

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

J. Müller-Borhanian
Kamerabasierte In-Prozessüber-
wachung beim Laserstrahlschweißen

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. 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.

Kamerabasierte In- Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

von Dr.-Ing. Jürgen Müller-Borhanian
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

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

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel
Mitberichter: Prof. Dr. sc. nat. Wolfgang Osten

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., 2008

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 2009

ISBN 978-3-8316-0890-4

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Kurzfassung

Um die Fertigungsqualität beim Laserstrahlschweißen sicherzustellen, werden häufig In-Prozessüberwachungsmethoden eingesetzt. Hierbei wird die durch die Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Werkstück entstehende Sekundärstrahlung analysiert, da sie Informationen über die Dynamik und die Stabilität des Schweißprozesses in sich trägt. Die Detektion dieser Prozessstrahlung mit Einzeldetektoren wie Photodioden ist als Verfahren robust und erprobt. Die Kombination mehrerer Einzeldetektoren, die die Prozessemissionen in unterschiedlichen Spektralbereichen oder an unterschiedlichen Messpositionen aufnehmen, soll die Zuverlässigkeit der Qualitätsaussage erhöhen, die dennoch, aufgrund der räumlich integrierenden Messung, begrenzt bleibt.

Wird statt der Einzeldetektoren eine Kamera für die Detektion der Prozessemissionen verwendet, bietet dies den Vorteil der orts aufgelösten Messung. Die Kamerabilder liefern somit eine Fülle an Informationen über den Schweißprozess. Die softwaretechnische Verarbeitung der Kamerabilder ist jedoch verglichen mit der Auswertung der Signale der Einzeldetektoren sehr viel aufwendiger.

Insbesondere die Auswertung der Geometrie der Kapillaröffnung und des Schmelzbades stellt einen allgemeinen Ansatz zur kamerabasierten In-Prozessüberwachung dar. Die gleichzeitige Visualisierung von Schmelzbad und Kapillaröffnung ist jedoch nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich und abhängig von den Kameraeigenschaften, von der Detektionswellenlänge, aber auch vom Bearbeitungsmaterial.

Basierend auf den in Vorversuchen durchgeführten spektroskopischen Untersuchungen und durch den Einsatz verschiedener Kamertypen und unterschiedlicher Detektionswellenlängen wird ein für die kamerabasierte In-Prozessüberwachung geeigneter Wellenlängenbereich gefunden. Weiter wird ein allgemeiner Bildverarbeitungsansatz zur Berechnung der Geometrie der Kapillaröffnung und des Schmelzbades aus den Kamerabildern vorgeschlagen und entsprechende Grundlagenversuche beim Laserstrahlschweißen werden durchgeführt.

Die gesammelten Erkenntnisse dienen der Modifikation eines bestehenden Echtzeit-Bildverarbeitungssystems. Der entwickelte Bildverarbeitungsansatz wird für dieses System umgesetzt, wobei durch optimierte Algorithmen und den Einsatz von DSP-Technik eine hohe Bildfolgefrequenz erreicht wird, um der Dynamik des Schweißprozesses gerecht zu werden. Das System wird bei Parameterstudien erprobt und seine Eignung für die Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen untersucht und beurteilt.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Inhaltsverzeichnis	7
Liste der verwendeten Symbole	11
Extended Abstract	15
1 Einleitung	19
1.1 Ausgangslage	19
1.2 Zielsetzung	20
1.3 Gliederung der Arbeit	21
2 Grundlagen	23
2.1 Laserstrahliefschweißen	23
2.1.1 Prinzip des Laserstrahliefschweißens	23
2.1.2 Schweißfehler und Fehlerindikatoren	25
2.2 Strahlungsphysikalische Größen	27
2.3 Wärmestrahlung	29
2.4 Bildverarbeitung	31
2.4.1 Optische Abbildung	32
2.4.1.1 Absorption und Reflexion	32
2.4.1.2 Brechung	33
2.4.1.3 Abbildung mit Linsen	34
2.4.1.4 Optische Filter	34
2.4.1.5 Abbildungsfehler	36
2.4.1.6 Schärfentiefe	37
2.4.1.7 Wellenphänomene	37
2.4.2 Kameras für die In-Prozessüberwachung	37
2.4.2.1 CCD-Kameras	39
2.4.2.2 CMOS-Kameras	40
2.4.2.3 IR-Kameras	42
2.4.3 Bilddigitalisierung	44

2.4.3.1	Kontinuierliche Bilder	44
2.4.3.2	Digitalisierte Bilder	44
2.4.3.3	Bildspeicherung	46
2.4.4	Bildverarbeitungsalgorithmen	47
2.4.4.1	Binarisierung/Schwellwertbildung	47
2.4.4.2	Mittelwerte	49
2.4.4.3	Falschfarben- und Pseudofarbdarstellung	49
2.4.4.4	Histogrammberechnung	50
2.4.4.5	Kantendetektion	51
2.4.4.6	Morphologische Operatoren	53
2.4.4.7	Zufallsvariablen und Momente	54
2.4.4.8	Formparameter	55
2.4.4.9	Objektbeschreibung und Konturapproximation	57
2.4.4.10	Objekterkennung	58
3	Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen	59
3.1	Offline-Verfahren	59
3.1.1	Zerstörende Qualitätskontrolle	60
3.1.2	Zerstörungsfreie Qualitätskontrolle	61
3.1.2.1	Röntgenverfahren	61
3.1.2.2	Ultraschallverfahren	62
3.1.2.3	Thermografieverfahren	62
3.1.2.4	Lichtschnittverfahren	63
3.1.2.5	Graubildauswertung	64
3.1.2.6	Penetrationsverfahren	64
3.1.2.7	Magnetpulverprüfung	64
3.2	Online-Verfahren	64
3.2.1	Pre- und Postprozessüberwachung	65
3.2.1.1	Lichtschnittverfahren	65
3.2.1.2	Graubildauswertung	65
3.2.2	In-Prozessüberwachung	66
3.2.2.1	Räumlich integrierende Verfahren	66
3.2.2.2	Bildgebende Verfahren	68
4	Voruntersuchungen	71
4.1	Untersuchung der Leistungsstabilität von Festkörperlasern	72
4.1.1	Versuchsaufbau	72
4.1.1.1	Messung der Laserleistung	72

