

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

F. Abt
Bildbasierte Charakterisierung und
Regelung von Laserschweißprozessen

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

Bildbasierte Charakterisierung und Regelung von Laserschweißprozessen

von Dr.-Ing. Felix Abt
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

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

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2017

D 93

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 Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2017

ISBN 978-3-8316-4691-3

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
Symbole und Abkürzungen	9
Kurzfassung der Arbeit	17
Extended Abstract	19
1 Einleitung	23
1.1 Ausgangslage	24
1.2 Zielsetzung	24
1.3 Gliederung der Arbeit	25
2 Messtechnische Grundlagen	27
2.1 Laserstrahlschweißen	27
2.2 Visuelle thermische Prozessemission	29
2.2.1 Entstehung der Wärmestrahlung	30
2.2.2 Emissionen der Dampfkapillare	33
2.2.3 Emissionen des Schmelzebades	34
2.3 Spektrale Eigenschaften der Prozessemissionen	35
2.3.1 Versuchsaufbau	35
2.3.2 Kalibrierung des Spektrometers	37
2.3.3 Versuchsplanung und Durchführung.....	40
2.3.4 Versuchsauswertung	41
2.3.4.1 Baustahl 1.0122 (S 235).....	41
2.3.4.2 Edelstahl 1.4310 (X 10 Cr Ni 18 8).....	44
2.3.4.3 Aluminium AA6012 (AlMgSiPb)	45
2.3.5 Extinktion im Schweißrauch	46
2.4 Konsequenzen für die Prozessvisualisierung.....	48
3 Prozess-Diagnostik mit Röntgen Video	49

3.1	Physikalische und technische Grundlagen	49
3.1.1	Abbildung mittels geometrischer Schattenprojektion	50
3.1.2	Absorption und Kontrast von Röntgenstrahlung	53
3.1.3	Signal-Rausch-Verhältnis	57
3.1.4	Röntgendetektoren	58
3.1.4.1	Direkte Röntgendetektoren	58
3.1.4.2	Indirekte Röntgendetektoren	59
3.1.4.3	Optische Kopplung von indirekten Röntgendetektoren	59
3.2	Aufbau des Röntgen-Systems	60
3.2.1	Röntgen-Video-Detektor und Röntgenröhre	61
3.2.2	Handling-System	64
3.2.3	Bildverarbeitung	66
3.2.3.1	Shading (Gain-Korrektur)	66
3.2.3.2	Helligkeit und Kontrast	69
3.3	Systemcharakterisierung	70
3.3.1	Ermittlung der Bildgütezahl mit dem Drahtsteg-BPK	70
3.3.2	Ermittlung der Bildgütezahl mit dem Stufe-Loch-BPK	73
3.4	Anwendung des Röntgen-Systems	77
3.4.1	Messung der Neigung der Kapillarfront	77
3.4.2	Beobachtung der Porenbildung	79
3.4.2.1	Prozessporen in Aluminium	79
3.4.2.2	Prozessporen in Stahl	81
3.4.3	Beobachtung von Schmelzebadströmungen	82
3.4.3.1	Eigenschaften von Tracern	82
3.4.3.2	Schmelzeströmungen (qualitativ) in Stahl und Aluminium	85
3.4.3.3	Schmelzeströmungen (quantitativ) in Aluminium	87
3.4.4	Visualisierung der Schmelzebadgrenze	89
3.4.5	Rekonstruktion des Schmelzebadvolumens	91
3.5	Zusammenfassung der Ergebnisse	94
4	Prozess-Überwachung	95
4.1	Aufbau der Prozessüberwachung	96
4.1.1	Optische Integration in den Prozess	96

4.1.2	Eigenschaften der Kamera.....	98
4.1.3	Bildakquise und Datenverarbeitung	101
4.2	Diagnostik der Fehlerentstehung	102
4.2.1	Versuchsaufbau	102
4.2.2	Versuchsplanung und Durchführung.....	104
4.3	Identifizierung signifikanter Bildmerkmale.....	106
4.3.1	Ungenügende Durchschweißung.....	106
4.3.2	Durchschussloch.....	111
4.3.3	Spritzer und Schmelzeauswürfe	114
4.3.4	Ungenügende Nahtbreite an der Oberfläche	116
4.4	Test der Prozessüberwachung.....	118
4.4.1	Ungenügende Durchschweißung.....	118
4.4.2	Durchschussloch.....	122
4.4.3	Spritzer und Schmelzeauswürfe	124
4.4.4	Ungenügende Nahtbreite an der Oberfläche	126
4.5	Bewertung der Methode.....	128
4.5.1	Vielseitigkeit.....	129
4.5.2	Erkennungssicherheit	130
4.5.3	Geschwindigkeit	132
4.5.4	Konsequenzen für die Prozessregelung.....	134
5	Prozess-Regelung	135
5.1	Stand der Wissenschaft und Forschung	135
5.2	CNN-Technologie.....	138
5.3	Visuelle Merkmalsextraktion.....	142
5.3.1	Algorithmus „One-Side“	146
5.3.2	Algorithmus „Omnidirectional“	148
5.4	Regelungstechnisches Modell.....	151
5.4.1	Messglied zur Ableitung von Mess- und Rückführungsgrößen.....	152
5.4.1.1	Arbeitspunkte und Verhalten der Messgröße	154
5.4.2	Regler und Regelstrategie.....	156
5.4.3	Regelstrecke.....	162
5.4.3.1	Verhalten der Regelstrecke.....	163

5.4.3.2	Abschätzung der minimalen Abtastfrequenz	166
5.5	Prototyp-Entwicklung	168
5.5.1	Kameraoptik.....	168
5.5.2	Steuerungseinheit.....	171
5.5.3	Echtzeitsoftware auf der CNN-Kamera.....	172
5.6	Patente	173
5.7	Test des Regelsystems.....	173
5.7.1	Closed-Loop Regelung der Durchschweißung.....	174
5.7.1.1	Kompensation der Vorschubgeschwindigkeit	176
5.7.1.2	Kompensation der Materialstärke	184
5.7.1.3	Kompensation der Fokusposition.....	190
5.7.1.4	Kompensation einer verschmutzten Optik.....	191
5.7.2	Closed-Loop Regelung der Einschweißung	192
5.7.2.1	Kompensation der Vorschubgeschwindigkeit	194
5.7.2.2	Einfluss des Spaltmaßes.....	196
5.8	Bewertung der Methode	200
5.8.1	Vollständige Durchschweißung.....	200
5.8.2	Einschweißung.....	201
5.8.3	Grenzen des Verfahrens.....	202
6	Zusammenfassung	203
7	Literaturverzeichnis	207
	Danksagung	221

Symbole und Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
3D	Dreidimensional
Å	Längeneinheit Ångström ($1 \text{ Å} = 0,1 \text{ nm}$)
A/D (AD)	Analog-Digital
AND	Logische Und-Verknüpfung
BEO	Bearbeitungsoptik
Bit	Kleinste binäre Einheit (0 oder 1)
BLOB	Binary Large Object
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BPK	Bildgüte-Prüfkörper
BZ	Bildgütezahl nach DIN EN 462
C	Programmiersprache C
CCD	Charge-Coupled Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
CNN	Cellular Neural Network
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CPC	Coaxial Process Control
CPU	Central Processing Unit
Digit	Einheit der Helligkeit im digitalen Farbraum
DIN	Deutsche Industrienorm
DIN EN	Deutsche Industrienorm Europäische Norm
DSP	Digitaler Signalprozessor
EMI	Fraunhofer Ernst-Mach Institut
F-Theta	Planfeld-Optik
FKZ	Förderkennzeichen
FPGA	Field Programmable Gate Array
FPH	Full-Penetration-Hole / Durchschweißloch
fps	Frames per Second [$1/s$]
GB	Gigabyte
GigE	Gigabit Ethernet

Abkürzung	Bedeutung
GPU	Graphics Processing Unit (Grafikprozessor)
IC	Image-Center
I/O (IO)	Input/Output (Ein- und Ausgänge)
IFSW	Institut für Strahlwerkzeuge
IPM	Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik
IR	Infrarot
ISO	Internationale Organisation für Normung
ISO DIS	ISO - Draft International Standard
IZC	Interaction-Zone-Center
LLK	Lichtleitkabel
LP	Linienpaar
MCP	Mikrokanalplatte
MDE	Metaldampfeffekt
NIR	Nahes Infrarot
OH	Hydroxygruppe
P46	Leuchtphosphor (Typ P46)
PC	Personal Computer
PCI	Peripheral Component Interconnect
PCT	Patent Cooperation Treaty
PFO	Programmierbare Fokussieroptik
PWM	Pulsweitenmodulation
px	Pixel
RAM	Random Access Memory (Arbeitsspeicher)
r.E.	Relative Einheiten
SIMD	Single Instruction Multiple Data
SISD	Single Instruction Single Data
TCP	Tool Center Point
UV	Ultraviolett
v.l.n.r	von links nach rechts
VIS	Visuelles Spektrum
VW	Volkswagen
X-Ray	Röntgenstrahlung
XOR	Logische Exklusiv-Oder-Verknüpfung
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat

Lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
a	m	Abstand
a_{QD}	m	Quelle-Detektor-Abstand
a_{QO}	m	Objekt-Abstand zur Quelle
A	m	Anbindebreite in der Fügeebene
b	m	Breite der Nahtoberraupe
B_{Roh}	-	Unkorrigiertes Röntgenbild
$B_{Korrigiert}$	-	Korrigiertes Röntgenbild
c_0	m/s	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum [299.792.458 m/s]
CA	m	Freie Apertur (clear aperture)
d_W	m	Dicke des Werkstücks
d_{Cam}	m	Strahldurchmesser auf der Kamera
d_f	m	Fokusbrennweite des Laserstrahls
d_{Faser}	m	Faserkern-Durchmesser
d_{Quelle}	m	Fokusbrennweite der Röntgenröhre
d_{Strahl}	m	Strahldurchmesser auf der Werkstückoberfläche
$D_{e\lambda}$	W/m ³	Spektrale spezifische Emission aus Dunkelstrommessung
D	Gy	Dosis der Röntgenstrahlung
E	MeV	Photonenenergien
\hat{E}_{Photon}	MeV	Maximum des erzeugten Röntgen-Spektrums
EST	m	Einschweißtiefe gesamt
EST(UB)	m	Einschweißtiefe im Unterblech
F	m ²	Fläche
f	Hz	Frequenz
$f/0,4$	-	Blendenzahl (Blende 0,4)
f_{cam}	m	Fokussierbrennweite kameraseitig
f_{col}	m	Brennweite der Kollimationslinse
f_{eff}	m	Effektive Brennweite
f_{foc}	m	Fokussierbrennweite der Bearbeitungslinse
f_{min}	Hz	Minimale Bildrate
f_{pri}	m	Brennweite der Primärlinse
f_{Z1}	m	Eingangsbrennweite vor dem Zoommodul
f_{Z2}	m	Ausgangsbrennweite nach dem Zoommodul
G	-	Helligkeitswert eines Pixels

Symbol	Einheit	Bedeutung
$G_{min}[x,y]$	-	Ergebnis der Minimumprojektion Z_{min}
$Gi[x,y]$	-	2D-Matrix aus Pixeln mit dem Positionsindex i
h	m	Höhe
h_W	m	Höhe des Werkstücks
h_p	Js	Plancksches Wirkungsquantum [$6,62606957 * 10^{-34} Js$]
i	-	Ganzzahliger Index
I	W/m ²	Intensität
$I(d_W)$	W/m ²	Intensität in Abhängigkeit der Werkstückdicke
I_0	W/m ²	Anfangsintensität
$I_{e\lambda}$	W/m ²	korrigierte spektrale spezifische Emission
$I_{Röhre}$	A	Röhrenstrom
k	J/K	Boltzmannkonstante [$1,3806488 * 10^{-23} J/K$]
K	-	Kontrast
l	m	Länge
l_W	m	Länge des Werkstücks
L	m	Wegstrecke (Gerade)
M_e	W/m ²	Gesamte spezifische Emission
$M_{e\lambda}$	W/m ³	Spektrale spezifische Emission
$M_{e\lambda,p}$	W/m ³	Spektrale spezifische Emission des Probekörpers
$M_{e\lambda,s}$	W/m ³	Spektrale spezifische Emission des Schwarzkörpers
M_{Ref}	-	Referenzbild
\bar{M}_{Ref}	-	Mittlere Helligkeit des Referenzbildes
n^*	-	Erwartungswert der Anzahl Photonen pro Pixel
n	-	Anzahl (allgemein)
n_{FPH}	-	Anzahl der Durchschweißlöcher
N_{max}	-	Maximale Anzahl Bilder (Border-Frames)
NA	-	Numerischen Apertur
NP_{max}	-	Zähler für Erreichen des oberen Leistungslimits
NP_{min}	-	Zähler für Erreichen des unteren Leistungslimits
p_{HS}	m	Größe des Halbschattens
p_0	-	Wahrscheinlichkeit für kein Durchschweißloch
p_{FHP}	-	Wahrscheinlichkeit für ein Durchschweißloch
P	W	Momentaner Leistungswert
P_0	W	Startleistung für die Regelung der Laserleistung

Symbol	Einheit	Bedeutung
ΔP	W	Schrittweite für die Regelung der Laserleistung
ΔP_0	W	Schrittweite zur Anpassung des Leistungsbandes (Border-Step)
ΔP_-	W	Negative Schrittweite für die Regelung der Laserleistung
ΔP_+	W	Positive Schrittweite für die Regelung der Laserleistung
P_L	W	Laserleistung
P_{min}	W	Untere Grenze des Leistungsbandes
P_{max}	W	Obere Grenze des Leistungsbandes
q_e	C	Elementarladung des Elektrons [$1,6021766208 \cdot 10^{-19}$ C]
q_{FPH}	-	Relative Häufigkeit von FPH als Scharmittelwert
r_{Bild}	m	Bildgröße
r_{FHP}	-	Durchschweißlochrate als Zeitmittelwert
r_{Obj}	m	Objektgröße
r_{soll}	-	Führungsgröße Durchschweißlochrate
Δr	-	Regelabweichung der Durchschweißlochrate
R	m	Radius eines Kreisbogens
$R_{e\lambda}$	W/m ³	Spektr. spez. Emission unkorrigiertes Referenzspektrums
s	m	Spaltmaß bei Überlapp-Stößen
s_d	m	Größe eines inneren Defekts
S_{FPH}	-	Durchschweißloch Messsignal (0 oder 1)
S	J/m	Streckenenergie
$S_{e\lambda}$	W/m ³	Spektrale spezifische Emission (unkorrigierte Messung)
SNR	-	Rauschabstand (Signal-to-Noise-Ratio)
t	s	Zeit
t_W	m	Dicke einer Durchschweißprobe
t_i	-	Quantisierter Zeitschritt mit Zeitindex i
T	K	Temperatur
T_v	K	Verdampfungstemperatur
$U_{Beschleunigung}$	V	Beschleunigungsspannung
U_L	V	Laser-Steuerspannung (allgemeine Stellgröße)
v	m/s	Vorschubgeschwindigkeit
V	-	Geometrische Vergrößerung
x	-	x-Koordinate
$x_{Hinterkante}$	px	x-Position der Kapillar-Hinterkante
$x_Hinterkante$	px	x-Position der Kapillar-Hinterkante

Symbol	Einheit	Bedeutung
x_{HK}	px	x-Position der Kapillar-Hinterkante
x_{max_FPH}	px	x-Position der Vorderkante des Durchschweißlochs
x_{Mitte_FPH}	px	x-Position des Schwerpunkts des Durchschweißlochs
$X1$	m	Position der Maschinenachse X1
$X2$	m	Position der Maschinenachse X2
y	-	y-Koordinate
y_{Mitte_FPH}	px	y-Position des Schwerpunkts des Durchschweißlochs
$Y1$	m	Position der Maschinenachse Y1
$Y2$	m	Position der Maschinenachse Y2
z	-	z-Koordinate
z_R	m	Rayleighlänge
Z	-	Gesamtanzahl an Elementen der Reihe 0 bis Z
Z_K	-	Kernladungszahl
Z_{min}	-	Operator: Minimumprojektion von mehreren 2D-Matrizen
$Z1$	m	Position der Maschinenachse Z1
$Z2A$	m	Position der Maschinenachse Z2A
$Z2B$	m	Position der Maschinenachse Z2B

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
β	-	Vergrößerung beziehungsweise Abbildungsmaßstab
β_{BV}	-	Vergrößerung des Bildverstärkers
β_{con}	-	Vergrößerung des Telekonverters
β_{geo}	-	Geometrische Vergrößerung
β_{max}	-	maximale förderliche Vergrößerung
β_{Relay}	-	Vergrößerung der Relay-Optik
β_{Tele}	-	Vergrößerung des telezentrischen Objektivs
β_{Zoom}	-	Vergrößerung des Zoommoduls
$\varepsilon_E(\lambda)$	-	Spektraler Emissionsgrad
ε_E	-	Emissionsgrad eines grauen Körpers
λ	m	Wellenlänge
λ_{max}	m	Wellenlänge des Intensitätsmaximums
μ	-	Abschwächungskoeffizient nach Lambert-Beer
$\mu_{Absorption}$	-	Absorptionskoeffizient
μ_d	-	Abschwächungskoeffizient des Werkstücks
μ_s	-	Abschwächungskoeffizient der inneren Struktur
$\mu_{Streuung}$	-	Streuungskoeffizient
μ_{543nm}	-	Abschwächungskoeffizient für 543 nm Wellenlänge
μ_{1047nm}	-	Abschwächungskoeffizient für 1.047 nm Wellenlänge
π	-	Kreiszahl
ρ	g/cm ³	Dichte des Werkstücks/Absorbers
σ	W/(m ² K ⁴)	Stefan-Boltzmann-Konstante [$5,67 * 10^{-8} W/(m^2K^4)$]
σ_{BIN}	-	Standardabweichung der Binomialverteilung
σ_{BIN}^2	-	Varianz der Binomialverteilung
σ_{FPH}	-	Standardabweichung von q_{FPH}
σ_{max}	-	Maximal zulässige Standardabweichung von q_{FPH}
σ_{max}^2	-	Maximal zulässige Varianz von q_{FPH}
τ	s	Zeitspanne
τ_A	µs	Abklingzeit
τ_{dv}	s	Zeitspanne die der Laserstrahl ein Flächenelement bestrahlt
τ_{90-10}	µs	Abklingzeit von 90 % auf 10 % Helligkeit
τ_{10-1}	µs	Abklingzeit von 10 % auf 1 % Helligkeit

Kurzfassung der Arbeit

Das Laserstrahl-tiefschweißen ist ein weit verbreitetes Verfahren in der industriellen Fertigung und obwohl bereits seit Jahrzehnten erfolgreich im Einsatz, mangelt es bis heute an Möglichkeiten der Prozessregelung. Verfügbare Regelsysteme beschränken sich meist auf die Positions- oder Abstandsregelung, lassen den eigentlichen Schweißprozess jedoch in aller Regel außen vor. Bisherige Ansätze zur Regelung des Schweißprozesses scheiterten regelmäßig an zu geringer Messgeschwindigkeit oder nicht robust messenden Integraldetektoren.

Ogleich die Prozessüberwachung von Laserschweißprozessen bereits in vielen Bereichen Anwendung findet, handelt es sich auch hierbei meist um Verfahren mit integral messenden Detektoren, deren Messkurven lediglich über Korrelationsverfahren mit der erreichten Nahtqualität in Verbindung stehen. Kamerabasierte Verfahren zur Prozessüberwachung wurden zwar in den vergangenen Jahren massiv weiterentwickelt, abgesehen von Systemen zur Positionsüberwachung und -Regelung, kommen jedoch auch bei diesen meist Algorithmen zum Einsatz, die den Prozess auf Helligkeitsschwankungen hin untersuchen.

Die Verwendung von Bildverarbeitungsalgorithmen, welche auf der Auswertung von geometrischen Formparametern beruhen, ermöglichen eine weit robustere und aussagekräftigere Beurteilung des Prozesszustandes, als es die eingangs genannten helligkeitsbasierten Algorithmen vermögen. Der notwendige hohe Rechenaufwand verhindert jedoch bis dato die Nutzung solcher Algorithmen für ein echtzeitfähiges System zur Prozessregelung.

In dieser Arbeit wird basierend auf spektroskopischen Untersuchungen der elektromagnetischen Prozessemissionen und der Störeinflüsse durch Metaldampf und Schweißrauchpartikel, ein spektrales Fenster identifiziert, welches optimale Bedingungen für die Beobachtung der thermischen Prozessemission mit siliziumbasierten Kameras ermöglicht.

Grundlagenuntersuchungen mittels kombiniertem Einsatz von Röntgenvideotechnik und Hochgeschwindigkeitskameras im nahen und mittleren Infrarot, erlauben einen dreidimensionalen Einblick in den Schweißprozess, auch unterhalb der Schmelzbad-

oberfläche. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Basis für die Entwicklung einer kamerabasierten Prozessüberwachung, welche über eine koaxial zum Bearbeitungslaserstrahl angeordnete Kamera, die thermische Strahlungsemission des Prozesses erfasst und die entstehenden Bilder anhand geometrischer Bildmerkmale auswertet. Die identifizierten Bildmerkmale beschreiben die jeweiligen transienten Fehler eindeutig und liefern eine Charakterisierung des Prozesszustandes.

Aus den evaluierten geometrischen Bildmerkmalen wird das Merkmal *Durchschweißloch* ausgewählt, um mittels eines geschlossenen Regelkreises den Durchschweißgrad von Lasertiefschweißprozessen zu regeln. Die Regelung wird dabei mittels einer neuartigen Rechnerarchitektur realisiert, der sogenannten *Cellularen Neuronalen Netze* (CNN). Die CNN-Architektur integriert dabei ein Netzwerk analoger Prozessoren direkt auf dem Kamerachip. Jeder einzelne Pixel verfügt bei diesem System über einen eigenen simplen Prozessor. Diese Architektur ermöglicht es durch die Vernetzung der einzelnen Pixel eine Bildverarbeitung direkt auf dem Kamerachip durchzuführen, deren Berechnungen innerhalb eines Belichtungszyklus abgeschlossen sind. Auf diese Weise wurde ein Regelsystem implementiert, welches mit Regelfrequenzen bis zu *14 kHz* bei minimaler Latenz, eine robuste Regelung der Durchschweißung und Einschweißung an I-Naht-Überlappverbindungen ermöglicht.

Extended Abstract

Deep-penetration laser welding is still an emerging application in the world of metal joining. It is increasingly replacing traditional resistance spot welding, particularly in automotive body construction, because of its higher productivity, lower costs and better quality. However, while process monitoring and control have found widespread use in classical joining processes, monitoring or closed-loop control of deep-penetration laser welding has only been established in a few applications so far.

Previously developed methods for direct in-process monitoring of laser welding processes were usually based on photo diodes. While allowing very high sampling rates, the spatial resolution of such systems is very limited. Camera-based systems on the other hand, offer a high spatial resolution but usually a very limited sampling rate, due to the limited bandwidth of the underlying data processing system. Both approaches are usually based on application-specific correlations between certain measuring signals and typical weld defects. Hence, the systems involved have to be calibrated to the specific application.

The goal of this work was the development of a fast, robust, camera-based, closed-loop control system for the penetration depth during laser welding. The emphasis of the work is on the overlap joint geometry commonly used in car body construction. This work includes process diagnostics and camera-based process monitoring to build up an accurate picture of the three-dimensional geometry of the welding process. This knowledge is crucial in order to achieve the goal of a non-correlation based measurement of the process characteristics, necessary for the development of a robust closed-loop control system.

Examination of spectral process emissions in the near infrared range below $1 \mu\text{m}$ enabled the identification of suitable wavelength ranges for process observation with silicon-based cameras detecting the thermal emission of the process itself. It is demonstrated within this work that conclusions drawn in many older publications have been based on measurements from uncalibrated spectrometers, leading to misinterpretation of various optical effects. By calibrated spectral measurement of the process emissions, two spectral windows free of characteristic line-emissions were identified for steel as well as for aluminium. Furthermore, it is shown that the spectral window be-

low 500 nm is not usable because of strong scattering effects in the welding plume. These scattering effects increase strongly with shorter wavelengths and cannot be avoided by using external illumination. Consequently the only practically usable spectral window for silicon-based cameras is between 650 nm and 1.000 nm . It should also be noted here that the dynamic range of silicon-based cameras is usually not sufficient for a simultaneous detection of the thermal emissions originating from both the key-hole and the weld bead. This is only possible in the infrared spectral range on the long-wavelength side of the thermal emission maximum of the welding process (above $3\text{ }\mu\text{m}$).

Investigation of capillary and melt pool dynamics in deep penetration laser welding processes was the next step. High-speed cameras in the visual and infrared spectrum range offer excellent image quality and high frame rates but access to the process details is limited due to the small surface area of the weld zone. With these conventional diagnostic techniques it is thus not possible to observe the key mechanisms inside the volume of the material which essentially determine the behaviour of the welding process. To gain insight into process phenomena such as the shape and movement of the capillary or the melt flow behaviour in the weld bead, X-ray videography is the ideal instrument. In this work the development and implementation of a high-speed X-ray video system is described, which enables the observation of internal process phenomena with high frame rates combined with outstanding spatial resolution.

A combined time-synchronous measurement system involving X-ray video and near infrared high-speed video was used to gather three-dimensional information about the geometry of the weld zone and its dynamic behaviour. It was possible to precisely measure the capillary depth and its dynamic movement as well as the direction and velocity of fluid flows inside the molten pool and their influence on pore formation. These findings are crucial for the understanding of possible limitations on the monitoring and controllability of deep-penetration laser welding in an industrial setting.

Investigations with high-speed cameras revealed important geometric information on the formation of different welding failures and possibilities for their distinct detection with a passive camera mounted on the welding head coaxially to the laser beam. The geometric image properties observed are directly linked to specific failure mechanisms and do not rely on simple correlations between standard measures and observed welding failures. The automatic recognition of characteristic geometric image-properties was performed by software algorithms developed in Matlab as a proof-of-concept. The robustness of the algorithms developed was tested in an extensive experimental study to identify possible candidates for the development of the closed-loop control system.

The so called full penetration hole (FPH) was identified as the most important image feature characterising the state of the process in terms of welding depth for a full penetration weld.

Using the aforementioned results it was possible to build up a camera-based closed-loop control system to ensure stable welding results even under changing welding conditions. Optical integration into the laser welding head was realised by means of a dichroitic beam-splitter to ensure a coaxial configuration of the camera's line of sight with the laser beam. This enables the system to be combined with two- or three-dimensional scanning heads in remote welding processes.

The key-technology to overcome the above mentioned performance issue of camera based control systems is a novel architecture called a "Cellular Neural Network" (CNN). With "Cellular Neural Networks" it is possible to integrate basic processor elements in the electronic circuitry of a CMOS camera resulting in a Single-Instruction-Multiple-Data (SIMD)-architecture on the camera chip itself. Such pixel-parallel systems provide extremely fast real-time image processing, since there is no need to transfer image data from the camera to a processor. The closed-loop control system developed in this work uses a CNN based camera surveying the contour of the full-penetration hole with a control frequency of up to 14 kHz for linear welding processes and up to 9 kHz for processes with variable welding trajectory, whereas the latency of the system is in the range of only one single frame.

An extensive experimental program was performed to validate the capabilities of the closed-loop control system. It was shown that the system is able to control the degree of full penetration in overlap joints with different steel grades. The closed-loop control successfully compensated for various external disturbances such as variations in material thickness and welding speed, as well as defocusing and the contamination of protective windows. These phenomena could be controlled with either linear or varying direction welding trajectories. Controlled full penetration welds are also possible in aluminum, but not with all alloys. In particular, the alloy AA5182 produces thermal camera images that are strongly disturbed by extensive fluctuations in brightness, which prevents reliable control. On the other hand, a closed-loop control of full penetration with the alloy group AA6000 is possible without difficulty.

In closed-loop controlled full penetration welding conditions there is no need for the otherwise obligatory 10% excess of laser power. This directly leads to a better quality of the root surface due to reduced spattering and smoke residue, as well as an energy saving or a corresponding gain in welding speed.

As well as optimizing full penetration, the control system is also able to maintain a stable penetration depth in a partial penetration condition during welding of overlap joints in different steel grades. This is due to the fact that the image feature FPH is also visible when the laser beam reaches the gap between the two welding parts, enabling the system to use this working point as a datum for closed-loop control. Stable closed-loop control of partial penetration welds in aluminum alloys could not be achieved in this work. Although the image feature itself was visible, the rate of false detection by the software algorithm was too high to ensure a stable operation.

In the partial penetration mode the weld seam does not penetrate through the lower sheet bottom surface. This reduces the need for subsequent machining and also provides higher resistance against corrosion in car body welding. The further decreased laser power in comparison to full penetration mode offers the possibility of higher welding speeds, leading to higher productivity and cost efficiency.

The limits of the camera-based closed-loop control system described in this work are basically due to the fact that the image feature of the full penetration hole (FPH) must be visible in the desired parameter field. This means also that a closed-loop control of an arbitrary welding depth, independent of the presence of any boundary surface, is generally not possible.

The first welding results using this closed-loop control system were presented at the ICALEO-conference 2008 in Temecula, CA, USA, and the fully developed control system was honored with the third place in the “Berthold Leibinger Innovation Award 2012” and the third place in the “Steel Innovation Award 2012”.

1 Einleitung

Das Strahlwerkzeug Laser hat seit seiner ersten Realisierung im Jahre 1960 eine weite Verbreitung in der Welt der industriellen Fertigung gefunden. Zu diesem Erfolg trägt insbesondere seine enorme Flexibilität bei, die es erlaubt, Strahlquellen für alle erdenklichen Verfahren und Materialien maßzuschneidern. Im Bereich der Fügeverfahren nimmt der Laser hierbei eine herausragende Stellung ein, die sich auf seine hohe Flexibilität, seine präzise definierte Energieeinbringung, seine enorme Prozessgeschwindigkeit und Qualität, sowie sein hohes Automatisierungspotential begründen. Es sei an dieser Stelle auf ein Zitat von Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel verwiesen, welches aus seiner Laudatio anlässlich der Verleihung des Berthold Leibinger Innovationspreis im Jahre 2012 entnommen wurde. Er beschreibt die Herausforderungen des Laserschweißens, die dieser Arbeit zugrunde liegen, in außergewöhnlicher Weise:

„Das Laserstrahlschweißen ist für mich wohl eine der faszinierendsten Technologien fertigungstechnischer Art, die mit dem Laser durchführbar sind. Ich will versuchen das etwas plakativ und vereinfachend so [zu] sagen, dass bei diesem Prozess der Werkstoff auf den der Laserstrahl trifft, all die Zustände [...] von Materie durchläuft, die wir kennen. Es geht hier vom festen Zustand, über einen flüssigen; zum Teil wird das Material verdampft und abhängig von [...] den Strahleigenschaften kann auch Plasma entstehen. Also alle vier Aggregatzustände, die wir kennen und wieder zurück. [...]diese Vorgänge laufen ungemein schnell ab, außerordentlich dynamisch, in Bruchteilen von Millisekunden. Und um diese Vorgänge zu beherrschen, damit dann im Endergebnis eine sichere Verbindung entsteht, das stellt auch heute noch gewaltige Herausforderungen an den Fertigungsingenieur dar, obwohl wir seit vielen Jahrzehnten in der Industrie erfolgreich schweißen.“

Die von Prof. Hügel erwähnte Beherrschung der Vorgänge im Prozess des Laserschweißens führt uns in letzter Konsequenz zu einem System, welches in der Lage sein muss, die komplexen und hoch dynamischen Vorgänge während des Schweißprozesses mit hoher Präzision und in Echtzeit zu erfassen, zu verarbeiten und zu regeln. Der Weg hin zu einem solchen System führt jedoch zwangsweise über die diagnostische Untersuchung eben jener Vorgänge im Schweißprozess und der Ableitung geeigneter

Prozessmerkmale für eine sichere Überwachung. Diese Arbeit widmet sich ebendiesem Weg von der Diagnostik über die Überwachung, bis hin zur Prozessregelung.

1.1 Ausgangslage

Unter den industriellen Laserfügeverfahren nimmt das Laserstrahl-tiefschweißen mit kontinuierlich betriebenen Strahlquellen eine besondere Rolle ein. Insbesondere im Automobilbau verdrängt es zunehmend die klassische Widerstandspunktschweißung, welche es in Sachen Produktivität, Kosten und Qualität teilweise deutlich übertrifft.

Während jedoch bei den klassischen Fügeverfahren Prozessüberwachung und auch Prozessregelung bereits weite Verbreitung gefunden haben, wird das Laserstrahl-tiefschweißen nur in wenigen Applikationen durchgängig überwacht und mangels verfügbarer Systeme selten in einem geschlossenen Regelkreis betrieben. Zu unterscheiden sind hierbei die Überwachung und Regelung der Eingangsparameter, wie beispielsweise die Laserleistung, der Zustand der Bearbeitungsoptiken oder der relativen Werkstückposition sowie die nicht direkt messbaren intrinsischen Störgrößen des Schweißprozesses selbst, die sich ebenso auf die Qualität des Endprodukts auswirken. Während die Eingangsparameter auch beim Laserschweißen heute bereits weitgehend durch Überwachung und Regelung abgedeckt werden können, besteht bei den intrinsischen Störgrößen noch immer eine große Lücke.

Bisherige Verfahren zur direkten In-Prozessüberwachung von Laserschweißprozessen setzen meist auf Systeme mit Photodioden, die zwar eine sehr hohe Abtastrate erlauben, jedoch nur sehr begrenzte Ortsinformation erzeugen können. Dem gegenüber stehen kamerabasierte Systeme, die zwar eine hohe Ortsauflösung erlauben, jedoch nur eine geringe Abtastrate aufweisen. Gemein ist in der Regel beiden Ansätzen, dass sie üblicherweise auf anwendungsspezifischen Korrelationen zwischen bestimmten Messsignalen und auftretenden Nahtfehlern beruhen. Sie müssen aus diesem Grund auch bei kleinen Veränderungen des Prozesses neu eingeplant werden.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit liegt in der Entwicklung und Anwendung neuer bildgebender Werkzeuge und Verfahren zur Prozessdiagnostik, -überwachung und -regelung beim Laserstrahl-tiefschweißen. Hierbei soll auch das Potential der jeweils verwendeten Technologie anhand von beispielhaften Anwendungen aufgezeigt werden.

Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit befasst sich mit den Grundlagen der elektromagnetischen Prozessemissionen und deren Erfassung sowie der diagnostischen Untersuchung von Laserschweißprozessen mit bildgebenden Verfahren, die es erlauben, den Schweißprozess in seinen drei Dimensionen orts aufgelöst zu untersuchen. Hierzu zählt insbesondere die Diagnostik mit Röntgentechnologie, welche Einblicke in die Tiefe des Schweißprozesses erlaubt, die mit herkömmlichen Verfahren nicht möglich sind.

Die Basis für eine kamerabasierte Prozessregelung bildet schließlich eine breit angelegte Untersuchung von automatisch detektierbaren Bildmerkmalen, die sich für eine sichere Erkennung des Prozesszustandes nutzen lassen. Ziel ist es hierbei, Merkmale zu identifizieren, die den Prozesszustand eindeutig charakterisieren, ohne dabei auf einer bloßen Korrelation zu basieren.

Am Ende dieses Entwicklungsprozesses steht die kamerabasierte Prozessregelung um Laserstrahl-tiefschweißprozesse auf eine definierte Einschweißtiefe hin zu regeln. Im Vordergrund steht dabei die Fügegeometrie des I-Naht-Überlappstoßes, wie er insbesondere im Automobilbau breite Verwendung findet.

1.3 Gliederung der Arbeit

Die Gliederung dieser Arbeit folgt dem Weg vom Allgemeinen zum Speziellen, respektive von der Diagnostik der Prozessgrundlagen über die passive Prozessüberwachung verschiedener Prozess-Charakteristika, bis hin zur aktiven Prozessregelung einer einzelnen Stellgröße.

Die notwendigen Grundlagen zur Entstehung elektromagnetischer Prozessemissionen und die Untersuchung von deren spektralen Eigenschaften wird in Kapitel 2 behandelt. Besonderes Augenmerk liegt hier auf den Konsequenzen für die Prozessvisualisierung mittels optischer Flächendetektoren.

Da sich mit herkömmlichen optischen diagnostischen Verfahren ausschließlich Phänomene beobachten lassen, die sich an der Prozessoberfläche abspielen, wird in Kapitel 3 die Entwicklung eines Verfahrens beschrieben, welches es erlaubt, Vorgänge auch in der Tiefe des Prozesses zu beobachten. Hierzu wird auf Prozessdiagnostik mittels Röntgen Video zurückgegriffen. Durch die Kombination von Röntgentechnik mit herkömmlichen bildgebenden Diagnoseverfahren, ist es möglich den Schweißprozess quasi dreidimensional zu erfassen und auf diese Weise Einblicke in Vorgänge unterhalb der Schmelzebadoberfläche zu ermöglichen, wie es in dieser Auflösung und

Geschwindigkeit bisher nicht möglich war. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag hierbei auf dem dynamischen Verhalten der Dampfkapillare und den Schmelzebadströmungen, die sowohl einen wesentlichen Einfluss auf das Schweißergebnis haben, als auch direkt die Beobachtbarkeit und Regelbarkeit des Fügeprozesses beeinflussen.

Kapitel 4 befasst sich mit der Untersuchung von verschiedenen Fehlertypen beim Laserstrahliefschweißen und deren charakteristische Signatur in Form geometrisch erfassbarer Bildmerkmale, die eine sichere Beurteilung des momentanen Prozesszustandes mittels bildgebender Sensoren erlauben. Ziel dieser Untersuchungen war es zum einen, eine koaxial zum Bearbeitungslaser angeordnete Beobachtungsoptik zu evaluieren und zum anderen charakteristische Bildmerkmale zu identifizieren, die für eine kamerabasierte Prozessregelung aussichtsreich sind.

Die Entwicklung der kamerabasierten Prozessregelung zur Regelung der Einschweißtiefe an Überlappverbindungen wird schließlich in Kapitel 5 behandelt. Es wird hier insbesondere auf die Besonderheiten der Regelstrecke in Gestalt des Schweißprozesses eingegangen und dessen Konsequenzen auf die Bildverarbeitung und das Design des Regelkreises. Das Kapitel schließt mit der Beschreibung eines umfangreichen Testprogramms, in welchem verschiedene Szenarien in industriellen Schweißapplikationen nachgestellt, sowie die Reaktion des Regelsystems auf äußere Störgrößen überprüft und eine detaillierte Bewertung der Methode durchgeführt wurden.

Die Arbeit schließt letztendlich mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einer Standortbestimmung in Kapitel 6.

2 Messtechnische Grundlagen

2.1 Laserstrahlschweißen

Das Fertigungsverfahren des Laserschweißens gehört gemäß der DIN 8580 zur Hauptgruppe 4 „Fügen“ und dort wiederum nach der Definition der DIN 8593-6 zur Gruppe 4.6 „Fügen durch Schweißen“. Das Laserstrahlschweißen gehört nach der dortigen Definition zu den Schmelzschweißverfahren. Beim Schmelzschweißen von Metallen wird durch Zufuhr von Wärme der Grundwerkstoff der Fügepartner mindestens teilweise aufgeschmolzen und geht daraufhin eine stoffschlüssige Verbindung ein. Je nach Bedarf kann ein artähnlicher Zusatzwerkstoff zum Einsatz kommen um Einfluss auf die dabei entstehende Legierung und das entstehende Gefüge zu nehmen. Im Bereich der Verbindung erfolgt dabei im Allgemeinen eine vollständige Vermischung der aufgeschmolzenen Grund- und Zusatzwerkstoffe [1].

Der entscheidende Vorteil des Laserstrahlschweißens gegenüber herkömmlichen Schmelzschweißverfahren liegt in der hohen Leistungsdichte des Laserstrahls und der dadurch sehr präzisen Energieeinbringung in das Werkstück. Aufgrund dieser Eigenschaft umfasst das Laserstrahlschweißen einen großen Bereich vom Schweißen dicker Bleche im Stumpfstoß bei gleichzeitig schlanker Nahtgeometrie, über Schweißungen von Karosserieblechen im Automobilbau im Überlappstoß, bis hin zu Mikroschweißungen von Dünoblechen mit hoher Geschwindigkeit und geringer thermischer Belastung des Werkstücks. Dabei müssen die Fügepartner nicht zwingenderweise aus demselben Material bestehen. In gewissen Grenzen sind auch Laserschweißungen von artfremden Metallen, wie Kupfer an Aluminium oder Aluminium an Stahl möglich.

Grundsätzlich kann das Laserstrahlschweißen in zwei Verfahren unterschieden werden. Zum einen das Wärmeleitungsschweißen, bei dem ein Laserstrahl geringer Leistungsdichte lediglich ein flaches Schmelzbad erzeugt, und zum anderen das Tiefschweißen, bei dem die Leistungsdichte des Laserstrahls eine sogenannte Dampfkapillare erzeugt mit der tiefe und gleichzeitig sehr schlanke Schweißnähte erzeugt werden können. Dem weiteren Verlauf dieser Arbeit wird nur noch das Tiefschweißverfahren zugrunde gelegt. Solange nicht explizit darauf hingewiesen wird, ist bei allen Laserschweißverfahren immer das Tiefschweißen gemeint.

Beim Schweißen im Allgemeinen, wie auch beim Laserstrahlschweißen treten periodische und zufällige Fehler beziehungsweise Nahtunregelmäßigkeiten auf, die das Prozessergebnis negativ beeinflussen. In Tabelle 2.1 sind die wichtigsten nach ISO DIS 13919 definierten und quantifizierbaren Nahtunregelmäßigkeiten für lasergeschweißte Verbindungen aufgeführt.

Nr	Unregelmäßigkeit, Fehler	Darstellung	Mögliche Ursachen
1	Risse	-	Zu hohe Temperaturgradienten
2	Endkrater	-	„
3	Porosität und Poren		Instabilitäten der Dampfkapillare, ausgelöst durch hohe Fluktuation der Schmelze
4	Porennester	-	„
5	Porenzeilen	-	„
6	Endkraterlunker	-	„
7	Feste Einschlüsse	-	Inhomogenitäten des Materials
8	Bindefehler	-	Zu große Spalte oder fehlerhafte Positionierung
9	Ungenügende Durchschweißung		Falsche Parameterwahl (Vorschub, Intensität...)
11	Randkerben		„
12	Nahtüberhöhung		„
13	Wurzelunterhöhung		„
14	Kantenversatz		Aufspannungsfehler beim Werkstück, Schmutz, Grate
15	Nahtunterwölbung mit Wurzelüberhöhung		Falsche Parameterwahl (Vorschub, Intensität...)
16	Nahtunterwölbung		„
17	Wurzelrückfall, Wurzelkerbe		„
19	Schweißspritzer	-	Hohe Fluktuation der Schmelze

Tabelle 2.1: Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten gemäß ISO DIS 13919 [2].

2.2 Visuelle thermische Prozessemission

Während des Laserschweißprozesses werden von der Bearbeitungszone und deren Umgebung kontinuierlich Signale in Form verschiedener Indikatoren ausgesandt. Diese Prozessemissionen können für eine Prozessüberwachung oder -regelung nutzbare Informationen enthalten. In Bild 2.1 sind exemplarisch einige wichtige Emissionsarten beim Laserstrahlschweißen dargestellt, dabei sei angemerkt, dass die Darstellung aufgrund der vielfältigen Emissionen keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Eine detailliertere Aufstellung wird in [3] gegeben. Die Quellen der Prozessemissionen beim Laserstrahlschweißen sind neben der reflektierten Laserleistung im Wesentlichen die Schweißfackel über, und der Metalldampf in der Kapillare und das Schmelzbad sowie die abkühlende Schweißnaht selbst [4]. Eine tabellarische Übersicht der in Bild 2.1 gezeigten Prozessemissionen mit den zugehörigen Entstehungsorten und geeigneter Sensoren ist in Tabelle 2.2 zu finden.

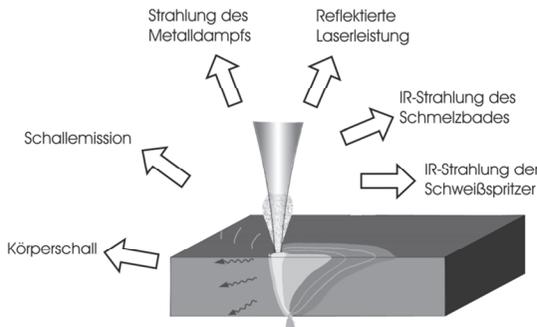


Bild 2.1: Verschiedene Emissionsarten eines Laserstrahlschweißprozesses [5].

Auf Grund ihrer hohen Störanfälligkeit zum Beispiel durch Fremdschallquellen erweisen sich Schallemissionen und Körperschall als nicht robust genug für eine zuverlässige Prozessüberwachung beim Laserschweißen. Dies wurde bereits in der Vergangenheit in verschiedenen Arbeiten festgestellt [6], [7], [8], [9]. Sie werden in dieser Arbeit, genau wie die reflektierte Laserleistung, nicht weiter thematisiert. Bedeutend zuverlässigere und auch vielfältigere Informationen werden durch die elektromagnetischen beziehungsweise optischen Emissionen des Schweißprozesses übertragen.

In dieser Arbeit liegt der Schwerpunkt auf Mess- und Regelsystemen, die auf elektromagnetischen Emissionen des Schweißprozesses beruhen, weshalb im Weiteren nur noch auf diese näher eingegangen wird.

Effekte und Örtlichkeit		Typische Detektoren
Elektromagnetische Strahlung	Kapillare	Kamera, Photodiode
	Schmelzebad	Kamera, Photodiode
	Unterseite des Werkstücks	Kamera, Photodiode
Akustische Emissionen	Öffnung der Kapillare	Mikrophon
	Körperschall des Werkstücks	Piezoaufnehmer, Vibrometer
Ausstöße von Partikeln	Schmelzebad	Kamera, Photodiode
Reflektierte Laserstrahlung	Kapillare	Kamera, Photodiode

Tabelle 2.2: Prozessemissionen von Laserschweißprozessen und zu deren Detektion geeignete Sensoren [10], [11].

2.2.1 Entstehung der Wärmestrahlung

Jeder Körper mit einer Temperatur T oberhalb des absoluten Nullpunkts sendet entsprechend seiner Temperatur elektromagnetische Strahlung, so genannte Eigenstrahlung, aus. Ursächlich hierfür ist seine innere mechanische Molekülbewegung, welche mit steigender Temperatur zunimmt. Da mit den Molekülen zwangsweise Ladungen bewegt werden, entsteht hierbei erwähnte elektromagnetische Strahlung.

Die spektrale Verteilung der so entstehenden Strahlung wird durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben. Geht man von einem sogenannten schwarzen Strahler aus, dessen Emissions- beziehungsweise Absorptionskoeffizient für alle Wellenlängen λ den Wert $\varepsilon(\lambda) = 1$ hat, lässt sich die spezifische spektrale Emission mittels der Gleichung

$$M_{e\lambda,s} = \frac{2\pi h_p c_0^2}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{hc_0 / \lambda kT} - 1} \right) \quad (2.1)$$

berechnen [12]. Dabei sind h_p das Plancksche Wirkungsquantum, c_0 die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum und k die Boltzmann-Konstante.

In Bild 2.2 ist die spektrale Verteilung der Emission eines Schwarzkörpers nach Gleichung (2.1) für verschiedene Temperaturen dargestellt. Die spezifische spektrale Emission nimmt bei jeder Wellenlänge mit steigender absoluter Temperatur zu, während sich das Maximum der Kurven mit zunehmender Temperatur zu kürzeren Wellenlängen verschiebt. Die Verschiebung des spektralen Emissionsmaximums bei der Wellenlänge λ_{\max} mit der Temperatur findet man durch Differenzieren von $M_{e\lambda,s}$

nach λ und nachfolgendem Nullsetzen der entsprechenden Gleichung. Man erhält daraus den sogenannten Wienschen Verschiebungssatz [12]

$$\lambda_{\max} T = \frac{h_p c_0}{5k} = 2,8978 \cdot 10^3 \mu\text{mK}. \quad (2.2)$$

Hieraus kann beispielsweise die Wellenlänge des spektralen Emissionsmaximums bei Raumtemperatur von 20°C (etwa 293 K) zu $\lambda_{\max} = 9,89 \mu\text{m}$ berechnet werden.

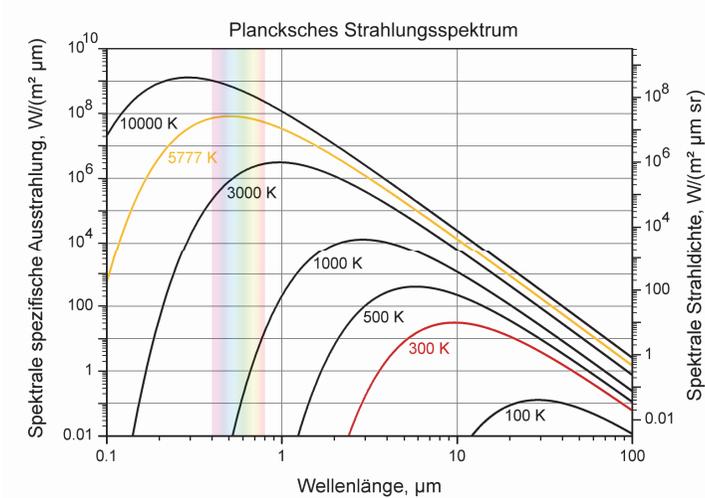


Bild 2.2: Spektrale Verteilung der Schwarzkörperstrahlung bei verschiedenen Temperaturen [13].

Integriert man die spezifische spektrale Emission aus Gleichung (2.1) über alle Wellenlängen λ , so erhält man die gesamte spezifische Emission¹

$$M_e = \sigma T^4 \quad (2.3)$$

als Fläche unter der Schwarzkörperstrahlungskurve bei der Temperatur T mit der Stefan-Boltzmann-Konstante σ [14].

¹ M_e ist die emittierte Strahlungsleistung pro Fläche F , woraus sich bei bekannter Fläche F durch Multiplikation die gesamte, von einem Körper emittierte Strahlungsleistung berechnen lässt.

Die Strahlung von realen Oberflächen ist immer geringer als die eines Schwarzkörpers, was durch die Angabe des wellenlängenabhängigen Emissionsgrades

$$\varepsilon_E(\lambda) = \frac{M_{e\lambda,p}}{M_{e\lambda,s}} \quad (2.4)$$

berücksichtigt wird.

In Fällen, bei denen $\varepsilon_E(\lambda) = \textit{konstant}$ ist, nennt man den Probekörper grauer Strahler. In diesem Fall ist die spektrale Emission des Probekörpers immer proportional zu der des schwarzen Strahlers, und die Kurven unterscheiden sich nur um den konstanten Faktor ε_E . Im Allgemeinen ist der Emissionsgrad abhängig von Material, Aggregatzustand, Oberflächenbeschaffenheit, Temperatur und Emissionswinkel zur Oberflächennormalen und meist auch von λ [15].

Bei der Analyse von Laserschweißprozessen spielt diese Tatsache eine besondere Rolle, da beim Laserstrahlschweißen das Material in drei verschiedenen Aggregatzuständen vorliegt: Gasförmig im Kapillarbereich, flüssig im Schmelzbad und fest außerhalb der Wechselwirkungszone. Der Eindruck, der durch die Messung der spezifischen Emission M_e vermittelt wird, muss also immer unter Berücksichtigung des Emissionsgrads bewertet werden. Tabelle 2.3 zeigt die hemisphärischen Gesamt-Emissionsgrade (integriert über alle Wellenlängen) von Stahl und Aluminium.

Material	Temperatur in °C	Gesamt-Emissionsgrad
Stahl, Legierung (8 % Ni, 18 % Cr)	500	0,35
Stahl, unlegiert, bei Schmelztemperatur	1.600 – 1.800	0,28
Stahl, galvanisiert	20	0,28
Stahl, oxidiert	200 – 600	0,80
Stahl, verrostet	20	0,69
Stahl, poliert	100	0,07
Edelstahl	20 – 700	0,16 – 0,45
Aluminium, poliert	50 – 100	0,04 – 0,06
Aluminium, raue Oberfläche	20 – 50	0,06 – 0,07
Aluminium, oxidiert	50 – 500	0,2 – 0,3
Aluminium, eloxiert	100	0,55

Tabelle 2.3: Hemisphärische Gesamt-Emissionsgrade (integriert über alle Wellenlängen) von Stahl und Aluminium [16].

2.2.2 Emissionen der Dampfkapillare

Die Wand der Dampfkapillare besteht aus Metall in schmelzflüssiger Phase im Übergang zur dampfförmigen Phase. Die Verdampfungstemperatur T_v beträgt für Eisen $3.000\text{ }^\circ\text{C}$ [17] und für Aluminium $2.470\text{ }^\circ\text{C}$ [17]. Der Druck in der Dampfkapillare ist nach [18] im oberen Bereich der Dampfkapillare nur wenig erhöht gegenüber dem Normaldruck, so dass keine signifikante Verschiebung der Verdampfungstemperatur durch Siedepunkterhöhung zu erwarten ist. Durch das hohe Aspekt-Verhältnis der Dampfkapillare ergibt sich bei integraler Betrachtung laut [18] eine schwarzkörperähnliche Emissionscharakteristik.

Beim Laserstrahlschweißen mit Wellenlängen um $1\text{ }\mu\text{m}$ verhält sich der Metaldampf in der Kapillare in der Modellvorstellung wie ein ideales Gas. Da nach dem Phasenübergang vom flüssigen in den dampfförmigen Aggregatzustand der Metaldampf für die Laserwellenlänge optisch dünn ist und somit nur noch wenig Energieübertrag stattfindet, erhöht sich die Dampftemperatur nur noch geringfügig. Die Temperatur des Metaldampfs in der Kapillare kann folglich beim Laserstrahlschweißen von Stahl mit $1\text{ }\mu\text{m}$ Wellenlänge, mit ungefähr 3.273 K abgeschätzt werden.

Die Metaldampffackel oberhalb des Werkstücks kühlt durch die Expansion und die geringe Energiezufuhr rasch ab (adiabatische Expansion). Im Vergleich zum Metaldampf in der Kapillare wird die spektrale Verteilung der optischen Emission der Metaldampffackel in einen langwelligeren Bereich verschoben, außerdem sinkt die emittierte Strahlungsleistung gemäß dem Stefan-Boltzmann-Gesetz (2.3) deutlich. Bei ausreichend großem Aspekt-Verhältnis der Kapillare kann bei einer Leuchtdichtemesung koaxial zum Laserstrahl der Beitrag des Metaldampfs über der Kapillare vernachlässigt werden [19]. Aufgrund der deutlich reduzierten Schwarzkörperstrahlung können jedoch in den verbleibenden Emissionen charakteristische Spektren in Abhängigkeit des geschweißten Werkstoffes gemessen werden, siehe hierzu die Ergebnisse in Abschnitt 2.3.4.

Insgesamt betrachtet ist die emittierte Strahlungsdichte der Kapillarwand dominierend gegenüber den Emissionen des Metaldampfes, weshalb bei Verwendung von bildgebenden Sensoren, über die räumliche Verteilung der Leuchtdichte, auf die Geometrie der Kapillarwand geschlossen werden kann.

2.2.3 Emissionen des Schmelzbad

Das Schmelzbad wird an seiner äußeren Umrandung durch die Erstarrungslinie und zur Dampfkapillare hin durch die Verdampfungslinie begrenzt, und weist somit eine Temperatur zwischen Siede- und Schmelztemperatur auf. Für Eisen liegen die Schmelztemperatur bei 1.538 °C [20] und die Siedetemperatur bei 3.000 °C [17]. Bei Aluminium liegen die Temperaturen bei 660 °C [20] Schmelztemperatur beziehungsweise 2.470 °C [17] Siedetemperatur.

Die elektromagnetischen Emissionen des Schmelzbad können mittels bildgebenden Sensoren orts aufgelöste Informationen über die Temperatur der Schmelze liefern. Damit ist es möglich die Fläche des Schmelzbad und dessen Lage zu bestimmen. Als Indikator zur Bestimmung der Einschweißtiefe kann das Verhältnis aus Schmelzbadlänge zum Abstand zwischen Kapillar- und Schmelzbadflächenschwerpunkt dienen. Die Methode ist jedoch bisher ausschließlich zum Schweißen von Stahlwerkstoffen mit CO_2 -Laser qualifiziert [21].

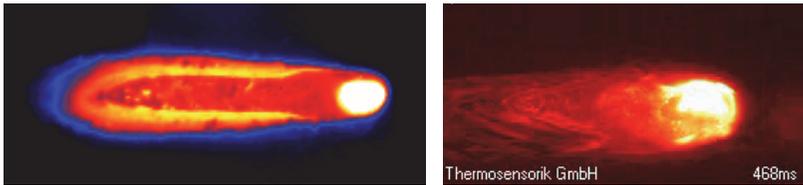


Bild 2.3: Infrarotaufnahme eines Laserstrahlschweißprozesses im Wellenlängenbereich zwischen $3\ \mu\text{m}$ und $5\ \mu\text{m}$. Die Farbskala reicht von Weiß (hohe Temperatur) über Gelb nach Rot (mittlere Temperatur) und weiter über Blau nach Schwarz (niedrige Temperatur). Links in Stahl, rechts in Aluminium.

In Bild 2.3 sind zwei Laserschweißprozesse in Stahl und in Aluminium dargestellt, die sehr deutlich den Einfluss des Emissionskoeffizienten zeigen. Während im rechten Bild beim Schweißen von Aluminium das Schmelzbad vollständig von einer Oxidschicht bedeckt ist, ist das Schmelzbad des Schweißprozesses in Stahl im linken Bild nahezu frei von Oxid. Dies hat zwei wichtige Folgen für die Prozessbeobachtung unter Ausnutzung des thermischen Eigenleuchtens.

Erstens: Bei Aluminium ist es quasi nicht möglich die tatsächliche Erstarrungslinie zu erkennen, da das Infrarotbild einen stetigen Temperaturgradienten entlang des Schmelzbad zeigt.

Zweitens: Bei Stahl tritt an der Erstarrungslinie ein Sprung nach oben im Emissionskoeffizienten auf, der dazu führt, dass der bereits erstarrte Bereich direkt hinter der Erstarrungslinie heißer erscheint als die Schmelze. Gemäß den Werten aus Tabelle 2.3 ändert sich der Emissionskoeffizient von $0,28$ (oxidfreie Oberfläche der Schmelze) auf $0,80$ (oxidierter Bereich direkt hinter der Erstarrungslinie). Dieser Effekt ist auch deutlich in Bild 2.3 links zu sehen, wobei auch auf der Oberfläche des Schmelzebades vereinzelt gelbe (vermeintlich heißere) Bereiche zu sehen sind. Diese werden durch Oxid-Schollen verursacht, die auf der Oberfläche des Schmelzebades treiben.

2.3 Spektrale Eigenschaften der Prozessemissionen

Grundlage einer jeden bildgebenden Diagnostik von Laserbearbeitungsprozessen ist ein grundlegendes Verständnis der spektralen Verteilung der Prozessemissionen. Wie in Abschnitt 2.2 bereits theoretisch erörtert, werden durch den Laserschweißprozess elektromagnetische Emissionen in einem weiten Spektralbereich erzeugt. Diese sind abhängig von Werkstoff, Laserparametern und Entstehungsort.

Abhängig davon, welche Charakteristika eines Schweißprozesses beobachtet werden sollen, kann es vorkommen, dass Prozessemissionen in Form von Störlicht eine bildgebende Beobachtung erschweren oder gar verhindern. Durch Kenntnis der ortsabhängigen Emissionsspektren kann dieses Störlicht gezielt durch spektrale Filterung unterdrückt werden.

Im Rahmen der beiden Forschungsprojekte MERlaS [22] und FoControl [23] - gefördert durch die Baden-Württemberg Stiftung - wurden Experimente durchgeführt, in denen für unterschiedliche Werkstoffe, ortsabhängige Emissionsspektren ermittelt wurden. In den folgenden Abschnitten soll auf diese Untersuchungen näher eingegangen werden.

2.3.1 Versuchsaufbau

Für die Experimente wurde ein Spektrometer vom Typ HR4000 von OceanOptics verwendet. Es handelt sich dabei um ein Gerät mit einem Silizium CCD-Zeilensensor. Das einfallende Licht wird mittels eines Beugungsgitters in seine spektralen Bestandteile zerlegt und auf den Zeilensensor abgebildet. Das verwendete Gitter erzeugt eine spektrale Spreizung von 200 nm bis 1.100 nm auf der CCD-Zeile [24]. Bei einer nutzbaren Pixelanzahl von 3.648 ergibt dies eine spektrale Auflösung von ungefähr

0,25 nm je Pixel. Die Belichtungszeit des Geräts beträgt minimal 3,8 ms, was eine Ausleserate von 250 Spektren pro Sekunde erlaubt. Auf diese Weise konnte während einer laufenden Schweißung eine ganze Reihe von Spektren akquiriert werden, was sowohl eine zeitaufgelöste Bewertung, als auch eine spätere Mittelung der Daten erlaubte. Der CCD weist laut Hersteller eine Linearität von $> 99,8\%$ auf [24], was einen direkten Vergleich von Spektren mit unterschiedlichen Belichtungszeiten erlaubt.

Um aus dem Laserschweißprozess einen möglichst gut definierten geometrischen Bereich auf das Spektrometer zu leiten wurde zur Lichtübertragung eine Glasfaser mit vorgeschaltetem Linsenteleskop verwendet. Bei der Faser handelte es sich um eine „UV-VIS High OH content“ Quarzglasfaser mit einem Kerndurchmesser von $100\ \mu\text{m}$, der Firma OceanOptics. Das vom Prozess emittierte Licht wurde mittels eines konfokalen Teleskops aus zwei Linsen in die Faser eingekoppelt. Aus der prozessseitigen Brennweite von $100\ \text{mm}$ und der faserseitigen Brennweite von $50\ \text{mm}$ ergibt sich ein Abbildungsverhältnis von $2:1$. Dies bedeutet, dass ein kreisförmiger Bereich aus dem Objektfeld mit einem Durchmesser von $200\ \mu\text{m}$ in die Faser eingekoppelt wird. Die in der Anlage montierte Teleskopoptik mit Faser ist in Bild 2.4 rechts zu sehen.

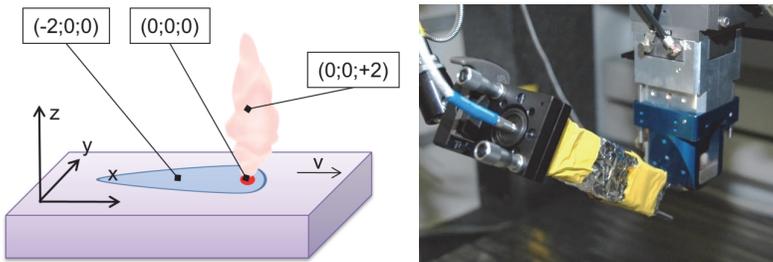


Bild 2.4: Links: Werkstück mit charakteristischen Emissionszonen des Schweißprozesses und den korrespondierenden Messpunkten. Rechts: Teleskopoptik mit Glasfaser zum Spektrometer neben dem Laserschweißkopf [25].

Im Wesentlichen lässt sich die Wechselwirkungszone beim Laserschweißen in drei Bereiche untergliedern, die aufgrund ihrer Temperatur nennenswerte Emissionen im visuellen und nahinfraroten Spektrum erzeugen können. Dies ist zum einen die Dampfkapillare, deren Wände sich im Wesentlichen auf Verdampfungstemperatur befinden und die mit heißem Metaldampf gefüllt ist. Um und hinter der Dampfkapillare befindet sich das Schmelzebad, welches eine Temperatur zwischen Verdampfungstemperatur und Schmelztemperatur aufweist. Oberhalb der Dampfkapillare und des Schmelzbad befindet sich der aus der Kapillare ausströmende Metaldampf.

Die Positionen der mit diesen Bereichen korrespondierenden Messpunkte sind schematisch in Bild 2.4 links dargestellt. Die Messposition für die Dampfkapillare hat die Koordinaten $(0;0;0)$, während der Messpunkt für das Schmelzebad um 2 mm gegen die Vorschubrichtung versetzt dazu an der Position $(-2;0;0)$ lag. Der Messpunkt für die Metaldampffackel wurde entsprechend 2 mm oberhalb der Öffnung der Dampfkapillare auf die Position $(0;0;+2)$ gelegt.

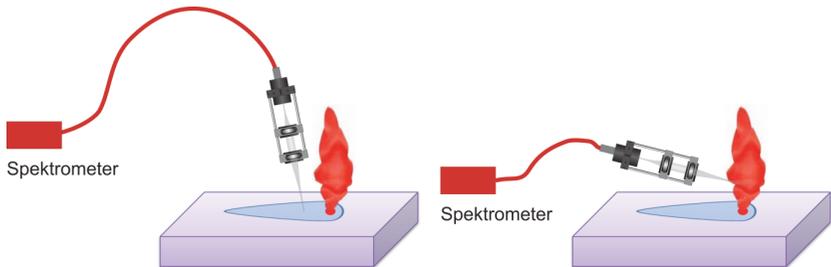


Bild 2.5: Schematische Darstellung der Blickrichtung des Spektrometers. Links: Für Schmelzebad und Dampfkapillare, 30° stechend zur Senkrechten. Rechts Für die Metaldampffackel 80° stechend zur Senkrechten [22], [25], [26].

Die Messpunkte für die Dampfkapillare und das Schmelzebad wurden unter einem Winkel von 30° zur Senkrechten, stechend zum Vorschub aufgezeichnet, während der Messpunkt in der Metaldampffackel unter einem sehr flachen Winkel von 80° zur senkrechten ebenfalls stechend zum Vorschub aufgezeichnet wurde. Die beiden Fälle sind in Bild 2.5 schematisch dargestellt.

2.3.2 Kalibrierung des Spektrometers

Grundvoraussetzung für belastbare und vergleichbare Messungen ist ein kalibriertes Spektrometer. Da ein Spektrometer Intensitätswerte für diskrete Wellenlängenbänder erfasst, ist sowohl eine Kalibrierung der Wellenlänge als auch eine Kalibrierung der Intensität erforderlich.

Die Wellenlängen-Kalibrierung bestimmt die Zuordnung einer bestimmten Wellenlänge zu einem Pixel auf der Sensorzeile des Spektrometers. Diese Kalibrierung wurde bereits durch den Hersteller vorgenommen, weshalb hier nicht weiter auf deren Durchführung eingegangen werden soll.

Im vorliegenden Fall bleibt jedoch die Intensitäts-Kalibrierung, welche entweder absolutgenau oder relativ durchgeführt werden kann. Eine absolutgenaue Kalibrierung

erlaubt später die exakte Bestimmung der spektralen Leistungsdichteverteilung der Emission des vermessenen Prüflings. Eine absolutgenaue Kalibrierung ist jedoch vergleichsweise aufwändig zu realisieren und für die angestrebten Experimente nicht zwingend erforderlich. Es wurde daher eine relative Intensitäts-Kalibrierung durchgeführt, die es erlaubt Intensitäten innerhalb eines aufgenommen Spektrums miteinander zu vergleichen.

Für die relative Intensitäts-Kalibrierung wird eine Lichtquelle mit bekanntem Emissionsspektrum benötigt. Eine einfache und günstige Variante ist der Einsatz einer Wolfram-Halogenlampe, die in guter Näherung einen Schwarzkörperstrahler darstellt. Somit kann das Emissionsspektrum mit Hilfe des Planckschen Strahlungsgesetzes und der Temperatur der Glühwendel berechnet werden [22], [25].

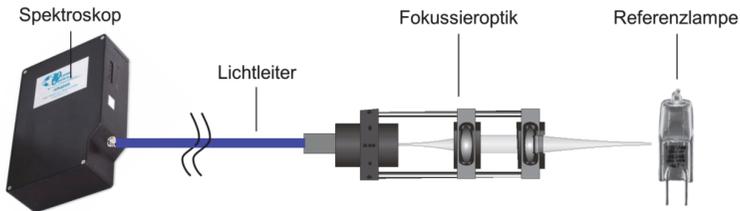


Bild 2.6: Versuchsaufbau zur Intensitätskalibrierung des Spektrometers. V.l.n.r.: Spektrometer OceanOptics HR4000, Glasfaser mit $100\ \mu\text{m}$ Kerndurchmesser (Typ: UV-VIS High OH content), Fokussieroptik mit Abbildungsverhältnis 2:1, Wolfram-Halogen-Lampe Osram HLX 64655 Xenophot [25].

Zur Kalibrierung wurde eine Osram HLX 64655 Xenophot ($250\ \text{W}$, $24\ \text{V}$) Glühlampe anstelle des Werkstücks in den Versuchsaufbau gestellt. Dieser Aufbau erlaubte die Kalibrierung der gesamten Signalübertragungskette inklusive der Fokussieroptik, des Lichtleiters und des Spektrometers, siehe hierzu die Schemazeichnung in Bild 2.6.

Die verwendete Lampe emittiert gemäß Herstellerangabe [27] bei Nennleistung nahezu das Spektrum eines Planckschen Strahlers mit einer Temperatur von $3.550\ \text{K}$. Dieses Schwarzkörperspektrum lässt sich mit dem Planckschen Strahlungsgesetz nach Gleichung (2.1) beschreiben. Zusätzlich zu diesem Referenzspektrum muss zur Kalibrierung auch der Dunkelstrom des Spektrometers bestimmt werden. Hierzu wurde das Ende der Glasfaser abgedunkelt. Danach konnte mit Hilfe der Software Spectra Suite das noch anliegende Spektrum als Blindstrom bestimmt werden, und für zukünftige Messungen (bei dieser Integrationszeit) automatisch subtrahiert werden.

Die relative Kalibrierung wurde anhand folgender Gleichung durchgeführt:

$$I_{e\lambda} = \frac{M_{e\lambda,s}}{R_{e\lambda} - D_{e\lambda}} \cdot (S_{e\lambda} - D_{e\lambda}) \quad (2.5)$$

mit $I_{e\lambda}$: korrigierte spektrale spezifische Emission

$M_{e\lambda,s}$: Spektrale spezifische Emission des Schwarzkörpers aus Gleichung (2.1)

$S_{e\lambda}$: Spektrale spezifische Emission der unkorrigierten Messung

$R_{e\lambda}$: Spektrale spezifische Emission des unkorrigierten Referenzspektrums

$D_{e\lambda}$: Spektrale spezifische Emission aus der Dunkelstrommessung

In Gleichung (2.5) erkennt man direkt den Quotienten aus dem Planckschen Strahlungsgesetz und der spektralen spezifische Emission des gemessenen Referenzspektrums, korrigiert um den Dunkelstrom. Dieser Quotient stellt die Korrekturfunktion dar, mit der die um den Dunkelstrom korrigierten Rohdaten multipliziert werden müssen um eine kalibrierte Messung zu erhalten. Bild 2.7 links zeigt in Blau, die Messwerte des gemessenen Referenzspektrums korrigiert um den Dunkelstrom und in Rot die Verteilung gemäß dem Planckschen Strahlungsgesetz. Bild 2.7 rechts zeigt die sich daraus ergebende Korrekturfunktion [25].

Aus der Betrachtung der Korrekturfunktion in Bild 2.7 rechts geht hervor, dass die gemessenen Spektren nur im Spektralbereich zwischen ungefähr 350 nm und 900 nm verwertbare Ergebnisse beinhalten. Dies rührt daher, dass das Spektrometer in den Randbereichen, aufgrund der spektralen Quanteneffizienz des verwendeten Siliziumdetektors, eine sehr niedrige Empfindlichkeit aufweist, die zu sehr hohen Werten der Korrekturfunktion führt. Dadurch werden jedoch auch Messunsicherheiten sehr hoch verstärkt, was zu einem sehr schlechten Signal-Rausch-Verhältnis in diesen Bereichen führt [22], [25].

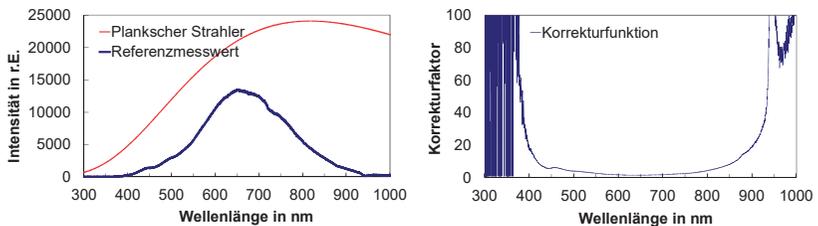


Bild 2.7: Sollspektrum des Planckschen Strahlers und gemessene Kurve der Referenzlampe (links), errechnete Korrekturfunktion (rechts) [22], [23], [25].

2.3.3 Versuchsplanung und Durchführung

Die Versuche zur spektralen Vermessung der Emissionen beim Laserstrahl-Tiefschweißen wurden mit einem lampengepumpten Nd:YAG Stablasers (HL 4006 D der Firma Trumpf) durchgeführt. Das Lasersystem hat eine maximale cw-Ausgangsleistung von 4 kW bei einer Wellenlänge von 1.064 nm . Das Laserlicht wurde in einer Transportfaser mit einem Kerndurchmesser von $600\text{ }\mu\text{m}$ geführt und mittels einer Laserbearbeitungsoptik (Trumpf BEO-D70 in 0° -Konfiguration) mit einem Abbildungsmaßstab von $1:1$ (Brennweite der Kollimation und der Fokussierung beträgt 200 mm) auf das Werkstück fokussiert. Bei einer relativen Fokusslage von 0 mm (Fokus auf der Werkstückoberfläche) ergibt sich ein Brennfleckdurchmesser von $600\text{ }\mu\text{m}$ auf dem Werkstück. Der Schweißprozess wurde ohne zusätzliche Prozessgase durchgeführt. Über den Strahlteiler der Bearbeitungsoptik wurde zusätzlich eine Kamera zur Prozessüberwachung im nahen Infrarot koaxial zum Bearbeitungslaser eingekoppelt. Der Gesamtaufbau mit allen genannten Komponenten ist in Bild 2.8 zu sehen.

