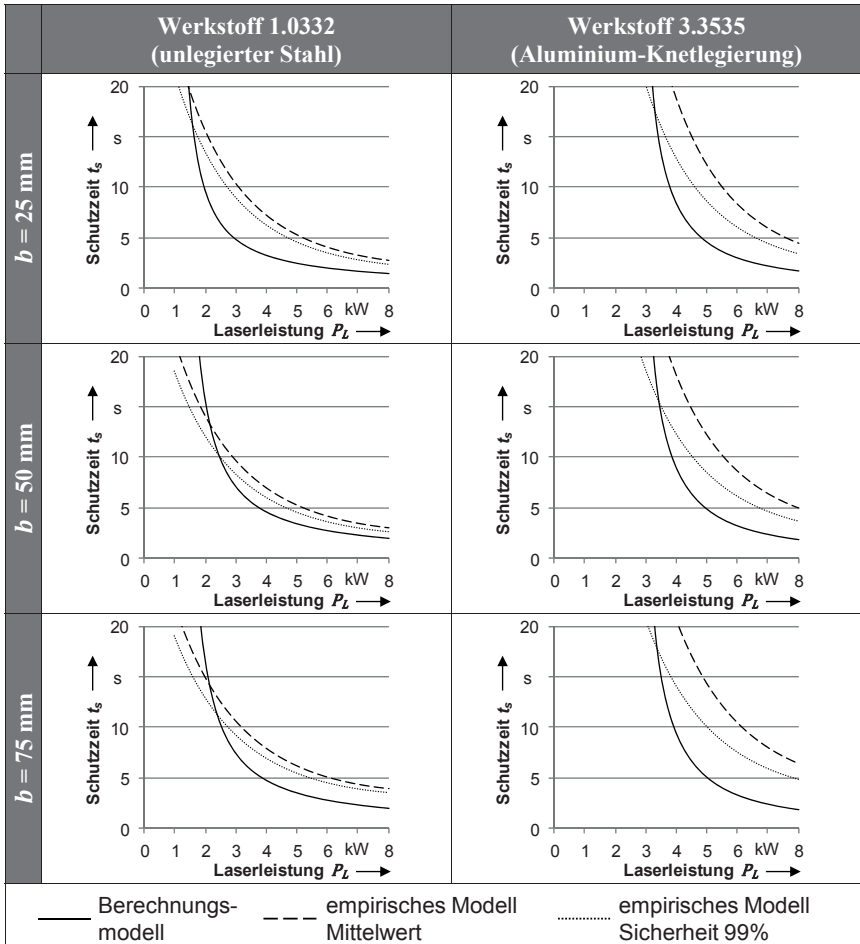


Tabelle 18: Übersicht über Schutzzeitdiagramme der Zweiplatten-Schutzwände; Plattendicke $d = 1,5 \text{ mm}$; Variation der Kammerbreite b ; $z = 380 \text{ mm}$; Parameter nach Abschnitt 5.6.2.2 bis 5.6.2.5

Im Vergleich der beiden Werkstoffe kann hinsichtlich des Werkstoffs 1.0332 (unlegierter Stahl) eine genauere Berechnung erfolgen, was aufgrund der im Temperaturverlauf geringer variierenden Parameter vermutet wird. Mit steigendem Abstand vom Fokuspunkt sinkt generell die Vorhersagegenauigkeit. Dies ist der Abweichung der in der Berechnung angenommenen Gauß'schen Strahlpropagation im Vergleich zur realen Propagation geschuldet. Anhand der Diagramme lässt sich

trotzdessen eine gute Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse mit den Real-experimenten erkennen. Besonders für Schutzwandpositionen nahe am Fokuspunkt, wie sie bei Remote-Laseranlagen leicht vorkommen können, ist das Berechnungsmodell daher gut geeignet.

5.7 Betrachtung anderer Strahlformen

Lasersysteme unterscheiden sich u. a. durch ihre Strahlform. Neben den in der Industrie bereits weit verbreiteten Multi-Mode-Laserstrahlungsquellen mit ihren typischen Top-Hat-Profilen finden auch Single-Mode-Quellen mit Gauß'schen Strahlprofilen mit hohen Laserleistungen Einzug in die Produktion. Durch optische Phänomene, wie beispielsweise Beugung, können diese Strahlprofile verändert werden. Im Folgenden werden Ergebnisse der Schutzzeitberechnung einer Hohlkammerwand aus dem Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl) mit verschiedenen Ausprägungen dieser Profile dargestellt. Der Laserstrahl-Brennfleckdurchmesser auf der Schutzwand nach dem 86%-Kriterium ist hierbei konstant. Alle anderen in die Berechnung eingehenden Parameter entsprechen denen, wie sie bereits für die Diagramme in Tabelle 17 und Tabelle 18 verwendet wurden. Die Schutzwand hatte eine Hohlkammer der Breite $b = 75$ mm und wurde mit einer Laserleistung von $P_L = 2$ kW im Abstand von $z = 380$ mm bestrahlt. Tabelle 19 zeigt für die erste wie auch für die zweite Platte jeweils das entsprechende Strahlungs-Intensitätsprofil bei Strahlungsbeginn und das Intensitätsprofil beim Strahlungsdurchbrand auf den Platten mit den zugehörigen Temperaturverläufen über dem Brennfleckradius. Die Spalte *Daten* weist die Durchbrandzeiten der Einzelplatten wie auch die Gesamtschutzzeit aus. Bei der Variation der eingehenden Intensitätsprofile zeigen die Temperaturprofile unterschiedliche Ausprägungen. Je intensiver und konzentrierter die Strahlung in der Brennfleckmitte ist, wie beim Gauß'schen Strahlprofil, desto weniger kann die eingebrachte Energie durch Wärmeleitung in das umgebende Material abgeführt werden. Die Metallplatte versagt deshalb dort am schnellsten. Alle anderen in Tabelle 19 dargestellten Profile, vom Gauß'schen Strahlprofil mit Ring, über Top-Hat, bis zum Ring, bringen ihre Strahlungsintensität immer weiter entfernt vom Mittelpunkt ein. Die Platten bleiben länger intakt und die Schutzwirkung ist für längere Zeit gegeben. Es kann der qualitative Zusammenhang festgehalten werden, dass die Schutzzeit umso höher ist, je weiter entfernt vom Brennfleckmittelpunkt der hauptsächliche Anteil der Strahlungsintensität eingebracht wird. Aus diesem Grund muss eine Strahlverschlechterung in ihrer Auswirkung auf die Sicherheit nicht explizit betrachtet werden.

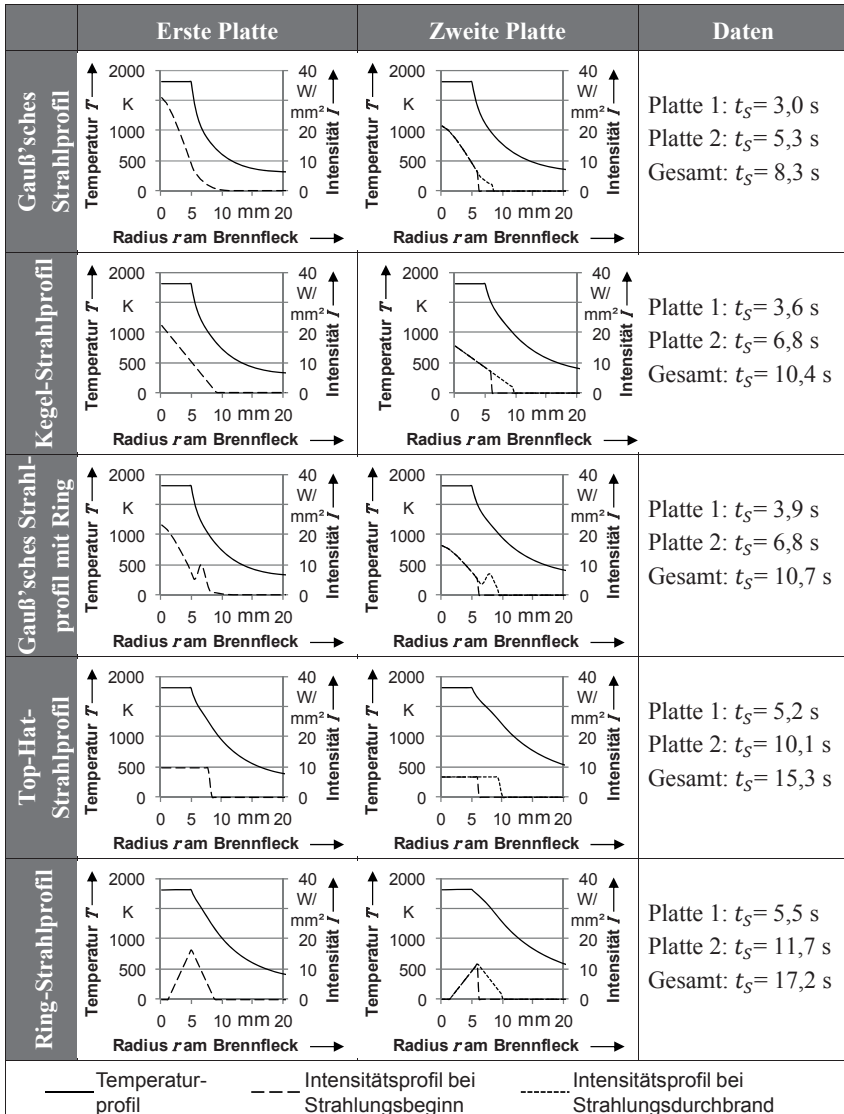


Tabelle 19: Einfluss des Intensitätsverlaufs auf die Schutzzeiten einer Hohlkammer-Schutzwand; Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl); $b = 75$ mm, $P_L = 2$ kW, $z = 380$ mm; andere Parameter wie vorher (siehe Abschnitte 5.6.2.2 bis 5.6.2.5)

5.8 Fazit

Für jedes bisher bekannte und auch in dieser Arbeit adressierte aktive Lasersicherheitskonzept sind passive Schutzwände essentiell. Sie stellen den Schutz in einem Fehlerfall während der Reaktionszeit der aktiven Sensoren sicher und halten auch sonstige beim Normalbetrieb auftretende Gefährdungen als trennende Schutzeinrichtung von den sich außerhalb aufhaltenden Personen ab. Mit dem gezeigten Ansatz können metallische Einzelplatten- und Hohlkammer-Schutzwände mit Hilfe von herkömmlichen Rechnern und Tabellenkalkulationen iterativ gezielt auf permanente und auch auf temporäre Lasten ausgelegt werden. Die Schutzzeiten von Stahl-Schutzwänden lassen sich mit hoher Genauigkeit berechnen. Bei Aluminium-Schutzwänden sind größere Abweichungen der berechneten Schutzzeiten gegenüber den Schutzzeiten aus den Versuchen gegeben. Ein Hauptgrund hierfür wird in der stark von Einflüssen wie beispielsweise der Oberflächenverschmutzung geprägten Absorption vermutet. Deshalb ist bei der Anwendung des Berechnungsverfahrens auf die Datenakquisition ein besonderes Augenmerk zu legen, denn nur genaue und belastbare Eingangsdaten sichern ein ebenso belastbares Ergebnis. Im Kontext dieser Arbeit werden Anlagen mit hohen Laserleistungen und großen Arbeitsabständen adressiert. Die Schutzwände werden somit im Fehlerfall nahe am Fokuspunkt bei hohen Intensitäten bestrahlt. Gerade in diesem Bereich ist eine ausreichend hohe Übereinstimmung der Berechnungsergebnisse und der Realwerte, ausgedrückt durch das empirische Modell (siehe Tabelle 17 und Tabelle 18, niedrige z -Werte und hohe P_L -Werte), gegeben.

Durch weitere Simulationsexperimente mit dem aufgezeigten Berechnungsverfahren konnte gezeigt werden, dass ein Laserstrahl eine Schutzwand umso stärker und schneller schädigt, je ähnlicher einer Gauß'schen Verteilung sich seine Strahlungsintensität auf der Schutzwandoberfläche ausbildet (vgl. Abschnitt 5.7). Eine Verschärfung des Fehler- und Versagensfalls durch eine zufällige Verschlechterung des Strahls ist somit nicht zu befürchten.

6 Zentrales aktives Sensorkonzept

6.1 Zweck

Wie in Kapitel 3 dargestellt, ist eines der Betrachtungsfelder ein zentrales, d. h. nicht schutzwandgebundenes, aktives Sensorkonzept zur Erkennung einer fehlerhaften geradlinigen Strahlpropagation. Dieses wird im Folgenden hergeleitet und die prinzipielle Eignung anhand eines Funktionsprototyps dargestellt. Für einen späteren kommerziellen Einsatz wird ein Ausführungsvorschlag mit Empfehlungen zur sicherheitsgerichteten Umsetzung gegeben. Erste Überlegungen hierzu wurden bereits von ZÄH ET AL. (2009B) und von ZÄH & BRAUNREUTHER (2010B) aufgezeigt.

6.2 Funktionsprinzip

Laserstrahlung kann nur im Ort ihres Auftreffens mit Materie wechselwirken. Solange sie am gewünschten Wirkungsort ihre Energie einbringt, ist die Funktion der Anlage korrekt. Im Umkehrschluss kann die Information über einen möglichen Fehlerfall somit aus einer *Ortsüberprüfung* des Brennflecks durch einen Sensor gewonnen werden. Entspricht die *Brennfleck-Ist-Koordinate* bei emittierender Laserstrahlung der *Brennfleck-Soll-Koordinate* und befindet sich diese wiederum in einem erlaubten *Arbeitsraum* (*logische Überprüfung*), so liegt kein Fehlerfall vor (vgl. Abbildung 57). Trifft eine dieser beiden Fallabfragen und die damit zusammenhängende logische *Folgerung* nicht zu, so muss unverzüglich der Not-Halt eingeleitet werden.

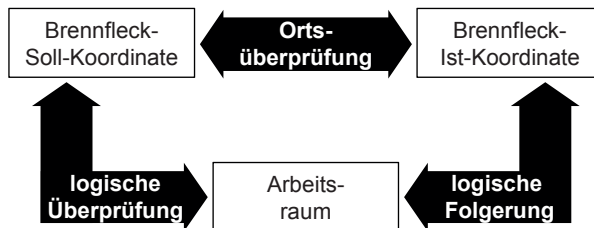


Abbildung 57: Grundgedanke der Überwachung der geradlinigen Strahlpropagation mittels des zentralen aktiven Sensors

Bei diesem Sensorkonzept ist lediglich der Laserstatus als sicheres Eingangssignal in die entsprechende Sicherheitsfunktion vorauszusetzen. Heutige Strahlquellen geben dieses Signal nicht sicher aus, jedoch könnte dies seitens der Strahlquellenhersteller durch eine redundante Ausgabe mit Signalvergleich aufwandsarm realisiert werden. Alle anderen Signale, wie beispielsweise die Ist-Koordinate und die Soll-Koordinate, sind zur Laufzeit nicht sicherheitskritisch, denn solange in diesen Signalen keine zwei sich gegenseitig kompensierenden Fehler gleichzeitig auftreten, führen deren Fehlen lediglich zum Verlust der Anlagenverfügbarkeit. Die Anlage würde dann stillgesetzt werden, obwohl die Sicherheit nicht beeinträchtigt wäre. Das System ist somit einfehlersicher.

6.3 Soll-Ist-Überprüfung

6.3.1 Sensorprinzip

Das Auftreffen eines Materialbearbeitungs-Laserstrahls hoher Intensität auf eine Werkstückoberfläche ist typischerweise durch sehr helles Leuchten an der bestrahlten Stelle gekennzeichnet. Die Folge der Bestrahlung an der Brennfleckposition, die nicht gleich der Fokusposition sein muss, ist die Prozessstrahlung. Sie ist ein optisches Signal. Zu dessen Empfang kommen nur optische Sensorprinzipien infrage. Optische Sensoren geben, je nach Konfiguration, angefangen bei Photodioden, über Zeilendetektoren und Zeilenkameras bis hin zu Matrix-Anordnungen wie Matrix-Kameras, Bilder als Einzelpixel, Pixellinien oder Pixel-Matrizen aus. Darum werden diese hier im Weiteren *bildgebende Sensoren* genannt. Nach HARTLEY & ZISSERMAN (2008) können auf Basis von bildgebenden Sensoren Ortsbestimmungen durch Triangulation und Epipolargeometrie durchgeführt werden, was im Folgenden in der Anwendung auf den zu überwachenden Brennfleck beschrieben wird.

Vor allem durch die modernen und hochgradig redundanten Führungskinematiken, wie beispielsweise Knickarmroboter und 3D-Spiegeloptiken, kann es leicht zu Abschattungen des Brennflecks durch die Systemtechnik selbst kommen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, die Überwachung mehrstufig aufzubauen. Im Folgenden wird deshalb die Überwachung der Brennfleckposition relativ zur Optik sowie der Optik relativ zu einem ortsfesten Koordinatensystem beschrieben (siehe Abbildung 58). Der Sensor kann dann, wenn er sich nahe an der Laserstrahlachse befindet, den ohnehin freien optischen Zugang zum Brennfleck nutzen.

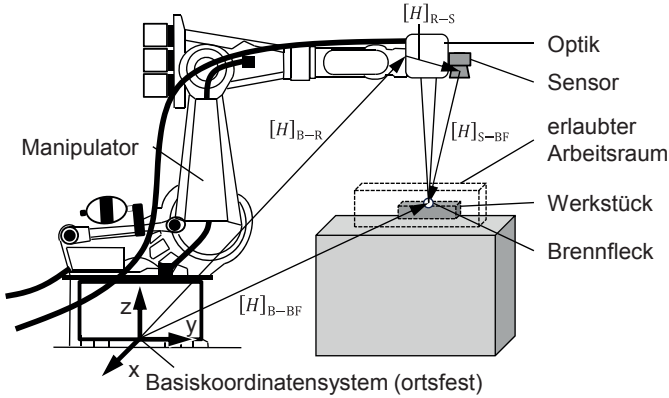


Abbildung 58: Übersichtsbild zur mehrstufigen Brennfleck-Überwachung mit einem bildgebenden Sensor nahe an der Laserstrahlachse

Örtliche Beziehungen im Raum können mit einer Translation und einer Rotation beschrieben werden. Eine gängige Notation hierfür ist eine Transformationsmatrix. Wie in Abbildung 58 eingezeichnet, wird die Beziehung vom ortsfesten Basiskoordinatensystem zum Roboterflansch mit $[H]_{B-R}$, vom Roboterflansch zum Sensor mit $[H]_{R-S}$ und vom Sensor zum Brennfleck mit $[H]_{S-BF}$ beschrieben. $[H]_{R-S}$ ist bei einem gegebenen festen mechanischen Aufbau konstant, da sich die Translation und die Rotation des Sensors gegenüber dem Roboterflansch nicht ändern können. Mit diesen drei Beziehungen können die Brennfleck-Koordinaten im Basiskoordinatensystem angegeben werden:

$$[H]_{B-BF} = [H]_{B-R} \cdot [H]_{R-S} \cdot [H]_{S-BF} \quad (69)$$

Zur Verifizierung der räumlichen Beziehung $[H]_{S-BF}$ wurde ein auf einer Bildverarbeitung basierendes Überwachungssystem verwendet. Auf die Überwachung der Führungskinetik ($[H]_{B-R}$) wird im weiteren Verlauf (siehe Abschnitt 6.3.5) eingegangen. Werden die beiden Beziehungen $[H]_{S-BF}$ und $[H]_{B-R}$ als korrekt befunden, ist die Beziehung $[H]_{B-BF}$ ebenso richtig. Mit $[H]_{B-BF}$ kann die Arbeitsraumüberprüfung durchgeführt werden.

Die sinnvolle Konfiguration des bildgebenden Sensors hängt maßgeblich von den Freiheitsgraden des zu lokalisierenden Brennflecks gegenüber dem Koordinatensystem der Laserstrahloptik ab. Einfache Optiken mit einer konstanten Brennweite besitzen keinen, Optiken mit einem veränderlichen Arbeitsabstand hingegen einen

Freiheitsgrad. Spiegeloptiken sind in der Lage, den Laserstrahl beliebig auf einer Fläche oder sogar in einem Volumen zu fokussieren. Der Sensor muss dabei mindestens so viele Freiheitsgrade abdecken können, wie die Laserstrahloptik besitzt. Für eine Festoptik würde somit bereits ein aus einem Pixel bestehender bildgebender Sensor, beispielsweise eine auf einen Punkt fokussierte Fotodiode oder ein fokussiertes Faserende mit nachgeschalteter elektro-optischer Erkennung, genügen (vgl. Abbildung 59). Es empfiehlt sich allerdings aus Gründen der Ausrichtung auf den Laserstrahl-Fokuspunkt, einen Sensor mit mehr Freiheitsgraden einzusetzen. Eine Zeilenkamera kann hierbei einen, eine Matrixkamera zwei Freiheitsgrade abdecken.

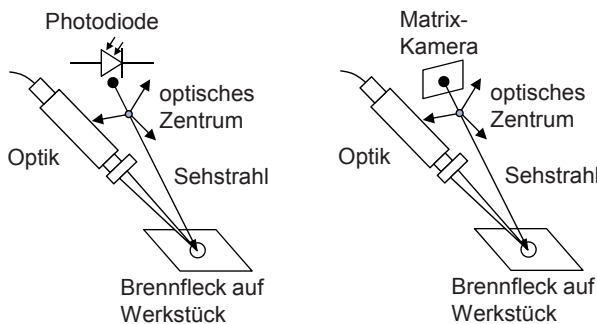


Abbildung 59: Schema der Ortsüberprüfung mittels Triangulation bei einer Laserstrahloptik mit fester Brennweite mittels Photodiode (links) und Matrixkamera (rechts)

Ab einem 3D-fähigen Scanner werden zwei Matrixkameras benötigt. Zur eindeutigen Lokalisierung des Brennflecks im Raum müssen sie hierzu Bilder vom Prozessleuchten aus zwei unterschiedlichen Richtungen aufnehmen. Mit der Kenntnis der Orientierung der Matrix-Kameras zueinander, bestimmbar durch eine Kalibrierung, werden in einer Stereorekonstruktion durch eine Projektion die Abbilder des Brennflecks durch die optischen Zentren der Kameraobjektive auf den Kamerachips ermittelt. In der Disziplin der industriellen Bildverarbeitung werden Geraden, welche die Projektion eines Punkts im Raum durch ein optisches Zentrum beschreiben, als *Sehstrahlen* bezeichnet. Ihre räumlichen Schnittpunktkoordinaten sind hier gleich den Koordinaten der Mitte des Brennflecks (vgl. Abbildung 60).

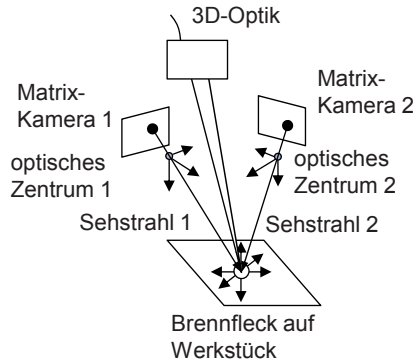


















Abbildung 60: Schema der Stereo-Rekonstruktion durch Epipolargeometrie bei einer 3D-Laserstrahl-optik

In Abbildung 61 werden die erwähnten Grundtypen von Sensorkonzepten den verschiedenen Optik-Grundtypen, bezogen auf die jeweiligen Freiheitsgrade des Brennflecks, in Form einer Tabelle gegenübergestellt. Die Tabelleneinträge kennzeichnen die Eignung der jeweiligen Sensortypen in Bezug auf den Optiktyp über den Vergleich der jeweiligen Freiheitsgrade. Wird ein Sensortyp darin als *bedingt geeignet* bezeichnet, so erfüllt er die Mindestanforderung der Gleichheit der Anzahl der Freiheitsgrade der Brennfleckpositionierung mit denen des Sensortyps. Es ist allerdings bei diesen Ausführungen aufgrund einer geringen Flexibilität mit einem erhöhten Inbetriebnahmeaufwand zu rechnen. In der Praxis gut einsetzbare und beherrschbare Systeme sind in dieser Hinsicht als *geeignete* Sensortypen anzusehen. Bei Stereo-Rekonstruktions-Sensoren wie Stereo-Kamerasystemen kann es zur *Übererfüllung* der Anforderung kommen. Sie bringen im Vergleich zu rein geeigneten Sensortypen keinen zusätzlichen Nutzen.

Brennfleck- projektion	Optik- Grundtyp	Fest- optik	Zoom- optik	2D- Scanner	3D- Scanner
	Freiheits- grade	0	1	2	3
Sensor-Grundtyp/ Eignung	Gerichtete Diode				
	Zeilen- kamera				
	Matrix- kamera				
	Stereo- Kamerasystem				





 nicht geeignet
 bedingt geeignet
 geeignet
 übererfüllt

Abbildung 61: Übersicht über bildgebende Sensor-Grundtypen und ihrer Eignung zur Erkennung der Brennflecklage bei verschiedenen Optik-Grundtypen

6.3.2 Bildauswertung

Das Auffinden des Abbilds des Brennflecks in den Signalen des jeweiligen Sensors erfordert eine Auswertung des gesamten Bildinhalts. Je größer dieser auszuwertende Bereich ist, desto rechenaufwändiger ist diese Operation. Mit der Kenntnis der räumlichen Soll-Koordinate des Brennflecks lässt sich diese auf die jeweiligen Soll-Pixelkoordinaten in den Bildern zurückrechnen. Im Sinne einer reinen Kontrolle, ob die tatsächlichen Ist-Brennfleckkoordinaten gleich den Soll-Koordinaten sind, muss somit das Brennfleckabbild auf den jeweiligen Sensoren in den jeweils vorher berechenbaren Pixelkoordinaten oder zumindest in einem Koordinatenbereich um diese zu finden sein.