4.1.1.2	Messung der Leistung der reflektierten Laserstrahlung	73
4.1.1.3	Optimierung des Versuchsaufbaus	74
4.1.1.4	Signalverarbeitung	75
4.1.2	Untersuchung der Leistungsstabilität	76
4.1.3	Einflüsse der reflektierten Strahlung	78
4.1.4	Zusammenfassung	78
4.2	Spektroskopische Untersuchungen	79
4.2.1	Versuchsaufbau und -durchführung	79
4.2.2	Ergebnisse	81
4.2.3	Zusammenfassung	83
4.3	Prozessvisualisierung mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeits-IR-Kamera	83
4.3.1	Versuchsaufbau und -durchführung	84
4.3.2	Ergebnisse	86
4.3.3	Zusammenfassung	89
4.4	Untersuchung der Leistungsdichteverteilung der reflektierten Laserstrahlung	91
4.4.1	Ergebnisse der Simulationsrechnung	91
4.4.2	Versuchsaufbau	93
4.4.3	Versuchsdurchführung und -auswertung	95
4.4.4	Ergebnisse	97
4.4.4.1	Kapillareigung	97
4.4.4.2	Unterschiedliche Schachtverhältnisse	101
4.4.4.3	Auswürfe	102
4.4.5	Zusammenfassung	103
5	Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen	105
5.1	Einleitung	105
5.2	Analyse der Schmelzbad- und Kapillargeometrie	106
5.2.1	Kameraeigenschaften	106
5.2.2	Versuchsaufbau	107
5.2.3	Einfluss der Detektionswellenlänge	108
5.2.3.1	Störung durch das Metaldampfleuchten	109
5.2.3.2	Visualisierung des Schmelzbades	110
5.2.4	Erfassung der Schmelzbad- und Kapillargeometrie	114
5.2.4.1	Objekterkennung	116
5.2.4.2	Bestimmung und Auswertung der Formparameter	118
5.3	Zusammenfassung	119

6 Realisierung eines Echtzeit-Bildverarbeitungssystems	121
6.1 Einleitung	121
6.2 Systemhardware	121
6.3 Systemsoftware	122
6.4 Systemanpassung	124
6.5 Versuchsdurchführung	124
6.6 Detektionsergebnisse	126
6.6.1 Variation der Laserleistung	127
6.6.2 Variation der Fokusslage	128
6.6.3 Spalt beim Überlappstoß	131
6.6.4 Kombination aus Lateralversatz und Spalt beim Stumpfstoß . .	136
6.6.5 Lateralversatz bei Stumpfstoß von Tailored Blanks	138
6.6.6 Lateralversatz bei Kehlnahtschweißungen	139
6.6.7 Schutzgaseinflüsse	141
6.7 Zusammenfassung	142
7 Zusammenfassung	146
Literaturverzeichnis	148
Danksagung	153

Liste der verwendeten Symbole

Symbol	Bezeichnung	Wert	Dimension
Lateinische Buchstaben			
a_{ix}, a_{iy}	Richtungskomp. des Kettencodes	1	1
A	Absorption	1	1
A_D	Detektorfläche	1	m ²
A_O	Objektfläche	1	Pixel
b_W	Bildweite	1	m
b	Wiensche Konstante	$2,8978 \cdot 10^{-3}$	m·K
b_B	Bildbreite	1	Pixel
B	Bildgröße	1	m
c	Lichtgeschwindigkeit	1	ms ⁻¹
C	Speicherbedarf	1	Bit
d	Dicke des Dielektrikums	1	m
d_f	Fokusedurchmesser	1	m
d_{kap}	Öffnungsdurchmesser der Kapillare	1	1
D	Dicke der planparallelen Platte	1	m
E	Extinktion	1	1
E_S	Bestrahlungsstärke	1	Wm ⁻²
f	Brennweite	1	m
f_f	Formfaktor	1	1
F	Farbtiefe	1	Bit
g	Grauwert	1	1
g_W	Gegenstandsweite	1	m
G	Gegenstandsgröße	1	m
h	Plancksche Konstante	$6,6262 \cdot 10^{-34}$	Js
$\mathbf{h}$	Laplace-Operator	1	1
h_B	Bildhöhe	1	Pixel
H	Histogrammfunktion (rel. Häufigkeit)	1	1
HW	Halbwertsbreite	1	m
i	Wahrscheinlichkeit	1	1

Extended Abstract

In recent years, laser welding has found increasing use in various industries. One reason is the enhancement of economic efficiency compared to competing techniques. To utilize this advantage the quality of the laser welded parts has to be ensured by automated process control strategies. A common method of in-process monitoring during laser beam welding is the examination of the secondary radiation of the welding process. This radiation is produced by the interaction between laser beam and work piece and contains information about the stability and the dynamics of the welding process. The process emissions can be analyzed by means of photo diodes. Usually, instead of using a single diode, a combination of several diodes is applied, whereby the reliability of the detector system can be increased. In this case each single diode is detecting the process emissions at a different measurement position or at a different spectral range. Thereby it is possible to analyze the radiation of the excited metal vapor that is generated during the welding process in the UV or visible region. The thermal radiation of the melt pool can be observed in the infrared or near infrared region. Additionally the analysis of the reflected laser radiation provides useful information about the welding process. For the examination of the generated data commercially available multi detector systems are using a comparison with reference signals calculated from good welds.

The process monitoring method presented in this paper is based on the evaluation of the process emissions by means of a camera. The advantage compared to single detectors is the spatially resolved measurement. Thus the camera images provide a lot of information about the welding process. Within the presented method a camera is used to observe *keyhole opening* and *melt pool* during laser beam welding. Because intensity and geometry of these objects have a correlation to welding process parameters, it is possible to use this method for process monitoring tasks.

CCD cameras were used initially but today CMOS cameras are preferred, because conventional CCD cameras are limited to a frame rate of 50 Hz. With respect to the high dynamics of the laser welding process this frame rate is not sufficient. The technological principle of CMOS cameras, in comparison, allows the readout of a part of the camera image. By appropriate selection of such a region of interest (ROI) frame rates up to some kHz are possible. Furthermore, CMOS cameras offer a higher optical dynamic.

Generally compared to the diode based systems the interpretation and processing of the camera signals are more complex and the necessary hardware and software is more cost-

intensive. The camera based monitoring indeed is providing a lot of information related to the welding process but a direct correlation to welding process parameters cannot be provided as well.

For the described process monitoring method the undisturbed and simultaneous visibility of keyhole opening and melt pool in the camera images must be ensured. For the described method no active illumination is used so the camera images are depending on the thermal radiation of keyhole and melt pool area.

What can influence the undisturbed visibility of keyhole opening and melt pool is the radiation of the excited metal vapor above the work piece. If this vapor is emitting in the wave length area of the detection wave length it can cause disturbances of the visibility. Therefore not every wave length area is useful for the observation of keyhole opening and melt pool. To find suitable wave length areas for the camera based process monitoring during preliminary experiments spectroscopic investigations of the emissions during welding different materials have been carried out. Hereby spectral ranges have been identified that have to be avoided because of strong characteristic emissions of the excited metal vapor above the work piece. This vapor is emitting basically in the UV and the visible region. Cameras with silicon based chips have a spectral range from the UV to the near infrared. Therefore, while using a CCD or a CMOS camera, a detection wave length in the near infrared is of advantage. Thus it is necessary to constrict the spectral range of the cameras by means of optical filters.

