

Lehrstuhl für
Montagesystemtechnik und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen

Alexandra Reek

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Hoffmann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Dilger, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Die Dissertation wurde am 20.10.1999 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 29.02.2000 angenommen.

Forschungsberichte

iwb

Band 138

Alexandra Reek

***Strategien zur Fokuspositionierung
beim Laserstrahlschweißen***

***herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart***

Herbert Utz Verlag

UTZ

Forschungsberichte iwb

**Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München**

herausgegeben von

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
Technische Universität München
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)**

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2000

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2000

ISBN 3-89675-730-X

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089/277791-00 · Fax: 089/277791-01

Geleitwort des Herausgebers

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

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

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

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

Gunther Reinhart

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Leiter dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung, die entscheidend zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen hat.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dilger, dem Leiter des Lehrstuhls für Klebtechnik der RWTH Aachen, möchte ich mich für die Übernahme des Koreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken, bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann für die Übernahme des Vorsitzes.

Darüberhinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, insbesondere den „Laser“-Kollegen, sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich.

München, im April 2000

Alexandra Reek

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Vorteile der Lasertechnik.....	1
1.2	Problemstellung.....	2
1.3	Zielsetzung.....	5
1.4	Vorgehensweise	5
2	Grundlagen und Definitionen	7
2.1	Grundlagen des Laserstrahlschweißens	7
2.1.1	Laseranordnung.....	8
2.1.1.1	Laserstrahlquellen.....	8
2.1.1.2	Beschreibung des fokussierten Laserstrahls	9
2.1.1.3	Prozeß Laserstrahlschweißen.....	11
2.1.2	Handhabungssysteme	12
2.1.2.1	Portalanlagen	14
2.1.2.2	Knickarmroboter.....	15
2.1.3	Meß- und Regelvorrichtungen	17
2.1.3.1	Begriffsbestimmung	17
2.1.3.2	Prozeßsensorik.....	19
2.1.3.3	Nahtfolgesensorik	20
2.1.4	Analyse der Werkstücke.....	23
2.2	Machbarkeitsprüfung der robotergestützten Bahnbearbeitung.....	24
2.2.1	Machbarkeitskriterium	24
2.2.2	Zulässige Abweichungen der Nahtformen.....	24

2.2.3	Genauigkeit der Handhabungstechnik	27
2.2.4	Analyse der Bauteilabweichungen	31
2.2.5	Analyse des Machbarkeitskriteriums	33
2.3	Die Methode der geplanten Versuche	33
2.3.1	Grundlagen der statistischen Versuchsplanung	33
2.3.2	Planung	35
2.3.3	Durchführung	37
2.3.4	Analyse	38
3	Analyse des Sensoreinsatzes beim Laserstrahlschweißen	40
3.1	Anforderungen an ein Sensorsystem	40
3.2	Stand der Sensortechnik zur Bahnführung	43
3.2.1	Möglichkeiten mechanischer Kompensation	43
3.2.2	Prozeßsensorik	44
3.2.2.1	Einsatz von Prozeßsensoren zur Bahnführung	45
3.2.2.2	Einsatz von Prozeßsensoren zur Qualitätssicherung	49
3.2.3	Bahnführung durch Nahtfolgesensorik	51
3.2.3.1	Meßprinzipien	51
3.2.3.2	Einsatz von Triangulationssensoren zur Bahnführung	55
3.2.3.3	Detektion geometrischer Eigenschaften der Fügezone	58
3.2.3.4	Einsatz von Nahtfolgesensoren zur Qualitätssicherung	59
3.3	Zusammenfassung und Bewertung der Konzepte	60
3.3.1	Bewertung anhand der Anforderungen	60
3.3.1.1	Prozeßsensorik	60

3.3.1.2	Nahtfolgesensorik	62
3.3.2	Ableitung des Handlungsbedarfs	64
4	Verbesserung der Nahterkennung	66
4.1	Grundlagen der Nahterkennung	66
4.2	Versuchsbeschreibung	69
4.2.1	Sensortechnik	69
4.2.2	Versuchsanordnung	70
4.3	Optimierung von Nahterkennung und -vermessung	71
4.3.1	Verbesserung der Nahterkennung	71
4.3.1.1	Grundlagen der Nahterkennung.....	71
4.3.1.2	Untersuchungen zur Nahterkennung	72
4.3.2	Vermessung von Fügespalten.....	74
4.3.2.1	Analyse der Fügekanten	74
4.3.2.2	Einfluß der Beleuchtung auf die Nahtvermessung	75
4.3.2.3	Einfluß der Fügekanten auf die Nahtvermessung.....	76
4.4	Zusammenfassung und Bewertung	78
5	Adaptive Schweißfunktionen	80
5.1	Grundlagen adaptiver Schweißfunktionen.....	80
5.1.1	Begriffsbestimmung	81
5.1.2	Grundlagen der Überbrückung von Fügespalten	82
5.1.2.1	Möglichkeiten der Spaltüberbrückung	82
5.1.2.2	Stand der adaptiven Schweißtechnik	82
5.1.2.3	Defizite der vorhandenen Ansätze.....	84

5.2	Versuchsbeschreibung	86
5.2.1	Auswahl der Werkstoffe und Nahtformen	86
5.2.2	Versuchsaufbau	87
5.3	Entwicklung adaptiver Schweißfunktionen	88
5.3.1	Versuche zur Auswahl geeigneter Prozeßparameter.....	89
5.3.2	Erarbeitung geometriebasierter Modelle	92
5.3.2.1	Kehlnaht am Überlappstoß	93
5.3.2.2	I-Naht am Stumpfstoß.....	98
5.3.3	Erprobung der theoretischen Ansätze	102
5.3.3.1	Kehlnaht am Überlappstoß	102
5.3.3.2	I-Naht am Stumpfstoß.....	104
5.3.4	Anpassung adaptiver Schweißfunktionen	106
5.3.4.1	Vorgehensweise	106
5.3.4.2	Berechnung der Konstante c_{im} für die I-Naht am Stumpfstoß .	107
5.3.4.3	Bestimmung des Verlaufs Funktionen für die Kehlnaht am Überlappstoß	108
5.3.4.4	Vergleichende Bewertung des experimentellen Aufwands.....	110
5.3.5	Integration in ein Nahtfolgesystem	112
5.4	Zusammenfassung und Bewertung	114
6	Strategien zur dynamikgerechten Bahnführung	115
6.1	Grundlagen des dynamischen Verhaltens des Systems Sensor-Roboter	115
6.1.1	Einflüsse des Handhabungsgeräts	116
6.1.2	Einflüsse der Sensorik	118

6.1.3	Auswirkungen auf die sensorgeführte Bahnbearbeitung	120
6.2	Beschreibung der Versuchsanlage	120
6.3	Untersuchungen zum dynamischen Verhalten	122
6.3.1	Erarbeitung eines roboterspezifischen Kennwerts	122
6.3.2	Umsetzung der Ergebnisse in der Sensorsteuerung	126
6.4	Zusammenfassung und Bewertung	128
7	Kosten-Nutzen-Analyse der sensorgeführten Bahnbearbeitung.....	129
7.1	Alternativen der Toleranzbeherrschung beim Laserstrahlschweißen	129
7.2	Wirtschaftliche Bewertung der Alternativen	131
7.3	Technologische Bewertung	135
8	Anwendungsbeispiel	139
8.1	Beschreibung der Fertigungsaufgabe.....	139
8.2	Entwicklung der adaptiven Schweißfunktion	142
8.2.1	Analyse der Prozeßparameter.....	143
8.2.2	Theoretische Überlegungen.....	143
8.3	Experimentelle Erprobung	146
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	147
10	Literatur.....	151

Verzeichnis verwendeter Formelzeichen

A_1, A_2	Nahtquerschnitt im Fügespalt [m ²]
A_{Naht}	Nahtquerschnitt [m ²]
A_o	Nahtquerschnitt im oberen Blech [m ²]
A_u	Nahtquerschnitt im unteren Blech [m ²]
b_o	Nahtbreite am Oberblech [m]
b_u	Nahtbreite am Unterblech [m]
c_{\dots}	Konstanten der adaptiven Schweißfunktion
cov	Kovarianz
D_d	Drahtdurchmesser [m]
d	Strahldurchmesser auf der Optik [m]
$D_{O,u}$	Durchmesser der Strahltaille [m]
f	Größe des Sensorsichtfelds [m]
f_b	Breite des Sensorsichtfelds [m]
f_d	Füllgrad
f_h	Höhe des Sensorsichtfeldes [m]
h_s	Größe des Fügespalts [m]
h_v	Höhe des Kantenversatzes [m]
K	Strahlqualitätszahl
K_v	Geschwindigkeitsverstärkung [s ⁻¹]
K_H	Maschinenstundensatz [DM/s]
K_M	Kosten pro Meter Schweißnahtlänge [DM/m]
k	Anzahl der Faktoren der statistischen Versuchsplanung
l_u	Länge des Überlappbereichs [m]
l_w	Werkzeuglänge [m]
N	Anzahl der notwendigen Versuche der SVP
n	Stichprobenumfang
O_v	Orientierungsführung
P	Laserleistung [W]
P_0	Laserleistung bei Nullspalt [W]
p	Reglerparameter der adaptiven Regelung
q_r	Öffnungswinkel des fokussierten Laserstrahls [rad]
r	Korrelationskoeffizient
S	Streckenenergie [J/m]
S	Schleppabstand [m]
s	Standardabweichung
s_K	Positionsabweichung [m]

s_v	Sensorvorlauf [m]
t	Blechdicke [m]
t_k	Kreisformabweichung [m]
V	Abstand von der Regressionsgraden
v	Bahngeschwindigkeit [m/s]
v_d	Drahtfördergeschwindigkeit [m/s]
v_{d0}	Drahtfördergeschwindigkeit bei Nullspalt [m/s]
v_0	Bahngeschwindigkeit bei Nullspalt [m/s]
v_K	Korrekturgeschwindigkeit [m/s]
v_u	Umorientierungsgeschwindigkeit [$^\circ$ /s]
w	Sollwert der adaptiven Regelung
x	Auftreffpunkt
\bar{x}	Mittelwert der Probe
x_i	Meßwert der Probe
y	Vorschubrichtung
z	Strahlrichtung
z	Störungen der Regelstrecke
z_R	Rayleighlänge [m]
z_f	Brennweite der Fokussieroptik [m]
α	Knickwinkel [$^\circ$]
Δx	Verschiebung des Auftreffpunktes [m]
Δz	Verschiebung der Fokuslage [m]
λ	Wellenlänge [m]
ζ	Parameteränderung der Regelstrecke
$\dot{\omega}$	Winkelbeschleunigung [$^\circ$ /s ²]