Die Möglichkeit der Eingrenzung auf diesen Koordinatenbereich lässt eine Auswahl des für die Überwachungsaufgabe interessanten Sensorsignals zu. Die zu den vorher berechneten Pixelkoordinaten korrelierende Information stellt lediglich einen Teil des Gesamtsignals dar. Die gerichtete Diode bildet hierbei eine Ausnahme, da ihr Signal nicht weiter unterteilt werden kann. Der relevante Teil des Signals mit den Informationen bezüglich des Brennfleckabbilds kann aufgrund dieser Betrachtung

aus dem Gesamtsignal herausgenommen werden. Da alle Sensor-Grundtypen bildgebend sind, wird für diesen Bereich der in der maschinellen Bildverarbeitung übliche Begriff der ROI (engl.: region of interest) verwendet. Um das Datenaufkommen im Überwachungssystem gering zu halten, ist es empfehlenswert, die Informationen außerhalb der ROI gar nicht erst zu erheben. Selektiv auslesbare bildgebende Sensoren sind deshalb zu bevorzugen. Aufgrund von Systemungenauigkeiten muss die ROI größer als der eigentliche Brennfleck angegeben werden. Die tatsächlich benötigte ROI-Breite und -Höhe ist jeweils für den konkreten Fall einzustellen. Weitere Randbedingungen sind durch die Sensorintegrationszeit und die folgende Datenverarbeitung gegeben. Die Integrationszeit kann nicht größer sein als der Kehrwert der Signalabtastrate. Durch die ohnehin wegen der extrem hellen Leuchterscheinung benötigten sehr kurzen Belichtungszeiten spielt diese Einschränkung nahezu keine Rolle. Zur Weiterverarbeitung der Daten werden diese nach jeder Aufnahme als Liste von Grauwerten ausgegeben. Hierzu werden sie in einem Speicher abgelegt und anschließend durch eine Grauwert-Schwellwert-Operation mit anschließender Zählung ausgewertet.

Der Schwellwert klassifiziert die Pixelzugehörigkeit innerhalb der ROI zum Brennfleck oder zum Hintergrund. Seine Wahl muss so getroffen werden, dass diese Klassifizierung möglichst trennscharf erfolgen kann. In der Praxis kann der Wert leicht mithilfe von Grauwert-Histogrammen einiger Testbilder bestimmt werden. Bei dieser Anwendung ergibt sich ein großer Bereich zwischen dem dunklen Hintergrund mit niedrigen und dem Brennfleckabbild mit hohen Pixel-Grauwerten. Sind schlussendlich ausreichend viele Pixel des Brennflecks gezählt, so gilt der Brennfleck als an der richtigen Position erkannt.

Abbildung 62 stellt den beschriebenen Algorithmus der Anwesenheitskontrolle des Brennfleckabbilds innerhalb der ROI schematisch dar. Es wird hier exemplarisch die ROI auf eine 3-mal-3-Matrix zentrisch um das Soll-Pixel eingegrenzt. In diesem Beispiel wird für den Hintergrund der Grauwert 0 und für das Brennfleckabbild 255 angenommen. Der in der Grauwertliste jeweilige ausgegebene und einem Pixel zuordenbare Wert ist das anteilmäßige Ergebnis der mit den Grauwerten gewichteten Flächenverhältnisse. Bei einem angenommenen Schwellwert von 40 ergibt sich hier eine Anzahl von 4 Pixeln, welche der zu detektierenden Region zuzuordnen sind. 4 ist in diesem Fall größer als die hier angenommene Mindestpixelzahl von 2. Der Brennfleck ist damit an der richtigen Position erkannt.

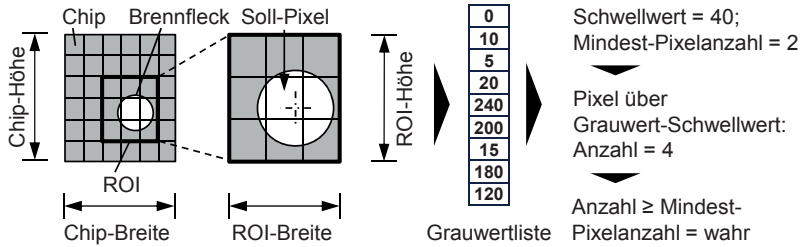


Abbildung 62: Beispielhafte Eingrenzung des Bildbereichs auf dem Kamerachip und Auswertung durch Grauwert-Schwellwert-Operation

6.3.3 Soll-Pixelkoordinaten

Auf Basis der Sollpositionen des Brennflecks im Raum X_{BF-S-K} können über die geometrischen Zusammenhänge die Pixel-Soll-Koordinaten X_{P-S-K} auf jedem Sensor bestimmt werden. Diese Berechnung erfolgt ausgehend von jedem räumlichen diskreten Punkt hin zu den Pixelkoordinaten auf dem Kamerachip. Unter Verwendung eines idealen Kameramodells (Lochkamera) wäre diese Berechnung rein durch die Verwendung von geometrischer Optik mit einer Abbildungsmatrix $[A]$ lösbar. $[A]$ kann durch eine sogenannte externe Kalibrierung bestimmt werden. Kameraobjektive unterliegen in der Realität jedoch einer Verzeichnung $[V]$. Sie bewirkt eine Verschiebung des durch $[A]$ abgebildeten Punkts auf dem Kamerachip. Verzeichnungen von optischen Abbildungseinheiten können beliebig komplex sein. Typischerweise ist die Verzeichnung von Kameralinsen radial, d. h. ein Punkt wird vom Verzeichnungszentrum je nach seinem Abstand r_v und einem Verzeichnungsfaktor χ vom Zentrum weg oder zu ihm hin verschoben. Eine radiale Verzeichnung ergibt, je nach Ausprägung, beispielsweise eine kissen- oder tonnenförmige Veränderung des Bilds. Die am häufigsten verwendete Art der Beschreibung dieser radialen Verzeichnung in der maschinellen Bildverarbeitung ist ein Ansatz zweiter Potenz. $[V]$ kann somit als eine 2×2 -Matrix mit ausschließlich den Einträgen $1 + \chi \cdot r_v^2$ auf der Hauptdiagonale beschrieben werden. Weitere Ausführungen zur Verzeichnung können beispielsweise bei HARTLEY & ZISSERMAN (2008) und bei STEGER ET AL. (2008) nachgelesen werden. Die Bestimmung der Verzeichnung $[V]$ erfolgt durch eine sogenannte interne Kamerakalibrierung. Bei der Berechnung der Soll-Pixelkoordinaten muss diese Verzeichnung mit ihrer Umkehrfunktion berücksichtigt werden (vgl. Gleichung (70)):

$$\underbrace{X_{P-S-K}}_{\text{Pixel-Soll-Koordinaten}} = \underbrace{[V]^{-1}}_{\text{Verzeichnungs-korrektur}} \cdot \underbrace{[A]}_{\text{Abbildungs-matrix}} \cdot \underbrace{X_{BF-S-K}}_{\text{Brennfleck-Soll-Koordinaten}} \quad (70)$$

Bei der Projektion jedes ermittelten Pixels, unter Berücksichtigung der Verzeichnung durch das optische Zentrum, ergibt sich eine sich öffnende Pyramide. Dies bedeutet: Alle räumlichen Punkte innerhalb ihres Volumens, auch wenn sie auf verschiedenen zum Chip parallelen Ebenen liegen, werden auf demselben Pixel abgebildet. Laseroptiken bis einschließlich des Freiheitsgrads *zwei* können den Brennfleck nicht beliebig im Pyramidenstumpf platzieren. Bei 3D-Optiken führt dies allerdings zur Problematik der geometrischen Mehrdeutigkeit (siehe Abbildung 63). Erst die weitere Blickrichtung der zweiten Kamera liefert die Lösung, da jeder Punkt der Pyramide von Kamera *eins* in einer anderen Pyramide für Kamera *zwei* liegt, solange sich die Punkte nicht auf einer Linie zwischen den optischen Zentren befinden (STEGE ET AL. 2008, HARTLEY & ZISSERMAN 2008). Eine solche Konstellation ist bei der Anwendung der Brennfleckbeobachtung aufgrund der dann auftretenden Hinterschneidungen aber auch nicht möglich.

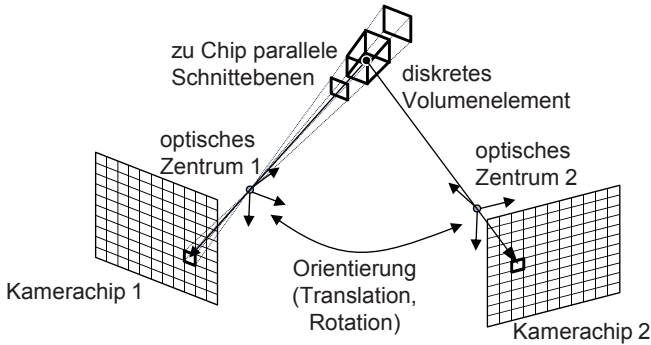


Abbildung 63: Diskretisierung des Raums für jede Kamera und Zuordnung von Pixelkoordinaten

Durch eine Diskretisierung des gemeinsamen Sichtbereichs beider Kameras ist eine Zuordnungstabelle von möglichen 3D-Soll-Koordinaten zu den entsprechenden Pixelkoordinaten für jede Kamera realisierbar. Diese Tabelle wird im Sicherheitssystem verwendet, um die entsprechenden ROIs zu setzen. Die Vorbereitung der Tabelle vor dem eigentlichen Einsatz reduziert den Berechnungsaufwand zur Laufzeit bzw. erhöht die Systemgeschwindigkeit. Je nach Größe und Bewegungsgeschwindigkeit des Brennflecks sowie der Übermittlungszeit der Pixel-Soll-Koordi-

naten muss die Größe der ROI im Sinne der Pixelanzahl horizontal und vertikal angepasst sein.

6.3.4 Flexibilität zur Laufzeit

Je nach der Art der Laseraufgabe und dem Zeitpunkt ihrer Entstehung können die in der Diskretisierung erstellten Zuordnungstabellen weiter vorverarbeitet werden. Ist die Laseraufgabe frühzeitig bekannt oder werden in Bezug auf die Laserstrahloptik immer die gleichen Strahlpositionierungsoperationen ausgeführt, beispielsweise mit einer Festoptik oder mit einer Spiegeloptik mit immer gleichen Brennfleckbahnen, so kann das Sicherheitssystem starr ausgelegt werden. In einer Datenvorverarbeitung, beispielsweise auf einem PC ausgeführt, können die Brennfleck-Soll-Positionen in ihrer zeitlichen Abfolge mit einem Zeitstempel versehen in der Zuordnungstabelle abgelegt werden. Zur Laufzeit muss dann lediglich der Brennfleck in dieser zeitlichen Abfolge an den Pixel-Soll-Koordinaten auf dem Sensor oder den Sensoren erkannt werden. Die Komplexität ist somit in die Datenvorverarbeitung, welche wiederum zeitunkritisch im Vorhinein erfolgen kann, verschoben.

Lasersysteme bestehen typischerweise aus komplexen mechatronischen Komponenten, welche auf Umgebungseinflüsse reagieren können. Beispielsweise erfassen sie über Temperatursensoren, Drucksensoren oder Schnittstellen zu anderen Komponenten Zustände und passen interne Parameter an. Sofern diese Auswirkungen die Laseraufgabe nicht betreffen, kann das Sicherheitssystem starr sein. Sind jedoch Einflüsse auf die zeitliche Abfolge der Brennfleck-Koordinaten möglich, beispielsweise durch Regelungs- oder Nachführsysteme innerhalb der Laseraufgabe oder durch manuelle Eingaben, so ist die Laseraufgabe erst zur Laufzeit vollständig bekannt. Das Sicherheitssystem muss dann adaptiv gestaltet sein. Der Logikabgleich von Brennfleck-Soll- und Pixel-Soll-Koordinaten muss während der Laufzeit vorgenommen werden. Die entsprechenden Daten sind dann aus der Zuordnungstabelle zu extrahieren. Für eine schnelle Abarbeitung dieser Aufgabe empfiehlt es sich, die 3D-Koordinaten in der Tabelle mit während der Laufzeit im System vorliegenden Parametern auszudrücken. Im Fall einer 3D-Spiegeloptik können dies beispielsweise die Spiegelstellungen und eventuell die Fokusslänge sein. Ein adaptiv ausgelegtes Überwachungssystem ist bei Einspeisung von immer gleichen Parametern ebenso starr verwendbar. Die Umkehrung davon gilt nicht (vgl. Abbildung 64).

Definition der Laseraufgabe	Program- mierung	Beeinflussung durch Sensorik	Beeinflussung durch Nutzereingaben
Kenntnis der Laseraufgabe	frühzeitig bekannt	erst zur Laufzeit bekannt	
Vorliegen der Soll-Pixel-Koordinaten	bei Daten- vorverar- beitung	während der Laufzeit	
Zeitpunkt des Logikabgleichs	Datenvor- verarbeitung möglich	Datenvorverarbeitung bedingt möglich	
Flexibilität des Systems	starr	starr; keine sicherheits- relevante Aufgaben	adaptiv

Abbildung 64: Möglichkeit der Datenvorverarbeitung und benötigte Flexibilität des Sicherheitssystems

6.3.5 Überwachung der Führungskinetik

Die Führungskinetik bewegt die Optik in Laseranlagen auf vorgegebenen Bahnen. Zu diskreten Zeitpunkten weist diese somit eine bestimmte Position und Orientierung auf (vgl. Beziehung $[H]_{B-R}$ in Abbildung 58, S. 117). Typische Vertreter von Führungskinetiken im industriellen Umfeld sind aus kinematischen Ketten aufgebaut (serielle Kinetik). Sie können beispielsweise mit Winkelgebern und mit Längenmesssystemen überwacht werden, die sichere Signale ausgeben. Hierbei ist darauf zu achten, dass der Performance-Level dieser Sensoren für die entsprechende Anwendung ausreicht (vgl. mit dem Risikograph, Abbildung 20, S. 28). Im Bereich der Industrieroboter ist diese Funktionalität von vielen Herstellern in deren Produkten erhältlich. Beispiele hierfür sind der Safe Robot (KUKA ROBOTER GMBH 2012) und SafeMove (ABB LTD. 2012).

Sollte diese Art der Überwachung nicht realisierbar sein, so kann das optische Überwachungsprinzip des Brennflecks im Optik-Koordinatensystem auch auf die die Optik führende Kinetik übertragen werden. Es ist hier ebenso der Abgleich zwischen der Soll- und der Ist-Position durchzuführen. Hierzu muss ein für die Kamerasysteme sichtbarer Marker benutzt werden. Dieser Marker muss eine eindeutige Positions- und Orientierungsidentifikation ermöglichen. Eine mögliche Ausführung ist beispielsweise eine definierte Anordnung von lichtemittierenden Dioden (LEDs) an der Laserstrahloptik. Ihre Leuchtstärke muss so stark sein, dass

sie nicht vom Prozessleuchten überblendet werden können. Die Sensoren für die Überwachung werden ortsfest im Raum montiert. Da es sich zumeist um 3D-Führungskinetiken handelt, sind Stereo-Kamerasysteme nötig (vgl. Abbildung 61, S. 120). Um dem Problem der system- und kinematikbedingten Hinterschneidungen gerecht zu werden, ist der Einsatz von mehr als zwei Sensoren zur Überwachung der Führungskinetik zu empfehlen. Solange mit zwei von ihnen die Marker detektiert werden können, ist das Sicherheitssystem arbeitsfähig.

6.3.6 Auswertelogik

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gestaltete Auswertelogik ist das zentrale Element des Sicherheitssystems. Sie steht in dauerhafter Kommunikation mit dem Sicherheitssensor und mit den Peripheriekomponenten der Laserstrahlanlage. In einem zyklischen Arbeitsablauf liest sie die jeweiligen Soll-Koordinaten des zu überwachenden Objekts ein. Dies kann je nach Gestaltung des Gesamtüberwachungssystems nur der Brennfleck oder auch der Brennfleck und der Marker auf der Führungskinetik bzw. die Endeffektorstellung der Führungskinetik sein. Aufgrund der Soll-Transformationen $[H]_{S-BF}$ und $[H]_{B-R}$ werden in den vorberechneten Zuordnungstabellen Pixel-Soll-Koordinaten ermittelt. Um diese herum werden die ROIs gesetzt. Von jedem zu überwachenden Objekt wird ein Bild aufgenommen und der jeweilige Inhalt der betreffenden ROI wird in den Speicher der Logikeinheit übertragen. Auf Basis dieser Daten erfolgen die Bildauswertung und der Vergleich der Brennfleck-Ist-Koordinaten mit den Brennfleck-Soll-Koordinaten und eventuell die Überwachung der Führungskinetik. Mit den nun vorliegenden Transformationsmatrizen $[H]_{S-BF}$, $[H]_{R-S}$ und $[H]_{B-R}$ wird mittels Logik überprüft, ob sich der Brennfleck innerhalb des Arbeitsraums befindet. In Abbildung 65 ist dieser beschriebene Arbeitszyklus der Logikeinheit verdeutlicht.

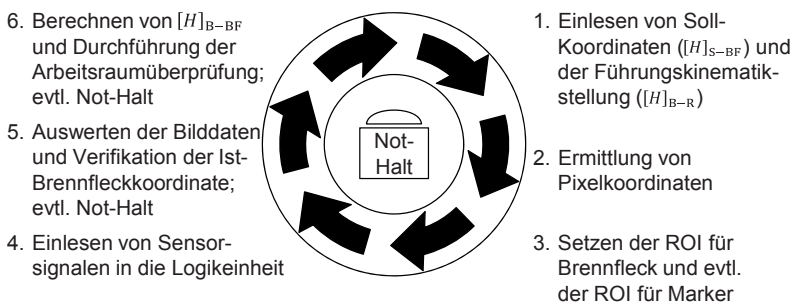


Abbildung 65: Arbeitszyklus der Auswertelogik in sechs Prozedurschritten

6.3.7 Kalibrierung

Für den Einsatz von Kameras als Sensoren, so wie sie in dem hier betrachteten Sicherheitskonzept verwendet werden, müssen diese intern und extern kalibriert werden (STEGE ET AL. 2008).

Bei einer *internen Kamerakalibrierung* werden die internen Parameter einer Kamera mitsamt dem Objektiv bestimmt, die für die Zuordnung von Punkten im 3D-Raum zu Pixeln auf dem Kamerachip benötigt werden. Die wichtigsten Daten sind dabei die genauen Brennweite und der radiale Verzeichnungsfaktor des Objektivs. Zur Durchführung der internen Kalibrierung werden einige Bilder eines vorher definierten Kalibrierkörpers mit der entsprechenden Kamera eingezogen. Mit Hilfe dieser Bilder können, beispielsweise mittels kommerziell verfügbarer Softwarebibliotheken (vgl. MVTEC SOFTWARE GMBH 2011), Parametersätze für jede im Sicherheitssystem befindliche Kamera bestimmt werden.

Mittels einer *externen Kamerakalibrierung* werden die Translation und die Orientierungen der Kamera in einem 3D-Koordinatensystem bestimmt. Hierfür ist das Werkzeug-Koordinatensystem der Führungskinematik von Bedeutung, da die jeweilige Kamera von dieser mit bewegt wird. Das hier angewendete Kalibrierverfahren wird in der maschinellen Bildverarbeitung *Hand-Auge-Kalibrierung mit bewegter Kamera* genannt (STROBL & HIRZINGER 2006). Durch diese Technik kann die Transformation $[H]_{R-S}$ und damit die in Formel (70) benötigte Abbildungsmatrix erstellt werden.

6.4 Funktionsprototyp und Funktionsnachweis des Sensorkonzepts

Zum Nachweis der prinzipiellen Eignung des Sensorkonzepts mittels Bildverarbeitungssystemen zur Soll-Ist-Überprüfung der Position eines Laserschweiß-Brennflecks wurde der bereits in den Kapiteln 4 und 5 vorgestellte Versuchsaufbau der Knickarmroboter-geführten Remote-Optik mit fester Brennweite und mit dem Multimode-Faserlaser gewählt. Als Überwachungssensor ist nach Abbildung 61 (S. 120) eine Matrix-Kamera geeignet.

Das selektive Auslesen bestimmter ROIs ist mit CMOS-Kameras möglich. Sie bieten des Weiteren bei eingeschränktem Bildbereich eine der Bildflächenreduktion reziproke Zunahme der Bildrate. Es kam daher im Rahmen dieser Arbeit eine monochrome CMOS-Maschinenkamera vom Typ Photonfocus® MV-D1024E zum

Einsatz. Um das Abbild des ungefähr $600\text{ }\mu\text{m}$ großen und $0,5\text{ m}$ von der Kamera entfernten Brennflecks auf dem Bauteil zu detektieren, wurde ein 8-mm-Objektiv mit zwei in Reihe geschalteten Graufiltern mit einer Neutraldichte von $\text{ND} = 3$ und von $\text{ND} = 1,8$ verwendet. Sie dunkeln das Prozessleuchten um den Faktor $10^{(3+1,8)} \approx 63000$ ab. Ein Schutzglas schützte die Filter vor Metallschmelzespritzer. Mit einer Belichtungszeit von $0,5\text{ ms}$ und einer Blendenstellung von 12 wurden hiermit verwertbare Bilder erzielt. Die aufgenommene ROI wurde mit einer Ausdehnung von 20 Pixeln quadratisch um das Zentrumspixel auf eine Kantenlänge von 41 Pixel begrenzt. In Abbildung 66 sind Beispiele dieser Aufnahmen bei verschiedenen Laserleistungen dargestellt. In allen Bildern ist der Brennfleck als sehr helle Region und über die verschiedenen Laserleistungen hinweg mit annähernd konstanter Fläche zu erkennen.

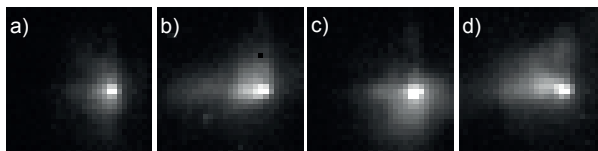


Abbildung 66: Beispielaufnahmen eines Brennflecks im Fokus mit $\lambda = 1070\text{ nm}$ und $d_0 = 596\text{ }\mu\text{m}$ auf dem Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl) mit einer CMOS-Kamera bei
a) $P_L = 2\text{ kW}$; b) $P_L = 4\text{ kW}$; c) $P_L = 6\text{ kW}$; d) $P_L = 8\text{ kW}$

Der Schwellwert für die Bestimmung der Mindest-Pixelanzahl der Brennfleckregion wurde aus Testbildern bestimmt. Hierzu wurde für jede Laserleistungsstufe der in Abbildung 66 genannten Beispiele eine Serie von 50 Bildern in ebenso viele Grauerthistogramme überführt und gemittelt. Durch eine Integration dieser gemittelten Histogramme wurden vier kumulierte gemittelte Häufigkeitsverteilungen zu den angegebenen Laserleistungsverteilungen erhalten (siehe Abbildung 67). Mit ihrer Hilfe kann eine Aussage darüber getroffen werden, wie viele Pixel unter oder über einem bestimmten Grauwert sind.

Aus der kumulierten gemittelten Häufigkeitsverteilung (siehe Abbildung 67 links) kann entnommen werden, dass fast ungeachtet der Laserleistung bis zu einem Grauwert von ungefähr 50 nahezu die ganze Bildfläche zur dunklen Region, also zum Hintergrund, zählt. Die kumulierte Pixelanzahl ändert sich unabhängig von der Laserleistung nicht mehr signifikant. Der Pixelanzahlsprung, welcher durch den Brennfleck erzielt wird, liegt im hohen Grauwertbereich (größer als 250, siehe

Abbildung 67 rechts). Aus diesem Grund kann der Grauwert-Schwellwert zur Erkennung des Brennflecks zwischen 50 und 250 gewählt werden. Für diese Anwendung wurde er auf 75 festgelegt.

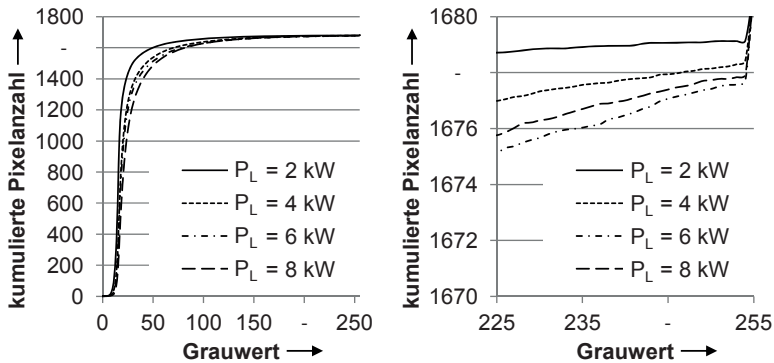


Abbildung 67: Kumulierte gemittelte Häufigkeitsverteilungen von Brennfleckabbildern innerhalb der ROI bei verschiedenen Laserleistungen zu dem aufgezeigten Beispiel; gesamter Grauwertbereich links; Detaildarstellung des Grauwertbereichs des Brennflecks (helle Pixel) rechts

Im prototypischen Versuchsaufbau des Sicherheitssystems wurde die o. a. MV-D1024E-CMOS-Kamera mit 500 Bilder pro Sekunde betrieben. Die Bilder wurden über eine CameraLink[®]-Verbindung an einen PC übertragen und mittels des oben erläuterten Grauwert-Schwellwerts auf die Sichtbarkeit des Brennflecks hin untersucht. Der PC erhielt zudem über einen Analog-USB-Koppler das Laser-Ein-Signal, führte den logischen Vergleich durch, ob der Brennfleck bei emittierender Laserstrahlquelle sichtbar ist, und gab dieses Signal über denselben Koppler als Analogsignal wieder aus. Dieses Signal war über ein zusätzliches Reed-Relais in den Not-Aus-Kreis eingebunden, über den die Anlage in hier nachgestellten Fehlerfällen stillgesetzt wurde.