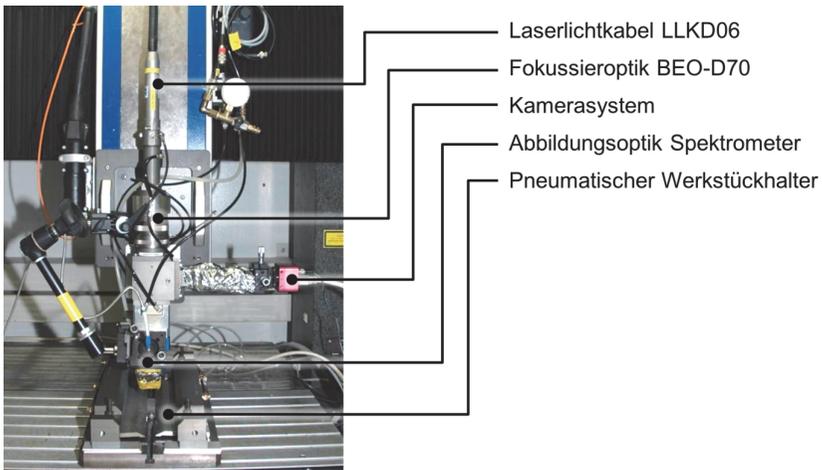


Bild 2.8: Aufbau zur spektralen Vermessung von Laserschweißprozessen [25].

Untersucht wurden drei unterschiedliche Werkstoffe, die jeweils ihre Werkstoffgruppe repräsentieren². Ein niedrig legierter Baustahl 1.0122 (S 235), ein hochlegierter Edel-

² Erfahrungsgemäß ist das Emissionsverhalten bei Stahlwerkstoffen auch bei unterschiedlichen Legierungen sehr ähnlich. Bei Aluminium trifft dies nicht uneingeschränkt zu, da sich Legierungen mit unterschiedlichen Hauptlegierungselementen im Emissionsverhalten zum Teil sehr stark unterscheiden (Beispiel: AA6012 zu AA5182).

stahl 1.4310 (X 10 Cr Ni 18 8) und ein Aluminium AA6012 (AlMgSiPb). Die Legierungselemente der Werkstoffe sind in Tabelle 2.4 zusammengefasst.

Baustahl 1.0122

C	Mn	P	S	N
0,17	1,4	0,045	0,045	0,09

Edelstahl 1.4310

C	Ni	Cr	Mn	P	S	N	Si	Mo	Cu
0,05-0,15	6-9,5	16-19	2	0,05	0,015	0,11	2	0,8	1

Aluminium AA6012

Si	Mn	Mg	Pb
0,6-1,4	0,4-1,0	0,6-1,2	0,4-2,0

Tabelle 2.4: Auflistung der Legierungselemente für die verwendeten Werkstoffe in Gewichtsprozent [28].

Die oben genannten Werkstoffe wurden mit unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten von 4, 6 und 8 m/min mit jeweils 3 kW und 4 kW Laserleistung geschweißt. Alle Versuche wurden zudem doppelt ausgeführt um eventuelle Ausreißer zu erkennen.

2.3.4 Versuchsauswertung

Die Auswertung der aufgezeichneten Spektren erfolgte qualitativ. Es wurden also vornehmlich Bereiche identifiziert, die durch diskrete Linienemissionen oder durch breitbandigere Abweichungen vom kontinuierlichen Spektrum - zum Beispiel durch Multipletts oder Molekülschwingungen - auffällig sind. Solche Spektralbereiche sind erfahrungsgemäß hinderlich für eine bildgebende Prozessvisualisierung, die meist ein Abbild der thermischen Verhältnisse erzeugen soll oder, unterstützt durch Zusatzbeleuchtung, die Struktur der Prozessoberfläche erfassen soll.

2.3.4.1 Baustahl 1.0122 (S 235)

Das Emissionsspektrum von niedrig legiertem Baustahl zeigt nur wenige Abweichungen von dem eines schwarzen beziehungsweise grauen Körpers. Im Wesentlichen emittiert die Dampfkapillare (rote Linie in Bild 2.9) ein kontinuierliches Spektrum, welches nur leicht von diskreten Spektrallinien überlagert wird. Zieht man vergleichend die Emissionsspektren des Schmelzbad (blaue Linie) und der Metaldampffackel (grüne Linie) heran, fällt auf, dass die Abweichungen vom kontinuierlichen Spektrum in der Metaldampffackel am stärksten ausgeprägt sind. Das Emissionsspektrum des Schmelzbad enthält teilweise auch die Emissionen der Metaldampf-

fackel, da bei der Messung das Schmelzebad dieses Spektrum teilweise - durch optisches Übersprechen - als Überlagerung in die Messung mit einspiegelt.

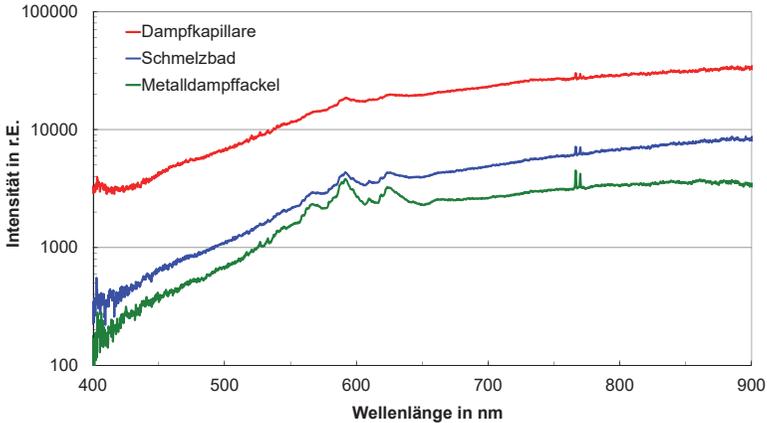


Bild 2.9: Emissionsspektrum von Baustahl 1.0122 (S 235) bei einer Laserleistung von 4 kW und einer Vorschubgeschwindigkeit von 6 m/min [26].

Der Unterschied in den relativen Intensitäten zwischen den drei Messpunkten hat unterschiedliche Gründe.

Als erstes sei hier die unterschiedliche Temperatur an den Messpunkten genannt. In der Dampfkapillare herrscht mindestens Verdampfungstemperatur von Eisen, also etwa 3.273 K [17]. Der Bereich des Schmelzebades weist eine deutlich niedrigere Temperatur auf. Die Schmelze liegt im Temperaturintervall zwischen der Schmelztemperatur von etwa 1.811 K [20] und der Verdampfungstemperatur. Aufgrund des T^4 -Gesetzes aus Gleichung (2.3) ergeben sich zwischen Dampfkapillare und Schmelzebad sehr große Unterschiede in der beobachtbaren Helligkeit der Prozessemission. Vernachlässigt man den Emissionskoeffizienten, ergibt sich aus dem Temperaturunterschied ein Helligkeitsunterschied von bis zu Faktor 10 . Die Temperatur der Metalldampffackel wiederum hängt sehr stark von der Wechselwirkungsdauer mit dem Bearbeitungslaser ab, der dem Dampf weiter Energie zuführt und dadurch der Abkühlung durch adiabatische Expansion entgegenwirkt.

Der zweite essentielle Grund für die gemessenen Intensitätsunterschiede ist der Emissionskoeffizient. Die Dampfkapillare mit ihrem hohen Aspektverhältnis von $> 3:1$ wirkt annähernd wie ein schwarzer Strahler mit einem Emissionskoeffizienten nahe 1 ,

während das quasi ebene Schmelzebad gemäß Tabelle 2.3 nur einen Emissionskoeffizienten von etwa 0,28 aufweist. Der Emissionskoeffizient der Metaldampffackel ist weitgehend unbekannt. Aufgrund der Tatsache, dass er im nahen infraroten Spektrum optisch dünn ist, kann jedoch von einem sehr niedrigen Emissionskoeffizienten ausgegangen werden, der dazu noch abhängig von der Ausdehnung der Fackel entlang der Beobachtungslinie ist.

Insbesondere fallen in den Spektren in Bild 2.9 zwei Linien bei $766,5\text{ nm}$ und $769,9\text{ nm}$ auf. Diese Linien tauchen auch in allen anderen Experimenten auf und sind unabhängig vom verwendeten Werkstoff. Bei den Linien handelt es sich nach [29] um die Kalium-I Doppellinie (K I). Kalium kommt als Kaliumverbindung in der Umwelt sehr häufig vor und lässt sich leicht anregen. Es handelt sich folglich um eine Verunreinigung der Proben. Insgesamt sind diese Linien für die Prozessbeobachtung als wenig störend einzuordnen, da sie im Vergleich zum darunterliegenden Kontinuum nur wenig Strahlungsleistung transportieren.

Nennenswerte Abweichungen vom kontinuierlichen Spektrum sind bei Baustahl lediglich im Wellenlängenbereich zwischen 550 nm und 640 nm zu beobachten. Eine Prozessbeobachtung unterhalb und oberhalb dieses Bereichs ist also - zumindest was die Eigenemission des Prozesses angeht - erfolgversprechend.



Bild 2.10: Bildfolge bei $850\text{-}10\text{ nm}$ einer Schweißung von Baustahl 1.0122 (S 235) bei einer Laserleistung von 4 kW und einer Vorschubgeschwindigkeit von 6 m/min [25].

Als Beispiel hierfür sei die Bildfolge in Bild 2.10 gezeigt. Es handelt sich dabei um Aufnahmen bei einer Zentralwellenlänge von 850 nm mit einer spektralen Halbwertbreite von 10 nm ($850\text{-}10\text{ nm}$). Die Aufnahmen zeigen also das thermische Eigenleuchten des Prozesses. Die Struktur der Wechselwirkungszone ist klar zu erkennen und wird nur wenig von darüber liegendem Metaldampf überdeckt.

2.3.4.2 Edelstahl 1.4310 (X 10 Cr Ni 18 8)

Im Vergleich zum niedrig legierten Baustahl sind in den Spektren des hochlegierten Edelstahls 1.4310 mehr diskrete Linien und Abweichungen vom kontinuierlichen Spektrum zu erkennen. Vergleicht man die Diagramme in Bild 2.9 und Bild 2.11, ist zu erkennen, dass sich diese Unterschiede hauptsächlich auf den Spektralbereich unterhalb von 640 nm beziehen. Bei der diskreten Linie um $520,5\text{ nm}$ könnte es sich gemäß [29] um die Chrom-1 Linie (Cr I) bei $520,452\text{ nm}$ handeln. Chrom ist in dieser Legierung mit 16% bis 19% das zweithäufigste Element neben Eisen. Weshalb jedoch das Spektrum der Metaldampffackel bei den Versuchen mit Edelstahl keine Kalium-1 Linien enthält konnte nicht abschließend geklärt werden.

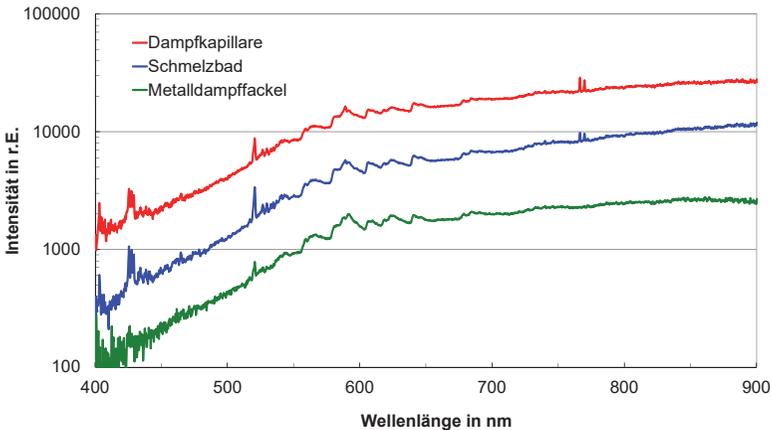


Bild 2.11: Emissionsspektrum von Edelstahl 1.4310 (X 10 Cr Ni 18 8) bei einer Laserleistung von 4 kW und einer Vorschubgeschwindigkeit von 6 m/min [26].

Wie oben erwähnt, sind die Hauptunterschiede zum niedrig legierten Baustahl hauptsächlich im Bereich unterhalb von 640 nm zu finden, was insbesondere auch verstärkte Emissionen im Bereich des blauen Spektrums zwischen 400 nm und 450 nm einschließt.

Für die Prozessbeobachtung bedeutet dies, dass der Spektralbereich oberhalb von 640 nm tendenziell weniger störende Emissionen beinhaltet, die das rein thermische Leuchten des Prozesses überdecken.

Bild 2.12 zeigt exemplarisch eine Bildfolge der Prozessbeobachtungskamera. Die Aufnahmen wurden wie bei den Experimenten mit Baustahl bei einer Zentralwellen-

länge von 850 nm und einer spektralen Halbwertbreite von 10 nm ($850\text{-}10\text{ nm}$) angefertigt. Die Aufnahmen zeigen das thermische Eigenleuchten des Prozesses. Die Struktur der Wechselwirkungszone ist auch in diesen Aufnahmen klar zu erkennen und wird nur wenig von darüber liegendem Metaldampf überlagert.



Bild 2.12: Bildfolge bei $850\text{-}10\text{ nm}$ einer Schweißung von Edelstahl 1.4310 (X 10 Cr Ni 18 8) bei einer Laserleistung von 4 kW und einer Vorschubgeschwindigkeit von 6 m/min .

2.3.4.3 Aluminium AA6012 (AlMgSiPb)

Aluminium (AA6012) zeigt gegenüber den weiter oben untersuchten Stahlwerkstoffen ein gänzlich anderes Emissionsverhalten.

Bei Betrachtung von Bild 2.13 fällt vor allem auf, dass die relativen Intensitäten von Dampfkapillare und Schmelzebad deutlich weiter auseinander liegen (mehr als Faktor 40 bei 700 nm) als bei den Stahlwerkstoffen (etwa Faktor 10 bei 700 nm). Dieser Unterschied zu den Stahlwerkstoffen ist vor allem durch den größeren Unterschied zwischen der Siedetemperatur von 2.743 K [17] und der Schmelztemperatur von 933 K [20] begründet. Aufgrund des T^4 -Gesetzes aus Gleichung (2.3) ergibt sich hier ein Unterschied in der beobachtbaren Helligkeit von bis zu Faktor 75 zwischen Dampfkapillare und Schmelzebad. Dieser Umstand macht die gleichzeitige Erfassung des Schmelzebades und der Dampfkapillare im Wellenlängenbereich unter 1.000 nm ohne Zusatzbeleuchtung sehr schwierig, da der Dynamikbereich verfügbarer Kameras hierfür meist nicht ausreichend groß ist. Dieser Umstand wird durch die Bilderserie in Bild 2.14 verdeutlicht und wurde durch Müller-Borhanian in [30] detailliert beschrieben.

Der spektrale Verlauf aller drei Messpunkte in Bild 2.13 weist teils extreme Abweichungen vom kontinuierlichen Graukörper-Spektrum auf. Dies gilt besonders für den gesamten Bereich unterhalb von 600 nm . Der gesamte Bereich im grünen und blauen Spektrum ist mit erheblichen charakteristischen Emissionen durchzogen, die aufgrund ihrer spektralen Breite eher von Molekülschwingungen verursacht werden. Diese Emissionen sind auch von anderen Aluminiumlegierungen bekannt und wurden bereits in früheren Arbeiten beschrieben [30], [31]. Auch bei AA6012 tritt wie schon bei den Stahlwerkstoffen die Kalium-Doppellinie (K I) bei $766,5\text{ nm}$ und $769,9\text{ nm}$ auf.

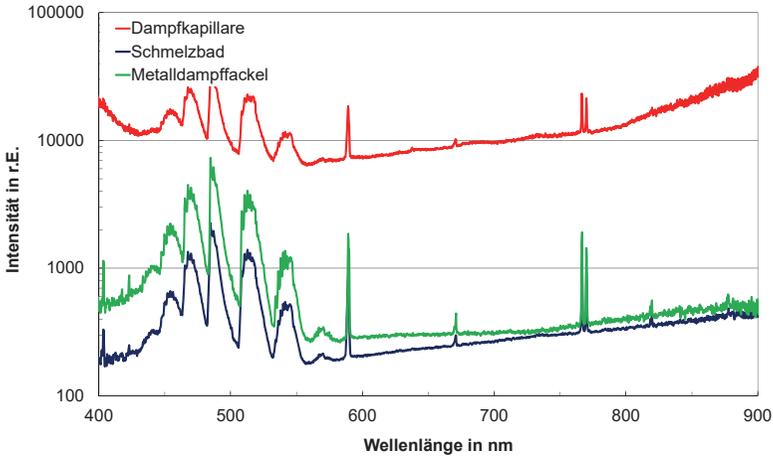


Bild 2.13: Spektrum AA6012 bei 4 kW und 6 m/min [26].

Generell ist bei der Prozessbeobachtung von Aluminium der Spektralbereich oberhalb von 600 nm von Vorteil, da er nur wenig durch charakteristische Emissionen gestört wird. Dies zeigen auch die Beispielbilder in Bild 2.14. Es handelt sich dabei um Aufnahmen bei einer Zentralwellenlänge von 850 nm mit einer spektralen Halbwertbreite von 10 nm (850-10 nm). Die Aufnahmen zeigen das thermische Eigenleuchten des Prozesses. Die Struktur ist klar zu erkennen und wird nur wenig von darüber liegendem Metalldampf gestört.



Bild 2.14: Bildfolge der AA6012-Schweißung (3 kW, 4 m/min).

2.3.5 Extinktion im Schweißrauch

Ein weiterer Aspekt für die Prozessbeobachtung ist die Absorption und Streuung des beobachteten Lichts im Schweißrauch. Diese Effekte lassen sich zusammen mit Beugung und Reflexion unter dem Begriff Extinktion subsummieren [32].

Michalowski et al. hat diesen Effekt für Laserschweißprozesse in Stahl mit Yb:YAG-Lasern quantifiziert [33]. In diesen Experimenten wurden Messlaserstrahlen verschied-

dener Wellenlängen durch die Schweißackel geleitet und mit einer Ulbrichtkugel die transmittierte Leistung ermittelt. Dabei wurden die Abschwächungskoeffizienten μ für das Lambert-Beersche Gesetz bestimmt, die für lange Wellenlängen deutlich niedriger ausfallen als für kurze Wellenlängen ($\mu_{543nm} = 1,05 m^{-1}$ und $\mu_{1047nm} = 0,08 m^{-1}$). Da beim Lambert-Beerschen Gesetz nach Gleichung (3.4) der Abschwächungskoeffizient zusammen mit der Weglänge im Exponenten der e-Funktion steht, können sich je nach zurückgelegtem Strahlweg durch den Schweißrauch Unterschiede in der Intensität von mehreren Größenordnungen ergeben [22].

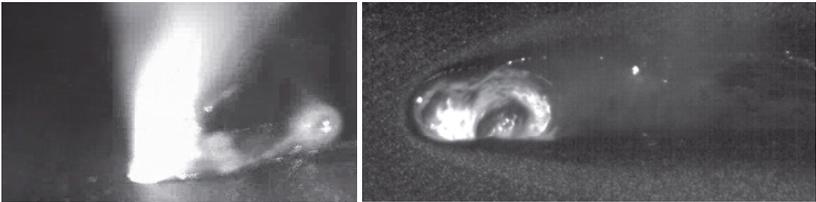


Bild 2.15: Schweißackel eines Laserschweißprozesses in Stahl unter Fremdbeleuchtung. Links bei 523 nm, rechts bei 808 nm.

Für die Prozessbeobachtung hat die Extinktion unterschiedliche Effekte. Bei der passiven Beobachtung des thermischen Eigenleuchtens, reduziert sie zum einen die scheinbare Helligkeit des zu untersuchenden Prozesses und zum anderen wird durch Streuung sowohl der Kontrast als auch die Ortsauflösung der Beobachtung reduziert. Bei Verwendung einer aktiven Beleuchtung wird das einfallende Licht schon im Schweißrauch gestreut und reflektiert. Die so gewonnen Bilder erscheinen, wie durch Nebel hindurch aufgenommen. Bild 2.15 zeigt einen Vergleich zwischen zwei Videobildern eines Laserschweißprozesses in Stahl bei einer Beleuchtung mit 532 nm und einer mit 808 nm Wellenlänge. Es ist deutlich zu erkennen, dass die kürzere Beleuchtungswellenlänge an den Partikeln in der Metaldampffackel wesentlich stärker gestreut wird, als die längere Wellenlänge. Auch ein Erhöhen der Beleuchtungsstärke kann hier keine Abhilfe schaffen, da die gestreute Beleuchtung selbst die Blendwirkung verursacht.

Die bessere Eignung von langwelliger Beleuchtung für die Prozessbeobachtung wurde bereits in früheren Arbeiten wie beispielweise in [30] und [31] erkannt, jedoch wurde als Ursache eine stärkere Emission des Prozesses im Bereich um 532 nm genannt. Wie die Messungen in Abschnitt 2.3.4 zeigen, gilt dies jedoch nur für Aluminiumwerkstoffe. Bei Stahlwerkstoffen sind keine ausgeprägten Emissionsmaxima in diesem Wellenlängenbereich vorhanden.

2.4 Konsequenzen für die Prozessvisualisierung

Die durchgeführten spektralen Untersuchungen der Prozessemissionen unterschiedlicher Werkstoffe ergaben für den Spektralbereich unterhalb $1 \mu\text{m}$ jeweils zwei spektrale Fenster pro Werkstoff in denen die Prozessemissionen vergleichsweise niedrig sind. Für Stähle sind dies die Spektren unterhalb von 500 nm und oberhalb von 650 nm Wellenlänge. Bei Aluminium (AA6012) liegt das kurzwellige Fenster unterhalb von 450 nm und das langwellige oberhalb von 600 nm .

Die Ergebnisse der Extinktionsmessungen im Schweißrauch zeigen, dass eine Verwendung des kurzwelligen Fensters, aufgrund der sehr großen Extinktion dieser Wellenlängen im Schweißrauch, für die Prozessvisualisierung nicht zielführend ist. Dieser Umstand lässt sich auch durch die Verwendung aktiver Beleuchtungseinrichtungen nicht umgehen.

Aus diesen Erkenntnissen lässt sich für die Prozessvisualisierung mit siliziumbasierten Kameras das spektrale Fenster zwischen 650 nm und 1.000 nm ableiten. In diesem Fenster sind die charakteristischen Prozessemissionen niedrig gegenüber dem thermischen Eigenleuchten des Prozesses und die zu beobachtende Strahlung wird durch die Extinktion im Schweißrauch nur gering beeinflusst. Die obere Grenze bei ungefähr 1.000 nm wird durch die spektrale Empfindlichkeit der Siliziumhalbleiter und durch die Wellenlänge des Bearbeitungslasers definiert.

Dabei gilt es zu beachten, dass der Wellenlängenbereich unter 1.000 nm im Spektrum der Schwarzkörperstrahlung in Bild 2.2 selbst bei Siedetemperatur von Stahl links des Emissionsmaximums liegt. Dies führt dazu, dass es in der Regel nicht möglich ist, Dampfkapillare und Schmelzebad vollständig in einem Kamerabild zu erfassen, da der Dynamikbereich von Siliziumkameras dazu nicht ausreicht [30]. Im Bereich des mittleren infraroten Spektrums rechts des Emissionsmaximums hingegen unterscheidet sich die spezifische Emission bei unterschiedlichen Temperaturen weit weniger stark. Kameras für diesen Wellenlängenbereich sind jedoch weit teurer und langsamer als Siliziumkameras und daher mehr für die Prozessdiagnostik als für die Prozessüberwachung interessant.

3 Prozess-Diagnostik mit Röntgen Video

Bei der Diagnostik von Laserschweißprozessen in metallischen Festkörpern stellt sich die grundlegende Problematik, dass der zu beobachtende Prozess unter der Oberfläche eines für optische Strahlung intransparenten Werkstoffs stattfindet. Um dieses Problem zu umgehen, kann auf den Einsatz von Röntgenvideotechnologie zurückgegriffen werden. Bis ins Jahr 2010 war eine solche Röntgenvideoanlage ausschließlich am Joining and Welding Research Institute (JWRI) in Osaka, Japan verfügbar.

An der Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge (FGSW) wurde im Jahre 2006 ein Forschungsprojekt gestartet mit dem Ziel in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Ernst-Mach-Institut für Hochgeschwindigkeitsdynamik EMI eine Hochgeschwindigkeits-Röntgenvideoanlage zu entwickeln. Die Anlage konnte am 10.11.2010 offiziell in Betrieb genommen werden. Das Forschungsprojekt wurde im Rahmen der Zukunftsoffensive III durchgeführt und von der Baden-Württemberg Stiftung finanziert.

Durch den Einsatz der Röntgenvideotechnologie lassen sich Prozessphänomene unterhalb der Werkstückoberfläche betrachten, die für die Entwicklung von Prozessüberwachungs- und Regelungssystemen wichtige Informationen liefern. Hierzu zählen insbesondere Informationen über Strömungsgeschwindigkeiten im Schmelzebad und das dynamische Verhalten der Dampfkapillare, welches direkten Einfluss auf Kapillarneigung, Porenbildung und Einschweißtiefe hat.

Die physikalischen Grundlagen, der Aufbau des Röntgensystems und dessen Anwendung, sowie die Erkenntnisse für das Prozessverständnis des Laserschweißens werden in den folgenden Abschnitten behandelt.

3.1 Physikalische und technische Grundlagen

Die Röntgenprüfung von Werkstoffen ist vergleichbar mit der Röntgendiagnostik am lebenden Objekt in der Medizin. Der einzige Unterschied ergibt sich durch die zu untersuchende Materie und die Dicke der zu durchstrahlenden Objekte. Insbesondere bei metallischen Festkörpern mit hoher Kernladungszahl bedarf es - verglichen mit der Medizin - einer sehr viel höheren Photonenenergie.

Für die Untersuchung der Kapillardynamik und der Schmelzebadströmung von Laserschweißprozessen mittels Röntgenvideotechnik ist es entscheidend, bei hohen Bildaufnahmeraten sehr kleine Details des Prozesses erfassen zu können. Dabei handelt es sich um eine sehr anspruchsvolle Aufgabe, da hohe Bildaufnahmeraten mit sehr kurzen Belichtungszeiten einhergehen und daher einen sehr großen Photonenfluss erfordern. Jedoch beeinträchtigt ein großer Photonenfluss aus technischen Gründen inhärent die geometrische Auflösung eines Röntgensystems.

Um diesem Zielkonflikt adäquat zu begegnen, ist sowohl eine sorgfältige Auswahl der Systemkomponenten, als auch eine fundierte Kenntnis über die Effekte der einzustellenden Systemparameter entscheidend. In den folgenden Abschnitten soll zu diesem Zweck auf die physikalischen Grundlagen und deren Einfluss auf die Bildqualität eingegangen werden.

Für die Hochgeschwindigkeits-Röntgen-Videografie existieren im Wesentlichen vier dominierende Einflussfaktoren, die sich gegenseitig beeinflussen. Diese sind:

- Die geometrische (laterale) Auflösung,
- der Kontrast (Tiefenauflösung),
- die Belichtungsdauer (Bildaufnahmerate)
- und das Bildrauschen (Signal-Rausch-Abstand).

3.1.1 Abbildung mittels geometrischer Schattenprojektion

Da der Brechungsindex aller Materialien für harte Röntgenstrahlen, im Wellenlängenbereich $< 1 \text{ \AA}$, nur unwesentlich von „1“ abweicht [34], ist die Konstruktion von refraktiven Röntgenoptiken sehr aufwändig. Hinzu kommt, dass harte Röntgenstrahlung in jedem Festkörper eine signifikante Absorption erfährt und selbst sehr gut polierte Oberflächen für derart kurze Wellenlängen eine signifikante Rauigkeit aufweisen. Eine Abbildung des zu beobachtenden Objekts mittels Spiegel oder Linsensystem ist für die hier verwendete harte Röntgenstrahlung deshalb nicht effizient zu realisieren.

Aus diesem Grund wurde bei der Entwicklung der Röntgendiagnostik am IFSW auf das Prinzip der geometrischen Schattenprojektion zur Abbildung des Objekts zurückgegriffen. Dieses Prinzip soll anhand des Schemas in Bild 3.1 verdeutlicht werden. Die Röntgenquelle beleuchtet das Objekt, welches seinerseits einen entsprechenden Schatten auf den Röntgendetektor wirft.

Die geometrische Vergrößerung

$$\beta_{geo} = \frac{a_{QD}}{a_{QO}} = \frac{r_{Bild}}{r_{Obj}} \quad (3.1)$$

dieser Projektion ergibt sich gemäß dem Strahlensatz [35], [36]. Wobei a_{QO} der Objektabstand zur Röntgenquelle ist und a_{QD} der Abstand der Röntgenquelle zum Detektor. Das Objekt mit der Größe r_{Obj} wird dabei mit der Bildgröße r_{Bild} auf den Detektor projiziert.

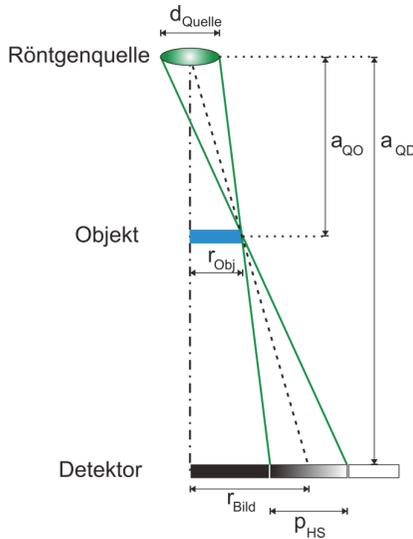


Bild 3.1: Prinzip des geometrischen Schattenwurfs eines zu beobachtenden Objekts auf einen Detektor.

Da die Röntgenröhre keine ideale Punktquelle ist, sondern eine flächige Quelle mit einem endlich großen Fokaldurchmesser ihres Elektronenstrahls, ergibt sich auf dem Detektor kein perfekt scharfer Schattenwurf. Die Größe des Halbschattens

$$p_{HS} = \frac{d_{Quelle}}{a_{QO}} (a_{QD} - a_{QO}) = d_{Quelle} \cdot \beta_{geo} - d_{Quelle} \quad (3.2)$$

der von einer perfekt scharfen Objektkante erzeugt wird, hängt deshalb vom Fokaldurchmesser der Röntgenröhre ab, wobei p_{HS} die Größe des Halbschattens und d_{Quelle} die Größe des Fokaldurchmessers der Röntgenröhre ist. Die Größen a_{QO} und a_{QD} sind die aus Bild 3.1 bekannten Abstände Quelle-Objekt und Quelle-Detektor [36], [37].

Der Fokusbereich d_{Quelle} der Röntgenröhre seinerseits, folgt einer monoton steigenden Funktion des Röhrenstroms und der Beschleunigungsspannung $d_{Quelle} = f(I_{Röhre}, U_{Beschleunigung})$ wie in Bild 3.2 ersichtlich ist. Maßgeblich für dieses Verhalten sind die Leistungsdichte des Elektronenstrahls auf der Anode der Röntgenröhre und die maximale thermische Belastbarkeit des Anodenmaterials. Die dargestellten Daten gelten für die Mikrofokus Röntgenröhre FXE-225.48 der Firma Yxlon, welche in der Röntgenanlage des IFSW verbaut ist. Der Röhrenstrom ist dabei maßgeblich für den Photonenfluss und die Beschleunigungsspannung für die Photonenenergie. Dies bedeutet jedoch, dass eine Erhöhung des Photonenflusses und/oder der Photonenenergie jeweils mit einer Vergrößerung des Fokusbereichs, und damit mit einer Vergrößerung des Halbschattens, einhergeht.

Wie aus Bild 3.1 ersichtlich ist, limitiert die Größe des Halbschattens p_{HS} das geometrische (laterale) Auflösungsvermögen des Systems. Diese Limitierung lässt sich auch durch eine weitere Erhöhung des Quelle-Detektorabstandes oder durch eine Verkürzung des Objektabstandes nicht umgehen. Nimmt man als Bedingung für die Erkennbarkeit von Strukturen im Bild an, dass $p_{HS} \leq r_{Bild}$ sein muss, so ergibt sich durch Gleichsetzen der Gleichungen (3.1) und (3.2), für Objektdetails kleiner als der Fokusbereich d_{Quelle} , eine maximal förderliche Vergrößerung von

$$\beta_{max} \leq \frac{d_{Quelle}}{(d_{Quelle} - r_{Obj})}. \quad (3.3)$$

Dies bedeutet, dass für einen gegebenen Fokusbereich d_{Quelle} eine maximale förderliche geometrische Vergrößerung β_{max} existiert, bei deren Überschreiten die Größe des Halbschattens p_{HS} stärker anwächst, als die Bildgröße r_{Bild} des zu beobachtenden Objekts r_{Obj} . Des Weiteren lässt sich aus Gleichung (3.3) für eine gegebene geometrische Vergrößerung β_{max} die kleinste gerade noch auflösbare Detailgröße r_{Obj} in Abhängigkeit des Fokusbereichs d_{Quelle} bestimmen [36].

Eine direkte Folge der Relation aus Gleichung (3.3) ist, dass bei kleiner werdender Vergrößerung auch Objektdetails kleiner als der Fokusbereich der Röntgenröhre noch scharf auf einem Schirm abgebildet werden können. So ergeben sich beispielsweise für eine Vergrößerung $\beta = 2$ minimal auflösbare Objektdetails r_{Obj} mit einer Größe von $d_{Quelle} / 2$. Theoretisch ergibt sich für eine Vergrößerung von $\beta = 1$ eine auflösbare Strukturgröße von $r_{Obj} = 0$. Aufgrund des begrenzten Auflösungsvermögens des Detektors lässt sich dies jedoch nicht nutzen. Typische Szintillatoren in Röntgendetektoren weisen eine Auflösung von etwa 2 - 20 LP/mm auf [36], [38]. Des Weiteren sind dem minimalen Abstand von Objekt zu Detektor praktische Grenzen gesetzt.

Es bleibt de facto meist nur die Möglichkeit eine Röntgenquelle mit möglichst kleinem Fokus zu nutzen und eine hinreichend große geometrische Vergrößerung einzustellen, um das begrenzte Auflösungsvermögen des Detektors bestmöglich auszunutzen.

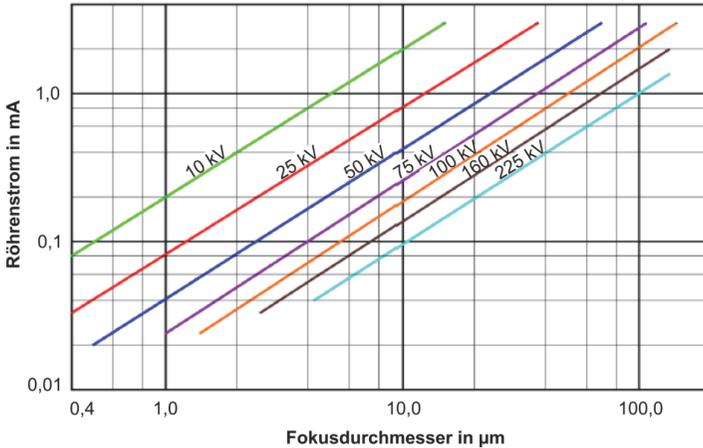


Bild 3.2: Fokussdurchmesser d_{Quelle} der Röntgenröhre (Yxlon FXE-225.48) als Funktion des Röhrenstroms $I_{\text{Röhre}}$ und der Beschleunigungsspannung $U_{\text{Beschleunigung}}$ [39].

3.1.2 Absorption und Kontrast von Röntgenstrahlung

Für die Sichtbarkeit kleiner Strukturen ist neben der theoretischen lateralen Auflösung des Systems der Kontrast eine entscheidende Kenngröße. Der Kontrast bei der Röntgendiagnostik hängt im Wesentlichen von den Absorptionseigenschaften des zu untersuchenden Materials und der Energie der dazu verwendeten Röntgenstrahlung ab.

Die Schwächung von Röntgenstrahlung beim Durchgang durch ein Medium beruht gemäß [40] und [41] vorwiegend auf den Mechanismen der Photoabsorption und der Compton-Streuung. Bei sehr hohen Photonenenergien von $E > 1 \text{ MeV}$ tritt zusätzlich noch die sogenannte Elektron-Positron-Paarbildung als Absorptionseffekt auf. Da die meisten technischen Anwendungen zur Materialprüfung Photonenenergien von weniger als $0,5 \text{ MeV}$ einsetzen, soll im Weiteren auf den Effekt der Paarbildung nicht näher eingegangen werden.

Die Extinktion der Röntgenstrahlung in einem Werkstück (Kombination aus Absorption und Streuung [32]) erfolgt nach dem Abschwächungsgesetz

$$I(d_W) = I_0 \cdot e^{-\mu d_W} = I_0 \cdot e^{-(\mu_{\text{Streuung}} + \mu_{\text{Absorption}})d_W} \quad (3.4)$$

von Lambert-Beer entlang des Strahlenganges. I_0 entspricht dabei der Anfangsintensität und $I(d_W)$ der Intensität hinter einem Werkstück (Absorber) der Dicke d_W mit einem Schwächungskoeffizienten μ . Der Abschwächungskoeffizient $\mu = \mu_{\text{Streuung}} + \mu_{\text{Absorption}}$ setzt sich zudem additiv aus dem Streukoeffizienten μ_{Streuung} und dem Absorptionskoeffizienten $\mu_{\text{Absorption}}$ zusammen, wobei für Atome mit Kernladungszahl $Z_K > 20$ der Streueffekt vernachlässigbar klein wird. Der Abschwächungskoeffizient

$$\mu \propto \frac{\rho \cdot Z_K^3}{E^3} \quad (3.5)$$

ist im Wesentlichen abhängig von der Dichte des Werkstoffes ρ , seiner Kernladungszahl Z_K und der Photonenenergie der Röntgenstrahlung E , wobei Kernladungszahl und Photonenenergie jeweils zur dritten Potenz in die Relation eingehen [37], [42]. Die Intensität $I(d_W)$, die das Werkstück durchdringt lässt sich also gemäß der Gleichungen (3.4) und (3.5) auf zwei Arten beeinflussen. Zum einen kann der Photonenfluss, durch Erhöhung des Röhrenstroms der Strahlquelle erhöht werden, und zum anderen kann durch Anpassung der Photonenenergie (direkt abhängig von der Beschleunigungsspannung) die Durchdringungskraft der erzeugten Strahlung beeinflusst werden.

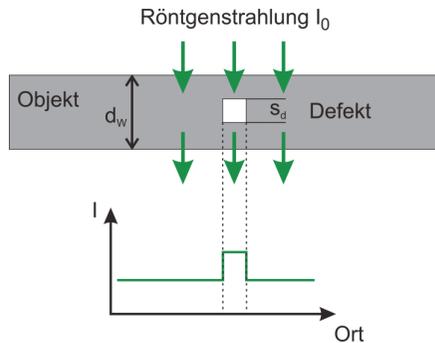


Bild 3.3: Prinzip der Kontrastentstehung bei der Röntgendurchstrahlung eines homogenen Prüfkörpers der Dicke d_W mit einem kubischen Defekt (Hohlraum) der Kantenlänge s_d . Röntgenstrahlung der Intensität I_0 durchdringt das Objekt und trifft in abgeschwächter Form I auf den Detektor.

Die Röntgenbilderzeugung basiert nun darauf, dass die Abschwächung der Röntgenstrahlung beim Durchgang durch einen Prüfkörper, in Abhängigkeit seiner inneren Struktur, ortsabhängig ist.

Zur Verdeutlichung der Entstehung des Kontrasts bei der Röntgenbilderzeugung wird der Sachverhalt in Bild 3.3 herangezogen. Dargestellt ist ein homogener Prüfkörper der Dicke d_w mit einem Abschwächungskoeffizient μ_d , welcher eine kubische Struktur der Kantenlänge s_d mit Abschwächungskoeffizient μ_s enthält. Dieser Prüfkörper wird von einem homogenen Strahlungsfeld der Intensität I_0 durchstrahlt, welches durch die innere Struktur des Prüfkörpers eine ortsabhängige Abschwächung erfährt. Diese ortsabhängige Abschwächung kann mit einem bildgebenden Detektor sichtbar gemacht werden. Die simpelste Definition des Kontrastes zwischen zwei zu vergleichenden Intensitätswerten I_1 und I_2 ist deren Quotient³ [43]

$$K = \frac{I_1}{I_2}. \quad (3.6)$$

Wird Gleichung (3.6) mit dem Abschwächungsgesetz (3.4) nach Lambert-Beer kombiniert, ergibt sich daraus der Kontrast

$$K = \frac{I(d_w - s_d)}{I(d_w)} = \frac{I_0 \cdot e^{-\mu_d \cdot (d_w - s_d)} \cdot e^{-\mu_s \cdot s_d}}{I_0 \cdot e^{-\mu_d \cdot d_w}} = e^{(\mu_d - \mu_s) \cdot s_d} \quad (3.7)$$

der Teilstrahlen $I(d_w - s_d)$ und $I(d_w)$ aus Bild 3.3. Bemerkenswert ist, dass gemäß Gleichung (3.7) der Kontrast unabhängig von der Dicke des Prüfkörpers d_w und ebenfalls unabhängig von der verwendeten Intensität I_0 der Röntgenquelle ist. Solange hinreichend viel Röntgenintensität auf den Detektor trifft, ist der Kontrast im resultierenden Bild lediglich abhängig von der Größe der zu detektierenden Struktur s_d und den Abschwächungskoeffizienten des Grundmaterials μ_d und der inneren Struktur μ_s . Gleichung (3.7) zeigt ebenfalls, dass der einfache Kontrast gemäß Gleichung (3.6) exponentiell von der Größe der inneren Struktur und der Differenz der beteiligten Schwächungskoeffizienten abhängt.

Wie aus Gleichung (3.5) bekannt ist, lässt sich der Schwächungskoeffizient über die verwendete Photonenenergie beeinflussen. Da in vielen Fällen die zu findende innere Struktur einen Hohlraum darstellt, dessen Abschwächungskoeffizient $\mu_s \ll \mu_d$ ist, ist es zielführend, durch Reduzierung der Photonenenergie den Abschwächungskoeffizient des Grundmaterials zu erhöhen, um dadurch den Kontrast gemäß Gleichung (3.7) zu verbessern. Bild 3.4 zeigt hierzu exemplarisch den Verlauf des Schwächungskoeffizienten von Eisen und Aluminium in Abhängigkeit der Photonenenergie. Daraus lässt

³ Neben dem einfachen Quotienten (Leuchtdichteverhältnis) sind in der Praxis noch weitere Definitionen für den Kontrast gebräuchlich, wie beispielsweise der Weber-Kontrast in der Beleuchtungsplanung oder der Michelson-Kontrast in der Signalverarbeitung.

sich erkennen, dass bei Verwendung der gleichen Photonenenergie Aluminium einen sehr viel niedrigeren Schwächungskoeffizienten aufweist als Eisen, was zu einem schlechteren Kontrast im Röntgenbild führt. Wird jedoch bei der Untersuchung von Aluminium die Photonenenergie entsprechend reduziert lassen sich vergleichbare Abschwächungskoeffizienten wie bei Eisen erreichen.

Der Kontrasterhöhung durch Erhöhung des Abschwächungskoeffizienten sind jedoch technische Grenzen gesetzt. Wird der Abschwächungskoeffizient größer, gelangt naturgemäß weniger Strahlung zum Detektor. Dies muss durch Erhöhung des Photonennflusses kompensiert werden, was jedoch nur in Grenzen möglich ist.

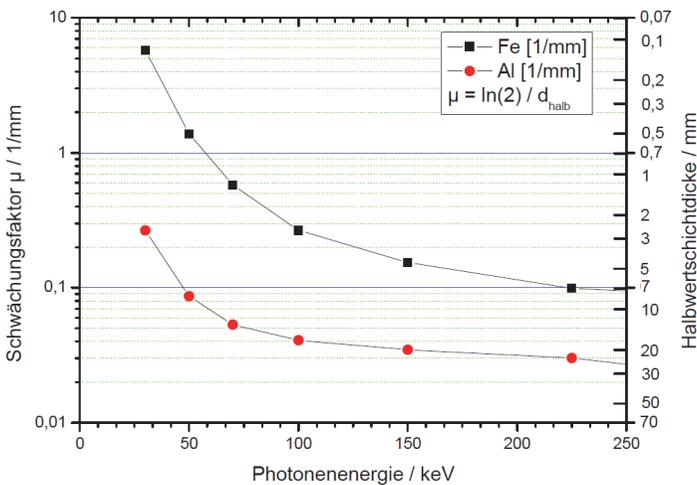


Bild 3.4 Abschwächungskoeffizient und Halbwertschichtdicke von Eisen und Aluminium in Abhängigkeit der Photonenenergie der verwendeten Röntgenstrahlung [36], [44].

Die Photonenenergie \hat{E}_{Photon} des Intensitätsmaximums der durch Bremsstrahlung in der Röntgenröhre erzeugten Röntgenquanten lässt sich über die Elementarladung des Elektrons q_e und die Beschleunigungsspannung in der Röntgenröhre $U_{\text{Beschleunigung}}$ anhand der Kulenkampffschen Formel

$$\hat{E}_{\text{Photon}} = \frac{2}{3} \cdot U_{\text{Beschleunigung}} \cdot q_e \quad (3.8)$$

berechnen [45]. Sie kann verwendet werden, um den Absorptionskoeffizienten gemäß Gleichung (3.5) näherungsweise mit monochromatischer Röntgenstrahlung zu berechnen, obwohl naturgemäß ein ganzes Energiespektrum vorliegt.

Für die Untersuchung von Eisen beziehungsweise Stahl wird die Röntgenröhre typischerweise mit Beschleunigungsspannungen zwischen 150 kV und 220 kV betrieben. Für Aluminium hingegen, liegen die Werte zwischen 50 kV und 100 kV . Diese Beschleunigungsspannungen beruhen auf Erfahrungswerten aus dem Betrieb der Röntgenanlage am IFSW.

3.1.3 Signal-Rausch-Verhältnis

Da bei der Diagnostik mit Röntgen Video aufgrund der hohen Bildaufnahmezeiten sehr kurze Belichtungszeiten verwendet werden müssen, stehen für die Bildgebung nur sehr wenige Photonen pro Bildpunkt zur Verfügung. Dies führt dazu, dass auch bei vollkommen homogener Beleuchtung des Detektors mit Röntgenstrahlung einer gegebenen Intensität die einzelnen Pixel des entstehenden Bildes nicht notwendigerweise dieselbe Helligkeit aufweisen. Lediglich die mittlere Helligkeit des Bildes ist proportional zur Intensität der Röntgenstrahlung. Das dabei entstehende Schrotrauschen (shot-noise) zwischen den Bildpunkten, entsteht dadurch, dass aufgrund der begrenzten Anzahl an einfallenden Photonen, benachbarte Bildpunkte stochastisch von unterschiedlich vielen Photonen getroffen werden.

Für eine geringe Anzahl an Photonen pro Pixel folgt die Wahrscheinlichkeit für die Detektion von Photonen einer Poisson-Verteilung [46]. Die Standardabweichung des Schrotrauschens entspricht dabei der Wurzel des Erwartungswertes der Anzahl an Photonen n^* , die ein Pixel trifft [47]. Somit lässt sich die Stärke des Schrotrauschens als dessen Signal-Rausch-Verhältnis

$$SNR = \frac{n^*}{\sqrt{n^*}} = \sqrt{n^*} \propto \sqrt{D} \quad (3.9)$$

schreiben. Die Wurzel aus dem Erwartungswert der detektierten Photonen und damit das SNR ist proportional der Wurzel aus der Dosis D der Röntgenstrahlung [36], [46]. Dieses Rauschen beeinträchtigt die Erkennbarkeit von kleinen Details innerhalb des Bildes, wenn der Kontrast der gesuchten Details nicht mehr signifikant höher ist, als das umgebende Rauschen. Gemäß Gleichung (3.9) kann die Bildqualität erhöht werden, indem die Dosis der Röntgenstrahlung erhöht wird, die pro Zeiteinheit auf den Detektor trifft.

Die Dosis

$$D \propto U_{\text{Beschleunigung}} \cdot I_{\text{Röhre}} \cdot t \quad (3.10)$$

ist proportional dem Röhrenstrom $I_{\text{Röhre}}$, der Beschleunigungsspannung $U_{\text{Beschleunigung}}$ und der Expositionsdauer t . Dies bedeutet, dass die minimal erkennbare Detailgröße auch vom Signal-Rausch-Verhältnis abhängt, da kleine Strukturen einen Kontrast aufweisen müssen, der signifikant höher als das Umgebungsrauschen ist [35].

3.1.4 Röntgendetektoren

Für die Röntgenvideographie werden ortsauflösende Röntgendetektoren benötigt, die ein schnelles zeitaufgelöstes Auslesen der Bilddaten erlauben. In der weiteren Betrachtung wird daher auf die Beschreibung von Röntgenfilm und Speicherphosphor-Bildplatten verzichtet. Die zeit- und ortsaufgelöst arbeitenden Detektoren lassen sich im Wesentlichen in die zwei Klassen der direkten und der indirekten Detektoren unterteilen.

3.1.4.1 Direkte Röntgendetektoren

Bei den direkten Detektoren wird die Röntgenstrahlung in einem Halbleitermaterial direkt in Ladungsträger umgewandelt, die analog zu CCD- beziehungsweise CMOS-Kameras, elektronisch ausgelesen werden können. Damit im Detektor Ladungsträger durch Röntgenphotonen ausgelöst werden können, muss das Halbleitermaterial hinreichend stark mit der Röntgenstrahlung wechselwirken. Gemäß der Relation (3.5) ist hierfür ein Material mit möglichst hoher Kernladungszahl notwendig, um den Sensor mit praktikablen Schichtdicken realisieren zu können. Zudem muss sich das Halbleitermaterial zu ausreichend großen Flächendetektoren (einige Zentimeter Kantenlänge) mit hinreichend hoher Pixelanzahl verarbeiten lassen [36].

Silizium erfüllt zwar die Anforderungen an die Verarbeitbarkeit, erreicht jedoch aufgrund seiner geringen Kernladungszahl von $Z_K = 14$ nur eine sehr geringe Wechselwirkung mit der Röntgenstrahlung.

Geeignete Materialien sind momentan ausschließlich Cadmium-Tellurid- beziehungsweise Cadmium-Zink-Tellurid-Halbleiter. Durch die höhere Kernladungszahl von $Z_K = 48$ und die größere Dichte gegenüber Silizium ist die Wechselwirkung mit Röntgenphotonen etwa 150-Fach größer. Solche CdTe/CdZnTe-Halbleiter lassen sich im

CMOS-Prozess zu Flächendetektoren mit hinreichender Größe und Pixelanzahl verarbeiten und sind von einigen Firmen am Markt verfügbar. Je nach Auflösung, sind Bildraten bis wenige Hundert Bildern pro Sekunde erzielbar [36].

3.1.4.2 Indirekte Röntgendetektoren

Bei den indirekten Detektoren wird die Röntgenstrahlung in einem mindestens zwei-stufigen Prozess durch die Verwendung von Szintillatoren erfasst. Szintillatoren sind Materialien, die bei Bestrahlung mit hochenergetischen Photonen oder geladenen Teilchen ihrerseits durch Fluoreszenz zum Leuchten angeregt werden. Diese Szintillatoren werden in der Regel flächig ausgelegt und dienen als Leuchtschirm, der das Röntgenlicht in sichtbares Licht umwandelt. Das so entstandene sichtbare Licht wird dann mit konventionellen optischen Verfahren aufgezeichnet [48].

Je nach Anwendungsfall kommen unterschiedliche Szintillatoren zum Einsatz, die sich durch ihre Leuchtstärke, ihre Abklingdauer und ihre optische Auflösung voneinander unterscheiden. Auf der einen Seite sei hier Gadoliniumoxid ($\text{Ga}_2\text{O}_2\text{S:Tb}$) genannt, bei dem es sich um einen sehr hell leuchtenden Szintillator handelt, der jedoch mit $\tau_A = 570 \mu\text{s}$ eine sehr lange Abklingzeit aufweist. Auf der anderen Seite stehen mit Bariumfluorbromid (BaFBr) und Calciumwolframat (CaWo) Szintillatoren mit extrem kurzer Abklingzeit von $\tau_A = 0,7 \mu\text{s}$ zur Verfügung, die jedoch gegenüber Gadoliniumoxid nur etwa $1/8$ bis $1/5$ von dessen Leuchtkraft aufweisen. Einen Kompromiss aus Leuchtkraft und Abklingzeit stellen Szintillationen aus Thallium dotiertem Cäsiumiodid, sogenanntes CsI:Tl dar, deren Abklingzeit etwa $0,5 \mu\text{s}$ bis $1,0 \mu\text{s}$ beträgt, gefolgt von einem geringen Nachleuchten (wenige Prozent) im Millisekundenbereich [36], [48].

3.1.4.3 Optische Kopplung von indirekten Röntgendetektoren

Direktkontakt

In den meisten kommerziell erhältlichen Detektoren ist der Szintillator direkt auf einen Silizium-Kamerachip aufgebracht. Jedes im Szintillator erzeugte Photon, das den Kristall in Richtung des Detektors verlässt, gelangt ohne weitere optische Komponenten direkt auf den Kamerachip. Diese Methode bietet die größtmögliche Lichtempfindlichkeit. Nachteilig ist, dass der Silizium-Kamerachip genau so groß sein muss, wie die benötigte röntgensensitive Fläche. Typischerweise handelt es sich hierbei um Größenordnungen von $50 * 50 \text{ mm}^2$ bis $400 * 400 \text{ mm}^2$. Derart große Siliziumchips wer-

den meist aus polykristallinem oder amorphem Silizium gefertigt und lassen sich naturgemäß nur sehr langsam mit Bildraten von < 50 Hz auslesen [36].

Linsensysteme

Die zweite Möglichkeit der Kopplung besteht in der Verwendung von Linsensystemen zur Abbildung des Szintillators auf den Kamerachip. Der große Vorteil dieser Methode besteht in der großen Flexibilität bezüglich des Abbildungsmaßstabs und der geometrischen Anordnung. So können einerseits kompakte, hochauflösende und schnelle Kamerachips verwendet werden um das Abbild eines deutlich größeren Szintillators aufzuzeichnen und andererseits können diese empfindlichen Kameras durch eine Spiegeloptik außerhalb des direkten Strahlkegels der Röntgenquelle angeordnet werden, was deren Lebensdauer im industriellen Einsatz deutlich erhöht [49]. Nachteilig wirkt sich jedoch der vergleichsweise schlechte optische Wirkungsgrad solcher Linsensysteme aus, der, je nach Objektivtyp, typischerweise zwischen 5 % und 25 % liegt [50].

Faseroptische Koppler

Die dritte Möglichkeit zur Kopplung von Szintillator und Kamerachip besteht in der Verwendung von faseroptischen Platten. Die Übertragung ist sehr effizient, da das Faserbündel direkt mit dem Szintillator und dem Kamerachip verkittet wird. Auf diese Weise wird ein sehr großer Anteil der emittierten Photonen in das Faserbündel eingekoppelt. Diese Platten lassen sich auch als Fiber-Taper herstellen, die dann eine optische Vergrößerung beziehungsweise Verkleinerung bewirken. Kommerziell erhältlich sind Vergrößerungen bis 3:1 bei einer Transmission von bis zu 70 % [36]. Nachteilig sind jedoch die geringe Flexibilität und die aufwändige Montage solcher Systeme. So müssen Szintillator, Fiber-Taper und Kamera fest miteinander verkittet werden, was bei Wartungsarbeiten an Kamera und Szintillator hinderlich ist.

3.2 Aufbau des Röntgen-Systems

Die Röntgenanlage des Instituts für Strahlwerkzeuge IFSW wurde entwickelt für die Video-Diagnose von Laserschweißprozessen in Metallen, wie beispielsweise Aluminium-, Stahl- und Kupferlegierungen. Die typischen Fokusedurchmesser der verwendeten Bearbeitungslaser liegen im Bereich zwischen $50 \mu\text{m}$ und $600 \mu\text{m}$, bei Laserleistungen von wenigen hundert Watt bis hin zu mehreren Kilowatt. Bei Vorschubgeschwindigkeiten von $0,5 \text{ m/min}$ bis etwa 50 m/min werden dabei Einschweißiefen zwischen $0,5 \text{ mm}$ und mehr als 10 mm erzielt. Die dabei vorherrschenden Tiefschweißprozesse

sind gekennzeichnet durch eine hohe Dynamik der Dampfkapillare und des umgebenden Schmelzebades, was zu stochastisch auftretenden Schweißfehlern, wie Porenbildung und Schmelzebadauswürfen führen kann.

Diese Prozessparameter definieren die Anforderungen an das Röntgensystem hinsichtlich Auflösungsvermögen in Zeit und Raum. Das System muss dabei in der Lage sein, Videodaten von mehreren Sekunden Länge mit Bildaufnahmeraten von mindestens 1.000 fps (Zielgröße: 10.000 fps) aufzuzeichnen. Weiterhin muss die räumliche Auflösung im Bereich von $250\text{ }\mu\text{m}$ bis $50\text{ }\mu\text{m}$ oder besser liegen. Zur optimalen Ausnutzung der begrenzten Pixelanzahl des Detektorsystems soll die geometrische Vergrößerung anpassbar sein, um ein Sichtfeld (im Prozess) zwischen $5\text{ mm} * 5\text{ mm}$ und $20\text{ mm} * 20\text{ mm}$, bildfüllend auf den Detektor abzubilden.

3.2.1 Röntgen-Video-Detektor und Röntgenröhre

Der Röntgen-Video-Detektor wurde nach dem modularen Konzept eines indirekten Röntgendetektors aufgebaut und besteht aus diskreten austauschbaren Komponenten, die eine spätere Anpassung oder Aufrüstung des Systems ermöglichen.

In Bild 3.5 ist das Schema des Röntgen-Video-Detektors mit der Röntgenquelle und dem zu beobachtenden Objekt dargestellt. Als Röntgenstrahlquelle dient eine Mikrofokus-Röntgenröhre vom Typ FXE-225.48 der Firma Yxlon. Der minimal einstellbare Fokusedurchmesser liegt bei $6\text{ }\mu\text{m}$, wobei der praktisch nutzbare Fokusedurchmesser, aufgrund der benötigten Strahlleistung⁴, zwischen $50\text{ }\mu\text{m}$ und $100\text{ }\mu\text{m}$ liegt (siehe hierzu Bild 3.2). Die Beschleunigungsspannung kann zwischen 10 kV und 225 kV variiert werden, wobei der maximale Röhrenstrom bei 3 mA liegt.

Die Röntgenstrahlen, welche von der Röntgenröhre emittiert werden, projizieren das zu untersuchende Objekt, gemäß den Gesetzmäßigkeiten aus Abschnitt 3.1, auf einen $50\text{ mm} * 50\text{ mm}$ großen Szintillationsschirm⁵ [38], welcher die Röntgenphotonen in sichtbares Licht umwandelt. Es kommt dabei ein Szintillator aus Thallium dotiertem Cäsiumjodid, sogenanntes CsI:Tl, zum Einsatz, welches in einer kristallinen Nadelstruktur auf einem Aluminiumsubstrat gezüchtet wurde. Es zeichnet sich durch seine vergleichsweise hohe Leuchtkraft bei gleichzeitig kurzer Abklingzeit ($\tau_A \approx 1,0\text{ }\mu\text{s}$,

⁴ Je nach zu untersuchendem Material, dessen Stärke und gewünschter Bildaufnahmerate, liegt die benötigte Strahlleistung zwischen 90 W und 200 W (Erfahrungswerte aus dem Betrieb der Anlage).

⁵ Konkrete Anwendung findet der J8978 von Hamamatsu mit einer Schichtdicke von $150\text{ }\mu\text{m}$.

siehe Abschnitt 3.1.4.2) aus. Die Nadelstruktur hat lichtführende Eigenschaften, was eine große Dicke des Szintillators und damit hohe Konversionseffizienz ermöglicht, ohne dadurch aufgrund von Volumenstreuung an Ortsauflösung zu verlieren. Die vom Hersteller angegebene Auflösung beträgt 10 LP/mm (bei einer Kontrastübertragung von 20%) [38].

Das Bild auf dem Szintillationsschirm wird anschließend über ein lichtstarkes telezentrisches⁶ Objektiv bildfüllend auf den Eingangsschirm eines Bildverstärkers abgebildet. Das verwendete Objektiv wurde von der Firma Sill Optics nach speziellen Vorgaben für diese Anwendung konstruiert. Es zeichnet sich durch eine besonders homogene Helligkeitsverteilung (Vignettierung) aus und besitzt bei einer optischen Vergrößerung von $\beta = 0,3$ eine Blendenzahl von $f/0,4$ (Offenblende).

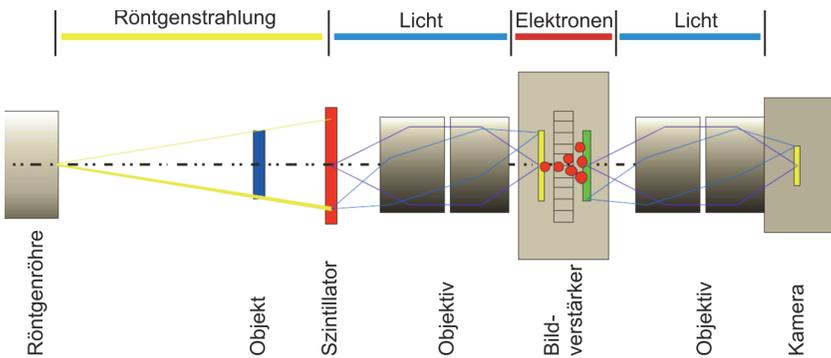


Bild 3.5: Schema des Röntgen-Video-Systems mit Strahlengang von der Röntgenröhre bis zur Kamera [36].

Bei dem verwendeten Bildverstärker handelt es sich um einen zweistufigen Verstärker vom Typ C10880 der Firma Hamamatsu Photonics mit schaltbarem elektronischem Gate. Das sichtbare Licht wird auf der Eingangsseite von einer Photokathode in freie Elektronen umgewandelt, die in einer ersten Stufe von einer Mikrokanalplatte (MCP) elektrisch vervielfacht werden. Die Kopplung zur zweiten Stufe erfolgt optoelektronisch mit dem besonders schnellen Leuchtphosphor P46⁷ und einer weiteren Photokathode. Die zweite Stufe, der sogenannte Booster ist ein Inverter, der nach dem Prinzip

⁶ Maßgeblich bei der Auswahl war dabei nicht die telezentrische Eigenschaft selbst, sondern die bei dieser Konstruktionsart niedrige Vignettierung und geringe Abbildungsfehler.

⁷ Diese Variante wurde von Hamamatsu Photonics als Modifikation C10880-03F nach Kundenspezifikation entwickelt.

einer Elektronenröhre arbeitet und über eine elektronenoptische Abbildung die Elektronen mittels Hochspannung auf den Ausgangsschirm (Leuchtphosphor P46) des Boosters beschleunigt. Aufgrund des verwendeten Leuchtphosphors findet auch innerhalb des Bildverstärkers ein gewisses, wenn auch sehr kurzes, Nachleuchten statt. Der verwendete P46 weist eine schnelle Abklingkomponente (von 90 % auf 10 % Helligkeit) $\tau_{90-10} = 0,3 \mu\text{s}$ gefolgt von einer langsamen Abklingkomponente (von 10 % auf 1 % Helligkeit) $\tau_{10-1} = 90 \mu\text{s}$ auf. Die bildseitige Ortsauflösung des Bildverstärkers wird vom Hersteller mit 38 LP/mm angegeben, was niedriger liegt, als die vom Szintillator (10 LP/mm) über das Objektiv ($\beta_{Tele} = 0,3$) und den Bildverstärker ($\beta_{BV} = 0,67$) theoretisch erzielbare Ortsauflösung von $10 / (0,3 * 0,67) \text{ LP/mm} = 49,75 \text{ LP/mm}$.

Das so in seiner Intensität verstärkte Bild wird schließlich mittels eines 1:1 (effektiv gemessen $\beta_{Relay} = 1,18$) abbildenden Objektivs (Relay-Optik) auf den Sensor einer Hochgeschwindigkeitskamera abgebildet. Zum Einsatz kommt hierfür eine CMOS-Kamera vom Typ SA3 der Firma Photron mit einer Auflösung von $1.024 * 1.024 \text{ Pixel}$ bei einer Pixelgröße von $17 \mu\text{m}$. Die Quantisierung der Intensitätswerte erfolgt mit 12 Bit , was 4.096 Graustufen entspricht. Die maximale Bildaufnahmezeit bei voller Auflösung beträgt 2.000 fps , durch Reduzierung der Bildgröße können auch höhere Bildaufnahmezeiten erzielt werden, siehe hierzu Tabelle 3.1.

Bildrate in Hz	Auflösung in px		Aufnahmedauer in s	
	x	y	@ max. Auflösung	@ 512x512 px
1.000	1.024	1.024	2,72	10,90
2.000	1.024	1.024	1,36	5,45
5.000	640	544	1,64	2,18
6.000	512	512	1,81	1,81
10.000	384	352	2,11	-
20.000	256	192	2,90	-

Tabelle 3.1: Bildaufnahmezeit, Auflösung und maximale Aufnahmezeit der Hochgeschwindigkeitskamera [35].

Der am IFSW realisierte Aufbau des Röntgen-Video-Detektors ist in Bild 3.6 dargestellt. Die Kernkomponenten sind der CsI:Tl-Szintillator (1), das telezentrische Abbildungsobjektiv (2) der zweistufige Bildverstärker (3), die Relay-Optik (4) und die Hochgeschwindigkeitskamera (5).

Nach dem Abtasttheorem von Nyquist-Shannon muss die Pixelzahl des Sensors größer als die doppelte Anzahl Linienpaare sein, welche mit dem System quantisiert werden soll [51]. Ausgehend von der Pixelzahl von 1.024 , der Sensorgröße von $17,41 \text{ mm}$ ($1.024 \text{ px} * 17 \mu\text{m}$) und dem Abbildungsmaßstab der Relay Optik ($\beta_{Relay} = 1,18$) ergibt

sich eine Auflösung von $34,7 \text{ LP/mm}$ in der Bildebene des Bildverstärkers, was unterhalb der bildseitigen Ortsauflösung des Bildverstärkers von 38 LP/mm liegt. Unter idealen Bedingungen (Röntgenkontrast sehr groß) stellt also die Kamera den auflösungsbegrenzenden Faktor des gesamten Detektorsystems dar.

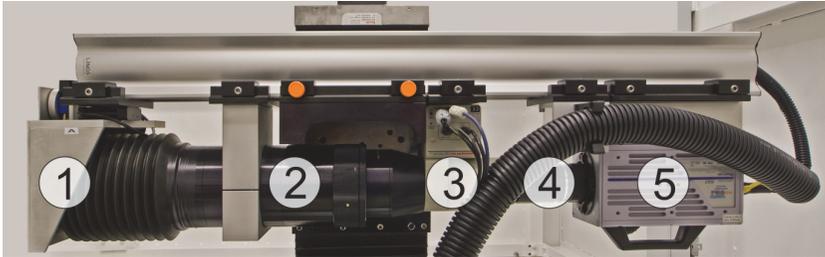


Bild 3.6: Foto des am IFSW realisierten Aufbaus des Röntgen-Video-Detektors mit seinen Kernkomponenten: Szintillator (1), telezentrische Abbildungsoptik (2), Bildverstärker (3), Relay-Optik (4) und Kamera (5).

Rückgerechnet durch die gesamte Abbildungskette mittels der Gleichung

$$\frac{\text{Pixelzahl}}{2 * \text{Sensorgröße}} \cdot \beta_{\text{Relay}} \cdot \beta_{\text{BV}} \cdot \beta_{\text{Tele}} = 6,98 \text{ LP/mm} \quad (3.11)$$

kann die Kamera auf dem Szintillator theoretisch $6,98 \text{ LP/mm}$ auflösen. Bei einer typischen geometrischen Vergrößerung gemäß Abschnitt 3.1.1 von $\beta_{\text{geo}} = 5$ würde sich daraus, im zu untersuchenden Objekt, eine Auflösung von $34,9 \text{ LP/mm}$ ergeben, was wiederum einer Strukturgröße von $14,3 \mu\text{m}$ entspricht. Auflösungen in dieser Größenordnung werden jedoch in der Praxis nicht erreicht. Die Gründe hierfür sind im Wesentlichen die Nicht-Punktförmigkeit der Röntgenquelle (Abschnitt 3.1.1), der Röntgenkontrast (Abschnitt 3.1.2) und das Signal-Rausch-Verhältnis (Abschnitt 3.1.3). Auf die tatsächlich praktisch erreichbaren Auflösungen wird im Abschnitt 3.3 näher eingegangen.

3.2.2 Handling-System

Das Handling-System der Röntgenanlage erfüllt im Wesentlichen zwei Aufgaben. Zum einen dient es dazu, die Relativbewegung zwischen dem zu untersuchenden Werkstück und dem Bearbeitungslaser beziehungsweise dem Röntgen-Video-Detektor, mit einer Vorschubgeschwindigkeit von bis zu 80 m/min zu gewährleisten (drei Achsen XI , YI , ZI), und zum anderen ermöglicht es die Einstellung der ge-

wünschten geometrischen Vergrößerung und der Position der Röntgenabbildung (vier Achsen $X2$, $Y2$, $Z2A$, $Z2B$).

Die geometrische Vergrößerung der Röntgenabbildung lässt sich durch seitliches Verschieben des Röntgen-Video-Detektors relativ zum Werkstück erreichen, was einer Änderung des Objektabstandes a_{QO} bei konstantem Quelle-Detektor-Abstand a_{QD} gemäß Gleichung (3.1) aus Abschnitt 3.1.1 entspricht. Durch Verkleinern des Abstandes zwischen Röntgenröhre und Werkstück erhöht sich die geometrische Vergrößerung, siehe hierzu das Detailfoto in Bild 3.7 rechts. Aufgrund der Störkonturen der involvierten Bauteile ist der erzielbare Vergrößerungsbereich eingeschränkt. Bild 3.8 verdeutlicht den Zusammenhang von geometrischer Vergrößerung und der zur Positionierung verwendeten Maschinenachse $Y2$. Der praktisch einstellbare Bereich der geometrischen Vergrößerung liegt - abhängig von der Dicke d_W und Höhe h_W des Werkstücks gemäß Bild 3.7 links - etwa zwischen $\beta_{geo} = 1,7$ und $\beta_{geo} = 6,0$, wobei die untere Grenze durch Kollision des Spannmittels mit dem Szintillator-Gehäuse und die obere Grenze durch Kollision des Spannmittels mit dem Röhren-Gehäuse definiert wird.

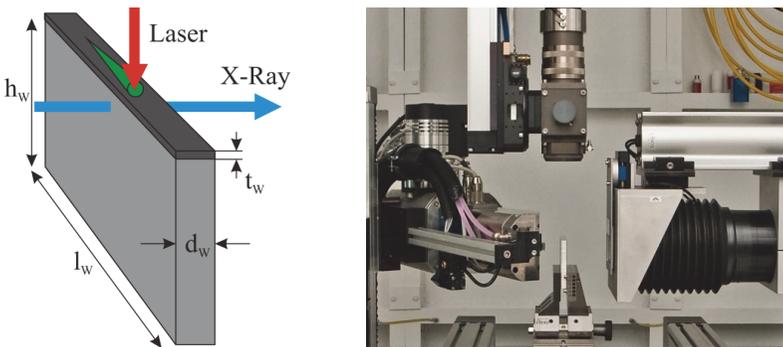


Bild 3.7: Handling-System der Röntgenanlage. Links: Schema des Werkstücks mit angedeutetem Schweißprozess und Durchstrahlrichtung. Rechts: Detailansicht der Bearbeitungszone mit dem Werkstück, der Laseroptik, der Röntgenröhre und dem Detektor.

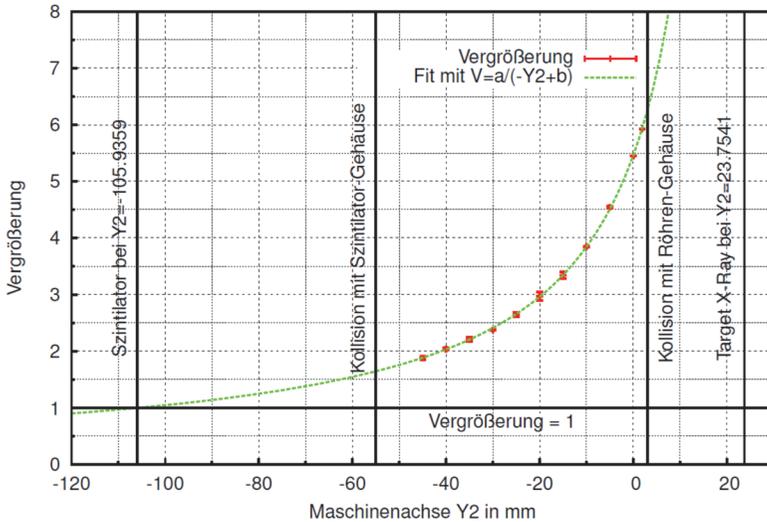


Bild 3.8: Geometrische Vergrößerung⁸ V in Abhängigkeit der Position der Maschinenachse Y_2 . Die grüne Kurve beruht auf Gleichung (3.1), die Fehlerbalken der gemessenen Stützstellen sind rot eingezeichnet [52].