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer Aided Design
CCD	Charge Coupled Device
CO ₂	Kohlendioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren
EN	Europäische Norm
ISO	International Standardisation Organisation
LWM	Laser Welding Monitor
Nd:YAG	mit Neodym dotierter Yttrium-Aluminium-Granat
PKW	Personenkraftwagen
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

1 Einführung

1.1 Vorteile der Lasertechnik

Im Rahmen der Diskussion um die zunehmende Globalisierung der Weltwirtschaft werden die hohen Lohnkosten immer wieder als Nachteil des Produktionsstandortes Deutschland angeführt. Dem gegenüber stehen die Vorteile der deutschen Industrie in der Entwicklung und im Einsatz neuer, innovativer Technologien. Es ist von hoher Bedeutung, innovative Technologien nicht nur in den Labors der Entwickler, sondern ebenso im Rahmen einer effizienten Produktion unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit zu beherrschen. Aufgrund des hohen Anteils an der Wertschöpfung gilt dies insbesondere für die Fertigungsprozesse. Dabei ist es wichtig, auch diese Prozesse kontinuierlich weiterzuentwickeln, um das Potential der Verfahren voll ausschöpfen zu können (GEIGER & LUTZ 1995, LEIBINGER 1997, MILBERG 1997).

Großes Potential hat hierbei die Lasertechnik, die als Wachstums- und Schlüsseltechnologie für innovative Anwendungen gilt (GEIGER & LUTZ 1995, HAFERKAMP & HÖFEMANN 1997, LEIBINGER 1997). Bei der Anwendung lasergestützter Technologien ergeben sich eine Reihe praktischer Vorteile in der Fertigung. Diese sind die hohe Flexibilität, Bearbeitungsgeschwindigkeit und –qualität sowie eine gute Automatisierbarkeit (Bild 1.1) (HÜGEL 1992).

Aufgrund seiner Flexibilität kann der Laser in allen Hauptgruppen der Fertigungsverfahren eingesetzt werden (GEIGER & LUTZ 1995). In einer Anlage können dabei verschiedene Verfahren und Anwendungen innerhalb der durch Laserstrahlleistung und –qualität gegebenen Grenzen umgesetzt werden, da für die Umrüstung lediglich eine Anpassung der Peripherie erforderlich ist. Laseranwendungen sind hervorragend automatisierbar. Der Laser eignet sich somit für die Fertigung eines großen Produktionsvolumens im Dreischichtbetrieb (RAJU 1992). Die Schnelligkeit der lasergestützten Verfahren erlaubt zudem eine Verkürzung der Durchlaufzeit in der Produktion. Beispielsweise können beim Laserstrahlschweißen um den Faktor zehn höhere Vorschubgeschwindigkeiten im Vergleich zu den Lichtbogenschweißverfahren erreicht werden.



Bild 1.1 Vorteile der Lasertechnik

Der wichtigste Grund für den Einsatz des Lasers ist in den meisten Fällen eine Verbesserung der Fertigungsqualität (FERTIGUNG 1990). Der Laserstrahl als punktuell angreifendes, berührungsloses Werkzeug arbeitet ohne mechanische Beanspruchung des Werkstücks. Im Vergleich zu anderen thermischen Verfahren bietet der Laser den Vorteil einer minimalen Wärmeeinbringung und somit einer kleinen Wärmeeinflußzone. Eine Nacharbeit des Bauteils kann deshalb in vielen Fällen minimiert oder ganz eingespart werden. Zuletzt werden erst durch den Einsatz des Lasers bestimmte Anwendungen oder Konstruktionen ermöglicht, die beispielsweise Einsparungen von Material und Gewicht bei verbesserter Festigkeit bieten.

1.2 Problemstellung

Die Vorteile der Lasertechnik haben sich in den letzten Jahren in jährlichen Zuwachsraten von über zehn Prozent, sowohl für Strahlquellen als auch für Lasersysteme, widerspiegelt (VDMA 1997). Dennoch sind nach GEIGER U.A. (1997) nur etwa 15 Prozent aller möglichen Anwendungen des Lasers für die Materialbearbeitung in der Industrie ausgeschöpft, obwohl ein Großteil im Bereich der Forschung beherrscht wird. Aussagen von MIYAMOTO (1998) und POPRAWE

(1995) unterstützen diese Einschätzung. Doch gerade die Fähigkeit, in den Forschungslabors erarbeitetes Wissen schnell in Anwendungen umzusetzen zeichnet erfolgreiche Unternehmen aus (MILBERG 1997).

Insbesondere im Bereich der Lasertechnik bestehen große Defizite in der industriellen Umsetzung bekannter Lösungen (WEISS 1997). Dies ist unter anderem auf die ungünstigen wirtschaftlichen Randbedingungen der Lasertechnik zurückzuführen. Nachteilig sind die hohen Anschaffungskosten, die fehlende Standardisierung und Normung und der Mangel an mit der Lasertechnik vertrautem Personal (HÜGEL 1995). Die technologische Beherrschung des umzusetzenden Prozesses bei hoher Prozeßsicherheit ist eine unbedingte Voraussetzung für den erfolgreichen Einsatz der Lasertechnik.

Ein Verfahren, bei dem in diesem Bereich großes Verbesserungspotential besteht, ist das Laserstrahlschweißen. Verglichen mit herkömmlichen Fügeverfahren, wie beispielsweise dem Punktschweißen von Stahl oder dem WIG-Schweißen, Clinchen oder Nieten von Aluminium weist das Laserstrahlschweißen eine Vielzahl von Vorteilen auf, die in Bild 1.2 zusammengefaßt sind (SCHINZEL & REICHELT 1998, SHIBATA 1992, ROESSLER U.A. 1992).

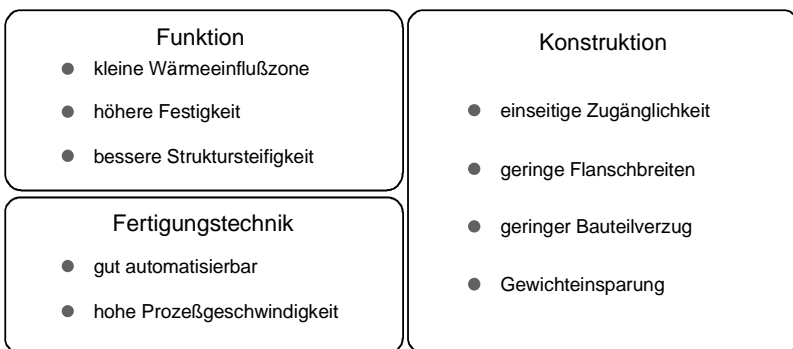


Bild 1.2 Vorteile des Laserstrahlschweißens

Funktional ergeben sich aufgrund der in der Regel linienförmig ausgebildeten Verbindung höhere Festigkeiten und eine bessere Struktursteifigkeit. Die kleine Wärmeeinflußzone verursacht zudem eine nur geringe Schwächung des Grundwerkstoffs. Aus Sicht der Konstruktion erlaubt der Einsatz des Lasers eine insbesondere im Hinblick auf das Bauteilgewicht optimale Gestaltung, da lediglich

einseitige Zugänglichkeit und geringe Flanschbreiten erforderlich sind. Wegen des geringen Bauteilverzugs ist eine weniger hohe Eigensteifigkeit des Bauteils gefordert. Fertigungstechnische Vorteile ergeben sich durch die gute Automatisierbarkeit und die geringen Taktzeiten aufgrund der hohen Prozeßgeschwindigkeit (FERTIGUNG 1990, ROESSLER U.A. 1992, SCHINZEL & REICHELT 1998, TREIBER 1990).

Obwohl dem Verfahren Laserstrahlschweißen aufgrund dieser Vorteile höchste Zuwachsraten und großes Anwendungspotential vorausgesagt wurden und werden (BELFORTE 1988, BEYER U.A. 1988, GEIGER & LUTZ 1995), lag der Anteil der Laserschweißbearbeitung an den lasergestützten Verfahren lange Zeit konstant bei etwa 20 Prozent (FERTIGUNG 1990, WEISS 1997). Zuwächse in den letzten Jahren sind ausschließlich auf die Verbreitung der Tailored Blanking Technologie zurückzuführen, einer rein zweidimensionalen Anwendung (TÖNSHOFF 1997, MERTENS 1998).