For the simultaneous visibility of keyhole opening and melt pool it has to be considered that the range from the melting to the evaporation temperature causes a range in the intensity of the thermal radiation. This range is higher for aluminum because of the lower melting temperature compared to steel. For example, without taking into account the emission ratio, for aluminum at a detection wave length of 633 nm the intensity at evaporation temperature is higher by a factor of 10^7 than the intensity at melting temperature. For iron this factor is only about 10^3 . Additionally this intensity range is strongly depending on the detection wave length. With an increasing wave length the factor is decreasing and the chance for the simultaneous visibility of keyhole opening and melt pool is getting higher. This means, that in principle the temperature range that can be observed with a camera, on the one hand, depends on the optical dynamic and the spectral response of the camera and, on the other hand, on the used detection wave length. Experiments during laser beam welding with a CMOS camera recording images from the keyhole opening and the melt pool at different spectral ranges have been performed. For the analysis of the camera images a general image processing approach is used: to identify the two interesting objects keyhole opening and melt pool in the camera images a blob (binary large object) analysis with two thresholds is used. And the two objects

are described by different object parameters like length, width, area, center of intensity, etc. In that way based on the visible intensity distribution an analytical description of the keyhole opening and the melt pool geometry with *object parameters* is generated. During welding with variations of the different welding process parameters and welding with the creation of different defects these object parameters are observed and a correlation between object parameters and welding defects or respectively welding parameters is proved.

These experiments show that the detection results are influenced by the selected wave length and, therefore, also the significance of the different indicators used for process monitoring is influenced by the detection wave length. The result of the experiments in combination with the spectroscopic investigations is a kind of measurement instruction for the camera based in-process monitoring. In particular it could be shown that a detection wave length in the near infrared is of advantage for the image quality because of fewer disturbances by the radiation of the excited metal vapor above the work piece. The reason is that in the near infrared region the metal vapor has less characteristic emissions. Furthermore in the infrared region the intensity of the thermal radiation at evaporation and melting temperature of steel and aluminum is higher and therefore the simultaneous visibility of keyhole opening and melt pool is better. But because the temperature range from the melting to the evaporation temperature is higher for aluminum, the simultaneous observation of keyhole opening and melt pool with a CMOS camera is only possible during welding steel.

Empirically the best detection results are generated at a detection wave length of 950 nm. During welding steel a band width of 10 nm and during welding aluminum a band width of 40 nm leads to the best results. Above 950 nm e.g. at 1030 nm the simultaneous visibility of keyhole opening and melt pool becomes indeed better but because of the low sensitivity of the CMOS camera in that region the camera images are getting noisy. This generates a negative influence on the calculated object parameters. Therefore this region is not used for the detection.

The experiences of the described investigations are used to build a camera based in-process monitoring system by the modification of a real time image processing unit. The system is carrying out a blob analysis with two different thresholds to identify the objects keyhole opening and melt pool and the corresponding object parameters. By modification of the system algorithms the calculation can be done online with a frame rate of 500 Hz. For the recording of the images of keyhole opening and melt pool a CMOS camera with a detection wave length of 950 nm is used. With that system final tests during welding steel and aluminum with different joint geometries have been carried out. During welding processes the reaction of the object parameters on the variation of welding parameters or welding defects have been investigated. The result of these expe-

periments is that most of the usual welding defects and welding parameter variations can be identified online with the camera based process monitoring system. But according to the preliminary experiments the reliability of the system is better for welding steel. The reasons for the lower reliability during welding aluminum are the higher process dynamics and the lower melting temperature compared to the steel material.

Generally for almost every welding parameter variation an object parameter can be found that mirrors the variation. But a classification of welding parameters or welding defects is not possible because a change in one object parameter can have more than one reason. Thus for the industrial use of such a camera based monitoring system it is important to establish stable welding processes and to customize the monitoring system on the detection of the remaining defects.

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Der Laser als Strahlwerkzeug hat sich durch seine fertigungstechnisch günstigen Eigenschaften ein ständig zunehmendes Einsatzgebiet in der industriellen Fertigung erschlossen. Zu diesen Eigenschaften gehören insbesondere die Flexibilität, die hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit und -qualität sowie das enorme Automatisierungspotenzial. Mit dem Laser sind unterschiedlichste Materialien bearbeitbar und verschiedene Bearbeitungsprozesse wie Schweißen, Schneiden, Bohren, Abtragen und Umschmelzen zu realisieren [1].

Insbesondere beim Laserstrahlschweißen in der Serienfertigung geht die zunehmende Automatisierung einher mit der Forderung nach einer Qualitätsüberwachungsstrategie. Es sind zwar zahlreiche Methoden und Ansätze zur In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen bekannt, diese basieren jedoch in der Regel auf der Auswertung indirekter Indikatoren. Eine direkte Überwachung der prozessrelevanten Größen ist derzeit noch nicht möglich, jedoch werden ständig neue Messverfahren auf ihre Eignung zur direkten Messung, beispielsweise der Einschweißtiefe, untersucht [2, 3, 4].

Eine gängige Methode der Prozesskontrolle beim Laserstrahlschweißen ist die Analyse der in der Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahl und Werkstück entstehenden Prozessemissionen, da diese Strahlung Informationen über die Stabilität und die Dynamik des Schweißprozesses in sich trägt. Üblich ist die Messung dieser Strahlung in unterschiedlichen Spektralbereichen mit Photodioden. So lässt sich die Strahlung des beim Schweißen entstehenden, angeregten Metaldampfes im UV- und sichtbaren Spektralbereich untersuchen und die Wärmestrahlung insbesondere des schmelzflüssigen Materials durch die Betrachtung des infraroten bzw. nahinfraroten Spektralbereichs. Darüber hinaus liefert die Analyse der reflektierten Laserstrahlung wertvolle Informationen über den Schweißprozess. Die Beurteilung der erzeugten Daten erfolgt softwaretechnisch jeweils durch den Vergleich mit Referenzdaten, die aus den Signalen von Gut-Schweißungen berechnet werden.