3.2.3 Bildverarbeitung

Die vom Röntgenvideodetektor aufgezeichneten Bilddaten weisen systembedingte Unzulänglichkeiten, wie beispielsweise eine ungleichförmige Ausleuchtung oder nicht optimale Helligkeits- und Kontrastwerte innerhalb des 12 Bit Farbraums, auf. Um eine optimale Bewertbarkeit der Aufnahmen zu ermöglichen, müssen die Rohdaten aufgearbeitet werden. Die hierfür entwickelten Verfahren werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

3.2.3.1 Shading (Gain-Korrektur)

Wird ein Rohbild mit einem homogenen Prüfkörper konstanter Dicke aufgezeichnet, so ist die Helligkeitsverteilung im Röntgenbild - entgegen der Erwartung - nicht homogen, so wie dies in Bild 3.9 links exemplarisch dargestellt ist.

⁸ Die geometrische Vergrößerung β_{geo} wird in der Formel der Fit-Funktion im Bild als V bezeichnet.

Die nicht homogene Helligkeitsverteilung des Rohbildes wird durch verschiedene Quellen verursacht. So weist die Röntgenröhre selbst in Ihrer Emission bereits gewisse Ungleichförmigkeiten auf. Die Struktur des Szintillators und der Mikrokanalplatte im Bildverstärker zeigen ebenfalls Inhomogenitäten, die sich in einer Art Wabenstruktur im Bild widerspiegeln, wie in Bild 3.9 links deutlich zu sehen ist. Schließlich erzeugen die Objektive im optischen Aufbau einen natürlichen Randlichtabfall nach dem Cos^4 -Gesetz, auch Vignettierung genannt [53], welcher das Bild zu den Rändern hin dunkler werden lässt. Des Weiteren führt der nicht telezentrische Aufbau der Relay-Optik dazu, dass außeraxiale Pixel nicht mehr senkrecht beleuchtet werden. Das einfallende Strahlenbündel trifft somit schräg auf die Pixel und führt zu einer Pixel-Vignettierung⁹ auf dem Kamerachip.

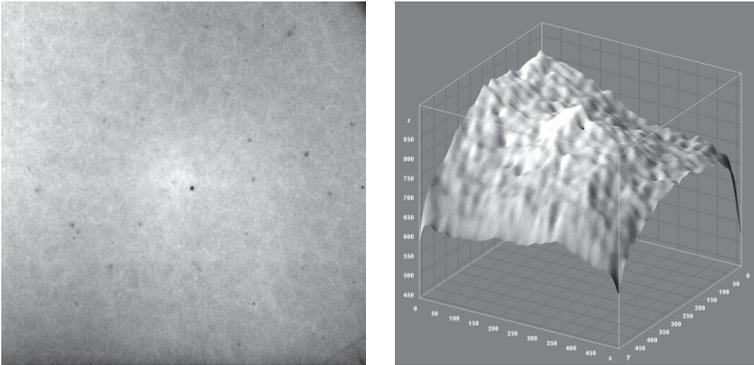


Bild 3.9: Links: Rohbild (Durchschnitt aus 1.000 Einzelaufnahmen) eines homogenen Prüfkörpers konstanter Dicke. Rechts: 3D-Plot der Helligkeitsverteilung.

Diese Fehler sind jedoch per Software korrigierbar. Hierfür wird ein Referenzbild M_{Ref} aufgezeichnet, welches als Durchschnitt aus einer Vielzahl von Einzelaufnahmen gebildet wird. Dieses Vorgehen reduziert das Schrotrauschen, welches bei den systembedingt kurzen Belichtungszeiten ansonsten unvermeidlich ist. Ein später aufgenommenes Röntgenbild kann nun mit diesem Referenzbild korrigiert werden, indem das Röntgenbild B_{Roh} gemäß der Gleichung

$$B_{Korrigiert} = B_{Roh} \cdot \frac{1}{M_{Ref}} \cdot \overline{M}_{Ref} \quad (3.12)$$

⁹ Dieser Effekt kann prinzipiell durch den Einsatz eines Mikrolinsen-Arrays vor dem Kamerachip kompensiert werden. Die verwendete Kamera vom Typ Photron SA-3 verfügt jedoch nicht über einen derartigen Aufbau.

durch das Referenzbild M_{Ref} pixelweise geteilt wird und anschließend mit der mittleren Helligkeit \bar{M}_{Ref} des Referenzbildes multipliziert wird. Wichtig ist, dass diese Operationen im *12 Bit* Farbraum durchgeführt werden, um genügend fein aufgelöste Graustufen für die Rechenschritte zu verwenden.

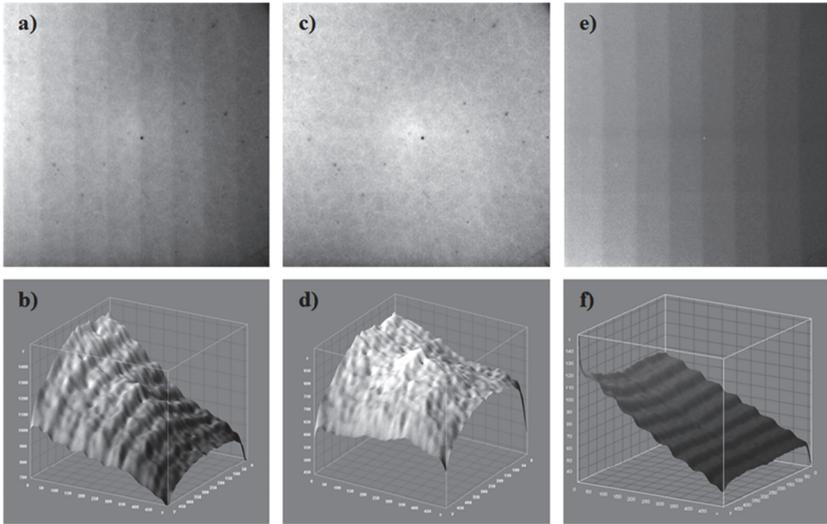


Bild 3.10: Prinzip der Shading-Korrektur. a) Rohbild des Stufenkeils, c) Referenzbild eines homogenen Prüfkörpers, e) Korrigiertes Bild des Stufenkeils. b), d) und f) sind die 3D-Plots der Helligkeitsverteilungen der Bilder a), c) und e) [35].

Die einzelnen Schritte dieser Operation sollen in Bild 3.10 veranschaulicht werden. Teilbild a) zeigt die Röntgenaufnahme eines Stufenkeils aus Edelstahl mit einer Stufenhöhe von $0,1\text{ mm}$ und einer totalen Höhendifferenz von $0,8\text{ mm}$. Deutlich zu sehen ist die Überlagerung der eigentlichen Stufen durch Vignettierung, diverse punktförmige Störungen und eine allgemein ungleichmäßige Ausleuchtung des Bildes. Der 3D-Plot der zugehörigen Helligkeitsverteilung in Teilbild b) hebt dies noch hervor. Wird nun mit einem vorher aufgenommenen Referenzbild c) die Korrektur gemäß Gleichung (3.12) durchgeführt, erhält man das korrigierte Bild des Stufenkeils e). Die Teilbilder a) und e) aus Bild 3.10 beinhalten mathematisch gesehen noch immer dieselbe Information, jedoch hat sich durch die Korrektur die Messbarkeit und auch der optische Eindruck des Bildes signifikant verbessert.

3.2.3.2 Helligkeit und Kontrast

Da der Röntgenvideodetektor Bilddaten mit einer Farbtiefe von 12 Bit erzeugt, ist es nötig, Helligkeit und Kontrast geeignet anzupassen, bevor die Bilddaten für die Videoerzeugung (unter Informationsverlust) in den 8 Bit Farbraum konvertiert werden. Die meisten Bildbetrachtungsprogramme führen diese Farbraumkonversion standardmäßig mit einer linearen Kennlinie über den gesamten Wertebereich durch. Da die relevante Bildinformation in den Röntgenbildern meist auf einen eher kleinen Wertebereich im 12 Bit Farbraum konzentriert ist, führt diese Vorgehensweise zu sehr kontrastarmen Bildern mit meist ungünstiger Helligkeit im 8 Bit Farbraum. Beispielhaft hierfür ist Bild 3.11 links, welches kaum auswertbare Bilddetails zeigt.

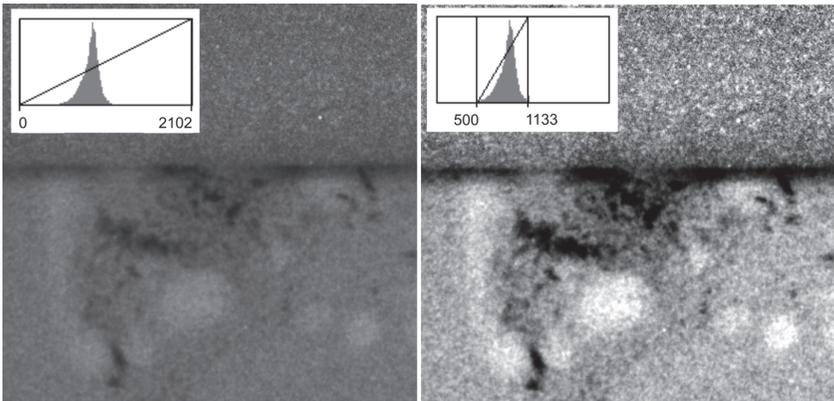


Bild 3.11: Links: Automatisch konvertiertes Bild mit ungünstigem Wertebereich $0 - 2.102$. Rechts: Dasselbe Bild mit angepasstem Wertebereich $500 - 1.133$.

Um dieses Problem zu lösen, muss vor der Farbraumkonversion der zu konvertierende Wertebereich der Pixelhelligkeiten sinnvoll eingeschränkt werden. Ein probates Hilfsmittel hierzu stellt das Histogramm der Bildhelligkeit dar, welches es erlaubt den Wertebereich mit relevanter Bildinformation direkt einzugrenzen.

Bild 3.11 rechts zeigt dasselbe Röntgenbild, welches jedoch für die Farbraumkonversion auf den relevanten Wertebereich der Bildhelligkeit zwischen 500 Digits und 1.133 Digits eingeschränkt wurde. Im direkten Vergleich fällt unmittelbar der deutlich höhere Kontrast bei gleichzeitig optimaler Ausnutzung des im 8 Bit Farbraums zu Verfügung stehenden Wertebereichs der Bildhelligkeit auf. Insbesondere die Dampfkapillare, die sich ablösenden Poren und die dunklen Tracer-Partikel im Schmelzbad sind dadurch deutlich besser zu erkennen.

3.3 Systemcharakterisierung

Wie bereits in den vorangegangenen Abschnitten erwähnt wurde, lässt sich die theoretisch erzielbare Bildqualität der Röntgenanlage unter realen Prozessbedingungen nicht erreichen. Limitierende Faktoren sind hierbei vor allem die Belichtungszeit, das zu untersuchende Material, die verwendete Beschleunigungsspannung und der benötigte Röhrenstrom. Es ist daher notwendig die Bildqualität unter realistischen Bedingungen experimentell zu ermitteln.

Die quantitative Bewertung der Bildqualität der Röntgenanlage wurde mit Hilfe unterschiedlicher Methoden durchgeführt, die in der Norm DIN EN 462 definiert sind. Die Bewertung der Bildqualität hinsichtlich der Sichtbarkeit dünner länglicher Strukturen, wie sie beispielsweise die Schweißkapillare darstellt, wurde mittels des Drahtsteg-Bildgüte-Prüfkörpers (Drahtsteg-BPK) gemäß DIN EN 462-1 durchgeführt. Analog dazu wurde mittels der Loch-Stufe-Methode nach DIN EN 462-2 die Erkennbarkeit von sphärischen Strukturen, wie sie bei der Porenbildung vorkommen, bewertet.

3.3.1 Ermittlung der Bildgütezah mit dem Drahtsteg-BPK

Zur quantitativen Bewertung der Erkennbarkeit von dünnen länglichen Strukturen in Röntgenbildern definiert die DIN EN 462-1 eine Methode unter Einsatz des sogenannten Drahtsteg-Bildgüte-Prüfkörper (BPK). Dabei wurde experimentell ermittelt, wie dünn ein Prüfdraht sein darf, damit er sich gerade noch gegen einen Grundkörper desselben Materials im Röntgenbild abhebt.

Der Test ermöglicht die Einschätzung der Erkennbarkeit einer Dampfkapillare in einem Laserschweißprozess, die ebenfalls eine längliche dünne Struktur darstellt. Lediglich der Kontrast ist dabei invertiert, da der Drahtsteg-BPK einer Verdickung des Grundkörpers entspricht, während die Dampfkapillare eine Schwächung darstellt.

Bild 3.12 zeigt auf der linken Seite eine Schemazeichnung des Drahtsteg-BPK, in der Mitte ein Foto des Drahtsteg-BPK, montiert auf einen 4 mm dicken Grundkörper des gleichen Materials¹⁰, und rechts die Positionierung im Strahlengang der Röntgenanlage. Die DIN EN 462-1 schreibt vor, den Bildgüteprüfkörper, wenn möglich, auf der Strahlerseite des Grundkörpers zu montieren.

¹⁰ Für den BPK aus reinem Aluminium wurde ein Grundkörper aus AlMg3 verwendet, während für den BPK aus reinem Eisen ein Grundkörper aus Edelstahl 1.4301 zum Einsatz kam.

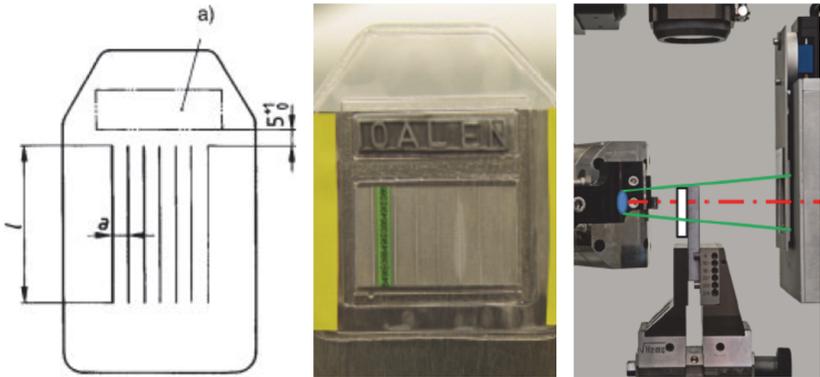


Bild 3.12: Links: Schematische Darstellung des Drahtsteg-BPK nach DIN EN 462-1. Im Feld a) steht die Kennzeichnung des BPK, die Werte a und l stehen für die Länge der Drähte und deren Abstand zueinander [54]. Mitte: Drahtsteg-BPK aus Aluminium montiert auf einem 4 mm dicken Grundkörper aus Aluminium [55]. Rechts: Position des BPK (weißes Rechteck) im Strahlengang der Röntgenanlage [52].

Für die Ermittlung der Bildgütezahl stehen Drahtstege der Klasse $W10$ bis $W19$ aus Eisen und Aluminium zur Verfügung. Die entsprechenden Drahtdurchmesser sind in Tabelle 3.2 aufgeführt, welche der DIN EN 462-1 entnommen ist.

Für die Ermittlung der Bildgütezahl BZ wurde das Röntgenvideosystem auf eine Vergrößerung von $\beta_{geo} = 5,0$ eingestellt. Als Dicke für den zu durchstrahlenden Grundkörper wurde 4 mm gewählt, die untersuchten Materialien waren Eisen und Aluminium. Die verwendeten Bildraten waren 1.000 fps und 5.000 fps , die jeweilige Belichtungszeit betrug 1 ms respektive $0,2\text{ ms}$. Die Röntgenröhre wurde auf eine Leistung von 90 W im Mikrofokusbetrieb eingestellt. Röhrenstrom und Beschleunigungsspannung wurden solange variiert, bis der maximal mögliche Kontrast erzeugt wurde.

Laut Norm gilt ein Draht genau dann als erkennbar, wenn er auf einer Länge von mindestens 10 mm ohne Unterbrechung erkennbar ist. Aufgrund der hohen Vergrößerung des Röntgen-Video-Systems war der Bildausschnitt während des Experiments jedoch auf 8 mm limitiert, weshalb insofern von der Norm abgewichen wurde, als dass Drähte als erkannt gewertet wurden, wenn sie über die komplette Bildhöhe sichtbar waren.

Beispielhaft sind in Bild 3.13 die Aufnahmen der Drahtstege $W10$ bis $W16$ aus Eisen auf einem Grundkörper aus 4 mm dickem Stahl dargestellt. Der dünnste gerade noch durchgehend erkennbare Drahtsteg hat die Nummer $W14$ (dritter von rechts).

Bildgüteprüfkörperklasse umfassend				Draht- durchmesser			Achsabstand
W1	W6	W10	W13	Drahtnummer	Nennmaß	Grenzabmaße	a
X				W 1	3,2	±0,03	$9,6^{+1}_{+0}$
X				W 2	2,5		$7,5^{+1}_{+0}$
X				W 3	2		6^{+1}_{+0}
X				W 4	1,6	±0,02	5^{+1}_{+0}
X				W 5	1,25		
X	X			W 6	1		
X	X			W 7	0,8		
	X			W 8	0,63		
	X			W 9	0,5	±0,01	
	X	X		W 10	0,4		
	X	X		W 11	0,32		
	X	X		W 12	0,25		
		X	X	W 13	0,2	±0,005	
		X	X	W 14	0,16		
		X	X	W 15	0,125		
		X	X	W 16	0,1		
			X	W 17	0,08		
			X	W 18	0,063		
			X	W 19	0,05		

Tabelle 3.2: Drahtdurchmesser, Grenzabmaße und Achsabstand der Drahtnummern *W1* bis *W19*. Die Nummer des im Test gerade noch erkennbaren Drahtes gibt direkt die Bildgütezahl *BZ* an [54].

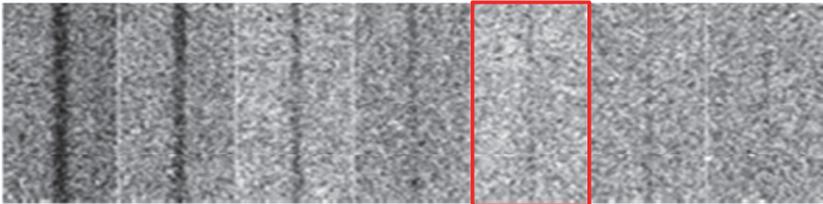


Bild 3.13: Röntgenaufnahmen der Drahtstege (v. l. n. r.) *W10* bis *W16* aus Eisen auf einem Grundkörper von *4 mm* Dicke. Die Belichtungszeit der Aufnahmen liegt bei *1 ms*, entsprechend einer Bildrate von *1.000 fps* [52].

Eine Übersicht der kleinsten gerade noch durchgehend erkennbaren Drahtstege aus den Werkstoffen Eisen und Aluminium, bei unterschiedlichen Bildraten, ist zusammen mit den eingestellten Parametern der Röntgenröhre, in Tabelle 3.3 aufgelistet.

Zu bemerken ist, dass die Bildqualität unterhalb der in der Norm DIN EN 462-3 definierten Bildgüteklassen liegt. Bei einer Dicke des Grundkörpers von *4 mm* müsste für die schlechtere der beiden Bildgüteklassen *A* mindestens der Drahtsteg *W15* erkannt

werden. Dabei gilt es jedoch zu bedenken, dass diese Norm für die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung entwickelt wurde, bei der typischerweise Belichtungszeiten von mehreren Sekunden eingesetzt werden.

Material	Grundkörper mm	FPS 1/s	Spannung kV	Strom μ A	Drahtnummer/BZ	Durchmesser μ m	Bildgüteklasse
-	-	-	-	-	-	-	-
Fe	4	1000	140	643	W14	160	-
Fe	4	5000	140	643	W13	200	-
Al	4	1000	70	1286	W14	160	-
Al	4	5000	90	1000	W12	250	-

Tabelle 3.3: Übersicht der dünnsten gerade noch durgehend erkennbaren Drahtstege aus Aluminium und Eisen, bei unterschiedlichen Bildraten, mit den dazugehörigen Einstellungen der Röntgenröhre und der Bildgüteklasse gemäß DIN EN 462-3 [52], [55]¹¹.

Die Erkennbarkeit der Drahtstege hängt direkt mit dem Bildrauschen (*SNR* siehe Abschnitt 3.1.3) zusammen, welches die sehr dünnen Strukturen signifikant überlagert. Dies führt auch dazu, dass bei einer Bildrate von 5.000 fps der dünnste erkennbare Drahtsteg um eine Nummer dicker ist, als bei 1.000 fps .

Es wird ebenfalls deutlich, dass unter realen Aufnahmebedingungen mit sehr kurzen Belichtungszeiten die theoretisch zu erwartende Auflösung des Röntgen-Video-Systems von $14,3 \mu\text{m}$ (siehe Abschnitt 3.2.1) um mehr als eine Größenordnung verfehlt wird. Ursächlich hierfür sind hauptsächlich zwei Effekte. Zum einen wird bei den benötigten Röntgenleistungen (Spannung und Strom) der Fokusedurchmesser der Röntgenröhre sehr groß (gemäß Bild 3.2 in der Größenordnung von $50 \mu\text{m}$), was zur Bildung eines ausgeprägten Halbschattens führt, und zum anderen überlagert bei kurzen Belichtungszeiten das Bildrauschen die zu erkennenden Details.

3.3.2 Ermittlung der Bildgütezahl mit dem Stufe-Loch-BPK

Zur quantitativen Bewertung der Erkennbarkeit von zylinder- beziehungsweise kugelförmigen Strukturen in Röntgenbildern definiert die DIN EN 462-2 eine Methode unter Einsatz des sogenannten Stufe-Loch Bildgüte-Prüfkörpers (BPK). Der Prüfkörper besteht aus Plättchen unterschiedlicher Dicke, die Löcher mit einem Durchmesser enthalten, der genau der Dicke des Plättchens entspricht. Wird dieser Prüfkörper auf einen Grundkörper gelegt, so entspricht das Loch im Prüfkörper näherungsweise ei-

¹¹ In den Veröffentlichungen [52] und [55] wird hier fälschlicherweise die Bildgüteklasse *A* für die Versuche mit einer Bildrate von 1.000 fps genannt, die Messwerte an sich sind jedoch korrekt.

nem sphärischen Einschluss im Grundkörper. Der Test ermöglicht die Einschätzung der Erkennbarkeit von Poren in einem Laserschweißprozess, die ebenfalls eine näherungsweise sphärische Struktur besitzen.

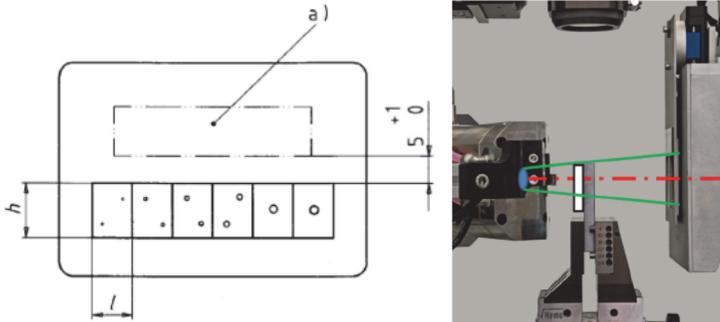


Bild 3.14: Links: Schematische Darstellung des Stufe-Loch-BPK nach DIN EN 462-2. Im Feld a) steht die Kennzeichnung des BPK, die Werte h und l stehen für die Höhe und Länge der einzelnen Prüfplatten [54]. Rechts: Position des Stufe-Loch-BPK (weißes Rechteck) montiert auf einem Grundkörper im Strahlengang der Röntgenanlage [55], [52].

Bild 3.14 zeigt auf der linken Seite eine Schemazeichnung des Stufe-Loch-BPK und rechts ein Foto des Stufe-Loch-BPK, montiert auf einen Grundkörper des gleichen Materials¹² im Strahlengang der Röntgenanlage. Die DIN EN 462-2 schreibt vor, den Bildgüteprüfkörper, wenn möglich, auf der Strahlerseite des Grundkörpers zu montieren.

Für die Ermittlung der Bildgütezahl stehen Stufe-Loch-Platten der Klasse $H1$ bis $H6$ aus Eisen und Aluminium zur Verfügung. Die entsprechenden Maße sind in Tabelle 3.4 aufgeführt, welche der DIN EN 462-2 entnommen ist.

Für die Ermittlung der Bildgütezahl BZ wurde das Röntgenvideosystem, wie in Abschnitt 3.3.1, auf eine Vergrößerung von $\beta_{geo} = 5,0$ eingestellt. Als Dicke für den zu durchstrahlenden Grundkörper wurden 4 mm und 6 mm gewählt, die zu untersuchenden Materialien waren Eisen und Aluminium. Die verwendeten Bildraten waren 1.000 fps und 5.000 fps , die jeweilige Belichtungszeit betrug 1 ms respektive $0,2\text{ ms}$. Die Röntgenröhre wurde auf eine Leistung von 90 W im Mikrofokusbetrieb eingestellt.

¹² Für den BPK aus reinem Aluminium wurde ein Grundkörper aus AlMg3 verwendet, während für den BPK aus reinem Eisen ein Grundkörper aus Edelstahl 1.4301 zum Einsatz kam.

Röhrenstrom und Beschleunigungsspannung wurden solange variiert, bis der maximal mögliche Kontrast erzeugt wurde.

Bildgüteprüfkörper				Loch und Stufe		
H1	H5	H9	H13	Lochnummer	Nennlochdurchmesser und Stufendicke	Grenzabmaße
X				H 1	0,125	+ 0,0150
X				H 2	0,160	
X				H 3	0,200	
X				H 4	0,250	
X	X			H 5	0,320	
X	X			H 6	0,400	
	X			H 7	0,500	
	X			H 8	0,630	+ 0,0200
	X	X		H 9	0,800	
	X	X		H 10	1,000	
		X		H 11	1,250	+ 0,0250
		X		H 12	1,600	
		X	X	H 13	2,000	
		X	X	H 14	2,500	
			X	H 15	3,200	+ 0,0300
			X	H 16	4,000	
			X	H 17	5,000	
			X	H 18	6,300	

Tabelle 3.4: Auflistung der Stufe-Loch-BPK mit den Lochnummern, zugehörigen Durchmessern/Stufendicken und Grenzabmaßen [54].

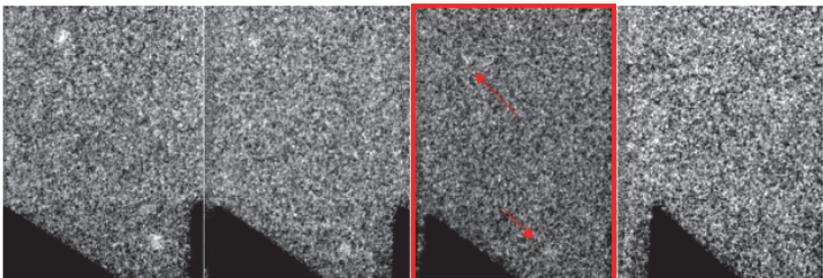


Bild 3.15: Röntgenaufnahmen der Stufe-Loch-BPK (v. l. n. r.) H6 bis H3 aus Eisen auf einem Grundkörper von 4 mm Dicke. Die Belichtungszeit der Aufnahmen liegt bei 1 ms, entsprechend einer Bildrate von 1.000 fps [52].

Beispielhaft sind in Bild 3.15 die Aufnahmen der Stufe-Loch-BPK *H6* bis *H3* aus Eisen auf einem Grundkörper aus 4 mm dickem Stahl dargestellt. Der kleinste gerade noch erkennbare Stufe-Loch-BPK ist *H4* mit einem Durchmesser von 250 μm (zweiter von rechts).

Eine Übersicht der kleinsten gerade noch erkennbaren Stufe-Loch-BPK aus den Werkstoffen Eisen und Aluminium, mit unterschiedlich dickem Grundkörper, ist zusammen mit den eingestellten Parametern der Röntgenröhre, in Tabelle 3.5 aufgelistet. Die erkennbaren Lochdurchmesser liegen je nach Werkstoff und Dicke des Grundkörpers zwischen 250 μm und 320 μm . Die nach DIN EN 462-3 daraus resultierende Bildgüteklasse liegt bei *B* für 4 mm Eisen und bei *A* für die restlichen Versuche. Zu beachten ist dabei, dass *B* die höhere Qualitätsklasse als *A* ist.

Material -	Grundkörper mm	FPS 1/s	Spannung kV	Strom μA	Lochnummer -	Durchmesser μm	Bildgüteklasse -
Fe	4	1000 (5)	140	643	H4 (H1)	250 (125)	B (B)
Fe	6	1000 (5)	144	625	H5 (H2)	320 (160)	A (B)
Al	4	1000 (5)	50	1800	H5 (H3)	320 (200)	A (B)
Al	6	1000 (5)	55	1636	H5 (H3)	320 (200)	A (B)

Tabelle 3.5: Übersicht der kleinsten gerade noch erkannten Stufe-Loch-BPK auf Aluminium und Eisen, bei unterschiedlicher Dicke des Grundkörpers, mit den dazugehörigen Einstellungen der Röntgenröhre und der Bildgüteklasse gemäß DIN EN 462-3. Werte in Klammer gelten für eine Mittelung von 200 Bildern, respektive einer effektiven Belichtungszeit von 200 ms [52].

Um den Einfluss der Belichtungszeit auf das Signal-Rausch-Verhältnis (*SNR*) noch einmal deutlich zu machen, sind in Bild 3.16 Röntgenaufnahmen des Stufe-Loch-BPK aus Eisen auf einem 4 mm dicken Grundkörper aus Edelstahl (1.4301) mit den Belichtungszeiten 1 ms und 200 ms gegenübergestellt. Bei einer Belichtungszeit von 200 ms kann sogar die kleinste Loch-Stufe *H1* mit einem Durchmesser von 125 μm problemlos erkannt werden. Die Werte hierzu sind in Tabelle 3.5 in Klammern vermerkt.

Die Ergebnisse der Systemcharakterisierung nach DIN EN 462 zeigen deutlich, dass nicht die geometrische Auflösung des Systems an sich der limitierende Faktor ist, sondern das Signal-Rausch-Verhältnis der Röntgenbilder. Dies bedeutet auch, dass mit langsamerer Bildrate und damit längerer Belichtungszeit gleichzeitig die Auflösung, beziehungsweise die Detailerkennbarkeit in den Röntgenbildern zunimmt, was die theoretische Voraussage gemäß Gleichung (3.9) und (3.10) aus Abschnitt 3.1.3 experimentell bestätigt.

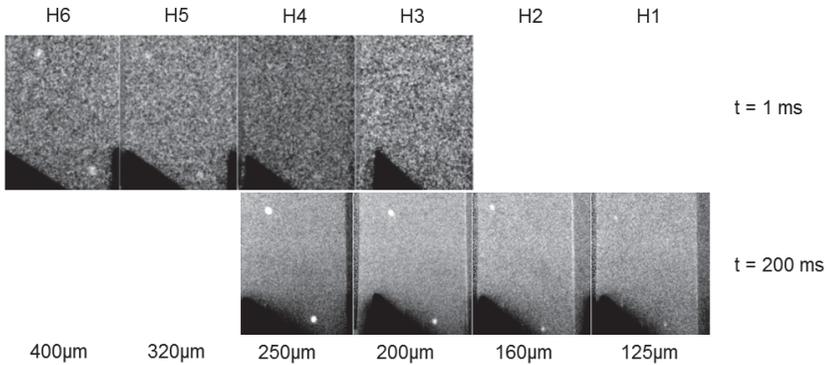


Bild 3.16: Vergleich der Röntgenbilder des Stufe-Loch-BPK (aus Eisen) auf einem 4 mm dicken Grundkörper aus Edelstahl. Die obere Zeile zeigt Aufnahmen bei einer Belichtungszeit von 1 ms, die untere Zeile bei einer Belichtungszeit von 200 ms [55].

3.4 Anwendung des Röntgen-Systems

In den folgenden Abschnitten sollen die Möglichkeiten und die Leistungsfähigkeit des Röntgen-Systems anhand verschiedener Anwendungen aufgezeigt werden. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Untersuchung von charakteristischen Phänomenen beim Laserstrahl-tiefschweißen, die mit herkömmlichen diagnostischen Verfahren nicht zugänglich sind.

3.4.1 Messung der Neigung der Kapillarfront

Eines der ersten Experimente, welches mit der Röntgenanlage durchgeführt wurde, ist die Messung der Neigung der Kapillarfront beim Laserschweißen. Die Experimente fanden im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts WELDone statt. Das Hauptziel der Untersuchungen war die Überprüfung der Leistungsfähigkeit eines Inprozess-Sensors zur Messung der Kapillargeometrie beim Laserschweißen von Stahlwerkstoffen und die Klärung eines etwaigen Einflusses der Kapillargeometrie auf die Beobachtbarkeit des Schweißprozesses [55], [56].

Bild 3.17 zeigt die Dampfkapillare eines Laserschweißprozesses bei drei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten in Edelstahl (1.4301) mit einer Laserleistung von 4 kW und einem Fokusbereich von 600 µm. Bei der Laserstrahlquelle handelte es

sich um einen lampengepumpten Nd:YAG Stablaser Modell HL 4006 D der Firma Trumpf. Die verwendete Transportfaser hatte einen Kerndurchmesser von $600 \mu\text{m}$ bei einer Numerischen Apertur von $NA = 0,1$. Die Röntgenbilder wurden mit einer Belichtungszeit von 1 ms erzeugt und sind einem Röntgenvideo entnommen, welches mit einer Bildaufnahme rate von 1.000 fps aufgenommen wurde.

Die Abmessungen des Werkstücks waren gemäß der Schemazeichnung in Bild 3.7 links, $l_W = 100 \text{ mm}$, $t_W = 2 \text{ mm}$, $d_W = 5 \text{ mm}$. Bei Vorschubgeschwindigkeiten unterhalb von 6 m/min wurde eine vollständige Durchschweißung mit nach unten offener Kapillare erzielt, für höhere Geschwindigkeiten lag lediglich eine Einschweißung mit nach unten geschlossener Kapillare vor. Detailliertere Ergebnisse des Experiments können aus [56] entnommen werden.

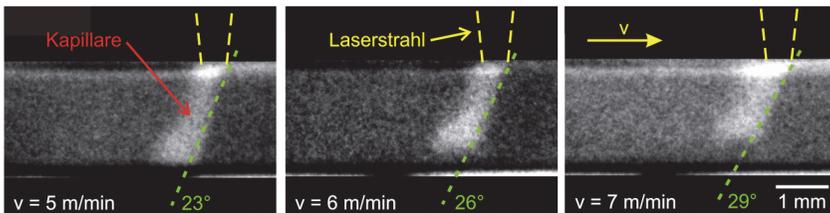


Bild 3.17: Messung der Kapillarfrontneigung bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten in einem Laserschweißprozess in Edelstahl [55]. Das Werkstück aus Edelstahl 1.4301 hatte eine Stärke von 2 mm , die Laserleistung betrug 4 kW bei einem Fokussdurchmesser von $600 \mu\text{m}$.

Aus den durchgeführten Untersuchungen in [56] und [57], sowie aus Bild 3.17 geht hervor, dass unter Anwendung von Festkörperlasern bei der vollständigen Durchschweißung von Stahlwerkstoffen die Kapillarneigung stets in einem Bereich liegt, in dem der Laserstrahl die gesamte Kapillare vorderseite direkt bestrahlt (Bild 3.17 links). Erst wenn keine vollständige Durchschweißung mehr erzielt wird, existieren Bereiche am Kapillargrund, welchen nicht direkt vom Bearbeitungslaserstrahl getroffen werden sondern lediglich reflektierter beziehungsweise gestreuter Laserstrahlung ausgesetzt sind, siehe hierzu die Situation in Bild 3.17 rechts. Des Weiteren konnte kein Fall beobachtet werden, bei dem das Durchschweißloch an der Unterseite der Kapillare von deren Hinterkante im oberen Bereich verdeckt werden würde. Dies bedeutet, dass bei Verwendung einer koaxial zum Bearbeitungslaserstrahl angeordneten Kamera im Wesentlichen freie Sicht auf das Durchschweißloch besteht.

3.4.2 Beobachtung der Porenbildung

Ein weiterer bereits bekannter Anwendungsfall für die Röntgenvideotechnologie ist die Visualisierung der Porenentstehung beim Laserschweißen von metallischen Werkstoffen, wie er beispielsweise durch Katayama et al. in [58], [59] und [60] gezeigt wurde. Exemplarisch sollen hier die Ergebnisse zweier Experimente gezeigt werden, die die Porenbildung in Aluminium und Stahl veranschaulichen sollen. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Entstehungsgeschwindigkeit der Poren und deren Bewegungsgeschwindigkeit im Schmelzebad, was neben der Analyse der Porenentstehung, Rückschlüsse auf die notwendige Beobachtungsgeschwindigkeit von Prozessüberwachungssystemen ermöglicht.

3.4.2.1 Prozessporen in Aluminium

Das erste Experiment wurde durchgeführt, um die Entstehung von Prozessporen beim Lasertiefschweißen von Aluminium zu untersuchen. In Bild 3.18 sind hierzu zwei Bildsequenzen einer solchen Schweißung dargestellt, welche mit einer Bildaufnahme-rate von 1.000 fps respektive 5.000 fps erstellt wurden. Die Schweißung wurde mit einem lampengepumpten Nd:YAG Stablasers (Trumpf HL 4006 D) in die Stirnseite einer $d_w = 6\text{ mm}$ breiten massiven Platte aus AlMgSi eingebracht. Die Laserleistung betrug dabei 4 kW bei einem Fokusbereich von $600\text{ }\mu\text{m}$ und einer Vorschubgeschwindigkeit von 3 m/min .

Die oberen drei Standbilder aus Bild 3.18 (Bildaufnahme-rate 1.000 fps) zeigen die generelle Bewegung der Poren. Aus den Videodaten lässt sich entnehmen, dass die Bewegungsgeschwindigkeit der Poren in einem sehr weiten Bereich schwankt. Die Pore in diesem Beispiel hatte eine mittlere Geschwindigkeit von ungefähr 250 mm/s (15 m/min) bevor sie mit der Schmelze erstarrte, was etwa fünfmal schneller war als die vorherrschende Vorschubgeschwindigkeit, mit der sich die Dampfkapillare durch das Werkstück bewegte.

Die unteren drei Standbilder aus Bild 3.18 (Bildaufnahme-rate 5.000 fps) zeigen den eigentlichen Entstehungsprozess einer einzelnen Pore in derselben Schweißung. Der komplette Prozess der Porenentstehung war bereits nach etwa 3 ms abgeschlossen. Im linken Standbild ist noch eine vollständig ausgebildete Dampfkapillare zu sehen, an der sich in ihrem unteren Drittel ein Hohlraum abschnüren wird. Nach 2 ms (mittleres Standbild) war die Kapillare in ihrem unteren Drittel bereits nahezu vollständig durch die Einschnürung vom oberen Teil getrennt. Durch diese Einschnürung erreicht sehr

viel weniger Laserleistung die Kapillarspitze und speziell die untere Kapillarrückwand, was zu einem Kondensieren des darin enthaltenen Metaldampfes führt. Durch die noch nicht vollständig geschlossene Abschnürung wird aufgrund des so entstehenden Unterdrucks Umgebungsgas durch die Kapillare nach unten in den Hohlraum gesaugt. Im rechten Standbild (nach 3 ms) ist zu sehen, wie sich die Pore aufbläht und von der Dampfkapillare ablöst. Das Aufblähen der Pore wird dadurch verursacht, dass das eingesaugte Umgebungsgas durch die umgebende Schmelze erwärmt wird und so unter gleichem hydrostatischem Druck der Schmelze an Volumen zunimmt.

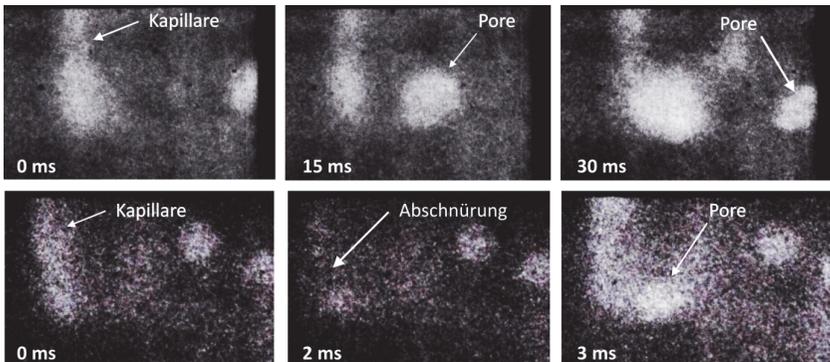


Bild 3.18: Blindschweißung in 6 mm dickem Aluminium (AlMgSi). Der Vorschub betrug 3 m/min von rechts nach links, die Laserleistung war 4 kW bei einem Fokusedurchmesser von 600 μm . Die obere Bildreihe zeigt Standbilder der Porenbewegung aus einem Video mit einer Bildrate von 1.000 fps. Die untere Bildreihe zeigt die Entstehung einer Pore innerhalb von 3 ms mit Standbildern aus einem Video mit einer Bildrate von 5.000 fps [35].

Das Experiment verdeutlicht insbesondere die Notwendigkeit einer hohen zeitlichen Auflösung von $> 1.000 \text{ fps}$ der Röntgenvideos um auch solch schnell ablaufende Prozesse mit hinreichend hoher Abtastrate zu visualisieren.

Des Weiteren kommt es bei der Porenbildung, wie oben beschrieben, zu Abschattungen und lokalen Abkühlungen innerhalb der Dampfkapillare. Dieser Umstand kann sich im Bild einer koaxialen Beobachtung der thermischen Prozessemission in starken Helligkeitsschwankungen manifestieren.

3.4.2.2 Prozesssporen in Stahl

Prozesssporen beim Laserschweißen von Stahlwerkstoffen treten deutlich seltener auf, als bei Aluminium und sind auch stärker abhängig von den verwendeten Prozessparametern. Dies ist unter anderem dadurch begründet, dass die Prozessdynamik beim Schweißen von Stahl deutlich geringer ist und damit die Dampfkapillare weniger Fluktuationen unterworfen ist.

In Bild 3.19 sind zwei Laserschweißprozesse in Edelstahl 1.4016 einander gegenübergestellt. In der jeweils oberen Bildhälfte ist die Draufsicht auf den Schweißprozess mit einer Hochgeschwindigkeitskamera im NIR-Spektrum dargestellt, während in der unteren Bildhälfte das Röntgenvideo der Seitenansicht zu sehen ist. Die Schweißung wurde als Stupfstoß ausgeführt und mittels eines Yb:YAG Scheibenlasers (Trumpf TruDisk 5001) durchgeführt. Der Laserstrahl wurde über eine Transportfaser mit einem Kerndurchmesser von $200\ \mu\text{m}$ ($NA = 0,1$) und einer Fokussieroptik mit einer Abbildung von $\beta = 280 / 200 = 1,4$ auf das Werkstück abgebildet. Vorschubgeschwindigkeit und Laserleistung wurden so gewählt, dass jeweils eine Einschweißtiefe von etwa $3\ \text{mm}$ erreicht wurde.

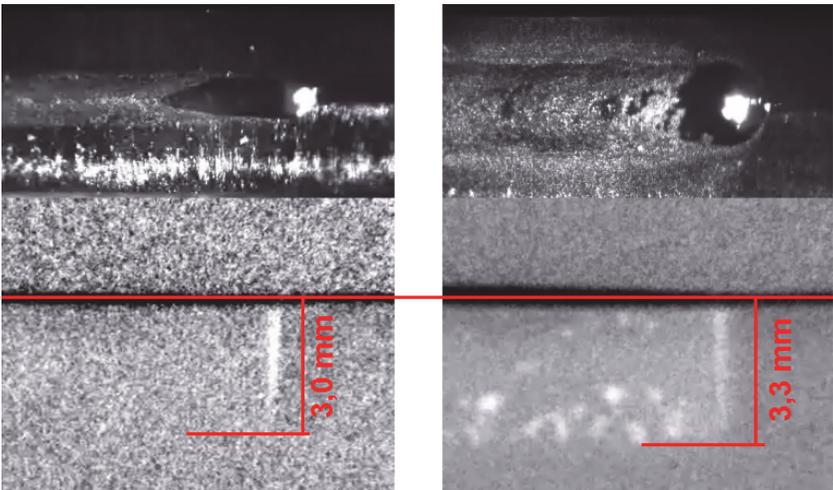


Bild 3.19: Laserschweißung im Stupfstoß von Edelstahl 1.4016. Links: $d_f = 280\ \mu\text{m}$, $v = 5\ \text{m/min}$, $P = 2,5\ \text{kW}$. Rechts: $d_f = 280\ \mu\text{m}$, $v = 1\ \text{m/min}$, $P_L = 1,5\ \text{kW}$. Die obere Bildhälfte zeigt das Bild einer Hochgeschwindigkeitskamera, die untere Bildhälfte zeigt das zugehörige Bild des Röntgenvideos [61].

Beim Vergleich der beiden Schweißprozesse in Bild 3.19 wird deutlich, dass die Entstehung von Prozessporen bei diesem Werkstoff stark von den verwendeten Prozessparametern abhängig ist. Während die Schweißnaht bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 m/min praktisch porenfrei ist, ist die Schweißnaht bei einem Vorschub von 1 m/min stark mit Prozessporen an der Wurzel­seite belastet. In dem gezeigten Fall wirkte die höhere Vorschubgeschwindigkeit stabilisierend auf die Dampfkapillare und führte bei erhöhter Produktivität zu einer verbesserten Nahtqualität.

Aufgrund des fehlenden Kontrasts innerhalb des Schmelz­bades ohne Prozessporen, kann jedoch keine Aussage darüber getroffen werden, wie sich die Strömungen des flüssigen Metalls im Schmelz­bad verhalten. Um fundierte Aussagen über die Entstehung von Prozessunregelmäßigkeiten zu erhalten, sind jedoch Daten zu Schmelz­strömungen essentiell. Im folgenden Abschnitt soll daher auf eine Methode eingegangen werden, Schmelz­badströmungen in Laserschweißprozessen mit Hilfe der Röntgen-Videografie zu visualisieren.

3.4.3 Beobachtung von Schmelz­badströmungen

Für die Visualisierung von Schmelz­badströmungen ist ein hinreichender Kontrast innerhalb des schmelzflüssigen Materials zwingend notwendig. Da in einem ungestörten Schweißprozess, ohne Poren­bildung, das Schmelz­bad einen weitgehend homogenen Schwächungskoeffizienten über sein Volumen aufweist, sind ohne weitere Maßnahmen keine Schmelz­badströmungen erkennbar. Eine Lösung dieses Problems besteht im Einsatz von sogenannten Tracern, die einen vom Grundwerkstoff verschiedenen Schwächungskoeffizienten aufweisen.

3.4.3.1 Eigenschaften von Tracern

Tracer lassen sich grundsätzlich in zwei Gruppen einteilen; flüssige Tracer, die mit dem Grundwerkstoff zusammen aufschmelzen, und feste Tracer, die während des Schweißprozesses ihre solide Form nicht verlieren. Die beiden Gruppen haben dabei unterschiedliche Vor- und Nachteile. Feste Tracer eignen sich insbesondere zur Untersuchung von Strömungs­geschwindigkeiten, da sie als diskrete Objekte im Röntgen­video verfolgt werden können. Flüssige Tracer eignen sich dagegen besser, um das Durchmischungsverhalten im Prozess zu beobachten.

Ein Tracer muss verschiedene Anforderungen erfüllen, um für die Röntgen­untersuchung von Laserschweißprozessen geeignet zu sein. Zum einen sollte er einen mög-

licht hohen Kontrast gegenüber dem Grundwerkstoff aufweisen, zum anderen darf er den Laserschweißprozess nicht übermäßig beeinflussen. Die Forderung nach hohem Kontrast lässt sich durch die Auswahl eines Elements mit einer höheren Kernladungszahl als der Grundwerkstoff erfüllen. Exakte Vorhersagen über die Beeinflussung des Schweißprozesses sind dagegen aus den Werkstoffkennwerten (Tabelle 3.6) nur schwer zu treffen.

Material	Hauptelement	Ordnungszahl	Dichte [g/cm ³]	Schmelzpunkt [K]	Siedepunkt [K]
Aluminium	Al	13	2,7	933	2743
Stahl	Fe	26	7,87	1811	3273
Kupfer	Cu	29	8,96	1357	2836
Zinn	Sn	50	7,3	505	2876
Wolframkarbid	W	74	19,3	3680	5828

Tabelle 3.6: Werkstoffkennwerte verschiedener Materialien [17], [20], [62].

Insbesondere flüssige Tracer neigen dazu, den Schweißprozess stark zu stören. Zum einen beeinflussen sie teils stark die Dynamik des Prozesses selbst, zum anderen neigen sie dazu mit dem Grundwerkstoff zu legieren, was sowohl das Erstarrungsverhalten, als auch die resultierende Metallurgie beeinflusst.

Im Folgenden soll daher anhand dreier Beispiele die Auswahl eines geeigneten Tracers für einen Schweißprozess in Aluminium aufgezeigt werden. Die wichtigsten Werkstoffkennwerte der untersuchten Tracer Zinn, Kupfer und Wolframkarbid sind zusammen mit den Grundwerkstoffen Aluminium und Stahl in Tabelle 3.6 aufgeführt.



Bild 3.20: Beispiele für Tracermaterialien beim Schweißen von Aluminium. Links: Zinn-Draht. Mitte: Kupfer-Silizium-Draht. Rechts: Pulvergemisch aus Wolframkarbid und Stellite 21.

In Bild 3.20 sind Standbilder aus drei Röntgenvideosequenzen abgebildet, die exemplarisch die Auswirkungen der drei verwendeten Tracer auf einen Laserschweißprozess in Aluminium verdeutlichen sollen. Der Schweißprozess läuft von rechts nach links.

Zinn

Das erste Bild von links zeigt den Moment kurz nach dem Überschweißen eines Stück Zinn-Drahts. Das Zinn bewirkt im Schweißprozess eine sprunghafte Zunahme der Einschweißtiefe und eine starke Beschleunigung der Schmelze entlang der Erstarrungsgrenze des Schmelzebades, die zu einem starken Schmelzeauswurf führt. Das fehlende Material führt zu der großen hellen Fläche im Röntgenbild kurz hinter der Dampfkapillare. Zinn bietet zwar einen hohen Kontrast gegenüber Aluminium, ist jedoch aufgrund der starken Beeinflussung des Schweißprozesses als Tracer nicht geeignet.

Kupfer

Aufgrund der Tatsache, dass Kupfer-Silizium als Zusatzwerkstoff für das Schweißen von Aluminium Verwendung findet, ist dieses Material ein aussichtsreicher Kandidat als Flüssigtracer für Aluminium-Werkstoffe. Das Bild in der Mitte zeigt den Moment kurz nach dem Überschweißen eines Stück Kupfer-Silizium-Drahts. Der Kontrast ist aufgrund der niedrigeren Kernladungszahl etwas niedriger als bei Zinn, jedoch immer noch sehr deutlich. Die Einschweißtiefe bleibt beim Überschweißen des Tracers quasi konstant und auch die Oberfläche des Schweißprozesses bleibt stabil. Wird der Tracer hinreichend tief im Grundwerkstoff platziert, lässt sich eine deutliche Hervorhebung der Erstarrungsgrenze des Schmelzebades erreichen.

Wolframkarbid

Wolframkarbid zählt aufgrund seines hohen Schmelzpunktes zu den festen Tracern. Sowohl bei Schweißprozessen in Aluminium, als auch in Stahl verbleiben die Partikel in ihrer ursprünglichen Form und legieren nicht mit dem Grundwerkstoff. Das Bild ganz rechts zeigt den Moment kurz nach dem Überschweißen einer Bohrung, die mit einem Pulvergemisch aus Wolframkarbid und Stellite 21 gefüllt war. Die Schmelzebaddynamik bleibt beim Überschweißen dieser Tracer weitgehend konstant, lediglich bei Verwendung von sehr großen Tracermengen tritt eine leichte Erhöhung der Einschweißtiefe auf. Der Kontrast ist aufgrund der hohen Kernladungszahl von Wolfram sehr groß, was es ermöglicht, auch sehr kleine Partikel noch sicher zu erkennen. Das Pulvergemisch mit Stellite 21 neigte im vorliegenden Beispiel zu Clusterbildung. In späteren Experimenten wurde aus diesem Grund auf reines Wolframgranulat zurückgegriffen, welches eine homogenere Verteilung in der Schmelze erreicht. Insgesamt bietet jedoch auch das hier verwendete Pulvergemisch aus Wolframkarbid und Stellite 21 einen guten Kontrast bei geringer Beeinflussung des Schweißprozesses.

3.4.3.2 Schmelzeströmungen (qualitativ) in Stahl und Aluminium

Zur Visualisierung der vorherrschenden Schmelzebadströmungen wurde als Tracer Wolframgranulat flächig auf der Werkstückoberfläche aufgebracht, welches durch den Laserschweißprozess in das Schmelzebad gemischt wurde. Beim Grundwerkstoff handelte es sich um Edelstahl 1.4301 beziehungsweise um Aluminium AlMgSi, welcher mittels eines Yb:YAG Scheibenlasers (Trumpf TruDisk 5001) geschweißt wurde. Das Ende der Transportfaser mit einem Kerndurchmesser von $200\ \mu\text{m}$ ($NA = 0,1$) wurde auf einen Fokusbereich von $280\ \mu\text{m}$ fokussiert [61].

Edelstahl 1.4301

Bild 3.21 zeigt zwei Laserschweißprozesse mit vergleichbarer Einschweißtiefe, aber unterschiedlicher Vorschubgeschwindigkeit. Im linken Bild wurde mit einer Laserleistung von $5\ \text{kW}$ und einer Vorschubgeschwindigkeit von $6\ \text{m/min}$ geschweißt, während im rechten Bild $3\ \text{kW}$ Laserleistung bei $3\ \text{m/min}$ Vorschub zum Einsatz kam.

Die Videodaten zeigen für beide Prozesse deutlich unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten, wobei ein höherer Vorschub zu größeren Strömungsgeschwindigkeiten führt. Auf eine quantitative Bewertung der Strömungen wurde in diesem Experiment verzichtet. Die qualitative Betrachtung der Schmelzebadströmungen führte bei beiden Laserschweißprozessen zu quasi identischen Resultaten.

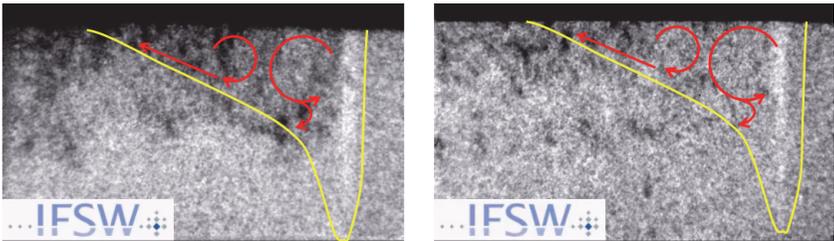


Bild 3.21: Laserschweißprozess (Blindschweißung) in Edelstahl 1.4301. Fokusbereich $280\ \mu\text{m}$, Wellenlänge $1.030\ \text{nm}$. Links: Laserleistung $5\ \text{kW}$ bei $6\ \text{m/min}$ Vorschub. Rechts: Laserleistung $3\ \text{kW}$ bei $3\ \text{m/min}$ Vorschub. Die Hauptströmungsrichtungen sind durch rote Pfeile gekennzeichnet, während die ungefähre Schmelzebadgrenze Gelb markiert ist [61].

Der Materialtransport fand hauptsächlich in der oberen Hälfte des Schmelzebades statt. Nur sehr wenige Tracerpartikel wurden an der Kapillarvorderwand nach unten transportiert, die meisten verblieben in der oberen Hälfte des Schweißbades.

Große Strömungswirbel können hauptsächlich in der oberen Hälfte des Schmelzebades beobachtet werden. Auffällig sind dabei zwei Hauptwirbel, die hinter der Dampfkapillare nacheinander aneinander angrenzend in jeweils entgegengesetzte Richtungen drehen.

Der kapillarnahe Hauptwirbel, mit Drehrichtung gegen den Uhrzeigersinn, scheint sich dabei auf halber Tiefe der Kapillare aufzuspalten in einen Hauptanteil, der an der Kapillarrückwand wieder nach oben fließt, und einen kleineren Anteil, der (zumindest zeitweise) Material an der Kapillarrückwand nach unten drückt. Das nach unten gedrückte Material scheint dabei bereits nach kurzer Zeit von der Erstarrungsfront überholt zu werden.

Der kapillarferne Wirbel, mit Drehrichtung im Uhrzeigersinn sorgt für einen starken Materialtransport weg von der Kapillare, entlang der Erstarrungslinie des Schmelzebades. Dieser Materialtransport scheint maßgeblich dafür verantwortlich, dass das Schmelzebad im oberen Drittel des Prozesses eine derart große Länge mit vergleichsweise geringer Tiefe erreicht.

Aluminium AlMgSi

In Bild 3.22 sind zwei Laserschweißprozesse in Edelstahl und Aluminium einander gegenübergestellt. Das linke Bild zeigt wieder den Schweißprozess in Edelstahl 1.4301 mit 5 kW und 6 m/min , wie er bereits in Bild 3.21 links zu sehen war. Das rechte Bild zeigt dagegen einen Laserschweißprozess in Aluminium AlMgSi mit einer Laserleistung von 3 kW bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 m/min [61].

Beim Vergleich der beiden Schweißprozesse fällt auf, dass im Fall von Aluminium im oberen Drittel des Schmelzebades zwei ähnliche, entgegengesetzt laufende Wirbel (orange Pfeile) auftreten wie bei Stahl. Diese sind jedoch deutlich weniger konstant.

Im unteren Bereich des Schmelzebades entsteht bei Aluminium dagegen ein großer Wirbel, der im gezeigten Bild im Uhrzeigersinn drehend große Mengen Schmelze und Tracer in Richtung der Kapillarmitte transportiert. Dieser Wirbel fördert jedoch nicht konstant Material, sondern zerfällt immer wieder in ein chaotisches Strömungsmuster. Diese Störung wurde im Experiment durch Prozesssporen hervorgerufen, die sich während ihrer Entstehung stark aufblähen, wie bereits in Abschnitt 3.4.2.1 beschrieben, und dabei einen starken Impuls entgegen der Drehrichtung des Wirbels erzeugten. Es scheint jedoch so, als ob der starke Materialtransport in Richtung der Kapillarmitte das Einschnüren derselben und damit die Entstehung von Prozesssporen hervorruft.

Auch der Materialtransport entlang der Erstarrungsgrenze des Schmelzebades nach hinten ist deutlich weniger gleichmäßig als bei der Schweißung in Stahl. Die Strömung existiert nur zeitweise und scheint hauptsächlich durch die Porenbildung getrieben zu sein. Die Strömungsgeschwindigkeiten liegen in der Spitze zwar deutlich über denen von Stahl, es wird dabei in Summe jedoch augenscheinlich weniger Material transportiert.

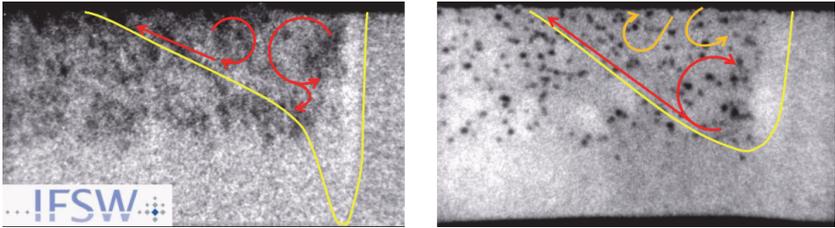


Bild 3.22: Laserschweißprozess (Blindschweißung) mit Fokusdurchmesser $280\ \mu\text{m}$, Wellenlänge $1.030\ \text{nm}$. Links: Edelstahl 1.4301 mit einer Laserleistung von $5\ \text{kW}$ bei $6\ \text{m/min}$ Vorschub. Rechts: Aluminium AlMgSi mit einer Laserleistung von $3\ \text{kW}$ bei $5\ \text{m/min}$ Vorschub. Die Hauptströmungsrichtungen sind durch rote und orange Pfeile gekennzeichnet, während die ungefähre Schmelzebadgrenze Gelb markiert ist [61].

3.4.3.3 Schmelzeströmungen (quantitativ) in Aluminium

Unter Zuhilfenahme einer Software zur Partikelverfolgung¹³ kann mit der Röntgenvidetechnik auch eine weitgehend automatische Vermessung der Strömungsgeschwindigkeiten durchgeführt werden, wie sie in Bild 3.23 dargestellt ist. Voraussetzung dafür ist, dass die Videodaten ein genügend hohes Signal-Rausch-Verhältnis aufweisen.

Das Plugin Trackmate für die Bildverarbeitungssoftware Fiji identifiziert automatisch, anhand eines vorgegeben Helligkeitsschwellwertes, die Tracerpartikel im Video des Schweißprozesses. In aufeinanderfolgenden Bildern wird wieder nach denselben Partikeln gesucht und deren Bewegung in einem sogenannten Track gespeichert. Die Tracks können anschließend beispielsweise mit Excel ausgewertet werden.

Bei der in Bild 3.23 dargestellten Schweißung handelt es sich um eine Laserschweißung von Aluminium AlMgSi welche mit einer Laserleistung von $3\ \text{kW}$ bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $5\ \text{m/min}$ durchgeführt wurde. Die Strahlquelle war ein

¹³ Beispielsweise über das Plugin Trackmate für die Bildverarbeitungssoftware Fiji.

Trumpf TruDisk 5001 Scheibenlaser mit einer Transportfaser mit $200\ \mu\text{m}$ Kerndurchmesser, der auf einen Fokussdurchmesser von $280\ \mu\text{m}$ fokussiert wurde. Dieser Prozess entspricht damit dem in Abschnitt 3.4.3.2 gezeigten.

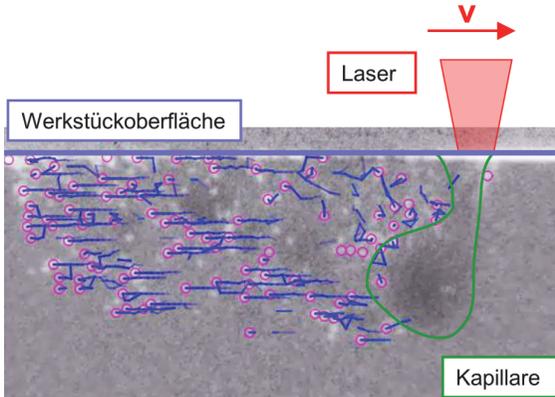


Bild 3.23: Visualisierung einer automatischen Partikelverfolgung in einem Laserschweißprozess in Aluminium. Grün umrandet ist die Dampfkapillare dargestellt, während die ermittelten Spuren der Tracerpartikel blau markiert sind. Der Kontrast des Röntgenbilds ist invertiert, weshalb die Dampfkapillare dunkel und die Tracer hell erscheinen [61]¹⁴.

In Bild 3.24 ist das Histogramm der gemessenen Geschwindigkeitsverteilung der Tracerpartikel, des oben beschriebenen Schweißprozesses, dargestellt. Das Maximum bei $5\ \text{m/min}$ wird durch die Vorschubgeschwindigkeit des Prozesses definiert, da Tracer, welche von der Erstarrungsfront eingeholt werden, sich mit genau dieser Geschwindigkeit aus dem Bild hinausbewegen.

Es wird deutlich, dass im Schmelzbad wesentlich höhere Geschwindigkeiten auftreten können als die Vorschubgeschwindigkeit selbst. Die hier gemessenen Geschwindigkeiten reichen bis über $70\ \text{m/min}$, die Häufigkeitsgrenze von 10 wird dabei erst bei Geschwindigkeiten oberhalb von $40\ \text{m/min}$ unterschritten, was *achtmal* höher liegt, als die Vorschubgeschwindigkeit selbst. Diese Ergebnisse decken sich weitgehend mit den anderenorts gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in [63].

¹⁴ Das hier in Abschnitt 3.4.3 verwendetet Aluminium wird in dieser Quelle fälschlicherweise als AlMg3 bezeichnet. In der Tat handelt es sich jedoch bei dem in diesen Versuchen verwendeten Aluminium um eine AlMgSi-Legierung.

Für die Prozessbeobachtung unterstreicht dies nochmals die Notwendigkeit hoher zeitlicher Auflösung, da ansonsten die Bewegungsunschärfe unter Umständen größer wird, als die Ortsauflösung des Systems. Beispielsweise bewegt sich bei 60 m/min ein Objekt bereits so schnell, dass bei einer zeitlichen Auflösung von 1.000 fps eine Wegstrecke von 1 mm pro Bild zurückgelegt wird. Des Weiteren verdeutlicht es, dass unter der Oberfläche des Schmelzebades Prozesse ablaufen, deren Geschwindigkeit an der Oberfläche selbst nicht direkt sichtbar sind und sich damit der Detektion durch herkömmliche kamerabasierte Beobachtungsverfahren entziehen.

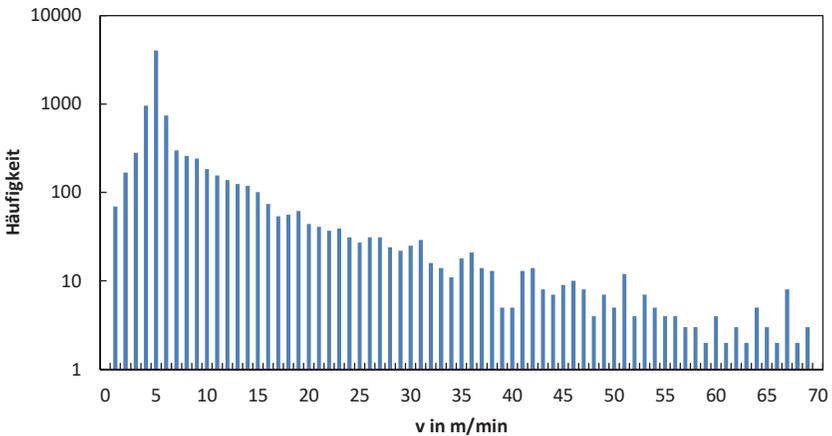


Bild 3.24: Auswertung der gemessenen Geschwindigkeiten nach deren Häufigkeit in logarithmischer Darstellung.

3.4.4 Visualisierung der Schmelzebadgrenze

Wie bereits in den vorhergehenden Abschnitten beschrieben, hebt sich die schmelzflüssige Phase eines Metalls im Röntgenbild nicht hinreichend gegenüber der festen Phase ab, um sie visualisieren zu können. Im Folgenden soll daher ein Verfahren beschrieben werden, welches es ermöglicht, dieses Problem zu lösen und die geometrische Begrenzung des Schmelzebades in einem Laserschweißprozess sichtbar zu machen.

Die schmelzflüssige Phase in einem Schweißprozess unterscheidet sich von der festen Phase dadurch, dass das flüssige Material im Röntgenbild ein durch Tracer nachweisbares Bewegungsmuster aufweist, welches sich von der festen Phase unterscheidet. In

Abschnitt 3.4.3 wurde gezeigt, dass im Schmelzebad ein Strömungsfeld vorliegt, das aus chaotischen Strömungen und regelmäßigen Wirbeln besteht, während sich das erstarrte Material linear mit konstanter Geschwindigkeit seitlich aus dem Bildfeld hinausbewegt. Der Schlüssel zur Visualisierung der Phasengrenze ist es nun diesen Unterschied der Bewegungsvektoren durch geeignete Bildverarbeitungsalgorithmen sichtbar zu machen.

Um den zeitlichen Verlauf einer Bildreihe rechentechnisch zu erfassen, kann die sogenannte Z-Projektion verwendet werden [64]. Die Z-Projektion betrachtet jedes Bild als Matrix aus Pixelwerten G mit Koordinaten $[x,y]$. Eine Bildreihe besteht somit aus einer Anzahl Z derartiger Matrizen $G_i[x,y]$ mit dem Laufindex i . Die Z-Projektion bietet nun die Möglichkeit, entlang eines Pfades i (von 0 bis Z) eine mathematische Operation auf die jeweiligen Pixelwerte $G_i[x,y]$ anzuwenden.

Da sich Tracerpartikel im Röntgenbild als dunkle Pixel manifestieren, erscheint es zweckmäßig, die jeweils dunkelsten Stellen einer Bilderreihe durch eine mathematische Operation in ein Ergebnisbild zu überführen, um deren Bewegungsmuster zu visualisieren. Hierzu kann die Minimumfunktion verwendet werden, die als Ergebnis das kleinste Element einer ihr übergebenen Menge liefert. Um das Ergebnisbild der Minimumprojektion Z_{min} zu erhalten wird die Z-Projektion mit der Minimumfunktion kombiniert. Dies führt zu einem Ergebnisbild $G_{min}[x,y]$, in dem jeder Pixel den jeweils niedrigsten Pixelwert aus der zugrundeliegenden Bilderreihe gemäß der Gleichung

$$G_{min}[x,y] = Z_{min} \Big|_0^Z (G_i[x,y]) \quad (3.13)$$

enthält.

Bild 3.25 zeigt die Anwendung der Minimumprojektion (3.13) auf eine Röntgenbildsequenz eines Laserschweißprozesses in AlMgSi mit Wolframpartikeln als Feststofftracer. Das linke Bild zeigt ein Standbild aus der Röntgenbildsequenz mit eingezeichnetem Laserstrahl (rot) und Dampfkapillare (grün). Wird auf diese Bilderreihe die Minimumprojektion angewandt, ergibt sich als Ergebnis das Bild in der Mitte. Zieht man nun eine Linie durch alle Erstarrungspunkte, ab denen sich die Tracerpartikel nur noch in X-Richtung nach rechts bewegen, so erhält man die maximale Ausdehnung des Schmelzebades in der XY-Ebene des Schweißprozesses, wie im Bild rechts (gelb-gestrichelt markiert) dargestellt.

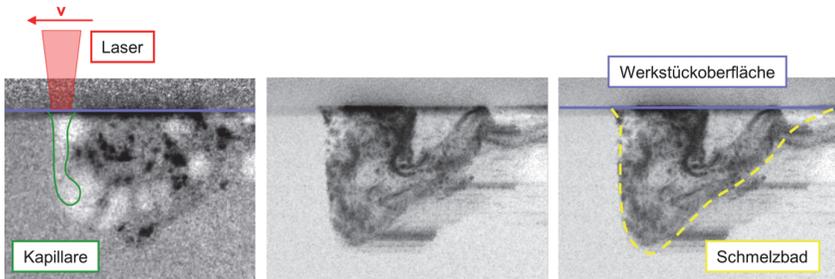


Bild 3.25: Ermittlung der Schmelzbadbegrenzung in der XY-Ebene des Schweißprozesses. Links: Standbild aus der Röntgenbildsequenz mit grün eingezeichneter Dampfkapillare und rot markiertem Laserstrahl. Mitte: Minimumprojektion der Röntgenbildsequenz. Rechts: Begrenzung des Schmelzbad (gelb gestrichelt). Die Werkstückoberfläche ist in blauer Farbe hervorgehoben.

Das beschriebene Verfahren ermöglicht es nun, Geometrieinformationen über das Schmelzbad in Vorschubrichtung des Prozesses unterhalb der Werkstückoberfläche zu ermitteln. Es ist damit ein wichtiger Baustein zur messtechnischen Rekonstruktion des tatsächlichen Schmelzbadvolumens während des Schweißprozesses, welche im nachfolgenden Abschnitt beschrieben wird.

3.4.5 Rekonstruktion des Schmelzbadvolumens

Eine exakte Rekonstruktion des Schmelzbadvolumens ist ohne Tomographieverfahren nicht durchführbar. Jedoch ist es möglich, aus der Kombination verschiedener diagnostischer Verfahren eine Näherungslösung für dieses Problem zu finden. Für eine Näherungslösung des Schmelzbadvolumens müssen geometrische Informationen aus mindestens drei orthogonalen Richtungen kombiniert werden.

Wie in Abschnitt 3.4.4 beschrieben, kann aus Röntgenvideodaten die Schmelzbadbegrenzung in der Seitenansicht des Prozesses extrahiert werden. In Anlehnung an die Maschinenkoordinaten sei diese Ebene XZ-Ebene genannt.

Die maximale Ausdehnung des Schmelzbad, in der Ebene orthogonal zur Vorschubrichtung, kann aus den Daten eines Querschnitts bestimmt werden. Diese Ebene sei die YZ-Ebene.

Die Geometrie des Schmelzbadens an der Oberfläche des Werkstücks, in der XY-Ebene kann mittels einer NIR-Kamera mit Fremdbeleuchtung in koaxialer Anordnung zum Bearbeitungslaserstrahl erfasst werden, wie sie in Kapitel 4 beschrieben wird.

In Bild 3.26 sind die drei Ansichten des Schmelzbadens aus einem Röntgenvideo, dem zugehörigen Querschliff und des Bildes der NIR-Kamera gezeigt und welche Ebene sie jeweils im 3D-Modell repräsentieren.