Die Erwartungen, die an die Möglichkeiten des Laserstrahls zum Fügen dreidimensionaler Strukturen gestellt worden sind, konnten nicht oder nur teilweise erfüllt werden, insbesondere aufgrund der Zurückhaltung der Automobilindustrie (WIRTH 1996). Falls Schweißungen an dreidimensionalen Fügepartnern durchgeführt werden, geschieht dies in den aktuellen Anwendungen lediglich an quasis-zweidimensionalen Nahtstrukturen (EUROLASER 1996). Ein typisches Beispiel ist das Laserschweißen von PKW-Dachnähten (RIPPL 1997).

Als Hemmnisse für das Verbinden dreidimensionaler Strukturen werden Probleme der Systemtechnik wie das eingeschränkte Bewegungsverhalten der zur Verfügung stehenden Handhabungstechnik, die aufwendige Spanntechnik zur Minimierung der Nahttoleranzen, sowie der Bedarf nach Sensorik für Qualitätssicherung und Bahnführung genannt (HORNIG & REINHART 1990, FLOHR 1995, SCHINZEL & REICHELT 1998). Dies gilt in besonderem Maße für Nahtformen wie Kehlnaht und Stumpfstoß, die hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Fokuspositionierung stellen. Aus diesem Grund wird die Geometrie der Fügezone eher durch fertigungstechnische als durch technologische Gesichtspunkte bestimmt (POPRAWA 1995). Eine Vielzahl von Anwendungen scheitert daran, daß aufgrund der vorgegebenen Geometrie der Fügezone oder der Toleranzen der Fügepartner keine ausreichende Prozeßsicherheit in der Fokuspositionierung erreicht werden kann.

1.3 Zielsetzung

Die Zielsetzung dieser Arbeit besteht darin, durch eine an die Naht- und Stoßgeometrie angepaßte Fokuspositionierung Fehler in laserstrahlgeschweißten Nähten zu vermeiden. Im Rahmen der Arbeit sollen sowohl die Eigenschaften des Laserstrahlschweißprozesses bezüglich der zulässigen Fokusabweichung als auch die vorhandenen Bauteiltoleranzen als gegebene und somit nicht veränderbare Größen angesehen werden. Vielmehr wird das Vermeiden, die Kompensation oder zumindest die Erkennung einer fehlerhaften Fokuspositionierung mit Hilfe geeigneter Systemtechnik, insbesondere durch Handhabungs- und Sensortechnik angestrebt.

Durch vollständige Ausschöpfung aller systemtechnischen Möglichkeiten zur fehlerfreien Fokuspositionierung sollen sowohl bislang aufgrund der Komplexität der Bearbeitung nicht umgesetzte Anwendungen für das Laserstrahlschweißen erschlossen als auch die technologisch sinnvollste Naht- und Stoßform ermöglicht werden.

1.4 Vorgehensweise

Zunächst werden in **Kapitel 2** nach Klärung der für die Arbeit relevanten Begriffe die zu einer Abweichung der Fokusslage führenden Einflüsse klassifiziert und analysiert. Es wird die Eignung der rein bahngesteuerten Bearbeitung für das Laserstrahlschweißen untersucht. Zu diesem Zweck werden die typischen Toleranzen von Bauteilen und Stoßgeometrien und die Abweichungen der Handhabungstechnik mit den zulässigen Fokusslageabweichungen der verschiedenen Nahtformen verglichen. Es wird aufgezeigt, daß ausreichende Prozeßsicherheit nur bei Einsatz einer geeigneten Sensorik erreicht werden kann.

In **Kapitel 3** wird der Stand der Technik auf dem Gebiet der Sensorik zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen aufgezeigt. Dazu werden zunächst die Anforderungen an die Sensorik zusammengefaßt. Bestehende Lösungen werden untersucht und anhand der Anforderungen analysiert. Dabei wird zwischen Verfahren mit indirekter Messung durch Prozeßsensorik und Verfahren, bei denen die Bearbeitungsbahn direkt durch Nahtfolgesensoren vermessen wird, unterschieden. Durch Abgleich mit den anfangs definierten Anforderungen werden das Einsatzpotential der Sensorkonzepte sowie bestehende Defizite aufgezeigt.

Die Kapitel 4 bis 6 befassen sich mit Lösungsansätzen zur Behebung der dargestellten Defizite. Dabei werden verschiedene neue Strategien für die Fokuspositionierung erarbeitet.

In **Kapitel 4** werden Möglichkeiten aufgezeigt, die Nahterkennung, insbesondere bei schwierigen Nahtformen wie dem Stumpfstoß zu verbessern. Ein Schwerpunkt liegt hierbei auf der sicheren Detektion und Vermessung von Abweichungen in der Stoßform wie Fügespalt oder Bauteilversatz in Abhängigkeit von Bauteileigenschaften wie Oberfläche oder Stoßkantenvorbereitung.

Darauf aufbauend werden in **Kapitel 5** adaptive Schweißfunktionen entwickelt, mit deren Hilfe die Prozeßparameter an Eigenschaften der Stoßgeometrie zur Überbrückung von Fügespalten angepaßt werden. Die entwickelten Lösungen werden durch beispielhafte Integration in die Steuerung eines Nahtfolgesystems verifiziert.

In **Kapitel 6** wird der Ansatz des adaptiven Schweißens auf die Kompensation von Eigenheiten im Bahnverlauf wie Krümmungen oder Knicke erweitert. Dadurch werden Fehler in der Bearbeitung, die durch die Grenzen im dynamischen Verhalten des Handhabungsgeräts auftreten, vermieden.

In **Kapitel 7** wird im Rahmen einer Kosten-Nutzen-Analyse die Wirtschaftlichkeit und technologische Machbarkeit der erarbeiteten Ansätze diskutiert. Die Praxistauglichkeit wird in **Kapitel 8** anhand eines Anwendungsbeispiels aufgezeigt. Den Abschluß der Arbeit bilden Zusammenfassung und Ausblick in **Kapitel 9**.

2 Grundlagen und Definitionen

Im Rahmen dieses Kapitels werden die für das Laserstrahlschweißen und die Handhabung erforderlichen Komponenten vorgestellt, sowie wichtige Begriffe definiert. In einem weiteren Schritt wird die Eignung konventioneller bahngesteuerter Handhabungsgeräte für das Laserstrahlschweißen untersucht. Dazu werden die Anforderungen eines Laserstrahlschweißprozesses an die Fokuspositionierung den unter Berücksichtigung der Bauteiltoleranzen und der Bahnabweichungen des Handhabungsgeräts erreichbaren Genauigkeiten gegenübergestellt. In einem letzten Schritt werden die zur Durchführung der experimentellen Untersuchungen im Rahmen der Arbeit erforderlichen Grundlagen der statistischen Versuchsplanung vorgestellt.

2.1 Grundlagen des Laserstrahlschweißens

Die Darstellung der Grundlagen des Laserstrahlschweißens erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 11145 (1995). Hier wird eine Laseranlage nach dem in Bild 2.1 dargestellten Schema zusammengesetzt.

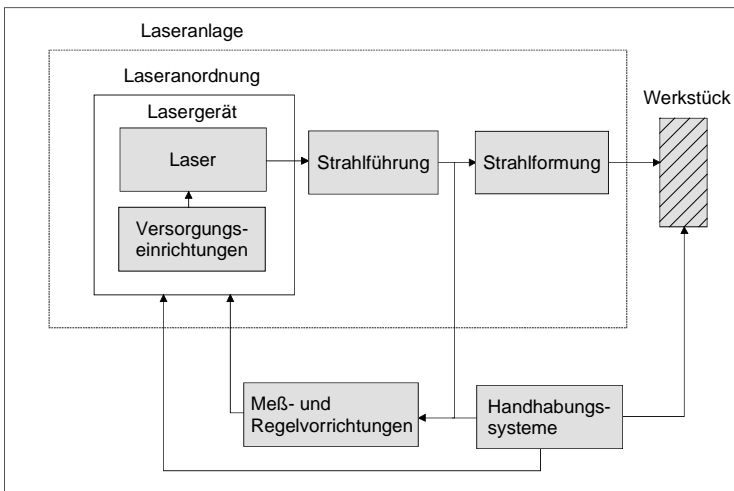


Bild 2.1 Schema zur Veranschaulichung einer Laseranlage (DIN EN ISO 11145)

2 Grundlagen und Definitionen

2.1.1 Laseranordnung

Zunächst werden die beim Laserstrahlschweißen zum Einsatz kommenden Lasergeräte und die Strahlformung vorgestellt. Anschließend werden die für die vorliegende Arbeit relevanten Größen der Fokuspolygonierung und die Grundlagen des Laserstrahlschweißprozesses beschrieben.

2.1.1.1 Laserstrahlquellen

Die einzigen derzeit für das Laserstrahlschweißen im industriellen Umfeld zum Einsatz kommenden Strahlquellen sind Kohlendioxid- und Neodym:YAG-Laser. CO₂-Laser gehören zur Gruppe der Gaslaser, die Nd:YAG-Laser zu den Festkörperlaser. Die Kenngrößen der Strahlquellen sind in Bild 2.2 zusammengefaßt. Die physikalischen Grundlagen der Laserstrahlquellen werden umfassend in HÜGEL (1992, S.123-170) beschrieben.