Mit dem Versuchsaufbau (siehe Abbildung 68) wurden auf einem 2 cm dicken, senkrecht stehenden Bauteil Schweißnähte mit Laserleistungen von 2 kW bis 8 kW und Verfahrgeschwindigkeiten von 3 m/min bis 5 m/min durchgeführt. Um Rückreflexe in Richtung der Optik zu vermeiden, wurde diese um 10° nach unten gekippt. Solange sich der Laserspot auf dem Werkstück und damit im Arbeitsraum befand, erlaubte dieser Funktionsprototyp des Sicherheitssystems die Lasermaterialbearbei-

tung. In diesem Betriebsmodus arbeitete das System robust. Es kam während der Versuche zu keinen fehlerhaften Abschaltungen und somit zu keiner Verringerung der Anlagenverfügbarkeit. Als Fehlerfall wurde bei allen Leistungs- und Geschwindigkeitspaarungen die Laserbestrahlung über die Bauteilgrenzen hinaus durchgeführt. Es kam in diesem Fall zu einer unerlaubten Bestrahlung innerhalb der Laserzelle. Sind in einem solchen Fall keine anderen Peripheriekomponenten mehr im Strahlengang, so wird unweigerlich die Schutzhäuserung bestrahlt. Um dies zu visualisieren, wurde in einem Abstand von 0,5 m hinter der Bearbeitungsstelle, aber im Strahlengang des im Test fehlgeleiteten Strahls, ein Luftballon platziert. Bei inaktivem Sicherheitssystem wurde der Ballon erwartungsgemäß jedes Mal zerstört. Das aktive System erkannte den Brennfleck beim Überfahren der Bauteilkante nicht mehr und ordnete dies einem Fehlerfall zu. Über den Not-Halt schaltete es die Strahlungsemission ab. Durch die kurze Reaktionszeit und das etwa 3 ms andauernde Schleifen des Strahls an der Bauteiloberseite aufgrund der 10°-Optikneigung blieb der fehlgeleitete Strahlungsanteil derart gering, dass der Luftballon nicht beschädigt wurde.

Bereits mit diesem Funktionsprototyp konnten die Kernanforderungen an das neuartige Sicherheitsprinzip erfüllt werden. Dies sind hier die Unabhängigkeit von Hinterschneidungen durch die nahe am Strahl positionierte Kamera, die Reduktion der Sensoren im Sicherheitssystem auf die Anzahl *eins* und die hohe Abtastrate des Brennfleckabbilds. Das Funktionsprinzip dieses Aufbaus kann daher für die Soll-Ist-Überprüfung des Brennflecks bei Remote-Laserbearbeitungsanlagen als geeignet angesehen werden.

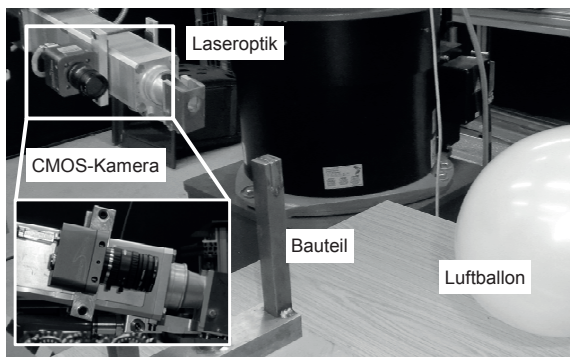


Abbildung 68: Sensorkonzept-Funktionsprototyp der Brennflecküberwachung vor nachgestelltem Fehlerfall

6.5 Sicherheitsgerichtete Auslegung

6.5.1 Allgemeines

Mithilfe der in diesem Kapitel aufgezeigten Methoden kann das zentrale aktive Überwachungs- und Sensorkonzept nach den aktuellen Anforderungen in Bezug auf die Sicherheitstechnik (vgl. Abschnitte 2.4, S. 22 bis 2.6, S. 29) auf einen bestimmten Anwendungsfall übertragen werden. In der Sicherheitstechnik können jedoch nicht mehr die im Funktionsprototyp eingesetzten PC-tauglichen Komponenten verwendet werden. Vielmehr sind hier betriebsbewährte Bauteile, wie sie beispielsweise in großen Stückzahlen und in sicherheitskritischen Anwendungen bereits im Automobilbau ihren Einsatz finden, zu bevorzugen. Diese Bauteile sind bereits hinsichtlich Sicherheitsaspekten getestet und zertifiziert.

Die Betrachtung des Einsensor-Systems aus dem vorigen Abschnitt wird in der folgenden Betrachtung auf das Zweikamera-System erweitert. Mit dieser Maximalausbaustufe können dann auch 3D-Optiken überwacht werden. Nach den aktuellen Sicherheitsstandards muss das Konzept bei der konkreten Umsetzung von dem Konstrukteur oder der Konstrukteurin mit weiteren Sicherheitsmaßnahmen verbessert werden. Eine geeignete Methodik hierfür ist beispielsweise die Fehlermöglichkeits- und -influssanalyse (FMEA). Dabei handelt es sich um eine analytische Methode, mit der Schwachstellen innerhalb eines Systems aufgedeckt werden können. Die Methodik der FMEA kann für sämtliche Phasen des Produktlebenszyklus angewandt werden. In der hier durchgeführten Analyse erfolgte eine Beschränkung auf eine System-FMEA, welche das Zusammenwirken von Teilsystemen und insbesondere deren Schnittstellen und deren Verträglichkeit betrachtet. Die hier zu analysierenden unterschiedlichen Teilsysteme sind die Logik, die Kameramodule, die Schnittstellen, Strahlführungsgeräte wie der Manipulator oder Spiegeloptiken sowie die zugehörigen Parametersätze der Kalibrierung und der Einstellungen. Für jedes dieser Teilsysteme werden potentielle Fehler, deren Folgen und die potentiellen Fehlerursachen ermittelt. Auf Basis dieser Ergebnisse wird der aktuelle Zustand hinsichtlich jeder Fehlerursache bewertet. Näheres zu dieser Methode kann beispielsweise in DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR QUALITÄT (2008) oder in FRANKE (1989) nachgelesen werden.

Die im Abschnitt 6.5.2 folgenden Listen stellen auf Basis der FMEA einen Vorschlag dar, wie ein derartiger auf der Anwendung von Kameras basierender zentraler aktiver Lasersicherheitssensor sicherheitsgerichtet ausgelegt und entwickelt werden kann. Hierbei müssen derartige Sicherheitselemente in einer Anlage eine

gewisse Güte aufweisen. Die sicherheitstechnische Einordnung und die Methoden zur Bestimmung dieser werden nachfolgend unter Zuhilfenahme der Norm DIN EN ISO 13849-1 erläutert und es wird ihre Anwendung beschrieben.

6.5.2 Sicherheitsmaßnahmen

6.5.2.1 Einsatz von Zusatzkomponenten

In die Hardware des Sicherheitssystems, im Speziellen in die Auswerteeinheit der Logik, müssen zusätzliche Komponenten eingebracht werden. Sie werden für die Überprüfung von wichtigen Grundfunktionen der Hardware oder ihrer Peripheriekomponenten benötigt:

- Eine Spannungsüberwachung stellt eine kontinuierliche Stromversorgung im System sicher und verhindert Schäden oder Ausfälle durch Über- oder Unterspannung.
- Ein Prüf-Mikrocontroller (Watchdog) kontrolliert den Programmlauf innerhalb der Logik. Er erwartet in definierten Zeitabständen ein Signal von ihr. In diesem Signal kann eine Information enthalten sein, die zu jeder Signalbereitstellung neu erzeugt wird (Dynamisierung). Ist dieses Signal verspätet oder die Information darin nicht korrekt, so muss ein Fehler im Programmlauf oder in der Programmfunktionalität vorliegen. Der Not-Halt muss daraufhin aktiviert werden.

6.5.2.2 Maßnahmen innerhalb der Logik

Auch innerhalb der Logik können softwaretechnische Kontrollmaßnahmen implementiert werden. Diese werden zyklisch zur Laufzeit ausgeführt. Die Regelmäßigkeit dieser Überprüfungen richtet sich nach den Hardware-Leistungsressourcen. Nach HAUKE & SCHAEFER (2008) sollen solche Selbsttests einmal beim Systemstart und dann zyklisch im weiteren Betrieb ausgeführt werden. Dabei ist mindestens 100-mal häufiger zu testen, als die Anforderung der Sicherheitsfunktion theoretisch benötigt werden würde. Selbst unter der Annahme, dass jedes Mal während einer achtstündigen Arbeitsschicht ein Fehlerfall auftritt, den das Sicherheitssystem abfangen müsste, bleibt damit noch immer eine Zeitdauer von $8 \text{ Stunden} / 100 = 4,8$ Minuten für einen Selbsttest. Diese Tests sind in viele kleine Einzeltests zerlegbar. Sie können bevorzugt immer dann ausgeführt werden, wenn das Sicherheitssystem nicht gebraucht wird. Solche sogenannten Nebenzeiten liegen immer dann vor,

wenn keine Laserstrahlung emittiert wird und in dieser Zeitspanne somit auch keine Gefahr bestehen kann. Eine Auswahl an möglichen Tests, welche als Sicherheitsmaßnahmen in die Logik implementiert und von dieser während des Programmlaufs durchgeführt werden sollten, ist in der folgenden Auflistung gegeben:

- Von der Logik wird ein Triggersignal an die Kameras und eventuell an die Steuerung der Führungskinetik zur Synchronisation der Datenströme ausgesandt. Hierdurch sollen Asynchronitäten im System verhindert werden. Eine eventuelle Reaktion darauf kann die Not-Halt-Funktion sein. Alternativ zu dieser Überprüfung können auch Zeitstempel innerhalb der Datenströme verwendet werden.
- Speichertests nach MAI & REUB (2006) verhindern, dass eingelesene Daten fehlerhaft abgelegt werden, was eine zuverlässige Ausführung des Soll-Ist-Vergleichs sicherstellen soll. Weiterhin wird bemerkt, falls Speicherzellen ihren Zustand zufällig ändern oder Kurzschlüsse zwischen ihnen entstehen.
- Das Zurücklesen der Not-Halt-Ausgänge ist für die korrekte Aktivierung des Not-Halts essentiell.
- Der auszuwertende Bildausschnitt wird von der Logik über einen Parametersatz an den entsprechenden Sensor übermittelt. Auch dieser kann wieder ausgelesen und mit dem Sollwert kontrolliert werden, was die Übermittlung eines falschen Bildausschnitts verhindert.
- Nach MAI & REUB (2006) können mit einem Porttest die Ein- und Ausgänge aller an die Logik angeschlossenen Komponenten auf ihre richtige Funktion hin geprüft werden. Hierzu wird über einen angeschlossenen Transistor für einen sehr kurzen Zeitraum ein Signal gesendet, welches direkt wieder in die Logik zurückgelesen wird. Der Zeitraum muss so kurz gewählt werden, dass beispielsweise ein angeschlossenes Relais für die Aktivierung des Not-Halts nicht schalten kann.
- Die Auswertung der Helligkeit der aufgenommenen Bilder stellt eine Plausibilitätsabfrage dar. Sie soll Kurzschlüsse zwischen benachbarten Pixeln erkennen. Hierbei kann beispielsweise das Verhältnis von hellen und dunklen Pixeln innerhalb der ROI als Kriterium verwendet werden.
- Der Gesamttest des Systems kann mit einem Testbild erfolgen. Dieses wird ausgewertet und mit dem erwarteten Ergebnis verglichen. Durch diesen Test lassen sich die Gesamtfunktion des Systems und der Zustand der Logik

überprüfen. Hierzu zählen unter anderem die Bestimmung der Anzahl der Cold- und Hot-Pixel (Bildbereiche mit einem dauerhaften Schaden) und der Grad der Verschmutzung der Objektive an den Sensoren. Des Weiteren wird damit die Verfügbarkeit sämtlicher angeschlossener Komponenten überprüft.

6.5.2.3 Manuelle Maßnahmen

Bei der Entwicklung des Sicherheitssystems müssen für Sicherheitstechnik taugliche Vorgehensstandards eingehalten und das System speziellen Test unterzogen werden. Ebenso sind bei späteren Wartungs- und Reparaturarbeiten und beim Einsatz im Feld Prüfroutinen nötig:

- Die Hard- und die Software sind nach anerkannten Standards und Vorgehensmodellen zu entwickeln. Einschlägige Normen, wie DIN EN ISO 13849 ff., geben hierzu weitere Hinweise.
- Für einen störungsfreien Betrieb der Logik und der Sensoren sollte die Hardware mittels eines Tests auf die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV-Test) vorab getestet werden.
- Stecker müssen eindeutig ausgeführt sein, um eine falsche elektrische Kontaktierungen zu vermeiden.
- Eine feste Kameramontage verhindert ein unabsichtliches Verstellen der Position. Dieser Fehler beeinträchtigt zwar die Sicherheit nicht, jedoch die Systemverfügbarkeit wäre mit mechanisch dejustierten Sensoren beeinträchtigt. Mittels einer Sichtprüfung und eines Testbilds kann ein verstelltes Objektiv als solches erkannt werden.
- Mit einer Visualisierung der vom System zu überwachenden Vektoren (vgl. Abbildung 58, S. 117) in Testbildern kann ein Anlagenbediener die Systemfunktion auf Plausibilität prüfen.
- Das Schutzglas vor den Sensoren wird im Laufe der Zeit durch Umgebungseinflüsse verschmutzt. Es ist in regelmäßigen Abständen, spätestens bei einer verringerten Systemverfügbarkeit, auszutauschen.
- Eine Sichtprüfung der einzelnen Komponenten bei Wartungsarbeiten gibt Aufschluss über Beschädigungen und Verschmutzungen.

6.5.3 Sicherheitstechnische Kennzahlen

6.5.3.1 Geforderte Sicherheit

Zur Einordnung eines Sicherheitssystems stellt u. a. die Norm DIN EN ISO 13849-1 Hilfsmittel bereit. Das wesentliche Instrument zur Bestimmung der geforderten Sicherheit bzw. des daraus abgeleiteten geforderten Performance-Levels (PL_r) ist der Risikograph, wie er in Abschnitt 2.5 (S. 28) vorgestellt wurde.

Bei einem Unfall mit intensiver Laserstrahlung ist von schweren irreversiblen Schäden auszugehen. Hauptsächlich sind die Personen im jeweiligen Produktionsumfeld betroffen. Sie befinden sich in einer potenziell gefährdenden Position im Umfeld der Laseranlage. Beim Unfall können sie den Schaden nicht durch eine Reaktion vermeiden, da die Strahlung unsichtbar ist und unmittelbar auf der jeweiligen Person auftreten kann. Lediglich der Schaden selbst ist bemerkbar. Mit dem Risikograph (siehe Abbildung 20, S. 28) wird deshalb mit den Kriterien Verletzung: *irreversibel*, Exposition: *selten* und Schadensvermeidung: *nicht möglich* der geforderte Performance Level PL_r auf die Stufe d festgelegt. Dieser gibt eine maximale Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls der Sicherheitsfunktion von 10^{-6} gefährlichen Ausfällen pro Stunde vor.

Auf Basis dieses ermittelten PL_r lässt sich nach HAUKE & SCHAEFER (2008) eine Sicherheitskategorie bestimmen. Die Kategorien sind unterteilt in Kategorie B, 1, 2, 3 und 4, wobei B die niedrigste und 4 die höchste darstellt. Sie drücken die Toleranz des Systems gegenüber Fehlern aus. BOEMER (2009) nennt für jede Kategorie eine mögliche Hardwarearchitektur des Sicherheitssystems. Nach HAUKE & SCHAEFER (2008) kann jeder Kanal dieses Sicherheitssystems in drei Blöcke, bestehend aus dem Eingang, der Logik und dem Ausgang, aufgeteilt werden. Sie spiegeln jeweils bestimmte Hardwarekomponenten wider. Diese Blöcke lassen sich jeweils separat betrachten und in einer Gesamtbewertung des Sicherheitssystems zusammenfassen. Die wichtigsten Klassifizierungsparameter werden in den weiteren Abschnitten beschrieben.

6.5.3.2 Mittlere Zeit bis zum gefahrbringenden Ausfall

Diese Kennzahl (engl.: mean time to dangerous failure - $MTTF_d$) ist ein statistischer Wert der mittleren Lebensdauer eines typischen Bauteils und bezieht sich nicht auf das eingesetzte Bauteil im Speziellen. Dadurch kann dieser Wert nicht als eine garantierte Lebensdauer des eingesetzten Bauteils angesehen werden. Diese Zeit

wird üblicherweise in Jahren angegeben. Ein gefahrbringender Bauteilausfall bedeutet in diesem Fall, dass die vorgesehene Sicherheitsfunktion nicht mehr erfüllt wird. Die Bestimmung basiert beispielsweise auf dem in (HAUKE & SCHAEFER 2008) erläuterten Parts-Count-Verfahren, bei dem jedem Bauteil eine konstante Ausfallrate unterstellt wird. Dieser konservative Ansatz geht davon aus, dass sich gefährliche und ungefährliche Anteile die Waage halten. Aus diesem Grund wird die $MTTF_d$ als doppelter Wert der MTTF (mittlere Zeit bis zum Ausfall) angenommen. Die $MTTF_d$ eines Blocks wird über die gefahrbringenden Ausfallraten λ_d jedes darin beinhalteten Bauteils nach dem in Formel (71) gezeigten Zusammenhang bestimmt. Die typische Einheit einer Ausfallrate ist FIT (engl.: failure in time); dies bedeutet Ausfälle in einer Milliarde Bauteilbetriebsstunden. Es gilt:

$$MTTF_d = \frac{1}{\sum \lambda_d} \quad (71)$$

Die $MTTF_d$ des Gesamtkanals wird nach Formel (72) über die Aufsummierung der Kehrwerte der $MTTF_{d,i}$ für jeden einzelnen Block errechnet:

$$MTTF_d = \left[\sum \frac{1}{MTTF_{d,i}} \right]^{-1} \quad (72)$$

Die $MTTF_d$ -Werte jedes Bauelements können dem jeweiligen Datenblatt oder Datenbanken entnommen werden. Liegt dieser Wert nicht vor, kann er beispielsweise mit dem Verfahren guter ingenieurmäßiger Praxis abgeschätzt werden (siehe HAUKE & SCHAEFER 2008). Eine Grundforderung ist hierbei jedoch, dass der Hersteller des Bauteils die gültigen und bewährten Sicherheitsprinzipien nach den Normen berücksichtigt.

6.5.3.3 Diagnosedeckungsgrad von Test- und Überwachungsmaßnahmen

Der Diagnosedeckungsgrad (engl.: diagnostic coverage - DC) betrachtet die Selbsttest- und Überwachungsmaßnahmen des Sicherheitssystems. Er ist als das Summenverhältnis der erkennbaren gefahrbringenden Ausfallraten λ_{dd} und der unerkennbar gefahrbringenden Ausfallraten λ_d nach Formel (73) definiert:

$$DC = \frac{\sum \lambda_{dd}}{\sum \lambda_d} \quad (73)$$

In der Norm DIN EN ISO 13849-1 wird der Weg einer konservativen Schätzung des DC angestrebt. Es sind auch einige Schätzwerte für gängige Standardverfahren gelistet. Eine zeitliche und logische Programmablaufüberwachung (Watchdog) in der

Logik ergibt beispielsweise einen DC von 90%. Die Werte sind in ein grobes Raster aus vier Eckwerten eingeteilt. Man unterscheidet zwischen keinem ($DC < 60\%$), einem niedrigen ($60\% \leq DC < 90\%$), einem mittleren ($90\% \leq DC < 99\%$) und einem hohen ($DC \geq 99\%$) DC. Er wird für jeden Block bestimmt, um daraus mit der jeweiligen $MTTF_d$ nach Formel (74) den DC_{avg} des gesamten Kanals zu berechnen:

$$DC_{avg} = \frac{\sum_1^n \frac{DC_i}{MTTF_{d,i}}}{\sum_1^n \frac{1}{MTTF_{d,i}}} \quad (74)$$

Der DC_i -Wert jedes Blocks wird mit seiner $MTTF_{d,i}$ gewichtet, da zuverlässigere Bauteile weniger auf wirksame Tests angewiesen sind als unzuverlässige.

6.5.3.4 Maßnahmen gegen Ausfälle infolge einer gemeinsamen Ursache

Um der Gefährdung durch Ausfälle infolge gemeinsamer Ursachen (engl.: common cause failure - CCF) entgegenzuwirken, nennt die Norm DIN EN ISO 13849-1 im Anhang F acht Gegenmaßnahmen, wobei jede einzeln mit Punkten bewertet ist (siehe Tabelle 20):

Maßnahme gegen CCF	Punktezahl
physikalische Trennung zwischen den Signalpfaden	15
Verwendung unterschiedlicher physikalischer Prinzipien im Sicherheitssystem	20
Schutz gegen Überspannung, Überdruck, Überstrom usw.	15
Verwendung bewährter Bauteile	5
Anwendung einer FMEA zur Aufdeckung von Gründen und Auswirkungen von Ausfällen infolge gemeinsamer Ursache	5
Ausreichende Schulung des Konstruktions- und Montagepersonals, um Auswirkungen gemeinsamer Ursachen zu erkennen	5
Schutz vor Verunreinigung und elektrischer Beeinträchtigung	25
Berücksichtigung hinsichtlich der Unempfindlichkeit gegenüber allen relevanten Umgebungseinflüssen (Wärme, Vibration, Feuchte usw.)	10

Tabelle 20: Maßnahmen gegen Ausfälle infolge einer gemeinsamen Ursache und die jeweilig zugehörige Punktezahl nach der Norm DIN EN ISO 13849-1, Anhang F

Die Punkte werden bei einer Umsetzung einer Maßnahme jeweils komplett vergeben. Eine teilweise Vergabe von Punkten erfolgt nicht. In der Summe sind maximal 100 Punkte zu erzielen. 65 Punkte sind mindestens gefordert.

6.5.4 Angestrebte Sicherheitskategorie

Der geforderte Performance Level von $PL_r = d$ ist ab einer Sicherheitskategorie von 2 zu realisieren. Ein Sicherheitssystem nach der Kategorie 2 ist ein einkanaliges System, das zusätzlich in regelmäßigen Abständen über einen Testkanal überprüft wird. Abbildung 69 gibt einen Überblick über die vorgeschlagene Architektur für die Sicherheitskategorie 2. Da durch die Testeinrichtung im Fehlerfall über den Ausgang der Testeinrichtung ein sicherer Zustand eingeleitet werden muss, ist eine zweite Abschaltvorrichtung vorzusehen. Für die Umsetzung dieser Kategorie sind grundlegende und bewährte Sicherheitsprinzipien anzuwenden.

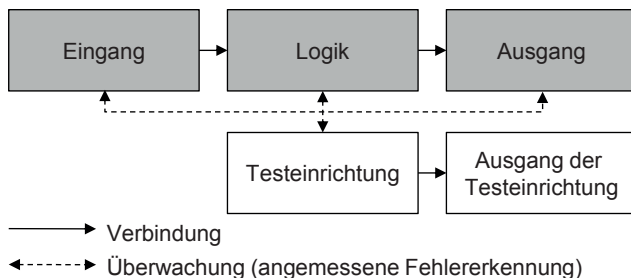


Abbildung 69: Vorgeschlagene Architektur der Sicherheitskategorie 2 (nach DIN EN ISO 13849-1)

Um mit der Sicherheitskategorie 2 einen $PL = d$ zu erreichen, sind für die eingangs erwähnten Parameter DC_{avg} , $MTTF_d$ und CCF nach DIN EN ISO 13849 ff. folgende Vorgaben zu erfüllen:

DC_{avg} = niedrig bis mittel: Ein DC_{avg} von Test- und Überwachungsmaßnahmen der Stufe „niedrig“ benötigt einen Diagnosedeckungsgrad von mindestens 60%. Abhängig von der durchschnittlichen Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls pro Stunde kann auch ein DC_{avg} von „mittel“ gefordert sein. Dies würde einem Deckungsgrad von mindestens 90% entsprechen. Für den Testkanal wird bei Kategorie 2 kein DC -Wert vorgeschrieben.

$MTTF_d$ = hoch: Für die $MTTF_d$ wird eine Dauer von 30 bis 100 Jahren gefordert. Die $MTTF_d$ des Testkanals muss mindestens doppelt so hoch sein, wie jene der Steuereinheit.

CCF = Maßnahmen erforderlich: Es müssen so viele Maßnahmen umgesetzt werden, um mindestens 65 Punkte zu erreichen.

6.5.5 Bewertung des Systems

Für die Bewertung des Systems werden zunächst verschiedene reale Hardwarekomponenten in die Blöcke in Abbildung 69 eingruppiert:

Der Block *Eingang* wird mit zwei monochromen CMOS-Kameramodulen MT9V024 von der Firma Aptina Imaging Corporation (MINIX 2010) inklusive der Objektive und einer dazugehörigen Spannungsüberwachung ausgestattet. Für diese Kameramodule sind Ausfallraten verfügbar, was sie für eine sicherheitstechnische Anwendung qualifiziert. Der zweite Block *Logik* setzt sich aus einem betriebsbewährten digitalen Signalprozessor, der Spannungsüberwachung, zwei Transistoren für die Porttests und einem Not-Halt-Relais mit Zwangsführung zusammen. Der Block *Ausgang* ist somit in dieser Betrachtung ein Teil des Blocks *Logik*. Der Testkanal besteht aus dem Watchdog mit einem Relais zur Auslösung des Not-Halts.