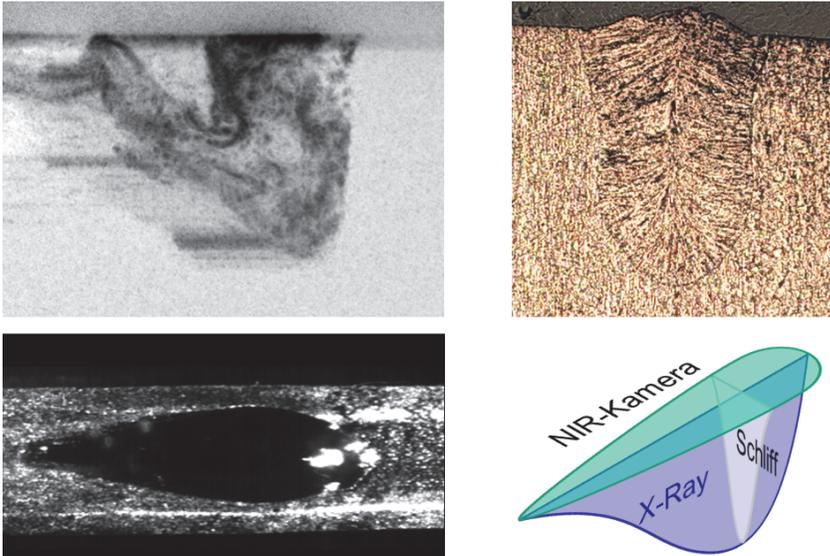


Bild 3.26: Kombination von drei orthogonalen Ansichten des Schweißprozesses. Links oben: Röntgenbild mit Schmelzbadgeometrie in der XZ-Ebene. Rechts oben: Schliffbild des Schmelzbadens in der YZ-Ebene. Unten links: Bild einer NIR-Kamera (mit Fremdbeleuchtung) des Schmelzbadens in der XY-Ebene. Unten rechts: Kombinationsschema der drei Ansichten.

Eine mögliche Methode diese Ansichten zu einem 3D-Modell zu kombinieren besteht darin, das 3D-Volumen scheibenweise aufzubauen. Dieses Modell wird in [65] auch als einfaches Spanten-Modell bezeichnet. Hierzu wird der Querschliff (YZ-Ebene) als sogenannter Ursprungsspannt gewählt, der über die gesamte Länge des Schmelzbadens in einem Stack gesammelt wird. Jeder Spant innerhalb dieses Stacks hat die Dicke eines Voxels¹⁵. Die Abmessungen des Spants werden für jede Position im Stack mit

¹⁵ Ein Voxel ist die Repräsentation eines Pixels im 3D-Raum und entspricht dem kleinsten Volumenelement.

den Geometriedaten der beiden anderen Ansichten skaliert. So wird die Höhe des Spants für jede Position im Stack mit der Tiefeninformation aus dem Röntgenbild (XZ-Ebene) skaliert und die Breite des Spants mit den Breiteninformationen aus dem Bild der NIR-Kamera (XY-Ebene). Das Schema des einfachen Spanten-Modells und das Resultat als 3D-Volumenkörper des Schmelzebades, sind in Bild 3.27 dargestellt.

Der Hauptvorteil des einfachen Spanten-Modells ist die geringe Komplexität des Verfahrens zu dessen Erzeugung. Dies wird jedoch durch die Näherung erkauft, dass der Schmelzebadgeometrie über deren gesamte Länge eine Querschnittsform zugrunde gelegt wird, die aus dem Erstarrungsprozess hervorgeht, nämlich den Daten des Querschlicfs. Es ist jedoch offensichtlich, dass die Schmelzebadform vor der Dampfkapillare durch den Aufschmelzprozess definiert wird. Des Weiteren berücksichtigt dieses Modell nicht alle Informationen aus komplexen Querschlicfen, in denen mehr als eine Erstarrungslinie auftritt. Dies ist beispielsweise bei Schweißnähten mit nagelkopfförmigem Querschnitt der Fall, in denen eine spitze tiefe Form durch eine nachlaufende, flache breite Form des Schmelzebades überlagert wird. Aufwendigere Rekonstruktionsmodelle, die diesen Umständen Rechnung tragen sind in [65] und [66] beschrieben.

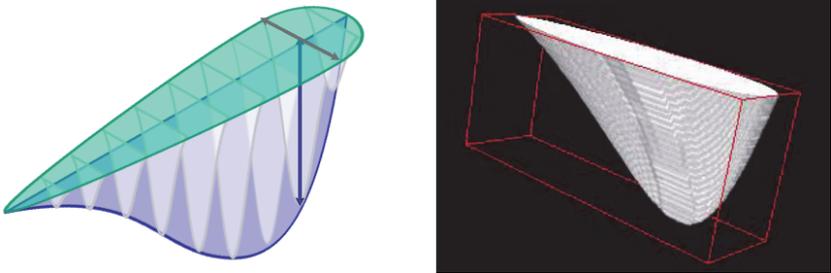


Bild 3.27: Links: Schema des einfachen Spanten-Modells mit dem Querschlift der YZ-Ebene als Ursprungsspant, skaliert mit der Tiefeninformation des Röntgenbildes und der Breiteninformation der NIR-Kamera. Rechts: Zusammengesetzter Volumen-Körper des Schmelzebades.

Die messtechnische Rekonstruktion des Schmelzebadvolumens eröffnet beispielsweise die Möglichkeit Schweißsimulationen zu kalibrieren, deren berechnete Schmelzebadvolumen bislang nur schwer oder gar nicht auf Plausibilität geprüft werden konnten.

3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Mit dem hier vorgestellten Röntgenvideosystem wurde ein diagnostisches Instrument entwickelt, mit dem laserbasierte Fertigungsverfahren, insbesondere das Laserstrahl-tiefschweißen, mit hoher zeitlicher und örtlicher Auflösung röntgendiagnostisch untersucht werden können. Neben der Röntgenvideoanlage am Joining and Welding Research Institute (JWRI) in Osaka ist dieses System das bis dato einzige weltweit, welches diese Möglichkeit bietet.

Neben dem physischen Aufbau der Anlage wurden zahlreiche Bildverarbeitungsalgorithmen umgesetzt, mit denen sich die Qualität der erzeugten Röntgenaufnahmen weiter steigern lässt. Die Verfahren und die theoretischen Grenzen für die Bildqualität wurden in den vorhergehenden Abschnitten detailliert beschrieben.

Des Weiteren wurden Verfahren vorgestellt mit denen sich Schmelzebadströmungen visualisieren lassen und mittels Kombination mit weiteren diagnostischen Verfahren, das Schmelzebadvolumen und dessen geometrische Form ermittelt werden kann. Außerdem konnte die Visualisierung von Porenentstehungsprozessen in Stahl- und Aluminiumwerkstoffen gezeigt, sowie Form und Bewegung der Dampfkapillare untersucht werden.

Eine wichtige Erkenntnis für die kamerabasierte Prozessüberwachung und -regelung ist die Tatsache, dass sich - zumindest bei Stahlwerkstoffen - die Neigung der Kapillarvorderkante, bei Durchschweißungen im quasi-stationären Zustand in einem Bereich bewegt, der in der Regel eine Bestrahlung der vollständigen Kapillarfront durch den Laserstrahl erlaubt. Dies bedeutet, dass bei einer koaxial zum Laserstrahl angeordneten Prozessbeobachtung im Falle der Durchschweißung das Durchschweißbloch sichtbar ist und nicht von der Kapillar-Hinterkante verdeckt wird.

Eine weitere Erkenntnis ist, dass insbesondere bei Aluminiumwerkstoffen, mit einer verstärkten Porenbildung zu rechnen ist, die sich durch eine stark fluktuierende Dampfkapillare auszeichnet. Da es hierbei zu Abschattungen und lokalen Abkühlungen innerhalb der Dampfkapillare kommt, ist davon auszugehen, dass sich dies im Bild einer koaxialen Beobachtung der thermischen Prozessemission in starken Helligkeitsschwankungen manifestiert.

4 Prozess-Überwachung

Im Gegensatz zu früheren Ansätzen für die Implementierung von kamerabasierten Prozessüberwachungssystemen wie beispielsweise in [30] oder [67], wird bei dem hier untersuchten Ansatz auf eine nachträgliche Korrelation von allgemeinen Formparametern der Prozesszone zu auftretenden Schweißfehlern verzichtet. Stattdessen wurde für jeden spezifizierten Schweißfehler aus Abschnitt 4.3 mittels diagnostischer Methoden gezielt ein Bildmerkmal identifiziert, das den entsprechenden Schweißfehler möglichst konkret identifiziert.

Aus diesem Grund wurde die Entwicklung der Prozessüberwachung von Beginn an durch bildgebende Prozessdiagnostik mittels Hochgeschwindigkeitskameras im nah-infraroten und infraroten Spektrum unterstützt. Dies ermöglichte eine sehr viel präzisere Definition der zu überwachenden Bildmerkmale als dies mit klassischen Methoden der Korrelation von Signalverläufen zu Schweißfehlern möglich ist.

Ziel war es, ein System zu entwickeln, das in der Lage ist, koaxial zum Strahlengang des Bearbeitungslasers, Bilddaten der thermischen¹⁶ Emission der Wechselwirkungszone des Schweißprozesses zu erzeugen und diese durch eine geeignete Bildverarbeitungssoftware so zu verarbeiten, dass eine Fehlererkennung weitgehend automatisch erfolgen kann. Die hier vorgestellten Arbeiten zur koaxialen Prozess-Überwachung dienen außerdem als Basis für die Entwicklung der kamerabasierten Prozessregelung in Kapitel 5. Insbesondere sei an dieser Stelle auf die Entwicklung der koaxialen Beobachtungsoptik verwiesen, sowie auf die Identifikation von geeigneten Bildmerkmalen für die Umsetzung in einem Regelungskonzept.

Die Arbeiten wurden größtenteils im Rahmen des Forschungsprojekts „Yb:Wolframat-Scheibenlaser höchster Leistung“ (FKZ: 13N8377, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung [11]), durchgeführt.

¹⁶ Beobachtet wird das Eigenleuchten des Prozesses im nahen Infrarot ohne zusätzliche Beleuchtung.

4.1 Aufbau der Prozessüberwachung

Die Entwicklung umfasst die Auswahl einer geeigneten Kamera, deren optische Integration in den Bearbeitungskopf und die Entwicklung einer Software zur Verarbeitung der Bilddaten. Im Folgenden soll auf die wichtigsten Aspekte der Systementwicklung eingegangen werden.

4.1.1 Optische Integration in den Prozess

Basis für die koaxiale optische Integration ist das Beobachtungsfenster am Strahlteiler des verwendeten Laserschweißkopfes PFO-33 von Trumpf, der für den Wellenlängenbereich unterhalb von 1.000 nm eine hinreichend hohe Transmission aufweist. Durch die koaxiale Anordnung wird gewährleistet, dass über das gesamte Scanfeld der PFO-33 der Schweißprozess im Kamerabild sichtbar ist. Des Weiteren treten durch die verwendete F-Theta-Optik des Laserscanners nur minimale perspektivische Verzerrungen des Kamerabildes auf.

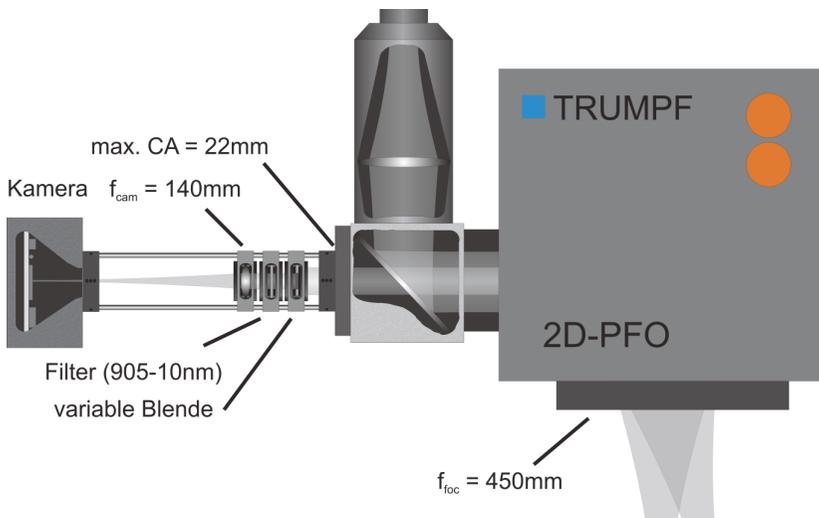


Bild 4.1: Schema der Abbildungsoptik für die koaxiale Prozessüberwachung. Die minimal mögliche Blendenzahl wird durch den maximalen Durchmesser des Optikflansches ($CA = 22\text{ mm}$) begrenzt [11].

Der Laserschweißprozess wurde in den Experimenten durch die konfokale Abbildung aus Fokussierlinse ($f_{\text{foc}} = 450 \text{ mm}$) und Abbildungslinse ($f_{\text{cam}} = 140 \text{ mm}$) auf den Kamera-Chip abgebildet. Zur Minimierung des störenden Metaldampfleuchtens wurde ein Interferenzfilter eingesetzt, der bei einer Wellenlänge von 905 nm ein Transmissionsmaximum mit einer Halbwertbreite von 10 nm aufweist ($905\text{-}10\text{nm}$) [11], siehe hierzu die Schemazeichnung in Bild 4.1. Die Auswahl des Interferenzfilters basierte dabei maßgeblich auf den Erkenntnissen der Spektraluntersuchungen die in Abschnitt 2.4 zusammengefasst sind. Die freie Apertur des abbildenden Systems betrug maximal 22 mm , konnte aber durch eine verstellbare Blende reduziert werden. Die Kamera wurde ohne externe Beleuchtung betrieben und visualisierte das thermische Eigenleuchten des Prozesses, dessen Entstehung in Abschnitt 2.2.1 beschrieben ist. Die gemessene Helligkeitsverteilung wird dabei maßgeblich durch die Temperaturverteilung des Prozesses bestimmt.

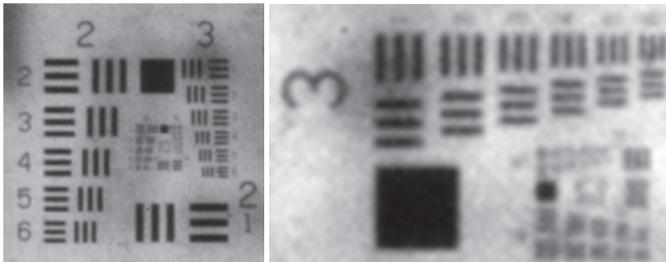


Bild 4.2: Testaufnahmen einer USAF-1951 Auflösungsstesttafel. Das kleinste gerade noch aufgelöste Element ist das Element-6 in der Gruppe-3. Dies entspricht einer Auflösung von $14,3 \text{ LP/mm}$ [11].

Die maximal mögliche Auflösung des abbildenden Systems in Verbindung mit der PFO-33 lag bei etwa $14,3 \text{ LP/mm}$, siehe Messung in Bild 4.2. Aus diesem Grund wurde die optische Vergrößerung des Linsensystems zu $\beta = (140 \text{ mm} / 450 \text{ mm}) = 0,31$ gewählt. Bei diesem Abbildungsmaßstab stehen, bei einem Pixelabstand von $10,6 \mu\text{m}$, objektseitig 30 px/mm auf der Kamera zur Verfügung. Dies begrenzt das Auflösungsvermögen gemäß dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem [51] auf maximal 15 LP/mm . Somit ergibt sich eine optimale Ausnutzung der Kameraauflösung bei kleinstmöglicher effektiver Blendenzahl¹⁷. Die notwendige Belichtungszeit beträgt $0,15 \text{ ms}$ bis $0,25 \text{ ms}$, was Aufnahmen mit geringer Bewegungsunschärfe ermöglicht.

¹⁷ Bei vorgegebener freier Apertur steigt die Blendenzahl mit einer längeren kameraseitigen Brennweite, beziehungsweise mit steigender optischer Vergrößerung.

4.1.2 Eigenschaften der Kamera

Für das Prozessüberwachungssystem wurde eine MV-D-1024E-CL160 des Herstellers Photonfocus verwendet. Es handelt sich dabei um eine siliziumbasierte CMOS-Kamera mit einer Auflösung von $1.024 \text{ px} * 1.024 \text{ px}$ und einer Ausleserate von bis zu 160 Megapixeln/Sekunde. Die Pixelgröße der Kamera ist mit $10,6 \mu\text{m}$ vergleichsweise groß. Im Wellenlängenbereich von 905 nm liegt die Quanteneffizienz bei siliziumtypisch niedrigen $10 - 15 \%$, welche jedoch in Verbindung mit der oben beschriebenen Optik ausreichend ist, um Schweißprozesse bei Belichtungszeiten von unter 1 ms zu visualisieren. Die Kamera verfügt außerdem über einen elektronischen globalen Shutter, der für verzerrungsfreie Aufnahmen bei Bewegungsabläufen im Bild essentiell ist¹⁸.

Die Kamera bietet verschiedene Einstellmöglichkeiten zur Beeinflussung der Bildaufnahmecharakteristik. Grundsätzlich weist die Kamera eine lineare Übersetzung von Eingangshelligkeit zu Ausgangssignal auf. Dieses Verhalten lässt sich jedoch durch verschiedene Einstellungen beeinflussen. Darunter sind neben der Belichtungszeit auch Einstellungen zum sogenannten Gain, Linlog, Skimming und Black Level Offset. Diese Einstellungen sollen im Folgenden kurz erläutert werden [68].

Belichtungszeit und Gain beeinflussen die Steigung der linearen Kennlinie in ähnlicher Weise. Während die Belichtungszeit die Steigung über eine Anpassung des physikalischen Eingangssignals verändert, greift der Gain erst nach der Digitalisierung durch eine simple Multiplikation des digitalen Signals ein. Der Eingriff über den Gain führt dadurch grundsätzlich auch zu einer Verstärkung des Grundrauschens im Bild. Das Bild wird dann zwar bei gleicher Belichtungszeit heller, das Verhältnis von Nutzsignal zu Rauschen bleibt jedoch gleich. Im Gegensatz hierzu führt ein Eingriff über die Belichtungszeit in der Regel zu einer Verbesserung des Verhältnisses von Nutzsignal zu Rauschen. Der Black Level Offset wird für die 0-Punkt Korrektur der linearen Kennlinie verwendet. Er wird sinnvollerweise so eingestellt, dass bei abgedunkelter Kamera im Histogramm die Gaußglocke der Helligkeitsverteilung nahe bei 0 liegt, jedoch nicht abgeschnitten wird.

Die Einstellungen Linlog und Skimming bewirken eine Veränderung der Kennlinie weg vom linearen Verhalten. Das Linlog-Verfahren ermöglicht es, sehr helle Bildbe-

¹⁸ Kameras mit „Rolling Shutter“ erzeugen bei bewegten Objekten Bilder mit geometrischer Verzerrung und sind deshalb zur Prozessüberwachung nicht tauglich.

reiche logarithmisch abzuschwächen, während gleichzeitig dunklere Bildbereiche weiterhin einer linearen Kennlinie folgen. Im Gegensatz zu Linlog ist das Skimming-Verfahren eine Technik zur Aufhellung dunkler Bildbereiche. Unterhalb eines einstellbaren Helligkeitswertes, in Bild 4.3 durch eine gepunktete, senkrechte Linie dargestellt, weist die Kamera eine höhere Empfindlichkeit (größere Steigung der Kennlinie) auf, als oberhalb.

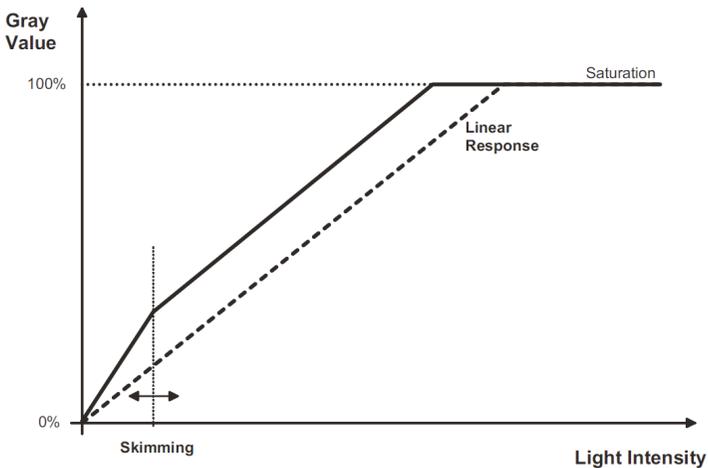


Bild 4.3: Beeinflussung der Kennlinie mit der Skimming Funktion zur Steigerung der Empfindlichkeit in dunklen Bereichen [69].

Zur Optimierung der oben beschriebenen Einstellungen wurden eine Reihe von Schweißversuchen mit der in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Optik durchgeführt. Ziel war es, nicht nur den Bereich der Dampfkapillare sondern auch die Schmelze dahinter gut zu erkennen. Diese Anforderung konnte am besten mit der Skimming Funktion gelöst werden. Auf diese Weise sind die Details im Bereich der hellen Dampfkapillare immer noch mit einer linearen Kennlinie dargestellt und trotzdem kann das deutlich dunklere Schmelzebad dahinter noch dargestellt werden, ohne die Belichtungszeit zu groß wählen zu müssen. Die experimentell ermittelten Einstellungen für die Kamera sind in Tabelle 4.1 aufgeführt.

Bild 4.4 zeigt ein Einzelbild einer Schweißung in verzinktem Stahlblech, bei der die oben beschriebenen Parameter entsprechend Tabelle 4.1 gewählt wurden. Der Bildbereich ist in dieser Darstellung auf den Bereich des Schweißprozesses eingeschränkt. Das Bildmaterial hat eine Auflösung von $324 \text{ px} * 324 \text{ px}$.

Das aus Bild 4.4 abgeleitete Histogramm ist in Bild 4.5 dargestellt und zeigt die Häufigkeitsverteilung der Grauwerte. Die Y-Achse zeigt die Anzahl der Pixel in logarithmischer Skalierung, die den entsprechenden Grauwert der X-Achse aufweisen. Am unteren Ende der Helligkeitsskala (Grauwert 0) ist zu erkennen, wie die Häufigkeit kontinuierlich bis 0^{19} abnimmt, was auf einen korrekten Black Level Offset schließen lässt. Am oberen Ende der Helligkeitsskala sinkt die Häufigkeit ab Helligkeitswert 245 ebenfalls auf 0^{19} . Hierdurch ist sichergestellt, dass in den sehr hellen Bereichen der Dampfkapillare kein Übersteuern der Kamera auftritt.

Belichtungszeit [μs]	150
Bildrate [fps]	1.000
Auflösung [px]	324 * 324
Linlog	0
Skimming	6
Black Level Offset	3.130

Tabelle 4.1: Einstellungen zur Bildaufnahme der CMOS-Kamera für die kamerabasierte Prozessüberwachung [68].



Bild 4.4: Aufnahme mit den gewählten Einstellungen (vergleiche hierzu Tabelle 4.1). Die Aufnahme wurde entnommen aus Schweißung fix_06_062 [68].

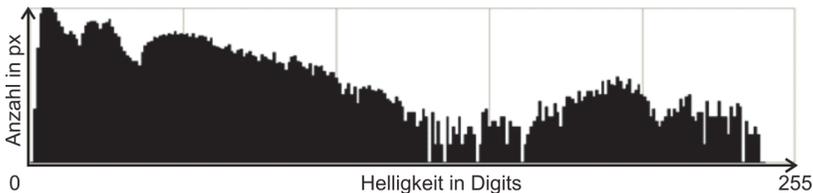


Bild 4.5: Histogramm für den in Bild 4.4 dargestellten Bildausschnitt. Die Y-Achse ist logarithmisch skaliert und zeigt die Anzahl von Pixeln mit der auf der X-Achse aufgetragenen Helligkeit im Intervall 0 bis 255 Digits [68].

¹⁹ Da es sich um eine logarithmische Skalierung handelt, kann hier streng genommen keine Häufigkeit 0 dargestellt werden. Die Darstellung in der linearen Skala legt aber nahe, dass für diese Helligkeitswerte sehr wohl die Häufigkeit 0 vorliegt.

4.1.3 Bildakquise und Datenverarbeitung

Die Aufzeichnung der Bilddaten erfolgte über einen Framegrabber vom Typ micro-Enable III der Firma Silicon-Software. Der Datenstrom aus der frei laufenden²⁰ CMOS Kamera wurde über die CameraLink Schnittstelle in den Pufferspeicher des Framegrabbers eingelesen und von dort, nach Beendigung der Aufnahme, als Sequenz einzelner Bitmap-Dateien auf die Festplatte des Host-Computers geschrieben. Anschließend wurden die Daten von der Festplatte in eine MATLAB Laufzeitumgebung eingelesen, in der die eigentliche Datenverarbeitung stattfand. Die Ergebnisdaten wurden anschließend zurück auf die Festplatte geschrieben und auf dem Monitor des Host-Computers angezeigt. Das entsprechende Datenflussdiagramm ist in Bild 4.6 gezeigt.

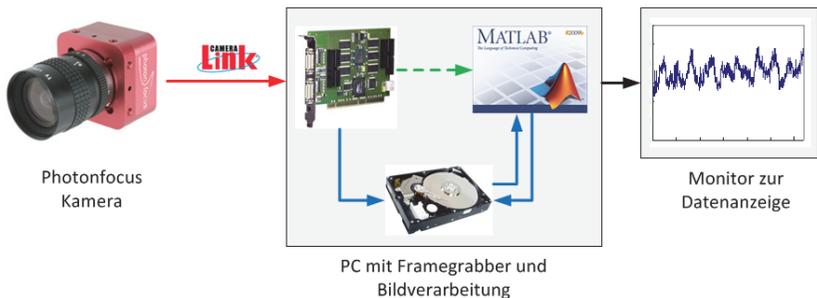


Bild 4.6: Datenflussdiagramm von links nach rechts: Von der Kamera über Camera-Link in den Framegrabber des Host-Computers (roter Pfeil). Zwischenspeicherung auf der Festplatte und Verarbeitung in MATLAB (blaue Pfeile) und Ausgabe auf dem Monitor (schwarzer Pfeil). Online-Datenverarbeitung ohne Zwischenspeicherung (grün gestrichelt).

Eine direkte Verarbeitung der Daten ohne Zwischenspeicherung auf der Festplatte war in diesem Projekt nicht vorgesehen, da der Projektschwerpunkt auf der Entwicklung der Algorithmen lag. Für eine produktionstaugliche Umsetzung der Prozessüberwachung muss jedoch die Möglichkeit der Online-Datenverarbeitung (Bild 4.6 grün gestrichelter Pfeil) vorgesehen werden.

²⁰ Freilaufend bedeutet, dass die Belichtung der Kamera nicht durch einen externen Taktgeber getriggert wird, sondern sowohl Belichtungszeit als auch Bildwiederholrate durch den internen Taktgeber der Kamera gesteuert werden.

4.2 Diagnostik der Fehlerentstehung

Durch Kombination von orts- und zeitaufgelöster Informationsgewinnung in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen ermöglichen Hochgeschwindigkeitskameras einen sehr detaillierten Blick auf das Geschehen in der Prozesszone und deren direkter Umgebung.

Der Einsatz dieser Kameras im nahinfraroten Spektralbereich von $\lambda < 1 \mu\text{m}$, mit und ohne Zusatzbeleuchtung, gehört in der Verfahrensentwicklung von Laserprozessen mittlerweile zum Stand der Forschung. Die wichtigsten Aspekte zur Generierung aussagekräftiger Bilddaten liegen bei diesem Verfahren hauptsächlich im Design der Beleuchtungstechnik. Die Auswahl einer geeigneten Beleuchtungswellenlänge und die Art der Beleuchtung beeinflussen maßgeblich die Qualität der erzeugten Bilddaten.

Kamerasysteme für den Infrarot-Bereich oberhalb von $\lambda > 1 \mu\text{m}$ hingegen, werden in aller Regel ohne Zusatzbeleuchtung eingesetzt und erzeugen ein thermisches Bild des Prozesses. Dies erlaubt sowohl eine sehr präzise Bestimmung der Schmelzebadlänge als auch die Abschätzung von Temperaturverläufen innerhalb des beobachteten Bereichs, wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben wurde.

Die hier durchgeführten diagnostischen Untersuchungen lieferten entscheidende Informationen über die Fehlerentstehung, welche die Identifizierung signifikanter Bildmerkmale für die Prozessüberwachung ermöglichten.

4.2.1 Versuchsaufbau

Für die Untersuchung der Fehlerentstehungsmechanismen wurde ein Versuchsaufbau entworfen, der sowohl eine Highspeed IR-Kamera vom Typ Thermosensorik CMT 256 M HS als auch eine Highspeed VIS/NIR-Kamera vom Typ Redlake MotionPro HS-4 nebst zugehörigem Beleuchtungslaser enthielt. Über ein gemeinsames Stativ wurden die Kameras so ausgerichtet, dass sie zeitgleich den Schweißprozess erfassen können. Wie in Bild 4.7 zu sehen ist, betrug der Beobachtungswinkel der beiden Kameras etwa 32° zur Senkrechten. Diese Schrägstellung führte zu einer um $\cos(32^\circ) = 0,85$ fach verkürzten Darstellung der Y-Koordinate gegenüber der unverzerrten X-Koordinate.

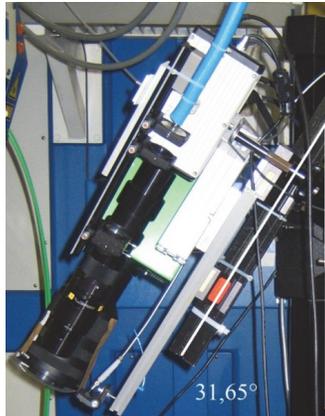


Bild 4.7: Kamerastativ mit Highspeed Kamera, Highspeed IR-Kamera und Beleuchtungslaser [70].

Highspeed VIS/NIR-Kamera, Redlake MotionPro HS-4

Die Highspeed-VIS/NIR-Kamera wurde mit einer Bildwiederholrate von 10 kHz und einer Belichtungszeit von $4 - 6\ \mu\text{s}$ bei einer Bildgröße von $512\text{ px} * 256\text{ px}$ betrieben. Der erfasste Bildbereich betrug dabei in etwa $6\text{ mm} * 3,5\text{ mm}$.

Als Beleuchtungsquelle diente ein fasergekoppelter Laserdiodenstack von Jenoptik mit einer Lichtleistung von 40 W bei einer Wellenlänge von 808 nm . Um das störende Prozessleuchten in den Aufnahmen weiter zu reduzieren, wurde im Kameraobjektiv zusätzlich ein Bandpassfilter mit einer Zentralwellenlänge von 808 nm und einer Halbwertbreite von 40 nm eingesetzt ($808-40\text{ nm}$). Das Gesamtsystem wurde damit am unteren Ende des NIR-Spektrums betrieben [11].

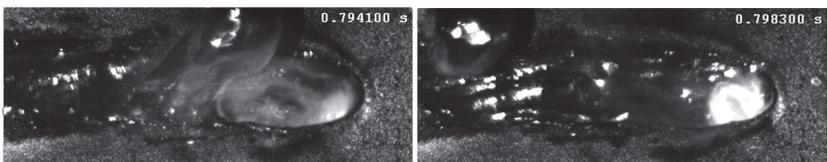


Bild 4.8: Einzelbilder aus einer Videosequenz einer Laserschweißung von verzinktem Stahl im I-Naht-Überlappstoß. Beleuchtungswellenlänge 808 nm . Gezeigt ist die Ablösung eines Spritzers an der Kapillar-Hinterkante [70].

Highspeed IR-Kamera, Thermosensorik CMT 256 M HS

Die maximale Bildwiederholrate der Highspeed IR-Kamera beträgt 1.725 Hz bei einer Belichtungszeit von $538 \mu\text{s}$ und einer Bildgröße von $256 \text{ px} * 128 \text{ px}$. Der sichtbare Bereich auf dem Werkstück betrug in den Experimenten etwa $10 \text{ mm} * 5,8 \text{ mm}$, das Beobachtungsspektrum entsprach dem vollen Empfindlichkeitsspektrum der Kamera und deckte den Bereich zwischen $3,4 \mu\text{m}$ und $5,1 \mu\text{m}$ ab.

Da die Aufnahmen mit der IR-Kamera ohne zusätzliche Beleuchtung erzeugt wurden, zeigen die Bilder die temperaturbedingte Eigenemission des Prozesses. Die sichtbare Helligkeit hängt dabei sowohl von der Temperatur als auch vom lokalen Emissionskoeffizienten ab, siehe hierzu Tabelle 2.3. Dies führt einerseits dazu, dass sich das Schmelzebad sehr deutlich gegen den erstarrten Bereich des Werkstücks abhebt, andererseits jedoch abgeleitete Temperaturen nicht über Phasengrenzen hinweg vergleichbar sind. Innerhalb der Phasengrenzen jedoch können Temperaturverläufe qualitativ abgelesen werden. Auch Spritzer und Auswürfe sind in den IR-Aufnahmen deutlich zu sehen, siehe hierzu die Beispielaufnahmen in Bild 4.9.

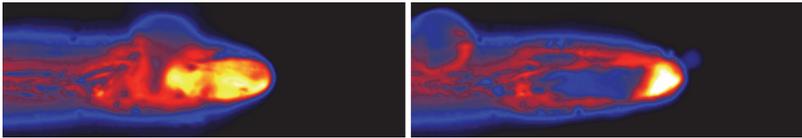


Bild 4.9: Einzelbilder aus einer IR-Videosequenz einer Laserschweißung von verzinktem Stahl im I-Naht-Überlappstoß [70].

4.2.2 Versuchsplanung und Durchführung

Die Experimente waren an typische Laserschweißprozesse aus dem Karosseriebau angelehnt. Zum Einsatz kam dabei ein Scheibenlaser vom Typ TruDisk 6002 in Kombination mit einer 2D-Scannerschweißoptik PFO-33, welche mit einer Fokussierbrennweite von $f_{\text{foc}} = 450 \text{ mm}$ ausgestattet war. Durch die Kollimationsbrennweite von $f_{\text{col}} = 150 \text{ mm}$ ergab sich ein Abbildungsverhältnis von $1:3$, welches den $200 \mu\text{m}$ starken Faserkern des Lichtleitkabels (LLK-D02) mit einem Fokusdurchmesser von $d_f = 600 \mu\text{m}$ auf das Werkstück abbildete. Es wurde kein Schutzgas verwendet und die relative Fokuslage betrug für alle Experimente 0 mm (Fokus auf der Werkstückoberfläche). Zur Reduktion von Nahtunregelmäßigkeiten wurde der entstehende Schweiß-

rauch über die standardmäßigen MDE-Düsen²¹ und eine zusätzliche Absaugung aus der Wechselwirkungszone entfernt.

Die Schweißproben hatten eine Abmessung von $100\text{ mm} * 30\text{ mm}$ und wurden im Überlappstoß mit einer 80 mm langen I-Naht und vollständiger Durchschweißung gefügt. Der Zinkentgasungsspalt zwischen den Blechen wurde mittels Fühlerlehrenband eingestellt, siehe hierzu Bild 4.10 links. Die Schweißproben wurden, wie in Bild 4.10 rechts dargestellt, in Wannelage gespannt. Untersucht wurden drei gebräuchliche verzinkte Stähle aus dem Karosseriebau in unterschiedlichen Materialstärken. Es wurden sowohl die Laserleistungen als auch das Spaltmaß variiert, wobei der Vorschub entsprechend angepasst wurde um die erforderliche Streckenenergie

$$S = \frac{P_L}{v} \quad (4.1)$$

als Quotient aus Laserleistung P_L und Vorschubgeschwindigkeit v , für eine vollständige Durchschweißung zu erzielen. Die Streckenenergie wurde dabei mit einem Sicherheitszuschlag von 10% eingestellt. Tabelle 4.2 zeigt den Versuchsplan mit den einzelnen Parametern und die sich daraus ergebende Anzahl der Einzelexperimente.

Werkstoff	Wandstärke [mm]	Leistung [kW]	Spaltmaß [mm]	Statistik	Probenzahl
	0,7\1,0\1,5\2,0\2,5				
H320LA	5	4	4	3	240
DC04	2	4	4	3	96
MS6000	2	4	4	3	96
Probenanzahl					432

Tabelle 4.2: Matrix der untersuchten Werkstoffe und Schweißparameter mit der jeweiligen Probenanzahl [11], [70].

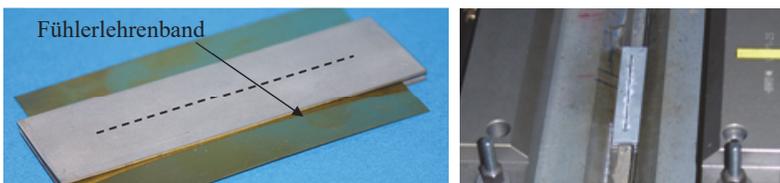


Bild 4.10: Links: Probenbleche mit Fühlerlehrenband zur Einstellung des Entgasungsspalt. Rechts: Spannmittel mit eingelegerter Probe [11].

²¹ MDE-Düse ist eine Bezeichnung der Firma Trumpf und bedeutet Metall-Dampf-Effekt-Düse, was fachlich nicht ganz korrekt ist, da die Düse streng genommen nicht den Metaldampf entfernt, sondern den Schweißrauch.

4.3 Identifizierung signifikanter Bildmerkmale

In den folgenden Abschnitten werden die Resultate der diagnostischen Untersuchungen aus Abschnitt 4.2 analysiert und auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse für unterschiedliche Schweißfehler signifikante Bildmerkmale identifiziert, die sich automatisiert aus den Bilddaten des Prozessüberwachungssystems (siehe Abschnitt 4.1) extrahieren lassen.

Für die Auswertung der aufgezeichneten Bildsequenzen wurde in der Programmierumgebung MATLAB die Software *LaWeld.m* entwickelt. Die Software dient als Basis um auf aufgezeichnete Bilddaten verschiedene Auswertelgorithmen anzuwenden, die automatisch Bildmerkmale vermessen können. Die hier gezeigte Software dient als „Proof-of-Concept“, für Algorithmen zur Erkennung von Schweißfehlern.

Auf umsetzungstechnische Details der Algorithmen soll in dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden. Es sei an dieser Stelle stattdessen auf die Quellen [11] und [71] verwiesen. In den folgenden Abschnitten soll jedoch auf die Prinzipien näher eingegangen werden, mit denen die aufgezeichneten Bildsequenzen auf das Auftreten von Schweißfehlern hin untersucht wurden.

4.3.1 Ungenügende Durchschweißung

Bei Schweißnähten am I-Naht-Überlappstoß ist die Sichtkontrolle, auf das Vorhandensein einer sauberen Nahtober- und Nahtunterraupe, ein etabliertes Mittel zur Qualitätssicherung. Dem liegt die Annahme zugrunde, dass beim Vorhandensein beider Kriterien auch im Fügespalt eine Naht mit vergleichbarer Nahtbreite vorliegt und somit ein ausreichender Anbindequerschnitt gewährleistet ist. Eine ungenügende Durchschweißung liegt dann vor, wenn auf der Unterseite der Fügpartner keine Schweißnaht in Form einer ausgeprägten Nahtunterraupe zu erkennen ist.

Prozesstechnisch lassen sich dabei zwei Fälle unterscheiden.

Im Fall 1 ist, wie in Bild 4.11a dargestellt, bei der Durchschweißung die Dampfkapillare an der Blechunterseite geöffnet. Ist die Dampfkapillare nach unten hin geschlossen, so liegt nach dieser strikten Definition eine ungenügende Durchschweißung vor, siehe hierzu in Bild 4.11b.

Im Fall 2 ist definitionsgemäß eine Durchschweißung bereits dann gegeben, wenn lediglich durch Wärmeleitung die Blechunterseite aufgeschmolzen wird. Wie in Bild 4.12a dargestellt, bleibt die Dampfkapillare dabei an ihrer Unterseite geschlossen. Erst wenn die Blechunterseite, wie in Bild 4.12b, nicht mehr aufgeschmolzen wird, liegt nach dieser Definition eine ungenügende Durchschweißung vor.

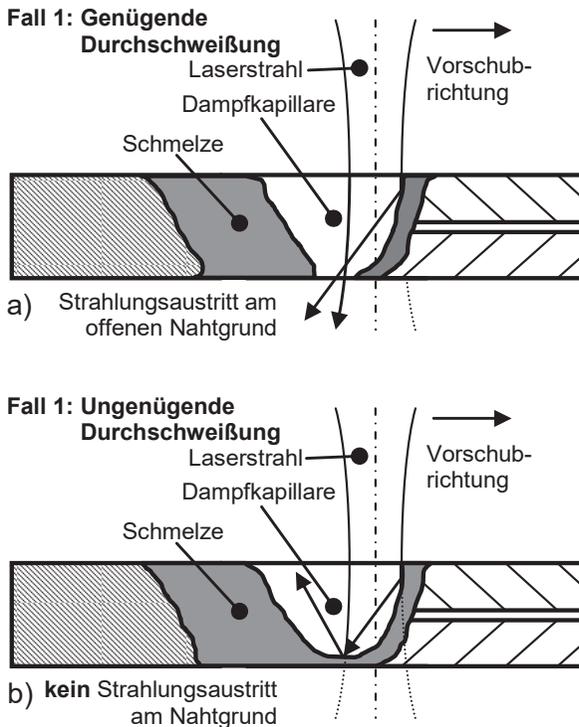


Bild 4.11: Fall 1: Schematische Darstellung für a) eine genügende und b) eine ungenügende Durchschweißung [11], [68], [71].

Mit einer Kamera in der Draufsicht des Schweißprozesses sind die drei Zustände aus Bild 4.11b, Bild 4.12a und Bild 4.12b nicht unterscheidbar, da in allen drei Zuständen eine Kapillare mit geschlossenem Grund zu sehen ist. Als aussichtreicher Kandidat für eine kamerabasierte Prozessüberwachung bleibt folglich lediglich die Durchschweißung gemäß Fall 1.

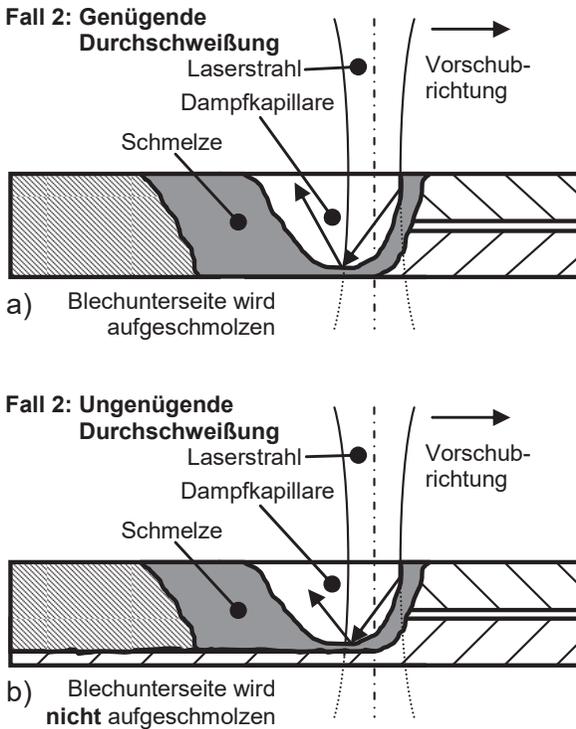


Bild 4.12: Fall 2: Schematische Darstellung für a) eine genügende und b) eine ungenügende Durchschweißung [11], [68], [71].

Entstehungsmechanismus

Während des Laserstrahl-tiefschweißens bildet sich, aufgrund der hohen Energiedichte des Bearbeitungslaserstrahls, im aufgeschmolzenen Werkstoff eine Dampfkapillare aus, die durch den Dampfdruck offen gehalten wird. Naturgemäß ist dieser gasförmige Zylinder in einer sich bewegenden Flüssigkeit ein instabiles Gebilde, welches Fluktuationen unterworfen ist. Der Entstehungsmechanismus der ungenügenden Durchschweißung nach Fall 1, besteht in einem Verschließen des Kapillargrunds. Ursächlich hierfür ist in den meisten Fällen eine zu geringe Streckenenergie durch falsche Prozessparameter, Extinktion der Laserleistung im Schweißrauch oder Plasma, oder Fluktuationen der Laserleistung. Außerdem kann aufgrund von Defokussierung auch das Verhältnis P_L / d_f zu gering sein.

Die Entstehungszeit für den Vorgang eines sich verschließenden Kapillargrunds reicht von annähernd instantan bis zu der benötigten Zeitspanne für einen kompletten Kapillarkollaps im Bereich von etwa $0,5\text{ ms}$ bis 2 ms [11].

Zur Charakterisierung einer Schweißnaht hinsichtlich der Nahttiefe im Verhältnis zur Gesamtdicke des Werkstücks wird üblicherweise der Begriff des Durchschweißgrades verwendet. Es existiert jedoch keine einheitliche Definition des Begriffs. In [72] wird beispielsweise die Einschweißtiefe ins Unterblech als Kenngröße für den Durchschweißgrad verwendet, gleichzeitig wird jedoch darauf verwiesen, dass bei Überlappschweißungen meist eine vollständige Durchschweißung erwünscht ist.

Der Durchschweißgrad soll im Folgenden so definiert sein, dass er den prozentualen Überschuss an Streckenenergie beim Erzeugen der vollständigen Durchschweißung nach Fall 1 wiedergibt. In der industriellen Fertigung wird bei unregelmäßigen Schweißungen üblicherweise mit einem Überschuss der Streckenenergie von 10% gearbeitet, um einen robusten Prozess zu erzielen.

Am fertigen Bauteil wird der Durchschweißgrad üblicherweise optisch geprüft, wobei hierbei die Ausprägung der Nahtunterraupe und die Stärke der Verschmächung an der Nahtunterseite begutachtet werden. Ist lediglich eine Nahtunterraupe ohne Schmächspuren zu sehen, liegt der Durchschweißgrad gleich oder unterhalb von 100% , was einer Durchschweißung nach Fall 2 entspricht. Werden an der Werkstückunterseite Spuren von Spritzern und Schmäch sichtbar, kann davon ausgegangen werden, dass die Dampfkapillare nach unten geöffnet ist und eine Durchschweißung nach Fall 1 vorliegt. Mit weiter steigender Streckenenergie nehmen diese Verschmutzungen der Nahtunterseite weiter zu.

Detektionsmöglichkeit

Im Falle einer kompletten Durchschweißung, mit nach unten geöffneter Kapillare, bildet sich hinter dem Auftreffpunkt des Laserstrahls, dem TCP (Tool Center Point), ein Bereich aus, an dem sich kein schmelzflüssiges Material mehr befindet. Dieser Bereich ist im Kamerabild als dunkler Fleck zu erkennen und wird auch als Durchschweißloch bezeichnet. Bild 4.13 zeigt mehrere Beispiele für Durchschweißlöcher bei unterschiedlichen Prozessparametern.

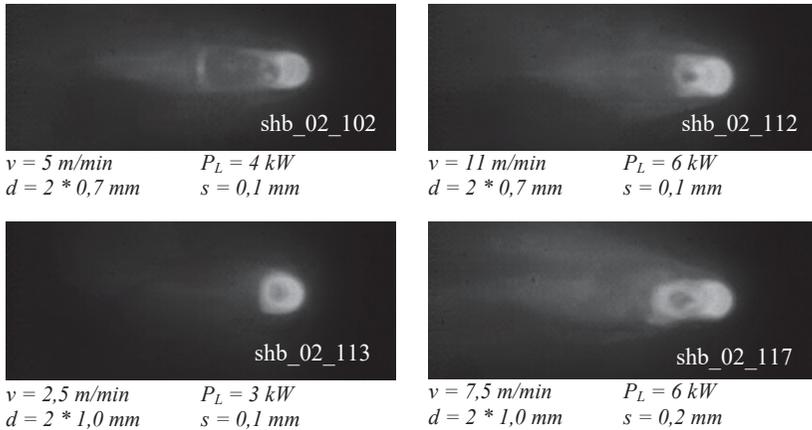


Bild 4.13: Beispiele für Durchschweißungen bei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten [11].

Aufgrund von Fluktuationen der Kapillare kann es vorkommen, dass der dunkle Bereich nicht in allen aufgezeichneten Bildern zu erkennen ist. Je nach Prozessparametern, wie beispielsweise Materialstärke oder Vorschubgeschwindigkeit kann ein Schwellwert festgelegt werden, der einen bestimmten Prozentsatz an erkannten Durchschweißlöchern definiert, bei dessen Unterschreiten keine sichere Durchschweißung mehr vorliegt.

Merkmalsextraktion

Der Softwarealgorithmus muss einen Dunkelbereich (Durchschweißloch beziehungsweise Full-Penetration-Hole FPH) innerhalb eines hellen Bereichs extrahieren. Die Erkennung des Durchschweißlochs wurde mittels einer Kantendetektion realisiert. Hierzu ist es zielführend, den Suchbereich auf den Bereich hinter der Kapillare einzugrenzen, da ansonsten im gesamten Bild sehr viele von Kanten begrenzte Objekte gefunden werden. Wird im Kamerabild ein Koordinatensystem definiert, das seinen Ursprung im Zentrum des Brennflecks hat (Laser-TCP), so sollte der Mittelpunkt des Dunkelbereichs in seiner x-Koordinate kleiner 0 und in seiner y-Koordinate $0 \pm d_{Strahl} / 2$ sein. Für die x-Koordinate kann alternativ auch die Vorderkante des Dunkelbereichs herangezogen werden, die dann gemäß Bild 4.14 im Bereich $x_{max_FPH} \leq d_{Strahl} / 2$ liegen muss.

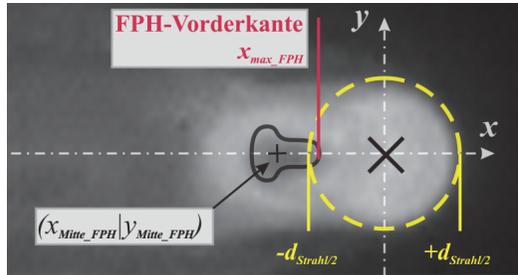


Bild 4.14: Erkennung der Durchschweißung anhand des dunklen Bereichs (schwarze Markierung) innerhalb oder hinter dem Laserfokus (gelbe Markierung).

4.3.2 Durchschussloch

Ein Durchschussloch, gemäß der Definition in [11], ist gekennzeichnet durch das Fehlen von Material in der Schweißnaht, das zu einem durchgängigen Loch in der Naht, von der Oberraupe bis hinunter zur Unterraupen, reicht. Der geometrische Sachverhalt ist in Bild 4.15 als Längsschnitt durch eine Schweißnaht schematisch dargestellt.

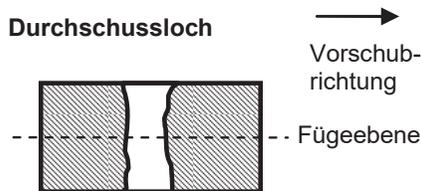


Bild 4.15: Schematische Darstellung eines Durchschusslochs [11], [68], [71].

Entstehungsmechanismus

Durchschusslöcher entstehen typischerweise durch einen abrupten oder kontinuierlichen Schmelzeverlust, welcher dazu führt, dass nicht mehr genügend Material zur Verfügung steht, um den Nahtquerschnitt zu füllen [11]. Die Bildfolge der Hochgeschwindigkeitsaufnahme in Bild 4.16 verdeutlicht die Entstehung des Durchschusslochs aufgrund eines kontinuierlichen Schmelzeverlusts.

Ein kontinuierlicher Schmelzeverlust tritt im Allgemeinen durch einen zu großen Fügepalt auf, der auf Dauer, durch das fortschreitende Materialdefizit, zu einem Schmelzeababriss im gesamten Nahtquerschnitt führt. Dies äußert sich dadurch, dass sich die Hinterkante der Dampfkapillare immer weiter zurückzieht, wie es auch bei

einem Nahtefall geschieht. Entfernt sich die Hinterkante der Dampfkapillare zu weit vom Laserstrahl, kühlt sie unter die Schmelztemperatur ab und erstarrt. Es bildet sich in gewissem Abstand dazu, durch neu aufgeschmolzenes Material, ein neues Schmelzbad und ein durchgängiges Loch bleibt zurück. Für den Fall des kontinuierlichen Schmelzeverlusts wird die Fehlerentstehungszeit mit bis zu 100 ms angenommen. Die Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahme aus Bild 4.16 ergibt beispielsweise eine Entstehungszeit von etwa 66 ms [11].

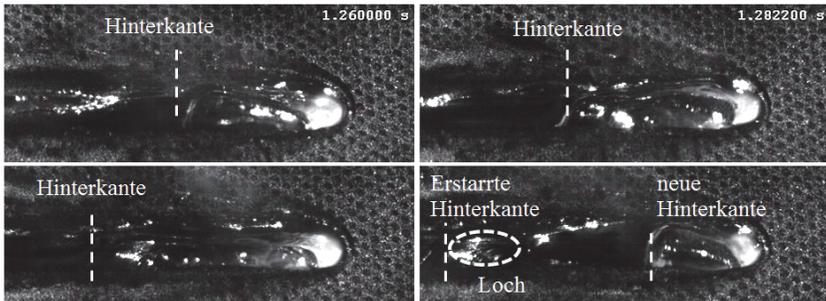


Bild 4.16: Entstehung eines Durchschusslochs durch Zurückziehen der Schmelzfront beziehungsweise der Kapillar-Hinterkante, Erstarren und Nachfließen von Schmelze, Entstehungszeit etwa 66 ms (Versuch PG_10_0180_HS) [11].

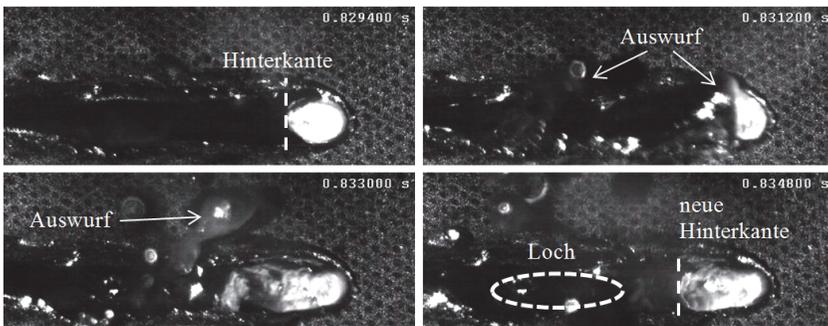


Bild 4.17: Entstehung eines Auswurfs und Zurückbleiben eines Durchschusslochs, Entstehungszeit $5,4\text{ ms}$ (Versuch PG_10_0185_HS) [11].

Die Bildfolge der Hochgeschwindigkeitsaufnahme in Bild 4.17 hingegen zeigt, dass Durchschusslöcher auch aufgrund eines abrupten Schmelzeverlusts infolge eines schlagartigen lokalen Schmelzbedauswurfs entstehen können. Im Falle eines Auswurfs kündigt sich die Fehlerentstehung eines Durchschussloches nicht unmittelbar an. Die direkte Entstehungszeit ist im Beispiel aus Bild 4.17 mit $5,4\text{ ms}$ sehr klein. In die-

sem Fall unterliegt die Hinterkante der Dampfkapillaren keinem signifikanten Bewegungsmuster, jedoch kann indirekt über die Detektion des Auswurfs auf einen Schweißfehler geschlossen werden.

Detektionsmöglichkeit

Eine endgültige Detektion von Durchschusslöchern kann streng genommen nur im Post-Prozess durchgeführt werden, da Auswürfe solange noch auftreten können, wie der Werkstoff flüssig und noch nicht erstarrt ist. Allgemeine Möglichkeiten zur Detektion im Post-Prozess sind die Vermessung der dreidimensionalen Geometrie [73], [74] oder die Nutzung der unterschiedlichen optischen Eigenschaften der Löcher [75].

Eine In-Prozess-Detektion während des Bearbeitungsvorgangs kann jedoch über eine entsprechende Auswertung von Kamerabildern ebenfalls erfolgen. Da im Bild der koaxial zum Laserstrahl angeordneten CMOS-Kamera die Hinterkante des Keyholes erkennbar ist, kann durch eine kontinuierliche Überwachung der x-Koordinate der Hinterkante der Dampfkapillare auf die Entstehung eines Durchschussloches geschlossen werden. Wie weiter oben beschrieben, entfernt sich die Hinterkante im Falle der Lochentstehung kontinuierlich vom Laser-TCP. Kommt es dann zur eigentlichen Entstehung des Lochs, bildet sich eine neue Hinterkante in geringerem Abstand zum Laser-TCP [11].

Für den Fall eines abrupten Schmelzeverlusts durch einen Schmelzebadauswurf, ist die Positionüberwachung der Kapillar-Hinterkante alleine nicht hinreichend aussagekräftig. Es kann in diesem Fall lediglich eine kurze Fluktuation des Hinterkantensignals beobachtet werden. Jedoch kann indirekt, über die Erkennung von Spritzern und Auswürfen, (siehe hierzu Abschnitt 4.3.3) auf einen Schweißfehler geschlossen werden.

Merkmalsextraktion

Die Entstehung des Durchschusslochs kann, im Fall einer sich zurückziehenden Hinterkante und anschließender Neubildung des Schmelzebads, direkt beobachtet werden. Die zeitliche Veränderung der Position der Kapillar-Hinterkante spiegelt dann exakt den Entstehungsprozess des Durchschusslochs wieder.

Bei einem stabilen Prozess pendelt die Position der Kapillar-Hinterkante mit geringer Amplitude um einen quasi-konstanten Wert $x_{\text{Hinterkante}}$. Die Entstehung eines Durchschusslochs kündigt sich im Falle des kontinuierlichen Schmelzeverlusts durch eine zunehmende Verschiebung der Hinterkanten-Position weg vom Laser-TCP an. Erreicht die Hinterkanten-Position einen kritischen Wert, erstarrt die abkühlende Hinter-

kante und das Schmelzebad bildet sich neu. Die detektierte Position der Kapillar-Hinterkante verlagert sich sprunghaft wieder in Richtung des Laser-TCP. Bild 4.18 links verdeutlicht grafisch den zeitlichen Verlauf der Hinterkanten-Position $x_{\text{Hinterkante}}$ bei der Entstehung eines Durchschusslochs. Die eigentliche Lochentstehung findet im Bereich zwischen den beiden gestrichelten Linien statt, in welchem ein hoher positiver Gradient der Hinterkanten-Position $dx_{\text{Hinterkante}} / dt$ vorliegt [11].

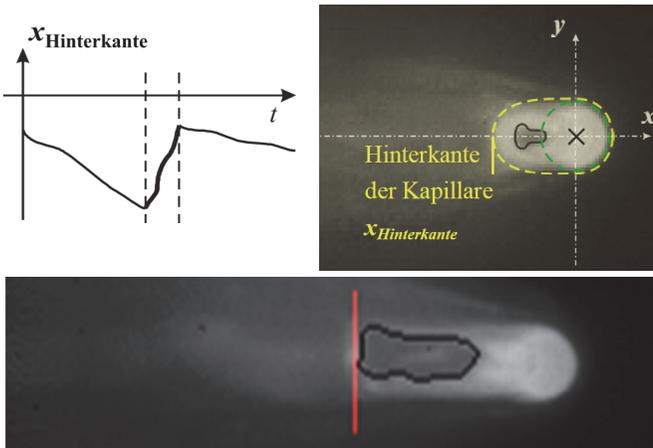


Bild 4.18: Links oben: zeitlicher Verlauf der Hinterkanten-Position bei der Lochentstehung. Rechts oben: Schematische Darstellung der Prozesszone mit Koordinatensystem im Laser-TCP und der Position der Kapillar-Hinterkante. Unten: Kamerabild nach der Bildauswertung mit erkanntem Durchschweißloch (schwarz) und Position der Kapillar-Hinterkante (rot) [11].

4.3.3 Spritzer und Schmelzeauswürfe

Spritzer und Schmelzeauswürfe werden spätestens dann als Schweißfehler gewertet, wenn sich ausgetragenes Schmelzevolumen qualitätsmindernd auf Funktionsflächen wie zum Beispiel Optiken, Spannmittel oder dem Werkstück ablagert oder das ausgeworfene Schmelzevolumen so groß ist, dass örtlich von einer Schwächung des Nahtquerschnitts auszugehen ist [11].

Entstehungsmechanismus

Die Ursache für Spritzer ist in jedem Fall eine Krafteinwirkung auf das Schmelzevolumen, welche hinreichend groß sein muss, um die Kohäsionskraft innerhalb der

Schmelze zu überwinden. Als Ursache hierfür gelten Instabilitäten in der Kapillarumströmung, die Verdampfung von Zink oder von organischen Verschmutzungen der Fügepartner und die Reibung des abströmenden Metaldampfes aus der Kapillare [76]. Die Entstehung von Spritzern und Auswürfen kündigt sich in den meisten Fällen nicht auf längeren Zeitskalen an, sondern geschieht spontan. Die Entstehungszeit eines solchen Fehlers reicht, bei kleinen Spritzern, von wenigen Zehntel bis hin zu mehreren Millisekunden bei größeren Auswürfen [11].

Detektionsmöglichkeit

Aufgrund ihrer hohen Temperatur sind Spritzer und Schmelzeauswürfe auf, im infraroten Spektrum aufgenommenen, Kamerabildern gut sichtbar und können durch eine entsprechende Bildverarbeitung von der dunkleren Umgebung diskriminiert werden. Alternativ kann auch mit einer Zusatzbeleuchtung gearbeitet werden, jedoch erhöht dies den technischen Aufwand für das Detektionssystem ohne wesentliche Verbesserungen in der Detektierbarkeit zu bringen.

Merkmalsextraktion

Zur Detektion von Spritzern im Kamerabild müssen in der dunklen Umgebung des Schweißprozesses helle, sich bewegende Objekte erkannt werden. In Bild 4.19 ist die Situation im Kamerabild grafisch dargestellt.

Da der Schweißprozess selbst eine sehr große Helligkeit aufweist, ist es nicht möglich Spritzer zu erkennen, die sich genau über diesem hellen Bereich befinden. Um Fehlerkennungen ausschließen zu können, ist es notwendig den hellen Bereich des Schweißprozesses aus der Bildanalyse auszublenden. Dies kann durch einen fest definierten Suchbereich erfolgen, wie er exemplarisch in Bild 4.19 links eingezeichnet ist.

Für eine weitere Verbesserung der Erkennungsleistung wurde in diesem Experiment zusätzlich eine adaptive Hintergrundkorrektur verwendet um das Streulicht des Schweißprozesses noch weiter zu unterdrücken. Diese adaptive Hintergrundkorrektur ermittelt die durchschnittliche Helligkeitsverteilung des Schweißprozesses im Kamerabild. Diese durchschnittliche Helligkeitsverteilung wird anschließend vom zu untersuchenden Bild subtrahiert. Bis auf die sehr helle Dampfkapillare wird durch diese Operation nahezu das gesamte Störlight in der Umgebung des Schweißprozesses eliminiert. Eine ausführlichere Beschreibung des Algorithmus ist in [71] zu finden.

Für die eigentliche Spritzererkennung wird auf eine BLOB²²-Analyse zurückgegriffen, die das in Bild 4.19 skizzierte Suchfeld nach hellen zusammenhängenden Pixel-Bereichen, sogenannten BLOBs durchsucht, die sich durch das Suchfeld bewegen. Die BLOB-Analyse liefert für das analysierte Bild eine Liste mit gefundenen Objekten und deren Eigenschaften wie Position, Größe und Helligkeit. Bild 4.19 rechts zeigt das Ergebnis der BLOB-Analyse mit den gefundenen Spritzern im Kamerabild.

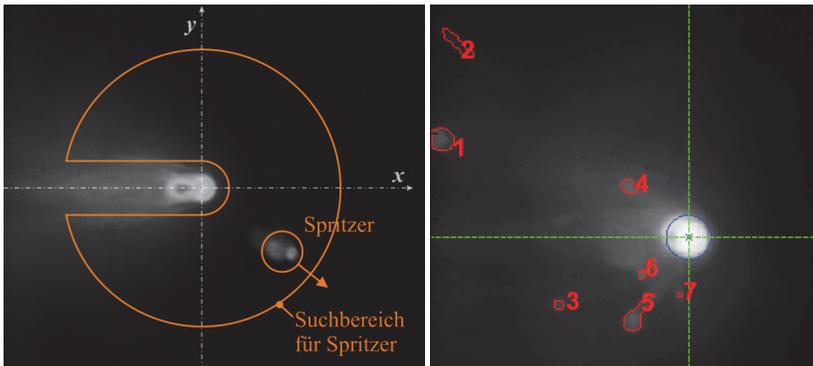


Bild 4.19: Spritzererkennung anhand heller Objekte, die sich durch den Suchbereich bewegen [11], [71].

4.3.4 Ungenügende Nahtbreite an der Oberfläche

Da bei I-Naht-Überlappstößen der Anbindequerschnitt in der Fügezone optisch nicht direkt beurteilt werden kann, ist die Nahtbreite an der Oberfläche ein wichtiges Kriterium für die Sichtkontrolle derartiger Schweißverbindungen. Unterschreitet die Breite der sichtbaren Nahtberraupe ein kritisches Maß, ist davon auszugehen, dass auch der Anbindequerschnitt in der Fügeebene nicht den Anforderungen genügt. Des Weiteren kann eine zu geringe Breite an der Oberfläche auch mit einem Nahteinfall einhergehen. Dieser wiederum führt durch den Verlust an tragendem Querschnitt und Kerbwirkung zu einer Verminderung der Nahtfestigkeit.

Entstehungsmechanismus

Eine ungenügende Schweißnahtbreite entsteht durch eine zu geringe Ausbreitung des Schmelzbadens an der Werkstückoberfläche. Dies kann verschiedene Ursachen haben,

²² Die Abkürzung BLOB steht für *Binary Large Object*.

wie beispielsweise eine zu geringe Streckenenergie oder eine falsche Parameterwahl zur Erreichung der Streckenenergie. Möglich sind auch eine zu große Wärmeabfuhr durch die Einspannung oder die Lage von Flanschen.

Detektionsmöglichkeit

Die tatsächliche Breite der Nahtberraupe kann im Nachlauf des Schweißprozesses [73] oder offline durch eine optische Vermessung der Naht erfolgen [74], [75]. Für eine In-Prozess-Vermessung kommt die Beobachtung der Bearbeitungszone im sichtbaren Wellenlängenbereich mit externer Beleuchtung oder die Beobachtung des Eigenleuchtens der Schmelze im Infrarotbereich in Frage. Ziel ist es, die Begrenzungslinie zwischen Schmelzebad und dem sie umgebenden Festkörper zu erfassen [11].

Merkmalsextraktion

Die Bestimmung der Nahtbreite aus dem Infrarot-Bild der In-Prozess-Kamera erfolgt über die Auswertung der Helligkeitsverteilung hinter dem Laser-TCP quer zur Vorschubrichtung.

Je nach beobachtetem Prozess ist die Erkennung der tatsächlichen Breite nicht unproblematisch. Die Helligkeit des Schmelzebades ist nicht besonders hoch, verglichen mit der Helligkeit des Störlichts, welches sowohl durch verdampfendes Zink an der Werkstückoberfläche hervorgerufen werden kann, als auch durch das Störlicht des Metaldampfes aus der Schweißkapillare. Diese Problematik tritt besonders dann auf, wenn die Schweißnaht gleichmäßig und ohne Randkerben an der Werkstückoberfläche liegt.

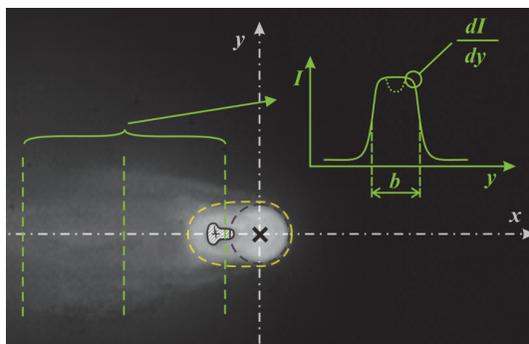


Bild 4.20: Schemadarstellung der Erkennung der Schweißnahtbreite mittels Auswertung des Helligkeitsverlaufs quer zur Vorschubrichtung [11], [71].

In Bild 4.20 ist schematisch dargestellt, wie zur Bestimmung der Nahtbreite kurz hinter dem Laser-TCP der Intensitätsverlauf quer zur Vorschubrichtung ausgewertet wurde. Entscheidend für die Bestimmung der Nahtbreite ist weniger die absolute Helligkeit des Schmelzbad, als vielmehr der Gradient der Helligkeitsverteilung quer zur Vorschubrichtung. Über die jeweilige Lage der Ableitungsmaxima der Helligkeit nach dem Ort dI/dy beziehungsweise der Nullstellen der zweiten Ableitung d^2I/dy^2 kann die Breite b der Nahtberraupe abgeschätzt werden.

Die aus dem Kamerabild ermittelte Helligkeitsverteilung muss vor der Differentialbildung geglättet werden, was beispielsweise durch einen gleitenden Mittelwert oder einen Medianfilter bewerkstelligt werden kann. Für eine Plausibilitätsprüfung kann der zulässige Suchbereich der Erstarrungslinie eingeschränkt werden, beispielsweise auf einen Bereich von $y = \pm d_{\text{Strahl}}$. Ist im Bild ein Durchschweißloch vorhanden, muss anhand des Vorzeichens der ersten Ableitung die korrekte Flanke für die Ermittlung der Nahtbreite bestimmt werden. Für eine robustere Bestimmung der Schweißnahtbreite können in der hier entwickelten Software bis zu drei Schnittlinien für die Berechnung herangezogen werden.

4.4 Test der Prozessüberwachung

In den nachfolgenden Abschnitten wird auf die Tests der Bildverarbeitungsalgorithmen eingegangen. Im Fokus stehen dabei sowohl die reine Erkennungssicherheit der Bildmerkmale als auch der direkte Vergleich mit den entsprechenden Nahtfehlern.

4.4.1 Ungenügende Durchschweißung

Die Erkennung der Durchschweißung beziehungsweise des Durchschweißgrades einer Schweißung wurde anhand des Bildmerkmals Fläche des Durchschweißloches getestet.

Der Grad der zu erkennenden Durchschweißung spiegelt sich letztlich in einem Wahrscheinlichkeitswert wieder, in einem Einzelbild einer Sequenz ein Durchschweißloch zu detektieren. Je geringer die Streckenenergie, desto weniger Durchschweißlöcher werden in einer Bildsequenz zu finden sein. Bild 4.21 zeigt drei unterschiedliche Durchschweißgrade, von sicherer Durchschweißung über den Grenzfall zwischen Durchschweißung und Einschweißung, und eine reine Einschweißung. Die Laserleistung betrug in allen Fällen 4 kW , das Spaltmaß $0,5 \text{ mm}$ und die Stärke der Versuchs-

bleche $2 * 1,5 \text{ mm}$. Die obere Bildreihe zeigt die Seitenansichten des Prozesses, die untere Bildreihe die Draufsichten der koaxialen Prozessüberwachungskamera. Deutlich erkennbar ist das Austreten von Metaldampf und Spritzern an der Kapillarunterseite im Falle der sicheren Durchschweißung, während es im Grenzfall nur zu einem zweitweisen Austritt von geringen Materialmengen an der Unterseite kommt. Im Falle der Einschweißung ist nur die Metaldampffackel auf der Oberseite zu sehen [68].

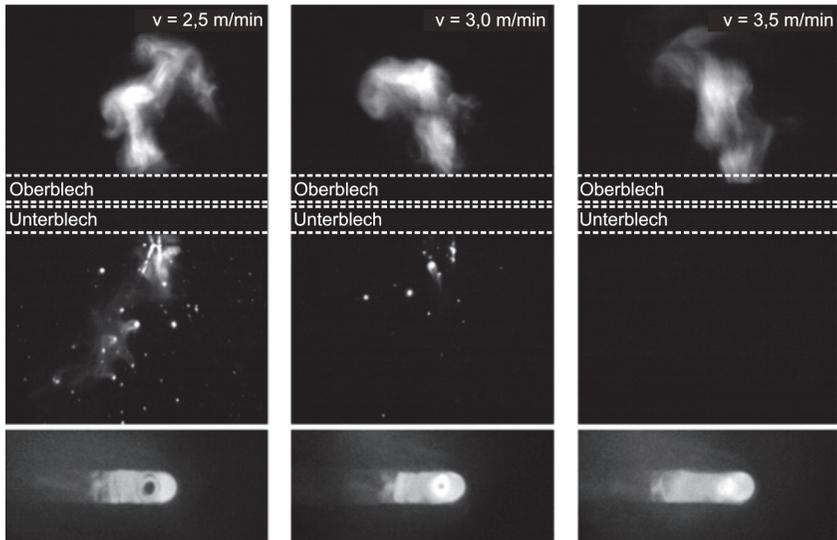


Bild 4.21: Von links nach rechts: *Durchschweißung, Grenzfall, Einschweißung*. Die obere Bildreihe ist die Seitenansicht des Prozesses, die untere Bildreihe die Draufsicht der Prozessüberwachungskamera [68].

Es werden im Folgenden beispielhaft zwei Proben herausgegriffen die sich im Durchschweißgrad unterscheiden. Der Grad der Durchschweißung lässt sich anhand der Verschmauchung auf der Blechunterseite abschätzen. Dies erlaubt mit gewissen Einschränkungen eine visuelle Beurteilung der geschweißten Probe.

Bild 4.22 zeigt eine Probe mit sicherer Durchschweißung (fix_02_106), was an der starken Verschmauchung der Blechunterseite zu erkennen ist. Dargestellt sind die Fläche des Durchschweißblochs und dessen gleitender Mittelwert in relativen Einheiten über der Zeit in *ms*. Es ist in Bild 4.22 gut zu erkennen, dass die Fläche des Durchschweißblochs im Diagramm mit der Stärke der Verschmauchung an der Werkstückunterseite und damit mit dem Grad der Durchschweißung, gemäß der Definition in Abschnitt 4.3.1, im Nahtverlauf ansteigt [11], [71].