	Nd:YAG-Laser	CO ₂ -Laser
Medium	mit Neodym dotierter YAG-Kristall	Kohlendioxid
Anregung	Blitzlampen	Hochfrequenzentladung
Wellenlänge	1,06 µm	10,6 µm
Leistungsbereich	100 bis 4000 W	100 bis 20000 W
Fokusintensität	10 ⁵ bis 10 ⁷ W/cm ²	10 ⁶ bis 10 ⁸ W/cm ²
Wirkungsgrad	3 bis 4 %	ca 10 %
Strahlführung	Lichtleitfaser	Spiegelsysteme

Bild 2.2 Kenngrößen der Strahlquellen

CO₂-Laser haben derzeit noch den größten Anwendungsbereich. Sie bestechen durch die hohen verfügbaren Leistungen, die gute Strahlqualität und die hohe Verfügbarkeit. Nd:YAG-Laser haben erst in letzter Zeit größere Bedeutung für

das Laserstrahlschweißen erlangt, seit Leistungen von mehr als einem Kilowatt zur Verfügung stehen (ALDER & BLOEHS 1998). Ihr Vorteil liegt in der Möglichkeit der Strahlführung über Lichtleitfaser, was insbesondere bei dreidimensionalen Bauteilen Vorteile in bezug auf Arbeitsraum und Zugänglichkeit mit sich bringt. Nachteilig sind die hohen Kosten, der geringe Wirkungsgrad und die geringe Verfügbarkeit durch die kurze Lebensdauer der Pumpquelle, die Blitzlampe.

Als zukünftige Alternativen befinden sich sowohl Diodenlaser als auch diodengepumpte Festkörperlaser im Entwicklungsstadium (ROFIN SINAR 1998). Das Potential dieser Strahlquellen für die Zukunft des Laserstrahlschweißens kann derzeit noch nicht abgeschätzt werden. Es ist jedoch zu erwarten, daß beide Laserstrahlquellen in Zukunft für das Laserstrahlschweißen eingesetzt werden (POPRAWIE U.A. 1998).

2.1.1.2 Beschreibung des fokussierten Laserstrahls

In der Lasermaterialbearbeitung wurden in den letzten Jahren mit großem Aufwand umfassende Kenngrößen zur Beschreibung eines Laserstrahls erarbeitet. Verschiedene Ansätze zur Normung geben eine Vielzahl von Kenngrößen an, um die Intensitätsverteilung von unfokussierten und fokussierten Laserstrahlen in und senkrecht zur Strahlrichtung zu beschreiben. Für das Laserstrahlschweißen ist lediglich die Beschreibung des fokussierten Laserstrahls (siehe Bild 2.3) relevant.

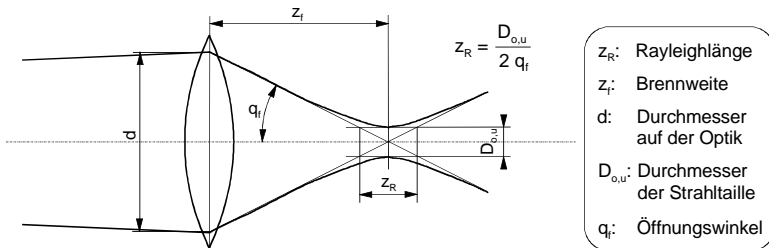


Bild 2.3 Fokussierter Laserstrahl (DIN EN ISO 11145)

Die Form eines Laserstrahls wird auch als Strahlkaustik bezeichnet. Die wichtigsten Kenngrößen zur Beschreibung der Strahlkaustik eines fokussierten Laser-

2 Grundlagen und Definitionen

strahls sind die Lage und der Durchmesser $D_{o,u}$ der Strahlteile und die Rayleighlänge z_R , die sich aus der Brennweite der Fokussieroptik und der Strahlqualität des Laserstrahls ergeben (DIN EN ISO 11145). Die Lage der Strahlteile wird auch als Laserfokus, der Durchmesser der Strahlteile auch als Fokussdurchmesser bezeichnet. Die Rayleighlänge ist ein Maß für die Tiefenschärfe des Laserstrahls.

Eine Kenngröße zur Beurteilung der Strahlqualität ist die sogenannte Strahlqualitätszahl K . Sie ist ein objektives Maß für die Fokussierbarkeit eines Laserstrahls. Der Wert von K läßt sich nach Ableitung aus DIN EN ISO 11145 (1994) aus der Wellenlänge des Laserstrahls λ , der Brennweite der Fokussieroptik z_f , dem Strahldurchmesser auf der Optik d und dem Durchmesser der Strahlteile $D_{o,u}$ nach

$$K = \frac{4 \cdot \lambda \cdot z_f}{\pi \cdot d \cdot D_{o,u}} \quad (2.1)$$

berechnen (nach HÜGEL 1992).

Unter dem Begriff Fokusslage wird die Position des Laserfokus in Strahlrichtung relativ zum Bauteil verstanden. Eine weitere wichtige Größe ist der Auftreffpunkt des Laserstrahls auf dem Bauteil. Die beiden Begriffe beschreiben gemeinsam die Verteilung der Laserstrahlleistung auf dem Bauteil (Bild 2.4).

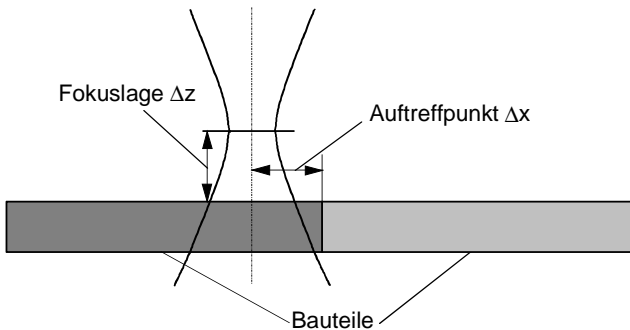


Bild 2.4 Definition von Fokusslage und Auftreffpunkt

Die Bewegung des Laserfokus entlang der Stoßkante wird außerdem über die Bahngeschwindigkeit v beschrieben. Diese gibt die Geschwindigkeit des Laser-

fokus in Vorschubrichtung an. Der Quotient aus Laserstrahlleistung P und Bahngeschwindigkeit v

$$S = \frac{P}{v} \quad (2.2)$$

wird als Streckenenergie S bezeichnet.

2.1.1.3 Prozeß Laserstrahlschweißen

Das Verfahren Laserstrahlschweißen beruht auf der Ausbildung einer Dampfkapillare mit einem Durchmesser in der Größenordnung des fokussierten Laserstrahls durch die lokale Einbringung der Energie des Laserstrahls in den Werkstoff (Bild 2.5). Der Dampfdruck wirkt dem hydrostatischen Druck der umgebenden Schmelze sowie deren Oberflächenspannungen entgegen und verhindert ein Schließen der Kapillare. Bei Laserstrahlschweißen mit CO_2 -Lasern wird der abströmende Dampf teilweise ionisiert und das so entstandene Plasma beeinflusst rückwirkend Form und Tiefe der Kapillare. Von deren Wandungen gelangt die dort eingekoppelte Energie in die Schmelze und weiter an das feste Material.

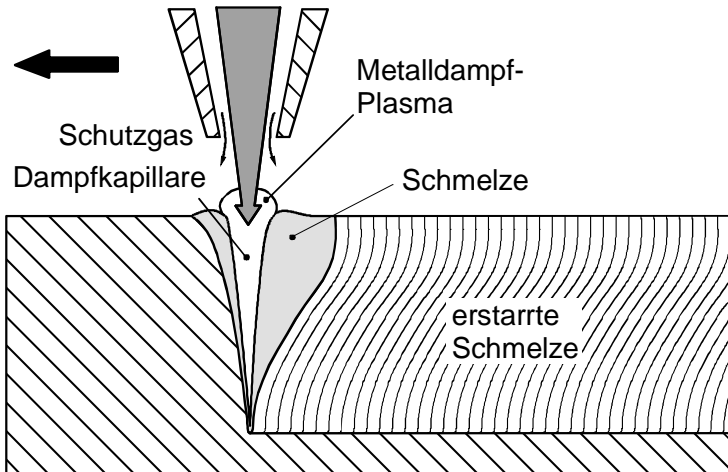


Bild 2.5 Laserstrahlschweißprozeß (HÜGEL 1992, S. 286-288)

Durch die Relativbewegung zwischen Kapillare und Werkstück entlang einer vorgegebenen Bahn wird stetig neues Material aufgeschmolzen, das die Kapillare

2 Grundlagen und Definitionen

seitlich umströmt und dahinter infolge Abkühlung durch das Bauteil wieder erstartet (HÜGEL 1992, S. 286-288).

Typische Verhältnisse von Nahttiefe zu Nahtbreite liegen zwischen 2:1 und 10:1, weshalb man beim Schweißen aufgrund des hier geschilderten Mechanismus auch vom Tiefschweißen spricht. Verfahren mit Intensitäten, die nicht zum Ausbilden von Kapillaren ausreichen, werden als Wärmeleitungsschweißen bezeichnet. Sie haben jedoch trotz der geringeren Anforderungen an die Fokusspositionierung nur geringe industriellen Relevanz. Daher werden sie im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

Beim Schweißen wird mit Prozeßgasen gearbeitet, die als Schutz- und Vorbeugungsmaßnahme gegen Oxidation und Plasmaabschirmung dienen. In der Praxis werden die unterschiedlichsten Gasführungen realisiert, die (wie in Bild 2.5 dargestellt) koaxial verlaufen oder tangential zur Werkstückoberfläche orientiert sind. Je nach zu verschweißendem Werkstoff kommen Argon, Helium, Stickstoff, Kohlendioxid oder Gemische dieser Gase zum Einsatz.