Mithilfe des eingangs genannten Parts-Count-Verfahrens wird der DC_{avg} -, der $MTTF_d$ - und der CCF-Wert ermittelt. Hierzu werden die jeweiligen Werte auf der Grundlage von Herstellerdaten, Datenbanken (SN 29500) oder Erfahrungswerten bestimmt. Tabelle 21 stellt die mit den Formeln (71) bis (74) ermittelten und für die weitere Berechnung der Gesamtausfallwahrscheinlichkeit relevanten Kennwerte dar.

Kanal	Block	Bauteil	Anzahl	Ausfallrate in FIT	Gesamtausfallrate in FIT	Rate gefährbringender Ausfälle in FIT	MTTF _d in Jahren	Quelle	DC	DC / MTTF _d
Steuereinheit	Sensorik	Kamerachip	2	27	54	27	2114	Datenblatt ¹⁾	90%	0,64%
		Objektiv	2	-	-	-	150	ingenieurmäßige Praxis		
		Spannungsüberwachung	1	-	-	-	38051	SN 29500-2		
	MTTF _{d, Sensorik}						140			
	Logik	Digitaler Signalprozessor	1	200	200	100	1142		99%	0,09%
		Not-Halt-Relais	1	-	-	-	1042	Annahme ²⁾	90%	0,10%
		Spannungsüberwachung		-	-	-	38051	SN 29500-2		
		Transistor	2	20	40	20	5708	SN 29500-2		
		Widerstand	2	0,2	0,4	0,2	570776	SN 29500-2		
		MTTF _{d, Logik}						490		
							Gesamt-MTTF _d	109		
							DC _{avg}	91%		
Testkanal	Watchdog	1	-	-	-	4566	SN 29500-2	nicht erforderlich		
		Not-Halt Testrelais	1	-	-	-	1042			Annahme ²⁾
	MTTF _{d, Testkanal}						848,19			

Tabelle 21: Übersicht über die bewertungsrelevanten Kennwerte; ¹⁾ siehe (MICRON TECHNOLOGY 2008); ²⁾ Lebensdauer 2·10⁶ Schaltspiele; 1 Schaltspiel/h, 240 d/a, 8 h/d, MTTF_d = 1042 a

Um das Gesamtergebnis aufgrund von zu sicher angenommenen Bauteilen nicht zu verzerren, werden die MTTF-Werte jedes Kanals auf maximal 100 Jahre begrenzt (HAUKE & SCHAEFER 2008). Der durchschnittliche Diagnosedeckungsgrad liegt bei DC_{avg} = 90%, was einem Grad der Stufe „mittel“ entspricht. Bei den Maßnahmen gegen Ausfälle infolge gemeinsamer Ursache (CCF) können 65 Punkte durch folgende Maßnahmen leicht erreicht werden:

- Schutz gegen Überspannung (15 Punkte)
- Schutz vor Verunreinigung und elektrischer Beeinträchtigung (25 Punkte)
- Anwendung einer FMEA zur Aufdeckung von Gründen und Auswirkungen von Ausfällen infolge gemeinsamer Ursache (5 Punkte)

- Ausreichende Schulung des Konstruktions- und Montagepersonals, um Auswirkungen gemeinsamer Ursachen zu erkennen (5 Punkte)
- Unempfindlichkeit gegenüber allen relevanten Umgebungen (10 Punkte)
- Verwendung bewährter Bauteile (5 Punkte)

Infolge dieser Teilergebnisse sind sämtliche Voraussetzungen für einen Performance-Level der Stufe d erreicht. Aufgrund der Komplexität der Berechnung und der notwendigen Interpolationen wird die Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls je Stunde mit der frei verfügbaren Software *Sistema* des Instituts für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA 2010) berechnet. Die Wahrscheinlichkeit eines gefahrbringenden Ausfalls pro Stunde liegt demnach bei $2,29 \cdot 10^{-7}$. Abbildung 70 zeigt eine grafische Einordnung dieser Betrachtung des ausgelegten Systems.

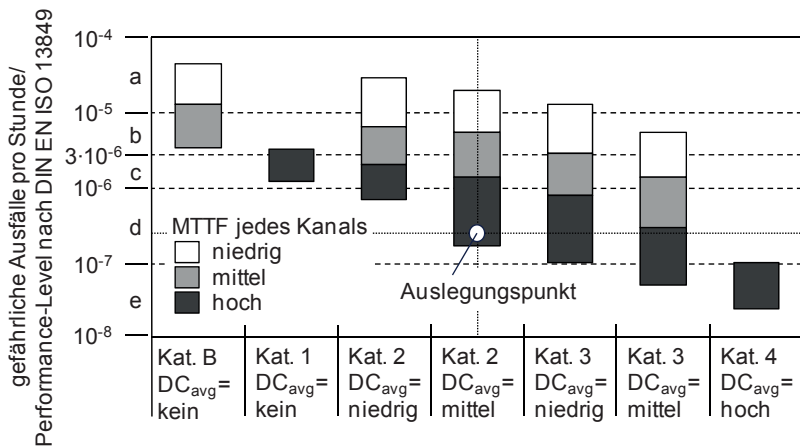


Abbildung 70: Sicherheitslevel für die ausgelegte und sicherheitstechnisch bewertete Sicherheitsfunktion des zentralen aktiven Sensorkonzepts (in Anlehnung an HAUKE & SCHAEFER 2008)

6.6 Fazit

Mithilfe des aufgezeigten zentralen aktiven Sensorkonzepts ist es möglich, den Laserstrahl-Brennfleck während des gesamten Bearbeitungsprozesses innerhalb der

Schutzzelle zu überwachen. Es wird damit sichergestellt, dass sich der Brennfleck zu jeder Zeit, abgesehen von der Reaktionszeit, innerhalb eines definierten Arbeitsraums an einer vorgegebenen Position befindet. Bei einer möglichen Abweichung wird der Anlagen-Not-Halt eingeleitet. Durch diese direkte und zentrale aktive Überwachung ist lediglich noch eine leichte Umhausung aus dünnen Schutzwänden nötig. Sie hält die Direktstrahlung während der Reaktionszeit und die reflektierte Strahlung während des Normalbetriebs von der Umwelt ab.

Eine Sicherheitsbetrachtung eines für Remote-Laser-Materialbearbeitungsanlagen geeigneten Schutzkonzepts nach DIN EN ISO 13849-1 weist aufgrund der möglichen Gefährdungen bei modernen Laserprozessen einen erforderlichen Performance-Level von $PL_r=d$ aus. Dieser kann mit den in diesem Kapitel aufgezeigten Methoden erreicht werden. Es sind darüber hinaus zu den theoretischen Überlegungen konkrete Umsetzungsmöglichkeiten für eine Auslegung der Sicherheitsfunktion in Hard- und Software in checklistenartiger Darstellung genannt.

7 Zusammenfassung

Die Steigerung der Brillanz von Festkörperlasern bietet die Möglichkeit zur Laserstrahlfokussierung in großen Arbeitsabständen bei nahezu vollkommener räumlicher Bewegungsfreiheit der Optik, was gerade in der Massenfertigung zu produktiv-technischen Vorteilen verhelfen kann. Es ist davon auszugehen, dass die künftig verfügbare Strahlbrillanz und die Laserleistung mit der stetigen Laserstrahlquellen-Entwicklung weiterhin steigen werden. Diese Entwicklungen führen jedoch in Bezug auf die Lasersicherheit entsprechender Anlagen zu neuen Problemen. Durch die großen Bearbeitungsabstände können die ohnehin notwendigen Anlagenumhausungen in einem Fehlerfall auf ihrer Innenseite mit hohen Strahlungsintensitäten belastet werden. Solche Fehlerfälle treten beispielsweise durch Softwarefehler, mechanisches Versagen oder Fehlbedienung auf.

Die Auswirkung dieser hohen Strahlenbelastung ist bei konventionellen mit passiven Schutzwänden aufgebauten Umhausungen meist ein schneller Durchbrand. Der daraufhin folgende Strahlungsaustritt in die Umwelt ist für Menschen extrem gefährlich. Aktive Schutzwandsysteme registrieren beispielsweise ein Auftreffen der Laserstrahlung auf der Innenseite der Schutzwände mittels dezentralen flächig verbauten Sensoren und schalten die Anlage daraufhin ab. Im Hinblick auf die erwähnten Trends im Strahlquellenbau ist bei solchen bestehenden Sicherheitsstrategien mit erheblichen Mehrkosten für die Lasersicherheit zu rechnen.

Das vermeintlich einfach lösbare Problem der Lasersicherheit entwickelt sich bei modernen Remote-Laseranlagen zunehmend zu einem Zielkonflikt zwischen den Kategorien *Kosten* und *Sicherheit*. Darum ist es das wesentliche Ziel dieser Arbeit, ein wirtschaftliches Lasersicherheitskonzept und zugehörige Auslegungsmethoden für derartige Anlagen zu erstellen. Dieses Konzept muss so gestaltet sein, dass sich die Anlagen- und damit die Umhausungsgröße möglichst wenig auf die Sicherheitssystemkosten auswirken. Dies ist mit einem zentralen aktiven Sicherheitssensor-konzept mit leichten passiven Schutzwänden zu erreichen.

Ein wesentlicher Kern des erarbeiteten Konzepts ist die Charakterisierung der von der Prozesszone ausgehenden reflektierten Strahlung, welche für die Schutzwand eine permanente Last darstellt. In Kapitel 4 wurde daher ein Modell zur Beschreibung der Reflexionen beim Remote-Laserstrahlschweißen erarbeitet. Es basiert auf den physikalisch-analytischen Zusammenhängen der Absorption und Reflexion in der beim Wärmeleitungs- und beim Tiefschweißen auftretenden Prozesszone. Umfangreiche Experimente bestätigen die erarbeitete Modellvorstellung. Für je einen

Stahl-, Edelstahl- und Aluminiumwerkstoff sind spezifische Eingangsparameter angegeben, sodass die resultierende reflektierte Strahlung bei Verwendung dieser Werkstoffe nunmehr in ihrer räumlichen Ausbreitung abgeschätzt werden kann. Aus den Ergebnissen geht auch hervor, dass die Streustrahlung dieser Schweißprozesse zwar für Menschen höchst gefährlich ist, bereits durch Metall-Schutzwände aber sicher abgeschirmt werden kann.

Eine Schutzwand sollte aber nicht nur diesen vom Prozess ausgehenden Reflexionen widerstehen. In einem Fehlerfall muss sie der ungleich intensiveren Direktstrahlung für einen definierten Zeitraum sicher standhalten können. Bisher konnte hierzu nur ein Realexperiment die benötigten Daten liefern. Für eine Vorabauslegung ist eine Berechnungsmethode der Schutzzeit auf Basis der eingebrachten Belastung erforderlich. Hierzu wurde in Kapitel 5 eine Auslegungsmethode für Hohlkammer-Schutzwände beschrieben, die vorwiegend aus Metallwerkstoffen aufgebaut sind. Diese Methode nutzt die bekannten Beziehungen der Strahlpropagation zur Bestimmung der Strahlungslast auf der Schutzwand. Durch eine formelmäßige Beschreibung der transienten Energiebilanz und der Wärmetransportphänomene können dann die Schutzzeiten berechnet werden. Das Verfahren wurde mit Realexperimenten validiert und zeigt sich gerade für den fokusnahen Schutzwand-Belastungsfall als gut geeignet.

Die die Schutzwand nach der Schutzzeit durchdringende direkte Strahlungslast muss zeitlich beschränkt sein. Die direkte Laserstrahlung darf die Schutzwand deswegen nicht länger als es ihre Schutzzeit erlaubt belasten. Zur zeitlichen Begrenzung dieser Belastung wird in Kapitel 6 das zentrale aktive Sensorkonzept hergeleitet. Es umfasst eine Ortsüberprüfung des Brennflecks mit einem zentral verbauten Sensor. Über logische Operationen kann damit die Laseranlage permanent auf eine mögliche Fehlersituation hin geprüft und dann im Fehlerfall die Strahlung abgeschaltet werden. Der Sensor basiert auf optischen Erfassungsprinzipien. Es sind Möglichkeiten zur Übertragung des Konzepts in eine konkrete Sicherheitsfunktion gegeben. Mit einem Funktionsprototyp wurde die Tauglichkeit des Konzepts an einer robotergeführten Remote-Laserstrahlanwendung mit einer Festbrennweiten-Optik nachgewiesen.

Diese drei Betrachtungsbereiche bilden den Kern der Arbeit. Bei einer Berücksichtigung der in diesen Bereichen erstellten Vorgehensweisen und anschließender Integration der drei Teillösungen kann die Lasersicherheit auch an bisher problematischen Laserstrahl-Anlagentypen, wie denjenigen mit großen Arbeitsabständen und hohen Laserleistungen, wirtschaftlich gewährleistet werden.

8 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) in den Jahren von 2008 bis 2011 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten im Themenbereich der Lasersicherheit. Die Ergebnisse sind teilweise in das vorliegende Dokument eingeflossen. Der Autor dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Studierende/r	Studienarbeit
Roschanek, D.	Entwicklung eines Sicherheitskonzepts für Roboter in der Laser-Materialbearbeitung; Diplomarbeit; März 2009
Föhr, P.	Entwicklung von Schutzwandkonzepten für die Laser-Materialbearbeitung und Realisierung eines Konzepts als Demonstrator; Semesterarbeit; März 2009
Ehrsam, A. N.	Analyse und Erforschung von Abschirmmaterialien für passive Laserschutzwände; Semesterarbeit; Juni 2009
Bernhard, H.	Entwicklung eines kameragestützten Sicherheitssystems für Remote-Laser-Materialbearbeitungszentren; Semesterarbeit; August 2010
Scherer, P.	Analyse der Schutzwirkung passiver Laserschutzmaterialien in Abhängigkeit von deren Oberflächenbeschaffenheit; Semesterarbeit; Januar 2011
Basbilar, D.	Numerisches Prozessmodell zur Vorhersage von Schutzzeiten von Hohlkammer-Laserschutzwänden aus Stahl; Semesterarbeit; März 2011
Scherer, P.	Analyse und Modellbildung der Propagation von Streustrahlung in der Laserstrahl-Materialbearbeitung und Einschätzung von deren Relevanz für die Lasersicherheit; Masterarbeit; Oktober 2011
Rogotz, K. H.	Prozessmodell zur Vorhersage von Schutzzeiten von Hohlkammer-Laserschutzwänden; Semesterarbeit; Dezember 2011
Stephan, M. A.	Methode zur Vorhersage von statistischen Schutzzeit-schwankungen bei Hohlkammer-Laserschutzwänden; Semesterarbeit; Dezember 2011

9 Literaturverzeichnis

ABB LTD. 2012

ABB Ltd.: SafeMove. Online verfügbar unter <http://www.abb.de/product/seitp327/1c06ca39ab379461c12573790047c9eb.aspx>, zuletzt geprüft am 20.02.2012.

ADUNKA 2000

Adunka, F.: Messunsicherheiten. Theorie und Praxis. 2. Aufl. Essen: Vulkan 2000. ISBN: 3-8027-2194-2.

ALUNOVIC & KREUTZ 1996

Alunovic, M.; Kreutz, E. W.: Abschirmung an Laserarbeitsplätzen (FB 750). Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW 1996. ISBN: 3-89429-790-5.

BAEHR & STEPHAN 2006

Baehr, H.-D.; Stephan, K.: Wärme- und Stoffübertragung. 5. Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3-540-32334-1.

BAHMER & SEIPP 1996

Bahmer, F. A.; Seipp, W.: Dermatologische Lasertherapie. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft 1996. ISBN: 3-8047-1431-5.

BECK 1996

Beck, M.: Modellierung des Lasertiefschweißens. Stuttgart: Teubner 1996. ISBN: 3-8265-6358-1.

BERARDI & MONCALIERI 1986

Schutzrecht DE 36 38 874 C 2 (21.05.1987). Amada Co. Ltd. Pr.: 16.11.1986. Berardi, E.; Moncalieri, D.: Schutzvorrichtung für ein Laserbearbeitungsgerät.

BEYER 1995

Beyer, E.: Schweißen mit Laser. Berlin: Springer 1995. ISBN: 3-540-52674-9.

BGETF 2009

BGETF: Biologische Wirkung von Laserstrahlung. In: BGETF (Hrsg.): Ausbildung zum Laserschutzbeauftragten in der Materialbearbeitung und Beschriftung. Dresden, 09.-13.02.2011. BGETF 2009, Kapitel 3.

BGFE 2007

BGFE: BGV B2 - Unfallverhütungsvorschrift Laserstrahlung (1997)
BGFE. Köln: Heymanns 2007.

BOEMER 2009

Boemer, T.: EN ISO 13849-1 - Die Anforderungen der neuen Norm - Bewährtes kombiniert mit Probabilistik. In: BGIA (Hrsg.): Sicherheit bei der Materialbearbeitung mit Laserstrahlung. Hennef, 23.-24.09.2009: BGIA 2009, S. 83-116.

BRAUNREUTHER 2009

Braunreuther, S.: Anlagensicherheitskonzepte für Hochleistungslaser der neuesten Generation. In: BGIA (Hrsg.): Sicherheit bei der Materialbearbeitung mit Laserstrahlung. Hennef, 23.-24.09.2009: BGIA 2009, S. 181-186.

BRAUNREUTHER ET AL. 2012

Braunreuther, S.; Schweier, M.; Zäh, M. F. : New Processes, Safety Systems and Regulations. In: Sheet Metal World (N1), S. 12-15. Online verfügbar unter <http://viewer.zmags.com/publication/dcabaaf9#/dcabaaf9/1>, zuletzt geprüft am 03.05.2012.

BRECHER ET AL. 2009

Brecher, C.; Rosen, C. J.; Wenzel, C.; Bausch, S.: Fräsen von Hochleistungskeramik. wt Werkstattstechnik online 99 (2009) 3, S. 177-185.

BROSE & GOMOLKA 2006

Brose, M.; Gomolka, M.: Sicherheit bei der Laserstrahl-Handbearbeitung. Halle: BGFE 2006.

BROSE & HAUKE 2010

Brose, M.; Hauke, J.: Unterweisungshilfe Lasersicherheit. Verfügbar auf CD, BGEFE 2010.

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND 1973

Gesetz über Betriebsärzte, Sicherheitsingenieure und andere Fachkräfte für Arbeitssicherheit. ASIG.

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND 2010

Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 2006/25/EG zum Schutz der Arbeitnehmer vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung und zur Änderung von Arbeitsschutzverordnungen. In: Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.): Bundesgesetzblatt: Bundesanzeiger, S. 960-967.

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND 2011

Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt. ProdSG.

DAUSINGER 1995

Dausinger, F.: Strahlwerkzeug Laser. Energiekopplung und Prozesseffektivität - Laser in der Materialbearbeitung. Stuttgart: Teubner 1995. ISBN: 3-519-06217-8.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR QUALITÄT 2008

Deutsche Gesellschaft für Qualität: FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. 4. Aufl. Berlin: Beuth 2008. ISBN: 3-410-32276-0.

DEUTSCHER BUNDESTAG 2010

Grundgesetz für die Bundesrepublik Deutschland. GG.

DIETRICH 1995

Dietrich, E.: Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozeßqualifikation. München: Hanser 1995. ISBN: 3-446-17984-4.

DIN 32532

DIN 32532. Schweißen - Laserstrahlverfahren zur Materialbearbeitung - Begriffe für Prozesse und Geräte. Berlin: Beuth 2009.

DIN 66001

DIN 66001. Informationsverarbeitung; Sinnbilder und ihre Anwendung. Berlin: Beuth 1983.

DIN EN 50126

DIN EN 50126. Bahnanwendungen - Spezifikation und Nachweis der Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit, Sicherheit. Berlin: Beuth 2000.

DIN EN 61508-1

DIN EN 61508-1. Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer, programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Berlin: Beuth 2002.

DIN EN 61508-2

DIN EN 61508-2. Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer, programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 2: Anforderungen an sicherheitsbezogene elektrische, elektronische, programmierbare elektronische Systeme. Berlin: Beuth 2002.

DIN EN 61508-3

DIN EN 61508-3. Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer, programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 3: Anforderungen an Software. Berlin: Beuth 2002.

DIN EN 61508-4

DIN EN 61508-4. Funktionale Sicherheit elektrischer, elektronischer, programmierbarer elektronischer sicherheitsbezogener Systeme - Teil 4: Begriffe und Abkürzungen. Berlin: Beuth 2002.

DIN EN 61508-5

DIN EN 61508-5. Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer, programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 5: Beispiele zur Ermittlung der Stufe der Sicherheitsintegrität. Berlin: Beuth 2002.

DIN EN 61508-6

DIN EN 61508-6. Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer, programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 6: Anwendungsrichtlinie für IEC 61508-2 und IEC 61508-3. Berlin: Beuth 2003.

DIN EN 61508-7

DIN EN 61508-7. Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer, programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 7: Anwendungshinweise über Verfahren und Maßnahmen. Berlin: Beuth 2003.

DIN EN 954-1

DIN EN 954-1. Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze. Berlin: Beuth 1997.

DIN EN ISO 11553-1

DIN EN ISO 11553-1. Sicherheit von Maschinen - Laserbearbeitungsmaschinen - Teil 1: Allgemeine Sicherheitsanforderungen. Berlin: Beuth 2008.

DIN EN ISO 11553-2

DIN EN ISO 11553-2. Sicherheit von Maschinen - Laserbearbeitungsmaschinen - Teil 2: Sicherheitsanforderungen an handgeführte Laserbearbeitungsgeräte. Berlin: Beuth 2008.

DIN EN ISO 11553-3

DIN EN ISO 11553-3. Sicherheit von Maschinen - Laserbearbeitungsmaschinen - Teil 3: Sicherheitsanforderungen zur Lärminderung und Geräuschmessverfahren für Laserbearbeitungsmaschinen und handgeführte Laserbearbeitungsgeräte sowie zugehörige Hilfsmittel. Berlin: Beuth 2008.

DIN EN ISO 12100

DIN EN ISO 12100. Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze, Risikobeurteilung und Risikominderung. Berlin: Beuth 2011.

DIN EN ISO 12100-2

DIN EN ISO 12100-2. Sicherheit von Maschinen - Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze - Teil 2: Technische Leitsätze. Berlin: Beuth 2004.

DIN EN ISO 13849-1

DIN EN ISO 13849-1. Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze. Berlin: Beuth 2008.

DIN EN ISO 13849-2

DIN EN ISO 13849-2. Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 2: Validierung. Berlin: Beuth 2010.

DIN EN 207

DIN EN 207. Persönlicher Augenschutz - Filter und Augenschutzgeräte gegen Laserstrahlung (Laserschutzbrillen). Berlin: Beuth 2009.

DIN EN 208

DIN EN 208. Persönlicher Augenschutz - Augenschutzgeräte für Justierarbeiten an Lasern und Laseraufbauten (Laser-Justierbrillen). Berlin: Beuth 2010.

DIN EN 60825-1

DIN EN 60825-1. Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen. Berlin: Beuth 2008.

DIN EN 60825-2

DIN EN 60825-2. Sicherheit von Laser-Einrichtungen - Teil 2: Sicherheit von Lichtwellenleiter-Kommunikationssystemen (LWLKS). Berlin: Beuth 2007.

DIN EN 60825-4

DIN EN 60825-4. Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 4: Laserschutzwände. Berlin: Beuth 2011.

DIN EN 60825-12

DIN EN 60825-12. Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 12: Sicherheit von optischen Freiraum-Kommunikationssystemen für die Informationsübertragung. Berlin: Beuth 2004.

DIN EN 62061

DIN EN 62061. Sicherheit von Maschinen - Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer und programmierbarer elektronischer Steuerungssysteme. Berlin: Beuth 2005.

EDAG GMBH & CO. KGAA 2009

EDAG GmbH & Co. KGaA: Lasertechnik. Online verfügbar unter <http://www.edag.de/produkte/lasertechnik/>, zuletzt geprüft am 23.01.2010.

EICHLER ET AL. 2004

Eichler, J.; Dünkel, L.; Eppich, B.: Die Strahlqualität von Lasern - Wie bestimmt man Beugungsmaßzahl und Strahldurchmesser in der Praxis? Laser Technik Journal 1 (2004) 2, S. 63-66.

EINSTEIN 1916

Einstein, A.: Zur Quantentheorie der Strahlung. In: Physikalische Gesellschaft Zürich (Hrsg.): Mitteilungen der physikalischen Gesellschaft Zürich - Nr. 18: Zürich 1916.

EUROPÄISCHES PARLAMENT 2006A

Richtlinie über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG. 2006/42/EG.

EUROPÄISCHES PARLAMENT 2006B

Richtlinie über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen. 2006/25/EG.

FABBRO ET AL. 2006

Fabbro, R.; Slimani, S.; Coste, F.; Briand, F.; Dlubak, B.; Loisel, G.: Analysis of basic processes inside the keyhole during deep penetration Nd:YAG cw laser welding. In: LIA (Hrsg.): ICALEO 2006. Scottsdale, Arizona, 30.10.-02.11.2006. Orlando, Florida, 2006, Paper 101.

FLUTHWEDEL 2008

Fluthwedel, A.: Sicherheit und Gesundheitsschutz durch Normung. In: Alex, D.; Klein, M. (Hrsg.): Einführung in die DIN-Normen. Stuttgart: Teubner 2008, S. 37-101. ISBN: 978-3-410-16516-3.

FÖLLMER 2007

Föllmer, H.: Finanzielles Risiko: Konzeptionelle Ansätze zur Quantifizierung. In: BBAW (Hrsg.): Debatte 6 - Risiko. Berlin: BBAW 2007, S. 41-45. ISBN: 978-3-939818-09-0.