Eine weitere Möglichkeit der Prozessüberwachung bietet die Analyse der Prozessemissionen mit Hilfe bildgebender Verfahren. Dazu werden mit einer Kamera Bilder des Schmelzbad- und Kapillarbereichs beim Laserstrahlschweißen aufgenommen und mit

Mitteln der Bildverarbeitung ausgewertet. Zunächst wurden für diese Aufgabe CCD-Kameras eingesetzt, die jedoch den Nachteil einer geringen optischen Dynamik aufweisen und in der Regel auf eine Bildfolgefrequenz von 50 Hz beschränkt sind. Heute werden zunehmend CMOS-Kameras verwendet. Zum Einen sind CMOS-Kameras mit einer höheren optischen Dynamik verfügbar, was für die Visualisierung des großen beim Laserstrahlschweißen zu berücksichtigenden Temperaturbereichs nötig ist. Zum Anderen ermöglichen CMOS-Kameras eine wesentlich höhere Bildfolgefrequenz. Dies ist für die Beobachtung des hochdynamischen Laserschweißprozesses von Vorteil.

Verglichen mit der Prozessüberwachung mit Hilfe von Einzeldetektoren erfordert die Kameratechnik sowohl eine komplexere Hard- als auch Software und verursacht dadurch auch höhere Kosten. Die Auswertung der Kamerabilder liefert zwar eine Fülle an Daten, jedoch fehlt auch hier der direkte Zugang zu den relevanten Qualitätsmerkmalen des Schweißprozesses.

Seitdem verfügbare CMOS-Kameras eine ausreichende Bildfolgefrequenz bieten, liegt der Engpass der Prozessüberwachungskette bei der softwaretechnischen Bildverarbeitung. Durch die begrenzte Bearbeitungsgeschwindigkeit sind nicht beliebig komplexe Bildverarbeitungsalgorithmen bei gleichzeitig hoher Bildfolgefrequenz zur Auswertung der Bilder einsetzbar.

1.2 Zielsetzung

Die kamerabasierte Prozessüberwachung wurde zunächst beim Schweißen von Stahl mit dem CO₂-Laser eingesetzt [5]. Die simultane Beobachtung von Schmelzbad und Kapillare war bei diesem Prozess möglich, und über die Auswertung der Geometrien wurde eine Korrelation zur Einschweißtiefe hergestellt [6]. Allerdings wurde eine CCD-Kamera für die Beobachtung eingesetzt, wodurch die Bildfolgefrequenz auf 50 Hz beschränkt war.

Aufgrund des zunehmenden Einsatzes von Festkörperlasern für das Laserstrahlschweißen in der industriellen Fertigung soll das Verfahren der kamerabasierten Prozessüberwachung auch bei diesen Prozessen eingesetzt werden können. Hier gestaltet sich die gleichzeitige Visualisierung von Schmelzbad und Kapillaröffnung jedoch als schwierig. Dies gilt insbesondere beim Schweißen des Werkstoffes Aluminium.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung der Methode der kamerabasierten Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen von Stahl und Aluminium mit einem Festkörperlaser. Zunächst wird dazu der Schweißprozess mit diagnostischen Methoden untersucht, um für die Prozessbeobachtung geeignete Wellenlängenbereiche zu finden. Anschließend werden die bei Laserschweißprozessen mit unterschiedlichsten Parametern

aufgezeichneten Bilder analysiert und ein allgemeiner Bildverarbeitungsansatz vorge schlagen. Auf Basis dieses Ansatzes und mit den Erkenntnissen aus Voruntersuchungen wird ein bestehendes Echtzeit-Bildverarbeitungssystem modifiziert und damit der Grundstein für die Analyse der Schmelzbad- und Kapillargeometrie beim Laserstrahlschweißen mit hoher Bildfolgefrequenz gelegt. Bei beispielhaften Parametervariationen des Schweißprozesses findet eine erste Erprobung und Beurteilung des Systems statt.

1.3 Gliederung der Arbeit

Nach der Darstellung der zum weiteren Verständnis notwendigen Grundlagen wird in Kapitel 3 ein Überblick über den Stand der Technik zur Thematik der Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen gegeben. Der Vollständigkeit halber werden hier sämtliche gängige Verfahren dargestellt, wobei jedoch hinsichtlich der Thematik der vorliegenden Arbeit der Schwerpunkt einerseits bei den zerstörungsfreien, andererseits bei den Online-Verfahren liegt.

In Kapitel 4 werden Voruntersuchungen vorgestellt. Zunächst wird die Stabilität der Ausgangsleistung des verwendeten Festkörperlasers untersucht, da diese zwingende Voraussetzung für einen stabilen Schweißprozess ist. Anschließend werden, um geeignete Spektralbereiche für die kamerabasierte In-Prozessüberwachung zu finden, die beim Prozess des Laserstrahlschweißens entstehenden Prozessemissionen spektroskopisch untersucht. Darüber hinaus wird eine Hochgeschwindigkeits-Infrarotkamera auf ihre Eignung für die Schweißprozessvisualisierung untersucht. Schließlich wird die Leistungsdichteverteilung der reflektierten Laserstrahlung orts aufgelöst gemessen und damit die Eignung dieses völlig neuartigen Ansatzes für die kamerabasierte In-Prozessüberwachung beurteilt.

Für die Visualisierung der Schmelzbad- und Kapillargeometrie beim Laserstrahlschweißen mit bildgebenden Verfahren wird in Kapitel 5 ein methodischer Ansatz vorgestellt. So wird durch Experimente auf Basis der Voruntersuchungen der Einfluss unterschiedlicher Spektralbereiche auf die Bildqualität beurteilt. Insbesondere wird die Möglichkeit untersucht, Kapillar- und Schmelzbadbereich gleichermaßen zu visualisieren. Andererseits wird der Einfluss der unterschiedlichen Materialien Stahl und Aluminium analysiert und eine Algorithmik für die Objekterkennung und -auswertung aufgezeigt.

Die gesammelten Erkenntnisse dienen der Modifikation eines bestehenden Echtzeit-Bildverarbeitungssystems auf die Bedürfnisse für die In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen. Das System wird in Kapitel 6 vorgestellt. Insbesondere die Software des Systems wird modifiziert, um eine Echtzeit-Bildverarbeitung mit hoher Bildwiederholrate zu erreichen. Bei der Durchführung von Schweißungen von Stahl und Alumi-

um mit Variation der Prozessparameter bzw. der Simulation von Schweißfehlern findet eine erste Erprobung des Systems beim Laserstrahlschweißen statt.

2 Grundlagen

Das Thema der vorliegenden Arbeit ist die kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen. Im Folgenden werden die nötigen Grundlagen behandelt. So wird in Kapitel 2.1 zunächst das Prinzip des Laserstrahltiefschweißens dargestellt, in Kapitel 2.2 werden die wichtigsten strahlungsphysikalischen Größen definiert und Kapitel 2.3 hat die Grundlagen der Wärmestrahlung zum Thema.

Die Grundlagen zur Bildverarbeitung werden in Kapitel 2.4 behandelt. Dabei werden, immer wenn dies dem Verständnis dient, zur Illustration eigene, im Rahmen der Untersuchungen zur kamerabasierten Prozessüberwachung erzeugte Kameraaufnahmen verwendet.