2.1.2 Handhabungssysteme

Für räumliche Anwendungen des Laserstrahlschweißens ist der Einsatz mehrachsiger Handhabungsgeräte erforderlich. Die am häufigsten zum Einsatz kommenden Geräte sowie die jeweils erreichbaren Genauigkeiten der Bahnführung werden im Rahmen dieses Kapitels vorgestellt.

An Handhabungsgeräte für die Lasermaterialbearbeitung werden hohe Anforderungen gestellt. Sie müssen schnelle Bearbeitungsgeschwindigkeiten bei gleichzeitig hohen Anforderungen an die Genauigkeit ermöglichen. Neben der Erzeugung einer Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug ist gleichzeitig der Laserstrahl in geeigneter Form an das Bauteil zu führen.

Die möglichen Handhabungskonzepte werden entsprechend Bild 2.6 sowohl nach der Anordnung der Achsen als auch nach den bewegten Komponenten gegliedert (STEEN 1991). Es wird zwischen den aus linearen Achsen zusammengesetzten kartesischen Systemen und Geräten mit rotatorischen Achsen in Kniackarmkinematik unterschieden. Die erforderliche Relativbewegung zwischen Laser und Bauteil wird entweder durch Bewegung der Strahlquelle, des Werkstücks, der Optik oder durch kombinierte Hybridlösungen erzeugt (SCHRAFT U.A. 1988, ULLRICH 1987). Bei bewegten Optiken sind Komponenten zur Strahlfüh-

nung erforderlich. Hier wird zwischen interner und externer Strahlführung unterschieden (GARNICH 1992).

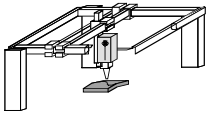
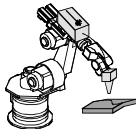
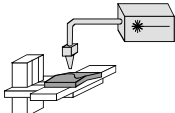
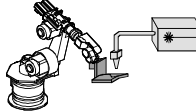
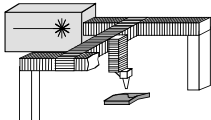
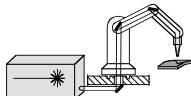
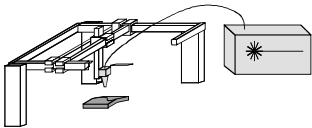
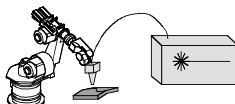
	Kartesisch	Rotatorisch
bewegte Strahlquelle		
bewegtes Werkstück		
bewegte Optik interne Strahlführung		
bewegte Optik externe Strahlführung		

Bild 2.6 Gliederung der Handhabungsgeräte

Aufgrund der hohen Masse der Strahlquelle gibt es derzeit keine Anwendungen mit bewegten Strahlquellen. Dieser Ansatz wird erst mit der Verbreitung von Diodenlaserquellen, die einen wesentlich kompakteren Aufbau aufweisen, industrielle Relevanz erlangen. Lösungen mit bewegtem Werkstück werden hauptsächlich bei zweidimensionalen Nahtgeometrien eingesetzt, wie beispielsweise bei rotationssymmetrischen Schweißungen oder beim Schließen von Rohren. Für komplexe dreidimensionale Geometrien ist die Führung des Laserstrahls über eine bewegliche Optik an das Bauteil üblich. Hierfür kommen entweder Systeme aus Spiegeln oder bei Nd:YAG-Lasern Lichtleitfasern zum Einsatz.

Alternative kinematische Konzepte für die Lasermaterialbearbeitung sind Portal- oder Knickarmroboter. Beide sollen im folgenden näher vorgestellt werden.

2.1.2.1 Portalanlagen

Portalanlagen sind die derzeit am weitesten verbreiteten Handhabungsgeräte für die Lasermaterialbearbeitung. Sie bestehen aus drei rechtwinklig zueinander angeordneten Grundachsen und zwei bis drei Handachsen. Aufgrund der Rotations-symmetrie des Laserstrahls sind auch für dreidimensionale Anwendungen Fünf-achsenanlagen in vielen Fällen ausreichend. Eine sechste Achse dient als Redun-danz oder zur Einstellung der Orientierung des Bearbeitungskopfes, falls nicht-koaxiale Komponenten wie vorlaufende Sensorik, Gas- oder Zusatzdrahtzufuhr erforderlich sind.

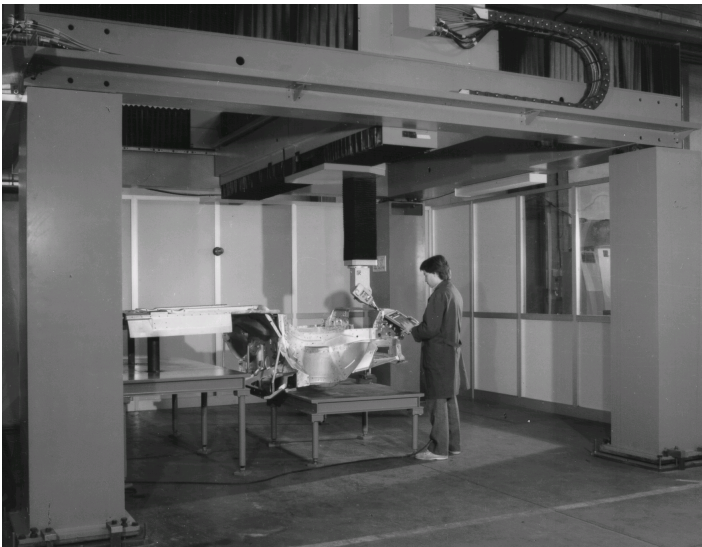


Bild 2.7 Laserportal

Die Strahlführung erfolgt bei den sogenannten Laserportalen (Bild 2.7) durch interne Strahlführung innerhalb der Achsen (HELD & GILLNER 1992). Hierbei handelt es sich um speziell für die Lasermaterialbearbeitung angepaßte Konstruktionen. Die Kombination einer Portalanlage mit externer Strahlführung (BEYER U.A. 1993) ist nur in Ausnahmefällen anzutreffen. Alternativ ist es möglich, den Laser als zusätzliches Werkzeug in eine konventionelle Werkzeugmaschine zu integrieren (FERTIGUNG 1994). Dieser Ansatz wird bisher nur mit ei-

nem Laserstrahl als Energiequelle für die Warmbearbeitung schwer zerspanbarer Werkstoffe eingesetzt.

Die Vorteile von Laserportalen liegen in der hohen Bahngenaugigkeit, dem großen Arbeitsraum und der kompakten Bauweise der Strahlführung. Dem gegenüber stehen Nachteile durch den großen Raumbedarf, die hohen Anschaffungskosten und die starke Veränderung der Strahlweglänge im Arbeitsraum. Letzteres hat eine Veränderung der Strahlqualität und Verschiebung der Fokusslage zur Folge.

2.1.2.2 Knickarmroboter

Der zweite Ansatz für die Handhabung einer Strahlführung ist die Verwendung von Knickarmkinematiken. Auch hier werden spezielle Laserroboter mit interner oder externer Strahlführung entwickelt (CUCCHI u.A. 1991, DELBOSCO 1992, AKINKUOYE 1987). Diese konnten sich jedoch nicht am Markt durchsetzen. Der Grund hierfür waren die sehr hohen Anschaffungskosten, die durch die aufwendige Integration der Spiegel in die Rotationsachsen verursacht werden.

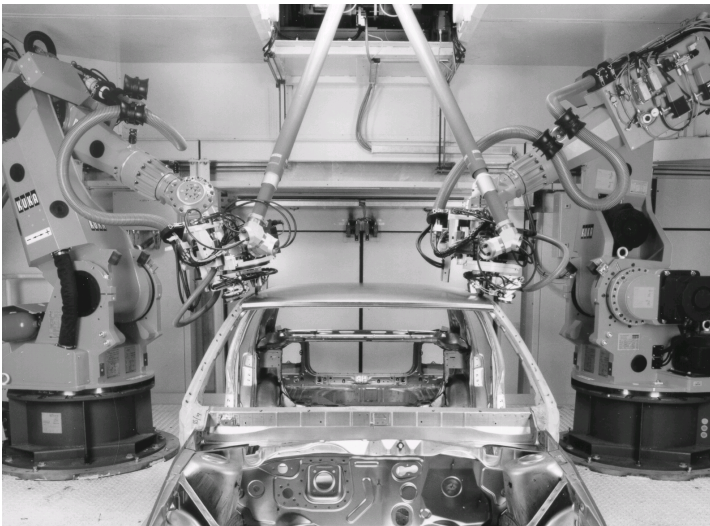


Bild 2.8 Knickarmroboter mit Strahlführungssystemen

2 Grundlagen und Definitionen

Die Verwendung von Standardindustrierobotern zur Lasermaterialbearbeitung findet aufgrund der geringen Investitionskosten zunehmend Verbreitung. Die Übertragung der Laserstrahlleistung an die Bearbeitungsstelle erfolgt in diesem Fall entweder bei CO₂-Lasern über Spiegel in sogenannten Strahlführungssystemen (Bild 2.8) oder bei Nd:YAG-Lasern mit Hilfe einer Lichtleitfaser (Bild 2.9). Das Einkoppeln von CO₂-Laserstrahlung in Fasern ist aufgrund der höheren Leistungen und der großen Wellenlänge derzeit nicht möglich.