FRANEK 2011

Franek, J.: Bestimmung des kritischen Fokusradius für eine mehrteilige Schutzwand. In: Reidenbach, H.-D. (Hrsg.): Nichtionisierende Strahlung in Arbeit und Umwelt. Düsseldorf, 19.-21.09.2011. Köln: TÜV Media 2011, S. 691-694. ISBN: 978-3-8249-1458-6.

FRANEK & HEBERER 2006

Franek, J.; Heberer, E.: Physikalische Grenzen der optischen Belastung von Schutzeinhausungen. In: SLV (Hrsg.): 5. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung. Halle, 29.-30.11.2006.

FRANEK & HEBERER 2007

Franek, J.; Heberer, E.: Requirements for Laser Guards Femtosecond Lasers in Comparison to usual High Power Lasers. In: LIA (Hrsg.): ILSC 2007. San Francisco, Kalifornien, 19.-22.03.2007. Orlando, Florida, 2007, Paper 907.

FRANKE 1989

Franke, W. D.: FMEA. Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse in der industriellen Praxis. 2. Aufl. Landsberg am Lech: Moderne Industrie 1989. ISBN: 3-478-41282-X.

FRÖHLICH 2005

SCHUTZRECHT DE 10 2005 009 613 A1 (07.09.2006). Laservision GmbH. Pr.: 03.03.2005. Fröhlich, T.: Laserschutzmaterial und Laserschutzeinrichtung hergestellt unter Verwendung einer solchen Materialschicht.

FÜCHTENKÖTTER 2005

SCHUTZRECHT DE 20 2005 021 038 U1 (08.02.2007). Laser Zentrum Hannover. Pr.: 21.07.2005. Füchtenkötter, G.: Laserschutzwand zur Abschirmung eines Laserbereiches.

GERTHSEN & MESCHEDI 2004

Gerthsen, C.; Meschede, D.: Gerthsen Physik. 22. Aufl. Berlin: Springer 2004. ISBN: 3-540-02622-3.

GLÜCK 1990

Glück, B.: Bausteine der Heizungstechnik. 2. Aufl. Berlin: Verl. für Bauwesen 1990. ISBN: 3-345-00515-8.

GOEBEL 2006

SCHUTZRECHT DE 10 2006 026 555 B4 (30.04.2008). Ingenieurbüro Goebel GmbH. Pr.: 08.06.2006. Goebel, K.: Verfahren und Vorrichtung zum Detektieren von optischer Strahlung.

GOEBEL 2011

Goebel, K.: Aktive Laserschutzeinhausungen und Sichtfenster - State of the Art. In: Reidenbach, H.-D. (Hrsg.): Nichtionisierende Strahlung in Arbeit und Umwelt. Düsseldorf, 19.-21.09.2011. Köln: TÜV Media 2011, S. 695-712. ISBN: 978-3-8249-1458-6.

GRAF 2009

Graf, T.: Laser. Grundlagen der Laserstrahlquellen; mit 20 Übungen. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2009. ISBN: 978-3-8348-0770-0.

HANNWEBER ET AL. 2007

SCHUTZRECHT DE 10 2007 038 780 B3 (04.09.2008). Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung. Pr.: 08.08.2007. Hannweber; Hanweber, J.; Kühn, S.; Bretschneider, S.; Melde, M.: Laserschutzwand für eine Umhausung bei Laserbearbeitungsanlagen.

HARTLEY & ZISSERMAN 2008

Hartley, R.; Zisserman, A.: Multiple view geometry in computer vision. 2. Aufl. Cambridge: Cambridge Univ. Press 2008. ISBN: 0-521-54051-8.

HARTUNG ET AL. 1995

Hartung, J.; Elpelt, B.; Klösener, K.-H.: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik; mit zahlreichen, vollständig durchgerechneten Beispielen. 10 Aufl. München: Oldenbourg 1995. ISBN: 3-486-23387-4.

HAUKE & SCHAEFER 2008

Hauke, M.; Schaefer, M.: Funktionale Sicherheit von Maschinensteuerungen - Anwendung der DIN EN ISO 13849. Sankt Augustin: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung 2008. ISBN: 978-88383-730-X.

HEBERER 1996

SCHUTZRECHT DE 196 29 037 C 1 (31.07.1997). Heberer, E. M. Pr.: 18.07.1996. Heberer, E.: Wandelement für einen Arbeits- oder Wirkungsbereich umgebende Schutzvorrichtung gegen Laserstrahlen einer Laserquelle.

HEBERER 2009A

Heberer, E.: Laser on Time As Safety or Only a Part of Safety? In: LIA (Hrsg.): ILSC. Reno, Nevada, 23.-26.03.2009. Orlando, Florida, 2009, Paper 1405.

HEBERER 2009B

Heberer, E.: Sicherheit bei der Materialbearbeitung mit Laserstrahlung. In: BGIA (Hrsg.): Sicherheit bei der Materialbearbeitung mit Laserstrahlung. Hennef, 23.-24.09.2009: BGIA 2009, S. 203-214.

HECHT 2009

Hecht, E.: Optik. 5. Aufl. München: Oldenbourg 2009. ISBN: 3486588613.

HÜGEL & GRAF 2009

Hügel, H.; Graf, T.: Laser in der Fertigung. Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2009. ISBN: 978-3-8351-0005-3.

HUSTEDT 2012

Hustedt, M.: Prosys Laser. Online verfügbar unter http://www.prosyslaser.eu/im/poster_800x2000mm_def.pdf, zuletzt geprüft am 24.07.2012.

IFA 2010

Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung: SISTEMA. Bewertung von sicherheitsbezogenen Maschinensteuerungen nach DIN EN ISO 13849: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung 2010.

IPG LASER GMBH 2005

IPG Laser GmbH (Hrsg.): YLR-8000 – Ytterbium-Faser-Laser. Benutzerhandbuch. Burbach 2005.

KAHL 1998

SCHUTZRECHT DE 198 55 793 B4 (08.06.2000). Paletti Profilsysteme GmbH & Co. KG. Pr.: 03.12.1998. Kahl, H.: Laserschutzwand.

KAHL 2002

SCHUTZRECHT EP 1 466 121 B1 (21.06.2006). Kahl, H. Pr.: 03.12.2002. Kahl, H.: Laserschutzwand.

KESSLER 2009

Kessler, B.: Sicherheit bei Hochleistungsfaserlasern. In: BGIA (Hrsg.): Sicherheit bei der Materialbearbeitung mit Laserstrahlung. Hennef, 23.-24.09.2009; BGIA 2009, S. 29-57.

KLEIN 2007

Klein, B.: Versuchsplanung - DoE. Einführung in die Taguchi-Shainin-Methodik. 2. Aufl. München: Oldenbourg 2007. ISBN: 978-3-486-58352-6.

KLOTZBACH 2006

SCHUTZRECHT DE 10 2006 036 500 B3 (21.02.2008). Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung. Pr.: 26.07.2006. Klotzbach, U.: Wandelement zum Schutz vor Laserstrahlung.

KONNOV 2005

Konnov, A.: Zuverlässigkeitsberechnung und vorbeugende Wartung von komplexen technischen Systemen mittels modifizierter Markov-Methode. Frankfurt am Main: VDMA 2005. ISBN: 3-8163-0499-0.

KREBS ET AL. 2009

Krebs, P.; Müller, N.; Schellmann, H.; Reinhardt, S.; Bredow, M.; Reinhart, G.: Ganzheitliche Risikobewertung für produzierender Unternehmen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 104 (2009) 3, S. 174-180.

KRÜGER 2004

Krüger, J.: Schlussbericht zum Forschungsprojekt "Sicherheit in der Anwendung der Femtosekunden-Laser-Technologie" Hrsg: BMBF. Berlin 2004.

KUKA ROBOTER GMBH 2012

KUKA Roboter GmbH: Safe Robot Technology. Online verfügbar unter http://www.kuka-robotics.com/germany/de/products/software/hub_technologies/, zuletzt geprüft am 20.02.2012.

LASERMET LTD. 2012

Lasermet Ltd.: Laser Jailer. Online verfügbar unter <http://www.lasermet.com/active-laser-guarding-system.php>, zuletzt geprüft am 24.08.2012.

LIGGESMEYER 2011

Liggesmeyer, P.: Sicherheit und Zuverlässigkeit eingebetteter Systeme. Online verfügbar unter http://seda.informatik.uni-kl.de/teaching/suze/ws2011/material/folien/SRES_03_Risk_Acceptance.pdf, zuletzt geprüft am 13.01.2012.

MACKWOOD & CRAFER 2005

Mackwood, A. P.; Crafer, R. C.: Thermal modelling of laser welding and related processes: a literature review. Optics & Laser Technology 37 (2005) 2, S. 99-115.

MAI & REUB 2006

Mai, M.; Reuß, G.: Selbsttests für Mikroprozessoren mit Sicherheitsaufgaben. Oder: "Quo vadis Fehler?" Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz. Sankt Augustin: HVBG 2006. ISBN: 3-88383-713-X.

MAIMAN 1960

Maiman, T. H.: Stimulated Optical Radiation in Ruby. In: Nature 187 (1960) 8, S. 493-494.

MEEUS 1998

Meeus, J.: Astronomical algorithms. 2. Aufl. Richmond: Willmann-Bell 1998. ISBN: 978-0-943396-61-3.

MEHMETLI ET AL. 1996

Mehmetli, B. A.; Takahashi, K.; Sato, S.: Direct measurement of reflectance from aluminum alloys during CO₂ laser welding. In: Applied Optics 35 (1996) 18, S. 3237-3242.

MEIER ET AL. 2008

Meier, O.; Püster, T.; Beier, H.; Wenzel, D.: Qualifizierung von persönlicher Schutzausrüstung für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung. Dortmund: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin 2008.

MICRON TECHNOLOGY 2008

Micron Technology, I.: 1/3-Inch Wide-VGA CMOS Digital Image Sensor - MT9V024. Aptina Imaging. San Jose, Kalifornien, 2008.

MINIX 2010

Minix, L. D.: MT9V024IA7XTM PPAP - Design Records. Aptina Imaging. Datenblatt. San Jose, Kalifornien, 2010.

MÜLLER 2006

Müller, D.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre für Ingenieure. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3-540-32194-2.

MÜLLER 2002

Müller, M. G.: Prozeßüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung. München: Utz 2002. ISBN: 3-8316-0144-5.

MÜLLER-BORHANIAN 2009

Müller-Borhanian, J.: Kamerabasierte In-Process-Überwachung beim Laserstrahlschweißen. München: Utz 2009. ISBN 978-3-8316-0890-4.

MVTEC SOFTWARE GMBH 2011

MVTec Software GmbH: Halcon. München: MVTec Software GmbH 2011.

NATIONAL INSTRUMENTS CORP. 2008

National Instruments Corp. (Hrsg.): High-Speed M Series Multifunction DAQ for USB. Datenblatt. Austin, Texas, 2008.

NIDA-RÜMELIN 2007

Nida-Rümelin, J.: Risiko und Risikoakzeptanz aus ethischer Sicht. In: BBAW (Hrsg.): Debatte 6 - Risiko. Berlin: BBAW 2007, S. 77-85. ISBN: 978-3-939818-09-0.

N. N. 2008A

SCHUTZRECHT DE 10 2008 016 856 A1 (15.10.2009). Trautmann, A. Pr.: 02.04.2008. N. N.: Strahlenschutzelement, Strahlenschutzanordnung und -verfahren.

N. N. 2008B

Schutzrecht DE 20 2008 007 197 U1 (29.01.2009). EADS Deutschland GmbH. Pr.: 28.05.2008. N. N.: Einsatz von Holz als Laserschutz.

N. N. 2009

SCHUTZRECHT DE 10 2009 023 821 A1 (17.03.2011). Trautmann, A. Pr.: 04.06.2009. N. N.: Schutzwandelement zur Abschirmung von Laserstrahlung und anderer hochenergetischer ionisierender bzw. nicht ionisierender Strahlung.

OEFELE 2012

Oefelee, F.: Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen. Online verfügbar unter <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20120627-1096019-1-9>, zuletzt geprüft am 10.10.2012.

OMEGA ENGINEERING INC. 1998

Omega Engineering inc. (Hrsg.): Emissivity of Common Materials. Stamford, Connecticut: Putman 1998.

OPHIR OPTRONICS SOLUTIONS LTD. 2012

Ophir Optronics Solutions Ltd. (Hrsg.): Photodiode Power Sensors – PD-300-3W. Datenblatt. Online verfügbar unter http://www.ophiropt.com/laser/pdf/PD300_PD300-1W_PD300-3W_PD300-TP.pdf, zuletzt geprüft am 26.01.2013.

OPTICAL ENGINEERING 1987

Optical Engineering: Power Probe Instruction Sheet - P-20-Y. Datenblatt. Lasercraft Inc. Santa Rosa, Kalifornien, 1987.

OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH & CO. OHG 2001

Osram Opto Semiconductors GmbH (Hrsg.): Silizium-Differential-Fotodiode. Datenblatt. Regensburg, 2001.

OSRAM OPTO SEMICONDUCTORS GMBH 2007

Osram Opto Semiconductors GmbH (Hrsg.): BPW-34-F – Si-PIN-Fotodiode mit Tageslichtsperrfilter. Datenblatt. Regensburg, 2007.

POLIFKE & KOPITZ 2005

Polifke, W.; Kopitz, J.: Wärmeübertragung. Grundlagen, analytische und numerische Methoden. München: Pearson Studium 2005. ISBN: 3-8273-7104-X.

POPRAWA 2005

Poprawe, R.: Lasertechnik für die Fertigung. Berlin: Springer 2005.

POPRAWA ET AL. 2004

Poprawe, R.; Weber, H.; Herziger, G.; Bäuerle, D.; Bergmann, H.; Dausinger, F.; Dörschel, K.; Gebhardt, A.; Geiger, M.; Grupp, M.; Haferkamp, H.; Hertzler, C.; Hügel, H.; Minet, O.; Möhrle, M.; Müller, G.; O'Neill, W.; Schulz, W.; Sepold, G.; Tiziani, H. J.; Totzeck, M.; Ulbricht, M.; Venghaus, H.; Vollertsen, F.; Welling, H.; Wiesemann, W.: Laser Physics and Applications. In: Landolt, H. et al. (Hrsg.): Numerical data and functional relationships in science and technology. Berlin: Springer 2004. ISBN: 3-540-00105-0.

PÜSTER 2009A

Püster, T.: Qualifizierung konstruktiver technischer Schutzmaßnahmen für handgeführte Lasergeräte zur Materialbearbeitung. In: BGIA (Hrsg.): Sicherheit bei der Materialbearbeitung mit Laserstrahlung. Hennef, 23.-24.09.2009: BGIA 2009, S. 117-130.

PÜSTER 2009B

Püster, T.: Qualifizierung persönlicher Schutzausrüstung für handgeführte Lasergeräte zur Materialbearbeitung. In: BGIA (Hrsg.): Sicherheit bei der Materialbearbeitung mit Laserstrahlung. Hennef, 23.-24.09.2009: BGIA 2009, S. 59-75.

RADE ET AL. 2000

Rade, L.; Westergren, B.; Vachenaer, P.: Springers mathematische Formeln. Taschenbuch für Ingenieure, Naturwissenschaftler, Informatiker, Wirtschaftswissenschaftler. 3. Aufl. Berlin: Springer 2000. ISBN: 3-540-67505-1.

RASMUSSEN & JASNAU 2006

Rasmussen, C.; Jasnau, U.: Sicherheit im Projekt Dock-Laser. In: Brose, M. et al. (Hrsg.): Sicherheit bei der Laserstrahl-Handbearbeitung. Halle, 29.-30.11.2006: BGFE 2006, S. 47-58.

READY & FARSON 2001

Ready, J. F.; Farson, D. F.: LIA Handbook of Laser Materials Processing. Orlando, Florida: Magnolia 2001. ISBN: 0-912035-15-3.

REIF 2007

Reif, K.: Automobilelektronik. Eine Einführung für Ingenieure. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2007. ISBN: 978-3-8348-0297-2.

RONNINGER 2012

Ronninger, C. U.: Visual-XSel – CRGraph 2012. Online verfügbar unter: <http://www.weibull.de/Software.htm>, zuletzt geprüft am 26.01.2013.

SCHIRMACHER ET AL. 1999A

Schirmacher, A.; Sutter, E.; Koschinski, W.; Wang, Y.: Laser Eye Protection: Concepts, European Standards Requirements Testing. In: LIA (Hrsg.): ILSC. Orlando, Florida, 08.-11.03.1999. Orlando, Florida, 1999, S. 346-355.

SCHIRMACHER ET AL. 1999B

Schirmacher, A.; Sutter, E.; Koschinski, W.; Wang, Y.: Laser-induced damage in absorbing eye protection materials. PTB-Mitteilungen (1999) 109, S. 473-481.

SCHROETER 1987

SCHUTZRECHT DE 37 05 694 C 2 (01.09.1988). Buck Chemisch-Technische Werke GmbH & Co. KG. Pr.: 23.02.1987. Schroeter, J.: Verfahren und Anordnung zum Schützen von Objekten gegen Laser hoher Leistungsdichte.

SCHUBERT & SILVANUS 2000

SCHUTZRECHT DE 100 17 284 C1 (21.06.2001). DaimlerChrysler AG. Pr.: 06.04.2000. Schubert, H.; Silvanus, J.: Wandelement für eine Schutzvorrichtung gegen Laserstrahlung.

SN 29500

SN 29500. Ausfallarten - Bauelemente - Erwartungswerte. München: Siemens AG 2005.

STEEN 2003

Steen, W. M.: Laser material processing. 3. Aufl. Berlin: Springer 2003. ISBN: 1-85233-698-6.

STEGER ET AL. 2008

Steger, C.; Ulrich, M.; Wiedemann, C.: Machine vision algorithms and applications. Weinheim: Wiley 2008. ISBN: 978-3-527-40734-7.

STOLDT 2009

Stoldt, C.: Gefährdungsbeurteilung. In: BGETF (Hrsg.): Ausbildung zum Laserschutzbeauftragten in der Materialbearbeitung und Beschriftung. Dresden, 09.-13.02.2009, Kapitel 8.

STRITT ET AL. 2011

Stritt, P.; Weber, R.; Graf, T.; Müller, S.; Ebert, C.: Utilizing Laser Power Modulation to Investigate the Transition from Heat-Conduction to Deep-Penetration Welding. Physics Procedia 12 (2011) Part 1, S. 224-231.

STRITT ET AL. 2012

Stritt, P.; Weber, R.; Esser, A.; Graf, T.; Weberpals, J.-P.: Laser Safety Barriers. In: Graf, T. (Hrsg.): Stuttgart Laser Technology Forum '12. Stuttgart, 13.-14.06.2012. Stuttgart: IFSW 2012. Erschienen auf CD.

STROBL & HIRZINGER 2006

Strobl, K. H.; Hirzinger, G.: Optimal Hand-Eye Calibration. (Hrsg.): The proceedings of 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Beijing, 09.-15.10.2006. Piscataway, New Jersey: IEEE 2006. ISBN: 1-4244-0259-X.

TAYLOR ET AL. 1990

Taylor, A.; Edwards, A.; Barret, J.; Bandle, A.: Detection of errant laser beams. In: SPIE (Hrsg.): CO₂ Lasers and Applications II (Volume 1276). Den Haag, 01.03.1990, S. 188-201.

THIEME 2008

Thieme, J.: Strahlqualität - der Schlüssel zu neuen Anwendungen in der Lasermaterialbearbeitung. In: Hoffmann, H. et al. (Hrsg.): münchener kolloquium. Garching b. München, 09.10.2008. München: Utz 2008. ISBN: 978-3-8316-0844-7.

VDI 1995

VDI: Sicherheitstechnische und medizinische Aspekte bei der Laserstrahlmaterialbearbeitung. Düsseldorf: VDI 1995.

VDI 1997

VDI: Sicherheitstechnische und medizinische Aspekte bei der Laserstrahlmaterialbearbeitung. Düsseldorf: VDI 1997. ISBN: 3-00-002234-1.

VDI 2006

VDI-Wärmeatlas. Berechnungsunterlagen für Druckverlust, Wärme- und Stoffübertragung. 10. Aufl. VDI. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3-540-25504-4.

WEBERPALS 2010

Weberpals, J.-P.: Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserschweißen. München: Utz 2010. ISBN: 978-3-8316-0995-6.

WILHELMI 2007

SCHUTZRECHT EP 1930 114 A1 (11.06.2008). Jenoptik Automatisierungstechnik. Pr.: 07.1 1.2007. Wilhelmi, B.: Laserschutzvorrichtung mit Sicherheitsabschaltung umfassend eine passive Laserschutzwand und eine Laserschutzfolie mit einem mit dem Laser verbundenen Sensor.

XIE & KAR 1999

Xie, J.; Kar, A.: Laser Welding of Thin Sheet Steel with Surface Oxidation. In: American Welding Society (Hrsg.): Welding Research Supplement 1999, S. 343-348.

YAGEO CORPORATION 2013

Yageo Corporation: Metal Film Resistors – MF0 series. Datenblatt. Online verfügbar unter: <http://www.reichelt.de/index.html?ACTION=7;LA=3;OPEN=0;INDEX=0;FILENAME=B400%252FMF01-01.pdf;SID=12U0I9L38AAAIAACbYiGEa05daacf48fa52ab4bd79205f1e724b8>, zuletzt geprüft am 26.01.2013.

ZÄH & BRAUNREUTHER 2010A

Zäh, M. F.; Braunreuther, S.: Lasersicherheit durch Hohlkammerschutzwände. In: VDI (Hrsg.): *wt Werkstatttechnik online*. Berlin: Springer 2010, S. 465-471.

ZÄH & BRAUNREUTHER 2010B

Zäh, M. F.; Braunreuther, S.: Abschlussbericht zum Forschungsprojekt "Entwicklung von technischen Anlagensicherheitskonzepten für Hochleistungslaser der neuesten Generation". Hrsg: *iwb*. Garching bei München 2010.

ZÄH & BRAUNREUTHER 2011

Zäh, M. F.; Braunreuther, S.: Kein sicherer Schutz: Lasersicherheit durch Laserschutzbrillen. *Der Praktiker* 62 (2011) 3, S. 94-96.

ZÄH ET AL. 2010

Zäh, M. F.; Braunreuther, S.; Daub, R.; Stadler, T.: Reflected Laser Radiation - Relevance for Laser Safety? In: BLZ (Hrsg.): *Proceedings of the Conference "LANE"*. Erlangen, 21.-24.09.2010: Science Direct 2010.

ZÄH ET AL. 2009A

Zäh, M. F.; Braunreuther, S.; Huber, S.; Oefele, F.; Trautmann, A.: Systematic Development of Safe High Performance Laser Applications - Knowing the Limits of Conventional Systems. In: LIA (Hrsg.): *ICALEO 2009*. Orlando, Florida, 2.-5.09.2009. Orlando, Florida, 2009, Paper 905.

ZÄH ET AL. 2009B

Zäh, M. F.; Braunreuther, S.; Krug, S.: Systematic development of safe high performance laser applications. In: Ostendorf, A. et al. (Hrsg.): *LIM 2009*. München, 15.-18.06.2009. Stuttgart: AT 2009, S. 305-311. ISBN: 978-3-00-027994-2.

ZÄH ET AL. 2008

Zäh, M. F.; Braunreuther, S.; Oefele, F.; Trautmann, A.: Sicurezza laser: un problema o un'opportunità? Mailand: *Applicazioni Laser* 22 (2008) 11, S. 50-53.

ZIRN & WEIKERT 2006

Zirn, O.; Weikert, S.: Modellbildung und Simulation hochdynamischer Fertigungssysteme. Eine praktische Einführung. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3-540-25817-5.

10 Firmen-, Einrichtungs- und Institutsverzeichnis

In den vorangegangenen Kapiteln werden in Bezug auf Produkte und Forschungsarbeiten Firmen, Einrichtungen und Institutionen genannt. Die folgende Tabelle gibt dazu nähere Informationen.