2.1 Laserstrahltiefschweißen

2.1.1 Prinzip des Laserstrahltiefschweißens

Trifft ein Bearbeitungslaserstrahl auf eine ebene Werkstückoberfläche wird er dort teilweise absorbiert, und die absorbierte Energie breitet sich im Werkstück in Form von Wärme aus. Überschreitet die Wärmestromdichte einen Mindestwert, erreicht die Werkstückoberfläche in der Wechselwirkungszone die Verdampfungstemperatur. Bei ausreichender Intensität des Bearbeitungslaserstrahls kann der Rückstoß des abströmenden Dampfes die umgebende Schmelze verdrängen und es entsteht eine *Dampfkapillare*, deren Durchmesser mit dem des fokussierten Strahls vergleichbar ist [7]. Die an den Kapillarwänden absorbierte Energie gelangt durch Wärmeleitung über die Schmelze an das feste Material.

Die Laserschweißnaht entsteht durch eine Relativbewegung zwischen Kapillare und Werkstück. Die Kapillare bleibt dabei dynamisch stabil. Es wird kontinuierlich festes Material aufgeschmolzen, das die Kapillare seitlich umströmt und hinter ihr zur Schweißnaht erstarrt [1, 8]. Der beschriebene Prozess wird *Lasertiefschweißen* genannt, weil dadurch ein großes Verhältnis von Nahttiefe zu -breite entsteht.

Das Prinzip des Laserstrahltiefschweißens ist in Bild 2.1 dargestellt. Hier ist auch der aus der Kapillare ausströmende Metaldampf eingezeichnet. Durch die Wechselwirkung

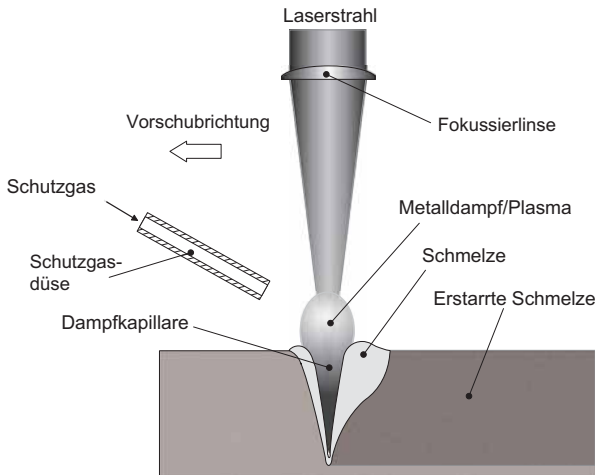


Bild 2.1. Zum Prinzip des Laserstrahltiefschweißens.

dieses Dampfes mit der Laserstrahlung kann es zur teilweisen Ionisation des Metaldampfes und damit zur Entstehung eines Plasmas kommen. Der wesentliche Wechselwirkungsmechanismus ist dabei *Absorption durch inverse Bremsstrahlung*. Diese Wechselwirkung ist proportional zum Quadrat der Laserwellenlänge und spielt deshalb beim Schweißen mit Festkörperlasern eine geringe Rolle. Beim Schweißen mit CO_2 -Lasern kann die Wechselwirkung zwischen der Laserstrahlung und dem Metaldampf/Plasma allerdings so stark werden, dass es zur Abschirmung der Laserstrahlung kommt.

Voraussetzung für den Tiefschweißeffect ist die Bildung einer Dampfkapillare. Maßgebend für deren Entstehen ist ein bestimmter Wert des Verhältnisses P_L/d_f aus Laserleistung und Fokusbereich. Unterhalb einer Schwelle wird keine Dampfkapillare gebildet und es wird vom Wärmeleitungsschweißen gesprochen.

Nach den Fresnelschen Formeln ist der Absorptionsgrad, außer von den optischen Eigenschaften des Bearbeitungsmaterials, vom Einfallswinkel und der Polarisationsrichtung der einfallenden Laserstrahlung abhängig. Bei senkrechtem Auftreffen von Strahlung auf eine metallische Oberfläche ist der Absorptionsgrad nur gering. Dieser erhöht sich jedoch beim Vorhandensein einer Dampfkapillare, da der Laserstrahl dann nicht mehr auf eine ebene Metalloberfläche, sondern auf die schräge Metallschmelzfläche der Kapillare trifft. Einerseits steigt durch den zunehmenden Einfallswinkel der Absorptionsgrad der parallel zur Einfallsrichtung polarisierten Komponente der einfallenden Strahlung an, andererseits findet zusätzlich innerhalb der Kapillare Mehrfachreflexion statt, d.h. der Laserstrahl wird bei jedem Auftreffen auf die Kapillarwand teilweise ab-

3 Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

Es wird zunächst eine Gliederung dargestellt, um die einzelnen Qualitätsüberwachungsmethoden definierten Kategorien zuzuordnen. Werkstoffkundlich wird die Gliederung der Methoden meist hinsichtlich der zu ermittelnden Werkstoffeigenschaften oder der angewandten Mittel vorgenommen. In der folgenden Gliederung werden die Prozessüberwachungsmethoden jedoch einerseits hinsichtlich ihrer zeitlichen Einordnung zum Prozessablauf charakterisiert, andererseits hinsichtlich der Messposition bezüglich der Wechselwirkungszone.

Bei der zeitlichen Einordnung der Methoden wird zwischen Online- und Offline-Methoden unterschieden: Werden bei den Online-Methoden die Messdaten simultan zum Prozessablauf generiert, so kommen Offline-Methoden in der Regel erst nach Abschluss des Schweißprozesses zum Einsatz.

Bei den Online-Methoden wird weiter hinsichtlich der Messposition bezüglich der Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahl und Werkstück unterschieden. Je nachdem, ob sich in Vorschubrichtung die Messposition vor, in oder hinter dieser Wechselwirkungszone befindet, wird von Pre-, In- oder Postprozessüberwachung gesprochen. In Bild 3.1 sind die verschiedenen Messpositionen der Online-Methoden schematisch dargestellt. Schwerpunkt dieser Arbeit ist die kamerabasierte In-Prozessüberwachung. Die wichtigsten Verfahren anderer Kategorien der Prozess- und Qualitätsüberwachung werden deshalb nur der Vollständigkeit halber zusammenfassend dargestellt. Insbesondere wird die zerstörende Qualitätskontrolle nur sehr allgemein behandelt, da sie für die Ergebnisse dieser Arbeit eine geringe Relevanz aufweist.