Insbesondere in Verbindung mit dem Nd:YAG-Laser weist der Einsatz von Standardknickarmrobotern großes Potential auf. Die Vorteile dieser Anlagen liegen in den deutlich geringeren Anschaffungskosten, dem günstigen Verhältnis von Arbeitsraum zu erforderlicher Stellfläche und der leichten Integrierbarkeit in bestehende Fertigungslinien (RIPPL 1997). Zudem ist die Innenbearbeitung von Strukturen wie beispielsweise einer PKW-Karosserie möglich.

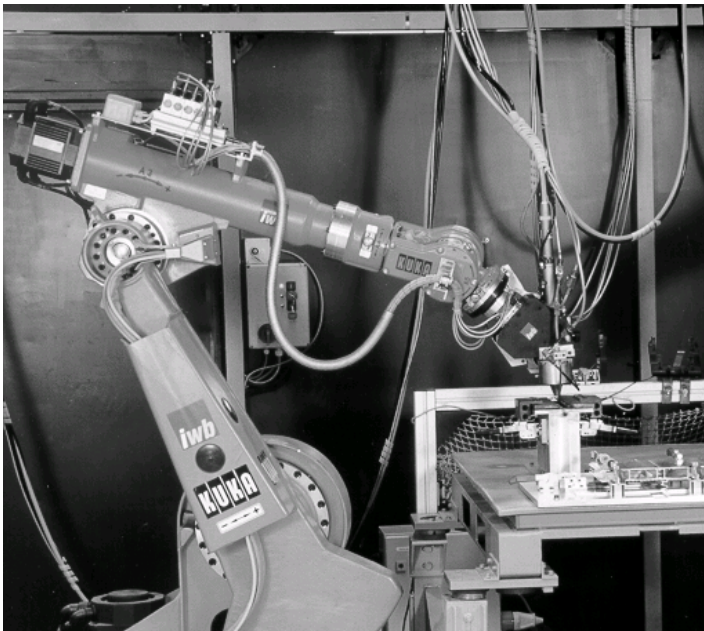


Bild 2.9 Roboter mit Lichtleitfaser

2.1.3 Meß- und Regelvorrichtungen

Unter Meß- und Regelvorrichtungen werden im Rahmen dieser Arbeit Sensorsysteme verstanden. Die verwendeten Definitionen und die grundsätzlichen Möglichkeiten des Sensoreinsatzes beim Laserstrahlschweißen werden im folgenden vorgestellt.

2.1.3.1 Begriffsbestimmung

Das Wort **Sensor** stammt aus dem Lateinischen und kann mit „Fühler“ übersetzt werden. Technisch wird diesem Begriff auch das „Erfassen“ und „Messen“ zugeordnet. Neben den Aufgaben einer klassischen Meßkette nach VDE/VDI 2600 spielt bei intelligenten Sensorsystemen auch die Informationsverarbeitung und Entscheidung eine wichtige Rolle (DRUNK & HILD 1990). Moderne Sensorsysteme zeichnen sich dadurch aus, daß das Ergebnis der Messung nicht mehr durch einen einzigen Meßwert beschreibbar ist. Vielmehr führt erst die Verknüpfung mehrerer physikalischer Meßgrößen in einem komplexen Erkennungssystem zu einem Ergebnis (WAGNER 1990). Im Rahmen dieser Arbeit soll unter dem Begriff **Sensorsystem** ein komplexes, intelligentes Erkennungssystem entsprechend Bild 2.10 mit einer oder mehrerer Eingangsgrößen verstanden werden.

Nach NAYAK & RAY (1993) werden Sensorsysteme als **intelligent** bezeichnet, wenn sie eine Anpassung an die Veränderung der Umgebung erlauben. **Adaptive** Sensorsysteme erlauben hiernach zudem, nicht programmierten Bahnen zu folgen. Ein wichtiges Kriterium dabei ist die **Echtzeitfähigkeit**, welche die Eigenschaft des Systems beschreibt, bei der gegebenen Bahngeschwindigkeit die erforderliche Bahnengenauigkeit einzuhalten (NAYAK & RAY 1993). Abweichend von der oben verwendeten Definition wird im Rahmen dieser Arbeit unter **adaptivem Schweißen** die Anpassung von Schweißparametern an die Geometrie der Fügezone und nicht nur die sensorgeführte Bahngenerierung verstanden (PISCHETSRIEDER U.A. 1995).

Zur Einteilung der Sensorsysteme zur Korrektur der Fokusposition wird nach internen und externen Sensoren unterschieden (NIEPOLD 1983). Unter internen Sensoren werden prozeßorientierte Systeme verstanden, die über Betrachtung des Schweißprozesses und der Prozeßparameter Rückschlüsse auf die Fokuslage erlauben. Im Gegensatz dazu sind externe geometrieorientierte prozeßunabhängige Sensoren physikalisch und räumlich getrennt von der Schweißstelle meist vorlau-

2 Grundlagen und Definitionen

fend angebracht, um die Geometrie und Lage der Schweißstelle zu vermessen (CHANDONI & OSTER 1990, UTNER 1990).

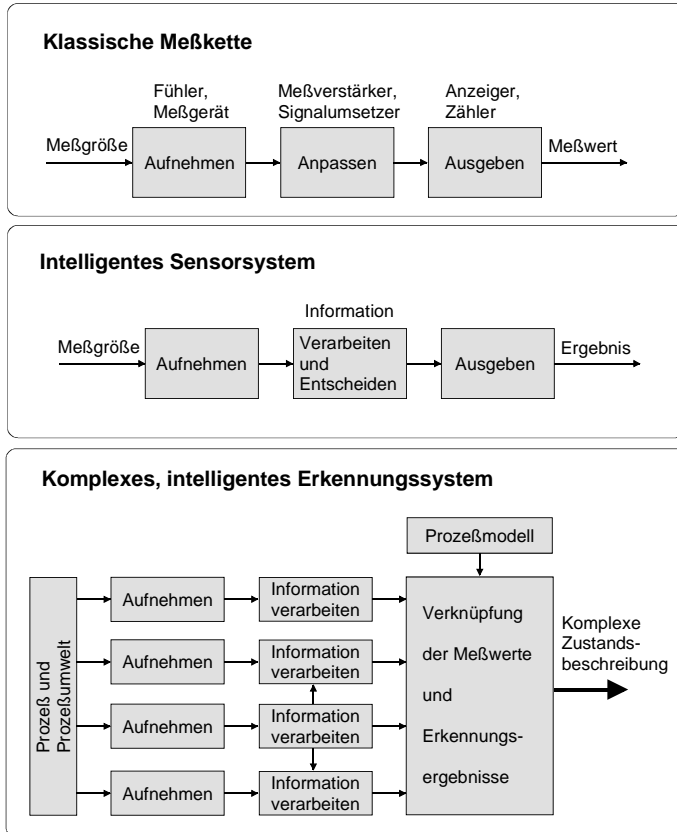


Bild 2.10 Begriffe der Sensortechnik (WAGNER 1990)

In der vorliegenden Arbeit werden prozeßorientierte Systeme vereinfacht als **Prozeßsensoren**, geometrieorientierte Systeme als **Nahtfootensoren** bezeichnet.

2.1.3.2 Prozeßsensorik

Prozeßsensoren erlauben keine direkte Messung der aktuellen Position des Laserfokus. Vielmehr sollen durch Beobachtung des Schweißprozesses Rückschlüsse auf Prozeßparameter wie die Fokuslage gezogen werden. Vorteile ergeben sich bei Einsatz dieser Verfahren dadurch, daß sie konkrete Aussagen über das Bearbeitungsergebnis und eventuelle Fehler zulassen.

Die Beeinflussung der Bearbeitungsbahn und weiterer Prozeßparameter durch Beobachtung von Prozeßgrößen wird auch als Prozeßregelung bezeichnet (CHRYSSOLOURIS 1991). Die für eine Prozeßregelung relevanten Größen sind in Bild 2.11 zusammengefaßt.

Als **Stellgrößen** werden dabei alle Kenngrößen bezeichnet, durch deren Variation der Bearbeitungsprozeß beeinflußt wird, wie die Laserstrahlleistung oder die Vorschubgeschwindigkeit. Im Gegensatz dazu sind **Systemgrößen** in Echtzeit nicht veränderbare Kenngrößen, die durch die Anlagenkonfiguration vorgegeben sind wie beispielsweise die Intensitätsverteilung im Fokus. Um eine Veränderung der Stell- und Systemgrößen durch **Störgrößen** zu erkennen, werden die den Bearbeitungsprozeß charakterisierenden Kenngrößen, die sogenannten **Meßgrößen**, wie die reale Laserleistung vor dem Werkstück, überwacht (VDI 1990). Entsprechende Regelungsstrategien der Stellgrößen im Rahmen einer **Parameterregelung** wurden für Leistung und Kaustik einer CO₂-Laserstrahlquelle sowohl von DEINZER U.A. (1994) als auch von KAUF (1997) erarbeitet.