Name	Adresse und Homepage
Asea Brown Boveri Ltd. (ABB)	Affolternstrasse 44 8050 Zürich, Schweiz http://www.abb.com/
Amada Co. Ltd.	200 Ishida Kanagawa, 259-1196, Japan http://www.amada.co.jp/
Aptina Imaging Corp.	3080 North 1st Street San Jose, CA 95134, Vereinigte Staaten von Amerika http://www.aplina.com/
Berufsgenossenschaft Elektro, Textil, Feinmechanik (BGETF)	eingegliedert in: Berufsgenossenschaft Energie, Textil, Elektro, Medienerzeugnisse (BGETEM) Gustav-Heinemann-Ufer 130 50968 Köln, Deutschland http://www.bgetem.de/
Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz (BGIA)	eingegliedert in: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) Alte Heerstraße 111 53757 Sankt Augustin, Deutschland http://www.dguv.de/
Buck Chemisch-Technische Werke GmbH & Co. KG	Unternehmen ist nicht mehr existent.
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA)	Friedrich-Henkel-Weg 1-25 44149 Dortmund, Deutschland http://www.baua.de/de/Startseite.html

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)	Hannoversche Straße 28-30 10115 Berlin, Deutschland http://www.bmbf.de/
CAVITAR Ltd.	Kuokkamaantie 4A 33800 Tampere, Finnland http://www.cavitar.com/
CRGraph	Hermann-Gmeiner-Weg 8 81929 München, Deutschland http://www.crgraph.de/
Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)	Alte Heerstraße 111 53757 Sankt Augustin, Deutschland http://www.dguv.de/
EDAG GmbH & Co. KGaA	Reesbergstraße 1 36039 Fulda, Deutschland http://www.edag.de/
Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.	Hansastraße 27 c 80686 München, Deutschland http://www.fraunhofer.de/
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA)	eingegliedert in: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) Alte Heerstraße 111 53757 Sankt Augustin, Deutschland http://www.dguv.de/
Ingenieurbüro Goebel GmbH	De La Fosse Weg 26 64289 Darmstadt , Deutschland http://www.goebel-laser.de/
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der TUM (iwb)	Boltzmannstr.15 85748 Garching, Deutschland http://www.iwb.de/

IPG Laser GmbH	Siemensstrasse 7 57299 Burbach, Deutschland http://german.ipgphotonics.com/
KUKA Roboter GmbH	Zugspitzstraße 140 86165 Augsburg, Deutschland http://www.kuka-robotics.com/germany/de/
Laser Zentrum Hannover e. V. (LZH)	Hollerithallee 8 30419 Hannover, Deutschland http://www.lzh.de/
Lasermet Ltd.	Hankinson Road 137 Dorset, BH9 1HR, Großbritannien http://www.lasermet.com/
Laservision GmbH	Siemensstr. 6 90766 Fürth, Deutschland http://www.uvex-laservision.de/
MathWorks Inc.	3 Apple Hill Drive Natick, MA 01760, Vereinigte Staaten von Amerika http://www.mathworks.com/index.html
MVtec Software GmbH	Neherstraße 1 81675 München, Deutschland http://www.mvtec.com/
National Instruments Corp.	11500 North Mopac Expwy Austin, TX 78759-3504, Vereinigte Staaten von Amerika http://www.ni.com/
Omega Engineering Inc.	P.O. Box 4047 One Omega Drive Stamford, CT 06907-0047, Vereinigte Staaten von Amerika http://www.omega.com/

Ophir Optronics Solutions Ltd.	P.O. Box 45021, Har Hotzvim, 9145001 Jerusalem, Israel http://www.ophiropt.com/
Osram Opto Semiconductors GmbH	Leibnizstr. 4 93055 Regensburg, Deutschland http://www.osram-os.com
Paletti Profilsysteme GmbH & Co. KG	Gewerbepark Meißen 17 32423 Minden, Deutschland https://www.paletti.de/
Photonfocus AG	Bahnhofplatz 10 8853 Lachen, Schweiz http://www.photonfocus.com/
Siemens AG	Wittelsbacherplatz 2 80333 München, Deutschland http://www.siemens.com/
Sigma GmbH	Carl-Zeiss-Str. 10/2 63322 Rödermark, Deutschland http://www.sigma-foto.de/
Verein Deutscher Ingenieure e. V. (VDI)	Westendstraße 199 80686 München, Deutschland www.vdi.de/
Vision Research Inc.	100 Dey Rd. Wayne, NJ 07470, Vereinigte Staaten von Amerika http://www.visionresearch.com/
Yageo Corp.	Baoqiao Rd. 233 231 New Taipei City, Taiwan http://www.yageo.com

Anhang

A1 Gemessene Schutzzeiten

Versuch	d in mm	2	3	3	3	2	3	3	1	2	1	2	1
	P_L in kW	4,5	8	8	1	1	4,5	4,5	4,5	8	4,5	4,5	1
	z in mm	590	800	590	380	590	800	590	590	590	800	380	380
1	Gemessene Schutzzeiten in s	4,1	3,6	2,6	65,2	35,5	7,2	4,9	2,9	2,3	3,6	3,3	12,7
2		3,9	3,6	2,7	67,0	43,1	7,0	4,7	2,7	2,4	3,8	3,6	13,2
3		3,2	3,6	2,4	72,8	36,1	7,0	4,8	2,8	2,3	3,7	3,7	13,6
4		3,5	3,4	2,7	72,2	38,2	6,8	5,4	2,6	2,2	3,6	3,3	12,9
5		3,5	3,4	2,9	73,7	41,0	6,8	5,1	5,2	2,2	3,9	3,4	13,8
6		3,7	3,5	3,1	72,0	39,8	6,9	4,6	2,9	2,3	3,5	3,4	13,9
7		3,5	3,6	2,5	66,4	35,4	7,0	5,0	2,6	2,3	3,4	3,7	12,3
8		3,5	3,7	2,9	70,0	35,6	7,0	5,3	2,7	2,1	3,4	3,5	12,9
9		3,6	3,4	2,8	71,5	38,2	7,3	5,4	2,8	2,5	3,5	3,2	11,4
10		3,4	3,4	2,4	73,6	40,1	7,2	5,0	2,9	2,4	3,4	3,3	14,3
11		3,7	3,5	2,4	72,7	34,6	6,8	4,8	2,9	2,5	3,8	3,6	13,0
12		3,8	3,3	2,8	72,6	35,7	7,3	5,1	2,7	2,4	3,7	3,3	14,2
13		3,8	3,5	2,8	71,8	37,5	7,4	5,3	3,0	2,5	3,7	3,4	12,6
14		3,6	3,2	2,8	76,5	34,4	7,1	5,0	2,8	2,4	3,6	3,4	13,9
15		3,9	3,5	3,0	78,2	41,6	6,9	5,0	3,0	2,3	3,8	3,5	13,3
16		3,6	3,4	2,9	68,4	38,5	6,9	5,1	2,8	2,4	3,8	3,6	13,8
17		4,2	3,4	2,7	75,2	31,3	6,9	5,1	2,7	2,5	3,6	3,4	12,5
18		3,4	3,5	2,8	70,7	35,5	7,2	5,1	3,0	2,5	3,8	3,4	13,5
19		3,7	3,7	2,7	74,4	35,8	6,8	5,1	2,8	2,3	3,6	3,5	11,9
20		3,8	3,5	2,4	74,7	35,9	6,8	5,1	2,9	2,5	3,6	3,5	13,3

Tabelle 22: In Versuchen ermittelte Schutzzeiten (zwanzigfache Versuchswiederholung); Einzelplatten-Schutzwand; Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl); Multimode-Faserlaser; $\lambda = 1070$ nm; $f = 460$ mm; eine Platte; Variation der Plattendicke d , der Laserleistung P_L und des Abstands z vom Fokuspunkt

Versuch	d in mm	1	1	3	1	1	3	3	2	3
	P_L in kW	4,5	8	8	1	4,5	4,5	4,5	4,5	8
	z in mm	590	590	590	380	800	800	380	590	800
1	Gemessene Schutzzeiten in s	3,3	1,5	3,1	25,3	3,9	28,8	14,3	5,6	8,7
2		3,3	1,8	3,8	27,2	3,9	20,2	14,7	4,5	9,3
3		3,1	1,9	2,9	26,0	3,6	28,5	13,4	5,2	9,6
4		2,7	1,6	2,8	29,9	4,2	26,7	15,0	4,9	8,7
5		2,4	1,9	2,7	41,4	3,8	22,0	15,6	4,7	9,0
6		3,1	1,7	3,4	21,0	3,7	26,7	13,7	4,5	8,8
7		2,8	1,9	4,1	29,4	3,6	28,6	14,9	5,1	8,8
8		3,0	1,6	2,9	21,4	3,3	24,7	14,7	4,5	7,5
9		3,3	2,0	2,5	27,3	3,9	25,6	14,9	4,7	7,9
10		2,8	1,6	3,3	28,9	4,0	28,3	14,1	4,6	9,2
11		3,0	1,6	3,0	27,9	4,0	28,1	16,1	5,0	8,0
12		2,5	1,4	3,1	30,3	3,9	26,9	15,1	5,0	8,2
13		2,8	1,5	3,7	37,4	3,9	23,4	15,2	4,9	8,0
14		3,1	1,9	3,6	29,2	4,1	28,8	14,6	5,0	8,5
15		3,1	1,5	3,7	35,4	3,6	26,6	17,2	4,8	9,2
16		3,1	1,4	3,1	19,2	3,6	17,6	15,9	5,0	9,3
17		3,2	1,6	3,6	36,9	4,1	30,0	16,4	5,1	9,7
18		2,6	1,5	3,4	39,3	3,8	24,8	13,7	4,6	9,5
19		2,9	1,6	3,0	34,5	4,0	22,9	14,8	5,9	9,7
20		2,8	1,8	3,5	30,8	3,6	25,8	14,6	4,5	9,3

Tabelle 23: In Versuchen ermittelte Schutzzeiten (zwanzigfache Versuchswiederholung); Einzelplatten-Schutzwand; Werkstoff 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung); Multimode-Faserlaser; $\lambda = 1070$ nm; $f = 460$ mm; eine Platte; Variation der Plattendicke d , der Laserleistung P_L und des Abstands z vom Fokuspunkt

Versuch	d in mm	2	2	1	1	2	2	1	2	1
	P_L in kW	8	5	2	8	2	5	5	2	2
	b in mm	75	25	75	75	25	50	75	25	25
1	Gemessene Schutzzeiten in s	3,6	5,4	21,3	2,8	18,6	6,1	4,2	20,2	10,5
2		3,1	5,4	21,0	2,5	20,5	5,9	3,8	19,5	10,5
3		3,4	5,7	19,2	2,6	19,7	6,0	4,0	19,6	10,1
4		3,4	5,7	21,6	2,3	19,5	5,7	4,1	20,7	10,8
5		3,3	5,5	20,6	2,3	19,9	6,0	4,2	20,5	10,4
6		3,9	5,3	20,8	2,4	20,0	5,8	3,9	21,3	10,0
7		3,8	5,3	20,7	2,4	19,6	6,2	4,0	22,8	10,9
8		3,7	5,3	20,1	2,6	20,3	5,8	3,9	19,6	10,9
9		3,8	5,6	20,6	2,5	19,7	6,1	4,0	22,8	11,4
10		3,4	5,7	21,6	2,5	20,5	6,0	3,9	20,6	11,0
11		3,7	5,7	19,4	2,6	20,2	5,8	4,2	20,4	10,4
12		3,4	5,7	19,8	2,6	19,3	5,8	4,2	22,8	11,1
13		3,6	5,6	21,1	2,4	20,1	5,6	4,1	17,2	11,2
14		3,6	5,4	21,3	2,6	19,3	5,8	4,2	19,2	10,5
15		5,9	5,8	20,0	2,3	20,3	5,7	4,1	20,2	10,7
16		3,8	5,8	20,7	2,5	21,0	5,9	3,9	20,0	10,8
17		3,5	5,3	21,7	2,2	20,7	5,7	4,1	20,5	10,6
18		3,8	5,8	19,1	2,2	20,2	6,1	4,2	21,5	10,7
19		3,3	5,4	22,1	2,6	21,1	5,8	4,0	19,7	10,4
20		2,9	5,4	23,3	2,6	21,2	5,8	4,1	22,4	10,5

Tabelle 24: In Versuchen ermittelte Schutzzeiten (zwanzigfache Versuchswiederholung); Hohlkammer-Schutzwand; Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl); Multimode-Faserlaser; $\lambda = 1070$ nm; $f = 460$ mm; Abstand vom Fokuspunkt $z = 380$ mm; zwei Platten; Variation der Plattendicke d , der Laserleistung P_L und der Hohlkammerbreite b

Versuch	d in mm	2	1	1	2	2	1	1	2
	P_L in kW	2	2	2	2	8	5	5	5
	b in mm	75	75	25	25	75	25	75	50
1	Gemessene Schutzzeiten in s	96,2	19,0	18,6	163,2	10,0	5,0	3,6	23,3
2		120,6	19,6	18,84	124,0	9,9	5,0	4,3	21,8
3		109,5	21,3	19,89	109,8	10,2	4,4	3,3	19,5
4		97,2	19,1	19,9	126,4	12,6	4,5	3,6	21,0
5		80,3	21,3	22,6	111,9	10,5	4,7	4,2	22,6
6		113,8	26,3	20,2	144,8	10,9	3,9	4,0	23,0
7		102,3	21,6	16,5	119,7	9,9	3,7	3,4	23,0
8		97,6	18,1	13,1	150,7	9,6	4,1	3,5	23,3
9		104,4	21,0	17,91	122,3	10,3	3,9	3,7	24,1
10		104,7	19,7	19,7	142,3	10,3	4,2	3,4	23,8
11		96,9	17,9	17,3	116,7	10,7	4,3	3,5	22,2
12		112,8	17,9	17,2	136,2	11,1	4,0	3,4	22,9
13		109,3	20,3	21,6	116,9	10,2	4,6	3,5	23,2
14		95,2	24,1	22,1	94,5	9,9	5,0	3,5	21,9
15		120,5	24,1	19,2	152,8	10,3	4,3	3,4	23,3
16		119,4	20,7	24,3	147,2	9,6	4,5	3,7	23,7
17		100,3	16,4	20,7	99,0	10,9	4,3	4,2	25,7
18		124,9	20,7	21,9	121,5	11,1	4,3	3,4	22,5
19		116,1	19,7	12,8	104,5	10,2	4,6	3,4	20,6
20		104,4	19,7	16,3	156,8	12,6	3,9	3,4	24,0

Tabelle 25: In Versuchen ermittelte Schutzzeiten (zwanzigfache Versuchswiederholung); Hohlkammer-Schutzwand; Werkstoff 3.3535 (Aluminium-Knetlegierung); Multimode-Faserlaser; $\lambda = 1070$ nm; $f = 460$ mm; Abstand vom Fokuspunkt $z = 380$ mm; zwei Platten; Variation der Plattendicke d , der Laserleistung P_L und der Hohlkammerbreite b

A2 Intensitäts-Mittelwertkarten

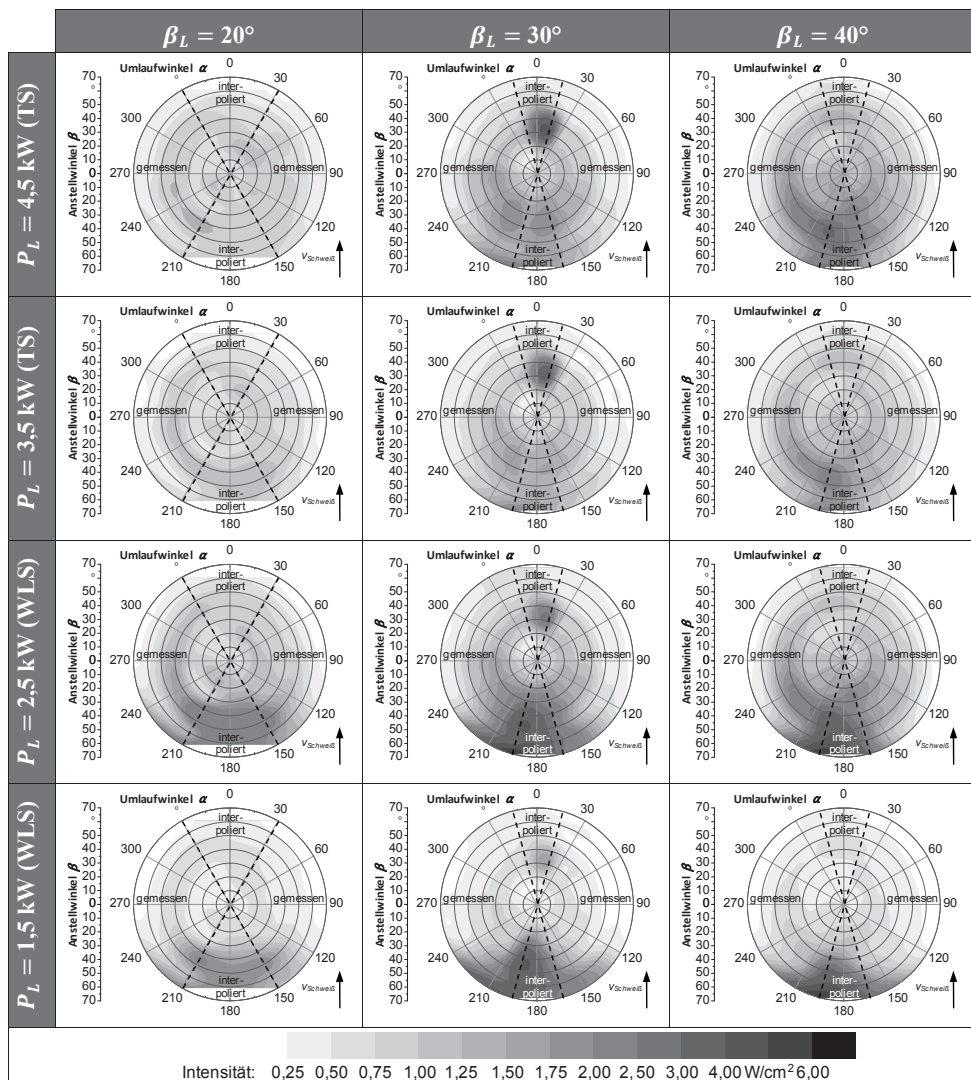


Tabelle 26: Intensitäts-Mittelwertkarten (mit Strahlungsmessbogen gemessen); Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl); Einstrahlung schleppend; Variation des Lasereinstrahlwinkels β_L und der Laserleistung P_L ; Schweißgeschwindigkeiten, -energien und -intensitäten nach Tabelle 2 (S. 62)

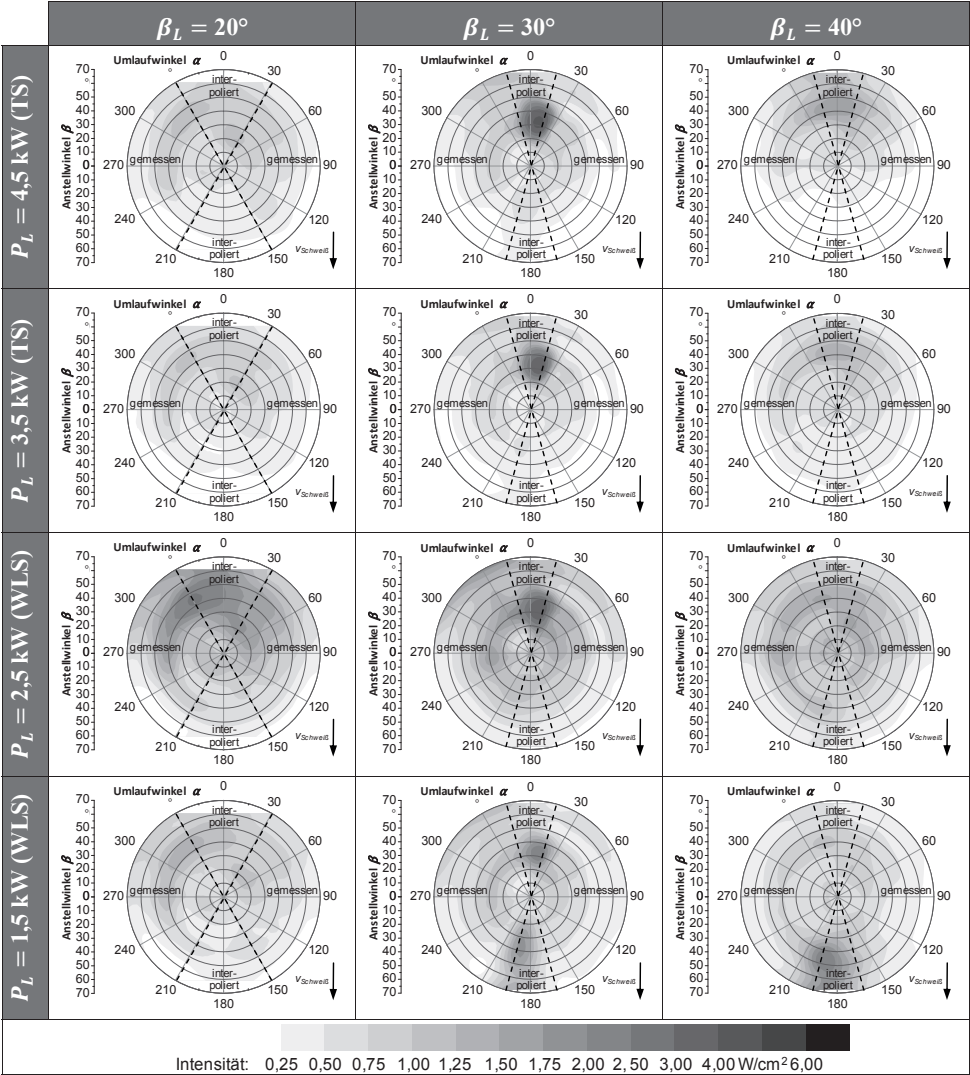


Tabelle 27: Intensitäts-Mittelwertkarten (mit Strahlungsmessbogen gemessen);
Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl); Einstrahlung stechend;
Variation des Lasereinstrahlwinkels β_L und der Laserleistung P_L ;
Schweißgeschwindigkeiten, -energien und -intensitäten nach Tabelle 2 (S. 62)

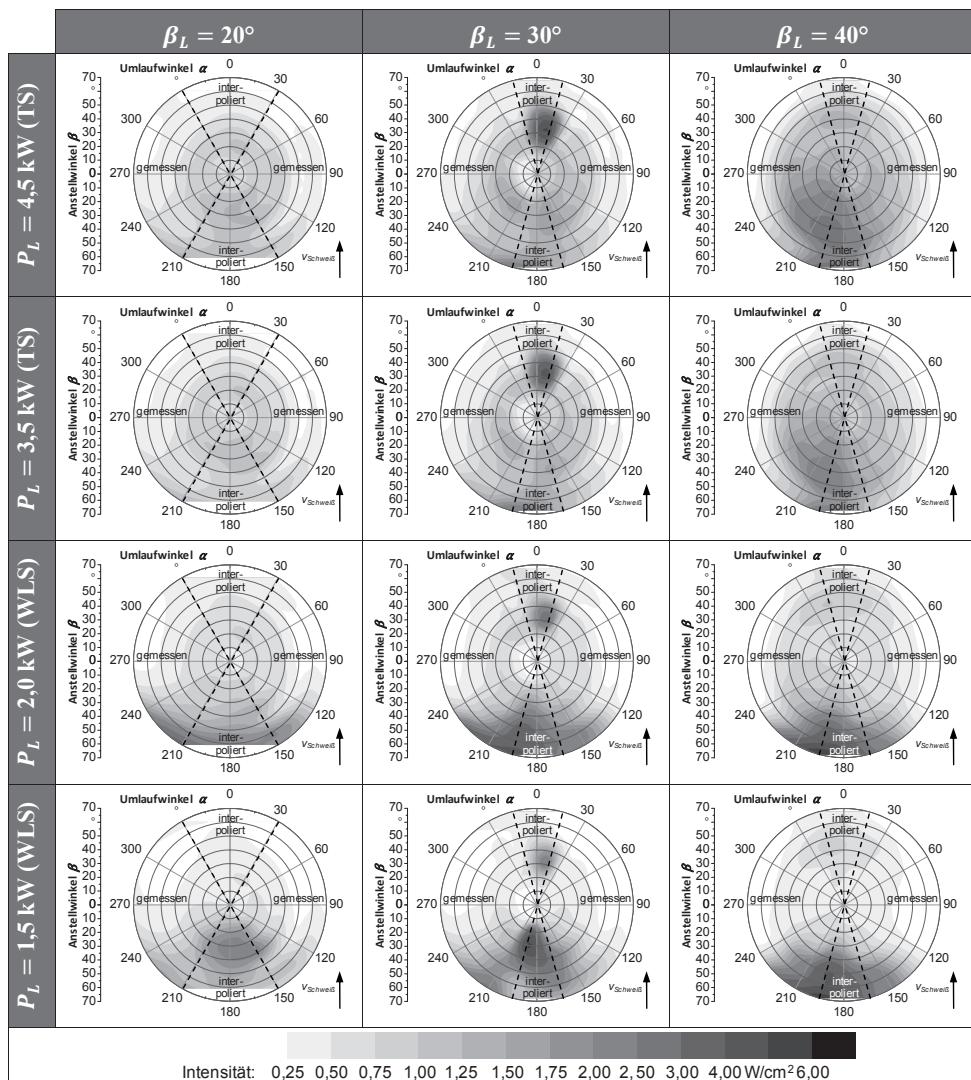


Tabelle 28: Intensitäts-Mittelwertkarten (mit Strahlungsmessbogen gemessen); Werkstoff 1.4301 (Edelstahl); Einstrahlung schleppend; Variation des Lasereinstrahlwinkels β_L und der Laserleistung P_L ; Schweißgeschwindigkeiten, -energien und -intensitäten nach Tabelle 2 (S. 62)