3.1 Offline-Verfahren

Offline-Methoden kommen zum Einsatz, wenn die Bearbeitung des Bauteils bereits abgeschlossen ist. Es handelt sich dabei also weniger um eine Prozess- als viel mehr um eine Qualitätsüberwachung.

Als weitere Charakterisierung für die Offline-Methoden hat sich in der industriellen Fertigung der Begriff Inline manifestiert. Er bezeichnet Verfahren der Qualitätskontrolle,

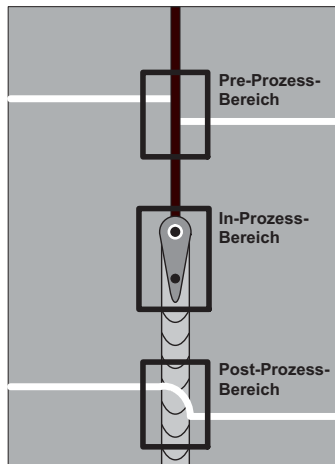


Bild 3.1. Messbereiche der Pre-, In- und Post-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen. Im Bild angedeutet ist die Messung mittels Lichtschnittverfahren im Pre- und Post-Bereich (weiße Linien, vgl. 3.1.2.4) sowie die diodenbasierte Messung im In-Bereich (schwarze Punkte).

die zwar offline, also nach Abschluss des Schweißprozesses stattfinden, aber vom zeitlichen Ablauf her in die Bearbeitungskette einer gestaffelten Fertigung integrierbar sind. Weiter abzugrenzen sind die zerstörenden gegenüber den zerstörungsfreien Verfahren. Da die Offline-Verfahren, insbesondere die zerstörenden, nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit sind, wird im Folgenden nur kurz auf die gebräuchlichsten Verfahren eingegangen.

3.1.1 Zerstörende Qualitätskontrolle

Die zerstörende Werkstoffprüfung dient der Ermittlung der mechanischen und physikalischen, oft auch der chemischen Eigenschaften der Werkstoffe bzw. der Schweißnähte. In diese Kategorie gehören mechanisch-technologische Prüfverfahren wie der Zugversuch (DIN EN 10 002), der Kerbschlagbiegeversuch (DIN EN 10 045), der Dauerschwingversuch und die Härteprüfung. Der Zugversuch liefert mechanische Kennwerte wie Streckgrenze und Zugfestigkeit sowie technologische Werte wie Bruchdehnung und Brucheinschnürung. Eine Versuchsreihe gestattet eine Aussage über die Belastbarkeit eines Bauteils. Mit Hilfe des Kerbschlagbiegeversuchs kann eine Aussage über das Spröd-

4 Voruntersuchungen

Im Rahmen der Voruntersuchungen wird zunächst die Leistungsstabilität der verwendeten Festkörperlaser untersucht, schließlich ist eine leistungsstabile Strahlquelle zwingende Voraussetzung für einen stabilen Schweißprozess. Die Untersuchungen zur Leistungsstabilität sind in Kapitel 4.1 dargestellt.

In Kapitel 4.2 werden spektroskopische Untersuchungen der emittierten Strahlung beim Laserstrahlschweißen verschiedenener Metalllegierungen vorgestellt. Diese Versuche werden insbesondere durchgeführt, um eine geeignete Detektionswellenlänge für die kamerabasierten Versuche zu bestimmen.

Weiter wird der Schmelzbad- und Kapillarbereich beim Laserstrahlschweißen mit einer Hochgeschwindigkeits-Infrarot-Kamera aufgenommen. Mit dieser Kamera kann auch die Wärmestrahlung der relativ niedrigen Temperaturen der erstarrenden Schmelze sichtbar gemacht werden. Dadurch sind die Dimensionen des Schmelzbades bestimmbar, was bei Aufnahmen mit einer CCD- bzw. CMOS-Kamera nur bedingt möglich ist. Die entsprechenden Untersuchungen sind Thema von Kapitel 4.3.

Da die Leistung der reflektierten Laserstrahlung aufgrund der Mehrfachreflexion von der Kapillargeometrie abhängt, ist sie ein Indikator für die Stabilität der Dampfkapillare beim Laserstrahlschweißen. Seither wurde die reflektierte Laserstrahlung mit Hilfe von Einzeldetektoren gemessen, und deren Leistungsdichteverteilung konnte somit nur punktuell durch unterschiedliche Detektorpositionen bestimmt werden [46]. In Kapitel 4.4 wird ein kamerabasiertes Verfahren vorgestellt, das die Leistungsdichteverteilung der reflektierten Laserstrahlung mit Hilfe einer Kamera aufnimmt. Die Analyse der Kamerabilder soll klären, ob sich die Leistungsdichteverteilung der reflektierten Laserstrahlung als Indikator für die Prozessüberwachung eignet.

Für die Voruntersuchungen wird ein Festkörperlaser HL4006D der Firma TRUMPF mit einer maximalen Ausgangsleistung von $P_L = 4 \text{ kW}$ verwendet. Im Folgenden werden die einzelnen Voruntersuchungen näher erläutert.

4.1 Untersuchung der Leistungsstabilität von Festkörperlasern

Die Leistungsstabilität des verwendeten Festkörperlasers wird als zwingende Voraussetzung für einen stabilen Schweißprozess betrachtet. Daher wird die Stabilität der Laserleistung untersucht. Darüber hinaus ist von Interesse, ob Leistungsspitzen der reflektierten Laserstrahlung (vgl. Kap. 3.2.2.1), die durch Prozessinstabilitäten entstehen, in den Laserresonator einkoppeln können und dort zu Leistungsschwankungen führen. Diese könnten im Resonator verstärkt werden und gerade der Auslöser für größere Prozessinstabilitäten und damit beispielsweise verantwortlich für Auswurfphänomene sein.

4.1.1 Versuchsaufbau

In Bild 4.1 ist der Versuchsaufbau zur Messung der Leistungsstabilität an einer 90°-Optik dargestellt. Neben der Leistung der einfallenden, wird die Leistung der reflektierten Laserstrahlung gemessen. Die Laserstrahlung gelangt über eine Stufenindexfaser mit einem Durchmesser von 600 μm zum Bearbeitungskopf, wird durch eine Kollimationslinse mit einer Brennweite von $f_k = 200 \text{ mm}$ kollimiert, an einem Strahlteiler nahezu vollständig reflektiert und über eine Linse ($f_F = 150 \text{ mm}$) auf die Werkstückoberfläche fokussiert.