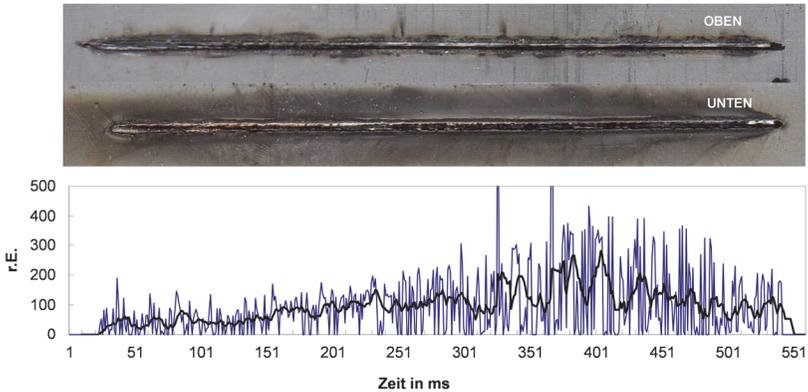


Bild 4.22: Probe fix_02_106 (2 * 0,7 mm ZStE340, bei 5 kW und 9 m/min) mit sicherer Durchschweißung. Fläche des Durchschweißblochs FPH und dessen gleitender Mittelwert in r.E. über der Zeit in ms [71].

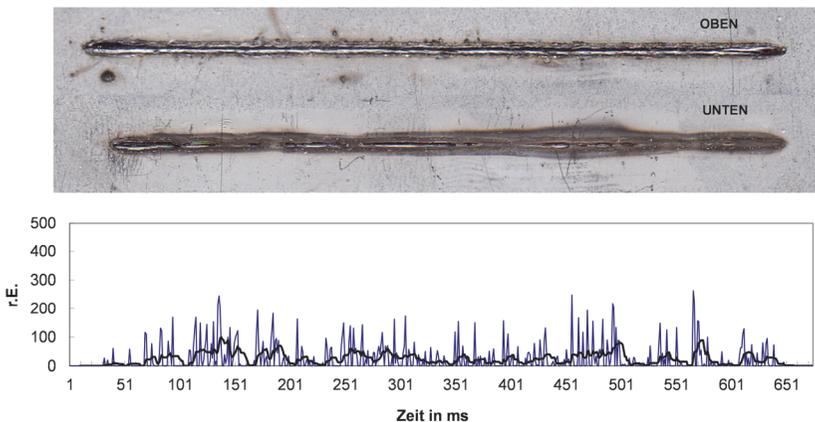


Bild 4.23: Probe fix_02_116 (2 * 1 mm ZStE340, bei 6 kW und 7,5 m/min) mit nur sporadischer Durchschweißung. Die Fläche des Durchschweißblochs FPH und dessen gleitender Mittelwert ist in r.E. über der Zeit in ms aufgetragen [71].

Die Probe in Bild 4.23 (fix_02_116) ist nur sporadisch durchgeschweißt, dies lässt sich eindeutig an der Fläche des detektierten Durchschweißbloches erkennen. Das bedeutet, dass die Dampfkapillare nur sporadisch an der Werkstückunterseite geöffnet war. An einigen Stellen wurde nicht einmal das Unterblech aufgeschmolzen. Entsprechend zeigt sich im zugehörigen Diagramm, dass das Durchschweißloch nur selten zu sehen

ist und seine durchschnittliche Fläche klein ist [11], [71]. Außerdem ist die Nahtunterseite weitgehend frei von Spritzern und Schmauchrückständen.

Die Erkennungsleistung für das Durchschweißloch ist gemäß Untersuchungen in [68] als gut bis befriedigend einzustufen. Insbesondere, da es zur Bewertung der Qualität der Durschweißung mehr auf eine Bewertung von Häufigkeit und Größe des erkannten Durchschweißloches ankommt, als auf die sichere Erkennung in jedem einzelnen Bild. Es zeigte sich bei den Versuchen in [68] jedoch auch, dass die Erkennungsleistung stark von der korrekten Parametrierung des Algorithmus abhängig ist und in den meisten Fällen zu „false positive“ Erkennungen neigt, siehe hierzu Bild 4.24. Grundsätzlich versagt die Konturerkennung auch, wenn keine geschlossene dunkle Fläche gefunden werden kann, wie beispielsweise in Bild 4.24 rechts. Aus diesem Grund ist in Tabelle 4.3 für die Erkennungsleistung ein Abzug von einer Note vermerkt, um diesem Umstand Rechnung zu tragen.



Bild 4.24: Links: Fehlerkennung des gesamten Kapillarbereichs als Durchschweißloch. Mitte: Fehlerkennung im Schmelzebad [68]. Rechts: Kein FPH erkannt, da keine geschlossene Kontur gefunden werden konnte.

Vergleicht man die Diagramme in Bild 4.22 und Bild 4.23 lässt sich erkennen, dass in beiden Fällen die gemessene Fläche des Durchschweißloches (blaue Kurven) zwischen Null und einem Maximalwert hin und her springt. Dieses quasi-binäre Verhalten und der sich daraus ergebende extrem schwankende Kurvenverlauf kann nicht direkt als Maß für den Durchschweißgrad verwendet werden. Besonders in Bild 4.22 ist gut zu erkennen, dass selbst bei hohem Durschweißgrad das Durchschweißloch sehr oft gänzlich geschlossen ist. Durch die Anwendung eines gleitenden Mittelwerts (schwarze Kurven) kann der quasi-binäre Messwertverlauf in eine proportionale Messgröße überführt werden, die den Grad der Durchschweißung näherungsweise widerspiegelt. In Kapitel 5 wird der gleitende Mittelwert, zur robusteren und lochflächenunabhängigen Kenngröße der Auftrittshäufigkeit von Durschweißlöchern weiterentwickelt.

4.4.2 Durchschussloch

Die Entstehung von Durchschusslöchern während eines Schweißprozesses lässt sich anhand des zeitlichen Verlaufes der Position der Kapillar-Hinterkante erkennen. Aus den durchgeführten Versuchen sind nachfolgend drei Stück herausgegriffen, um den Zusammenhang zwischen dem Bildmerkmal und dem Auftreten des Fehlers zu verdeutlichen.

Das Beispiel in Bild 4.25 zeigt eine Schweißung mit einem zu großen Spalt zwischen den Fügepartnern und zu hoher Vorschubgeschwindigkeit. Das dadurch entstehende Schmelzbaddefizit führt zu zyklisch auftretenden Durchschusslöchern. Im Diagramm aufgetragen ist die Position der Kapillar-Hinterkante im Verhältnis zum Laser-TCP, in relativen Einheiten (Pixeln). Wie im Diagramm zu sehen ist, verschiebt sich die Hinterkante der Dampfkapillare stetig weiter entgegen der Vorschubrichtung, weg vom Laser-TCP. Ab einer gewissen Grenzdistanz von etwa 100 px kommt es zur Entstehung eines Durchschusslochs und die Kapillar-Hinterkante springt zurück auf einen kleineren Abstand von etwa 20 px bis 40 px . Nahezu zu jedem Schmelzbadabbriss, der im Diagramm als steigende Flanke (19 Stück) zu sehen ist, existiert ein Durchschussloch in der Schweißnaht (18 Stück).

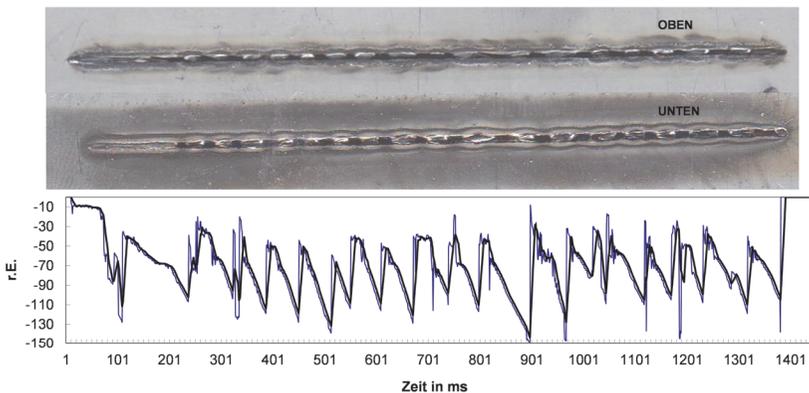


Bild 4.25: Erkennung zyklisch auftretender Durchschusslöcher an einer Schweißprobe (shb_02_100b) mit zu großem Spaltmaß und zu hoher Vorschubgeschwindigkeit. Das Diagramm zeigt die X-Position der Kapillar-Hinterkante in *r.E.* über der Zeit in *ms* und deren gleitenden Durchschnitt [11].

Bei der Schweißprobe in Bild 4.26 treten auf der gesamten Strecke nur drei Durchschusslöcher auf, die jedoch prinzipiell dieselbe Ursache haben. Auch hier ist im zu-

gehörigen Diagramm zu sehen, dass die Hinterkante des Keyholes stetig weiter nach hinten wandert, um dann beim Überschreiten einer gewissen Grenzlänge von etwa 100 px die Bildung einer neuen Kapillar-Hinterkante zu verursachen, die sich in einer sprunghaften Verlagerung der Kapillar-Hinterkante hin zum Laser-TCP äußert.

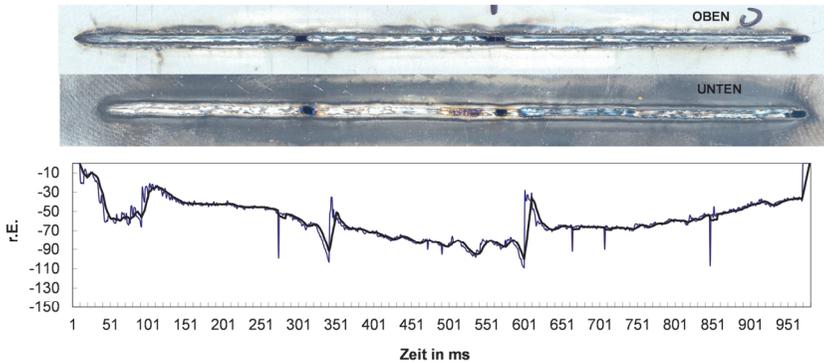


Bild 4.26: Probe shb_02_152. X-Position der Kapillar-Hinterkante in *r.E.* über der Zeit in *ms* und deren gleitender Durchschnitt [11], [71].

Als Vergleich sei hier in Bild 4.27 noch ein Versuch gezeigt, bei dem keine Durchschusslöcher auftreten. Im zugehörigen Diagramm zeigt sich dies durch einen konstanten und niedrigen Wert der x-Position der Kapillar-Hinterkante. Es tritt jedoch an einer Stelle im Nahtverlauf eine Fehldetektion auf, bei der die Erkennung der Kapillar-Hinterkante einem Schmelzebadauswurf folgt, welcher in Bild 4.28 als heller Fleck in der linken oberen Ecke des Bildes zu sehen ist. Der Algorithmus erkennt hier fälschlicherweise den Schmelzebadauswurf (grüne Markierung) gleichzeitig als Kapillar-Hinterkante (Markierung mit rotem Strich am linken Bildrand).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die zeitliche Überwachung der Position der Kapillar-Hinterkante das Fehlerbild des Durchschussloches sehr gut erkennt, wenn dieses durch ein kontinuierliches Schmelzebaddefizit verursacht wird.

Die Entstehung von Durchschusslöchern durch einen massiven Schmelzeauswurf jedoch, wird mit dieser Methode nicht sicher erkannt. Es wird in diesem Falle durch die Spritzerüberwachung ein Fehler detektiert, der jedoch nicht als Durchschussloch gewertet wird, sondern lediglich als Schmelzeauswurf.

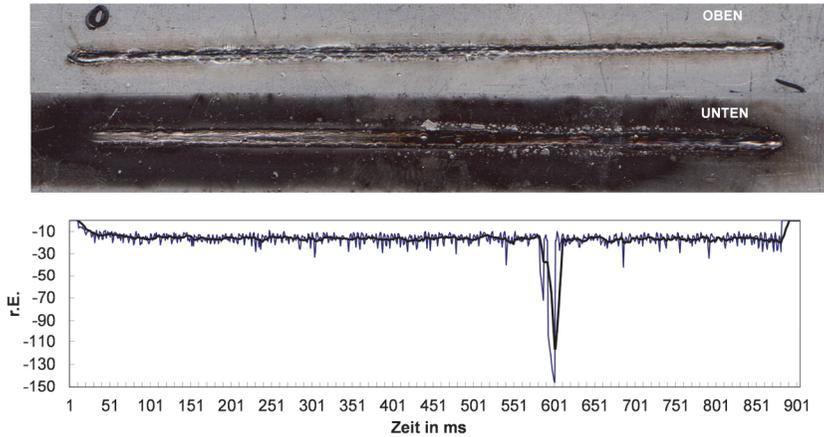


Bild 4.27: Versuch shb_02_112. X-Position der Kapillar-Hinterkante in $r.E.$ über der Zeit in ms und deren gleitender Durchschnitt [11].

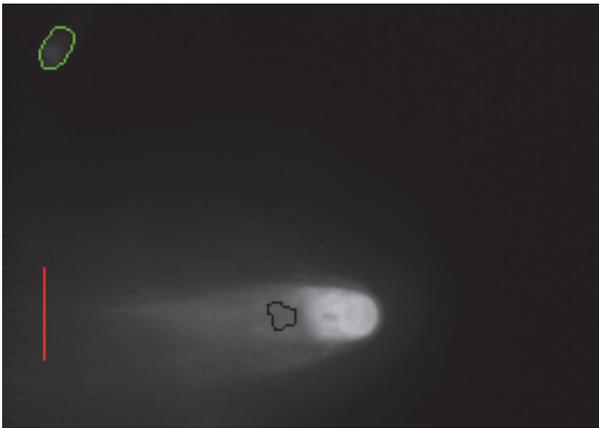


Bild 4.28: Fehlererkennung der Kapillar-Hinterkante (und des Durchschweißblochs) in Versuch shb_02_112.

4.4.3 Spritzer und Schmelzeauswürfe

Die Erkennung von Spritzern wird anhand der erkannten Anzahl von hellen Objekten und deren Größe im Kamerabild durchgeführt. Die in Bild 4.29 dargestellte Schweißung zeigt eine starke Spritzerbildung. Die Anzahl der erkannten Spritzer ist hoch und

es treten mittlere und große Spritzer auf. Die Spritzer treten vorzugsweise in Gruppen, sogenannten Auswurfereignissen auf. Zum Vergleich ist in Bild 4.30 eine praktisch spritzerfreie Schweißung dargestellt. Es sind nur in wenigen Einzelbildern Spritzer im Kamerabild erkennbar [11].

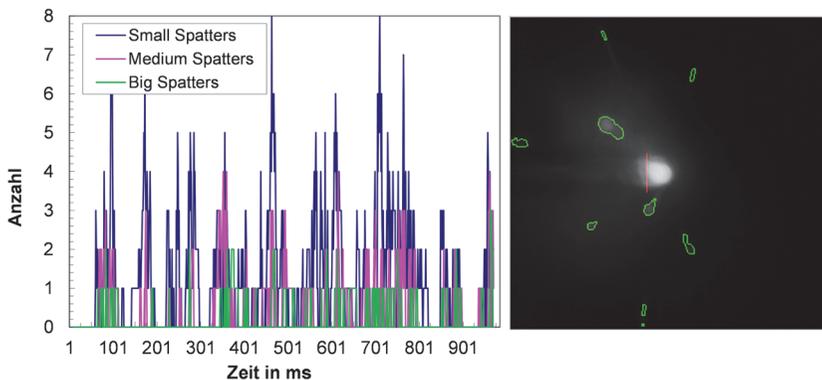


Bild 4.29: Spritzererkennung an einer stark spritzenden Schweißprobe (shb_02_120). Links: Die Spritzeranzahl über die Zeit ist im Diagramm nach Spritzergröße klassifiziert über der Zeit in *ms* aufgetragen. Rechts: Beispielbild aus der zugehörigen Bildsequenz mit eingezeichneten erkannten Spritzern und der Kapillar-Hinterkante.

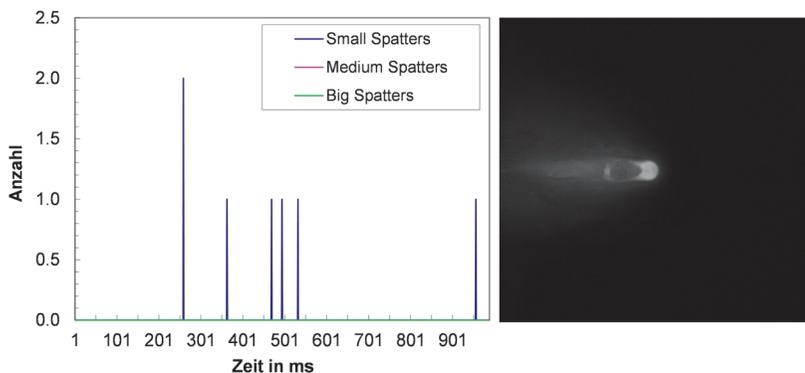


Bild 4.30: Spritzererkennung an einer quasi spritzerfreien Schweißprobe (shb_02_103). Links: Es sind nur vereinzelt Spritzer im Diagramm zu sehen. Rechts: Beispielbild aus der zugehörigen Bildsequenz.

4.4.4 Ungenügende Nahtbreite an der Oberfläche

Die Messung der Nahtbreite an der Oberfläche erfolgt indirekt über die gemessene Breite des Schmelzebades an drei Stellen hinter dem Laser-TCP. Eine Erkennung von Nahtefällen ist dabei sehr gut möglich, wie die folgenden Beispiele zeigen.

Die Schweißprobe aus Bild 4.31 weist keinen Nahtefall auf. Im Rahmen der Versuche, die für diese Arbeit durchgeführt wurden, konnte für Schweißungen ohne Nahtefall eine deutliche Fluktuation der gemessenen Breite des Schmelzebades beobachtet werden. Dies ist dadurch zu erklären, dass das Schmelzebad an der Oberfläche des Bleches fließend in den Festkörper übergeht und somit keine Kanalisierung durch den Nahtefall erfährt [71]. Des Weiteren zeigt sich, dass der Gradient der Helligkeitsverteilung in diesen Fällen sehr gering ist und somit nur schwer auf eine konkrete Breite geschlossen werden kann, siehe hierzu die Kamerabilder in Bild 4.33 Mitte und rechts.

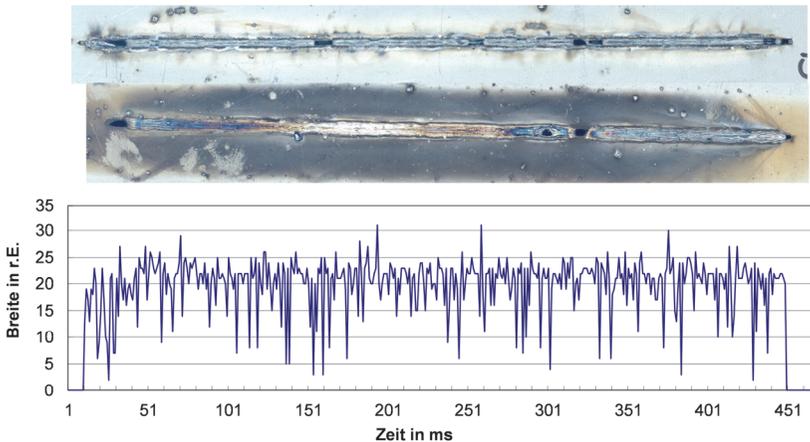


Bild 4.31: Schweißprobe ohne Nahtefall (fix_02_109). Oben: Nahtober- und Unterseite. Unten: Nahtbreite in *r.E.* über der Zeit in *ms* [71].

Die Schweißprobe in Bild 4.32 hingegen weist einen Nahtefall auf. Deutlich zu erkennen ist, im Gegensatz zum Versuch in Bild 4.31, dass die gemessene Schmelzebadbreite nach oben hin eine scharfe Begrenzung aufweist und eine deutlich niedrigere Fluktuation zeigt. Dies wird durch eine Kanalisierung des Schmelzevolumens hervorgerufen [71].

Weitergehende Untersuchungen zur Bestimmung der Nahtbreite in [68] zeigen jedoch, dass eine Messung der korrekten Nahtbreite nach dem hier verwendeten Verfahren nicht möglich ist. Insbesondere bei Prozessparametern, die zu sehr breiten Schmelzebädern führen wird die Breite nur unzureichend erkannt. Dies liegt insbesondere daran, dass unter Verwendung von siliziumbasierten CMOS-Kameras das Schmelzebad nur mit unzureichender Helligkeit abgebildet wird. In Verbindung mit dem darüber liegenden störenden Metaldampf ist die sichere automatisierte Erkennung der Schmelzebadbreite nahezu unmöglich.

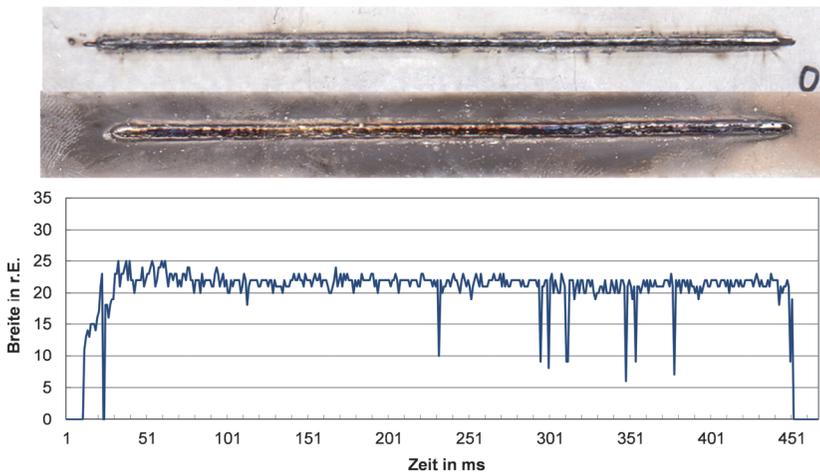


Bild 4.32: Schweißprobe mit Nahtefall (fix_02_110). Oben: Nahtober- und Unterseite. Unten: Nahtbreite in r.E. über der Zeit in ms [71].

Der Sachverhalt ist in Bild 4.33 dargelegt, wobei die Schmelzebadbreite von links nach rechts zunimmt. Die im linken Bild, durch einen Nahtefall stark kanalisierte Schmelze wird zwar sehr zuverlässig erkannt, jedoch nimmt die Messunsicherheit nach rechts mit zunehmender Schmelzebadbreite stark zu. Dies ermöglicht zwar die Erkennung eines Nahtefalles, wie oben beschrieben, jedoch kann bei großen Schmelzebadbreiten nicht auf die resultierende, konkrete Nahtbreite geschlossen werden.

Für eine bessere Erkennung der Schmelzebadbreite gibt es unterschiedliche Ansätze. So konnte beispielsweise mittels zusätzlicher Beleuchtung der Werkstückoberfläche eine erfolgreiche Erkennung der Schmelzebadgeometrie mittels des CPC-Systems durch das Fraunhofer ILT realisiert werden [77].

Ein Ansatz ohne Zuhilfenahme einer Zusatzbeleuchtung, wurde im Rahmen des Projekts WELDone verfolgt. Hier kam eine IR-kamera auf InGaAs-Basis zum Einsatz, die eine präzise Vermessung der Schmelzebadgeometrie ermöglicht [78], [79], [80].

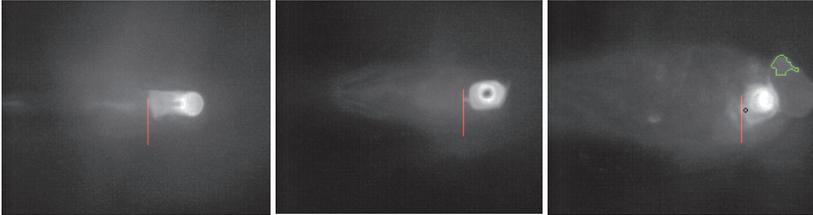


Bild 4.33: Bild der Prozesszone bei Schweißungen mit stark unterschiedlicher Schmelzebadbreite. Schmelzebadbreite von links nach rechts zunehmend [68].

4.5 Bewertung der Methode

Die beschriebene Methode zur In-Prozessüberwachung durch Auswertung des thermischen Eigenleuchtens des Schweißprozesses unter Verwendung von siliziumbasierten CMOS-Kameras ermöglicht die Realisierung von Systemen zur Prozessüberwachung beim Laserschweißen.

Die Verwendung von siliziumbasierten Kameras ermöglicht im Vergleich zu InGaAs-Kameras bei vergleichsweise niedrigen Kosten ein System mit sehr hoher örtlicher und zeitlicher Auflösung. Nachteilig wirkt sich dabei jedoch die niedrige spektrale Empfindlichkeit im nahen Infrarot aus, die eine Erkennung der Schmelzebadgeometrie erschwert. Dieser Nachteil lässt sich teilweise durch die Verwendung einer Zusatzbeleuchtung ausgleichen, was jedoch Komplexität und Kosten des Systems erhöht.

Durch die konsequente Analyse des Schweißprozesses mit bildgebenden diagnostischen Verfahren konnten die Entstehungsprozesse von Schweißfehlern detailliert beschrieben werden. Dies ermöglichte die direkte Ableitung von Bildmerkmalen zur Identifizierung von Schweißnahtfehlern. Verglichen mit bisherigen Systemen zur Prozessüberwachung mittels Einzeldetektoren [81], [82] oder Kameras [83], [84], die meist auf einer einfachen Korrelation zwischen allgemeiner Prozessgeometrie und Schweißfehlern beruhen, bietet dieser Ansatz ein wesentlich höheres Potential für eine zuverlässige Prozessüberwachung.

Die im Rahmen des Projekts entwickelten Algorithmen sind als „Proof-of-Concept“ zu sehen. Sie demonstrieren grundlegend die Ergebnisse der beschriebenen Methode

hinsichtlich der Vielseitigkeit, bieten jedoch auch noch reichlich Optimierungspotential hinsichtlich Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit.

4.5.1 Vielseitigkeit

Aus den Erkenntnissen der diagnostischen Untersuchungen von Laserschweißprozessen, der Abschnitte 2.3 und 4.2 konnte das oben beschriebene kamerabasierte Prozessüberwachungssystem entwickelt werden. Dies umfasst sowohl den optomechanischen Teil des Systems, bestehend aus Abbildungsoptik, Kamera und spektraler Filterung, als auch die Algorithmik zur Identifizierung von Bildmerkmalen und die Erkennung von Schweißnahtfehlern, aus den Bilddaten des laufenden Prozesses.

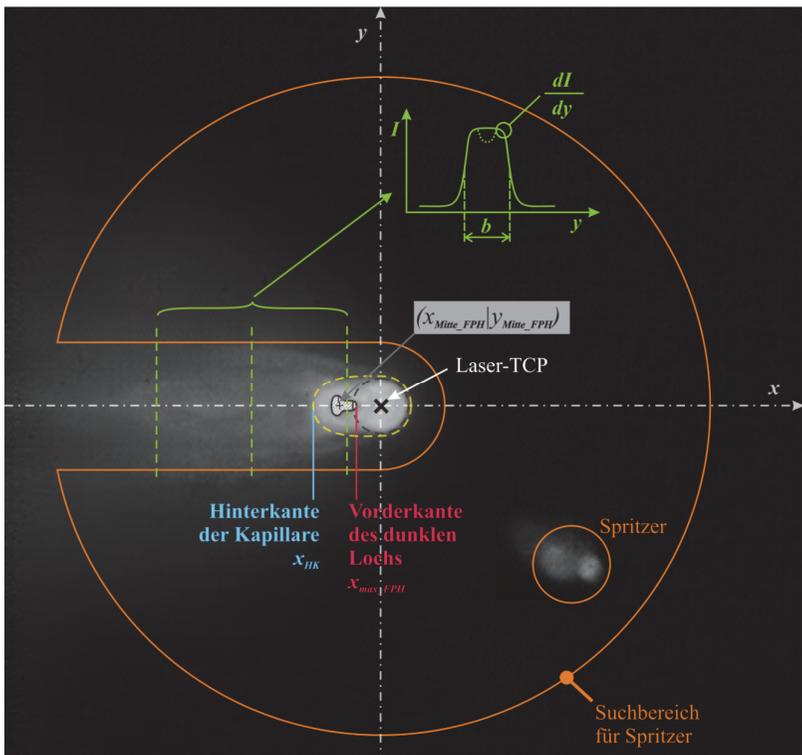


Bild 4.34: Schema der Bildmerkmale zur Erkennung von Schweißfehlern bei der In-Prozess Überwachung von Laserschweißnähten am I-Naht-Überlappstoß.

Die erarbeiteten Algorithmen zur automatischen Erkennung von Bildmerkmalen umfassen eine Vielzahl der üblichen Schweißnahtfehler, wie ungenügende Durchschweißung, Durchschußlöcher, Spritzer und ungenügende Nahtbreite. Ein Schema aller dafür notwendiger Bildmerkmale, bei der ortsauflösenden In-Prozessüberwachung von Laserschweißprozessen am I-Naht-Überlappstoß, findet sich in Bild 4.34.

4.5.2 Erkennungssicherheit

Zur Bewertung der Erkennungssicherheit sind in Tabelle 4.3 die Algorithmen zur Merkmalerkennung für verschiedene Laserleistungen, Spaltmaße und Blechdicken noch einmal abschließend zusammengefasst. Das Notenschema der Bewertungen reicht von ++ (sehr gut), über o (befriedigend) bis -- (sehr schlecht) und basiert auf einer subjektiven Beurteilung der Erkennungssicherheit anhand verschiedener Schweißversuche, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden.

Als Ankerpunkt des Koordinatensystems zur Bewertung der Bildmerkmale kommt der sicheren Erkennung des Laser-TCP besondere Bedeutung zu. In den durchgeführten Versuchen konnte die Erkennungsleistung des Algorithmus als überwiegend gut eingestuft werden. Gelegentliche Fehldetektionen können jedoch durch andere sehr helle Objekte verursacht werden

Die in Abschnitt 4.4.1 gezeigten Ergebnisse für die Erkennung des Durchschweißloches zeigen, dass das Merkmal an sich gut geeignet ist, um auf statistischer Basis den Durchschweißgrad einer Schweißung zu erkennen. Die Merkmalsextraktion auf Basis der hier verwendeten Segmentierungsalgorithmen ist jedoch, aufgrund der komplexen Situation in der Wechselwirkungszone, sehr fehleranfällig und bedarf eines hohen Konfigurationsaufwandes um eine gute Erkennungsleistung zu erzielen. Dieser Umstand ist in der Bewertung mit einem Abzug von einer Note berücksichtigt. Insgesamt ist das Durchschweißloch der aussichtsreichste Kandidat für die Umsetzung in einer Prozessregelung. Die Gründe hierfür sind zum einen die gute Erkennbarkeit im thermischen Kamerabild und zum anderen die leichte Zugänglichkeit einer geeigneten Stellgröße, nämlich der Laserleistung.

Die Erkennung der Hinterkante der Dampfkapillare ist gemäß Abschnitt 4.4.2 als sicheres Merkmal für die Detektion von Durchschußlöchern zu werten. Die sichere Erkennung der Hinterkante im Schweißprozess ist aufgrund der vielen Bilddetails in der Schmelze jedoch schwierig zu bewerkstelligen. Insbesondere kommt es vor, dass der Algorithmus fälschlicherweise einen Spritzer als Kapillar-Hinterkante erkennt und

damit falsche Ergebnisse liefert. Dies geschieht typischerweise dann, wenn die Erkennung des Laser-TCP einen falschen Wert für dessen x-Position liefert und dadurch der Suchbereich für die Hinterkante falsch gesetzt wird. Die Schwierigkeiten bei der sicheren Merkmalerkennung schlagen sich in der Bewertung mit einer Note Abzug nieder.

Eine Detektion von Spritzern und Schmelzbadauswürfen ist in den meisten Fällen sehr sicher möglich, wie in Abschnitt 4.4.3 gezeigt ist. Fehldetektionen (false positive) kommen tendenziell bei dünneren Blechen und großen Spaltmaßen vor. Bei diesen Konfigurationen ist eine sehr deutliche Verdampfungsfront der Zinkbeschichtung an den Seiten des Schmelzbedes zu beobachten, die dann zu den genannten Fehldetektionen führen. Durch eine Einschränkung des Suchbereichs können diese Fehldetektionen vermieden werden, jedoch steigt damit auch die Gefahr, tatsächliche Spritzer in diesem Bereich nicht zu entdecken.

Merkmal	Blechdicke [mm]	Leistung							
		4 kW				6 kW			
		Spaltmaß [mm]				Spaltmaß [mm]			
		0,0	0,1	0,3	0,5	0,0	0,1	0,3	0,5
Durchschweißloch ²³	1,0	+(++)	o(+)	o(+)	-(o)	--(-)	--(-)	-(o)	
	1,5	-(o)	o(+)	o(+)	-(o)	-(o)	--(-)	-(o)	-(o)
	2,0	-(o)	-(o)	-(o)	--(-)	o(+)	o(+)	o(+)	-(o)
Hinterkante ²³	1,0	o(+)	+(++)	+(++)	-(o)	o(+)	+(++)	o(+)	
	1,5	--(-)	--(-)	-(o)	+(++)	-(o)	--(-)	o(+)	-(o)
	2,0	--(-)	-(o)	o(+)	+(++)	--(-)	--(-)	-(o)	+(++)
Spritzer/ Auswürfe	1,0	+	o	-	-- ²⁴	++	+	-	
	1,5	++	+	-- ²⁴	-	++	++	+	-
	2,0	+	+	o	o	++	++	o	o
Schmelzbad- breite	Nahteinfall	+							
	Nahtbreite	-							

Tabelle 4.3: Bewertung der Algorithmen bei verschiedenen Schweißparametern.

²³ Abwertung der Ergebnisse um eine Note aufgrund der Schwierigkeit der korrekten Parametrisierung des Algorithmus. Die Werte in Klammern entsprechen der eigentlichen Bewertung der Erkennungsleistung.

²⁴ Fehldetektionen (false positive) in der Verdampfungsfront der Zinkbeschichtung an den Seiten des Schmelzbedes können durch Einschränkung des Suchbereichs vermieden werden.

Die Erkennung der Schmelzebadbreite wurde anhand einer repräsentativen Teilmenge von Schweißungen durchgeführt und ist daher nicht nach Blechdicken, Spaltmaß und Laserleistung aufgeschlüsselt. Wie in Abschnitt 4.4.4 gezeigt, lässt sich mit der Erkennung der Schweißnahtbreite ein Nahtefall sehr sicher detektieren, eine präzise Messung der Nahtbreite ist jedoch de facto nicht möglich. Eine detailliertere Bewertung der beschriebenen Algorithmen kann aus [68] entnommen werden.

4.5.3 Geschwindigkeit

Bezüglich der Geschwindigkeit der hier untersuchten Algorithmen sei nochmals darauf verwiesen, dass es sich bei der Umsetzung in MATLAB um ein Proof-Of-Concept handelt, das nicht für einen industriellen Einsatz gedacht ist. Jedoch verdeutlichen die ermittelten Werte für die Laufzeit der einzelnen Algorithmen deren Komplexität im Verhältnis zum Gesamtpaket.

Die Laufzeit der Algorithmen wurde anhand einer Auswertung der ersten 1.000 Bilder einer repräsentativen Schweißung untersucht. Bei einer Bildaufnahmezeit von 1.000 Hz entspricht dies einer Schweißdauer von einer Sekunde. Für die Auswertung wurde ein handelsüblicher Personal Computer²⁵ verwendet.

Algorithmus	Rechenzeit in s
TCP-Erkennung ²⁶	0,08
Durchschweißloch	0,57
Spritzer-Detektion	0,33
Hinterkante	0,14
Nahtbreite ²⁷	0,01
Total	1,13

Tabelle 4.4: Benötigte Rechenzeit der Algorithmen pro Bild [68].

In Tabelle 4.4 ist für die verschiedenen Algorithmen die jeweils benötigte Rechenzeit aufgeführt. Es handelt sich dabei um Durchschnittswerte aus drei durchgeführten Auswertungen, um den Einfluss von parallel laufenden Prozessen auf demselben

²⁵ CPU: Intel Core 2 Duo E6550 @ 2,33 GHz; RAM: 3 GB; Betriebssystem: Windows Vista SP1 x86.

²⁶ Muss in jedem Fall durchlaufen werden, da alle Algorithmen auf dem Ergebnis dieser Auswertung basieren.

²⁷ Setzt voraus, dass vorher die Detektion der Kapillar-Hinterkante (und auch des TCP) durchgeführt wurde.

Rechner zu minimieren. Zu beachten ist, dass die einzelnen Algorithmen nicht in beliebiger Weise aktivierbar oder deaktivierbar sind. Die TCP-Erkennung beispielsweise ist die Voraussetzung für alle weiteren Algorithmen und muss daher immer aktiv sein. Die Erkennung der Nahtbreite hat eine weitere Abhängigkeit zur Detektion der Kapillar-Hinterkante.

Wie aus Tabelle 4.4 hervorgeht, dauert die Analyse einer Schweißung mit einer Schweißdauer von einer Sekunde, bei Auswertung aller Merkmale, fast 19 Minuten. Eine Online-Prozesskontrolle mit den hier beschriebenen Algorithmen, in der Laufzeitumgebung MATLAB, ist also nicht möglich. Für die Umsetzung einer industriellen Prozesskontrolle ist daher die Portierung der Algorithmen auf eine schnellere Plattform notwendig. Dafür in Frage kommen besonders Plattformen mit höherer Effizienz der Laufzeitumgebung wie beispielsweise LabView oder eine Portierung in kompilierbare Programmiersprachen wie zum Beispiel C.

Soll die Prozesskontrolle online während der Schweißung ausgeführt werden, oder gar eine Rückkopplung auf den Prozess erfolgen, müssen echtzeitfähige Systeme zum Einsatz kommen. Diese können ebenfalls PC-basiert sein, wobei der Einsatz von GPU²⁸-Karten als Rechenwerke die Verarbeitungsgeschwindigkeit erheblich steigern kann. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass solche Systeme eine nicht unerhebliche Latenzzeit aufweisen, die durch den Datentransport zwischen der CPU des PCs und dem Speicher der GPU-Karte hervorgerufen wird. Eine höhere Verarbeitungsgeschwindigkeit bei gleichzeitig niedriger Latenzzeit lässt sich jedoch mit Spezialhardware, wie zum Beispiel DSPs²⁹ oder FPGAs³⁰, erzielen.

Im nachfolgenden Kapitel 5 wird eine kamerabasierte In-Prozess-Regelung beschrieben, die auf einer Kombination von CNN-Technologie³¹ mit einem FPGA basiert und dadurch auch komplexe Bildauswertungen - ohne den Einsatz zusätzlicher leistungsstarker Rechner - schnell, effizient und in Echtzeit löst.

²⁸ GPU steht für Graphics Processing Unit beziehungsweise Grafikprozessor, der auf massiv parallelisierbare Aufgaben ausgelegt ist.

²⁹ Ein DSP oder Digital-Signal-Processor ist ein für mathematische Operationen optimierter und echtzeitfähiger Prozessor.

³⁰ Ein FPGA oder Field-Programmable-Gate-Array ist ein integrierter Schaltkreis, in dem logische Schaltungen konfiguriert werden können. FPGAs sind besonders bei gut parallelisierbaren Problemen effizient einsetzbar.

³¹ Ein CNN oder Cellular-Neural-Network ist ein Netzwerk von simplen analogen Prozessoren, die direkt in die Pixel einer Hochgeschwindigkeitskamera integriert werden können und dadurch Bildverarbeitung mit bisher nicht erreichter Geschwindigkeit durchführen können.

4.5.4 Konsequenzen für die Prozessregelung

Die ermittelten Bildmerkmale aus Abschnitt 4.3 gliedern sich in Merkmale, welche die Entstehung von transienten Schweißfehlern beschreiben, als auch in solche, die den allgemeinen Zustand des Schweißprozesses charakterisieren. Für die Entwicklung der Prozessregelung ist insbesondere letztere Art von Interesse.

Aus der Kategorie der zustandsbeschreibenden Bildmerkmale eignen sich für die Prozessregelung insbesondere die Position der Kapillar-Hinterkante, welche Aufschluss über das zur Verfügung stehende Schmelzevolumen gibt, und das Durchschweißloch, welches den Durchschweißgrad des Prozesses wiedergibt. Für die Umsetzung der Prozessregelung in Kapitel 5 wurde das Durchschweißloch als entscheidendes Bildmerkmal gewählt, um darüber den Durchschweißgrad des Prozesses zu regeln.

5 Prozess-Regelung

Die konsequente Weiterentwicklung der Prozessdiagnostik zur kamerabasierten Prozessüberwachung führt letztlich zur kamerabasierten Prozessregelung, die es ermöglicht, Fehler nicht nur zu erkennen, sondern durch direkten Eingriff in die Prozessparameter zu vermeiden.

Im Rahmen der öffentlich geförderten Projekte ACES (Analoge Bildverarbeitung mit Cellularen Neuronalen Netzen (CNN) zur Regelung laserbasierter Schweißprozesse) [85] und ACES-II [86] der Baden-Württemberg Stiftung gGmbH, wurde durch das Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik IPM, die Technische Universität Dresden und das Institut für Strahlwerkzeuge IFSW, ein System zur kamerabasierten In-Prozessregelung der Durchschweißung beziehungsweise der Einschweißung am I-Naht-Überlappstoß realisiert.

Die Forschungsschwerpunkte der beiden Projekte waren auf die drei Partner wie folgt aufgeteilt. Die Prozessdiagnostik zur Erarbeitung der Prozessgrundlagen, die experimentellen Untersuchungen für das Design der Regelstrategie, die Entwicklung der Prozessbeobachtung und die Evaluierung des Regelsystems lagen im Verantwortungsbereich des IFSW. Die Theorie der Cellularen Neuronalen Netze und die Entwicklung der Bildverarbeitungsalgorithmen wurden an der TU-Dresden durch Dr. Leonardo Nicolosi bearbeitet [87]. Die Charakterisierung der Regelstrecke, die mathematische Modellbildung für das Design der Regelstrategie und die Entwicklung der elektronischen Komponenten für das Regelsystem wurden am IPM durch Dr. Andreas Blug [88] bearbeitet. In den folgenden Abschnitten wird an den entsprechenden Stellen gegebenenfalls durch Literaturverweise auf die Arbeiten dieser Projektpartner verwiesen.

5.1 Stand der Wissenschaft und Forschung

Abgesehen von Lageregelungssystemen zur Nahtverfolgung oder Temperaturregelungen für das Auftragsschweißen, sind aus der Literatur einige Ansätze bekannt, laserbasierte Fügeprozesse zu regeln [21], [89], [90], [91], [92]. Aufgrund der hohen Dynamik und großen Komplexität ist das Laserstrahl-Tiefschweißen eine besondere rege-

lungstechnische Herausforderung unter den laserbasierten Fügeverfahren. Erfolgreiche Ansätze das Laserstrahl-Tiefschweißen zu regeln basieren zumeist auf der Verwendung von Photodioden, da sie durch eine simple Intensitätsmessung hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten erlauben [93], [94], [95], [96]. Der größte Nachteil solcher Systeme liegt darin begründet, dass sie aufgrund des beschränkten Informationsgehalts der integral messenden Photodioden, empfindlich auf Veränderungen der Umgebungsbedingungen reagieren. Dies führt dazu, dass solche Systeme meist nur wenig robust sind und bei veränderten Umgebungsbedingungen, in vielen Fällen neu auf den zu regelnden Prozess abgestimmt werden müssen. Ein weiterer Nachteil ergibt sich bei der Kombination von Photodioden und Laserscannern mit F-Theta Objektiven. Durch die chromatische Aberration kann nicht gewährleistet werden, dass in den Randbereichen des Bearbeitungsfeldes, der Messfleck der Photodiode noch mit der Position des Bearbeitungslaserstrahls zusammenfällt. Diese Einschränkungen sind bereits bei der photodiodenbasierten Prozessüberwachung Stand der Technik.

Kamerabasierte Systeme ermöglichen eine deutlich robustere Auslegung gegenüber Veränderungen der Umgebungsbedingungen, da sie den Schweißprozess sehr viel detaillierter abbilden können. Wie jedoch aus Kapitel 4 hervorgeht, ist die Erkennung von geometrischen Größen in einem Kamerabild ein sehr komplexes Unterfangen in Bezug auf Erkennungssicherheit und Geschwindigkeit. Frühere Ansätze zur kamerabasierten Regelung [89], [90], [91], [92] waren nicht zuletzt aufgrund ihrer begrenzten Geschwindigkeit³² nur mäßig erfolgreich. Diagnostische Untersuchungen zur Dynamik von Laserstrahl-Tiefschweißprozessen, wie in den Kapiteln 3 und 4, legen nahe, dass für eine erfolgreiche Prozessregelung Regelfrequenzen im Bereich mehrerer Kilohertz, bei gleichzeitig niedriger Latenzzeit, notwendig sind.

Bild 5.1 veranschaulicht die hohe Dynamik des Laserstrahlschweißprozesses anhand der Fluktuationen der Dampfkapillare im Falle einer Durchschweißung. Die Abbildung zeigt aufeinanderfolgende Einzelbilder a) bis d) aus einer Videosequenz eines Laserschweißprozesses im Vergleich zu einem Durchschnittsbild e) und der Standardabweichung der Pixelhelligkeiten f). Die zugrunde liegende Videosequenz wurde mit einer koaxial zum Laserstrahl angeordneten Kamera bei einer Belichtungszeit von $40 \mu\text{s}$ und einer Bildrate von 3.000 fps aufgezeichnet. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Kontrast des Durchschweißblochs im Durchschnittsbild e) signifikant niedriger ist, als in den sehr kurz belichteten Einzelaufnahmen a) bis d). Die Standardabweichung f) hingegen zeigt, dass der Bereich des Durchschweißblochs die stärksten Fluktuationen

³² Unter Geschwindigkeit werden hier die Kenngrößen Bildrate und Latenzzeit zusammengefasst.

im gesamten Bild aufweist. Dies legt nahe, dass für eine sichere Erkennung des Durchschweißblochs eine schnelle Konturerkennung in vielen Einzelbildern geeigneter ist, als eine Auswertung absoluter Helligkeiten.

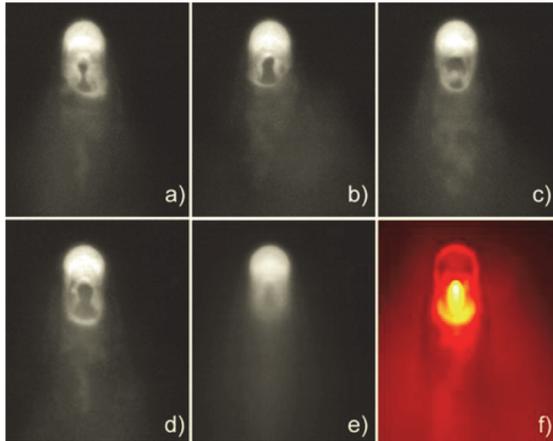


Bild 5.1: Laserschweißung in $2 * 0,7 \text{ mm}$ dickes verzinktes Stahlblech im I-Naht-Überlappstoß bei $9,5 \text{ m/min}$ Vorschub, einer Laserleistung von 6 kW und einem Fokusbereich von $600 \mu\text{m}$. a) – d): Aufeinanderfolgende Einzelbilder des Durchschweißblochs bei einer Bildaufnahmezeit von 3 kHz . e): Mittlere Helligkeit der Pixel über 100 Einzelbilder. f): Standardabweichung der Pixel über 100 Einzelbilder.

Bisherige Bildverarbeitungssysteme auf Mikroprozessorbasis, wie sie beispielsweise in [97] und [98] eingesetzt wurden, waren nicht in der Lage, solch hohe Bildraten und gleichzeitig niedrige Latenzzeiten zu erzielen.

Um die Probleme der zu niedrigen Geschwindigkeit beziehungsweise der hohen Latenzzeiten bei der Regelung zu lösen, wurde im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit erstmals eine neuartige Kameratechnologie - die so genannten „Cellularen Neuronalen Netzwerke“ (CNN) - zur Prozessregelung von Laserschweißprozessen eingesetzt. Diese Kameratechnologie ermöglicht durch Kombination von analoger und digitaler Bildverarbeitung direkt auf dem Kamerachip Bildaufnahme- beziehungsweise Bildverarbeitungsfrequenzen bis zu mehreren 10 kHz bei Latenzzeiten in der Größenordnung eines Bildes (Latenzzeit ungefähr gleich dem Kehrwert der Bildaufnahmezeit), was erstmals eine Echtzeit-Bildverarbeitung zur Regelung von Laserschweißprozessen ermöglicht.

5.2 CNN-Technologie

Auf eine Darstellung der genauen elektrischen und mathematischen Modelle für Zellulare Neuronal Netzwerke wird in dieser Arbeit verzichtet und stattdessen auf die grundlegenden Arbeiten von Chua [99], Roska [100] und Rodriguez-Vázquez [101] verwiesen. Auch die Dissertationsschriften von Nicolosi [87] und Blug [88] vermitteln einen Überblick über die technisch-mathematischen Grundlagen der hier verwendeten CNN-Technologie. Im Folgenden sollen jedoch die relevanten Charakteristika dieser Technologie erläutert werden und weshalb diese für eine schnelle kamerabasierte Prozessregelung vorteilhaft sind. Des Weiteren wird auf einige technische Umsetzungen von CNN eingegangen, die am Markt verfügbar sind.

Bildverarbeitungssysteme bestehen typischerweise aus Komponenten zur Beleuchtung, optischen Abbildungssystemen, Digitalkameras und Datenverarbeitungseinheiten zur Ablaufsteuerung und Auswertung. Bei der Mehrzahl der Systeme erfolgt die Auswertung der Daten über einen oder mehrere standardisierte Rechner, wie zum Beispiel Personalcomputer. Diese Architektur führt zu komplexen Rechnersystemen mit hohem Datenvolumen und daraus resultierenden typischen Engpässen bei der Datenübertragung und -verarbeitung. Bei den hierbei verwendeten Prozessoren handelt es sich nahezu ausschließlich um sogenannte „Single Instruction Single Data“ (SISD) - Systeme [102]. Das heißt, dass ein darauf laufender Algorithmus aus einer Folge von Befehlen besteht, die von einem oder wenigen Prozessorkernen sequentiell auf die einzelnen Datenelemente, in der Regel einzelne Pixel, angewendet werden. Eine Alternative stellen die sogenannten „Single Instruction Multiple Data“ (SIMD)-Architekturen dar, bei denen jede Anweisung eines Programms gleichzeitig auf eine Vielzahl von Daten parallel und auf gleiche Weise angewendet wird. Besonders Bildverarbeitungsalgorithmen lassen sich sehr effizient auf solchen SIMD-Architekturen umsetzen, da hier häufig die gleiche Operation auf jedes einzelne Bildelement angewendet wird [85].

Die CNN-Technologie [99] (Cellular Neural Network) liefert eine mögliche Basis für die Integration einer solchen SIMD-Architektur in die elektronische Beschaltung der einzelnen Pixel einer CMOS-Flächenkamera. Die theoretische Grundlage hierfür ist die „CNN Universal Machine“ [100], welche sich mit Hilfe von CMOS-Prozessen in einem Array von optischen Sensoren sowie analogen und digitalen Datenverarbeitungselementen auf kleinem Raum umsetzen lässt [101]. In einer solchen Architektur verfügt jeder Kamerapixel über einen eigenen analogen Prozessor, der mit seinen direkten Nachbarn kommunizieren kann, siehe hierzu die Schemazeichnung in Bild 5.2.

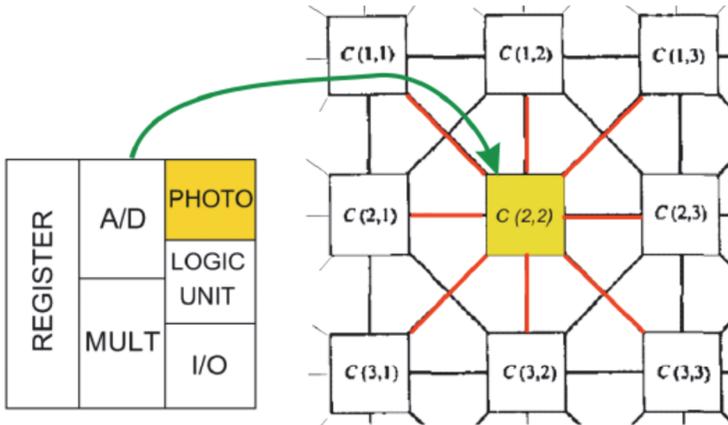


Bild 5.2: In einer CNN-Kamera wird jedes Pixel (rechts: Ausschnitt aus der vernetzten Pixelmatrix) des Kamerachips mit einem eigenen Prozessor ausgestattet (links: einzelner Prozessor mit integriertem Photodetektor) [99], [103].

Dieses auch als „Focal-Plane Processor Array“ bezeichnete System [104] verhält sich wie eine räumliche Anordnung lokal gekoppelter, nichtlinearer dynamischer Systeme, welche üblicherweise als Zellen bezeichnet werden, daher auch die alternative Bezeichnung als Cellular Nonlinear Network. In der Analogie zu einem neuronalen Netz entspricht die Zelle selbst einem Neuron und die Kopplung zu den Nachbarzellen einer Synapse. Das dynamische Verhalten einer Zelle lässt sich durch Zustandsgleichungen in Form von nichtlinearen, lokal gekoppelten Differentialgleichungen beschreiben [87], [105], [106].

Ein Algorithmus, der auf einem solchen CNN ausgeführt wird, besteht aus einer Folge von Kopplungsparametern, die die Interaktion zwischen den einzelnen Zellen bestimmen. Bild 5.3 veranschaulicht einen solchen, in allen Zellen parallel ablaufenden Verarbeitungsschritt eines CNN, in dem durch die analoge Kopplung der benachbarten Pixel eines Eingangsbildes in einem einzigen Verarbeitungsschritt ein Kantenbild erzeugt wird [85]. Der Zustand einer Zelle hängt in diesem System ab von der Beleuchtungsstärke des Pixels und seiner direkten Nachbarn (Input, neun Parameter), dem eigenen Zustand und den Zuständen seiner direkten Nachbarn (State, neun Parameter) und einem voreingestellten Faktor (Bias, ein Parameter), insgesamt also 19 Parameter. Das CNN kann somit als ein dreidimensionales Netzwerk in Raum und Zeit betrachtet werden, bei dem für jeden Kamerapixel ein eigener Prozessor zur Verfügung steht. Die Verarbeitung selbst unterliegt dabei keinem fest vorgegebenen Takt sondern richtet sich nach der Laufzeit, die aus der Komplexität der Reihe von Kopplungsparametern

resultiert, aus denen der Algorithmus besteht. Das Ergebnis steht dabei immer im nachfolgenden Zyklus zur Verfügung, was bedeutet, dass die Latenz maximal einen Zyklus (einige zehn bis hundert Mikrosekunden) lang ist.

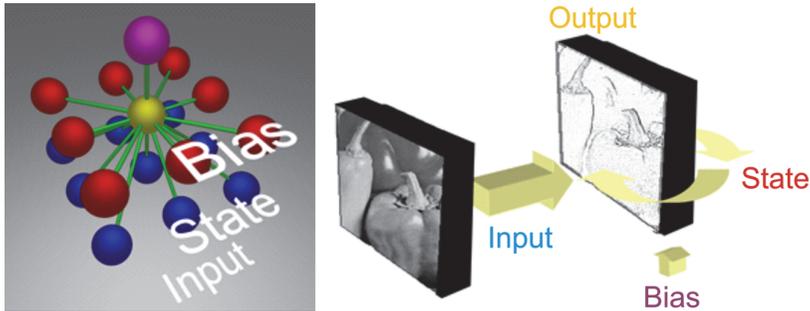


Bild 5.3: Links: Funktionsprinzip einer CNN-Zelle mit einer Nachbarschaft von 3×3 Pixel². Der analoge Zustand einer Zelle (Gelb) ist mit den Zuständen der Nachbarpixel (Rot) sowie mit dem des Eingangsbildes (Blau) und einem Bias (Magenta) gekoppelt. Unter Verwendung von Gewichtungsfaktoren - den Parametern eines CNN - wird die Stärke der Ankopplung festgelegt. Rechts: Darstellung des zeitlichen Ablaufs eines Verarbeitungsschrittes [107]. Am Eingang liegt ein Grauwertbild (Input) an, welches in ein Kantenbild (Output) überführt wird. Input, State und Bias symbolisieren die 19 Parameter zur gewichteten Verknüpfung des Eingangsbildes mit dem analogen Zustand der Zelle und dem Bias [85].

Die mathematischen Grundlagen der CNN Universal Machine wurden im Laufe der Zeit in verschiedenen elektrischen Schaltungen umgesetzt. Zur Laufzeit dieses Projektes waren drei CNN-Kamera-Chips der Firma ANAFOCUS am Markt verfügbar. Bei allen dreien handelt es sich um „Mixed Signal“-CMOS-Schaltkreise, das heißt um Schaltkreise, die sowohl analoge, digitale als auch fotosensitive Komponenten enthalten. In Tabelle 5.1 sind die drei am Markt verfügbaren Systeme aufgelistet [85], die alle innerhalb der Projekte ACES und ACES-II zur Entwicklung der Prozessregelung verwendet wurden.

Das EyeRIS 1.1-System [108] besteht, ebenso wie seine beiden Nachfolger-Systeme EyeRIS 1.2 und EyeRIS 1.3, aus zwei Hauptkomponenten. Einem konventionellen NIOS-II Prozessor und dem eigentlichen CNN-Chip, dem ACE16k. Der NIOS-II-Prozessor ist dabei für die Koordination des Programmablaufs auf dem CNN-Chip zuständig. Auf ihm können für diese Aufgabe weitgehend beliebige Programme ausgeführt werden. Das System wird in der Sprache C++ programmiert, die CNN-spezifische Bibliotheken für eine einfache Programmierung zur Verfügung stellt [85].

Jede CNN-Zelle verfügt über acht analoge Speicher für Grauwertbilder und zwei digitale Speicher für Binärbilder.

Kamera	CNN-Chip	Hersteller	Jahr	Strukturgröße [nm]	Pixel-Pitch [μm]	Speicher pro Zelle	Auflösung
EyeRIS 1.1	ACE16k	Anafocus	2005	350	74	8 analog 2 digital	128x128
EyeRIS 1.2	Q-Eye	Anafocus	2007	180	33,6	7 analog 4 digital	176x144
EyeRIS 1.3	Q-Eye	Anafocus	2010	180	33,6	7 analog 8 digital	176x144

Tabelle 5.1: Vergleich der verwendeten CNN-Kameras [85], [86], [108].

Der Q-Eye, als Kernstück der Kamerasysteme EyeRIS 1.2 und 1.3, ist der Nachfolger des ACE16k. Die kleinere Strukturgröße von 180 nm statt 350 nm erlaubt eine Reduktion des mittleren Pixelabstandes von $74\text{ }\mu\text{m}$ auf $34\text{ }\mu\text{m}$, was trotz kleinerer Chipdiagonale ($2/3''$ statt $1''$) eine Steigerung der Auflösung von $128 * 128$ auf $176 * 144$ Zellen ermöglicht. Ansonsten ähnelt der Aufbau des EyeRIS 1.2-Systems weitgehend dem des Vorgängers. Neben einem USB- (EyeRIS 1.2) beziehungsweise Ethernet-Anschluss (EyeRIS 1.3) verfügen sie über digitale Ein- und Ausgänge sowie über Pulsweitenmodulierte Ausgänge, die sich zur Erzeugung von analogen Steuerspannungen eignen. Das FPGA, auf dem der NIOS-Prozessor integriert ist, steuert zugleich die Bildaufnahme und den Datentransfer zwischen NIOS und CNN-Chip, was eine parallele Belichtung und Verarbeitung der Bilddaten auf dem CNN ermöglicht. Bild 5.4 zeigt die oben beschriebenen drei CNN-Kamerasysteme.



Bild 5.4: Verschiedene CNN-Kameras von ANAFOCUS, die im Projekt ACES verwendet wurden. V.l.n.r.: EyeRIS 1.1, EyeRIS 1.2 und EyeRIS 1.3 [108].

5.3 Visuelle Merkmalsextraktion

Für die Erkennung einer vollständigen Durchschweißung mit nach unten geöffneter Dampfkapillare kann das bereits in Abschnitt 4.3.1 beschriebene Bildmerkmal des Durchschweißloches (Full-Penetration-Hole FPH) verwendet werden. Die Schemazeichnung in Bild 5.5 oben verdeutlicht noch einmal die Entstehung dieses Bildmerkmals bei Verwendung einer koaxial zum Bearbeitungslaser angeordneten Kamera, die das thermische Eigenleuchten des Prozesses beobachtet.

Die Bereiche der Kapillare, die direkt vom Bearbeitungslaser bestrahlt werden, werden durch diesen auf Verdampfungstemperatur erhitzt. Diese Bereiche emittieren gemäß dem Planckschen Strahlungsgesetz elektromagnetische Strahlung in Form von Licht dessen spektrales Maximum von deren Temperatur abhängt. Verglichen mit Bereichen, die nur Schmelztemperatur besitzen oder noch kälter sind, erscheinen diese Bereiche im Kamerabild hell. Da im Bereich des Durchschweißloches kein Material mehr vorhanden ist, welches Licht emittieren könnte, erscheint dieser Bereich dunkel.

Außer bei der vollständigen Durchschweißung gibt es auch bei der Einschweißung am I-Naht-Überlappstoß einen Prozesszustand, der ein ähnliches Bildmerkmal erzeugt, siehe Bild 5.5 unten. Wenn die Streckenenergie genau so groß ist, dass die Kapillare das Oberblech gerade durchdringt, jedoch noch nicht genügend Intensität das Unterblech erreicht, um dieses auf Verdampfungstemperatur aufzuheizen, dann erscheint im Kamerabild das sogenannte Einschweißloch. Die untere Öffnung der Kapillare liegt dabei - in Vorschubrichtung - immer am hinteren Ende der vom Laser bestrahlten Zone. Im Grenzfall, dringt kein Laserlicht direkt durch diese Öffnung sondern lediglich an den Kapillarwänden reflektierte Strahlungsanteile. Diese reflektierte Strahlung reicht jedoch nicht aus, um das Unterblech auf Verdampfungstemperatur zu erhitzen.

Um diese Zusammenhänge frühzeitig im Projekt zu verifizieren, wurden einige Schweißversuche mit einem sehr frühen Algorithmus zur Erkennung des Durchschweißloches untersucht [109]. Bild 5.6 zeigt Messergebnisse, die mit dem sogenannten ArcFill-Algorithmus erstellt wurden. Der Algorithmus liefert als Ergebnis eine Anzahl gefundener weißer Pixel, die mit der Größe des Durchschweißloches korreliert, diese jedoch nicht exakt wiedergibt³³.

³³ Der ArcFill-Algorithmus liefert die Anzahl der gefundenen weißen Konturpixel des Durchschweißloches. Der Wertebereich des Algorithmus liegt dabei zwischen 0 und 20 Pixeln.

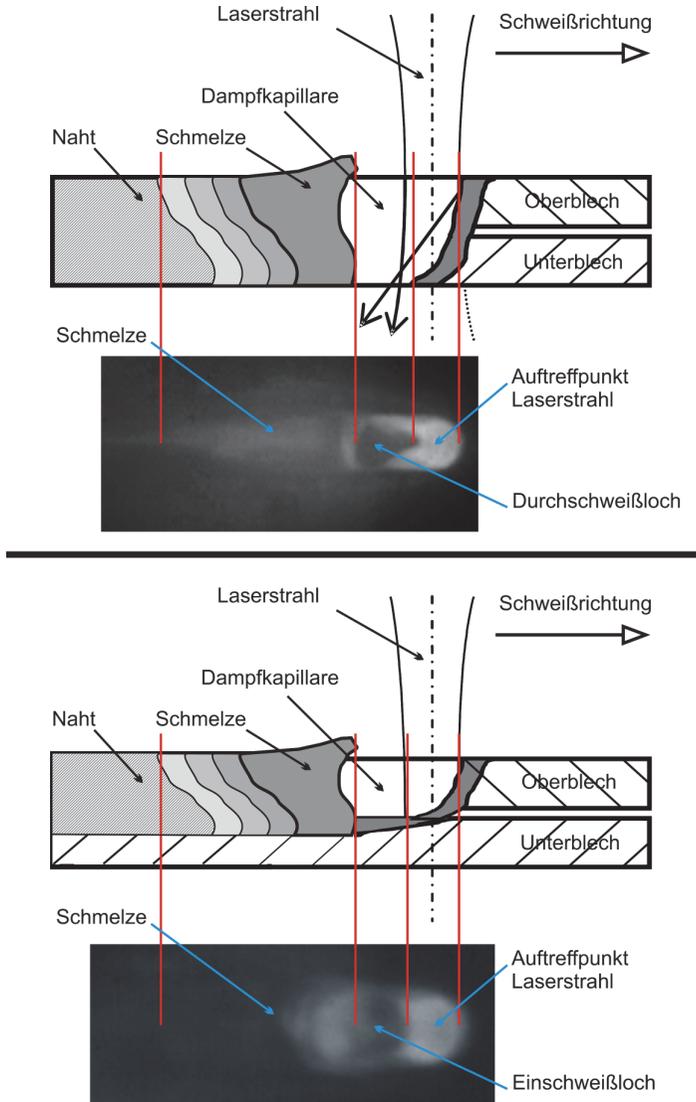


Bild 5.5: Direkte Zuordnung der Bildmerkmale aus einer Durchschweißung am I-Naht-Überlapstoß (oben) und einer Einschweißung am I-Nahtüberlapstoß (unten) [85]. Die Kamerabilder zeigen einen Schweißprozess in verzinktes Stahlblech koaxial zum Laserstrahl bei einer Beobachtungswellenlänge von 905 nm und einer Halbwertbreite von 50 nm .

Nichtsdestoweniger erlaubt der Algorithmus anhand der Anzahl gefundener Pixel, eine recht präzise Erkennung, ob ein Durchschweißloch vorhanden ist oder nicht. Es wurden hierfür zwei Schweißungen mit fest vorgegebenem Verlauf der Laserleistung durchgeführt. Es handelt sich dabei um Schweißungen von verzinktem Stahlblech mit einer Dicke von $2 * 0,7 \text{ mm}$ am I-Naht-Überlappstoß. Geschweißt wurde mit einem Fokusdurchmesser von $600 \mu\text{m}$ und einer Vorschubgeschwindigkeit von 9 m/min . Der Verlauf der Laserleistung wurde so gewählt, dass in den Bereichen mit 6 kW eine vollständige Durchschweißung erzielt wird, während im mittleren Bereich mit einer Leistung von 5 kW die Dampfkapillare nicht nach unten geöffnet ist.

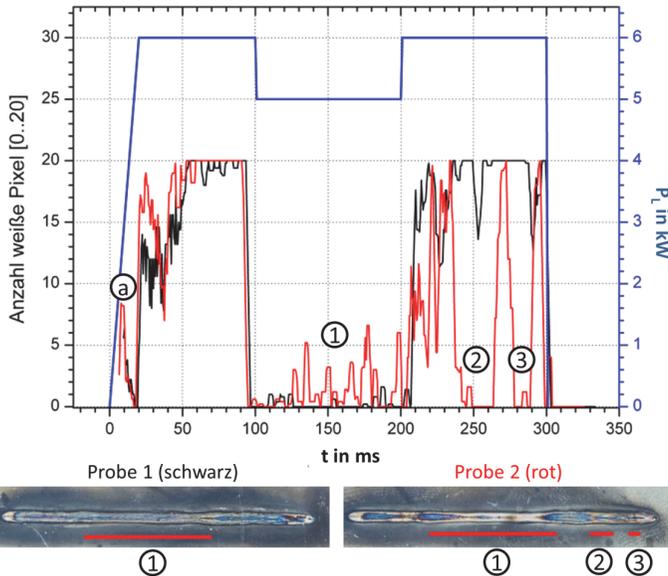


Bild 5.6: Gemessene Größe des Durchschweißlochs über der Zeit (schwarze und rote Kurve) bei vorgegebenem Verlauf der Laserleistung (blaue Kurve). Probe 1 zeigt nur im Bereich (1) eine ungenügende Durchschweißung, während Probe 2 zwischen 240 ms und 300 ms zwei weitere Bereiche (2) und (3) mit ungenügender Durchschweißung aufweist. Der mit (a) markierte Bereich im Diagramm zwischen 5 ms und 15 ms entspricht dem Übergang vom Ober- ins Unterblech am I-Naht-Überlappstoß [85], [88], [109], [105].

Betrachtet man den Verlauf der gemessenen Anzahl weißer Pixel für Probe 1 (schwarze Kurve) erkennt man ein erstes lokales Maximum nach etwa 10 ms , welches im Diagramm mit (a) gekennzeichnet ist. Dies ist der Zeitpunkt zu dem die Dampfkapillare gerade das obere Blech vollständig durchdrungen hat und beginnt, das untere Blech

aufzuheizen. Dies entspricht dem Zustand, der in Bild 5.5 unten dargestellt ist. Mit dem Vordringen der Dampfkapillare in das untere Blech verschwindet das Bildmerkmal wieder und die Anzahl gefundener Pixel sinkt auf ein lokales Minimum. Im Bereich zwischen 20 ms und 50 ms erreicht die Dampfkapillare die Unterseite des unteren Bleches und öffnet sich, was entsprechend durch einen starken Anstieg der Anzahl erkannter weißer Pixel gekennzeichnet ist. Dieser Zustand entspricht der vollständigen Durchschweißung mit nach unten geöffneter Dampfkapillare, entsprechend der Schemazeichnung in Bild 5.5 oben. Nach 100 ms beginnt der Bereich mit reduzierter Laserleistung, im Diagramm durch (1) gekennzeichnet. Da die Streckenenergie nun nicht mehr für eine vollständige Durchschweißung ausreicht, schließt sich die Dampfkapillare an der Unterseite wieder und es wird auch, abgesehen von einigen fälschlich erkannten Pixeln, kein Durchschweißloch mehr erkannt. Nach 200 ms wird die Laserleistung wieder auf 6 kW erhöht und die Durchschweißung wird bei Probe 1 vom Algorithmus wieder sicher erkannt.

Bei Probe 2 (rote Kurve Bild 5.6) sind dagegen im Bereich zwischen 200 ms und 300 ms deutliche Lücken zu erkennen, in denen die Probe nicht sauber durchgeschweißt wurde (diese Bereiche sind in Bild 5.6 mit (2) und (3) markiert). Solche Lücken können beispielsweise durch Schwankungen der Laserleistung aufgrund von Extinktion des Laserlichtes im Schweißrauch bei unzureichender Absaugung oder schwankendem Druck der Schweißrauch-Düsen hervorgerufen werden. Der zeitliche Verlauf der Anzahl weißer Pixel stimmt dabei sehr gut mit der visuellen Beurteilung der Nahtunterraupen in Bild 5.6 rechts überein.

Durch die Versuche konnten zwei wichtige Erkenntnisse für die weitere Entwicklung gewonnen werden.

Erstens: Im Messsignal ist sowohl der Übergang zur vollständigen Durchschweißung erkennbar als auch der Übergang vom oberen Blech ins untere Blech. Sowohl die Regelung der vollständigen Durchschweißung als auch die Regelung am Übergang zwischen den Fügepartnern sollte also grundsätzlich möglich sein.

Zweitens: Die Anzahl der gefundenen Konturpixel bei der vollständigen Durchschweißung verhält sich quasi binär. Das bedeutet, dass sie entweder dem Maximum von 20 px entspricht oder bei fehlender Durchschweißung im Bereich von 5 px oder weniger liegt. Dieses Verhalten konnte bereits bei den Versuchen zur Prozessüberwachung in Abschnitt 4.4.1, Bild 4.22 und Bild 4.23 beobachtet werden. Die im Folgenden beschriebenen Algorithmen verwenden deshalb einen Schwellwert, um zwischen den beiden Zuständen Merkmal „vorhanden“ und „nicht vorhanden“ zu unterscheiden.

5.3.1 Algorithmus „One-Side“

Der „One-Side“-Algorithmus ist ein einfacher und effizienter Algorithmus zur Erkennung des Durchschweißbloches in Laserschweißprozessen mit a priori bekannter und konstanter Schweißrichtung, der nicht auf eine geschlossene Kontur des Durchschweißbloches angewiesen ist. Sowohl die Ergebnisse aus Abschnitt 4.4.1 als auch das in Bild 5.7 (a) dargestellte Kamerabild zeigen, dass ein konturbasierter Algorithmus zur Erkennung des Durchschweißbloches spätestens dann versagt, wenn er auf eine geschlossene Form des Durchschweißbloches angewiesen ist, da diese geschlossene Form bei höheren Schweißgeschwindigkeiten in vielen Fällen nicht mehr gegeben ist.

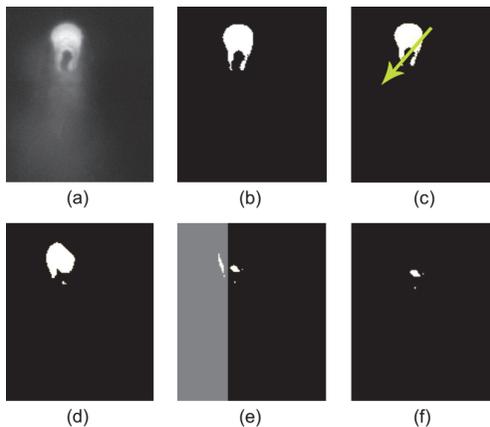


Bild 5.7: Abfolge der einzelnen Operationen des „One-Side“-Algorithmus. (a) Kamerabild (8 Bit Graustufen). (b) Binarisiertes Bild (1 Bit schwarz-weiß). (c) Dilatation entlang der Bilddiagonalen. (d) Ergebnis der Dilatation. (e) Ergebnis der XOR von (d) und anschließendem AND von (d) mit (b). (f) Endergebnis nach AND von (e) mit einer Maske (grau eingefärbt).

Es ist der erste im Projekt ACES umgesetzte Algorithmus, der mit einem geschlossenen Regelkreis ausgestattet ist. Der Algorithmus basiert weitgehend auf morphologischen Operatoren (Nachbarschaftsfindung), wie Dilatation und Erosion, die sehr effizient auf CNNs verarbeitet werden können [106].