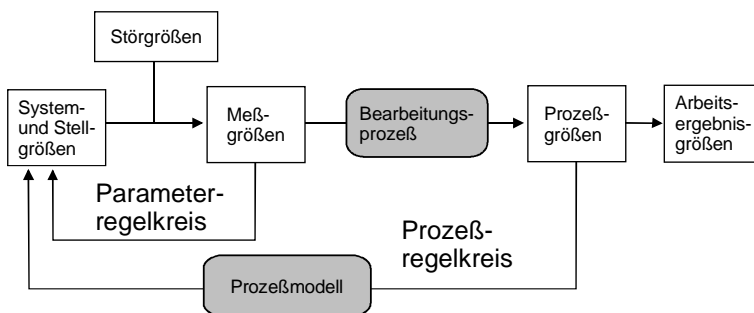


Bild 2.11 Begriffe und Prinzip der Prozeßregelung

Unter **Prozeßgrößen** werden die Kenngrößen verstanden, die während des **Bearbeitungsprozesses** aufgenommen werden können, und die direkt oder indirekt

2 Grundlagen und Definitionen

das Prozeßergebnis beschreiben. Die **Arbeitsergebnisgrößen** schließlich sind die technologischen Ausgangsgrößen des Prozesses, die eine Bewertung der Qualität der Bearbeitung ermöglichen, wie die Einschweißtiefe (OVERMEYER 1996).

Um im Rahmen einer **Prozeßregelung** die Stellgrößen basierend auf einer Messung der Prozeßgrößen im Sinne einer Optimierung der Arbeitsergebnisgrößen zu beeinflussen, ist ein Prozeßmodell, das die Zusammenhänge zwischen Arbeitsergebnisgrößen und Prozeßgrößen beschreibt, erforderlich. Da ein derartiges Prozeßmodell derzeit noch nicht in der erforderlichen Detaillierung zur Verfügung steht, wird auf experimentell ermittelte empirische Zusammenhänge zurückgegriffen.

2.1.3.3 Nahtfolgesensorik

Unter Nahtfolgesystemen werden intelligente Sensorsysteme verstanden, die Bauteilkonturen sensorisch erkennen und vermessen und daraus Informationen über die Lage und Geometrie der Naht in einer Form erarbeiten, die zur Korrektur der Position des Werkzeugs mit dem Ziel der Anpassung an die reale Bauteilgeometrie genutzt wird (KÖLBL 1991, NITSCH & KAIERLE 1994, TRUNZER U.A. 1993, UTNER 1990).

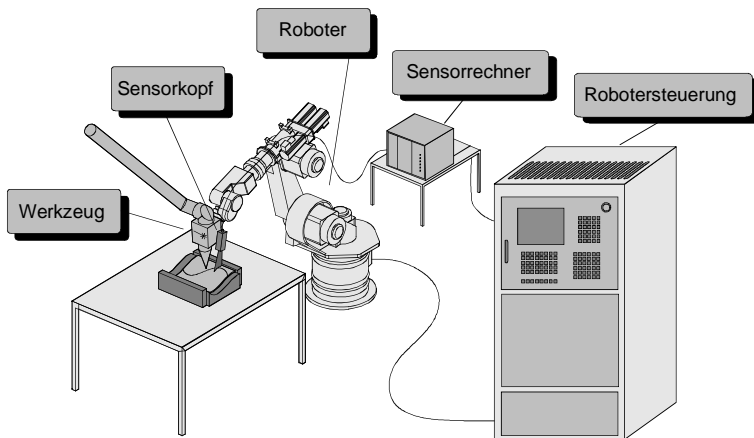


Bild 2.12 Komponenten der Bahnbearbeitung mit Nahtfolgesensoren

Systeme zur sensorgeführten Bahnbewegung mit Robotern bestehen im wesentlichen aus fünf Komponenten (Bild 2.12). Im **Sensorkopf** werden die Eingangsgrößen, welche die Informationen zu Lage und Geometrie der Fügekante enthalten, erfaßt. Der **Sensorrechner** verarbeitet die Signale des Sensorkopfes in geeigneter Form, und übergibt Korrekturwerte an die **Robotersteuerung**. In dieser werden die Signale weiterverarbeitet und die Bewegung des **Roboterarms** ausgelöst. Das **Werkzeug** schließlich führt die eigentliche Bearbeitungsaufgabe durch (TRUNZER 1996, S. 10).

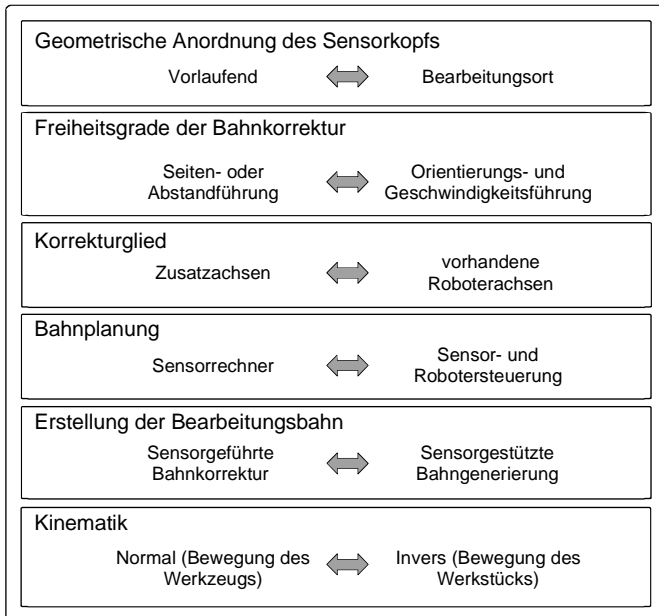


Bild 2.13 Überblick über die Prinzipien der Sensorführung

Nahtfolgesysteme existieren in vielfältigen Ausführungen unterschiedlicher technischer Fähigkeiten und Komplexität. Dabei kann nach verschiedenen Kriterien unterschieden werden (Bild 2.13). Bezüglich der geometrischen Zuordnung von Sensorkopf und Werkzeug wird zwischen Messung an der Bearbeitungsstelle und vorlaufender Anordnung unterschieden (FELDMANN U.A. 1994, SCHMID U.A. 1992). Ein weiteres Merkmal ist die Anzahl der vermessenen Freiheitsgrade. Diese variieren zwischen einem bei der reinen Abstands- oder Seitenführung und

2 Grundlagen und Definitionen

bis zu sechs bei komplexen dreidimensional korrigierenden Systemen mit zusätzlicher Orientierungs- und Geschwindigkeitsführung (HORN 1994, SCHWARZ U.A. 1991, VENKATESAN & ARCHIBALD 1990, ZELLER 1995). Die Korrektur der Bearbeitungsbahn erfolgt entweder mit Hilfe externer Zusatzachsen oder durch eine Beeinflussung der Bewegung des Roboters (COSTE U.A. 1998, NITSCH & KAIERLE 1994).

Zur Integration der Korrekturdaten in die Bahnplanung werden je nach Möglichkeiten der Schnittstelle und Rechnerleistung von Roboter- und Sensorsteuerung zwei unterschiedliche Konzepte verfolgt. Im ersten Ansatz wird vom Sensorrechner der Korrekturvektor in raumfesten Koordinaten bestimmt, der von der Robotersteuerung in Achskoordinaten umgerechnet und als Bewegung umgesetzt wird. Bei Robotersteuerungen, die nicht über ausreichend schnelle Schnittstellen und Rechenleistung verfügen, wird die vollständige Bahnplanung im Sensorrechner, in dem auch die Roboterkinematik abgebildet ist, durchgeführt. Dazu wird zyklisch die aktuelle Position des Roboters abgefragt und basierend auf den Sensormesswerten die Bewegungsbahn berechnet. Diese wird in Achskoordinaten direkt an die Lageregler des Roboters übergeben (BECKMANN 1989, TRUNZER 1996A, S. 53-54).

In der höchsten Entwicklungsstufe mit Vermessung der Bauteilkontur in sechs Freiheitsgraden und robotergestützter Bewegung werden die Systeme auch zur Generierung der Bearbeitungsbahn eingesetzt, so daß in der Robotersteuerung lediglich der Nahtanfang programmiert werden muß.

Neben der in Bild 2.12 dargestellten Anordnung, bei der der Sensor das Werkzeug über ein feststehendes Bauteil führt, wurden Lösungen in inverser Kinematik erarbeitet. Hier wird das Bauteil sensorgeführt unter einem räumlich fest angeordneten Laserstrahl hindurch bewegt (REINHART U.A. 1994).

Weiterhin unterscheiden sich die verschiedenen Konzepte in der erreichbaren Bahngeschwindigkeit und Genauigkeit. Diese ist neben der Rechenleistung der Sensorsteuerung maßgeblich durch das zum Einsatz kommende Meßprinzip bestimmt.

2.1.4 Analyse der Werkstücke

Die Anforderungen des Laserstrahlschweißens an die Fokuspositionierung hängen stark von der Geometrie des zu verschweißenden Stoßes ab. Daher werden hier die für das Laserstrahlschweißen relevanten Nahtarten vorgestellt.

In der Schweißtechnik sind verschiedene Möglichkeiten bekannt, um Schweißteile zu einer Schweißgruppe zu verbinden. Klassifiziert werden die Nähte dabei über Stoß- und Nahtart (DIN 1912, TEIL 1). Die Stoßart beschreibt die konstruktive Anordnung der Teile zueinander, während die Nahtart die Form der fertigen Schweißnaht beschreibt. Die für das Laserstrahlschweißen bedeutendsten Stoß- und Nahtarten sind in Bild 2.14 tabellarisch zusammengefaßt.


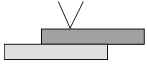

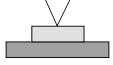

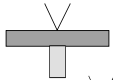


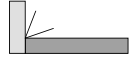
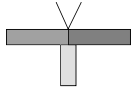
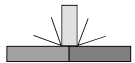
Nahtformen Stoßformen	I-Naht	Kehlnaht
Stumpfstoß		
Überlappstoß		
Parallelstoß		
T-Stoß		
Eckstoß		
Mehrfachstoß		

Bild 2.14 Stoß- und Nahtarten nach DIN 1912, Teil 1

Aus Sicht der Fokuspositionierung eines Laserschweißprozesses ist lediglich die Geometrie in unmittelbarer Nähe der Fügestelle von Bedeutung. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit die verschiedenen Nahtarten zusammengefaßt und

die Stoßarten Überlappstoß, Stumpfstoß und T-Stoß allgemein als Vertreter ihrer Klasse betrachtet (SCHULTZ 1997, S. 25-32).