4.1.1.1 Messung der Laserleistung

Ein geringer Anteil der einfallenden Laserstrahlung (ca. 1 %) wird am Strahlteiler transmittiert und gelangt durch eine Öffnung mit Blende in der Bearbeitungsoptik auf eine Photodiode, vor der sich eine weitere Blende befindet. Im Strahlengang befindet sich darüber hinaus ein Dichtefilter, um die Strahlung weiter abzuschwächen und ein schmalbandiger Interferenzfilter für die Laserwellenlänge (cwl 1064 nm, FWHM 10 nm), um sicher zu stellen, dass nur transmittierte Laserstrahlung und nicht etwa gestreute Prozessstrahlung auf den Detektor trifft. Am Detektor wird somit ein zur einfallenden Laserleistung proportionales Signal gemessen. Voraussetzung dafür ist allerdings, dass die Polarisationsrichtung der Laserstrahlung über die Messdauer konstant bleibt, da die Polarisationsabhängigkeit der Reflexion bzw. Transmission der optischen Komponenten nicht berücksichtigt werden kann.

5 Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

5.1 Einleitung

Ein Überblick über die gängigen Verfahren zur In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen wurde bereits in Kapitel 3.2.2 gegeben. Demnach basieren viele der Verfahren auf der Analyse der Sekundärstrahlung, die durch die Wechselwirkung zwischen Laserstrahlung und Werkstück entsteht, da diese Strahlung Informationen über die Stabilität und die Dynamik des Schweißprozesses in sich trägt [39]. Bei der Untersuchung der Prozessemissionen mit Hilfe von Photodioden findet eine räumliche Integration statt. Es wird also je Photodiode ein eindimensionales Signal erzeugt [63]. In der Praxis wird die Aussagekraft solcher Photodiodensysteme durch die Kombination mehrerer Einzeldetektoren erhöht [11]. Hierbei detektieren die einzelnen Photodioden die Prozessemissionen in unterschiedlichen Spektralbereichen bzw. an unterschiedlichen Messpositionen. Solche Multidetektorsysteme sind kommerziell erhältlich [64].

Die Verwendung eines ortsauflösenden Detektors zur Aufzeichnung der Prozessemissionen liefert dagegen eine Fülle an Informationen über räumliche Gegebenheiten des Schweißprozesses [65, 66]. Bei dieser Methode wird beispielsweise die vom Werkstück ausgehende Wärmestrahlung detektiert, um dadurch die Geometrie des Schmelzbades und der Kapillaröffnung zu berechnen. Dieses Verfahren bietet Zugang zu primären Prozessparametern, wie beispielsweise der Einschweißtiefe [6, 5, 67]. Eine andere Methode zur Bestimmung der Einschweißtiefe liegt in der Auswertung der detektierten Intensitätsverteilung des angeregten Metaldampfes in der Kapillare [68]. Darüber hinaus lassen sich durch die Auswertung bestimmter Merkmale in den Kamerabildern weitere Parameter beim Laserstrahlschweißen überwachen. So kann eine Durchschweißung durch eine charakteristische Intensitätsverteilung detektiert werden [68] und fehlerhafte Strahlpositionierungen sind überwachbar [69].

Schwerpunkt der im Folgenden vorgestellten Versuche zur kamerabasierten In-Prozessüberwachung ist die Analyse der Schmelzbad- und Kapillargeometrie.

5.2 Analyse der Schmelzbad- und Kapillargeometrie

In diesem Kapitel werden grundlegende Untersuchungen zur Methode der kamerabasierten In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen beschrieben. Hierbei wird die vom Prozess ausgehende Wärmestrahlung mit einer Kamera aufgenommen und die aufgenommenen Bilder werden hinsichtlich bestimmter Bildparameter ausgewertet. Der zeitliche Verlauf dieser berechneten Bildparameter wird beim Schweißen mit induzierten Fehlern und bei Parametervariationen betrachtet, um empirisch eine Korrelation zu den Schweißprozessparametern und Schweißfehlern herzustellen.

5.2.1 Kameraeigenschaften

Die grundlegenden Eigenschaften der für die Prozessüberwachung geeigneten Kameras wurden bereits in Kapitel 2.4.2 beschrieben. Wie wichtig die Wahl der Kamera für die Qualität der In-Prozess-Bilder ist, soll mit Hilfe der Beispiele in Bild 5.1 gezeigt werden. Für Bild 5.1a wurde der Schweißprozess mit Hilfe einer CCD-Kamera visualisiert. Im

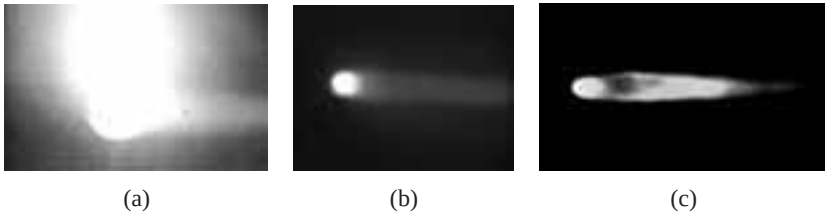


Bild 5.1. Kamerabilder beim Schweißen von Stahl: (a) CCD-Kamera, (b) InGaAs-Kamera, (c) InSb-Kamera.

Strahlengang wurde kein weiterer Filter zur Einschränkung des Spektralbereichs zwischen $0,4\ \mu\text{m}$ und $1,1\ \mu\text{m}$ verwendet. Die Metaldampfstrahlung über der Werkstückoberfläche dominiert das Bild. Eine Visualisierung des Schmelzbades bzw. der Kapillare ist nicht möglich. Bei Verwendung einer InGaAs-Kamera (Bild 5.1b) mit einem Spektralbereich von $0,9\ \mu\text{m}$ bis $1,7\ \mu\text{m}$ spielt die Metaldampfstrahlung über dem Werkstück keine Rolle. Keyhole und Schmelzbad sind erkennbar. Wird eine Infrarotkamera (vgl. Kap. 4.3) für einen Wellenlängenbereich von $3,4\ \mu\text{m}$ bis $5,1\ \mu\text{m}$ mit gleichzeitig hoher optischer Dynamik verwendet, sind Keyhole und Schmelzbad deutlich erkennbar. Es gibt keine Einflüsse des umgebenden Metaldampfes, wie in Bild 5.1c zu sehen ist.

Schnelle Infrarotkameras sind aufgrund ihrer Baugröße und der hohen Investitionskosten für die industrielle Prozessüberwachung nicht einsetzbar und herkömmliche CCD-Kameras sind auf eine Bildfolgefrequenz von 50 Hz beschränkt und werden somit der

6 Realisierung eines Echtzeit-Bildverarbeitungssystems

6.1 Einleitung

Im Folgenden wird ein Bildverarbeitungssystem vorgestellt, mit dessen Hilfe die Kapillar- und Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlschweißen in Echtzeit mit einer Bildwiederholrate von 500 Hz analysiert werden kann. Die Bilder der Wechselwirkungszone beim Laserstrahlschweißen werden mit dem bereits in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Versuchsaufbau aufgenommen. Zur Bildverarbeitung dient ein Echtzeit-Bildverarbeitungssystem, wobei Bildverarbeitungsalgorithmen zum Einsatz kommen, die einerseits eine Auswertung der Schmelzbad- und Kapillargeometrie zulassen (vgl. Kap. 5.2.4), andererseits eine kurze Berechnungszeit benötigen, um eine möglichst hohe Bildfolgefrequenz zu erreichen.