In früheren Arbeiten [109] konnte bereits gezeigt werden, dass das Intensitätsbild des Schweißprozesses im nahen Infrarot über einen weiten Bereich der Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit weitgehend konstant bleibt. Aus diesem Grund ist es möglich und zweckmäßig die Binarisierung des von der Kamera aufgezeichneten Grau-

wertbildes mit einem globalen³⁴ Schwellwert durchzuführen. Der Schwellwert wird anhand von aufgezeichneten Bildern ermittelt, indem eine visuelle Referenz mit dem Ergebnis des Algorithmus verglichen wird und dabei der globale Schwellwert automatisch solange variiert wird, bis maximale Übereinstimmung erzielt wird.

Bild 5.7 zeigt schematisch die ausgeführten Operationen auf ein binarisisiertes Kamerabild und die jeweiligen Zwischenergebnisse. Der Algorithmus führt als erstes auf das Kamerabild (a) eine Binarisierung durch (b). Anschließend wird ein Dilationsoperator entlang der Bilddiagonalen von oben-rechts nach unten-links ausgeführt (c). Das Ergebnis der Dilatation (d) wird anschließend mit dem binarisierten Ursprungsbild (b) per *XOR*- und *AND*-Operation verknüpft, woraus sich das Differenzbild (e) ergibt. Dieses Zwischenergebnis enthält nun sowohl die gesuchten weißen Pixel, die das Durchschweißloch repräsentieren, als auch einen Cluster weißer Pixel links davon, der als Artefakt des Dilations-Operators am äußeren Rand der Kontur erzeugt wurde. Dieser Cluster wird in einem letzten Schritt durch eine *AND*-Operation mit einer Maske entfernt, woraus sich schließlich das Ergebnisbild (f) ergibt [110].

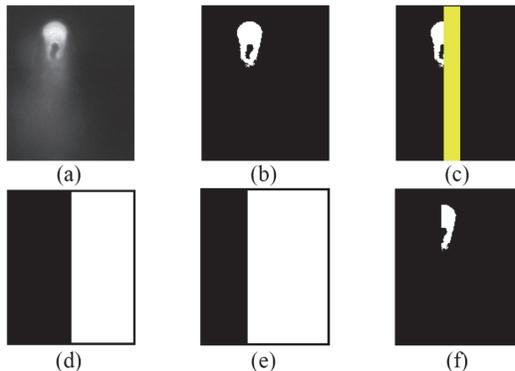


Bild 5.8: Funktion des Mask-Builders für den „One-Side“-Algorithmus. Das Kamerabild (a) wird binarisiert (b) und anschließend die Distanz der Laserinteraktionszone zur Bildmitte berechnet (c). Danach wird die initiale Maske (d) um eben diese Distanz verschoben (e). Ein Beispielbild aus dem Schweißprozess mit maskierter Laserinteraktionszone ist in (f) zu sehen [110].

Die Position der Maske wird zu Beginn einer jeden Schweißung durch den Mask-Builder berechnet. Der Mask-Builder ermittelt hierzu die Mitte der Laserinteraktions-

³⁴ Ein globaler Schwellwert zur Binarisierung ist im Bildfeld konstant und wird nur einmal beim Einrichten des Kamerasystems bestimmt.

zone, um die Maske dann vertikal daran auszurichten. Das Funktionsprinzip ist in Bild 5.8 veranschaulicht. Im ersten Schritt wird eine initiale Maske erzeugt, deren rechte Kante genau in der Bildmitte zum Liegen kommt (d). Danach wird das Kamerabild (a) mit dem globalen Schwellwert binarisiert (b) und die Distanz der Mitte der Laserinteraktionszone zur Bildmitte berechnet (c). Die initiale Maske wird nun um diese Distanz verschoben, sodass die Laserinteraktionszone mit ihrer rechten Kante genau in der Mitte geschnitten wird (e). Ein Beispiel eines so maskierten Bildes ist in (f) dargestellt. Eine detailliertere Beschreibung des Mask-Builders ist in [110] zu finden.

Die Laufzeit der Bildverarbeitungsfunktionen beträgt beim „One-Side“-Algorithmus etwa $40 \mu\text{s}$. Diese verläuft parallel zur Belichtung des darauffolgenden Bildes, die ebenfalls $40 \mu\text{s}$ beträgt. Die Zykluszeit des gesamten Regelalgorithmus beinhaltet zusätzlich noch die Zeiten für Kommunikations-, Logik- und Bildakquise-Funktionen, die sich auf etwa $30 \mu\text{s}$ summieren. Die Kommunikations- und Logikfunktionen beinhalten die Ansteuerung der Laseranlage, den Regelalgorithmus und die Erzeugung von Analogwerten (PWM-Signal) zur Regelung der Laserleistung. Die gesamte daraus resultierende Zykluszeit liegt bei etwa $70 \mu\text{s}$, was eine Regelfrequenz von etwa 14 kHz ermöglicht [87], [111].

5.3.2 Algorithmus „Omnidirectional“

Der in Abschnitt 5.3.1 beschriebene Algorithmus birgt, genau wie einige weitere Algorithmen aus [87], [105], [112] und [113], den großen Nachteil, dass für deren Einsatz die Schweißrichtung a priori bekannt sein muss und sich während des Prozesses nicht verändern darf. Um dieses Problem zu umgehen, wurde der richtungsunabhängige „Omnidirectional“-Algorithmus entwickelt, der in [87], [114] und [115] beschrieben ist.

Der „Omnidirectional“-Algorithmus basiert auf den richtungsunabhängigen morphologischen Operatoren Opening und Closing. Der Opening-Operator besteht im Wesentlichen aus einer Erosion mit anschließender Dilatation und entfernt damit kleine Objekte aus einem Bild. Der Closing-Operator hingegen, besteht aus einer Dilatation mit anschließender Erosion und füllt kleine Löcher im Bild auf. Opening und Closing sind nachbarschaftsbasiert und dadurch auf CNN-Architekturen sehr effizient.

Bild 5.9 zeigt den Datenfluss des „Omnidirectional“-Algorithmus. Das Kamerabild (a) mit 8 Bit Graustufen wird mittels eines Sharpening-Filters bearbeitet, um den Kontrast an Kanten zu erhöhen, was zu einem weiteren Graustufenbild (b) führt. Dieses

Bild wird mittels eines globalen Schwellwertes, analog zu Abschnitt 5.3.1, binarisiert und so in ein Schwarzweiß-Bild überführt (c). Alle schwarzen Löcher innerhalb der weißen Struktur werden mittels des Closing-Operators über 8 Iterationen geschlossen, was zu einer monolithischen weißen Struktur (d) führt. Mit den Operatoren XOR und AND wird anschließend das Differenzbild (e) aus (d) und (c) berechnet. Zur Reduzierung von Artefakten wird der Opening-Operator angewandt, was zu Bild (f) führt. Letztlich wird dieses Bild mit einer vorher berechneten Maske (g) per AND -Operator maskiert, um alle weißen Pixel zu entfernen, die nicht zum gesuchten Durchschweißloch gehören. Das Ergebnis ist das Binärbild (h), welches nur noch einen Cluster weißer Pixel enthält, die das Durchschweißloch repräsentieren.

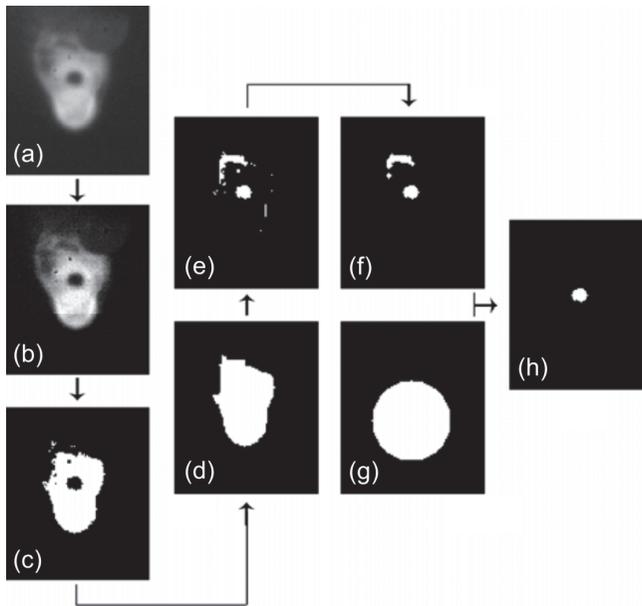


Bild 5.9: Datenfluss des „Omnidirectional“-Algorithmus. (a) Kamerabild, (b) Graubild nach Sharpen-Filterung, (c) binarisiertes Bild, (d) Binärbild nach Closing-Operator, (e) Differenzbild aus (d) und (c), (f) Binärbild nach Opening-Operator, (g) Maske, (h) Ergebnis mit einem einzigen Pixelcluster, der das Durchschweißloch repräsentiert [115].

Die Position der Maske für den „Omnidirectional“-Algorithmus wird zu Beginn jeder Schweißung durch den Mask-Builder berechnet. Die Funktionsweise des Mask-Builders ist ähnlich zu dem in Abschnitt 5.3.1 beschriebenen. Der Hauptunterschied

besteht in der Form der Maske, die anstatt rechteckig über die volle Bildhöhe, rund und in beiden Achsen zur Interaktionszone ausgerichtet ist. Durch die runde Maske ist sichergestellt, dass Artefakte unabhängig von der Schweißrichtung entfernt werden.

Wie in Bild 5.10 gezeigt, wird zur Erzeugung der Maske das ursprüngliche Grauwertbild der Kamera (a) mit einem globalen Schwellwert binarisiert und daraus das Binärbild (b) erzeugt. Das Kreuz mit der Bezeichnung *IC* markiert die Bildmitte (Image-Center *IC*). Im nächsten Schritt (c) wird über eine Bounding-Box-Funktion die Mitte der Laserinteraktionszone (Interaction-Zone-Center *IZC*) ermittelt. Anschließend wird die ursprüngliche Maske (d) derart verschoben, dass sie genau im Punkt *IZC* zu liegen kommt, wodurch die endgültige Maske (e) für die Schweißung erzeugt wird.

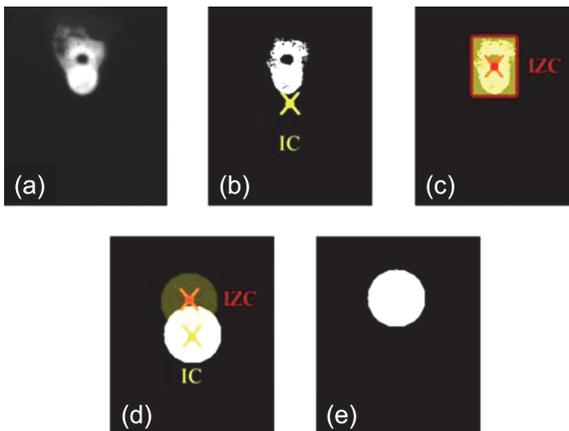


Bild 5.10: Funktion des Mask-Builders („Omnidirectional“-Algorithmus). a) Kamera-bild, b) binarisiert mit Bildmittenmarke *IC*, c) Ermittlung der Interaktionszone *IZC*. d) Verschiebung der Maske von *IC* nach *IZC*, e) Ergebnis [115].

Die reine Laufzeit der Bildverarbeitungsfunktionen des „Omnidirectional“-Algorithmus liegt bei ungefähr $130 \mu\text{s}$. Die gesamte Zykluszeit für den Regelkreis, inklusive Kommunikations-, Logik- und Bildakquise-Funktionen, beläuft sich auf etwa $160 \mu\text{s}$, was eine Regelfrequenz von ungefähr 6 kHz ermöglicht [87]. Durch eine Optimierung der Schwellwertbildung konnte die Laufzeit des Algorithmus auf etwa $110 \mu\text{s}$ reduziert werden, was eine Regelfrequenz von ungefähr 9 kHz ermöglicht. Die genaue Funktionsweise dieses als „Omni-Local“ bezeichneten Algorithmus ist in [87] detailliert beschrieben. Im Folgenden wird nicht weiter zwischen „Omnidirectional“ und „Omni-Local“ unterschieden und sämtliche Versuche mit diesen Algorithmen unter der Bezeichnung „Omnidirectional“ aufgeführt.

5.4 Regelungstechnisches Modell

Zur Regelung eines Schweißprozesses muss ein geschlossener Regelkreis aufgebaut werden, der aus einem Messsignal und einer Führungsgröße eine Stellgröße für den Schweißprozess generiert und diese in die Regelstrecke zurückführt. Der Wirkungsplan des im Rahmen dieser Arbeit entworfenen geschlossenen Regelkreises ist in Bild 5.11 dargestellt und soll in den folgenden Abschnitten gemäß den darin enthaltenen Elementen erklärt werden. Hierzu wird der Regelkreis in drei Segmente zerlegt. Die Ableitung einer geeigneten Messgröße durch das Messglied wird in Abschnitt 5.4.1 erklärt, auf den Regler selbst wird in Abschnitt 5.4.2 näher eingegangen und die Regelstrecke mit ihren Eigenschaften ist in Abschnitt 5.4.3 beschrieben. Die Reihenfolge der Abschnitte ergibt sich aus der Einführung der notwendigen Kenngrößen und Formelzeichen zur Beschreibung des Regelkreises.

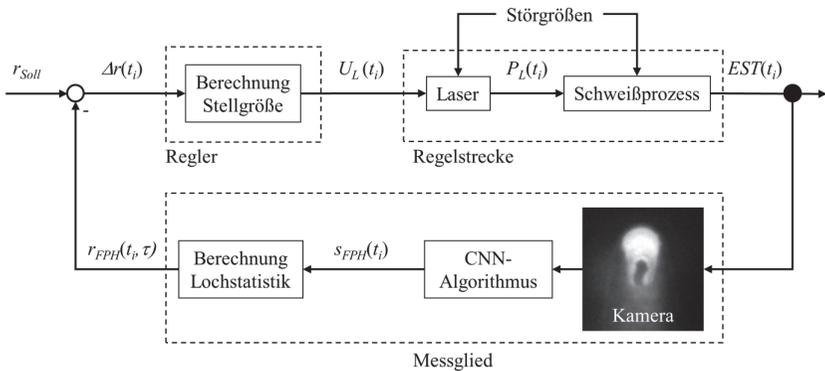


Bild 5.11: Wirkungsplan des geschlossenen Regelkreises für die geregelte Durchschweißung. Die Durchschweißlochrate r_{Soll} ist die Führungsgröße, $r_{FPH}(t_i, \tau)$ die Rückführung und $\Delta r(t_i)$ die Regelabweichung. Der Regler erzeugt die allgemeine Stellgröße beziehungsweise Steuerspannung $U_L(t_i)$, die durch das Stellglied (Laser)³⁵ in die Stellgröße $P_L(t_i)$ umgewandelt wird. Die von Störgrößen beeinflusste Regelstrecke (Schweißprozess) reagiert darauf mit der Regelgröße Einschweißtiefe $EST(t_i)$. Das Messglied erfasst über die CNN-Kamera die Regelgröße und berechnet aus dem Messsignal $s_{FPH}(t_i)$ die Rückführung.

³⁵ Der Laser als Stellglied wird hier der Regelstrecke zugerechnet, da auch auf ihn wirkende Störgrößen durch den Regler ausgeglichen werden.

5.4.1 Messglied zur Ableitung von Mess- und Rückführungsgrößen

Die vom Schweißprozess (Regelstrecke) emittierte thermische Strahlung, welche Information über die Einschweißtiefe $EST(t_i)$ (Regelgröße) enthält, wird orts aufgelöst mit der CNN-Kamera erfasst. Mit Hilfe der in Abschnitt 5.3 beschriebenen Algorithmen zur Bildauswertung wird aus dem laufenden Schweißprozess das Durchschweißloch in Form eines Clusters weißer Pixel ermittelt und an den NIOS-Prozessor des EyeRIS-Systems übergeben.

Die direkte Messgröße ist damit die Anzahl der erzeugten weißen Pixel, die näherungsweise die Größe des Durchschweißlochs repräsentiert. Da der Laserschweißprozess, wie bereits in Abschnitt 4.4.1 gezeigt, hinsichtlich der Größe des Durchschweißloches ein nahezu binäres Verhalten aufweist, wird die Messgröße mittels eines Schwellwertes in ein binäres Signal umgewandelt. Dieses Signal repräsentiert nur noch die Zustände „Durchschweißloch“ und „kein Durchschweißloch“. Das so erzeugte zeitdiskrete Messsignal $s_{FPH}(t_i)$ nimmt für jeden Zeitschritt t_i entweder den Wert 1 oder 0 an. Da es sich bei dem Messsignal $s_{FPH}(t_i)$ um ein unstetiges Signal handelt, lässt sich zwar ein Arbeitspunkt mit der Laserleistung P_0 daraus ableiten, an dem der Übergang zur Durchschweißung liegt, es liefert jedoch keine Information darüber, wie weit der Prozess zu einem Zeitpunkt t_i von diesem Arbeitspunkt entfernt ist. Im geschlossenen Regelkreis muss also durch das Messglied aus dem direkten binären Messsignal $s_{FPH}(t_i)$ eine Messgröße abgeleitet werden, welche zur Anpassung der Stellgröße $P_L(t_i)$ verwendet werden kann, was jedoch in vorliegendem Fall, mit unstemtgem Messsignal, nicht trivial ist.

Bild 5.12 zeigt den Verlauf der Messsignale $s_{FPH}(t_i)$ zweier Messungen über der Zeit in Abhängigkeit eines rechteckförmigen Eingangssignals $P_L(t_i)$, welches zwischen 3500 W und 4750 W springt. Die beiden Messsignale zeigen das Verhalten eines binären Zufallsprozesses, der nahezu über den gesamten Verlauf, mit unterschiedlicher Wahrscheinlichkeit, beide Zustände annehmen kann. Im mittleren Bereich mit hoher Laserleistung wird häufiger ein Durchschweißloch $s_{FPH}(t_i) = 1$ erkannt, als in den Bereichen mit niedriger Laserleistung. Das bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit des Zustandes $s_{FPH}(t_i) = 1$ die eigentlich gesuchte Messgröße ist. Sie stellt ein Maß für den momentanen Durchschweißgrad des Prozesses dar.

Da eine Wahrscheinlichkeit nicht direkt gemessen werden kann, soll an dieser Stelle auf den Schar- beziehungsweise Ensemblemittelwert zurückgegriffen werden, der sich über die Durchführung mehrerer Experimente bestimmen lässt. Die Wahrscheinlich-

keit $p_{FPH}(t_i)$, nach der Definition in [88], zu einem bestimmten Zeitpunkt t_i ein Durchschweißloch zu detektieren ($s_{FPH}(t_i) = 1$), entspricht in einem ergodischen Prozess (siehe Abschnitt 5.4.2) näherungsweise der relativen Häufigkeit in Form des Scharbeziehungswerte Ensemblemittelwerts

$$q_{FPH} \equiv \frac{n_{FPH}}{n} \approx p_{FPH}(t_i). \quad (5.1)$$

Dieser bezeichnet die Anzahl Durchschweißlöcher n_{FPH} , die in n Messwerten aus $s_{FPH}(t_i)$ in einer Zeitspanne τ erkannt werden. Man erhält somit mit der relativen Häufigkeit q_{FPH} eine nicht binäre, messbare Größe, die sich als Kenngröße zur Beschreibung des Durchschweißgrades eignet.

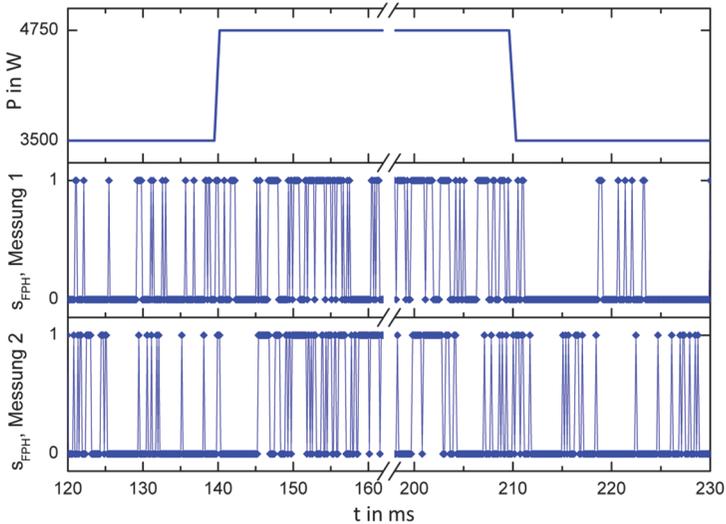


Bild 5.12: Zeitlicher Verlauf der Ausgangssignale $s_{FPH}(t_i)$ zweier Messungen zum gleichen, rechteck-förmigen Eingangssignal $P_L(t_i)$ am offenen Regelkreis [86].

In einem einzelnen kontinuierlich laufenden Schweißprozess, kann diese Kenngröße aufgrund der Ergodizität über die Bildung eines Zeitmittelwertes dargestellt werden, der dann einer Durchschweißlochrate innerhalb einer gewissen Zeitspanne entspricht. Diese Durchschweißlochrate

$$r_{FPH}(t_i, \tau) \equiv \frac{n_{FPH}(t_i, \tau)}{n(\tau)} = \frac{n_{FPH}(t_i, \tau)}{f \cdot \tau} \quad (5.2)$$

ist der Zeitmittelwert innerhalb der Zeitspanne τ , der sich analog der relativen Häufigkeit q_{FPH} berechnet. Die Durchschweißblochrate $r_{FPH}(t_i, \tau)$ entspricht somit der relativen Häufigkeit erkannter Durchschweißlöcher $n_{FPH}(t_i, \tau)$ innerhalb von τ (in welcher $n(\tau)$ Bilder mit der Frequenz f ausgewertet wurden) um den Zeitpunkt t_i , dem Zeitmittelwert. Sie ist damit die algorithmische Entsprechung der Wahrscheinlichkeit p_{FPH} .

Das Regelungskonzept beruht auf der Annahme, dass die Wahrscheinlichkeit $p_{FPH}(t_i)$ und damit auch deren Schätzwerte, die relative Häufigkeit q_{FPH} und die Durchschweißblochrate $r_{FPH}(t_i, \tau)$, von der innerhalb einer bestimmten Zeitspanne τ (Historie) in den Schweißprozess eingebrachten Prozessenergie³⁶ abhängig sind. Für eine ausführlichere Herleitung sei an dieser Stelle auf die Arbeiten [86] und [88] verwiesen.

5.4.1.1 Arbeitspunkte und Verhalten der Messgröße

Um mögliche Arbeitspunkte für die Regelung zu identifizieren wurde eine I-Naht-Überlappschweißung in $2 * 1 \text{ mm}$ verzinktes Stahlblech mit Spaltmaß $0,1 \text{ mm}$ am offenen Regelkreis durchgeführt. Die Laserleistung wurde dabei mit einem periodischen Dreieckssignal moduliert und die thermischen Bilder des Prozesses mit den Algorithmen aus den Abschnitten 5.3.1 und 5.3.2 ausgewertet. Die Laserleistung wurde zur Auswertung in diskrete Klassen unterteilt und für die zugehörigen Auswerteergebnisse die relative Häufigkeit erkannter Durchschweißlöcher q_{FPH} nach Gleichung (5.1) ermittelt.

Die Ergebnisse sind für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten in Bild 5.13 aufgetragen und zeigen die relative Häufigkeit erkannter Durchschweißlöcher q_{FPH} über der Streckenenergie. Aufgrund der guten Übereinstimmung der Messwerte für verschiedene Geschwindigkeiten, kann davon ausgegangen werden, dass der Prozesswirkungsgrad in diesem Parameterbereich nicht wesentlich von der Vorschubgeschwindigkeit abhängig ist. Messungen mit anderen Spaltbreiten zwischen $0,05 \text{ mm}$ und $0,3 \text{ mm}$ ergeben vergleichbare Ergebnisse und sind hier nicht separat aufgeführt.

Für Schweißungen in Stahl am I-Naht-Überlappstoß mit zwei Fügepartnern gehen aus Bild 5.13 drei mögliche Arbeitsbereiche hervor, die in Grün (Strichpunkt-Linie), Blau (gestrichelte Linie) und Rot (durchgezogene Linie) gekennzeichnet sind.

³⁶ Die Prozessenergie ist das Integral der Laserleistung über der Zeit abzüglich der durch Konvektion und Konduktion abgeführten Wärmeenergie.

Die rote Gerade stellt den Übergang zur vollständigen Durchschweißung dar und tritt bei jeder Schweißgeometrie auf, sofern diese eine Durchschweißung zulässt. Es wird deutlich, dass die Messgröße q_{FPH} , bei der Durchschweißung, in gewissen Grenzen linear mit der Streckenenergie zunimmt. Für Streckenenergien über 70 J/mm tritt eine Sättigung bei etwa 80% auf, wobei das Minimum bei etwa 45 J/mm nicht unter $5 - 10 \%$ fällt. Das bedeutet zum einen, dass auch bei einer vollständigen Durchschweißung, aufgrund von Kapillarfluktuationen, nicht zu jedem Zeitpunkt ein Durchschweißloch erkennbar ist; zum anderen, dass auch bei einer reinen Einschweißung vom Algorithmus Durchschweißlöcher erkannt werden. Ein Regler, der den Schweißprozess auf eine Lochrate im Bereich $15 - 70 \%$ regelt, kann somit auch den Grad der Durchschweißung (siehe Abschnitt 4.3.1) konstant halten. Beispiele für Durchschweißlöcher im eigentlichen Sinne, oberhalb von 50 J/mm , sind in Bild 5.14 in der unteren Reihe dargestellt.

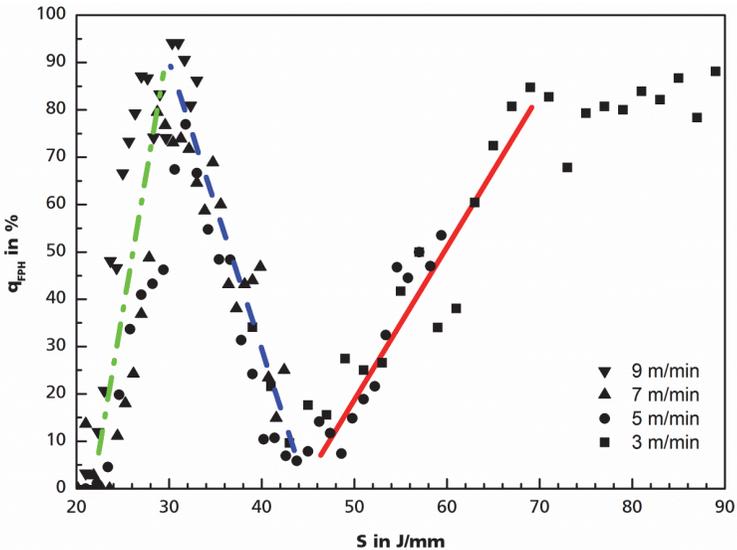


Bild 5.13: Abhängigkeit zwischen der Lochrate beziehungsweise dem Scharmittelwert q_{FPH} und Streckenenergie S für eine Schweißung am I-Naht-Überlappstoß in $2 * 1 \text{ mm}$ verzinktes Stahlblech mit einem Zinkentgasungsspalt von $0,1 \text{ mm}$.

Das Häufigkeitsmaximum bei einer Streckenenergie von 30 J/mm zwischen der grünen und der blauen Geraden repräsentiert die Situation wenn die Tiefe der Dampfkapillaren genau die halbe Stapeldicke erreicht hat und gerade der obere Fügepartner vollständig durchgeschweißt wird, die Dampfkapillare sich aber noch nicht im unteren

Fügepartner ausgebildet hat. Da am Fügespalt der Wärmefluss zwischen den beiden Blechen unterbrochen ist, ist die Oberfläche des unteren Fügepartners kälter als das Oberblech und erscheint im thermischen Bild der Kamera daher dunkler. Die grüne Gerade ist dabei der Übergang zur reinen Durchschweißung des Oberblechs, die blaue Gerade der Übergang zur Einschweißung ins Unterblech. Die blaue Gerade eignet sich daher grundsätzlich als Arbeitsbereich für eine Regelung der Einschweißung am I-Naht-Überlappstoß. Einige Beispielbilder für Durchschweißlöcher am Fügespalt zwischen 30 J/mm und 45 J/mm werden in Bild 5.14 in der oberen Reihe gezeigt.

Einschränkungen für die Regelung auf der blauen Geraden ergeben sich bei langsamen Vorschubgeschwindigkeiten aufgrund der Asymmetrie des Wärmeflusses zwischen den Fügepartnern. Bewegt sich die Regelung auf der blauen Geraden mit steigender Streckenenergie, so wird ein Durchschweißloch am Fügespalt sichtbar sein. Bewegt sich die Regelung jedoch mit fallender Streckenenergie, so muss das noch heiße Unterblech erst deutlich an Temperatur verlieren, bevor wieder ein Durchschweißloch erkannt werden kann. Im hier vorliegenden Fall mit $2 * 1 \text{ mm}$ verzinktem Stahl, liegt die praktische Untergrenze für die Regelbarkeit bei Vorschüben zwischen 3 m/min und 5 m/min . Für eine ausführliche Diskussion dieses Sachverhaltes sei an dieser Stelle auf die Arbeiten [86] und [88] verwiesen.

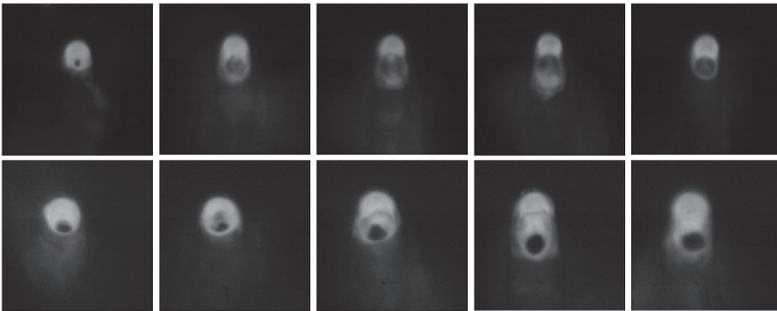


Bild 5.14: Obere Reihe: Beispiele für „Durchschweißlöcher“ in Stahl am Fügespalt bei der geregelten Einschweißung. Untere Reihe: Beispiele für Durchschweißlöcher bei einer vollständigen Durchschweißung [116].

5.4.2 Regler und Regelstrategie

Im Prinzip vergleicht der Regler die gemessene Durchschweißlochrate $r_{FPH}(t_p, \tau)$ mit einer Führungsgröße r_{Soll} und berechnet aus der Regelabweichung $\Delta r(t_i)$ die allgemeine Stellgröße in Form einer Steuerspannung $U_L(t_i)$ für den Laser. Das Stellglied des Re-

gelkreises, der Bearbeitungslaser, erzeugt aus der Steuerspannung die letztendliche Stellgröße $P_L(t_i)$, mit der die Regelstrecke (Schweißprozess) beaufschlagt wird.

Wie in den vorangegangenen Abschnitten deutlich gemacht wurde, handelt es sich beim geregelten Laser-Tiefschweißen um einen stochastischen, nichtlinearen Prozess. Weiter konnte in [86] und [88] gezeigt werden, dass es sich hierbei um einen ergodischen Prozess handelt, der bei einer Sprungfunktion der Stellgröße erst nach einiger Zeit (etwa 10 ms) stationäres Verhalten aufweist. Die Ergodizität ist für die Regelung, mittels Betrachtung einer begrenzten Prozesshistorie (Häufigkeit von Durchschweißlöchern in den letzten n Bildern), eine wichtige Eigenschaft. Sie erlaubt es aus der Mittelwertbildung einer begrenzten Historie der Messgröße - dem Scharmittelwert -, auf den Zeitmittelwert des gesamten stationären Prozesses zu schließen, und damit erst die in den Gleichungen (5.1) und (5.2) beschriebene Konversion des Messsignals s_{FPH} in die Messgröße q_{FPH} beziehungsweise r_{FPH} .

Es gilt also eine Regelstrategie zu entwerfen, die den wichtigsten Eigenschaften des Lasertiefschweißprozesses im Falle der Durchschweißung gerecht wird. Diese sind im Einzelnen:

- Binäres Messsignal s_{FPH} .
- Ergodischer, schwach stationärer³⁷ Prozess.
- Statisch lineares Verhalten der Messgröße q_{FPH} zur Stellgröße P_L .
- Dynamisch nichtlineares Zeitverhalten bei sprunghaften Änderungen.

Zur Erreichung dieser Ziele wurde ein zweistufiger Regelkreis definiert, der eine schnelle zeitliche Komponente mit einer langsameren ansteigsbegrenzenden Komponente kombiniert. Die schnelle Komponente sorgt dafür, dass kleine Prozessschwankungen, innerhalb des stationären Prozesses, schnell kompensiert werden können, die langsame ansteigsbegrenzende Komponente verhindert Instabilitäten, die durch das dynamisch nichtlineare Zeitverhalten des Prozesses hervorgerufen werden können und macht die Regelung robust.

Der *schnelle innere Regelkreis*, für den stationären Prozess mit linearem Verhalten, verwendet als Rückführungsgröße die vom Messglied erzeugte Durchschweißlochrate in Form des Zeitmittelwertes r_{FPH} .

³⁷ Für einen schwach stationären Prozess gilt, dass der Erwartungswert konstant ist, die Varianz endlich und die Autokovarianz stabil gegenüber Verschiebungen ist [117].

Die Funktion des Algorithmus des inneren Regelkreises besteht nun darin, die Stellgröße Laserleistung um eine negative Schrittweite ΔP_- zu reduzieren, sobald ein Durchschweißloch erkannt wird ($s_{FPH}(t_i) = I$) und umgekehrt um eine positive Schrittweite ΔP_+ zu erhöhen, wenn kein Durchschweißloch mehr erkannt wird. Dieser Algorithmus führt, beim stationären Prozess, automatisch zu einem Gleichgewicht der mittleren Laserleistung in einem festen Arbeitspunkt. Die Gleichgewichtsbedingung für große³⁸ Zeitspannen ergibt sich zu:

$$r_{FPH} \cdot \Delta P_- = (1 - r_{FPH}) \cdot \Delta P_+ \quad (5.3)$$

Die linke Seite der Gleichung (5.3) entspricht der Rückgangsgeschwindigkeit der Stellgröße, während die rechte Seite der Gleichung der Anstiegsgeschwindigkeit der Stellgröße entspricht.

Aus dieser Gleichgewichtsbedingung folgt der Sollwert (Führungsgröße) r_{Soll} für die Durchschweißlochrate beziehungsweise relative Häufigkeit von Durchschußlöchern. Für die steigende rote Flanke am Übergang zur Durchschweißung aus Bild 5.13 ergibt sich in Abhängigkeit der Schrittweiten ΔP_+ und ΔP_- die Führungsgröße

$$r_{Soll} \Big|_{\text{steigend}} = \frac{\Delta P_+}{\Delta P_+ + \Delta P_-} \quad (5.4)$$

In einem vollständig stationären Prozess sollte in diesem Arbeitspunkt die Durchschweißlochrate r_{Soll} mit der Messgröße q_{FPH} beziehungsweise $r_{FPH}(t_i, \tau)$ bei der mittleren Laserleistung übereinstimmen.

Dieser Algorithmus lässt sich auch auf die fallende blaue Flanke aus Bild 5.13 anwenden, um eine geregelte Einschweißung zu erzielen. Es muss hierfür lediglich genau entgegengesetzt reagiert werden und im Falle eines erkannten Durchschweißlochs die Laserleistung um die Schrittweite ΔP_+ erhöht werden und im entgegengesetzten Fall die Leistung um ΔP_- reduziert werden. Da auch in der Gleichgewichtsbedingung (5.3) die Schrittweiten ΔP_+ und ΔP_- vertauscht werden müssen ergibt sich für die fallende Flanke der Sollwert

$$r_{Soll} \Big|_{\text{fallend}} = \frac{\Delta P_-}{\Delta P_+ + \Delta P_-} \quad (5.5)$$

³⁸ „Groß“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass innerhalb dieser Zeitspanne mehrere Oszillationen der Laserleistung stattfinden, wie sie in Bild 5.15 dargestellt sind.

Dieser innere Regelkreis ergibt also ein System, bei dem die resultierende Laserleistung automatisch um genau den Arbeitspunkt herum oszilliert, an dem die entsprechende Durchschweißblochrate r_{Soll} (*steigend* beziehungsweise *fallend*) entsteht. Dieser innere Kreis reagiert sehr schnell (innerhalb der Reaktionszeit des Schweißprozesses) auf äußere Störungen, unterliegt jedoch prinzipiell periodischen Schwankungen der Laserleistung, aufgrund der Nichtlinearität und Trägheit des Schweißprozesses [86], wie es in Abschnitt 5.4.3.1 beschrieben ist.

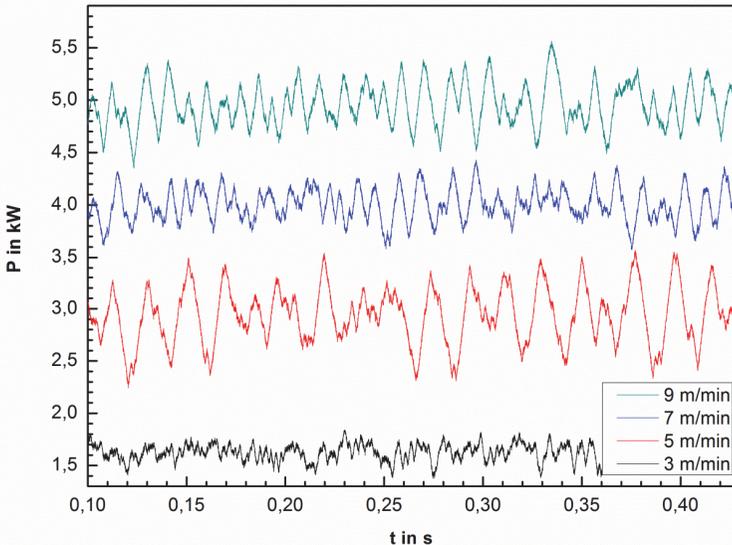


Bild 5.15: Geregelte Durchschweißung an $2 * 0,7 \text{ mm}$ verzinktem Stahlblech mit $0,1 \text{ mm}$ Fügspalt, bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten [86].

Diese periodischen Schwankungen sind in Bild 5.15 für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Oszillationen in Amplitude und Frequenz von der Vorschubgeschwindigkeit abhängen und einen Leistungsbereich von bis zu $\pm 500 \text{ W}$ überdecken. Die dominierende Frequenz steigt im Bereich $5 - 9 \text{ m/min}$ quasi-linear mit der Vorschubgeschwindigkeit von etwa 55 Hz auf 95 Hz . Lediglich sehr langsame Vorschubgeschwindigkeiten fallen aus dieser Gesetzmäßigkeit heraus.

Die Aufgabe des *äußeren langsameren Regelkreises* ist es nun, diese Überschwinger der Stellgröße durch eine definierte Begrenzung der Anstiegsgeschwindigkeit der Laserleistung zu begrenzen. Hierzu wird aus der Historie der Stellgröße abgeleitet, ob

sich der Prozess in der Nähe des Arbeitspunktes befindet oder nicht. Es wird zu diesem Zweck ein Leistungsband mit einer oberen und unteren Grenze (Typisch $\pm 100 \text{ W}$) um den aktuellen Arbeitspunkt herum definiert, in welchem sich die Stellgröße mit der vollen Regelgeschwindigkeit des inneren Kreises verändern darf. Stößt die Oszillation hingegen über eine definierte Zeit ununterbrochen an der oberen oder unteren Grenze an, wird das zulässige Leistungsband um eine Schrittweite ΔP_0 in die entsprechende Richtung angepasst.

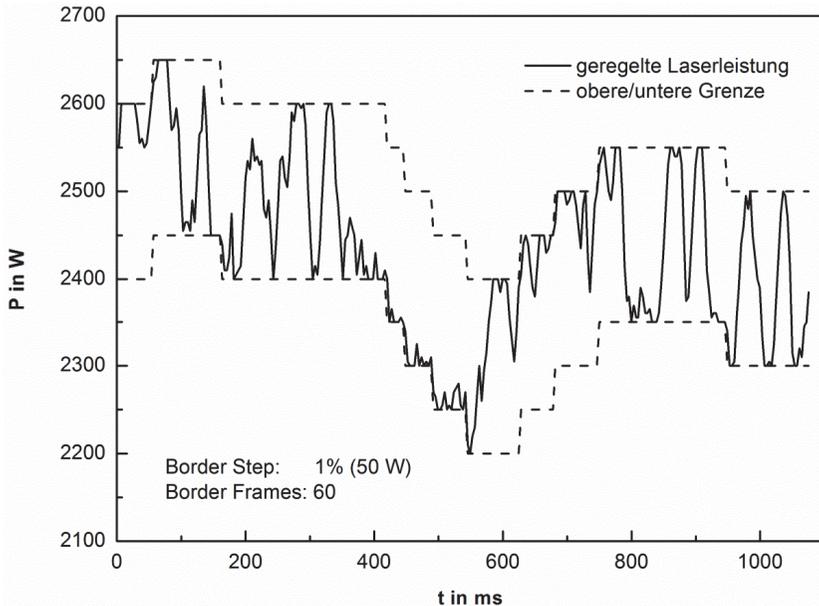


Bild 5.16: Verlauf der Laserleistung (durchgezogene Kurve) und der oberen und unteren Leistungsgrenzen (gestrichelte Kurven) für das zulässige Leistungsband des äußeren Regelkreises. $2 \times 0,9 \text{ mm}$ verzinktes Stahlblech mit $0,1 \text{ mm}$ Füge-spalt, bei 3 m/min Vorschub.

In Bild 5.16 wird das Verhalten des äußeren Regelkreises anhand eines Beispiels veranschaulicht. Die Regelung startet bei $t = 0 \text{ ms}$ mit einer Startleistung von $P_0 = 2.550 \text{ W}$. Das zulässige Leistungsband beträgt $\pm 100 \text{ W}$ und kann mit der Schrittweite $\Delta P_0 = 50 \text{ W}$ (Border-Step) angepasst werden, sobald die Laserleistung für eine gewisse Zeit beziehungsweise eine gewisse Anzahl ausgewerteter Kamerabilder $N_{max} = 60$ (Border-Frames) an einer der Grenzen anstößt. Solange der Prozess in einem stationären Zustand läuft ($t = 200 \text{ ms}$ bis $t = 400 \text{ ms}$) kann die Stellgröße mit der

vollen Geschwindigkeit des inneren Regelkreises angepasst werden. Bei $t = 400 \text{ ms}$ tritt eine Veränderung der Umgebungsbedingungen ein, die zu einem niedrigeren Arbeitspunkt führt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Stellgröße in diesem Fall nicht mit der hohen Geschwindigkeit des inneren Regelkreises abgesenkt wird. Der äußere Regelkreis begrenzt die Absenkungsgeschwindigkeit der Laserleistung auf einen Leistungsschritt $\Delta P_0 = 50 \text{ W}$ alle 60 Zyklen. Ab $t = 550 \text{ ms}$ setzt wieder eine freie Oszillation der Stellgröße ein. Zwischen $t = 650 \text{ ms}$ und $t = 800 \text{ ms}$ erfolgt dieselbe Begrenzung der Anstiegsgeschwindigkeit in positiver Richtung, bis ab $t = 800 \text{ ms}$ wieder eine freie Oszillation der Stellgröße um einen neuen Arbeitspunkt herum erfolgt.

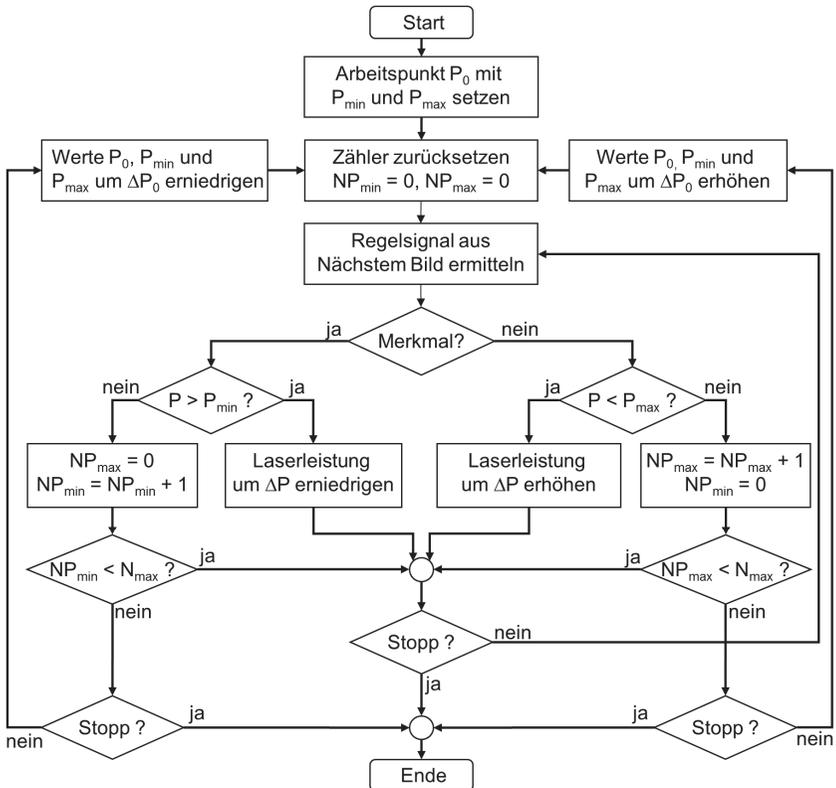


Bild 5.17: Ablaufdiagramm des zweistufigen Regelkreises aus dem Patent DE 10 2010 013 914 [118].

Das Ablaufdiagramm in Bild 5.17 zeigt den implementierten Regelalgorithmus aus der Patentanmeldung DE 10 2010 013 914 mit dem schnellen inneren und dem langsamen äußeren Regelkreis, der beim Erreichen der oberen oder unteren Grenze des zulässigen Leistungsbandes den Arbeitspunkt P_0 , sowie die Grenzwerte P_{min} und P_{max} anpasst. Zu Beginn der Regelung wird der Arbeitspunkt P_0 initialisiert sowie die Zähler NP_{max} und NP_{min} für die maximale Anzahl Bilder, in denen P_{max} beziehungsweise P_{min} erreicht werden darf, auf *Null* gesetzt. Innerhalb der Regelschleife wird das Regelsignal in Form des Bildmerkmals Durchschweißloch durch den CNN-Chip ausgewertet. Ist kein Durchschweißloch erkennbar und ist die Laserleistung P kleiner als der obere Grenzwert P_{max} , wird die Stellgröße Laserleistung um eine feste Schrittweite ΔP erhöht. Ist der obere Grenzwert P_{max} bereits erreicht, wird der Zähler NP_{max} um eins erhöht. Hat der Zähler NP_{max} seinen Maximalwert erreicht, wird sowohl der Arbeitspunkt als auch die Grenzwerte P_{min} und P_{max} um eine feste Schrittweite ΔP_0 erhöht und der Algorithmus beginnt von neuem. Wäre N_{max} in diesem Schleifendurchlauf noch nicht erreicht gewesen, würde die Stellgröße P für diesen Schleifendurchlauf auf dem Maximalwert P_{max} belassen. Dasselbe Funktionsschema gilt umgekehrt für den Fall, dass ein Durchschweißloch erkannt wird. Es wird dann der linke Zweig des Ablaufdiagramms in analoger Weise durchlaufen und die Stellgröße P entsprechend reduziert [118]. Um den gewünschten Arbeitspunkt gemäß den Gleichungen (5.4) und (5.5) frei einstellen zu können, kann anstelle eines einheitlichen ΔP , für die Leistungserhöhung ΔP_+ und für Leistungsreduzierung ΔP_- ein jeweils unterschiedlicher Werte festgelegt werden.

5.4.3 Regelstrecke

Die Regelstrecke besteht aus der Gesamtheit der Komponenten gemäß Bild 5.11, die sich zwischen dem Regler und dem Messglied befinden. Sie umfasst somit sowohl den Laserschweißprozess, als auch den Bearbeitungslaser selbst, der als Stellglied die allgemeine Stellgröße $U_L(t_i)$ in die Stellgröße $P_L(t_i)$ umwandelt. Dies wiederum bedeutet, dass sowohl Störgrößen auf den Schweißprozess selbst ausgeglichen werden, als auch Störgrößen, die die Strahlquelle, den Strahltransport sowie die Strahlformung betreffen.

Im Folgenden werden Störgrößen auf die Strahlquelle sowie den Strahltransport und die Strahlformung nicht weiter betrachtet, da diese regelmäßig quasi-statischer Natur sind, beziehungsweise sich nur langsam verändern.

5.4.3.1 Verhalten der Regelstrecke

Es wurde bereits in Abschnitt 5.4.2 darauf hingewiesen, dass der Laserschweißprozess einer gewissen Nichtlinearität und Trägheit unterworfen ist. Wird der Schweißprozess mit einem frei laufenden Regler geregelt, so ergeben sich charakteristische Oszillationen der Laserleistung um den Arbeitspunkt herum, die in Bild 5.15 dargestellt sind. Die Amplitude und Frequenz der Leistungsoszillation ist dabei offenkundig abhängig von der Vorschubgeschwindigkeit. Bei sehr niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten verschwindet die charakteristische Oszillation und geht in ein chaotisches Rauschen über. In weiteren Untersuchungen konnte ebenfalls beobachtet werden, dass hin zu größeren Blechstärken ein zunehmend chaotisches Schwingungsmuster zu Tage tritt, bei dem die charakteristischen Oszillationen mehr und mehr verschwinden. Für Blechstärken weniger als $2 * 1,5 \text{ mm}$ und Vorschübe größer 3 m/min ist dieses Oszillationsverhalten jedoch deutlich ausgeprägt.

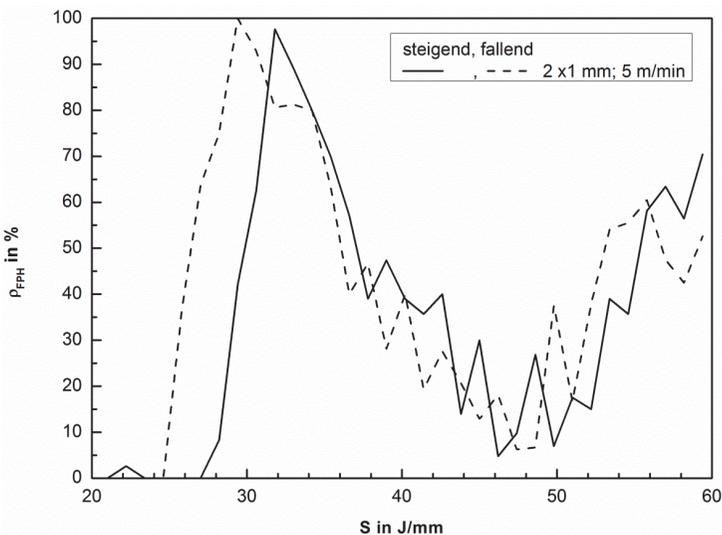


Bild 5.18: Wahrscheinlichkeit p_{FPH} ein Durchschweißloch zu detektieren über der Streckenenergie S , aufgeteilt nach steigender und fallender Streckenenergie. Der Versuch wurde durchgeführt mit $2 * 1 \text{ mm}$ verzinktem Stahlblech bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 m/min .

Die zugrunde liegende Hysterese des Schweißprozesses kann auch an der Lochwahrscheinlichkeit p_{FPH} abgelesen werden. Bild 5.18 zeigt die Wahrscheinlichkeit p_{FPH} aufgeteilt nach steigender Streckenenergie und fallender Streckenenergie. Es zeigt sich

deutlich, dass bei einer Erhöhung der Streckenenergie (steigend), die Änderung der Lochwahrscheinlichkeit erst bei deutlich höheren Streckenergien stattfindet, als bei einer Reduktion der Streckenenergie (fallend). Diese Hysterese führt im Falle einer Regelung zwingend zu einer Oszillation der Laserleistung.

Typische Zeitkonstanten für die Trägheit lassen sich aus der Fourier-Transformation der Leistungskurven in Bild 5.15 abschätzen. Die vorherrschenden Frequenzen liegen zwischen 25 Hz und 125 Hz , was Periodendauern zwischen 8 ms und 40 ms entspricht. Für die Totzeit zwischen dem Erscheinen des Durchschweißloches und seinem Verschwinden kann in guter Näherung die halbe Schwingungsperiode, also 4 ms bis 20 ms , angesetzt werden [85].

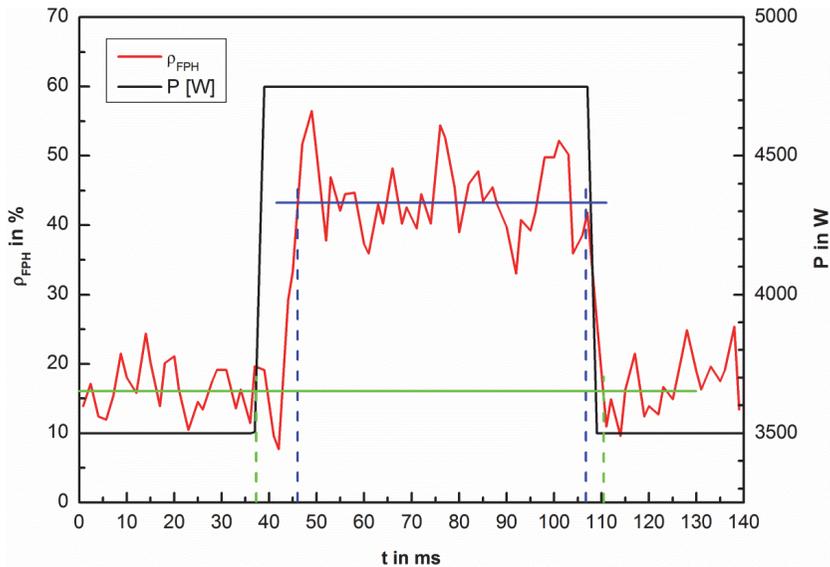


Bild 5.19: Zeitliche Änderung der Wahrscheinlichkeit eines Durchschweißloches als Prozessantwort auf ein Rechtecksignal der Laserleistung. Der Versuch wurde durchgeführt mit $2 * 1\text{ mm}$ verzinktem Stahlblech bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 m/min .

Diese Zeiten konnten auch durch einen Test der Prozessantwort auf ein aufgeprägtes Rechtecksignal der Laserleistung bestätigt werden, dessen Ergebnis in Bild 5.19 dargestellt ist. Die Lochwahrscheinlichkeit p_{FPH} folgt dem positiven Sprung der Laserleistung mit einer Verzögerung von etwa 10 ms , während sie dem negativen Sprung um lediglich etwa 4 ms verzögert folgt.

Die genaue Ursache für diese Hysterese konnte im Rahmen des Projektes nicht abschließend geklärt werden. Eine mögliche Hypothese für die hier beobachtete Trägheit des Systems kann jedoch aus der Wärmekapazität des thermischen Fließgleichgewichts und der Oberflächenspannung, welche der Öffnung des Durchschweißloches entgegen wirkt, abgeleitet werden.

Gemäß [119] verändert sich die Oberfläche des Kapillargrundes beim Übergang von der Einschweißung zur Durchschweißung von halbkugelförmig zu halb-Torus-förmig, siehe hierzu Bild 5.20. Da die Oberfläche des Halbtorus im Vergleich zur Halbkugel um 12 % größer ausfällt, wird für diesen Übergang aufgrund der Oberflächenspannung zusätzliche Energie benötigt. Dieser Effekt kann die verzögerte Reaktion des Schweißprozesses auf eine Steigerung der Laserleistung an diesem Übergang erklären. Die bei vollständiger Durchschweißung in der Oberflächenspannung des Halbtorus gespeicherte Energie muss bei sinkender Laserleistung wieder freigesetzt werden, sobald sich der Kapillargrund wieder zu einer Halbkugel verschließt. Diese freigesetzte Energie, welche sich zur momentan eingebrachten Laserleistung addiert, könnte nun bei sinkender Laserleistung dafür sorgen, dass über einen längeren Zeitraum trotzdem eine erhöhte Lochwahrscheinlichkeit besteht, die zu einem Absinken der geregelten Laserleistung bis weit unterhalb des Arbeitspunktes führt.

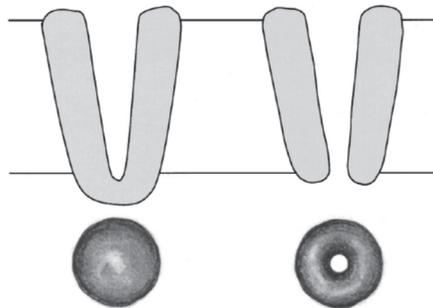


Bild 5.20: Situation der sich öffnenden Kapillare beim Übergang von der Einschweißung zur Durchschweißung. Links: Halbkugelförmiger Kapillargrund bei der Einschweißung. Rechts: Halbtorus-förmiger Kapillargrund im Falle der Durchschweißung [119].

Diese Hypothese kann mit den vorliegenden Daten jedoch nicht abschließend bestätigt werden und bedarf in Zukunft einer tiefergehenden Untersuchung.

5.4.3.2 Abschätzung der minimalen Abtastfrequenz

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt 5.4.2 dargelegt wurde, führt eine Regelung des Laserschweißprozesses auf Basis des Durchschweißloches zu einem Prozess mit oszillierender Laserleistung um einen Arbeitspunkt herum.

Die minimal notwendige Abtastfrequenz beziehungsweise Regelfrequenz für eine stabile Regelung kann anhand einer maximal zulässigen Unsicherheit der Messgröße hergeleitet werden, wobei im Folgenden n die Anzahl Messungen und p_0 die Wahrscheinlichkeit kein Durchschweißloch zu erkennen, bezeichnet. Die Standardabweichung

$$\sigma_{BIN} = \sqrt{n p_0 (1 - p_0)} \quad (5.6)$$

beziehungsweise deren Varianz σ_{BIN}^2 der Binomialverteilung von $s_{FPH}(t_i)$ kann als Maß für die Unsicherheit der in Gleichung (5.1) definierten Messgröße q_{FPH} angesehen werden.

Die Unsicherheit der Messgröße q_{FPH} in Form ihrer Standardabweichung σ_{FPH} ergibt sich daraus, wie auch bei Blug in [88] nachzulesen ist, zu

$$\sigma_{FPH} = \frac{\partial q_{FPH}}{\partial n_{FPH}} \sigma_{BIN} = \sqrt{\frac{p_0 (1 - p_0)}{n}} \approx \sqrt{\frac{q_{FPH} (1 - q_{FPH})}{n}}. \quad (5.7)$$

Gemäß Gleichung (5.7) sinkt die Varianz von q_{FPH} mit der Anzahl n an Messungen. Das bedeutet wiederum, dass mit einem Bildverarbeitungssystem, welches innerhalb der Reaktionszeit des Schweißprozesses möglichst viele Bilder verarbeiten kann, deutlich geringere Fluktuationen in der Regelung zu erwarten sind.

Die Reaktionszeit des Schweißprozesses kann in erster Näherung durch die Zeitspanne $\tau_{dv} = d_f / v$ abgeschätzt werden, welche ein Laserstrahl mit dem Durchmesser d_f benötigt, um sich mit dem Vorschub v über einen Punkt des Werkstücks vollständig hinweg zu bewegen [120]. Im Fall einer abrupten Leistungsänderung kann frühestens nach Ablauf dieser Zeitkonstanten wieder eine vollständige Stationarität des Prozesses erreicht werden. Bei einem Strahldurchmesser $d_f = 600 \mu\text{m}$ und einem Vorschub $v = 9 \text{ m/min}$ beträgt $\tau_{dv} = 4 \text{ ms}$. Prozesse des Energietransports innerhalb der Schmelze können jedoch deutlich schneller ablaufen. Die Strömungsgeschwindigkeit der Schmelze kann beispielsweise die Vorschubgeschwindigkeit v um den Faktor 10 übersteigen, wie bei den röntgendiagnostischen Versuchen in Abschnitt 3.4.3.3 gezeigt werden konnte. Daher kann ein quasi-stationärer Zustand auch schon früher erreicht

werden. Die Reaktionszeiten des Lasersystems und der CNN-Kamera liegen hingegen im Bereich von etwa $100 \mu\text{s}$ und sind somit vernachlässigbar [86].

Fordert man, dass die Wahrscheinlichkeit p_{FPH} innerhalb der Reaktionszeit τ_{dv} einer maximalen Varianz σ_{max} unterliegt, dann kann aus der Anzahl n , gemäß Gleichung (5.7), notwendiger Messungen eine minimale Bildrate

$$f_{\min} = \frac{n}{\tau_{dv}} = \frac{p_{FPH}(1-p_{FPH})}{\tau_{dv}\sigma_{\max}^2} \quad (5.8)$$

berechnet werden. Für eine Wahrscheinlichkeit $p_{FPH} = 0,5$, eine Reaktionszeit $\tau_{dv} = 4 \text{ ms}$ und einer Varianz $\sigma_{\max}^2 = 0,01$ folgt nach (5.8) eine minimale Bildrate $f_{\min} = 6,25 \text{ kHz}$ [86]. Erst wenn diese Abtastfrequenz erreicht wird, stehen genügend Messwerte zur Verfügung, um innerhalb der Reaktionszeit τ_{dv} des Prozesses eine hinreichend präzise Bewertung des Prozesszustandes sicherstellen zu können.

5.5 Prototyp-Entwicklung

Im Folgenden soll die Entwicklung eines Prototyps für die Regelung industrieller Schweißprozesse beschrieben werden. Bild 5.21 zeigt eine Schemazeichnung des Gesamtsystems bestehend aus Anlagen- und Lasersteuerung, Bearbeitungslaser und Schweißkopf, sowie der Kameraoptik und der CNN-Steuerung mit angeschlossenem Leitrechner [86].

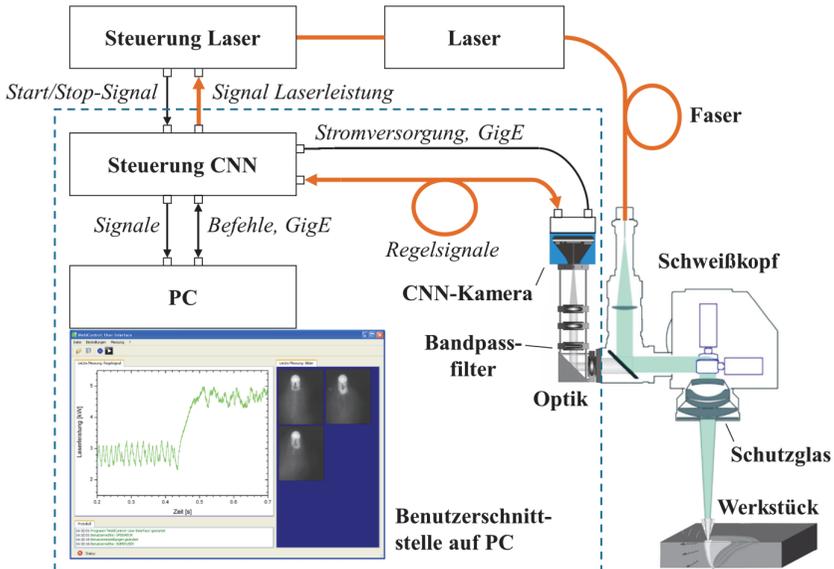


Bild 5.21: Strukturübersicht über das ACES-Regelsystem (gestrichelter Kasten) und seine Integration in die Schweißanlage. Der Regelkreis ist orange hervorgehoben [86].

5.5.1 Kameraoptik

Die neu konstruierte und in Bild 5.22 dargestellte Kameraoptik basiert auf einem Abbildungskonzept mit realem Zwischenbild, bei dem über eine Primärlinse (Achromat NIR, $f_{pri} = 160 \text{ mm}$) und die Fokussierlinse f_{oc} des Bearbeitungskopfes die Größe eben dieses Zwischenbildes festgelegt wird. Das Zwischenbild wird anschließend über ein verstellbares Zoommodul (Verstellbereich $\beta_{Zoom} = 0,5$ bis $2,0$ -fach) kombiniert mit einem Teleskop aus den Brennweiten $f_{z1} = 25 \text{ mm}$ und $f_{z2} = 100 \text{ mm}$ auf die Kamera

abgebildet. Zur Erweiterung des möglichen Vergrößerungsbereichs können zusätzlich Telekonverter mit Vergrößerungsfaktoren $\beta_{con} = 1,5$ und $\beta_{con} = 2,0$ vor der Kamera montiert werden.

Der Durchmesser des Laserfokus d_f - welcher letztlich die Größe der Bearbeitungszone bestimmt - auf dem Werkstück wird dabei mit der Größe

$$d_{Cam} = \beta_{con} \cdot \beta_{Zoom} \Big|_{0,5x}^{2x} \cdot \frac{f_{Z2}}{f_{Z1}} \cdot \frac{f_{pri}}{f_{foc}} \cdot d_f \quad (5.9)$$

auf den Kamerachip abgebildet. Die Konstruktion ermöglicht einen effektiven Brennweitenbereich der Kameraoptik von $f_{eff} = 320 \text{ mm}$ bis 2.500 mm .

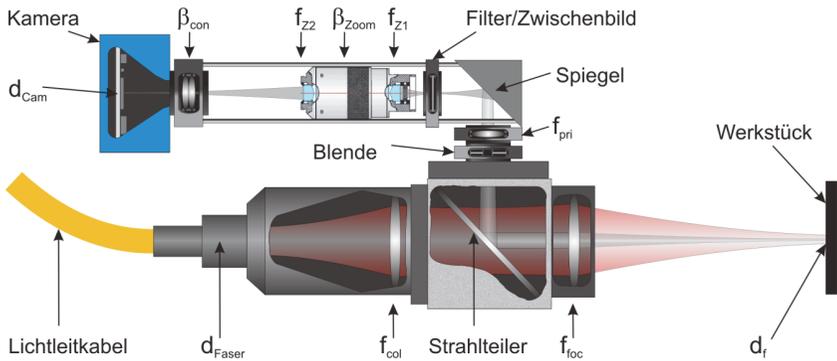


Bild 5.22: Schemazeichnung der neu entwickelten kompakten Kameraoptik mit Zoomfunktion, montiert an einer Bearbeitungsoptik mit Faserzuführung des Laserstrahls.

Der Durchmesser des Laserfokus auf dem Werkstück

$$d_f = \frac{f_{foc}}{f_{col}} \cdot d_{Faser} \quad (5.10)$$

hängt ausschließlich vom Durchmesser des Faserkerns, der Kollimationsbrennweite und der Fokussierbrennweite ab.

Der Einsatzbereich der Kameraoptik ergibt sich demzufolge nur noch aus der verwendeten Kollimationsbrennweite und dem Faserkerndurchmesser, die beide letztendlich die Größe der Prozesszone bestimmen. Die Brennweite der Fokussierlinse hingegen, hat keinen Einfluss auf das Gesamtsystem, da sie gemäß den Gleichungen (5.9) und

(5.10) in exakt gleichem Maße den Fokusbrenndurchmesser und die Kameraabbildung beeinflusst und sich somit aus der Gesamtbetrachtung in Gleichung (5.11) herauskürzt.

Für die Prozessregelung wird gefordert, dass der Fokusbrenndurchmesser auf dem Werkstück mit einer Größe zwischen 20 und 35 Pixeln , bei einem Pixel-Pitch von $33 \mu\text{m}$, auf den Kamerachip abgebildet wird, was einem Durchmesser

$$d_{Cam} = \beta_{con} \cdot \beta_{Zoom} \Big|_{0,5x}^{2x} \cdot \frac{f_{Z2}}{f_{Z1}} \cdot \frac{f_{pri}}{f_{col}} \cdot d_{Faser} \quad (5.11)$$

zwischen $d_{Cam} = 660 \mu\text{m}$ und $1.155 \mu\text{m}$ auf dem Kamerachip gleich kommt. Tabelle 5.2 zeigt welche Kombinationen aus Kollimationsbrennweite und Faserkerndurchmesser, gegebenenfalls unter Verwendung von Telekonvertern, von der Kameraoptik abgedeckt werden können. Die grünen Felder bedeuten, dass der gesamte geforderte Größenbereich von 20 bis 35 Pixeln erreichbar ist. Gelb bedeutet, dass ein Teil des geforderten Bereichs nicht erreicht werden kann, wobei der Vermerk in der Zelle anzeigt, welche Einschränkung besteht. Eine rote Zelle zeigt an, dass die Abbildung in keinem Fall die geforderte Größe erreichen kann, wobei der Vermerk in der Zelle den erzielbaren Größenbereich anzeigt.

		Kollimationsbrennweite		
		100mm	150mm	200mm
Faserkern	100 μm			
	200 μm			
	400 μm	>35px	>25px	
	600 μm	>55px	>35px	>25px

Tabelle 5.2: Erreichbare Kombinationen aus Faserkerndurchmesser und Kollimationsbrennweite. Grün bedeutet, dass alle geforderten Abbildungsgrößen ($20 \text{ px} - 35 \text{ px}$) bei dieser Kombination erreichbar sind. Gelb bedeutet, dass diese teilweise erreichbar sind und rot nicht zu erreichen. Zusätzlich ist vermerkt, welche Mindestgröße die Abbildung des Laserfokus auf der Kamera hat.

Mit dem austauschbaren Spektralfilter in der Zwischenbildebene des Objektivs wird der Wellenlängenbereich auf das nahe Infrarot eingeschränkt. Bei den meisten Versuchen, insbesondere bei niedriglegierten Stählen, wurde ein Bandpassfilter mit einem Transmissionsbereich von 820 nm bis 980 nm verwendet, der im späteren Verlauf des Projekts durch einen lichtstärkeren Bandpassfilter $905\text{-}50 \text{ nm}$ (Typ: bk-905-50-B) ersetzt wurde. Die Auswahl des Interferenzfilters basiert dabei maßgeblich auf den Erkenntnissen der Spektraluntersuchungen die in Abschnitt 2.4 zusammengefasst sind.

Bild 5.23 zeigt den realisierten mechanischen Aufbau des ACES-Kompaktobjektivs, links an einer Trumpf BEO-D70 und rechts an einer Trumpf PFO-33. Der Laserschweißprozess wird dabei durch die Fokussierlinse der Laseroptik und die Primärlinse (1) über den Umlenkspiegel (2) in ein Zwischenbild abgebildet. Die Lichtstärke und Schärfentiefe kann über eine verstellbare Irisblende in (1) beeinflusst werden. Die spektrale Filterung erfolgt mittels einschraubbarer Filter (3). Anschließend wird das Zwischenbild über das verstellbare Zoommodul (4) auf die CNN-Kamera (5) abgebildet. Optional kann zwischen (4) und (5) ein Telekonverter eingesetzt werden.

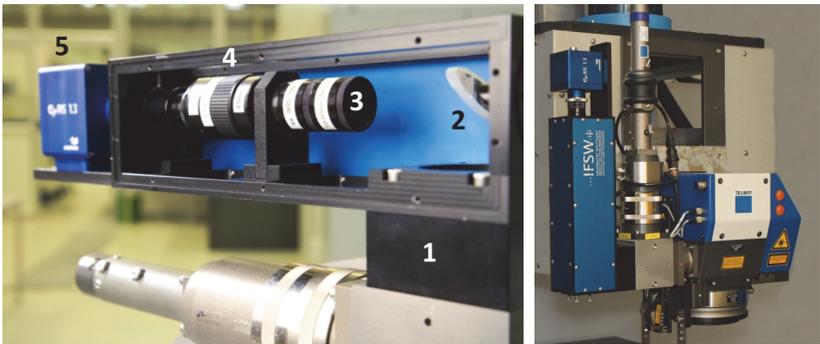


Bild 5.23: ACES-Kompaktobjektiv. Links: an einer Trumpf BEO-D70. (1) Primärlinse mit verstellbarer Iris-Blende, (2) Umlenkspiegel mit Justierfassung für die Einstellung der Bildlage, (3) Spektralfilter, (4) Zoommodul, (5) CNN-Kamera. Rechts an einer PFO-33 [86].

5.5.2 Steuerungseinheit

Die Steuerungseinheit für die CNN-Kamera übernimmt die Kommunikation zwischen CNN-Kamera, Laser- und Anlagensteuerung, sowie mit dem Steuerungs-PC. Die Kommunikation zur CNN-Kamera erfolgt über eine Ethernet-Verbindung für die Datenübertragung und über ein Lichtleitkabel für die analoge und digitale Signalübertragung. Die Steuerspannung für die Laserleistungsregelung wird direkt von der Kamera als pulsweiten-moduliertes Signal (PWM) mit einer Auflösung von 12 Bit erzeugt und von der Steuerungseinheit in ein analoges $0 - 10V$ Signal gewandelt. Zwei dieser Analogsignale sowie zwei serielle RS 232 Schnittstellen und vier digitale Ein- und Ausgänge werden bidirektional über die optische Faser übertragen. Die Signalaufbereitung erfolgt in einem Xilinx Spartan 3 FPGA mit 60 MHz Taktrate. Die Steuerungseinheit dient gleichzeitig als Schnittstelle zu einem Steuerungs-PC, der über ein Gigabit-

Ethernet-Interface (GigE), für Diagnosezwecke Bilder, sowie die Soll-/Ist-Werte der Regel- und Steuerungssignale erfassen kann.

Auf dem Steuerungs-PC läuft eine Software, die als Benutzerschnittstelle dient und die CNN-Kamera steuert, sowie sämtliche Signale protokolliert, die in der Steuerungseinheit zusammenlaufen. Die Signale werden über eine AD-Wandlerkarte Adlink PCI-9112 erfasst und auf der Festplatte des Rechners protokolliert [86].