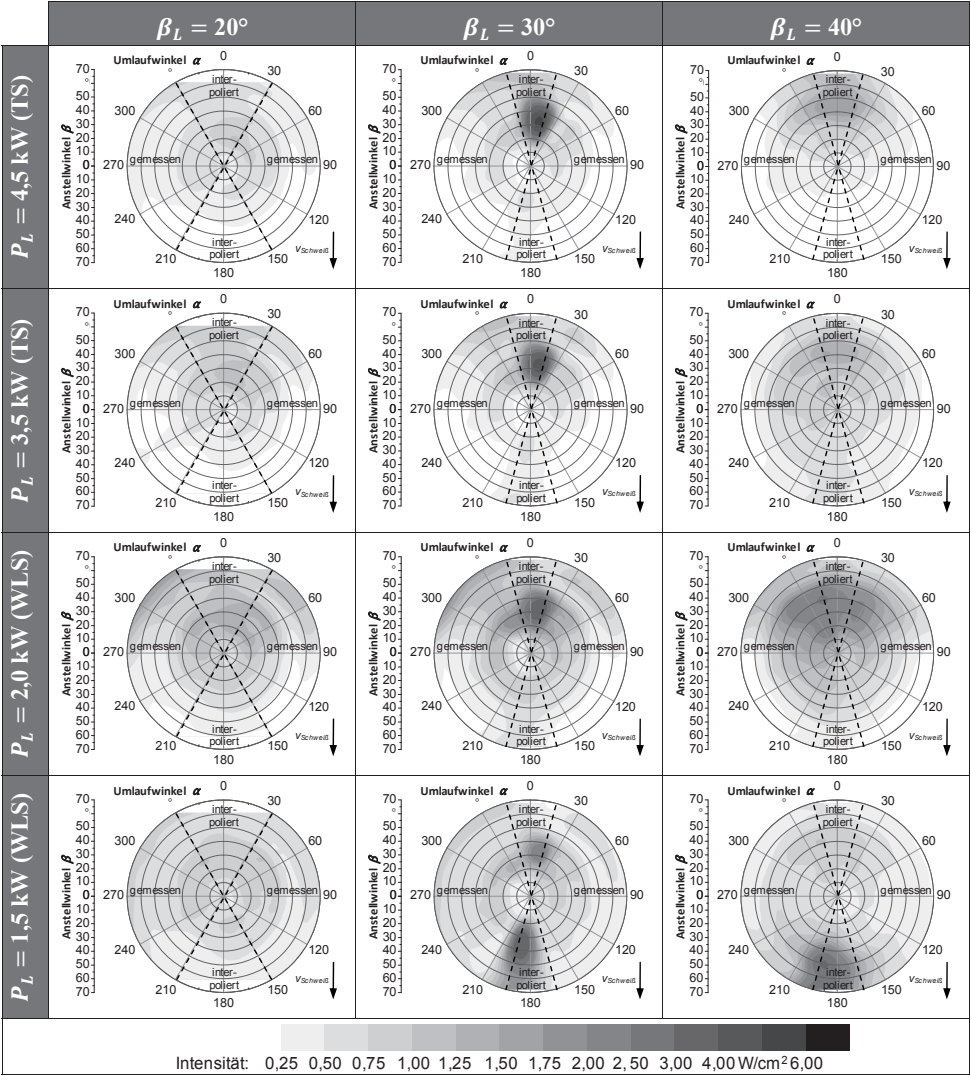


Tabelle 29: Intensitäts-Mittelwertkarten (mit Strahlungsmessbogen gemessen);
Werkstoff 1.4301 (Edelstahl); Einstrahlung stechend; Variation des
Lasereinstrahlwinkels β_L und der Laserleistung P_L ;
Schweißgeschwindigkeiten, -energien und -intensitäten nach Tabelle
2 (S. 62)

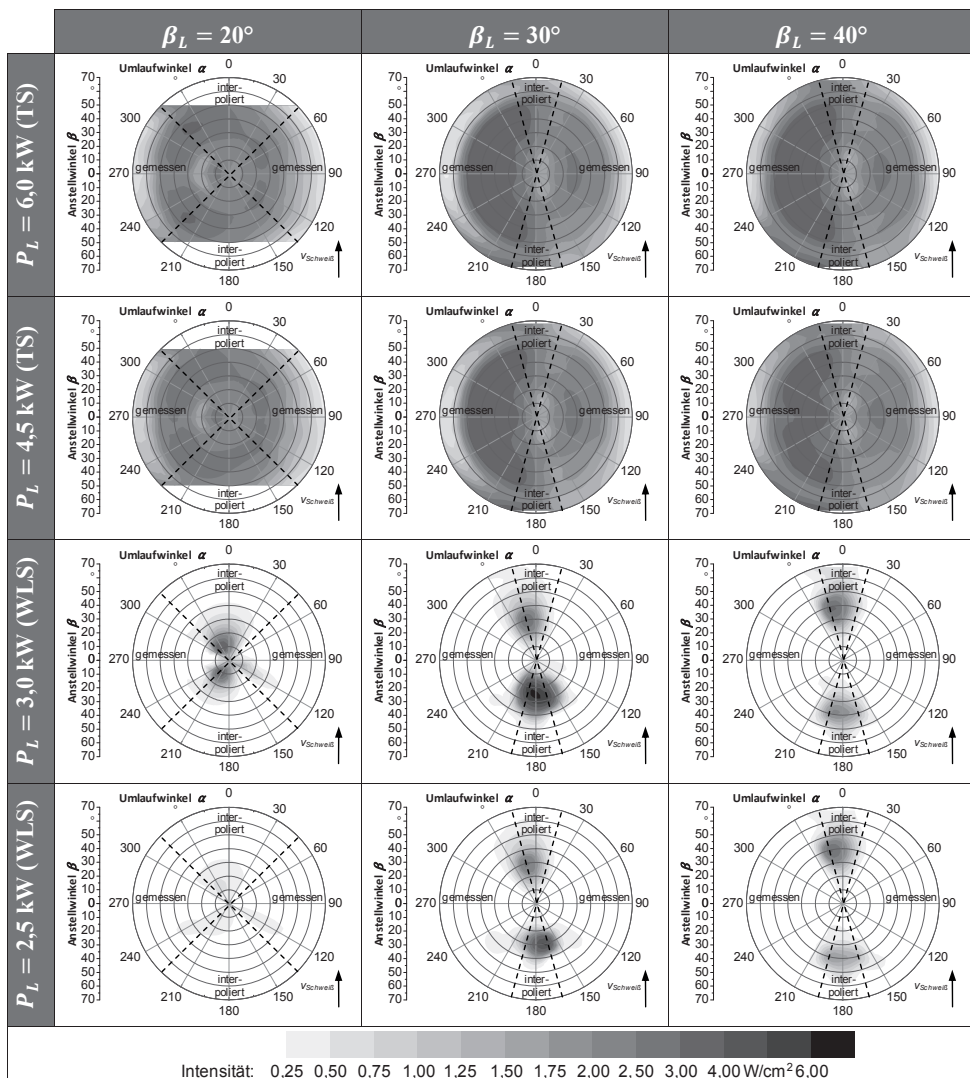


Tabelle 30: Intensitäts-Mittelwertkarten (mit Strahlungsmessbogen gemessen); Werkstoff 3.3206 (Aluminium-Knetlegierung); Einstrahlung schleppend; Variation des Lasereinstrahlwinkels β_L und der Laserleistung P_L ; Schweißgeschwindigkeiten, -energien und -intensitäten nach Tabelle 2 (S. 62)

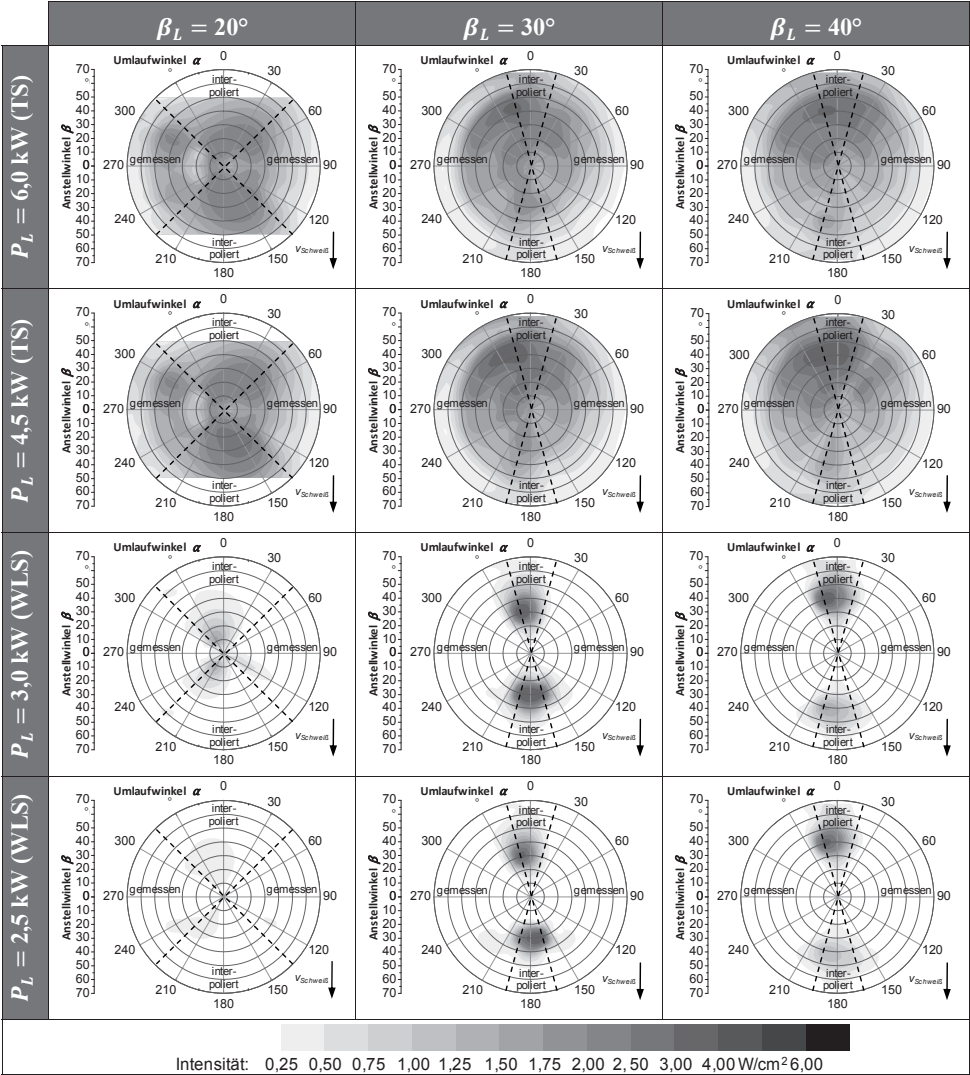


Tabelle 31: Intensitäts-Mittelwertkarten (mit Strahlungsmessbogen gemessen); Werkstoff 3.3206 (Aluminium-Knetlegierung); Einstrahlung stechend; Variation des Lasereinstrahlwinkels β_L und der Laserleistung P_L ; Schweißgeschwindigkeiten, -energien und -intensitäten nach Tabelle 2 (S. 62)

A3 Intensitäts-Standardabweichungskarten

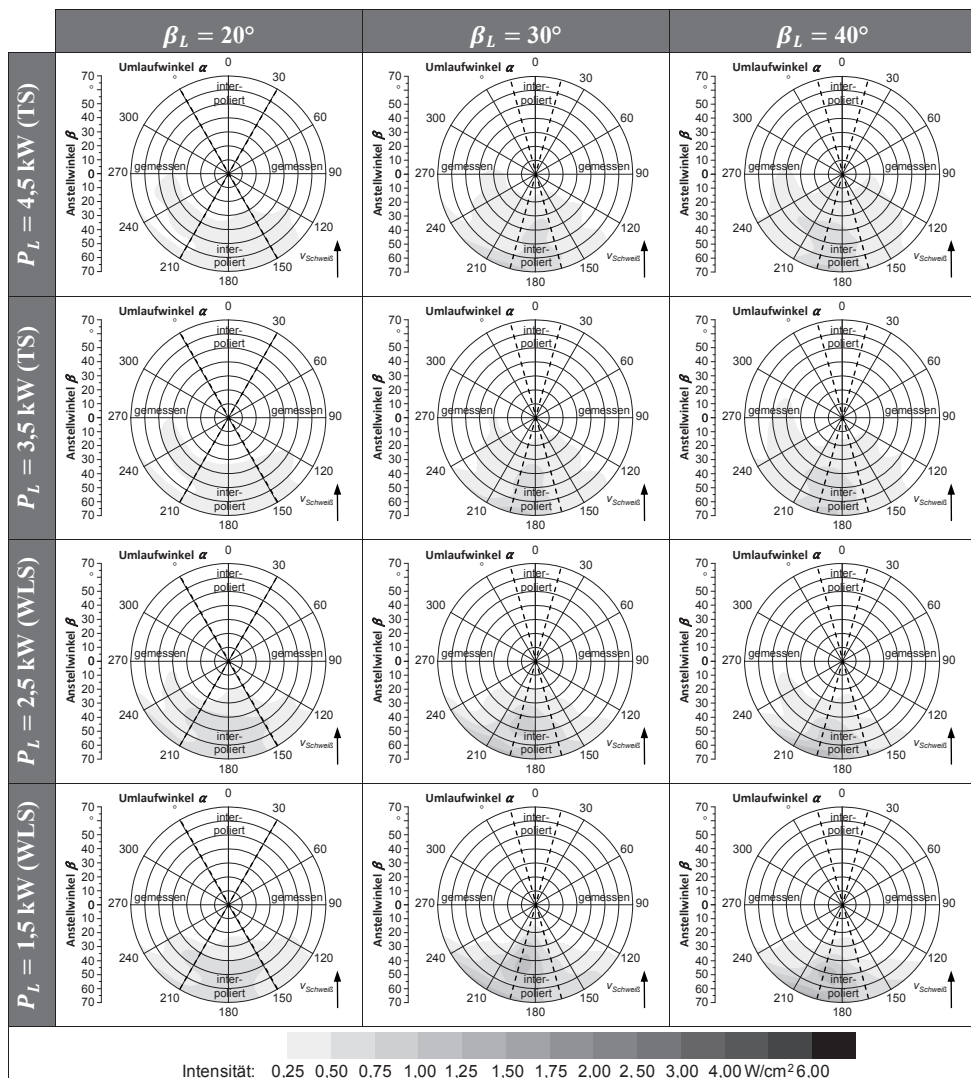


Tabelle 32: Intensitäts-Standardabweichungskarten (mit Strahlungsmessbogen gemessen); Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl); Einstrahlung schleppend; Variation des Lasereinstrahlungswinkels β_L und der Laserleistung P_L ; Schweißgeschwindigkeiten, -energien und -intensitäten nach Tabelle 2 (Seite 62)

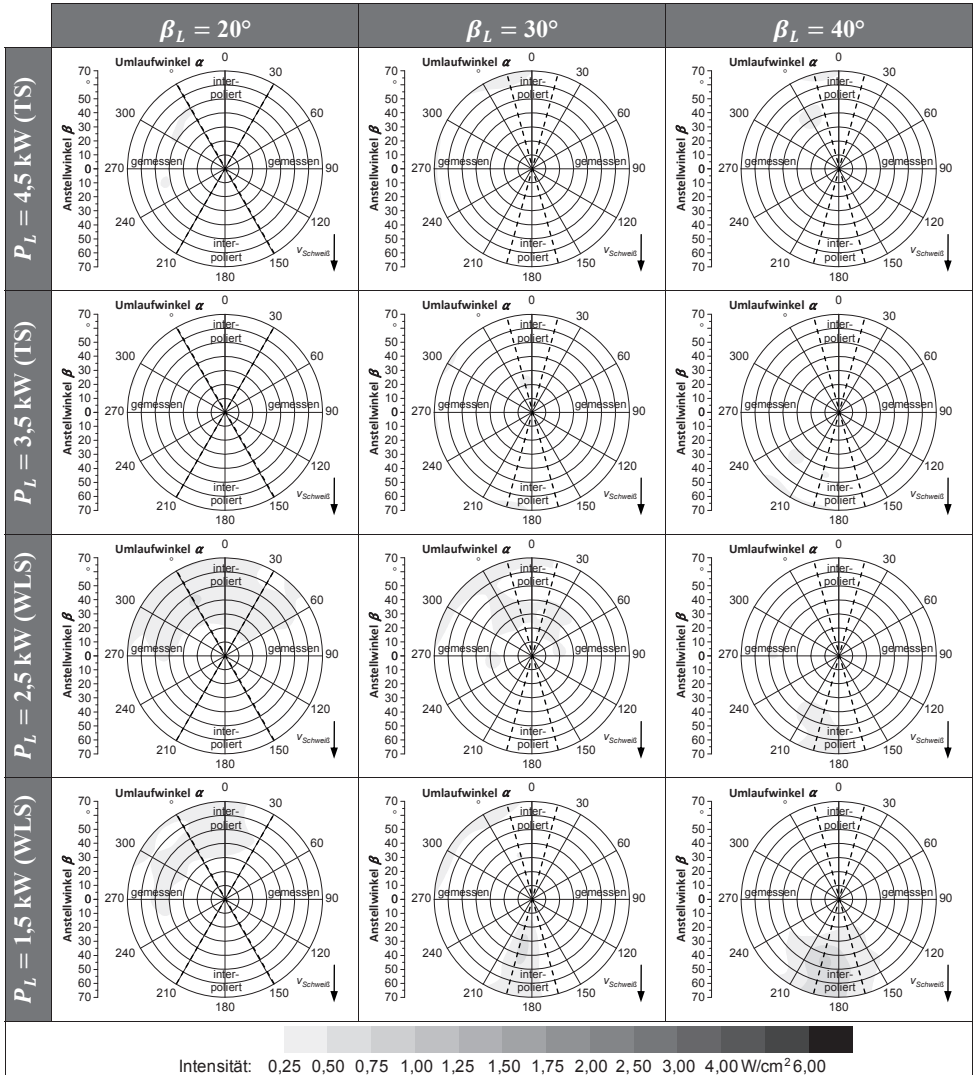


Tabelle 33: Intensitäts-Standardabweichungskarten(mit Strahlungsmessbogen gemessen); Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl); Einstrahlung stechend; Variation des Lasereinstrahlwinkels β_L und der Laserleistung P_L ; Schweißgeschwindigkeiten, -energien und -intensitäten nach Tabelle 2 (S. 62)

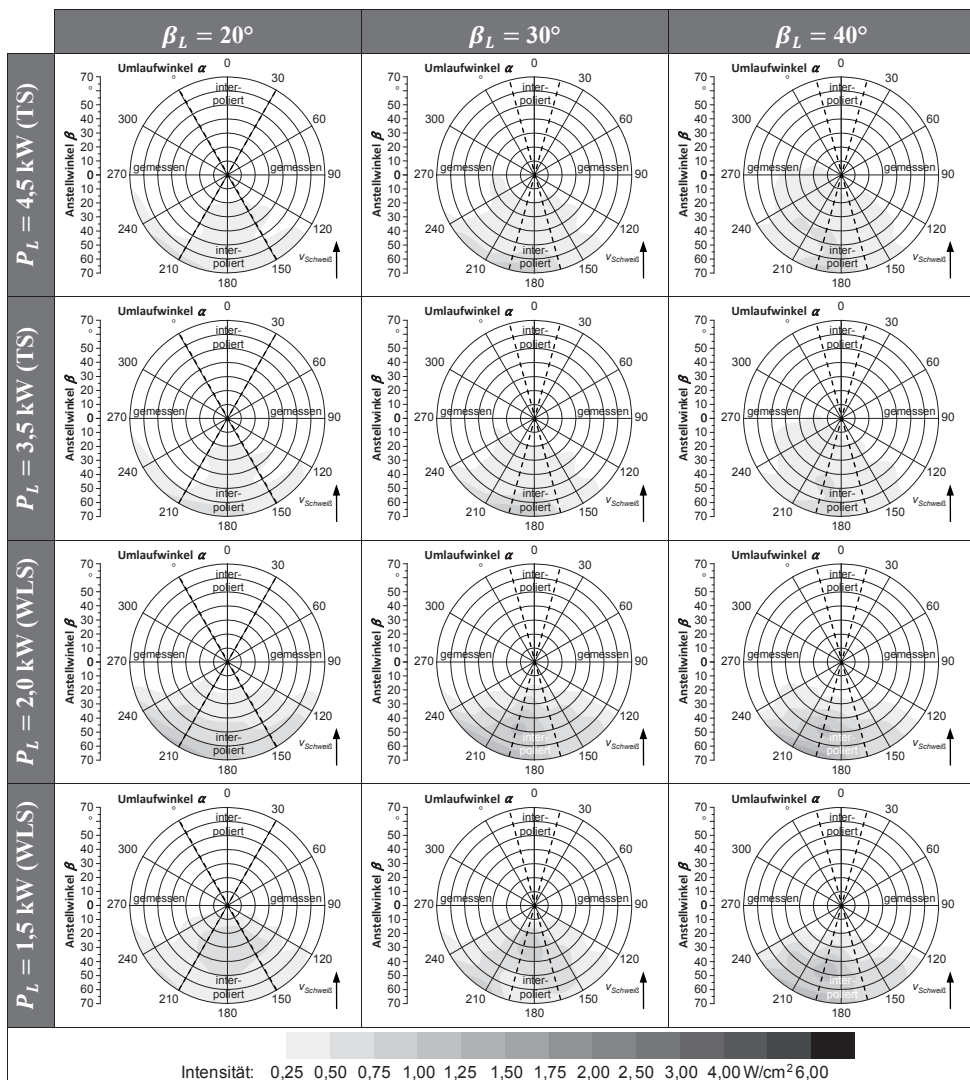


Tabelle 34: Intensitäts-Standardabweichungskarten (mit Strahlungsmessbogen gemessen); Werkstoff 1.4301 (Edelstahl); Einstrahlung schleppend; Variation des Lasereinstrahlwinkels β_L und der Laserleistung P_L ; Schweißgeschwindigkeiten, -energien und -intensitäten nach Tabelle 2 (S. 62)

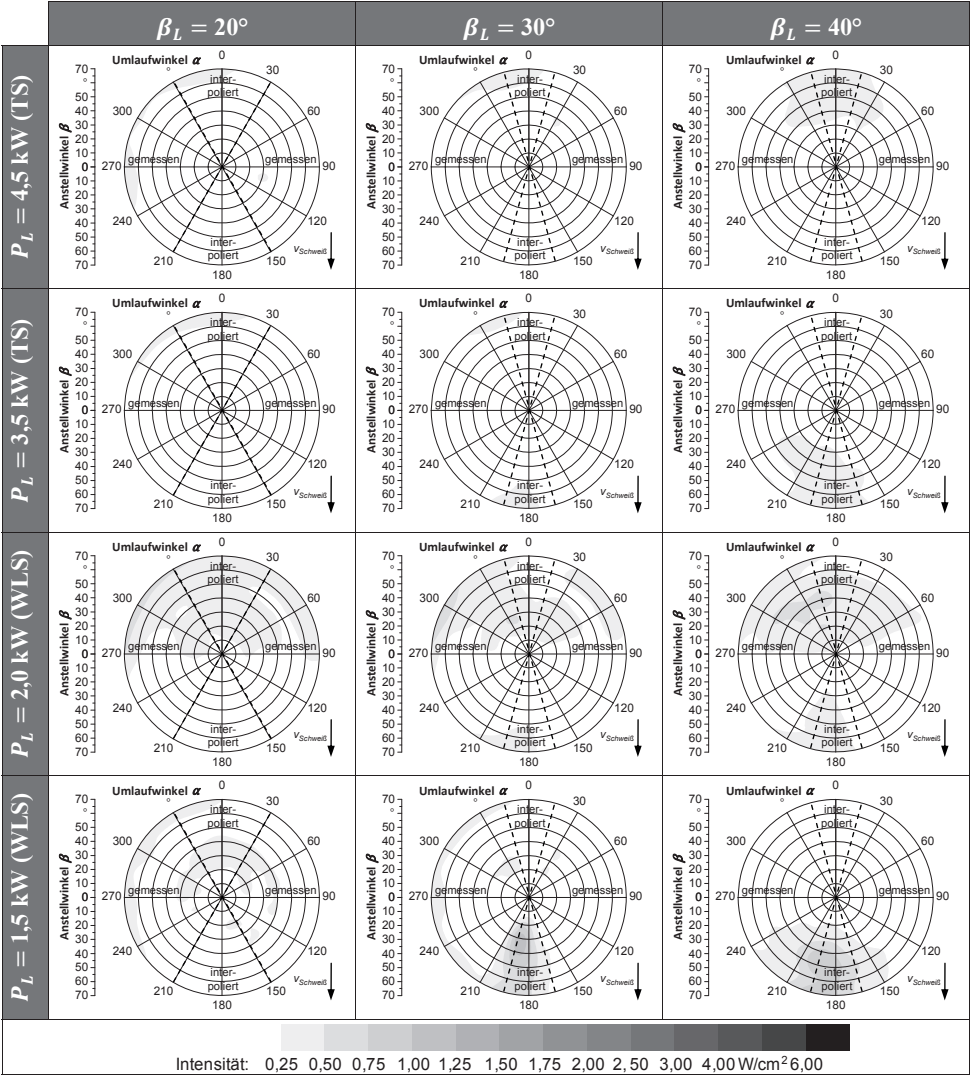


Tabelle 35: Intensitäts-Standardabweichungskarten (mit Strahlungsmessbogen gemessen); Werkstoff 1.4301 (Edelstahl); Einstrahlung stechend; Variation des Lasereinstrahlwinkels β_L und der Laserleistung P_L ; Schweißgeschwindigkeiten, -energien und -intensitäten nach Tabelle 2 (S. 62)