6.2 Systemhardware

Als Basis dient das *CompactVisionSystem selectorCVS power* der Firma hema electronic GmbH. Im Folgenden wird das System kurz CVS-System genannt. Es ist in Bild 6.1 dargestellt. Das System ist in einem 19 Zoll-Industrierack aufgebaut und besteht aus einem EMV-gerechten CompactPCI-Baugruppenträger mit Stromversorgung und Belüftung und einem robusten, industrietauglichen CompactPCI Industrie PC. Dieser verfügt über eine Pentium III CPU mit einer Taktfrequenz von 1 GHz und die üblichen Standard-PC-Schnittstellen.

Weiter verfügt das System über eine Compact PCI-Backplane für die Aufnahme von DSP-Bildverarbeitungskarten und handelsüblichen CompactPCI-Baugruppen [71]. In der zum Einsatz kommenden Konfiguration sind zwei Hochleistungs-DSP-Bildverarbeitungskarten *VisionFlash1* mit digitaler CameraLink™-Schnittstelle integriert. Eine dient der Verarbeitung der Kamerasignale. Die Bildverarbeitungskarten sind mit 600 MHz getaktet, besitzen als DSP-Bildprozessor den Typ TMS320C6415 von Texas Instruments mit 4800 MIPS (Million Instructions Per Second). Sie sind frei programmierbar und besitzen einen Bildspeicher von 128 MByte [72].



Bild 6.1. Echtzeit-Bildverarbeitungssystem auf Basis eines hema CVS power-Systems.

Da mit dem CVS-System zukünftig neben Bild- auch Analogdaten von Einzeldetektoren ausgewertet werden sollen, wurde die Hardware des Systems modifiziert. So befindet sich ein zusätzlicher Fronteinschub mit vier BNC-Anschlüssen für die Analogsignale im Gehäuse. Für die Verarbeitung der Analogdaten ist die zweite DSP-Karte VisionFlash1 vorgesehen.

6.3 Systemsoftware

Die notwendigen Softwarepakete sind in Tabelle 6.1 aufgelistet. Die Softwarestruktur auf DSP-Seite des Bildverarbeitungssystems ist in Bild 6.2 dargestellt. Die Softwarekomponenten *DSP/BIOS*, *Chip Support Library* und *DeviceDriver* gehören zur Ent-

Softwarepaket	Beschreibung
TI Code Composer Studio	DSP-Entwicklungsumgebung auf PC-Seite
Board Support Package BSP	Grundlegender Hardwaretreiber
Camera Support Package CSP	Kamerasteuerung
hema imaging framework	Bildverarbeitungsgrundgerüst
hema imaging library hil	Bildverarbeitungsbibliothek
hema image processing environment hipe	PC-Bedienoberfläche

Tabelle 6.1. Softwarepakete des hema-Systems.

Literaturverzeichnis

- [1] HÜGEL, H.: *Strahlwerkzeug Laser*. Stuttgart: Teubner, 1992.
- [2] KÖRNER, K.; WIESENDANGER, T.; OSTEN, W.: *Verfahren und Anordnung zur Keyhole-Tiefendetektion*, Patent DE 10356415 A1.
- [3] WIESENDANGER, T. F.; KÖRNER, K.; RUPRECHT, A. K.; TIZIANI, H. J.; OSTEN, W.: *Fast Confocal Point Sensor for In-Process Control of Laser Welding*, VDI-Berichte Nr. 1860 pp. 131-136 (2004).
- [4] MÜLLER-BORHANIAN, J. (HRSG.): *Integration optischer Messmethoden zur Prozesskontrolle beim Laserstrahlschweißen*, Abschlussbericht zum Verbundprojekt INESS. Forschungs- und Tagungsberichte, Herbert Utz Verlag, München 2005.
- [5] QUALAS Patent DE 197 16 293 A1.
- [6] BREITSCHWERDT, S.: *Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen*. Dissertation. Forschungsberichte des IFSW, Herbert Utz Verlag, Stuttgart 2001.
- [7] DAUSINGER, F.: *Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozeßeffektivität*. Universität Stuttgart, Habilitationsschrift. Stuttgart: Teubner, 1995 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).
- [8] BIMBERG, D.: *Laser in Industrie und Technik*. Sindelfingen: Expert-Verlag, 1985.
- [9] HÜGEL, H.: *Lasertechnologie II: Materialbearbeitung mit Hochleistungslasern*. Vorlesungsmanuskript, Stuttgart, 2002.
- [10] HÜGEL, H.: *Laser – Neue Strahlquellen und Einsatzfelder*. In: Ges. für Fertigungstechnik (Hrsg.): *Zukunftssicherung durch Innovation: Vorträge zum FTK'94*, Stuttgart, Springer-Verlag Berlin, 1994.
- [11] DEININGER, C.: *Evaluierung eines Multidetektorensystems zur Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen*. Diplomarbeit, Institut für Strahlwerkzeuge, Universität Stuttgart, Stuttgart 2001.
- [12] MODEST, M. F.: *Radiative heat transfer*. McGraw-Hill series in mechanical engineering, New York, 1993.
- [13] RAPPE, W.: *Quotientenpyrometer für Temperaturen ab 500°C*. Kernforschungszentrum Karlsruhe, Karlsruhe 1982.
- [14] *Produktinformation der LOT-Oriel GmbH & Co. KG*. Darmstadt, 2005.

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, vergiffen, 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 längsgeströimte CO₂-Lasern
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 längsgeströimten 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

Griebisch, Jürgen

Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

Kreputat, 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

Laserschweißseignung 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

Plaß, 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 Mo-lybdän
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 Zerspaltung
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 magnetofluidynamische 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 Festkörperlaseren für den Karoseriebau
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 Weichlötens 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-Doppelfokustechnik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Flexibilität 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 3-8316-0256-3

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 keramischen 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 Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Systemkonzept und experimentelle Verifizierung
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Aluminiumguß- 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 Präzision 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 Aluminiumgusslegierungen 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. habil. 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 Kurz-
pulsverstärkern 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 Fokussmatrixtechnik

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 variab-
lem 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 Naht-
eigenschaften beim Laserstrahlschweißen von
Aluminiumwerkstoffen

2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

Mikhail Larionov

Kontaktierung und Charakterisierung von
Kristallen für Scheibenlaser

2009, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-0855-3