5.5.3 Echtzeitsoftware auf der CNN-Kamera

Sämtliche für die Regelung verantwortlichen Algorithmen, die Echtzeitanforderungen unterliegen, sind auf dem EyeRIS v1.3 implementiert, dessen schematischer Aufbau in Bild 5.24 dargestellt ist.

Die visuelle Merkmalsextraktion - mit den Algorithmen „One-Side“ und „Omnidirectional“ - aus Abschnitt 5.3 läuft direkt auf den CNN-Prozessoren des Kamerachips (Focal-Plane Processor Array), während die Signalverarbeitung und Regelung auf dem NIOS-Prozessor implementiert ist. Im Einzelnen handelt es sich auf dem NIOS-Prozessor um die folgenden Funktionen [86]:

- Die zum Patent angemeldete Regelstrategie [118].
- Funktionen zur Aufnahme von Kennlinien von Schweißprozessen am offenen Regelkreis zur Charakterisierung der Regelstrecke.
- Funktionen zur Parameter-Optimierung der CNN-Algorithmen anhand von gespeicherten Daten.

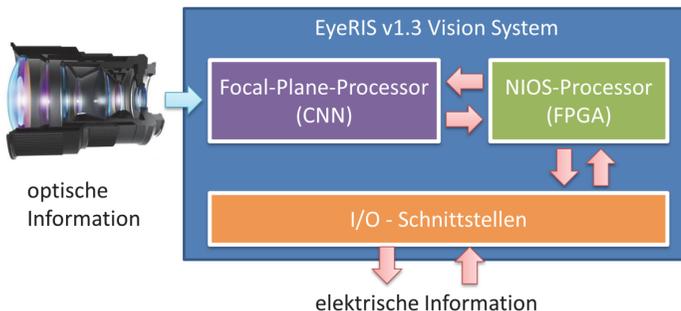


Bild 5.24: Schematischer Aufbau der EyeRis v.1.3 CNN-Kamera.

5.6 Patente

Da das ACES-Regelsystem zwei an sich bekannte Technologien, nämlich die koaxiale Prozessbeobachtung und die Technologie der Cellularen Neuronalen Netzwerke (CNN) zur Integration eines Parallelrechners in den Kamerachip kombiniert, ist eine Patentierung des physischen Aufbaus nicht möglich.

Patentierbar hingegen ist das Verfahrens-Know-How in Form der Algorithmen zur Detektion des Durchschweißloches auf dem CNN sowie die Regelstrategie. Letztere bietet gegenüber den Algorithmen den Vorteil, dass sie unabhängig von den vorgenannten Technologien ist und dass Patentverletzungen anhand der Regelsignale leichter nachgewiesen werden können. Insgesamt wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei Patente formuliert und eingereicht, die sich auf Verfahren zur kamerabasierten Prozessregelung beziehen.

Da sich die Regelstrategie der Durchschweiß- und Einschweißregelung für alle untersuchten Werkstoffe und Schweißgeometrien als universell erwiesen hat, wurde sie als zentrales Know-how unter der Nummer³⁹ DE 10 2010 013 914 am 01.04.2010 zum Patent [118] angemeldet, welches vom Deutschen Patent- und Markenamt am 31.10.2013 erteilt wurde. Des Weiteren wurde im Rahmen der Arbeit ein zweites Patent [121] unter der Nummer WO 2014/005603 A1 am 03.07.2012 eingereicht, welches Ansätze für ein Mehrgrößenregelsystem beinhaltet, die es ermöglichen das Schmelzevolumen zu beeinflussen und gleichzeitig die vorgegebene Einschweißtiefe mit Hilfe des ACES-Regelsystem konstant zu halten.

5.7 Test des Regelsystems

In den folgenden Abschnitten soll die Leistungsfähigkeit des ACES-Regelsystems anhand verschiedener Tests aufgezeigt werden. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt dabei auf Laserschweißungen am I-Naht-Überlappstoß in verzinktes Stahlblech im Dickenbereich von wenigen Millimetern, wie sie vornehmlich im Karosseriebau anzutreffen sind. Schweißversuche in Aluminium oder andere Fügegeometrien sind nicht Schwerpunkt der Untersuchungen, werden jedoch im Einzelfall angesprochen.

³⁹ Alternative PCT-Anmeldenummer: WO 2011/120672

Die Schweißversuche wurden, wenn nicht explizit anders angegeben, mittels eines Yb:YAG Scheibenlasers (Trumpf TruDisk 5001) mit einer Wellenlänge von 1.030 nm durchgeführt. Der Laserstrahl wurde über eine Transportfaser mit einem Kerndurchmesser von $200 \mu\text{m}$ ($NA = 0,1$) und eine Scanneroptik Trumpf PFO-33 mit einer Abbildung von $\beta = 450 / 150 = 3$ auf das Werkstück abgebildet, was einen Fokusedurchmesser von $600 \mu\text{m}$ ergibt.

Die Tests beschränken sich an dieser Stelle auf die praktischen Schweißversuche und deren Ergebnisse. Eine ergänzende, statistische Untersuchung der Erkennungssicherheiten und Fehlerraten innerhalb der visuellen Merkmalsextraktion der verschiedenen Algorithmen, kann den Quellen [87], [115] und [122] entnommen werden.

Falls nicht anders angegeben, wurden für die Schweißregelung einheitlich die folgenden Parameter gewählt. Border-Frames $N_{max} = 20$, Border-Step $\Delta P_0 = 305 \text{ W}$ und Schrittweite für Leistungsanpassung (innerer Regelkreis) $\Delta P = 11,7 \text{ W}$. Der Algorithmus für lineare Schweißnähte (One-Side) erreicht eine typische Bildrate von $f \approx 14 \text{ kHz}$, der Algorithmus für beliebige Orientierung (Ominidirectional) $f \approx 6 - 9 \text{ kHz}$, wie bereits in den Abschnitten 5.3.1 und 5.3.2 beschrieben wurde. Letztlich hängt die optimale Parametrierung des Regelalgorithmus vom konkreten Anwendungsfall ab.

5.7.1 Closed-Loop Regelung der Durchschweißung

Im konventionellen Fall der unregelmäßigen Durchschweißung am I-Naht-Überlappstoß wird die zum Schweißen verwendete Laserleistung, wie in Abschnitt 4.3.1 beschrieben, im Regelfall etwa 10% höher gewählt, als dies für die Erzielung der Durchschweißung nötig wäre. Dieser Sicherheitsfaktor ist notwendig, um auch bei Einwirkung von externen Störgrößen, wie beispielweise einer verschmutzten Laseroptik oder Geschwindigkeitsschwankungen des Schweißroboters, eine sichere Durchschweißung gewährleisten zu können.

Bild 5.25 zeigt eine solche auf konventionelle Art hergestellte Laserschweißnaht am I-Naht-Überlappstoß zweier verzinkter Stahlbleche. Typisch für diese Art von Schweißungen ist die starke Verunreinigung der Blechunterseite aufgrund der überhöhten Laserleistung. Diese führt zu vermehrtem Austreten von Schweißrauch und Schmelzespritzern an der Unterseite des Prozesses, die sowohl das Werkstück als auch die verwendeten Spannmittel verschmutzen. Des Weiteren treten aufgrund der Verzöger-

rung der Maschinenachsen am Ende der Schweißung üblicherweise Endkrater auf, sofern keine zusätzlichen Maßnahmen dagegen getroffen werden.



Bild 5.25: Ungeregelte Durchschweißung mit 10 % Leistungsüberschuss am I-Naht-Überlappstoß. Die Schweißparameter sind: $v = 9 \text{ m/min}$, $P = 5,5 \text{ kW}$, verzinktes Stahlblech $2 * 0,7 \text{ mm}$ mit $0,1 \text{ mm}$ Zinkentgasungsspalt [105].

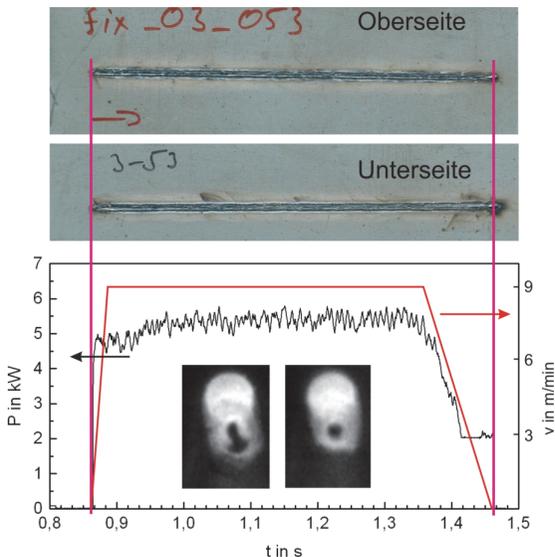


Bild 5.26: Geregelt Durchschweißung am I-Naht-Überlappstoß von $2 * 0,7 \text{ mm}$ verzinktem Stahlblech mit einem Fügespalt von $0,1 \text{ mm}$. Die Vorschubgeschwindigkeit liegt bei $v = 9 \text{ m/min}$. Die beiden Kamerabilder zeigen typische Varianten von Durchschweißblöchern am geregelten Prozess [111], [123].

Dem gegenüber steht die geregelte Durchschweißung in Bild 5.26, wie sie im Rahmen dieser Arbeit erzeugt wurden. Signifikant ist die nahezu vollständige Abwesenheit von Schweißrauchablagerungen und die deutliche Reduktion von Spritzerspritzungen auf der

Blechunterseite. Aus dem Diagramm in Bild 5.26 geht ebenfalls hervor, dass durch das Regelsystem die Laserleistung am Ende der Schweißnaht automatisch reduziert wird, um der fallenden Vorschubgeschwindigkeit gerecht zu werden, die zum Nahtende hin bis zum Stillstand reduziert wird. Hierdurch wird das Risiko von Endkratern signifikant reduziert und eine Nachbehandlung kann gegebenenfalls entfallen.

Im Folgenden wird die Reaktion der Prozessregelung auf unterschiedliche Störgrößen untersucht, um die Leistungsfähigkeit und Grenzen des Systems im praktischen Versuch zu ermitteln.

5.7.1.1 Kompensation der Vorschubgeschwindigkeit

Eine Störgröße für den Laserschweißprozess, die insbesondere bei komplizierten roboter-geschweißten Geometrien auftreten kann, ist eine Variation der Vorschubgeschwindigkeit. Da sich bei großen Unterschieden in der Vorschubgeschwindigkeit auch der Prozesswirkungsgrad ändert, ist eine simple Steuerung der Laserleistung linear mit der Vorschubgeschwindigkeit oft nicht ausreichend, um den Durchschweißgrad konstant zu halten.

Schweißnähte mit konstanter Schweißrichtung in Stahl

Die erste Testreihe für die Geschwindigkeitsvariation erfolgt mit linearen Schweißnähten und einem vorprogrammierten Geschwindigkeitsprofil, welches im Bereich zwischen 3 m/min und 9 m/min schrittweise variiert. Die Schrittweite beträgt 2 m/min und wird alle 20 mm Nahtlänge angepasst.

In Bild 5.27 sind die resultierenden Zeitverläufe der Laserleistung für drei verschiedene Geschwindigkeitsprofile dargestellt. Es handelt sich bei den Fügepartnern um $2 * 0,7\text{ mm}$ verzinktes Stahlblech (H320LA) mit einem Fügespalt von $0,1\text{ mm}$. Geschweißt wird mit einem Scheibenlaser (Trumpf TruDisk 6002), dessen Transportfaser mit $200\text{ }\mu\text{m}$ Kerndurchmesser, auf einen Fokusbereich von $600\text{ }\mu\text{m}$ am Werkstück abgebildet wird. Die Geschwindigkeit wird in Stufen von $3 - 5 - 7 - 9\text{ m/min}$, $9 - 7 - 5 - 3\text{ m/min}$ sowie $7 - 9 - 5 - 3\text{ m/min}$ variiert, wobei die Versuchsreihen doppelt ausgeführt sind, um eventuelle Ausreißer im Verhalten der Regelung erkennen zu können.

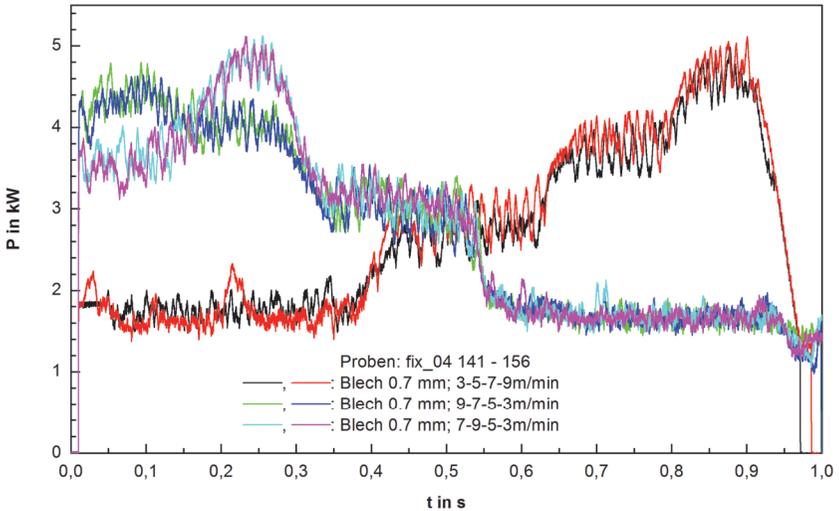


Bild 5.27: Leistungsverlauf geregelter Durchschweißungen über der Zeit in $2 * 0,7$ mm verzinktes Stahlblech (H320LA) mit $0,1$ mm Fügespalt. Die Vorschubgeschwindigkeit variiert zwischen 3 m/min und 9 m/min [111], [123].

Die zugehörigen Nahtunterraupen sind in Bild 5.28 dargestellt. Die Durchschweißung wurde bei jeder Geschwindigkeitsstufe korrekt ausgeregelt, ohne dass es zu Nahtdefekten durch Leistungsüberhöhung oder durch mangelnde Laserleistung kommt.

Um die Grenzen der Regelgeschwindigkeit bei der Variation des Vorschubes zu bestimmen wurden Proben mit $2 * 0,7$ mm verzinktem Stahlblech DC04 geschweißt, bei denen die Vorschubgeschwindigkeit sprunghaft von 3 m/min auf 9 m/min erhöht wurde. Derart große Sprünge in der Vorschubgeschwindigkeit können zu kurzen Unterbrechungen der Nahtunterraupe führen, wie in Bild 5.29 oben und Mitte gezeigt wird. Es handelt sich jedoch nicht um einen dauerhaften Abriss der Durchschweißung, da die Regelung bereits nach kurzer Distanz wieder eine stabile Durchschweißung sicherstellt. Jedoch reicht der verfügbare Leistungsgradient nicht aus, um dem Geschwindigkeitssprung schnell genug folgen zu können. Der von der Regelung erreichbare Leistungsgradient ist dabei eine Funktion der Parameter Border-Frames N_{max} , Border-Step ΔP_0 und der Bildrate f .

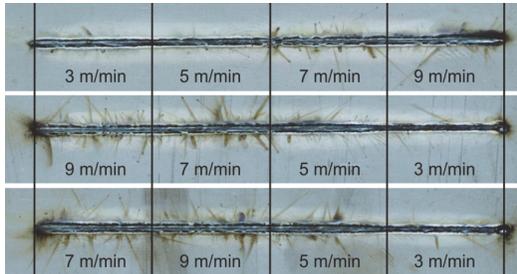


Bild 5.28: Nahtunterraupen der Geschwindigkeitsvariation. Oben: fix_04_141 mit 3 - 5 - 7 - 9 m/min, mittig: fix_04_143 mit 9 - 7 - 5 - 3 m/min, unten: fix_04_145 mit 7 - 9 - 5 - 3 m/min. Die Schrittweite beträgt 20 mm [111], [123].

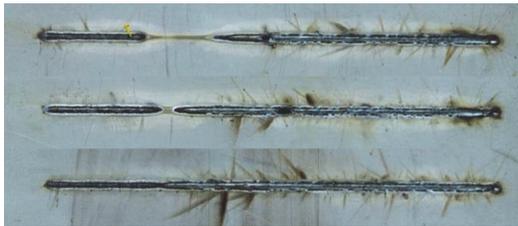


Bild 5.29: Vorübergehender Abriss der Durchschweißung durch eine Vorschubänderung von 3 m/min auf 9 m/min. Die Anpassung der Leistungslimits erfolgt mit einer Mittelung aus 50 Bildern ($N_{max} = 50$) im oberen Fall, mit 20 Bildern ($N_{max} = 20$) im mittleren Fall und mit 0 Bildern ($N_{max} = 0$) im unteren Fall. Schweißrichtung: von links nach rechts [124].

Im Falle von Bild 5.29 oben liegt der Wert für die Anzahl Border-Frames (siehe Abschnitt 5.4.2) bei $N_{max} = 50$ mit einer Bildrate von $f = 13,16 \text{ kHz}$ und einem Border-Step von $\Delta P_0 = 305 \text{ W}$, was zu einer großen Unterbrechung der Durchschweißung führt. Um die Regelgeschwindigkeit bei großen Leistungssprüngen zu erhöhen, kann die Anzahl der Bilder, die für die Anpassung der Leistungslimits gemittelt werden, auf $N_{max} = 20$ reduziert werden. Wie die Nahtunterraupe in Bild 5.29 Mitte zeigt, verkürzt sich der Bereich ohne Durchschweißung deutlich. Jedoch ist die Regelgeschwindigkeit immer noch zu niedrig. Erst durch Deaktivieren der Mittelung zur Anpassung der Leistungslimits ($N_{max} = 0$) kann eine Durchschweißung über die gesamte Länge der Naht sichergestellt werden, wie in Bild 5.29 unten zu sehen ist. Dies führt jedoch unweigerlich zu den in Abschnitt 5.4.2 erwähnten Oszillationen und kann die Stabilität der Regelung beeinträchtigen.

Schweißnähte mit veränderlicher Schweißrichtung in Stahl

Besondere Bedeutung kommt der Kompensation von Schwankungen der Vorschubgeschwindigkeit bei der Erzeugung von nicht linearen Schweißgeometrien zu, da besonders beim Schweißen mit Industrierobotern Geschwindigkeitsschwankungen beispielsweise bei Orientierungsänderungen des TCP (Tool-Center-Point) vorkommen können. Die im Folgenden beschriebenen Versuche mit dem „Omnidirectional“-Algorithmus sollen diesen Fall näher beleuchten.

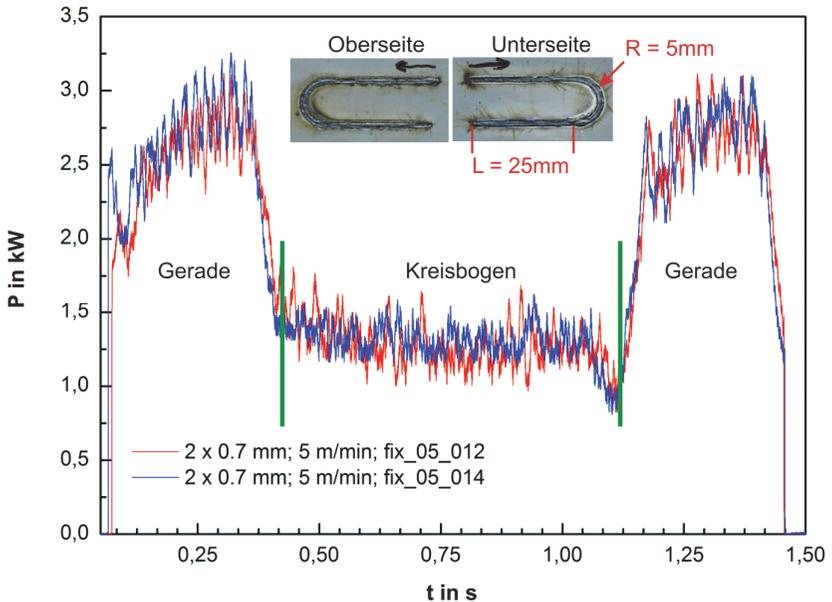


Bild 5.30: Leistungsverlauf geregelter Durchschweißungen in verzinktem Stahlblech von $2 \times 0,7\text{ mm}$ Dicke und einem Fügeseit von $0,1\text{ mm}$. Die Naht besteht aus zwei Geradenstücken von $L = 25\text{ mm}$ Länge, die über einen 180° Kreisbogen mit einem Radius von $R = 5\text{ mm}$ miteinander verbunden sind [111], [123].

In Bild 5.30 sind die Ergebnisse zweier Schweißungen dargestellt, bei denen die Vorschubgeschwindigkeit über die gesamte Nahtlänge auf 5 m/min programmiert ist. Die Schweißnaht besteht aus zwei Geradenstücken von je $L = 25\text{ mm}$ Länge, die über ein Kreissegment von 180° und einem Radius von $R = 5\text{ mm}$ miteinander verbunden sind. Aufgrund der begrenzten Dynamik der Maschinenachsen fällt die effektive Geschwindigkeit im Bereich des Kreissegmentes auf etwa $1,5\text{ m/min}$ ab.

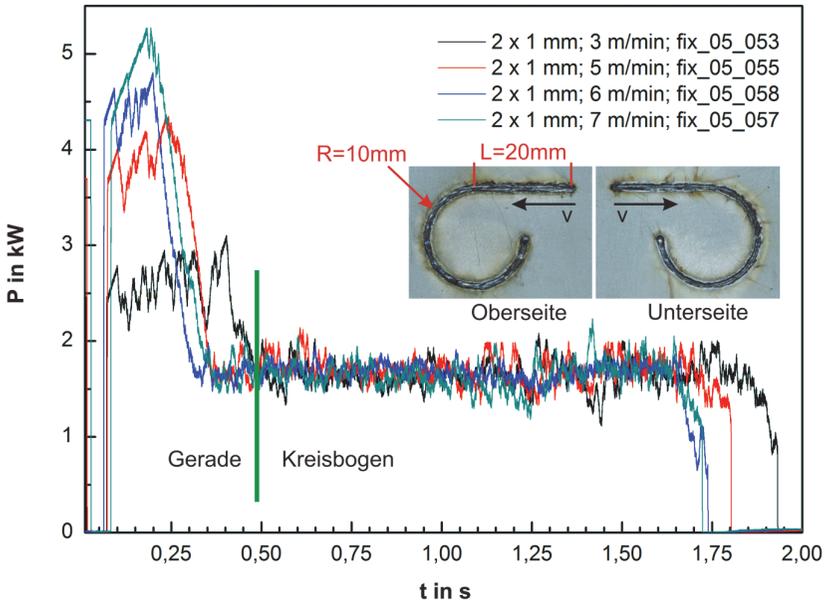


Bild 5.31: Leistungsverlauf geregelter Durchschweißungen in verzinktem Stahlblech von $2 * 1,0$ mm Dicke und einem Fügespalt von $0,2$ mm. Die Naht besteht aus einem Geradenstück von $L = 20$ mm Länge, gefolgt von einem 270° Kreisbogen mit einem Radius von $R = 10$ mm [111], [123].

Ein vergleichbarer Test ist in Bild 5.31 dargestellt, bei dem die Schweißung mit jeweils unterschiedlicher Anfangsgeschwindigkeit zwischen 3 m/min und 7 m/min, auf einem $L = 20$ mm langen Geradenstück beginnt und nach einem Kreisbogen mit 270° und $R = 10$ mm Radius endet. Im Kreissegment fällt auch hier der Vorschub auf etwa 2 m/min ab.

Durch das Regelsystem wird die Laserleistung sowohl auf den Geraden, als auch auf dem Kreissegment stabil auf den jeweils benötigten Wert eingeregelt, um eine saubere Durchschweißung zu erzielen. Die Reproduzierbarkeit ist in beiden Fällen gegeben, wie an den nahezu deckungsgleichen Leistungsverläufen beim Durchlaufen des Kreissegmentes zu erkennen ist.

Schweißnähte mit konstanter Schweißrichtung in Aluminium

Während bei unterschiedlichen Stählen die Variation der Kamerabilder als eher gering angesehen werden kann, hängt das thermische Erscheinungsbild der Prozesszone bei

Aluminium sehr stark von der vorliegenden Legierung ab. Generell haben die Schweißversuche gezeigt, dass bei Aluminium das Kamerabild durch signifikant mehr Schweißrauch gestört wird. Dies ist besonders bei der Legierung AA5182 zu beobachten. Des Weiteren ist bei Aluminium, im Vergleich zu Stahl, im thermischen Kamerabild fast ausschließlich der direkt vom Laser bestrahlte Bereich zu sehen. Dies ist auf den großen Temperaturunterschied zwischen Verdampfungstemperatur und Schmelztemperatur bei Aluminium zurückzuführen, wie bereits in Abschnitt 2.3.4.3 dargelegt wurde.

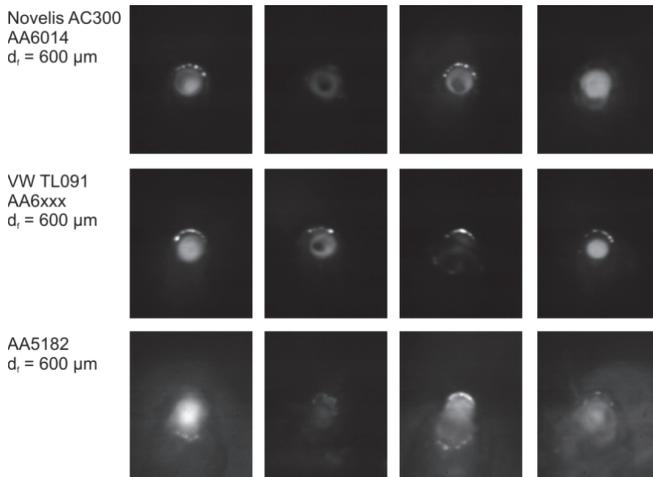


Bild 5.32: Prozessbilder der CNN-Kamera von verschiedenen Durchschweißungen in Aluminium mit einem Fokusbereich von $d_f = 600 \mu\text{m}$. Der Spektralbereich ist durch einen Filter $905\text{-}50 \text{ nm}$ eingegrenzt.

In Bild 5.32 ist eine Übersicht von thermischen Bildern der Prozesszone von verschiedenen Aluminiumlegierungen dargestellt, die im Rahmen des Projekts untersucht wurden. Insgesamt wirken die thermischen Kamerabilder unschärfer und kontrastärmer als bei Stahl. Außerdem kann meist an der Keyholefront ein Kranz heller Punkte beobachtet werden, der höchstwahrscheinlich durch die Verdampfung der Oxidschicht hervorgerufen wird.

Bild 5.33 zeigt den Leistungsverlauf zweier Durchschweißungen in Aluminium AA6014 (Novelis AC300) mit denselben Regelparametern am I-Naht-Überlappstoß mit unterschiedlicher Dicke bei variablem Vorschub. Die obere rote Kurve zeigt den Leistungsverlauf der Laserleistungsregelung an einem Blechstapel mit $2 * 1,5 \text{ mm}$

Dicke, die schwarze untere Kurve an einem Blechstapel mit $2 * 1,2 \text{ mm}$ Dicke. Geschweißt wurde jeweils mit technischem Nullspalt. Der Vorschub beträgt im ersten Abschnitt der Schweißung je 5 m/min und wird für den zweiten Abschnitt auf 3 m/min reduziert.

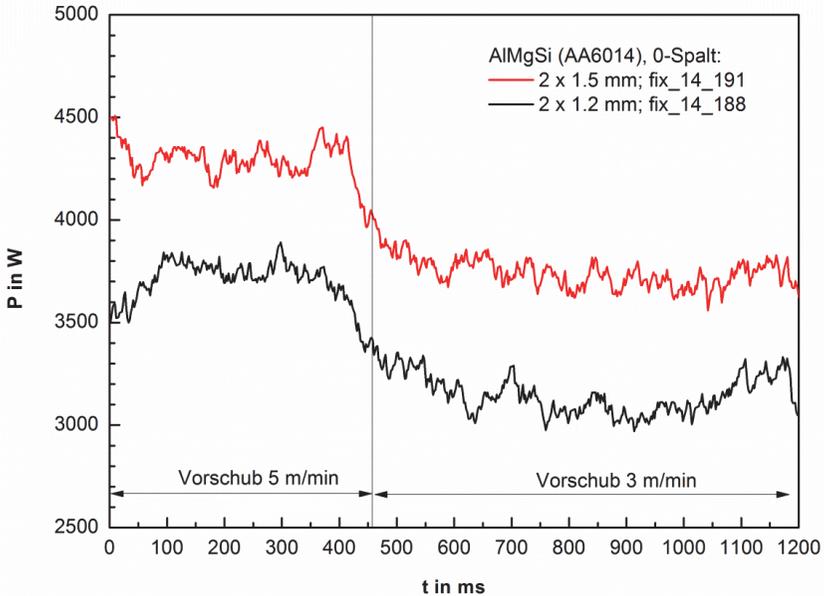


Bild 5.33: Laserleistungssignale für Materialdicken $2 * 1,5 \text{ mm}$ und $2 * 1,2 \text{ mm}$. Durchschweißung am I-Naht-Überlappstoß (0-Spalt) in Aluminium AA6014 (Novelis AC300) mit variablem Vorschub [86].

Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass die Laserleistungsregelung dem Sprung der Vorschubgeschwindigkeit in beiden Fällen folgt und die Laserleistung reduziert. Es fällt dabei jedoch auf, dass die resultierende Streckenenergie nicht konstant bleibt. Für die Durchschweißung in $2 * 1,5 \text{ mm}$ steigt die durchschnittliche Streckenenergie von ungefähr 52 J/mm bei 5 m/min Vorschub auf etwa 74 J/mm bei 3 m/min . Bei der Durchschweißung in $2 * 1,2 \text{ mm}$ ergibt sich entsprechend eine Steigerung von 44 J/mm auf 62 J/mm . Diese Steigerung der Streckenenergie hin zu langsameren Vorschubgeschwindigkeiten lässt sich auch an der Geometrie der Nahtunter- und -oberrauten in Bild 5.34 erkennen.

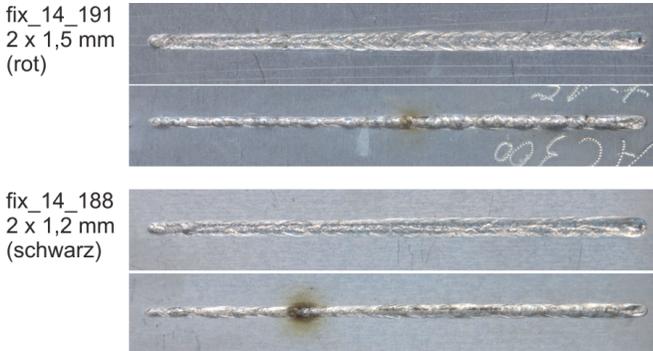


Bild 5.34: Nahtoberrauen und -unterrauen der Durchschweißungen in 2 * 1,5 mm und 2 * 1,2 mm am I-Naht-Überlappstoß (0-Spalt) in Aluminium AA6014 (Novelis AC300) mit variablem Vorschub [86].

Die Ursache für diesen Effekt ist im thermischen Wirkungsgrad beim Tiefschweißen unterschiedlicher Werkstoffe zu finden. Während Werkstoffe mit niedriger Wärmeleitfähigkeit, wie beispielsweise Stähle, bereits bei sehr niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten einen konstanten thermischen Wirkungsgrad beim Lasertiefschweißen aufweisen, gilt diese Konstanz für Werkstoffe mit hoher Wärmeleitfähigkeit, wie Aluminium, erst bei sehr viel höheren Vorschubgeschwindigkeiten [125], [126].

Übertragen auf die Laserleistungsregelung bedeutet dies, dass bei Aluminium zum Erreichen gleicher Lochwahrscheinlichkeiten p_{FPH} , bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten, im Gegensatz zu Stahlwerkstoffen, jeweils andere Streckenenergien notwendig sind. Dieser Sachverhalt ist für den Werkstoff AA6014 (VW-Norm TL091) experimentell bestimmt und in Bild 5.35 dargestellt. Die Erhöhung der Streckenenergie bei niedrigerer Vorschubgeschwindigkeit ist somit durch den Schweißprozess selbst bedingt und nicht auf eine Unzulänglichkeit der Regelung zurückzuführen.

Insgesamt können bei Durchschweißungen mit Aluminiumlegierungen der 6000er Reihe ähnlich gute Ergebnisse erzielt werden wie bei Stahlwerkstoffen, wenn auch die Prozessfenster bezüglich der Parametrierung des Regelsystems teils deutlich kleiner sind. Geregelt Durchschweißungen mit der Legierung AA5182 waren aufgrund der nicht aussagekräftigen thermischen Bilder der stark gestörten Prozesszone nicht möglich, siehe hierzu Bild 5.32 unten.

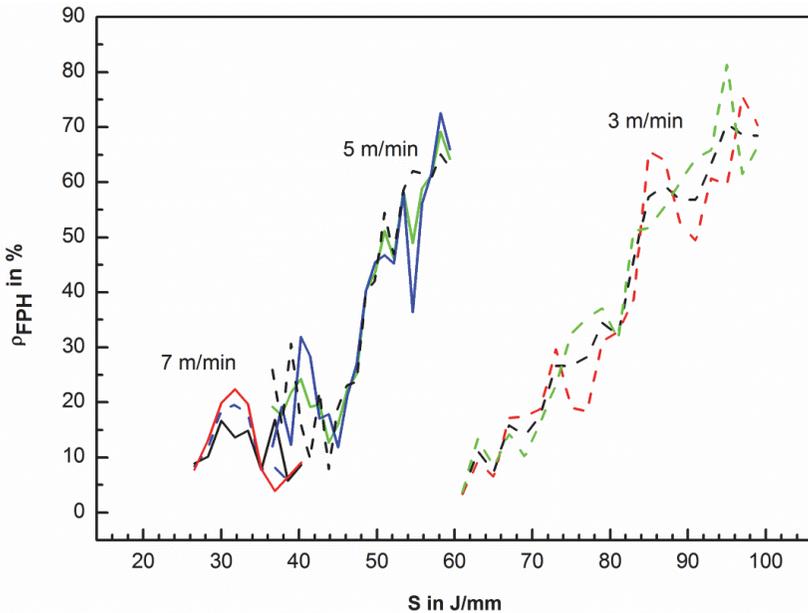


Bild 5.35: Wahrscheinlichkeit eines Durchschweißloches in Abhängigkeit von der Streckenergie. Gemessen mit einem Fokusbereich von $600\ \mu\text{m}$ an $2 * 1,2\ \text{mm}$ Aluminium TL091 (VW-Norm) im I-Naht-Überlappstoß mit 0-Spalt. Die Messdaten sind aus der Versuchsreihe fix_13_xxx entnommen.

5.7.1.2 Kompensation der Materialstärke

Schwankungen der Materialstärke über den Verlauf einer Schweißnaht sind ein weiterer Fall, der für unregelmäßige Prozesse nur schwer beherrschbar ist. Während beim Schweißen von Tailored-Blanks die Position der Dickenänderung noch weitgehend vorherzusehen ist, können in anderen Fällen Dickenschwankungen auch stochastisch auftreten. Die Wandstärke von Rohren beispielsweise ist in vielen Fällen lediglich auf 12,5 % bis 20 % Genauigkeit⁴⁰ toleriert.

⁴⁰ Gemäß der Normen EN 10297-1, EN 10216-1, EN 10216-2 und EN 10216-3, liegen die Toleranzen der Wandstärke je nach Rohrdurchmesser zwischen 12,5 % und 20 %.

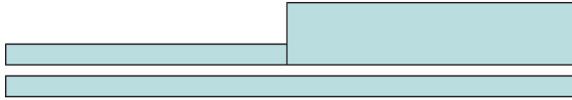


Bild 5.36: Blechstapel mit zwei unterschiedlich dicken Oberblechen zur Ermittlung der Sprungantwort des Regelsystems auf einen Sprung in der Materialstärke.

Die folgenden Experimente stellen Extremsituationen nach, in denen sich die zu schweißende Materialstärke sprunghaft ändert. Hierzu wurde das Oberblech gegen zwei unterschiedlich dicke Oberbleche ausgetauscht, wie in Bild 5.36 dargestellt. Da es sich bei dem Übergang zwischen den beiden Blechen um eine Unstetigkeitsstelle handelt, wird hier die maximale Regelgeschwindigkeit gefordert. Es handelt sich damit um einen Sprungantwort-Test.

Dickensprung des Oberblechs von 0,7 mm auf 1,0 mm

Die positive Sprungantwort des Regelsystems auf einen Dickensprung wurde in einem ersten Versuch an einem Sprung in der Dicke des Oberblechs von $0,7\text{ mm}$ auf $1,0\text{ mm}$ bei einem Unterblech von $0,7\text{ mm}$ und einem Spalt von $0,1\text{ mm}$ ermittelt, was einem Dickensprung von etwa 20% entspricht. Die Fügepartner bestehen je nach Blechstärke aus verzinktem Stahlblech vom Typ H320LA und DC04.

In Bild 5.37 ist das Zeitverhalten der Laserleistung dargestellt. Der Bereich des Dickenübergangs ist gesondert hervorgehoben um Leistungs- und Zeitwerte besser abzu-lesen zu können. Aus den Regelzeiten und Leistungsdifferenzen lassen sich die effektiven Regelgeschwindigkeiten ermitteln. Für die in Bild 5.37 dargestellten Leistungskurven liegt die effektiv gemessene Regelgeschwindigkeit zwischen 25 kW/s und 29 kW/s . Die effektive Regelgeschwindigkeit bezieht sich auf das Erreichen von Durchschnittsleistungen, nicht auf den maximal erzielten Leistungsgradienten.

Die effektive Regelgeschwindigkeit ist für die verwendeten Blechstärken hinreichend, um an der Unterseite lückenlose Nahtunterraupen zu gewährleisten, wie sie in Bild 5.38 dargestellt sind. Die starke Verschmutzung der Blechunterseiten ist auf eine Kontamination der Bleche mit Öl zurückzuführen, wie sie auch in der industriellen Fertigung vorkommt.

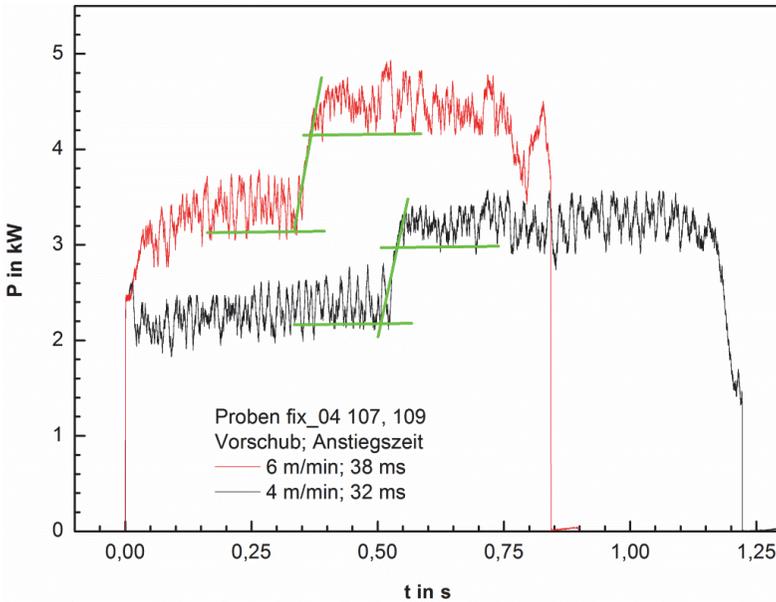


Bild 5.37: Zeitverhalten der Laserleistung auf einen positiven Sprung in der Dicke des Oberblechs. Unterblech 0,7 mm, Oberblech mit Sprung von 0,7 mm auf 1,0 mm bei Spalt 0,1 mm [85].

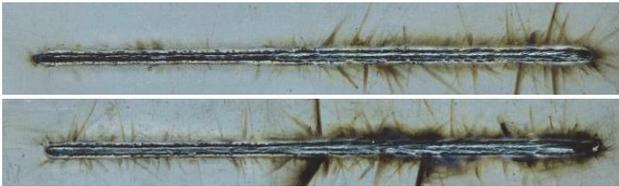


Bild 5.38: Nahtunterseite zweier geregelter Durchschweißungen mit positivem Sprung im Oberblech von 0,7 mm auf 1,0 mm. Schweißrichtung von links nach rechts. Oben: fix_04_107 mit einem Vorschub 4 m/min, Unten: fix_04_109 mit einem Vorschub 6 m/min.

Dickensprung des Oberblechs von 0,7 mm auf 1,5 mm

Die positive Sprungantwort des Regelsystems wurde auch an größeren Sprüngen in der Dicke des Oberblechs - hier von 0,7 mm auf 1,5 mm - bei einem Unterblech von 0,7 mm und einem Spalt von 0,1 mm ermittelt, was einem Dickensprung von etwa 57 % gleich kommt. Auch hier bestehen die Fügepartner je nach Blechstärke aus verzinktem Stahlblech vom Typ H320LA und DC04.

Das Zeitverhalten der Laserleistung ist in Bild 5.39 aufgetragen, wobei der Bereich des Dickenübergangs zur besseren Ablesbarkeit von Leistung und Zeit hervorgehoben ist. Aus den Regelzeiten und Leistungsdifferenzen lassen sich die effektiven Regelgeschwindigkeiten ermitteln, die zwischen 23 kW/s und 39 kW/s liegen. Die effektive Regelgeschwindigkeit bezieht sich auch hier auf das Erreichen von Durchschnittsleistungen, nicht auf den maximal auftretenden Leistungsgradienten. Der maximale Gradient der frei oszillierenden Regelung (innerer Regelkreis) liegt demgegenüber bei etwa 164 kW/s ($\Delta P \cdot f$).

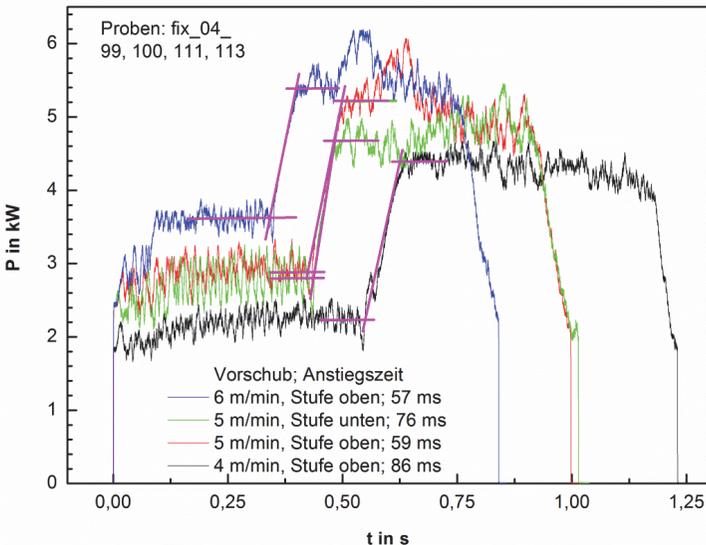


Bild 5.39: Zeitverhalten der Sprungantwort der Laserleistung auf einen positiven Sprung der Dicke des Oberblechs von 0,7 mm auf 1,5 mm. Das Unterblech hat eine Dicke von 0,7 mm der Fügespalt beträgt 0,1 mm. Bei der grünen Kurve (Stufe unten) sind Ober- und Unterblech vertauscht [111], [123].

Aus den zugehörigen Nahtunterraupen in Bild 5.40 wird deutlich, dass die effektive Regelgeschwindigkeit nicht mehr in allen Fällen ausreicht, um eine unterbrechungsfreie Durchschweißung zu gewährleisten. Da jedoch die Nahtunterraupen der Schweißungen `fix_04_099` und `fix_04_113` durchgängig sind, scheint eine höhere Vorschubgeschwindigkeit nicht zwingend zu einem früheren Abriss der Durchschweißung bei einem Dickensprung zu führen.

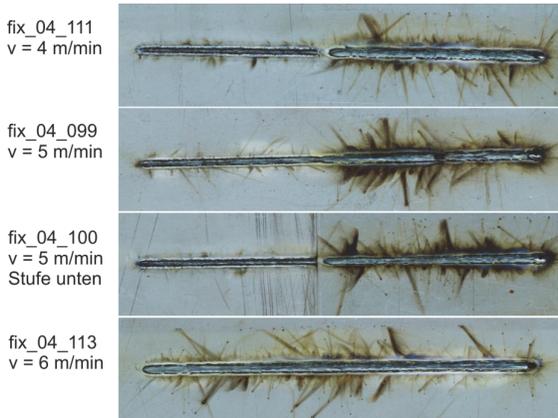


Bild 5.40: Nahtunterseiten geregelter Durchschweißungen mit einem Dickensprung von $1,4\text{ mm}$ auf $2,2\text{ mm}$ (ohne Fügspalt gerechnet) respektive 57% . Schweißrichtung von links nach rechts [111], [123].

Dickensprung des Oberblechs von $1,5\text{ mm}$ auf $0,7\text{ mm}$

Die negative Sprungantwort des Systems auf einen Dickensprung wurde in mehreren Versuchen mit unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten und Stärken des unteren Fügepartners durchgeführt. Gleichbleibend bei allen Versuchen ist der Sprung im Oberblech von $1,5\text{ mm}$ auf $0,7\text{ mm}$. Die verwendeten Materialien sind verzinktes Stahlblech vom Typ H320LA und DC04.

In Bild 5.41 sind die zeitlichen Verläufe der Laserleistung von vier Kombinationen des negativen Dickensprungs dargestellt. Variiert sind bei den vier Kombinationen, die Dicke des Unterblechs (Basis) mit $0,7\text{ mm}$ und $1,5\text{ mm}$, sowie der Vorschub, der je nach Unterblechdicke 3 m/min und 5 m/min beziehungsweise 4 m/min und 6 m/min beträgt.

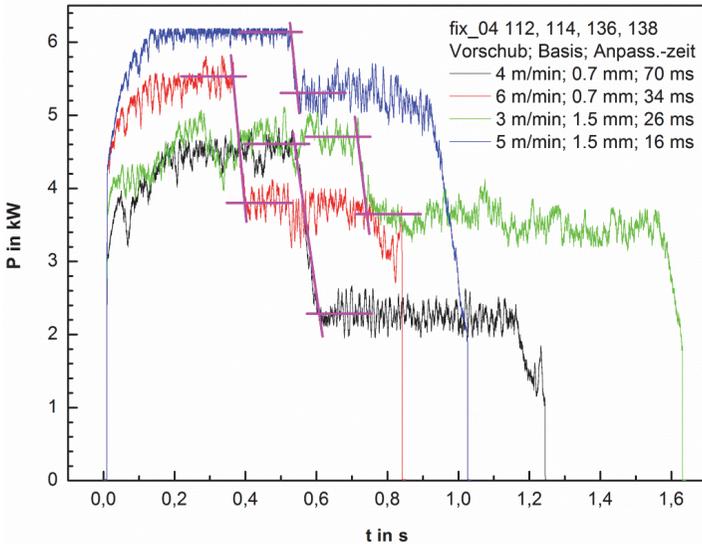


Bild 5.41: Zeitverhalten der Laserleistung auf einen negativen Sprung in der Dicke des Oberblechs. Die Dicke der Unterbleche (Basis) beträgt $0,7\text{ mm}$ und $1,5\text{ mm}$, die Oberbleche weisen eine Sprung von $1,5\text{ mm}$ auf $0,7\text{ mm}$ bei einem Spalt von $0,2\text{ mm}$ auf. Die Versuche wurden bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten zwischen 3 m/min und 6 m/min durchgeführt [85].

Werden die Anpassungszeiten der verschiedenen Versuche verglichen, ist ersichtlich, dass die Zeiten bei beiden Stapeldicken von der Vorschubgeschwindigkeit abhängig sind. Daraus lässt sich schließen, dass der Leistungsgradient tatsächlich vom Zeitverhalten des Schweißprozesses bestimmt wird und nicht durch den Regelalgorithmus begrenzt ist. Der effektive Leistungsgradient liegt bei -34 kW/s (schwarze Kurve mit 4 m/min) und -50 kW/s (rote Kurve mit 6 m/min), beziehungsweise -40 kW/s (grüne Kurve mit 3 m/min) und -53 kW/s (blaue Kurve mit 5 m/min).

An den Nahtuntertraupen in Bild 5.42 oben ist zu sehen, dass es bei dünnen Unterblechen mit $0,7\text{ mm}$ Dicke aufgrund des Leistungsüberschusses am Dickensprung zu Durchschusslöchern und Einschusslöchern kommen kann. Bei der größeren Dicke des Unterblechs von $1,5\text{ mm}$, wie es in Bild 5.42 unten gezeigt ist, treten diese Nahtdefekte dank der höheren Trägheit des Prozesses nicht auf. In diesen Fällen wird die Laserleistung hinreichend schnell reduziert um eine defektfreie Naht auch an der Unstetigkeitsstelle zu erzielen.

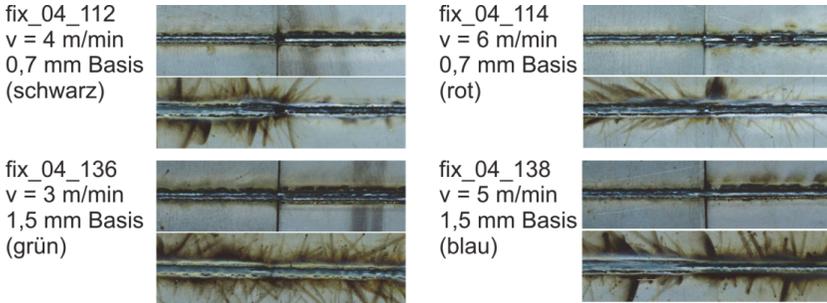


Bild 5.42: Nahtober- und Unterraupen der Schweißversuche aus Bild 5.41. Die Schweißrichtung verläuft von links nach rechts, gezeigt ist jeweils der Ausschnitt um die Unstetigkeitsstelle von Ober- und Unterraupen.

5.7.1.3 Kompensation der Fokusposition

Ein Problem, welches die Prozesssicherheit bei industriellen Laserschweißprozessen einschränken kann, ist eine Abweichung der Fokuslage, die sowohl auf mechanische Ursachen zurückführbar ist als auch durch einen thermischen Fokusschift der Bearbeitungsoptik hervorgerufen werden kann [127], [128]. Eine in positiver Z-Richtung aus der Nulllage verschobene Fokusposition führt im Allgemeinen zu einer Verringerung der Einschweißtiefe, was einen erhöhten Leistungsbedarf zum Erhalt der Durchschweißung nach sich zieht. Verschiebt sich die Fokuslage in negativer Z-Richtung in das Werkstück hinein, tritt - bis zu einem gewissen Grad - eine Erhöhung der Einschweißtiefe unter sonst konstanten Bedingungen auf, was entsprechend zu einem niedrigeren Leistungsbedarf führt. In einem unregelmäßigen Laserschweißprozess kann dies im schlimmsten Fall zu einer fehlerhaften Anbindung führen.

Das ACES-Regelsystem kann durch eine Anpassung der Laserleistung dem Effekt der Defokussierung in gewissen Grenzen entgegenwirken um die geforderte Einschweißtiefe beziehungsweise die vollständige Durchschweißung sicher zu stellen. Hierzu wurde in einer Versuchsreihe mit einem Faserkerndurchmesser von $200 \mu\text{m}$ und einer Schweißoptik mit Abbildungsverhältnis $1:1$ gearbeitet, was einen Fokussdurchmesser von $d_f = 200 \mu\text{m}$ bei einer Rayleighlänge von $z_R = 1,0 \text{ mm}$ ergibt. Die Schweißungen wurden alle mit derselben Laserleistung von 3.000 W gestartet. Das Regelsystem hat somit die Aufgabe, automatisch die optimale Laserleistung zur Erzielung einer vollständigen Durchschweißung in allen drei Fällen zu ermitteln.

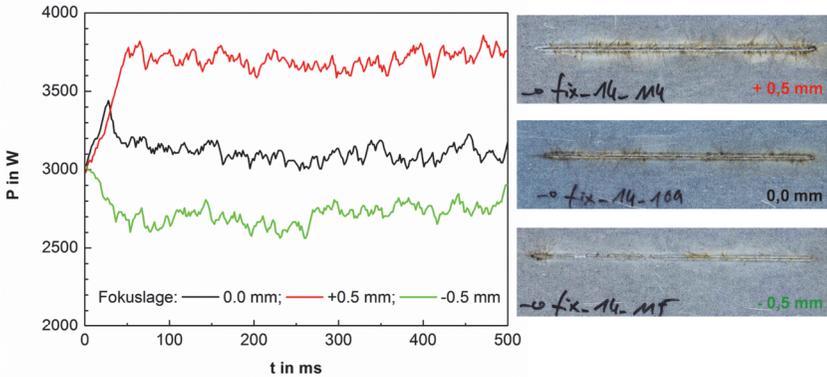


Bild 5.43: Kompensation einer verschobenen Fokusslage durch das ACES-Regelsystem. Geschweißt wurde mit einem Fokussdurchmesser von $200\ \mu\text{m}$ mit einer Rayleighlänge von $1,0\ \text{mm}$ [85].

Bild 5.43 zeigt den zeitlichen Verlauf der geregelten Laserleistung an drei Schweißungen mit Fokusslagen von $-0,5\ \text{mm}$, $0,0\ \text{mm}$ und $+0,5\ \text{mm}$. Der erwartete geringere Leistungsbedarf bei einer Fokusposition von $-0,5\ \text{mm}$ unterhalb der Werkstückoberfläche wird durch den Verlauf der grünen Kurve bestätigt, die durchschnittlich etwa $10\ \%$ niedriger liegt als bei einer Fokusposition von $0,0\ \text{mm}$ direkt auf der Werkstückoberfläche (schwarze Kurve). Die Defokussierung von $+0,5\ \text{mm}$ führt hingegen zu einem deutlich erhöhten Leistungsbedarf von etwa $20\ \%$ der roten Kurve gegenüber der schwarzen Kurve bei Fokusslage $0,0\ \text{mm}$. Die unterschiedlichen Leistungsbedarfe für eine vollständige Durchschweißung spiegeln sich auch in der Breite der Nahtunterraupe wieder, die in Bild 5.43 rechts abgebildet sind. Eine Durchschweißung konnte durch das ACES-Regelsystem in allen drei Fällen sichergestellt werden.

5.7.1.4 Kompensation einer verschmutzten Optik

Ein weiteres, häufig anzutreffendes Problem in der Lasermaterialbearbeitung sind verschmutzte Laseroptiken beziehungsweise deren Schutzgläser. Diese Verschmutzungen werden in der Regel durch die Emissionen des Bearbeitungsprozesses selbst hervorgerufen, die sich in Form von Schweißrauch oder Spritzern auf dem Schutzglas anlagern und dort zu erhöhter Absorption und Streuung des Laserstrahls führen. In der Produktion wird diesem Problem häufig mit fest vorgegebenen Wechselintervallen oder mit dedizierten Schutzglässensoren begegnet um eine stabile Produktion zu gewährleisten.

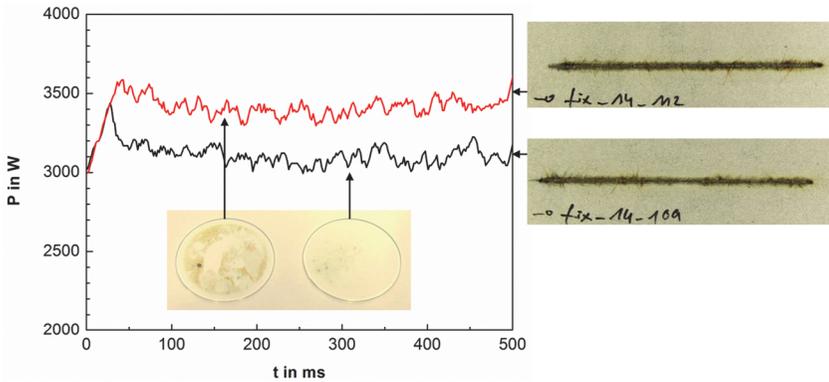


Bild 5.44 Kompensation eines verschmutzten Schutzglases durch das ACES-Regelsystem. Geschweißt wurde mit einem Fokusbereich von $200\ \mu\text{m}$ mit einer Rayleighlänge von $1,0\ \text{mm}$ [85].

Um die Fähigkeit des ACES-Regelsystems, den Einfluss eines verschmutzten Schutzglases zu kompensieren, zu testen, wurden Schweißungen mit verschieden stark verschmutzten Schutzgläsern durchgeführt. In Bild 5.44 sind für zwei unterschiedlich stark verschmutzte Schutzgläser sowohl die geregelten Laserleistungen über der Zeit als auch die resultierenden Nahtunterraupen der erzeugten Schweißnähte dargestellt. Deutlich zu erkennen ist der erhöhte Leistungsbedarf der mit der roten Kurve dargestellten Schweißung. Die vollständige Durchschweißung konnte durch das ACES-Regelsystem in beiden Fällen sichergestellt werden.

5.7.2 Closed-Loop Regelung der Einschweißung

Wie bereits in Abschnitt 5.3 dargelegt wurde, tritt bei Schweißungen am I-Naht-Überlappstoß auch bei Erreichen des Spaltes zwischen den Fügepartnern ein dem Durchschweißloch ähnliches Bildmerkmal auf, siehe Bild 5.5 unten. Die statistischen Untersuchungen über die Sichtbarkeit des Bildmerkmals und die sich daraus ergebenden möglichen Arbeitspunkte der Regelung in Abschnitt 5.4.1.1, legen eine mögliche Regelbarkeit der Einschweißung am I-Naht-Überlappstoß nahe. In Bild 5.13 sind zwei mögliche Arbeitsbereiche für eine solche geregelte Einschweißung dargestellt. Der erste Bereich (steigende Flanke) bei niedrigerer Streckenenergie ist durch die grüne (strich-punktierte) Linie markiert, bei der die Laserleistung gerade ausreicht um die Kapillare an der Unterseite des Oberblechs zu öffnen. Eine Anbindung erfolgt in diesem Fall lediglich durch Wärmeleitprozesse der Schmelze, wobei der aufgeschmolze-

ne Bereich nur wenig in das Unterblech hineinreicht. Der zweite Arbeitsbereich (fallende Flanke) bei höherer Streckenenergie ist durch die blaue (gestrichelte) Linie gekennzeichnet, bei der die Laserleistung so hoch ist, dass eine Kapillarausbildung in das Unterblech hinein beginnt. Die Anbindung ist in diesem Fall deutlich tiefer und kann in gewissen Grenzen durch Vorgabe der geforderten Lochrate q_{FPH} gesteuert werden.

In [105] konnte erstmals eine solche geregelte Einschweißung gezeigt werden, die im Arbeitsbereich der steigenden Flanke durchgeführt wurde. Geschweißt wurde verzinktes Stahlblech mit einer Stärke von $2 * 0,7 \text{ mm}$ im I-Naht-Überlappstoß mit einem Spaltmaß von $0,1 \text{ mm}$. Der verwendete Scheibenlaser wurde mittels einer Trumf PFO-33 mit einer Vergrößerung von $1:3$ auf einen Fokusbereich von $d_f = 600 \mu\text{m}$ fokussiert, wobei die Vorschubgeschwindigkeit auf $v = 9 \text{ m/min}$ festgelegt wurde.

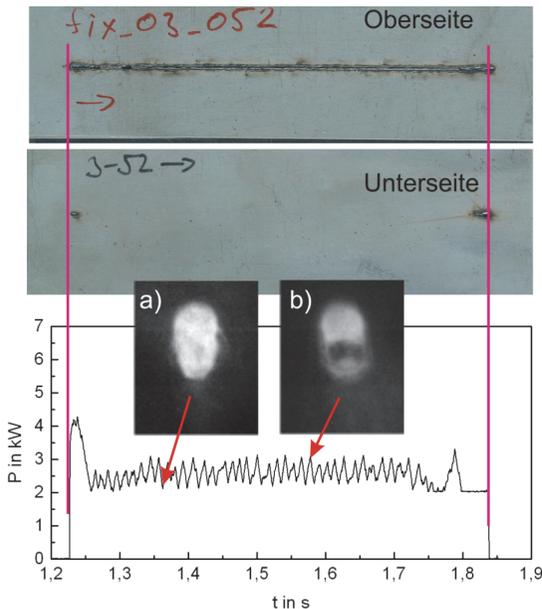


Bild 5.45: Geregelte Einschweißung von verzinktem Stahlblech im I-Naht-Überlappstoß. Die Blechstärke beträgt $2 * 0,7 \text{ mm}$ mit einem Spaltmaß von $0,1 \text{ mm}$ bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v = 9 \text{ m/min}$. Oben sind Ober- und Unterseite des Werkstücks dargestellt, unten das Diagramm der Laserleistung über der Zeit. Die Subbilder a) und b) zeigen das thermische Erscheinungsbild der Prozesszone im Falle der reinen Einschweißung im Oberblech a) und im Falle der Durchschweißung des Oberblechs b) [105].

In Bild 5.45 ist das Ergebnis dieses Experiments, mit dem zeitlichen Verlauf der geregelten Laserleistung und der zugehörigen Werkstückunter- und Oberseite, dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass, abgesehen von Nahtanfang und -ende, die Laserleistung stets in einem Bereich geregelt wird, in dem es zu keiner Zeit zu einer Verletzung der Werkstückunterseite kommt. Die kurzzeitigen Durchschweißungen am Nahtbeginn und Nahtende werden dadurch verursacht, dass die Schweißung mit stehenden Maschinenachsen beginnt und endet. Aufgrund der fest vorgegebenen Leistungsuntergrenze von 2 kW , kam es in diesen Bereichen zur Durchschweißung. Die mit a) und b) gekennzeichneten Subbilder in Bild 5.45 zeigen das thermische Erscheinungsbild der Prozesszone. Subbild a) zeigt dabei den Zustand bei zu niedriger Laserleistung und nach unten geschlossenem Keyhole im Oberblech, während Subbild b) den Zustand bei höherer Laserleistung und geöffnetem Keyhole im Oberblech zeigt.

Im Vergleich zur geregelten Durchschweißung ist bei sonst gleichen Randbedingungen die benötigte Laserleistung nur etwa halb so groß. Vergleicht man konkret die vollständige Durchschweißung in Bild 5.26 mit der Einschweißung in Bild 5.45 wird deutlich dass sich die benötigte Laserleistung von etwa $5,0 - 5,2\text{ kW}$ auf etwa $2,5 - 2,7\text{ kW}$ reduziert, was einer Reduktion von annähernd 50% entspricht.

5.7.2.1 Kompensation der Vorschubgeschwindigkeit

Im Folgenden soll die Fähigkeit des ACES-Regelsystems untersucht werden, auch bei variierender Vorschubgeschwindigkeit eine sichere Regelung der Einschweißung zu gewährleisten. Für die Experimente wird die Regelung derart parametrierung, dass der Arbeitsbereich auf der fallenden Flanke der Lochrate q_{FPH} , entsprechend der blauen gestrichelten Linie aus Bild 5.13 in Abschnitt 5.4.1.1, liegt. Die Schweißungen für dieses Experiment wurden auf verzinktem Stahlblech (ZStE 340) im I-Naht-Überlappstoß mit $2 * 1,0\text{ mm}$ Blechstärke und unterschiedlichen Spaltmaßen zwischen $0,05\text{ mm}$ und $0,3\text{ mm}$ ausgeführt. Der verwendete Scheibenlaser wird mit einer Scanneroptik, vom Typ Trumpf PFO-33, auf einen Fokusbereich von $d_f = 600\text{ }\mu\text{m}$ fokussiert. Die Parameter des Regelsystems werden so gesetzt, dass auf eine Lochrate von $q_{FPH} = 30\%$ geregelt wird.

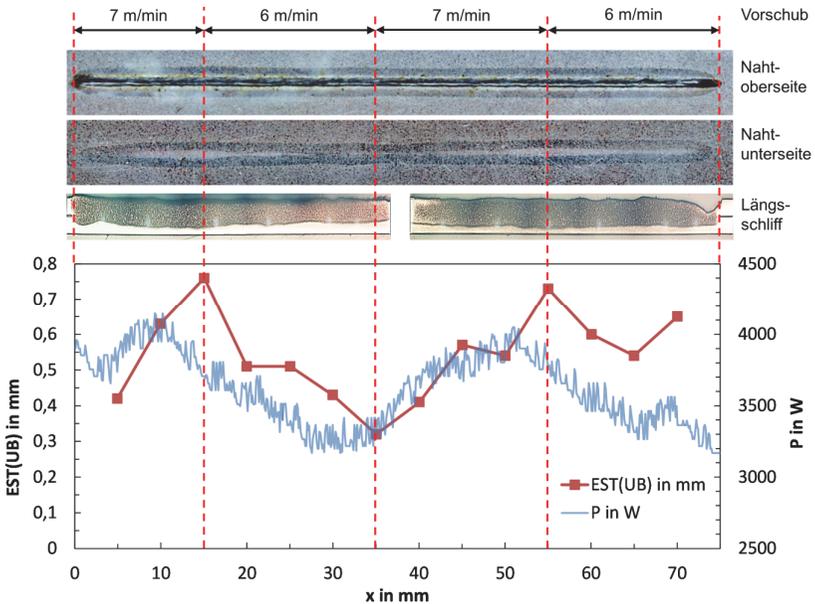


Bild 5.46: Geregelt eingeweißte Naht (Versuch *fix_12_127*) mit gleichzeitiger Modulation der Vorschubgeschwindigkeit zwischen 6 m/min und 7 m/min . Die Dicke des verzinkten Stahlblechs beträgt $2 * 1\text{ mm}$ mit einem Spaltmaß von $0,2\text{ mm}$. Von oben nach unten: Bereiche der verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten, Ansichten der Nahtoberseite und Nahtunterseite, Längsschliff durch die Schweißnaht (die Lücke entspricht der Sägestelle), Diagramm der Einschweißtiefe in das Unterblech $EST(UB)$ und der Laserleistung P über die Länge der Schweißnaht [129].

Bild 5.46 zeigt exemplarisch die Ergebnisse einer solchen geregelten Einschweißung mit einem Spaltmaß von $0,2\text{ mm}$. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde periodisch zwischen $v = 6\text{ m/min}$ und $v = 7\text{ m/min}$ variiert. Im Diagramm⁴¹ ist klar zu erkennen, dass die Regelung gemäß der Geschwindigkeitsschwankung die Laserleistung anpassen konnte. Die mittlere Streckenenergie gemäß Gleichung (4.1) liegt dabei im Bereich zwischen $S|_{6\text{m/min}} = 33\text{ J/mm}$ und $S|_{7\text{m/min}} = 35\text{ J/mm}$. Der Einfluss der Geschwindigkeitsvariation auf die resultierende Einschweißtiefe im Unterblech wird dabei von der Regelung leicht überkompensiert, wobei auch ein deutlicher Phasenversatz zwischen dem Geschwindigkeitsprofil, dem Verlauf der geregelten Laserleistung und der

⁴¹ Das Laserleistungssignal ist mit einer Rechteckfunktion für das Geschwindigkeitsprofil auf die Längsachse skaliert, da die Ist-Werte der tatsächlichen Achsgeschwindigkeit auf der Anlage nicht zur Verfügung standen.

resultierenden Einschweißtiefe im Unterblech zu erkennen ist. Es kommt jedoch zu keiner Zeit zu einem Verlust der Anbindung oder zu einer Verletzung der Werkstückunterseite. Es ist lediglich eine Wärmespur an der Unterseite der beiden Fügepartner zu erkennen.

Die exakte Ursache für den Phasenversatz und die Überkompensation konnte im Rahmen der hier gezeigten Experimente nicht abschließend geklärt werden. Eine unbestätigte Hypothese legt jedoch nahe, dass die vergleichsweise langsame konduktive Energieabfuhr bei gleichzeitig schneller und modulierter Energieeinbringung durch den Laser ursächlich ist. Die Einschweißtiefe hängt dabei primär vom Energiegehalt der Schmelze ab, während die Laserleistung jedoch anhand der Kapillartiefe geregelt wird.

5.7.2.2 Einfluss des Spaltmaßes

Um den Einfluss des Spaltmaßes auf die Einschweißregelung besser zu verstehen, wurde vor Beginn der eigentlichen Schweißversuche eine statistische Untersuchung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Durchschweißlöchern am Spalt durchgeführt. Hierzu wurde analog zu dem in Abschnitt 5.4.1.1 beschriebenen Verfahren eine Versuchsreihe mit verschiedenen Spaltmaßen zwischen $0,05\text{ mm}$ und $0,3\text{ mm}$ durchgeführt. Die Werkstücke bestehen aus $2 * 1\text{ mm}$ verzinktem Stahlblech ZStE340, welche mit einem Scheibenlaser geschweißt werden, der auf einen Fokussdurchmesser von $d_f = 600\text{ }\mu\text{m}$ fokussiert ist. Die Vorschubgeschwindigkeit beträgt für alle Versuche $v = 5\text{ m/min}$.

Die Ergebnisse des Experiments sind in Bild 5.47 als Scharmittelwert für die Auftretenswahrscheinlichkeit von Durchschweißlöchern q_{FPH} über der Streckenenergie S dargestellt. Aus dem Diagramm ergibt sich für den Arbeitsbereich auf der fallenden Flanke eine Streckenenergie zwischen etwa 35 J/mm und 40 J/mm , wobei davon ausgegangen werden kann, dass die Werte hin zu höheren Vorschubgeschwindigkeiten geringfügig niedriger ausfallen werden. Des Weiteren zeigt das Diagramm nur eine sehr geringe Abhängigkeit der Streckenenergie vom Spaltmaß, wobei größere Spaltmaße tendenziell zu leicht niedrigeren Streckenenergien führen. Dies könnte mit einer besseren Isolation der beiden Bleche und dadurch geringeren Wärmeabfuhr zusammenhängen, wurde jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter im Detail untersucht. Es konnten jedoch in weiteren Experimenten keine Hinweise auf eine Signifikanz dieses Effekts beobachtet werden.

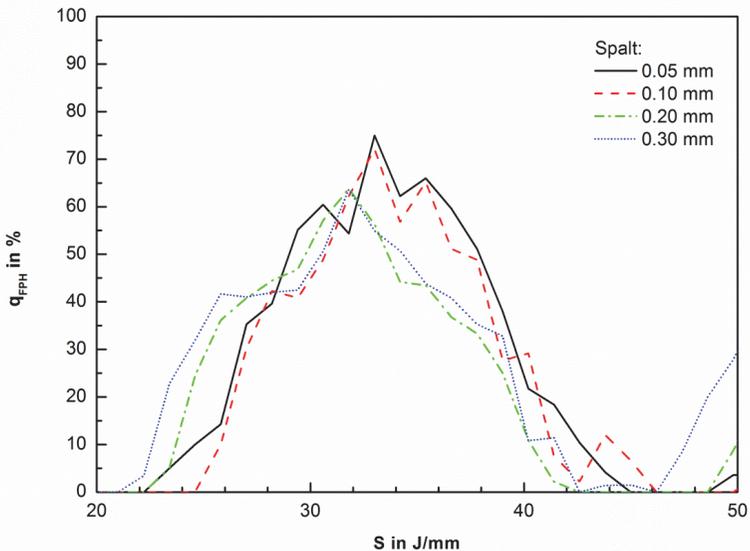


Bild 5.47: Abhängigkeit zwischen der Auftretenswahrscheinlichkeit von Durchschweißlöchern beziehungsweise deren Scharmittelwert q_{FPH} und der Streckenenergie S für eine Einschweißung am I-Naht-Überlapstoß in $2 \times 1 \text{ mm}$ verzinktes Stahlblech mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 m/min , in Abhängigkeit des Spaltmaßes [129].

Um den Einfluss des Spaltmaßes auf das Schweißergebnis der geregelten Einschweißung zu untersuchen, wurde unter anderem ein Experiment mit sich öffnendem Spalt durchgeführt, bei dem sich das Spaltmaß von $0,05 \text{ mm}$ auf $0,33 \text{ mm}$ erhöht. Geschweißt wurde, wie oben beschrieben, im I-Naht-Überlapstoß. Das Werkstück besteht aus $2 \times 1 \text{ mm}$ verzinktem Stahlblech ZStE340, welches mit einem Scheibenlaser geschweißt wird, der auf einen Fokussdurchmesser von $d_f = 600 \mu\text{m}$ fokussiert ist. Die Vorschubgeschwindigkeit beträgt $v = 7 \text{ m/min}$.

Bild 5.48 zeigt die resultierende Einschweißtiefe ins Unterblech $EST(UB)$ und die zugehörige Anbindebreite A in der Fügeebene, aufgetragen über dem gemessenen Spaltmaß.

Die Regelung bleibt über die gesamte Schweißnaht trotz sich öffnendem Spalt stabil, jedoch zeigt sowohl die Einschweißtiefe ins Unterblech $EST(UB)$ als auch die Anbindebreite A eine deutliche Abhängigkeit vom Spaltmaß. Klar zu erkennen ist auch die Abhängigkeit des Naht einfalls vom Spaltmaß, anhand der gezeigten Querschliffe.

Sowohl bei sehr engem Spalt von $0,07\text{ mm}$ als auch bei sehr großen Spalten von mehr als $0,3\text{ mm}$ tritt ein deutlicher Nahteinfall auf. Bei engen Spaltmaßen ist er auf einen erhöhten Schmelzeverlust in Folge von Spritzern zurückzuführen, bei den großen Spaltmaßen wird das fehlende Schmelzevolumen hingegen für die Überbrückung des Spaltes benötigt. Optimal erscheinen aus diesem Versuch Spaltmaße im Bereich zwischen $0,1\text{ mm}$ und $0,2\text{ mm}$.