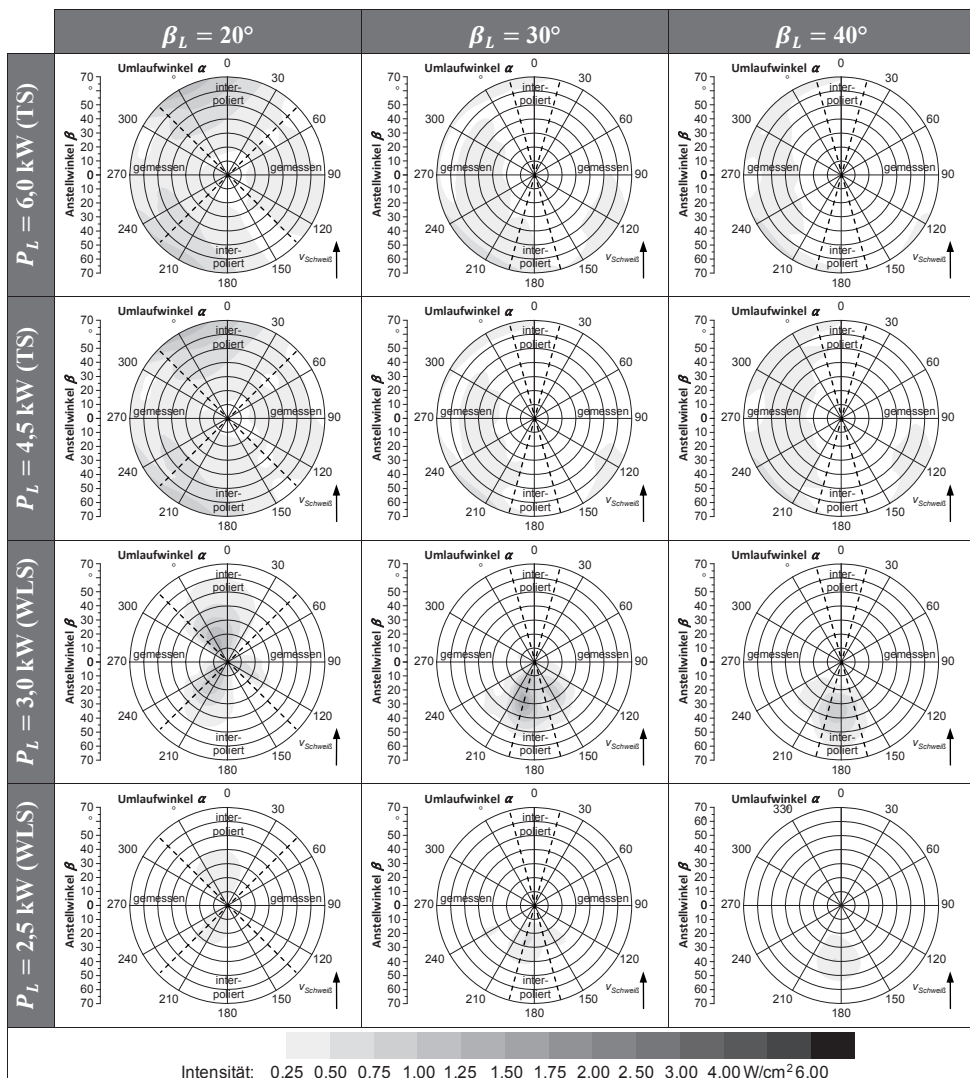


Tabelle 36: Intensitäts-Standardabweichungskarten (mit Strahlungsmessbogen gemessen); Werkstoff 3.3206 (Aluminium-Knetlegierung); Einstrahlung schleppend; Variation des Lasereinstrahlwinkels β_L und der Laserleistung P_L ; Schweißgeschwindigkeiten, -energien und -intensitäten nach Tabelle 2 (S. 62)

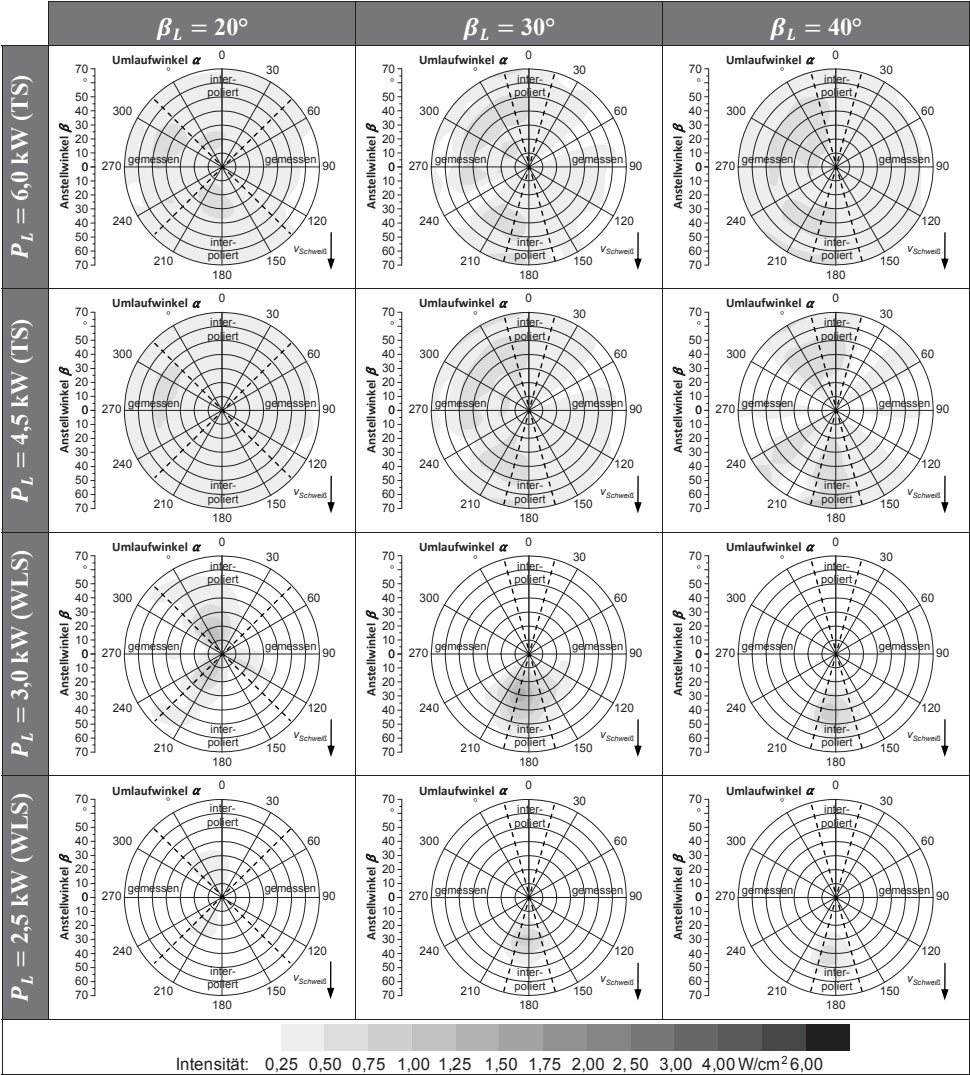


Tabelle 37: Intensitäts-Standardabweichungskarten (mit Strahlungsmessbogen gemessen); Werkstoff 3.3206 (Aluminium-Knetlegierung); Einstrahlung stechend; Variation des Lasereinstrahlwinkels β_L und der Laserleistung P_L ; Schweißgeschwindigkeiten, -energien und -intensitäten nach Tabelle 2 (S. 62)

A4 Kalorimetermesswerte

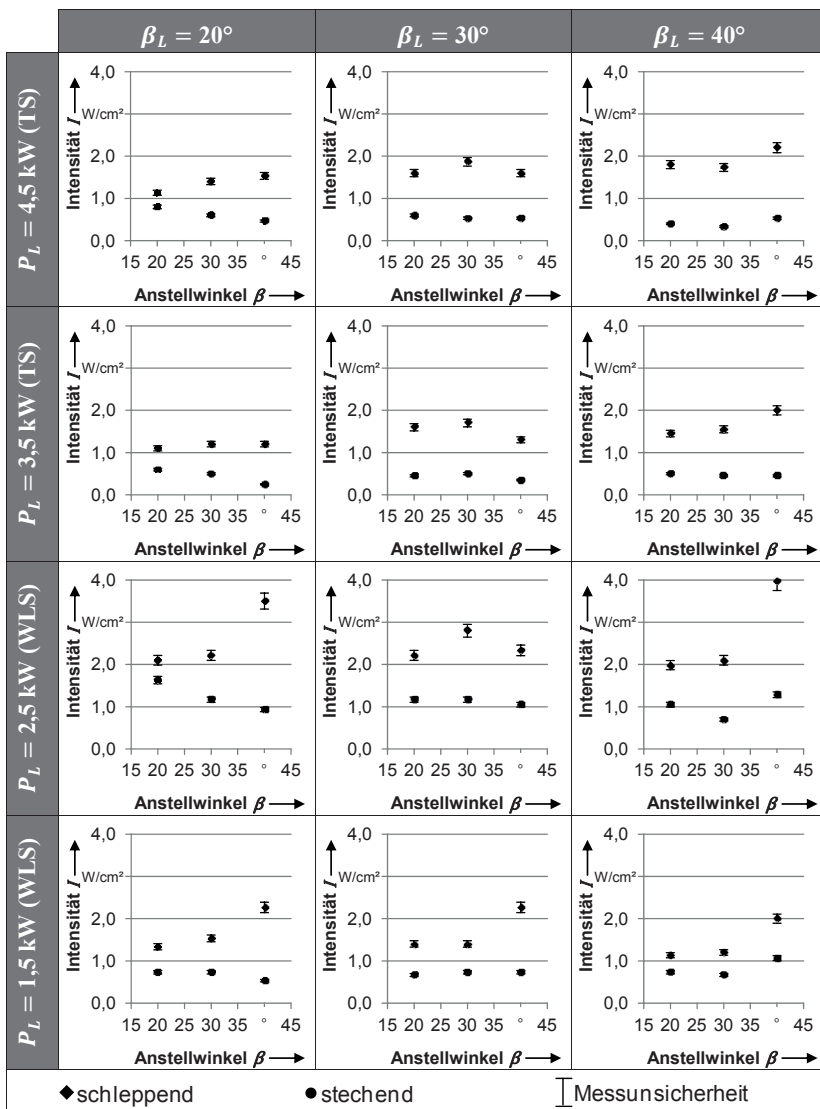


Tabelle 38: Intensitätswerte mit Kalorimeter gemessen; Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl); Variation des Lasereinstrahlwinkels β_L und der Laserleistung P_L ; Schweißgeschwindigkeiten, -energien und -intensitäten nach Tabelle 2 (S. 62)

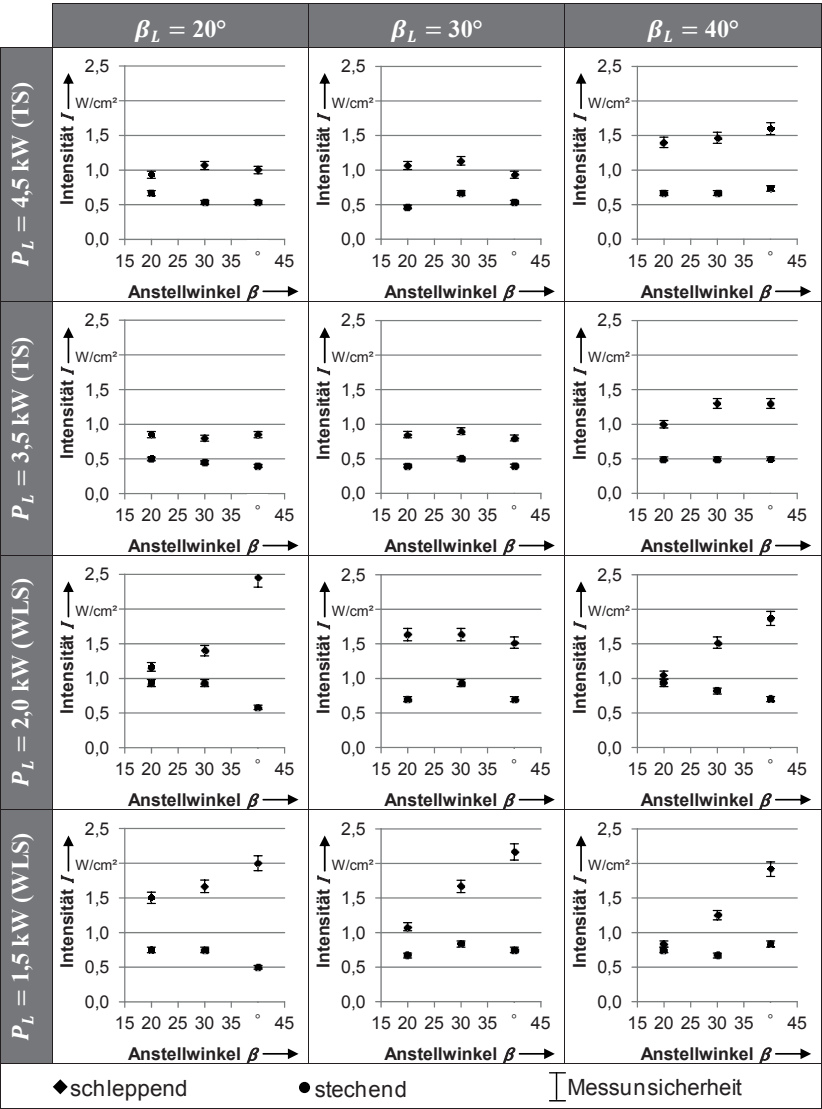


Tabelle 39: Intensitätswerte mit Kalorimeter gemessen; Werkstoff I.4301 (Edelstahl); Variation des Lasereinstrahlwinkels β_L und der Laserleistung P_L ; Schweißgeschwindigkeiten, -energien und -intensitäten nach Tabelle 2 (S. 62)

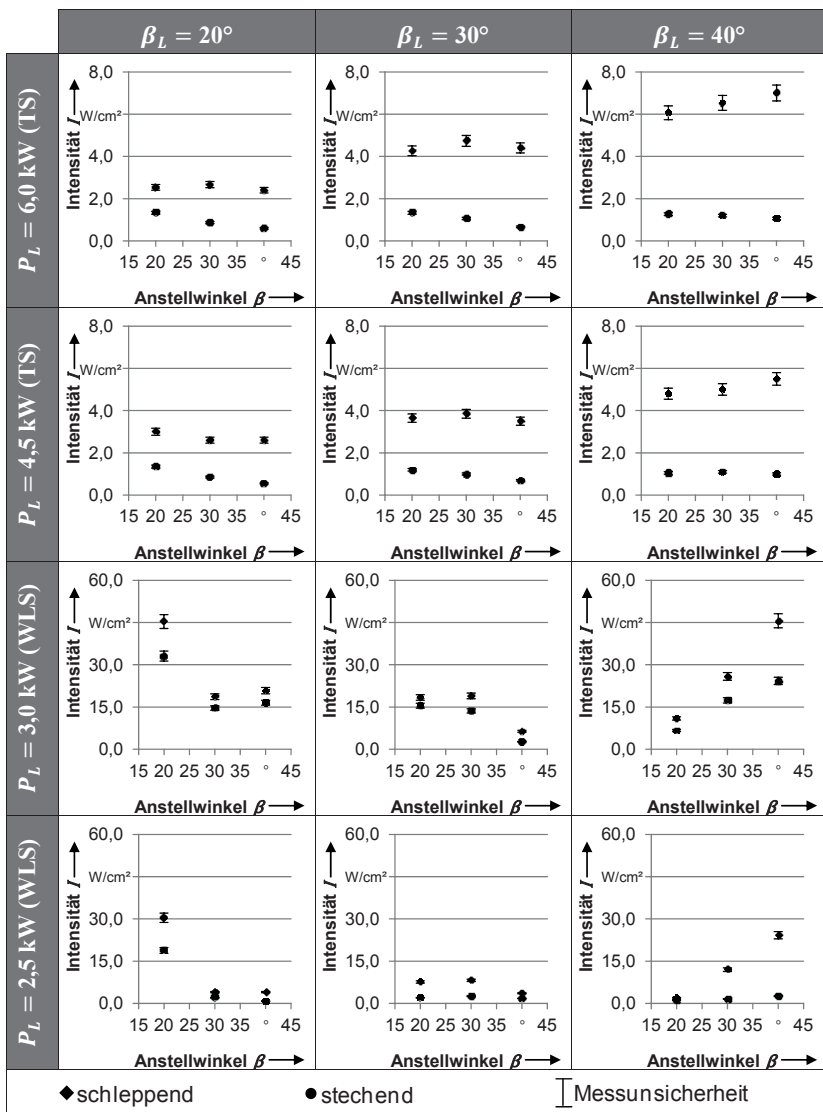


Tabelle 40: Intensitätswerte mit Kalorimeter gemessen; Werkstoff 3.3206 (Aluminium-Knetlegierung); Variation des Lasereinstrahlwinkels β_L und der Laserleistung P_L ; Schweißgeschwindigkeiten, -energien und -intensitäten nach Tabelle 2 (S. 62)

A5 Prozesszonengeometrien

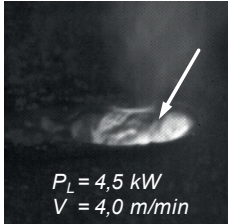
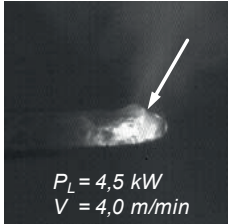
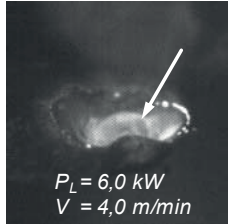
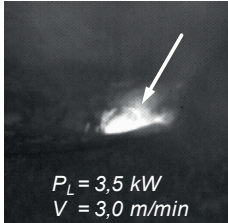
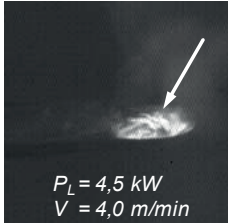
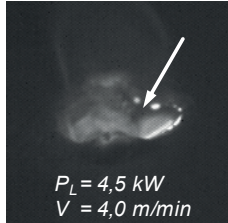
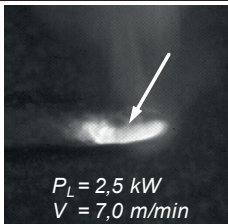
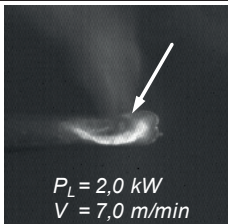
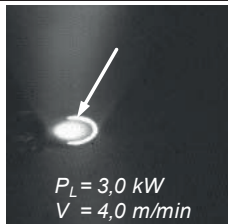
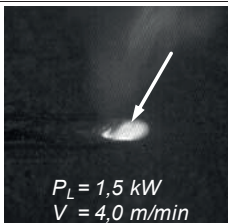
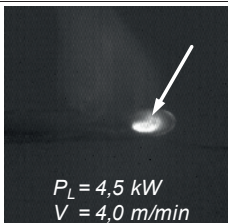
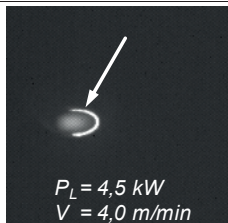
		Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl)	Werkstoff 1.4301 (Edelstahl)	Werkstoff 3.3206 (Aluminium- Knetlegierung)
$\beta_L = 30^\circ$ schleppend	Tiefschweißen	 $P_L = 4,5 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$	 $P_L = 4,5 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$	 $P_L = 6,0 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$
		 $P_L = 3,5 \text{ kW}$ $V = 3,0 \text{ m/min}$	 $P_L = 4,5 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$	 $P_L = 4,5 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$
	Wärmeleitungsschweißen	 $P_L = 2,5 \text{ kW}$ $V = 7,0 \text{ m/min}$	 $P_L = 2,0 \text{ kW}$ $V = 7,0 \text{ m/min}$	 $P_L = 3,0 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$
		 $P_L = 1,5 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$	 $P_L = 4,5 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$	 $P_L = 4,5 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$
	→ Laserstrahl			

Tabelle 41: Mittels Hochgeschwindigkeitskamera erstellte Momentaufnahmen der Prozesszonengeometrien der in Abschnitt 4.4.1 (S. 61) beschriebenen Versuche; Einstrahlwinkel $\beta_L = 30^\circ$ schleppend; ähnliche Streckenenergien innerhalb eines Schweißprozesses und eines Werkstoffs

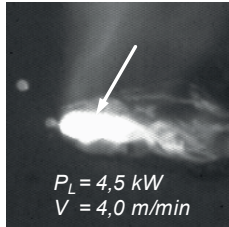
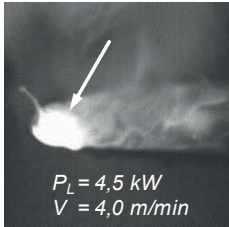
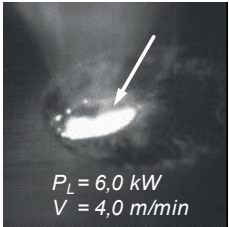
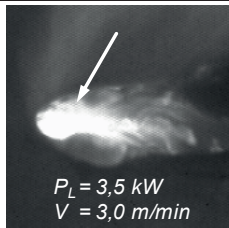
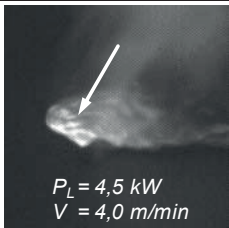
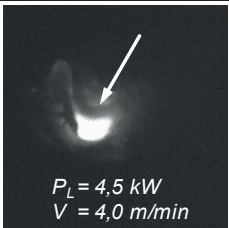
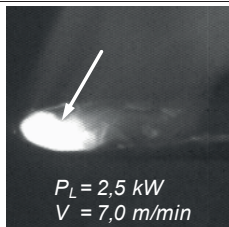
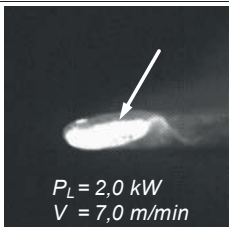
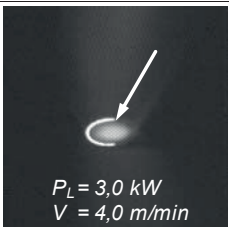
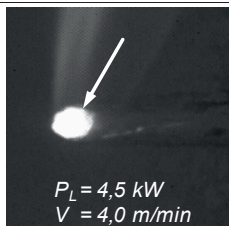
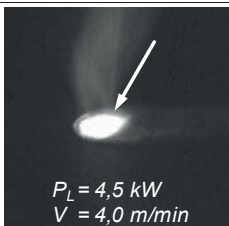
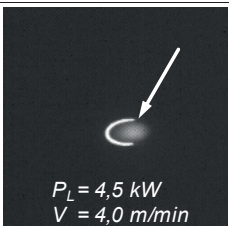
		Werkstoff 1.0332 (unlegierter Stahl)	Werkstoff 1.4301 (Edelstahl)	Werkstoff 3.3206 (Aluminium- Knetlegierung)		
$\beta_L = 30^\circ$ stechend	Tiefschweißen	 $P_L = 4,5 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$	 $P_L = 4,5 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$	 $P_L = 6,0 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$		
		 $P_L = 3,5 \text{ kW}$ $V = 3,0 \text{ m/min}$	 $P_L = 4,5 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$	 $P_L = 4,5 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$		
	Wärmeleitungsschweißen	 $P_L = 2,5 \text{ kW}$ $V = 7,0 \text{ m/min}$	 $P_L = 2,0 \text{ kW}$ $V = 7,0 \text{ m/min}$	 $P_L = 3,0 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$		
		 $P_L = 4,5 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$	 $P_L = 4,5 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$	 $P_L = 4,5 \text{ kW}$ $V = 4,0 \text{ m/min}$		
					→ Laserstrahl	

Tabelle 42: Mittels Hochgeschwindigkeitskamera erstellte Momentaufnahmen der Prozesszonengeometrien der in Abschnitt 4.4.1 (S. 61) beschriebenen Versuche; Einstrahlwinkel $\beta_L = 30^\circ$ stechend; ähnliche Streckenenergien innerhalb eines Schweißprozesses und eines Werkstoffs

Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen
80 Seiten - ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel
130 Seiten - ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte
120 Seiten - ISBN 3-931327-79-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionssysteme
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 15 Flexible fluide Kleb-/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- 30 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension
181 Seiten - ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz
102 Seiten - ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben
129 Seiten - ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette
134 Seiten · ISBN 3-98675-069-0
- 70 Mechatronik · Strukturdynamik von Werkzeugmaschinen
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik · Vorsprung durch Simulation
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik · Durch Innovation schnell und flexibel am Markt
100 Seiten · ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion – Die Zukunft der Automatisierungstechnik
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing · Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik · Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben
136 Seiten · ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwB Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen
245 Seiten · ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik · Herausforderung der automatisierten Montage!
111 Seiten · ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld · Seminar »Risiko und Chance«
151 Seiten · ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 · Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren
180 Seiten · ISBN 978-3-89675-097-6

- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlschmelzen
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! · Herausforderungen und Lösungen für die Zerspansung von Hochleistungswerkstoffen
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121, herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, sind im Springer Verlag,
Berlin, Heidelberg erschienen

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
183 Seiten · ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernd Goldstein*: Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 *Helmut E. Mößner*: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
164 Seiten · ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 *Ralf-Gunter Gräser*: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
167 Seiten · ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 *Hans-Jürgen Trossin*: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 *Doris Kugelmann*: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
168 Seiten · ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 *Ralf Diesch*: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 *Werner E. Lulay*: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
190 Seiten · ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 *Otto Murr*: Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
178 Seiten · ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 *Michael Macht*: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 *Bruno H. Mehler*: Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden
152 Seiten · ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Heitmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
146 Seiten · ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 *Can Abay*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
159 Seiten · ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 *Stefan Brandner*: Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
172 Seiten · ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 *Arnd G. Hirschberg*: Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
165 Seiten · ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 *Alexandra Reek*: Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
193 Seiten · ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabbah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
148 Seiten · ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schliffenbacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
187 Seiten · ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprenzel*: Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
144 Seiten · ISBN 978-3-89675-757-9

- 142 **Andreas Gallasch:** Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 **Ralf Cuiper:** Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 **Christian Schneider:** Strukturmekanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-0
- 145 **Christian Jonas:** Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 **Ulrich Willnecker:** Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 **Christof Lehner:** Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 **Frank Rick:** Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 **Michael Höhn:** Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0
- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0023-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilerstellung
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudorfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Fahrer:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppner:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weißenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Roßgoderer:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0202-5
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräzenter Montagesysteme
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitingner:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieverling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Jochim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierlohn:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9

- 185 **Tim Angerer:** Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgessysteme
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patron:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3
- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schlip:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eireiner:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griech:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraßer:** Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 **Klaus Schickenrieder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Möller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrensbewegungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansorge:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Wünsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oertli:** Strukturmekanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Lucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mörtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4

- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 **Ulrich Munzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Christoph Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilezuführung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schlip:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transientser Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungsoftware automatisierter Fertigungssysteme
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sherif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Radi:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Ruhstorfer:** Rührreibschweißen von Rohren
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Stählen
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5

- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reibschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Moutchiho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6
- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen
142 Seiten - ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 **Stefan Rainer Johann Braunreuther:** Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4348-6