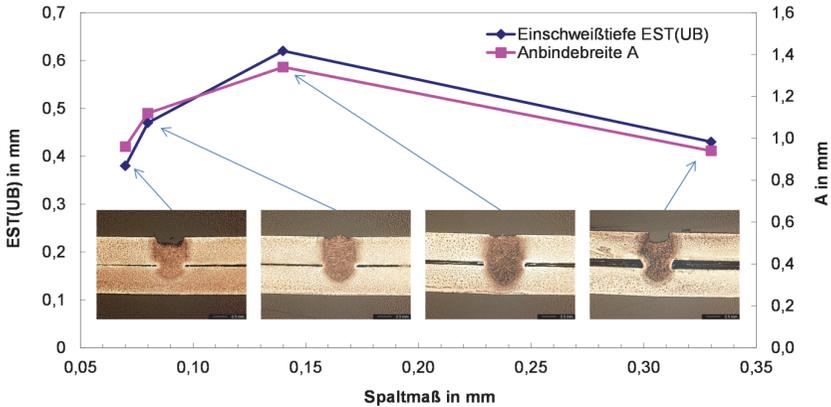


Bild 5.48: Einschweißtiefe ins Unterblech $EST(UB)$ und Anbindebreite A über dem Spaltmaß. Das Werkstück besteht aus $2 * 1\text{ mm}$ verzinktem Stahlblech ZStE340 mit einem sich öffnenden Spalt von $0,07\text{ mm}$ bis $0,33\text{ mm}$ [129].

Für eine umfassendere Darstellung der Abhängigkeiten von Einschweißtiefe und Anbindebreite, sowohl vom Spaltmaß als auch von der Vorschubgeschwindigkeit wurden weitere Experimente mit verschiedenen Spaltmaßen zwischen $0,05\text{ mm}$ und $0,3\text{ mm}$ durchgeführt. Die Versuche wurden hierfür mit drei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten von 5 m/min , 6 m/min und 7 m/min geschweißt.

Wie in Bild 5.49 dargestellt, unterliegt die Einschweißtiefe im Unterblech $EST(UB)$ einer vergleichsweise großen Schwankung, die tendenziell zu größeren Geschwindigkeiten hin zunimmt. Mit steigender Vorschubgeschwindigkeit steigt jedoch auch der Mittelwert der Einschweißtiefe über alle Spaltmaße hinweg, von $EST(UB)|_{5\text{ m/min}} = 0,35\text{ mm}$, über $EST(UB)|_{6\text{ m/min}} = 0,42\text{ mm}$ auf $EST(UB)|_{7\text{ m/min}} = 0,52\text{ mm}$, während die Streckenenergie über die Geschwindigkeit mit $S = 34,4 \pm 0,3\text{ J/mm}$ weitgehend konstant bleibt.

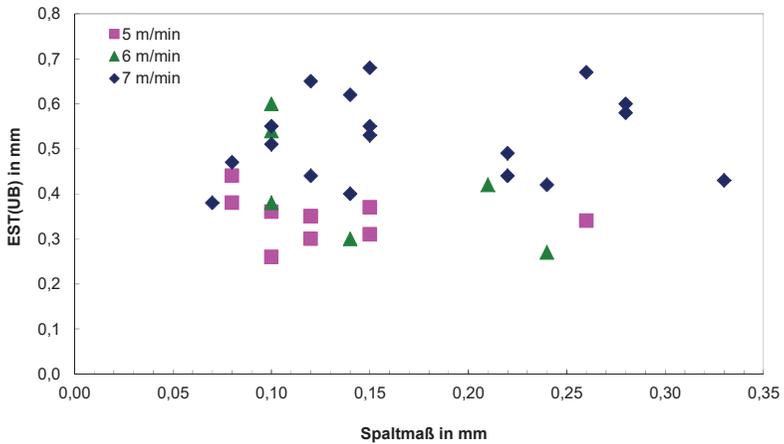


Bild 5.49: Einschweißtiefe ins Unterblech $EST(UB)$ über dem Spaltmaß für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten. Das Werkstück besteht aus $2 * 1 \text{ mm}$ verzinktem Stahlblech ZStE340 [129].

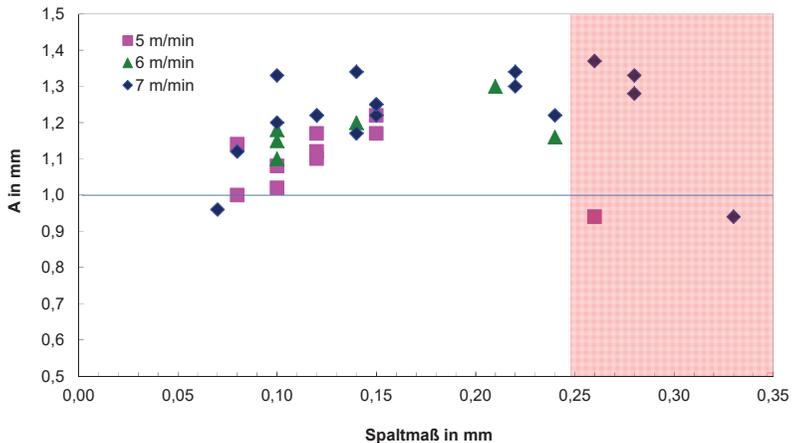


Bild 5.50: Anbindebreite A im Fügeseit über dem Spaltmaß für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten. Der rot unterlegte Bereich markiert das Auftreten von starkem Nahteneinfall und des Fehlers „Falscher Freund“. Das Werkstück besteht aus $2 * 1 \text{ mm}$ verzinktem Stahlblech ZStE340 [129].

Die für die Anbindung weit wichtigere Anbindebreite A in Bild 5.50, zeigt eine vergleichsweise niedrige Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit. Die Mittelwerte über alle Spaltmaße hinweg steigen nur leicht von $A|_{5 \text{ m/min}} = 1,11 \text{ mm}$, über

$A|_{6\text{ m/min}} = 1,18\text{ mm}$ auf $A|_{7\text{ m/min}} = 1,22\text{ mm}$. Die Abhängigkeit der Anbindebreite A vom Spaltmaß ist im Wesentlichen durch das Schmelzebaddefizit bei sehr kleinen und sehr großen Spaltmaßen zu erklären - siehe hierzu die Querschliffe in Bild 5.48 - und weist ein Maximum bei einem Spaltmaß zwischen etwa $0,15\text{ mm}$ und $0,2\text{ mm}$ auf. Generell ist eine Anbindebreite A anzustreben, die etwa der Dicke der Fügepartner entspricht; in diesem Falle also $1,0\text{ mm}$. Überschreitet das Spaltmaß einen Wert von etwa $0,25\text{ mm}$ treten sehr stark eingefallene Nahtoberraupen auf. Ab einem Spaltmaß von $0,3\text{ mm}$ konnte gehäuft das Fehlerbild des „Falschen Freundes“⁴² [130] beobachtet werden.

Die Stabilität des Regelsystems selbst, wurde anhand verschiedener Experimente nachgewiesen, bei denen das Spaltmaß vom technischen Nullspalt bis $0,7\text{ mm}$ variiert wurde, was bereits weit über das Fehlerbild des „Falschen Freundes“ hinaus geht.

5.8 Bewertung der Methode

Durch den Einsatz von Bildverarbeitungssystemen auf Basis von "Cellular Neural Networks" (CNN) konnte der Prototyp einer kamerabasierten Prozessregelung verwirklicht werden, die - verglichen mit konventionellen Kamera-Rechner-Kombinationen - bei niedrigen Hardwarekosten eine Bildverarbeitung in Echtzeit, im Multikilohertzbereich ermöglicht. Es konnte gezeigt werden, dass für die Regelung von Laserschweißprozessen Regelfrequenzen von bis zu 14 kHz für lineare Schweißnähte und bis zu 9 kHz für Freiformnähte möglich sind. Entscheidend für die Regelung ist hierbei, dass die Latenzzeit nur wenig höher als der Kehrwert der Regelfrequenz ist.

5.8.1 Vollständige Durchschweißung

Es konnte gezeigt werden, dass die Regelung der vollständigen Durchschweißung am I-Naht-Überlappstoß für verzinkte Stahlwerkstoffe mit großer Robustheit möglich ist. Dies konnte durch zahlreiche Experimente bestätigt werden, bei denen eine große Zahl von Prozessschwankungen wie sie auch unter Produktionsbedingungen auftreten, durch die Regelung kompensiert werden konnten. Dazu gehören Verschmutzungen auf dem Schutzglas, eine Schwächung des Laserstrahls durch Einflüsse des Schweißrauchs, Fehlpositionierungen der Fokuslage oder eine sprunghafte Änderung der Mate-

⁴² Beim Fehlerbild des „Falschen Freundes“ ist der Abstand von Ober- und Unterblech so groß, dass sich deren Schmelzebäder nicht miteinander verbinden. Ober- und Unterblech weisen nach dem Schweißvorgang jeweils eine (Blind-) Schweißnaht auf, es besteht jedoch keine Verbindung zwischen den beiden.

rialdicke sowie Schwankungen der Vorschubgeschwindigkeit wie sie etwa beim Schweißen mit Industrierobotern auftreten können.

Die Regelung der vollständigen Durchschweißung ist grundsätzlich auch bei Aluminiumwerkstoffen möglich, jedoch war dies nicht bei allen Legierungen möglich. Erfolgreich angewandt werden konnte die Durchschweißregelung bei verschiedenen Varianten der Legierungsgruppe AA6000. Für die Legierung AA5182 konnte hingegen keine erfolgreiche Regelung umgesetzt werden.

Generell kann bei der geregelten Durchschweißung, verglichen mit einer unregelmäßigen Schweißung, auf den 10 %-igen Sicherheitszuschlag der Laserleistung verzichtet werden, was zu entsprechenden Energieeinsparungen führt. Gleichzeitig werden hierdurch auch die durch diesen Leistungsüberschuss verursachten Schmauchspuren und Spritzer reduziert, was Nacharbeiten und Reinigungsaufwände reduziert. Des Weiteren könnten zusätzliche Qualitätsüberwachungsmaßnahmen reduziert und damit Kosten eingespart werden.

5.8.2 Einschweißung

Es konnte im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls gezeigt werden, dass an I-Naht-Überlapp-Schweißstößen mit verzinkten Stahlblechen auch die Einschweißung in das Unterblech über das Kamerasystem geregelt werden kann. Diese Prozesse sind insbesondere im Karosseriebau interessant, da so Nacharbeiten und Korrosion an der Nahtunterraupe vermieden werden und Schweißnähte im Sichtbereich platziert werden können. Bei verzinkten Stahlblechen konnten dabei Schwankungen der Vorschubgeschwindigkeit kompensiert werden. Des Weiteren wurde gezeigt, dass die Regelung der Einschweißung hinsichtlich der erzielten Anbindebreite robust ist, gegenüber Variationen der Breite des Fügspaltes. Im Vergleich zur geregelten Durchschweißung konnte so, bei sonst gleichen Randbedingungen, die benötigte Laserleistung auf fast die Hälfte reduziert werden.

Auch bei I-Naht-Überlappstößen an Aluminiumblechen sind Durchschweißlöcher am Fügspalt erkennbar. Hier reichte die Erkennungsrate in dem untersuchten Parameterbereich jedoch nicht für eine stabile Regelung aus. Weitere Experimente auf diesem Gebiet erscheinen jedoch insbesondere für die Legierungsgruppe AA6000 lohnenswert, da diese ein vergleichsweise stabiles thermisches Prozessbild für die Kamera aufweist.

5.8.3 Grenzen des Verfahrens

Neben der grundsätzlichen Notwendigkeit der Sichtbarkeit des Bildmerkmals Durchschweißloch, welches, wie oben beschrieben, nicht für alle Werkstoffe uneingeschränkt gegeben ist, gibt es noch weitere prinzipielle Einschränkungen des Verfahrens. Diese Grenzen liegen insbesondere bei solchen Schweißnahtfehlern, welche nicht über die Laserleistung ausgeglichen werden können. Hier seien insbesondere der Nahteinfall und der sogenannte „Falsche Freund“ genannt, bei dem keine Anbindung zwischen Ober- und Unterblech besteht, obwohl sowohl Ober- als auch Unterblech vollständig durchgeschweißt sind. Beide Schweißnahtfehler werden durch einen Mangel an Schmelzevolumen verursacht, weil beispielsweise die Schmelze einen zu großen Fügspalt nicht mehr sicher überbrücken kann.

Mögliche Ansatzpunkte zur Beeinflussung des Schmelzevolumens über eine Mehrgrößenregelung wurden in einem Patent (WO 2014/005603 A1) formuliert. Im Rahmen dieser Arbeit konnten diese Ansätze jedoch nicht mehr realisiert und somit deren Wirksamkeit auch nicht nachgewiesen werden.

6 Zusammenfassung

Die kamerabasierte Prozessüberwachung und -regelung ist ein komplexes Gebiet, welches viele Hürden auf dem Weg zu einer erfolgreichen Umsetzung bereithält. In der vorliegenden Arbeit wurden grundlegende Erkenntnisse gewonnen, um diese Hürden erfolgreich zu überwinden und ein funktionsfähiges kamerabasiertes Regelsystem zu entwickeln.

Durch spektrale Untersuchung der Prozessemissionen konnte ermittelt werden, welche Wellenlängenbereiche für eine bildgebende Prozessüberwachung der thermischen Prozessemissionen, mittels siliziumbasierter Kameras nutzbar sind. Die kalibrierte spektrale Messung der Emissionen offenbart, wie in Abschnitt 2.3.4 gezeigt, für die Werkstoffe Stahl und Aluminium, im Wellenlängenbereich unterhalb von 1.000 nm grundsätzlich zwei spektrale Fenster, die nicht durch charakteristische Emissionslinien der Werkstoffe gestört sind. Weiterhin wurde in Abschnitt 2.3.5 dargelegt, dass das kurzwellige Fenster unterhalb von 500 nm aufgrund von Streuungseffekten im Schweißrauch nicht sinnvoll nutzbar ist, was auch durch den Einsatz von Zusatzbeleuchtungen nicht umgangen werden kann. Letztlich steht gemäß Abschnitt 2.4 für siliziumbasierte Kameras nur das spektrale Fenster zwischen 650 nm und 1.000 nm zur Verfügung. Zu beachten ist jedoch auch hier, dass der Dynamikbereich von herkömmlichen siliziumbasierten Kameras in der Regel nicht ausreichend ist, um gleichzeitig das thermische Leuchten der Dampfkapillare und das Leuchten des Schmelzebades im Wellenlängenbereich unterhalb von 1.000 nm abzubilden.

Um die dynamischen Vorgänge innerhalb des Schweißprozesses zu erfassen, die durch das Werkstück oder die Schmelzebadoberfläche der direkten Beobachtung entzogen sind, wurde ein Röntgen-Video-System entwickelt und aufgebaut. Dieses in Kapitel 3 beschriebene System ermöglicht es Vorgänge im Inneren des Werkstücks mit hoher zeitlicher und örtlicher Auflösung zu beobachten.

Wie in Abschnitt 3.4.1 und 3.4.2 beschrieben, konnten mit dem Röntgensystem Verfahren umgesetzt werden, die es ermöglichen die Form und Neigung der Dampfkapillare zu bestimmen, sowie die Porenentstehung präzise zu beobachten. Weiterhin konnte in Abschnitt 3.4.3 und 3.4.4 gezeigt werden, wie mit dem System Schmelzebadströmungen visualisiert und quantitativ vermessen werden können, sowie die Soli-

du-Liquidus-Grenze bestimmt werden kann. Durch die Kombination mit herkömmlichen bildgebenden Verfahren konnte auf diese Weise der Schweißprozess quasi-dreidimensional charakterisiert werden, wie in Abschnitt 3.4.5 beschrieben ist. Neben der Röntgenvideoanlage am Joining and Welding Research Institute (JWRI) in Osaka ist dieses System das bis dato einzige weltweit, welches diese Möglichkeit bietet.

Durch weiterführende diagnostische Untersuchungen mit Hochgeschwindigkeitskameras konnten die Entstehungsprozesse diverser Schweißfehler detailliert erfasst werden, wie in Kapitel 4 beschrieben ist. Dies ermöglichte die Ableitung von charakteristischen geometrischen Bildmerkmalen zur Erfassung des momentanen Prozesszustandes und Erkennung von Schweißfehlern. Die identifizierten Bildmerkmale wurden direkt aus der diagnostischen Untersuchung des Entstehungsprozesses des jeweiligen Fehlers hergeleitet. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in Algorithmen zur automatisierten Erfassung dieser charakteristischen Bildmerkmale umgesetzt, deren Robustheit in Schweißversuchen mit unterschiedlichen Parametern getestet und in Abschnitt 4.5.2 bewertet wurde. Weiterhin wurde in diesen Untersuchungen die koaxiale kamerabasierte Prozessbeobachtung evaluiert, auf deren Prinzip im weiteren Verlauf der Arbeit auch das Prozessregelsystem aus Kapitel 5 aufgebaut wurde. Ziel war es neben der Erkennung von transienten Schweißfehlern passende Bildmerkmale zu identifizieren, die sich für eine Regelung des Schweißprozesses heranziehen lassen.

Aus den gefundenen Bildmerkmalen konnte das Durchschweißloch als entscheidendes Merkmal identifiziert werden, mit dem es möglich ist, den Durchschweißgrad von Laserschweißprozessen zu quantifizieren. Durch den Einsatz von CNN-Technologie war es möglich, einen Prototyp eines kamerabasierten Regelsystems aufzubauen, der bei niedrigen Kosten eine Bildverarbeitung im Multikilohertzbereich bei gleichzeitig minimaler Latenz ermöglicht.

Es konnte in zahlreichen Tests gezeigt werden, dass das System in der Lage ist, den Grad der Durchschweißung an I-Naht-Überlappstößen in verschiedenen Stahlwerkstoffen sicher zu regeln. Wie den Ergebnissen aus Abschnitt 5.7 zu entnehmen ist, ist das System dabei in der Lage, extern eingebrachte Störgrößen, wie Dickenänderungen, Schwankungen der Vorschubgeschwindigkeit sowie Defokussierung und verschmutzte Schutzgläser sicher zu kompensieren. All dies konnte sowohl an linearen Schweißnähen, als auch an Freiformnähen evaluiert werden.

Geregelte Durchschweißungen in Aluminium sind grundsätzlich ebenfalls möglich, jedoch hängt dies von den verwendeten Legierungen ab. Insbesondere der Werkstoff AA5182 fällt durch ein stark gestörtes thermisches Bild der Prozesszone auf, welches

eine sichere Regelung verhindert. Die Legierungsgruppe AA6000 hingegen stellt für die Prozessregelung der Durchschweißung kein Hindernis dar.

Wie in Abschnitt 5.8 beschrieben, kann bei der geregelten Durchschweißung im Gegensatz zum unregulierten Prozess, auf den sonst üblichen Sicherheitszuschlag von 10 % Laserleistung verzichtet werden, was zu entsprechenden Energieeinsparungen führt. Des Weiteren konnte hierdurch eine verbesserte Qualität der Nahtunterseite erzielt werden, die sich in einer verminderten Spritzerbildung und reduzierter Verschmächung des Werkstücks und des Spannmittels niederschlägt.

Es konnte außerdem gezeigt werden, dass die Regelung in der Lage ist eine geregelte Einschweißung am I-Naht-Überlappstoß von Stahlwerkstoffen zu realisieren. Dieser Prozess ist insbesondere im Karosseriebau interessant, weil hierdurch die Blechunterseite unverletzt bleibt, was sich positiv auf Nacharbeitsaufwände und das Korrosionsverhalten auswirkt. Da im Vergleich zur Durchschweißung bei der geregelten Einschweißung nur etwas mehr als die Hälfte der Einschweißtiefe erzielt werden muss, ist hierfür nochmals entsprechend weniger Laserleistung notwendig, siehe hierzu Abschnitt 5.8.2. Kann im Gegenzug die Schweißgeschwindigkeit in gleichem Maße erhöht werden, erbringt dies weitere Vorteile hinsichtlich Produktivität und Kosten.

Das geregelte Einschweißen bei Aluminiumwerkstoffen konnte hingegen nicht erfolgreich demonstriert werden. Das Bildmerkmal tritt zwar grundsätzlich auch bei dieser Werkstoffgruppe auf, jedoch ist die Erkennungsrate für eine sichere Regelung nicht ausreichend. Es erscheint jedoch lohnenswert weitere Untersuchungen in diese Richtung anzustellen, da zumindest bei der Werkstoffgruppe AA6000 ein vergleichsweise stabiles thermisches Bild der Prozesszone erzeugt wird.

Die Grenzen des Verfahrens liegen grundsätzlich darin begründet, dass für eine erfolgreiche Regelung das Bildmerkmal des Durchschweißloches im angestrebten Parameterbereich sichtbar sein muss. Dies bedeutet gleichfalls, dass eine Regelung auf eine beliebige Einschweißtiefe, unabhängig vom Vorhandensein von Grenzflächen, grundsätzlich nicht möglich ist.

Für derartige Anwendungsfälle muss auf Messsysteme zurückgegriffen werden, die eine direkte Messung der Kapillartiefe ermöglichen. Ein erster funktionierender Ansatz für ein solches Messsystem wurde auf der ICALEO 2011 gezeigt, die Scangeschwindigkeit dieses phasenlaufzeitbasierten Systems ist mit 1 kHz jedoch zu gering für eine sichere Prozessregelung [22], [131]. Zwei Jahre danach wurde durch Meiko Boley und Paul Webster et al. auf der ICALEO 2013 ein Messsystem vorgestellt, wel-

ches auf Basis von Inline Coherent Imaging (ICI) die direkte Messung der Kapillartiefe ermöglicht [132]. Ein ähnliches System wurde von Dr. Markus Kogel-Hollacher et al. auf dem Hirscheegg-Workshop 2014 präsentiert [133]. Diese ICI-basierten Messsysteme bieten mit Messfrequenzen von mehreren zehn Kilohertz das Potential für eine erfolgreiche Einschweißtiefenregelung, welche erstmals durch Paul Webster et al. auf dem Hirscheegg-Workshop 2016 gezeigt wurde [134].

Geregelte Laserschweißungen mit dem hier vorgestellten kamerabasierten Regelsystem konnten erstmals auf der ICALEO 2008 präsentiert werden [105], während das fertige System schließlich im Jahre 2012 mit dem dritten Platz des Berthold Leibinger Innovationspreises und dem dritten Platz des Stahl-Innovationspreis bedacht wurde.

7 Literaturverzeichnis

- [1] DILTHEY, U.: *Schweißtechnische Fertigungsverfahren Band 2 : Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen*. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995.
- [2] DEININGER, C.: *Entwicklung eines Systems zur Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen*. Universität Stuttgart, Studienarbeit, 2002 (Inst. F. Strahlwerkzeuge: IFSW).
- [3] SUN, A; ELIJAH, K-A JR.: *Sensor systems for real-time monitoring of laser weld quality*. Journal of Laser Applications Volume 11, Number 4 August 1999, S.153.
- [4] MÜLLER, M.G.: *Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung*. Universität Stuttgart, Dissertation, 2002 (Inst. F. Strahlwerkzeuge: IFSW).
- [5] ABT, F.: *Untersuchung der Leistungsstabilität von Festkörperlasern beim Laserstrahlschweißen*. Universität Stuttgart, Inst. f. Strahlwerkzeuge, Studienarbeit, 2004.
- [6] KOGEL-HOLLACHER, M.: *Sensorik und Datenauswertung zur industriellen Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen*. Technische Universität Berlin, Dissertation, 2008.
- [7] ARTINGER, G.; HANICKE, L.; TIMM, K.; WIRTH, P.: *Untersuchung akustischer und optischer Meßverfahren zur Diagnose des Laserstrahlschweißens*. In Schweißen und Schneiden 42, H.7, S.333, 1990.
- [8] GATZWEILER, W.; MAISCHNER, D.; BEYER, E.: *Messung von Plasmafluktuationen und Schallemission beim Laserstrahlschweißen zur Prozessüberwachung*. In Laser und Optoelektronik 20 (5), S.64, 1990.
- [9] FARSON, D.F.; KIM, K.R.: *Optical and Acoustic Emissions in Laser Welding*. In Proc. of the Lasers Materials Processing Symposium ICALEO 1998, Vol.85c, 1-10, 1998.
- [10] KOGEL-HOLLCHER, M.; DIETZ, C.; NICOLAY, T.; SCHMID, J.; SCHMIDT, M.; BAHNMÜLLER, J.; KESSLER, B.; SCHÜRMAN, B.; MÜLLER, M.-G.: *Process Monitoring Or Process Control In Laser Materials Processing*. In Proc. of the Lasers Materials Processing Symposium ICALEO2001, Jacksonville, Florida (LIA), 2001.

- [11] ABT, F.: *Abschlussbericht zum Projekt „Yb:Wolframat-Scheibenlaser höchster Leistung“*. (FZK: 13N8377) im Verbundprojekt „Scheibenlaser höchster Brillanz“, Stuttgart 2008.
- [12] WIKIPEDIA ENZYKLOPÄDI: *Wiensches Verschiebungsgesetz*. St. Petersburg 21.11.2016.
In: [https://de.wikipedia.org/wiki/Wienschés_Verschiebungsgesetz](https://de.wikipedia.org/wiki/Wiensch%C3%A9_Verschiebungsgesetz) am 02.01.2017
- [13] WIKIPEDIA ENZYKLOPÄDI: *Plancksches Strahlungsgesetz*. St. Petersburg 15.01.2015.
In: http://de.wikipedia.org/wiki/Plancksches_Strahlungsgesetz am 18.01.2015
- [14] NIST STANDARD REFERENCE DATABASE 121: *Stefan-Boltzmann constant*. "2014 CODATA recommended values" Gaithersburg 25.06.2015.
In: <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?sigma> am 02.01.2017
- [15] PEDROTTI, F.; PEDROTTI, L.; BAUSCH, W.; SCHMIDT, H.: *Optik: eine Einführung*. München: Prentice Hall Verlag GmbH, 1996.
- [16] MALDAGUE, X. P. V.: *Theory and Practice of Infrared Technology for Nondestructive Testing*. New York: John Wiley & Sons Inc., 2001.
- [17] ZHANG, Y; EVANS, J. R. G.; YANG, S.: *Corrected Values for Boiling Points and Enthalpies of Vaporization of Elements in Handbooks*. In *Journal of Chemical & Engineering Data*. 56, 2011, S. 328–337 (doi:10.1021/jc1011086).
- [18] BECK, M.: *Modellierung des Lasertiefschweißens*. Universität Stuttgart, Dissertation, 1996 (Inst. F. Strahlwerkzeuge: IFSW).
- [19] BEERSIEK, J.; POPRAWA, R.; SCHULZ W.; HONGPING, G.; MUELLER, R.E.; DULLEY, W.W.: *On-line monitoring of penetration depth in laser beam welding*. In *Proc. of the Lasers Materials Processing Symposium ICALEO'97*, LIA Vol. 82, LIA.
- [20] BAGDADE, S.D.: *ASM Ready Reference: Thermal Properties of Metals (Materials Data Series)*. ASM International, 9639 Kinsman Rd., Materials Park, Ohio 44073 Russell Township, Geauga County, Ohio, USA, February 2003.
- [21] JASPER, K.; BREITSCHWERDT, S.; SCHMID, C.: *Vorrichtung zur Regelung von Schweißparametern beim Laserstrahlschweißen*. Patentschrift DE 197 16 293 A1, 1998.

- [22] WÖLFELSCHNEIDER, H.; ABT, F.: *Online-Messung der Einschweißtiefe zur Regelung laserbasierter Schweißprozesse (MERlaS)*. Abschlussbericht zum Projekt MERlaS gefördert von der Baden-Württemberg Stiftung, 2012, Institut für Strahlwerkzeuge IFSW, Stuttgart, Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik IPM, Freiburg, Deutschland.
- [23] VOß, A.; ABT, F.; NEGEL, J.-P.: *Fokuslage-Überwachung und -Regelung mit Berücksichtigung der thermisch induzierten Fokuslageverschiebung*. Abschlussbericht zum Projekt FoControl gefördert von der Baden-Württemberg Stiftung, 2012, Institut für Strahlwerkzeuge IFSW, Stuttgart, Deutschland.
- [24] OCEANOPTICS: *HR4000 and HR4000CG-UV-NIR Series, High-Resolution Fiber Optic Spectrometers, HR4000 / HR4000CG-UV-NIR, Installation and Operation Manual*. Document Number 210-00000-000-02-0908, Ocean Optics, Inc. World Headquarters, 830 Douglas Ave., Dunedin, FL, USA 34698. In: <http://www.oceanoptics.com/technical/hr4000.pdf> am 16.11.2012.
- [25] RÜTTEN, C.: *Spektroskopische Untersuchung von Laserschweißprozessen*. Studienarbeit, IFSW 10-27, Institut für Strahlwerkzeuge, Stuttgart, 2010.
- [26] ABT, F.: *Online-Measurement of penetration depth for welding processes*. In IFSW (Hrsg.): Hirscheegg 2010 (12th International Workshop Process stability in laser beam welding II), Hirscheegg: 2010, Hirscheegg, Deutschland.
- [27] OSRAM (TECHNISCHER SUPPORT): *Produktinformationsblatt zum Leuchtmittel*. E-Mail vom 13.08.2009.
- [28] QUICK METALL GMBH: *Werkstoffdatenblätter*. In: <http://www.quickmet.de/Werkstoffe.aspx> am 16.11.2012.
- [29] CURRY, J.-J.: *NIST Atomic Spectra Database*. The National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, Maryland, USA, 2012. In: <http://www.nist.gov/pml/data/asd.cfm/> am 18.11.2012.
- [30] MÜLLER-BORHANIAN, J.: *Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen*. Universität Stuttgart, Dissertation, 2008 (Inst. F. Strahlwerkzeuge: IFSW).
- [31] MÜLLER-BORHANIAN, J.: *Integration optischer Messmethoden zur Prozesskontrolle beim Laserstrahlschweißen*. Abschlussbericht zum Verbundprojekt INESS. Forschungs- und Tagungsberichte, München, Herbert UTZ Verlag, 2005.

- [32] WIKIPEDIA ENZYKLOPÄDI: *Extinktion (Optik)*. St. Petersburg 20.01.2014.
In: [http://de.wikipedia.org/wiki/Extinktion_\(Optik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Extinktion_(Optik)) am 21.04.2014.
- [33] MICHALOWSKI, A.; HEB, A.; RUB, A.; DAUSINGER, F.: *Plume attenuation under high power Yb:YAG laser material processing*. In Proc. of Lasers in Manufacturing LIM 2007, München, Deutschland.
- [34] COSSLETT, V.E.: *Methods of X-Ray Microscopy*. In Proc. of "X-Ray Optics and X-Ray Microanalysis", Third International Symposium, Stanford University, Stanford, California, USA, August 1962.
- [35] ABT, F.; BOLEY, M.; WEBER, R.; GRAF, T.; POPKO, G.; NAU, S.: *Novel X-ray System for in-situ Diagnostics of Laser Based Processes – First Experimental Results*. In Proc. of Lasers in Manufacturing LIM 2011, München, Deutschland.
- [36] NAU, S.; POPKO, G.: *Machbarkeitsstudie für Hochgeschwindigkeits-Röntgenbildwandler – Röntgenvideo zur Analyse von Laserschweißvorgängen*. (Auftraggeber: Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge mbH) Fraunhofer EMI, Freiburg, 2008.
- [37] STEGEMANN, D.: *Radiografie und Radioskopie: Mit 20 Tabellen*. Stuttgart: Teubner, 1995.
- [38] HAMAMATSU: *X-Ray Scintillator ACS, ALS, FOS*. Hamamatsu Photonics K.K., Electron Tube Division, 314-5, Shimokanzo, Iwata City, Shizuoka Pref., 438-0193, Japan.
In: https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/ACS_ALS_FOS_TMCP1031E04.pdf am 21.07.2011.
- [39] YXLON INTERNATIONAL GMBH: *Kundenservice*. Essener Bogen 15, 22419 Hamburg, Deutschland, Kontakt: <http://www.yxlon.de/Service-de>.
- [40] KAUFFMANN, G.W.; MOSER, E.; SAUER, R.: *Radiologie*. Elsevier Urban & Fischer Verlag, München, Jena, 2006.
- [41] GÖBEL, H.: *Computertomographie mit Halo-Effekt - eine Prüfmethode durch kombinierte tomografische Verfahren mit Monte Carlo-Unterstützung*. Universität Konstanz, Dissertation, 2002 (Fachbereich Physik).
- [42] SAGEL, K.: *Tabellen zur Roentgen-Emissions- und Absorptions-Analyse. Bd. 9. Anleitungen für die chemische Laboratoriumspraxis*. Berlin [u.a.], Springer, 1959.

- [43] KALE, K.V.; MEHROTRA, S.C.; MANZA, R.R.: *Computer Vision and Information Technology – Advances and Applications*. I.K. International Publishing House Pvt. Ltd., New Delhi, Bangalore, 2010.
- [44] VOGT, H.G.; SCHULTZ, H.: *Grundzüge des praktischen Strahlenschutzes, 2. Auflage*. Carl Hanser Verlag, München, Deutschland, 1992.
- [45] REGLER, F.: *Einführung in die Physik der Röntgen- und Gammastrahlen: unter Berücksichtigung der Elektronen- und Neutronenbeugung*. München, Thiemig, 1967.
- [46] BUZUG, T.M.: *Einführung in die Computertomographie*. Springer-Verlag, Berlin, Deutschland, 2004.
- [47] WIKIPEDIA ENZYKLOPÄDI: *Shot noise*. St. Petersburg, 07.04.2014.
In: http://en.wikipedia.org/wiki/Shot_noise am 21.04.2014.
- [48] KRIEGER, H.: *Strahlungsmessung und Dosimetrie*. Springer Spektrum, Wiesbaden, 2013.
- [49] KUBE, M.: *Strahlungsstabile Röntgenkamera für industrielle Anwendungen – Xeye*. Fraunhofer-Allianz Vision, 26.01.2009.
In: <http://www.vision.fraunhofer.de/de/projekte/444.html> am 07.04.2015.
- [50] PCO COMPUTER OPTICS: *Optische Abbildung mit Einzel- und Tandemobjektiven*. Deutschland, 93309 Kelheim, OptTan_d-04/9, 2005.
- [51] LÜKE, H.D.: *The Origins of the Sampling Theorem*. IEEE Communications Magazine, S. 106–108, April 1999.
- [52] BOLEY, M.: *Erprobung eines Echtzeit Röntgen Videosystem zur Diagnostik laserbasierter Fertigungsverfahren*. Studienarbeit, IFSW 11-15, Institut für Strahlwerkzeuge, Stuttgart, 2011
- [53] HAFERKORN, H.: *OPTIK – Physikalisch-technische Grundlagen und Anwendungen*. Wiley-VCH, Weinheim, 2002.
- [54] NORM DIN EN 462 1994: *Zerstörungsfreie Prüfung; Bildgüte von Durchstrahlungsaufnahmen*.
- [55] ABT, F.; BOLEY, M.; WEBER, R.; GRAF, T.: *X-Ray Videography For Investigation Of Capillary And Melt Pool Dynamics In Different Materials*. In Proc. of 30est International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2011), 2011, Orlando, Florida, USA.

- [56] WEBERPALS, J.; HERMANN, T.; BERGER, P.; SINGPIEL, H.: *Utilisation of Thermal Radiation for Process Monitoring*. In Physics Procedia, Lasers in Manufacturing, Munich, Germany, 2011.
- [57] ABT, F.: *coaxial process monitoring*. In IFSW (Hrsg.): Hirscheegg Summer-Workshop 2007. Hirscheegg: 2007, Hirscheegg, Deutschland.
- [58] KATAYAMA, S.; SETO, N.; KIM, J.-D.; MATSUNAWA, A.: *Formation Mechanism and Reduction Method of Porosity in Laser Welding of Stainless Steel*. In Proc. of the Lasers Materials Processing Symposium ICALEO'97, Vol. 83, Orlando, Florida (LIA), 1997, Sect. G, S. 83.
- [59] KATAYAMA S.; MATSUNAWA, A.: *Formation Mechanism and Prevention of Defects in Laser Welding of Aluminium Alloys*. In Proc. of CISFFEL 6, Vol. 1, 1998, Seite 215.
- [60] KATAYAMA, S.; SETO, N.; KIM, J.-D.; MATSUNAWA, A.: *Formation Mechanism and Suppression Procedure of Porosity in High Power Laser Welding of Aluminium Alloys*. In Proc. of the Lasers Materials Processing Symposium ICALEO'98, Vol. 85, Orlando, Florida (LIA), 1998, Sect. C, S. 24.
- [61] ABT, F.; BOLEY, M.: *Melt Flow Visualization with X-Ray*. In IFSW (Hrsg.): Hirscheegg 2013 (15th International Workshop Process stability in laser beam welding II), Hirscheegg 2013, Hirscheegg, Deutschland.
- [62] WIKIPEDIA ENZYKLOPÄDI: *Periodensystem*. St. Petersburg 02.04.2017. In: <https://de.wikipedia.org/wiki/Periodensystem> am 06.04.2017
- [63] GATZEN, M.; TANG, Z.; VOLLERTSEN, F.; MIZUTANI, M; KATAYAMA, S.: *X-ray investigation of melt flow behavior under magnetic stirring regime in laser beam welding of aluminium*. In JLA, V. 23, I. 3, 2011.
- [64] FERREIRA, T.; RASBAND, W.: *ImageJ User Guide - IJ 1.46r*. 02.10.2012 In: <http://imagej.nih.gov/ij/docs/guide> am 11.01.2017.
- [65] BOLEY, M.: *Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung der Prozessgeometrie von Laserschweißprozessen mittels Röntgenvideographie*. Diplomarbeit, IFSW 13-01, Institut für Strahlwerkzeuge, Stuttgart, 2013
- [66] BOLEY, M.; ABT, F.; WEBER, R.; GRAF, T.: *X-Ray and Optical Videography for 3D Measurement of Capillary and Melt Pool Geometry in Laser Welding*. In Physics Procedia, Lasers in Manufacturing LIM 2013, Munich, Germany, 2013.

- [67] SCHMID, E.: *Kamerabasierte Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen mit dem Nd:YAG-Laser*. Universität Stuttgart, Inst. f. Strahlwerkzeuge, Studienarbeit, 2006.
- [68] KURZ, D.: *Qualifizierung von Auswertalgorithmen für die kamerabasierte Prozesskontrolle beim Laserschweißen*. Studienarbeit, IFSW 10-04, Institut für Strahlwerkzeuge, Stuttgart, 2010.
- [69] PHOTONFOCUS: *User Manual MV-D1024E CameraLink Series CMOS Area Scan Cameras*. Photonfocus AG, Bahnhofplatz 10, CH-8853 Lachen, Schweiz, 2008.
In: http://www.photonfocus.de/upload/manuals/MAN028_e_V1_4_MVD1024E-series_n2.pdf am 25.11.2012.
- [70] BAIER, T.: *Untersuchung verschiedener Ansätze zur Online Prozesskontrolle beim Remote-Laserstrahlschweißen*. Studienarbeit, IFSW 08-09, Institut für Strahlwerkzeuge, Stuttgart, 2008.
- [71] MURUBE-LINDAHL, A.: *Entwicklung und Test einer Software zur automatisierten Bildauswertung für die koaxiale, kamerabasierte Prozesskontrolle beim Laserschweißen*. Diplomarbeit, IFSW 08-21, Institut für Strahlwerkzeuge, Stuttgart, 2008.
- [72] FROSCHEIMER-HANSS, T.: *Festigkeitsverhalten laserstrahlgeschweißter belastungsangepasster Stahlwerkstoffverbindungen*. Universität Stuttgart, Dissertation, 2013 (Inst. F. Strahlwerkzeuge: IFSW).
- [73] PRECITEC KG: *WeldMaster Inspect*. Precitec GmbH & Co. KG, Draisstraße 1, 76571 Gaggenau-Bad Rotenfels, 76571 Gaggenau-Bad Rotenfels, 2015.2015.
In: <http://www.precitec.de/produkte/fuegetechnologie/prozessueberwachung/weldmaster-inspect/> am 10.04.2015.
- [74] MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GMBH & CO. KG: *2D/3D-Profilsensor scanCONTROL 2800*.
In: <http://www.micro-epsilon.de/download/products/dat--scanCONTROL-2800--de.pdf> am 25.05.2010.

- [75] PRECITEC KG: *Nahtinspektionssystem SOUVIS® 5000*. Precitec GmbH & Co. KG, Draistraße 1, 76571 Gaggenau-Bad Rotenfels, 76571 Gaggenau-Bad Rotenfels, 2015.2015.
In:
<http://www.precitec.de/produkte/fuegetechnologie/prozessueberwachung/souvis-r-5000/> am 10.04.2015.
- [76] WEBERPALS, J.; DAUSINGER, F.: *Influence of Inclination Angle on Spatter Behavior at Welding with Lasers of Strong Focusability*. In Proc. of the Lasers Materials Processing Symposium ICALEO 2007, Orlando, Florida (LIA), 2007.
- [77] KAIERLE, S.: *Understanding the Laser Process*. In Laser Technik Journal, Volume 7, Issue 2, 28.04.2010.
In: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/latj.201090027/pdf>
- [78] BERGER, P.; BAUKNECHT, T.; BOLEY, M.; ABT, F.; WEBER, R.; GRAF, T.: *Detection And Repairing Of Weld Defects*. In Proc. of the Lasers Materials Processing Symposium ICALEO 2013, Miami, Florida (LIA), 2013.
- [79] TRUMPF LASER- UND SYSTEMTECHNIK GMBH: *Triple Sensor Seamline Pro-Future Potential: Online Thermography*. TRUMPF Laser- und Systemtechnik GmbH, Johann-Maus-Str. 2 71254 Ditzingen, Deutschland, 2014.
In: http://www.trumpf-laser.com/fileadmin/DAM/trumpf-laser.com/Events/Techday/Automotive_Photonics/Triple_Sensor_Seamline_pro_applications_and_Potential.pdf am 22.04.2015.
- [80] DORSCH, F.: *Durchschweißerkennung beim Laserschweißen mittels koaxialer Prozessbeobachtung*. In Workshop Prozesskontrolle bei der Lasermaterialbearbeitung 2011, Hrsg.: bayern photonics e.V. Argelsrieder Feld 22, 82234 Oberpfaffenhofen, Deutschland, 2011.
- [81] PLASMO INDUSTRIE- UND SYSTEMTECHNIK GMBH: *processobserver advanced*. Plasmotechnik GmbH, Dresdner Straße 81-85, 1200 Vienna, Austria, 2014.
In: http://www.plasmo.at/site/images/2014_Datenblatt_ProcessObserver_advanced_D.pdf am 12.04.2015.
- [82] 4D GMBH: *WeldWatcher*. Juelicher Str. 338, 52070 Aachen, Germany, 2015.
In: <http://www.4d-gmbh.de/weldwatcher-description/> am 12.04.2015.
- [83] PRECITEC OPTRONIK GMBH: *LWM-C Laser Welding Monitor – Online monitoring of processing quality in laser material processing - Manual*. Rodgau: Precitec Optronic GmbH, 2005

- [84] PROMETEC: *Welding Monitor PD 2000*. 4D GmbH, Burgwedeler Straße 79, 30916 Isernhagen, Germany, 2015.
In: http://www.prometec.de/EN/solutions_laser.html am 12.04.2015.
- [85] ABT, F.; BLUG, A.; NICOLosi, L.: *Analoge Bildverarbeitung mit Cellularen Neuronalen Netzen (CNN) zur Regelung laserbasierter Schweißprozesse - ACES*. Abschlussbericht zum Projekt ACES gefördert von der Baden-Württemberg Stiftung. 2009, Institut für Strahlwerkzeuge IFSW, Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik IPM, TU-Dresden, Stuttgart, Deutschland.
- [86] ABT, F.; BLUG, A.; NICOLosi, L.: *Verwertungsprojekt zum abgeschlossenen Forschungsprojekt: Analoge Bildverarbeitung mit Cellularen Neuronalen Netzen (CNN) zur Regelung laserbasierter Schweißprozesse – ACES II*. Abschlussbericht zum Projekt ACES-II gefördert von der Baden-Württemberg Stiftung. 2011, Institut für Strahlwerkzeuge IFSW, Fraunhofer Institut für Physikalische Messtechnik IPM, TU-Dresden, Stuttgart, Freiburg, Dresden, Deutschland.
- [87] NICOLosi, L.: *Visual Control of Laser Welding Processes by Cellular Neural Networks*. Technische Universität Dresden, Dissertation, 2012 (Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik).
- [88] BLUG, A.: *Industrielle Prozesskontrolle mittels räumlich-zeitlicher Bildverarbeitung auf Zellularen Neuronalen Netzwerken*. Technische Universität Dresden, Dissertation, 2012 (Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik).
- [89] MANDEL, B.M.; SCHWINDER, P.M.: *Online Control and Quality Improvement of Laser-Beam Welding by High-Dynamic CMOS Cameras – A Major Step in Manufacturing Quality*. In Proc. of the LANE 2004, 2004, Vol. 1, S. 193.
- [90] BOLLIG, A.: *Prädikative Prozessregelung beim Schweißen mit Laserstrahlung*. Techn. Hochsch., Diss.--Aachen, 2003. VDI-Verl., 2004 (Reihe 8: Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik Band 1020). – ISBN 3-18-502008-1
- [91] BARDIN, F.; COBO, A.; LOPEZ-HIGUERA, J.; COLLIN, O.; AUBRY, P.; DUBOIS, T.; HÖGSTRÖM, M.; NYLEN, P.; JONSSON, P.; JONES, J.; HAND, D.: *Closed-loop power and focus control of laser welding for full-penetration monitoring*. In Applied Optics, Vol. 44, No. 1, January 2005.
- [92] BEERSIEK, J.: *Überwachung und Regelung der Einschweißtiefe beim Schweißen mit Laserstrahlung*. Berichte aus der Lasertechnik RWTH Aachen, Dissertation, 2004.

- [93] POSTMA, S.; AARTS, R.G.K.M.; MEIJER, J; JONKER, J.B.: *Penetration control in laser welding of sheet metal*. In Journal of Laser Applications, Vol. 14, Issue 4, Nov. 2002, pp. 210-214
- [94] BAGGER, C.; OLSEN, F.: *Laser welding closed-loop power control*. In Journal of Laser Applications, Vol. 15, Issue 1, Feb. 2003, pp. 19-24
- [95] KAWAHITO, Y.; KATAYAMA, S.: *In-process monitoring and adaptive control for prevention of through-holes in full-penetration lap welds of aluminum alloy sheets*. In Journal of Laser Applications, Vol. 18, Issue 2, May. 2006, pp. 93-100
- [96] JAUREGI, J.M.; AALDERINK, B.J.; AARTS, R.G.K.M.; OLDE BENNEKER, J.; MEIJER, J.: *Design, implementation and testing of a fuzzy control scheme for laser welding*. In Journal of Laser Applications, Vol. 20, Issue 3, Aug. 2008, pp. 146-153
- [97] NONNER, R.: *Erprobung eines Echtzeit-Bildverarbeitungssystems für die In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen*. Diplomarbeit, Institut für Strahlwerkzeuge, Stuttgart, 2006.
- [98] KOGEL-HOLLACHER, M. ET AL.: *Camera based Process Monitoring of the CO₂ and ND:YAG Laser Welding Process: Experiences from Applications in the Automotive Industry*. In Proc. of the Lasers Materials Processing Symposium ICALEO2004, Orlando, Florida (LIA), 2004.
- [99] CHUA, L.O.; YANG, L.: *Cellular Neural Networks: Theory*. In IEEE Transactions On Circuits And Systems, VOL. 35, NO. 10, OCT. 1988.
- [100] ROSKA, T., CHUA, L.O.: *The CNN Universal Machine: an analogic array computer*. In IEEE Transactions on Circuits and Systems-II Vol.40, pp. 163-173, March, 1993.
- [101] RODRÍGUEZ-VÁZQUEZ, A., LIÑÁN-CEMBRANO, G., CARRANZA, L., ROCA-MORENO, E., CARMONA-GALÁN, R., JIMÉNEZ-GARRIDO, F., DOMÍNGUEZ-CASTRO, R., ESPEJO MEANA, S.: *ACE16k: The Third Generation of Mixed-Signal SIMD-CNN ACE Chips Toward VSoCs*. In IEEE Transactions on Circuits and Systems—I: Regular papers, VOL. 51, NO. 5, pp. 851, MAY 2004.
- [102] FLYNN, M.: *Some Computer Organizations and Their Effectiveness*. In IEEE Trans. Comput., Vol. C-21, pp. 948, 1972

- [103] BLUG, A.; ABT, F.; NICOLOSI, L.; GEESE, M.; TETZLAFF, R.: CNN: *Pixelparallele Bildverarbeitung ermöglicht Prozessregelung beim Laserschweißen*. In Photonik (2008) Nr.06 S.30-32.
- [104] TETZLAFF, R., NIEDERHÖFER, C: *Cellular Nonlinear Networks: New ways of integrated sensing and processing*. In Sensor + Test 2006 Proceedings, OPTO2006, IRS²2006, pp. 21-26
- [105] ABT, F.; NICOLOSI, L.; CARL, D.; BLUG, A.; GEESE, M.; DAUSINGER, F.; DEISINGER, C.; HÖFLER, H.; TETZLAFF, R.: *Closed Loop Control Of Laser Welding Processes With Cellular Neural Network (Cnn) Cameras*. In Proc. of the 27th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2008), 2008, Temecula, CA, USA, 817-825.
- [106] CHUA, L.O.; ROSKA, T.: *Cellular neural networks and visual computing. Foundations and applications*. Cambridge University Press 2004, first published in printed format 2002.
- [107] ROSKA, T.: *Cellular Wave Computers for Brain-Like Spatial-Temporal Sensory Computing*. In IEEE Circuits and Systems Magazine, Vol 5, No. 2, pp. 5-19, 2005.
- [108] COMPANY ANAFOCUS, Av. Isaac Newton s/n, Pabelln de Italia, Parque Tecnológico Isla de la Cartuja, 41092 Seville, Spain. www.anafocus.com.
- [109] M. GEESE, R. TETZLAFF, D. CARL, A. BLUG, H. HÖFLER, F. ABT: *Feature Extraction in Laser Welding Processes*. In Proc. of the 11th International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications CNNA 2008, Santiago de Compostela, Spain.
- [110] NICOLOSI, L.; TETZLAFF, R.; ABT, F.; BLUG, A.; CARL, D.; HÖFLER, H.: *New CNN Based Algorithms for the Full Penetration Hole Extraction in Laser Welding Processes: Experimental Results*. In Proc. of the International Joint Conference on Neural Networks IJCNN 2009, Atlanta, GA, USA.
- [111] ABT, F.; BLUG, A.; NICOLOSI, L.; DAUSINGER, F.; HÖFLER, H.; TETZLAFF, R.; WEBER, R.: *Real Time Closed Loop Control of Full Penetration Keyhole Welding with Cellular Neural Network Cameras*. In Journal of Laser Micro / Nano-engineering (JLMN) (2011) Nr.2 S.131.
- [112] BLUG, A.; CARL, D.; HÖFLER, H.; ABT, F.; GEESE, M.; TETZLAFF, R.: *Pixelparallele Bildverarbeitung mit CNN zur Regelung von Laserschweißprozessen*. In VDI-Berichte, Sensoren und Messsysteme 2008, Vol. 2011, 2008.

- [113] L. NICOLOSI, R. TETZLAFF, F. ABT, A. BLUG, H. HÖFLER, D. CARL: *New CNN based algorithms for the full penetration hole extraction in laser welding processes*. In IEEE International Symposium on Circuits and Systems ISCAS, May 24-27 2009, Taipei, Taiwan.
- [114] ABT, F.; BLUG, A.; NICOLOSI, L.; DAUSINGER, F.; WEBER, R.; TETZLAFF, R.; CARL, D.; HÖFLER, H.: *Closed Loop Control Of Laser Welding Processes Using Cellular Neural Network Cameras: Measurement Technology*. In Proc. of 28th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2009), 2009, Orlando, Florida, USA.
- [115] NICOLOSI, L.; TETZLAFF, R.; HÖFLER, H.; BLUG, A.; CARL, D.; ABT, F.: *Omnidirectional Algorithm for the Full Penetration Hole Extraction in Laser Welding Processes*. In Proc. of the European Conference on Circuit Theory and Design ECCTD 2009, Antalya, Turkey.
- [116] ABT, F.; HEIDER, A.; WEBER, R.; GRAF, T.; BLUG, A.; CARL, D.; HÖFLER, H.; NICOLOSI, L.; TETZLAFF, R.: *Camera based closed loop control for partial penetration welding of overlap joints*. In Proc. of Lasers in Manufacturing 2011, München, Deutschland.
- [117] WIKIPEDIA ENZYKLOPÄDI: *Stationärer stochastischer Prozess*. St. Petersburg 03.10.2016.
In: https://de.wikipedia.org/wiki/Station%C3%A4rer_stochastischer_Prozess
am 03.04.2017
- [118] BLUG, A., ABT, F., NICOLOSI, L.: *Verfahren zum Betrieb einer Vorrichtung zur Materialbearbeitung und Vorrichtung*. Patent DE 10 2010 013 914.
- [119] T. FORSMAN, J. POWELL, C. MAGNUSSON: *Process instability in laser welding of aluminium alloys at the boundary of complete penetration*. In Journal of Laser Applications, Vol. 13, Issue 5, Oct. 2001, pp. 193-198
- [120] BLUG, A.; CARL, D.; HÖFLER, H.; ABT, F.; HEIDER, A.; WEBER, R.; NICOLOSI, L.; TETZLAFF, R.: *Closed-loop control of laser power using the full penetration hole image feature in aluminum welding processes*. In Proc. of Lasers in Manufacturing 2011, München, Deutschland.
- [121] BLUG, A., ABT, F., NICOLOSI, L.: *Verfahren zum Betrieb einer Laserschweißvorrichtung und Vorrichtung*. Patent WO 2014/005603.

- [122] NICOLOSI, L.; ABT, F.; BLUG, A.; HÖFLER, H.: *Cellular Neural Network (CNN) Based Control Algorithms for Omnidirectional Laser Welding Processes: Experimental Results*. In IEEE 12th International Workshop on Cellular Neural Networks and their Applications (CNNA), Berkeley, California, USA, 2010.
- [123] ABT, F.; BLUG, A.; NICOLOSI, L.; DAUSINGER, F.; HÖFLER, H.; TETZLAFF, R.; WEBER, R.: *Real Time Closed Loop Control of Full Penetration Keyhole Welding with Cellular Neural Network Cameras*. In Proc. of LAMP2009 - the 5th International Congress on Laser Advanced Materials Processing, Kobe, Japan, 2009.
- [124] BLUG, A.; ABT, F.; NICOLOSI, L.; DAUSINGER, F.; HÖFLER, H.; TETZLAFF, R.; WEBER, R.: *Closed Loop Control Of Laser Welding Processes Using Cellular Neural Network Cameras: Experimental Results*. In Proc. of 28th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2009), 2009, Orlando, Florida, USA.
- [125] SWIFT-HOOK, D.T.; GICK, A.E.F.: *Penetration Welding with Lasers*. In Welding Journal 52 (1973), No. 11, Seite 492-s – 499-s.
- [126] BERGER, P.: *Physikalische Prozesse der Lasermaterialbearbeitung Teil III – Wärmequellen zum Laserstrahl-tiefschweißen*. Vorlesungsmanuskript WS-2003/04, Institut für Strahlwerkzeuge IFSW, Universität Stuttgart ,2003.
- [127] BLOMSTER, O.; PALSSON, M.; ROOS, S.-O.; BLOMQUIST, M.; ABT, F.; DAUSINGER, F.; DEININGER, C.; HUONKER, M.: *Optics performance at high-power levels*. In Proc. of SPIE Vol. 6, Page 68712B-1 - 68712B-10, LASE 2008, Solid State Lasers XVII: Technology and Devices, USA.
- [128] ABT, F.; HESS, A.; DAUSINGER, F.: *Temporal Behaviour Of The Focal Shift Of Beam Forming Optics For High Power Single Mode Lasers*. In Proc. of the 27th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 2008), 2008, Temecula, CA, USA.
- [129] ABT, F.; HEIDER, A.; WEBER, R.; GRAF, T.; BLUG, A.; CARL, D.; HÖFLER, H.; NICOLOSI, L.; Tetzlaff, R.: *Camera based closed loop control for partial penetration welding of overlap joints*. In Physics Procedia, Lasers in Manufacturing, Munich, Germany, 2011.
- [130] REINIGER, C.D.: *Fluidynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügespalt*. Universität Stuttgart, Dissertation, 2015 (Inst. F. Strahlwerkzeuge: IFSW).

- [131] ABT, F.; WÖLFELSCHNEIDER, H.; BAULIG, C.; HÖFLER, H.; WEBER, R.; GRAF, T.: *Online Measurement And Closed Loop Control Of Penetration Depth In Laser Welding Processes*. In Proc. of the 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics - ICALEO 2011 (2011), Orlando, FL, USA.
- [132] BOLEY, M.; BERGER, P.; WEBSTER, P.; WEBER, R.; VAN VLACK, C.; FRASER, J.; GRAF, T.: *Investigating The Weld Depth Behaviour Using Different Observation Techniques: X-Ray, Inline Coherent Imageing And Highspeed Observation During Welding Ice*. In Proc. of ICALEO 2013, Miami, Florida (LIA), 2013.
- [133] KOGEL-HOLLACHER, M.: *Inline coherent imaging of laser processing - Part 2*. In IFSW (Hrsg.): Hirscheegg 2014 (16th International Workshop Process stability in laser beam welding II), Hirscheegg: 2014, Hirscheegg, Deutschland.
- [134] WEBSTER, P.; GALBRAITH, C.; KANKO, J.: *Multidimensional Inline coherent imaging*. In IFSW (Hrsg.): Hirscheegg 2016 (18th International Workshop Process stability in laser beam welding II), Hirscheegg: 2016, Hirscheegg, Deutschland.

Danksagung

Die vorliegende Dissertation basiert auf Arbeiten, aus meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) der Universität Stuttgart und an der Forschungsgesellschaft für Strahlwerkzeuge (FGSW), sowie der Technologiesgesellschaft für Strahlwerkzeuge (TGSW).

Ich bedanke mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Thomas Graf für die wissenschaftliche Betreuung und die Übernahme des Hauptberichtes. Er stand auch in schwierigeren Zeiten der Verfahrensentwicklung zu seinem Wort und ermöglichte mir so die Fertigstellung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt danke ich für die Übernahme des Mitberichts und das Interesse an meiner Arbeit.

Des Weiteren gebührt mein Dank den Herren Dr. Friedrich Dausinger und seinem Nachfolger Dr. phil. nat. Rudolf Weber, die mir als Leiter der Verfahrensentwicklung die notwendigen geistigen und organisatorischen Rahmenbedingungen, sowie die notwendigen Freiheiten zur Verfügung gestellt haben. Ohne ihre fachliche Expertise und die fruchtbaren Diskussionen, sowie deren wissenschaftliche Betreuung, wäre diese Arbeit so nicht möglich gewesen.

Meinen geschätzten Kollegen am IFSW möchte ich herzlich danken für die gute und produktive Zusammenarbeit und die familiäre Stimmung, die sie stets verbreitet haben. Insbesondere möchte ich an dieser Stelle die Herren Andreas Heider, Dr. Axel Hess, Dr. Peter Stritt und Frau Christiane Thiel sowie den akademischen Oberrat Herrn Peter Berger hervorheben, mit denen ich erfolgreich an vielen Projekten arbeiten durfte.

Meinen beiden Projektpartnern in den Projekten ACES und ACES-II, Dr. Andreas Blug und Dr. Leonardo Nicolosi, möchte ich ganz besonders für Ihre aktive Unterstützung danken. Sie haben entscheidend zum Projekterfolg beigetragen und wichtige Denkanstöße für das Gelingen dieser Arbeit geliefert.

Mein Dank geht auch an die zahlreichen Studenten und HiWis, die mich tatkräftig mit ihren Studien- und Diplomarbeiten unterstützt haben. Ganz besonders hervorheben möchte ich an dieser Stelle Herrn Dipl.-Ing. Meiko Boley, der als HiWi bei mir be-

gann und schließlich als wissenschaftlicher Mitarbeiter meine Nachfolge am IFSW angetreten hat. Sein vorbildlicher und unermüdlicher Einsatz hat die Röntgentechnologie am IFSW entscheidend vorangetrieben, wofür Ihm mein ganz persönlicher Dank und Respekt gebührt.

Mein ganz besonderer Dank gilt natürlich meiner Familie ohne die ich diese Arbeit so nicht hätte verfassen können. Meine Eltern Maria und Wolfgang Abt gaben mir mit Ihrer Erziehung die Grundlage für das Gelingen dieser Arbeit und gaben mir in meinem Leben stets die notwendige Unterstützung und Rückhalt. Besonders hervorheben möchte ich meine Lebensgefährtin Dr. Katrin Wentsch. Ihr Verzicht, Ihre Geduld, Unterstützung und Aufmunterung haben entscheidend zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen. Sie hat mich durch viele Höhen und Tiefen begleitet, weshalb ich Ihr diese Arbeit von ganzem Herzen widmen möchte.

Zürich, im Oktober 2017

Felix Abt

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW von 1992 bis 1999 erschienen im Teubner Verlag, Stuttgart

Zoske, Uwe

Modell zur rechnerischen Simulation von Laserresonatoren und Strahlführungssystemen
1992, 186 Seiten, ISBN 3-519-06205-4

Gorritz, Michael

Adaptive Optik und Sensorik im Strahlführungssystem von Laserbearbeitungsanlagen
1992, vergriffen, ISBN 3-519-06206-2

Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO₂-Laserschneiden von Metallen
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

Rudlaff, Thomas

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärtens mit Laserstrahlen
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

Borik, Stefan

Einfluß optischer Komponenten auf die Strahlqualität von Hochleistungslasern
1993, 200 Seiten, ISBN 3-519-06209-7

Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell längsgeströmte CO₂-Laser
1994, 149 Seiten, ISBN 3-519-06210-0

Wahl, Roland

Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit Steuerung der Polarisationsrichtung
1994, 150 Seiten, ISBN 3-519-06211-9

Frederking, Klaus-Dieter

Laserlöten kleiner Kupferbauteile mit geregelter Lotdrahtzufuhr
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

Grünewald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströmten CO₂-Lasern
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulverzufuhr
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit Excimerlasern
1994, 192 Seiten, ISBN 3-519-06215-1

Holzwarth, Achim

Ausbreitung und Dämpfung von Stoßwellen in Excimerlasern
1994, 153 Seiten, ISBN 3-519-06216-X

Dausinger, Friedrich

Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität
1995, 143 Seiten, ISBN 3-519-06217-8

Meiners, Eckhard

Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozeß
1995, 120 Seiten, ISBN 3-519-06222-4

Beck, Markus

Modellierung des Lasertiefschweißens
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06218-6

Breining, Klaus

Auslegung und Vermessung von Gasentladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

Griebsch, Jürgen

Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

Krepulat, Walter

Aerodynamische Fenster für industrielle Hochleistungslaser
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06221-6

Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

Glumann, Christiane

Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen
1996, 143 Seiten, ISBN 3-519-06224-0

Gross, Herbert

Propagation höhermodiger Laserstrahlung und deren Wechselwirkung mit optischen Systemen
1996, 191 Seiten, ISBN 3-519-06225-9

Rapp, Jürgen

Laserschweißleistung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7

Wittig, Klaus

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungslaserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5

Grünenwald, Bernd

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO₂-Hochleistungslaser
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-1

Lee, Jae-Hoon

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung
1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

Albinus, Uwe N. W.

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

Wiedmaier, Matthias

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

Bloehs, Wolfgang

Laserstrahlhärten mit angepassten Strahlformungssystemen
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

Bea, Martin

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

Stöhr, Michael

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

Plaaß, Wilfried

Zerstörschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Molybdän
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

Hack, Rüdiger

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO₂-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW
1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

Krupka, René

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser
1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

Pfeiffer, Wolfgang

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

Volz, Robert

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

Bartelt-Berger, Lars

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grundmode-Diodenlasern
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

Müller-Hummel, Peter

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspansung
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

Rohde, Hansjörg

Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd:YAG-Slablaser
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7

Huonker, Martin

Strahlführung in CO₂-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

Callies, Gert

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

Schubert, Michael E.

Leistungsskalierbares Lasersystem aus fasergekoppelten Singlemode-Diodenlasern
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1

Kern, Markus

Gas- und magnetofluiddynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

Raiber, Armin

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermikrobohren technischer Keramiken
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06248-8

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2000 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Schittenhelm, Henrik

Diagnostik des laserinduzierten Plasmas beim Abtragen und Schweißen
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-712-1

Stewen, Christian

Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung
2000, 145 Seiten, ISBN 3-89675-763-6

Schmitz, Christian

Gaselektronische Analysemethoden zur Optimierung von Lasergasentladungen
2000, 107 Seiten, ISBN 3-89675-773-3

Karszewski, Martin

Scheibenlaser höchster Strahlqualität
2000, 132 Seiten, ISBN 3-89675-785-7

Chang, Chin-Lung

Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik
2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-825-X

Haag, Matthias

Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlasern
2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

Bahn Müller, Jochen

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur Qualitätssteigerung beim Laserbohren
2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-851-9

Schellhorn, Martin Carl Johannes

CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen
2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

Angstenberger, Birgit

Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten
2000, 153 Seiten, ISBN 3-89675-861-6

Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karosseriebau
2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

Breitschwerdt, Sven

Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen
2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-5

Mochmann, Gunter

Laserkristallisation von Siliziumschichten auf Glas- und Kunststoffsubstraten für die Herstellung verbesserter Dünnschichttransistoren
2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

Herrmann, Andreas

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weichlötlens mit Diodenlasern
2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

Mästle, Rüdiger

Bestimmung der Propagationseigenschaften von Laserstrahlung
2002, 147 Seiten, ISBN 3-8316-0113-5

Voß, Andreas

Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle Ergebnisse anhand von Yb:YAG
2002, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0121-6

Müller, Matthias G.

Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0144-5

Abeln, Tobias

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtragens von Stahl
2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2

Erhard, Steffen

Pumpoptiken und Resonatoren für den Scheibenlaser
2002, 184 Seiten, ISBN 3-8316-0173-9

Contag, Karsten

Modellierung und numerische Auslegung des Yb:YAG-Scheibenlasers
2002, 155 Seiten, ISBN 3-8316-0172-0

Krastel, Klaus

Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen
2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

Staud, Jürgen

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montagekonzept in der Mikrosystemtechnik
2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

Schinzel, Cornelius M.

Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau
2002, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0201-8

Sebastian, Michael

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-CVD Synthese von Diamant und amorphen Kohlenstoffen
2002, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0200-X

Lücke, Bernd

Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays
2003, 120 Seiten, ISBN 3-8316-0224-7

Hohenberger, Bernd

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokus-
technik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Fle-
xibilität und verfügbarer Strahlleistung
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

Jasper, Knut

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und
-führung für die Mikrotechnik
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

Heimerdinger, Christoph

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen
für die Luftfahrt
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-5

Christoph Fleig

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen
Bestimmung des Reflexionsgrades optischer
Komponenten
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

Joachim Radtke

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in ke-
ramischen Werkstoffen mittels repetierender
Laserbearbeitung
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

Michael Brandner

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und
Kleben mit Hochleistungsdiodenlasern
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

Reinhard Winkler

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von
Aluminium-Druckguss
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

Helmut Kindler

Optische und gerätetechnische Entwicklungen
zum Laserstrahlspritzen
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

Andreas Ruf

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metal-
len mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Sys-
temkonzept und experimentelle Verifizierung
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Alumini-
umguß- und Knetlegierungen mit CO₂-Laser
unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

Armin Strauch

Effiziente Lösung des inversen Problems beim
Laserstrahlschweißen durch Simulation und
Experiment
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8

Thomas Wawra

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzi-
sion mittels Laserstrahlung
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-3

Michael Honer

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren
metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung
2004, 113 Seiten, ISBN 3-8316-0441-x

Thomas Herzinger

Prozessüberwachung beim Laserbohren von
Turbinenschaufeln
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-6

Reiner Heigl

Herstellung von Randschichten auf Aluminium-
gusslegierungen mittels Laserstrahlung
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-6

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Thomas Fuhrich

Marangoni-effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl

2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-verstärkern im Scheibenlaserdesign

2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheiben-laser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzver-dopplung

2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik

2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

Michael Weikert

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laser-pulsen

2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit vari-ablem Laserstrahldurchmesser in modularen Ferti-gungssystemen

2006, 132 Seiten, ISBN 3-8316-0572-6

Andreas Ruß

Schweißen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit

2006, 142 Seiten, ISBN 3-8316-0580-7

Gabriele Seibold

Absorption technischer Oberflächen in der La-sermaterialbearbeitung

2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

Dirk Lindenau

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen

2007, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-0687-0

Jens Walter

Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung

2008, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-0770-9

Heiko Ridderbusch

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze

2008, 175 Seiten, ISBN 978-3-8316-0840-9

Markus Leimser

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahteigen-schaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

Mikhail Larionov

Kontaktierung und Charakterisierung von Kristal-len für Scheibenlaser

2009, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-0855-3

Jürgen Müller-Borhanian

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

2009, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-0890-4

Andreas Letsch

Charakterisierung allgemein astigmatischer La-serstrahlung mit der Methode der zweiten Mo-mente

2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiterschei-benlasers

2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

Günter Ambrosy

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen

2009, 170 Seiten, ISBN 978-3-8316-0925-3

Agnes Ott

Oberflächenmodifikation von Aluminiumlegierun-gen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung

2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

Detlef Breiting

Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-0960-4

Dmitrij Walter

Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-0968-0

Jan-Philipp Weberpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen

2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

Angelika Beyertt

Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse

2010, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4002-7

Christian Stolzenburg

Hochrepetierende Kurzpuls-Scheibenlaser im infraroten und grünen Spektralbereich
2011, 184 Seiten, ISBN 978-3-8316-4041-6

Svent-Simon Beyertt

Quantenfilm-Pumpen zur Leistungsskalierung von Halbleiter-Scheibenlasern
2011, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4051-5

Sonja Kittel

Verzugsarmes Laserstrahlschweißen an axial-symmetrischen Bauteilen
2011, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4088-1

Andrey Andreev

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebebau – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1

Christian Föhl

Einsatz ultrakurz gepulster Laserstrahlung zum Präzisionsbohren von Metallen
2011, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-4120-8

Andreas Josef Birnesser

Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen
2011, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4133-8

Christoph Neugebauer

Thermisch aktive optische Bauelemente für den resonatorinternen Einsatz beim Scheibenlaser
2012, 220 Seiten, ISBN 978-3-8316-4178-9

Andreas Dauner

Fluidmechanische Maßnahmen zur Reduzierung von Schmelzablagerungen beim Hochgeschwindigkeitslaserbohren
2012, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4194-9

Axel Heß

Vorteile und Herausforderungen beim Laserstrahlschweißen mit Strahlquellen höchster Fokussierbarkeit
2012, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4198-7

Christian Gehrke

Überwachung der Struktureigenschaften beim Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laserpulsen
2013, 164 Seiten, ISBN 978-3-8316-4271-7

David Schindhelm

In-Prozess Qualitätssicherung für das Laserstrahlschneiden von Metallen
2013, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-4345-5

Moritz Vogel

Speciality Fibers for High Brightness Laser Beam Delivery
2014, 187 Seiten, ISBN 978-3-8316-4382-0

Andreas Michalowski

Untersuchungen zur Mikrobearbeitung von Stahl mit ultrakurzen Laserpulsen
2014, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-4424-7

Georg Stöppler

Untersuchung eines OPOs im mittleren Infrarot im Hinblick auf Anwendungen für minimalinvasive Chirurgie
2015, 144 Seiten, ISBN 978-3-8316-4437-7

Patrick Mucha

Qualitäts- und produktivitätsbeeinflussende Mechanismen beim Laserschneiden von CF und CFK
2015, 120 Seiten, ISBN 978-3-8316-4516-9

Claus-Dieter Reiniger

Fluiddynamische Effekte beim Remote-Laserstrahlschweißen von Blechen mit Fügespalt
2015, 188 Seiten, ISBN 978-3-8316-4528-2

Andreas Leitz

Laserstrahlschweißen von Kupfer- und Aluminiumwerkstoffen in Mischverbindung
2016, 172 Seiten, ISBN 978-3-8316-4549-7

Peter Stritt

Prozessstrategien zur Vermeidung von Heißrissen beim Remote-Laserstrahlschweißen von AlMgSi 6016
2016, 194 Seiten, ISBN 978-3-8316-4555-8

Katrin Sarah Wentsch

Analyse Ytterbium-dotierter Materialien für den Einsatz in ultrakurz-gepulsten Scheibenlasersystemen
2016, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-4578-7

Jan-Philipp Negel

Scheibenlaser-Multipassverstärker für ultrakurze Laserpulse mit Ausgangsleistungen im kW-Bereich
2017, 142 Seiten, ISBN 978-3-8316-4632-6

Christian Freitag

Energietransportmechanismen bei der gepulsten Laserbearbeitung Carbonfaser verstärkter Kunststoffe
2017, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

Andreas Popp

Faserlaser und Faserlaserverstärker als Brillanzkonverter für Scheibenlaserstrahlen
2017, 242 Seiten, ISBN 978-3-8316-4638-8

Karin Heller

Analytische Temperaturfeldbeschreibung beim Laserstrahlschweißen für thermographische Prozessbeobachtung
2017, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4654-8

Stefan Piehler

Resonatorinterne Kompensation thermisch induzierter Wellenfrontstörungen in hochbrillanten Scheibenlasern
2017, 148 Seiten, ISBN 978-3-8316-4690-6

Felix Abt

Bildbasierte Charakterisierung und Regelung von Laserschweißprozessen
2017, 232 Seiten, ISBN 978-3-8316-4691-3

Volker Rominger

Untersuchungen der Prozessvorgänge bei Einschweißungen in Baustahl mit Lasern hoher Brillanz
2017, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-4692-0