2.2 Machbarkeitsprüfung der robotergestützten Bahnbe- arbeitung

2.2.1 Machbarkeitskriterium

Um die Machbarkeit einer Anwendung zum robotergestützten Laserschweißen zu prüfen, müssen die auftretenden Abweichungen in der Bahnführung des Roboters und der Lage der Fügestelle mit den vom Prozeß zugelassenen Toleranzen verglichen werden. WAHL U.A. (1989) postulieren, daß „die von der jeweiligen Schweißgeometrie zugelassene maximale Fehlpositionierung zwischen Laserstrahl und Fügestelle, abzüglich der maximalen Abweichung der Ist-Bahnen der verwendeten Roboteranlage von der vorgesehenen Sollbahn größer oder gleich der maximalen Abweichung der Ist-Lagen der Fügestellen an den Werkstücken von ihren Soll-Lagen im Raum sein muß.“ Dies läßt sich formal als

$$\Delta\text{Proze\ss} - \Delta\text{Roboter} \geq \Delta\text{Fügestelle} \quad (2.3)$$

darstellen.

Somit sind im folgenden die zulässigen Abweichungen der Nahtformen **$\Delta\text{Proze\ss}$** , das Bahnverhalten des Roboters **$\Delta\text{Roboter}$** , sowie die mit dem Laser zu fügenden Bauteile in bezug auf die Genauigkeit der Lage der Fügestelle **$\Delta\text{Fügestelle}$** zu untersuchen.

2.2.2 Zulässige Abweichungen der Nahtformen

Die Bearbeitungsoptik kann aufgrund der Bauteiltoleranzen und Fehler in der Handhabungstechnik nicht immer am definierten Arbeitspunkt gehalten werden. Daher treten Abweichungen in der Position des Laserfokus **$\Delta\text{Proze\ss}$** auf. Die Beschreibung dieser Abweichungen ist in Bild 2.15 am Beispiel einiger wichtiger Nahtformen zusammengefaßt.

Verschiebungen der Nahtlage können sowohl in Strahlrichtung die Fokusslage Δz als auch senkrecht dazu den Auftreffpunkt Δx beeinflussen. Fehler in der Stoß-

2.2 Machbarkeitsprüfung der robotergestützten Bahnbearbeitung

form können sowohl das Auftreten eines Fügespalt h_s als auch bei Stumpfstoßen ein Bauteilversatz h_v sein.

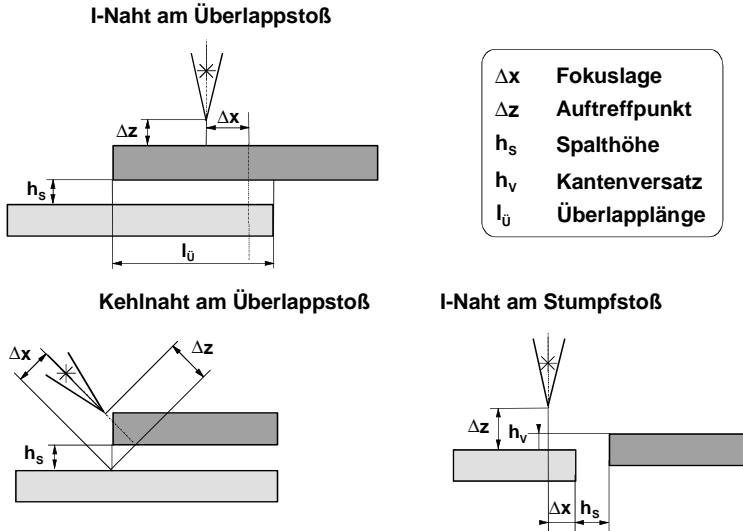


Bild 2.15 Definition der Abweichungen von Nahtlage und -form

Die verschiedenen Nahtformen weisen unterschiedliche Prozeßfenster bezüglich der zulässigen Abweichungen von Ideallage und Idealform auf. In Bild 2.16 sind Größenordnungen der zulässigen Abweichungen für das Laserstrahlschweißen von Stahlwerkstoffen angegeben. Diese können aufgrund der Vielzahl der zum Einsatz kommenden Strahlquellen und Werkstoffe lediglich als Anhaltspunkt dienen. Für Leichtbauwerkstoffe wie Aluminium oder Magnesium, die höhere Anforderungen an die Schweißtechnik stellen, gelten geringere Werte. Für eine Beurteilung der mit bahngesteuerter Handhabungstechnik erreichbaren Genauigkeiten ist diese allgemeine Betrachtung jedoch ausreichend.

Der zulässige Bereich der Fokuslage ist unabhängig von der verwendeten Nahtform und hat eine Ausdehnung Δz von 0,25 bis 0,6 mm (HUANG U.A. 1992). Für den aktuellen Wert ist bei gegebener Strahlqualität die Brennweite der verwendeten Optik und somit die Tiefenschärfe des Laserstrahls verantwortlich. Bezüglich des Auftreffpunkts weist die I-Naht am Überlappstoß die geringsten Anforderungen auf. Hier wird die Position durch die Größe des Überlappbereichs $l_{\bar{u}}$ oder eventuelle Kollisionen mit Bauteil oder Spanntechnik bestimmt. Bei der

2 Grundlagen und Definitionen

Kehlnaht am Überlappstoß und I-Naht am Stumpfstoß ist der Strahl so zu positionieren, daß der fokussierte Laserstrahl stets beide Bauteile berührt. Nur so kann gewährleistet werden, daß sich der aufgeschmolzene Bereich über beide Stoßpartner erstreckt und somit eine Verbindung der Bauteile gewährleistet. Dadurch ergibt sich eine zulässige Abweichung Δx in der Größenordnung des Strahlradius (SCHULTZ 1997, S. 26).


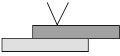

Nahtformen Abweichungen	I-Naht am Stumpfstoß 	I-Naht am Überlappstoß 	Kehlnaht am Überlappstoß 
Fokusslage Δz	0,25-0,6 mm	0,25-0,6 mm	0,25-0,6 mm
Auftreffpunkt Δx	0,5 $D_{o,u}$	$\sim l_0$	0,5 $D_{o,u}$
Fügespalt h_s	0,1-0,25 t oder < 0,2mm	0,05-0,1 t oder < 0,15mm	0,4 t
Kantenversatz h_v	0,1-0,3 t		
l_0 : Überlapplänge $D_{o,u}$: Fokussdurchmesser t: Blechdicke			

Bild 2.16 Zulässige Toleranzen in Nahtlage und -form

Ein Fügespalt zwischen den Bauteilen führt zu fehlendem Material im Schmelzgut, falls wie hier zunächst angenommen ohne Zusatzwerkstoff gearbeitet wird. Dies hat einen mit wachsender Spaltbreite zunehmenden Nahteneinfall und damit eine Verringerung des tragenden Querschnitts und das Auftreten einer Kerbwirkung zur Folge. Der Nahteneinfall und somit die zulässige Spalthöhe sind bei allen Nahtformen proportional zur Blechdicke t (JOKINEN U.A. 1998, MAZUMDER 1983, TREIBER 1990, S. 147). Bei größeren Blechdicken darf zudem eine absolute Obergrenze des Fügespalt nicht überschritten werden.

Oberhalb dieses Wertes ist die Verbindung der Bauteile nicht mehr gewährleistet. Bei Stumpfstoßen tritt in diesem Fall der Laserstrahl durch den Fügespalt hindurch ohne die Bauteile aufzuschmelzen. Bei großen Spalthöhen bei Überlapp-

stößen wurde beobachtet, daß bedingt durch die Oberflächenspannung der Schmelze Ober- und Unterblech aufgeschmolzen werden, ohne daß eine Verbindung zwischen den Fügepartnern entsteht. Dies ist besonders kritisch, da ein derartiger Fehler optisch nicht erkennbar ist (SCHULTZ 1997, S. 113-122).

Bei Stumpfstößen stellt ein Versatz zwischen den Fügepartnern einen weiteren möglichen Fehler in der Positionierung der Bauteile zueinander dar. Ein Bauteilversatz hat wiederum eine Verringerung des tragenden Querschnitts und somit der Festigkeit der Schweißgruppe zur Folge. Ein weiterer Faktor ist die Verschlechterung des Kraftflusses durch die Schweißnaht. SALMINEN & MOISIO (1991) geben einen zulässigen Bauteilversatz zwischen 0,1 und 0,3 t an.

Neben den oben genannten Anforderungen an die relative Positionierung des Laserfokus zum Bauteil muß die Position des Bauteils und des Bearbeitungskopfes bezogen auf die Umgebung berücksichtigt werden. Grenzen bilden der Arbeitsraum des Roboters oder des Strahlführungssystems sowie Kollisionen mit nahtfernen Teilen des Bauteils oder mit der Spanntechnik. Hier können keine allgemein gültigen Werte angegeben werden, da diese sehr stark durch die Konfiguration der aktuellen Anwendung bestimmt werden.

2.2.3 Genauigkeit der Handhabungstechnik

Bei Beurteilung des zum Einsatz kommenden Handhabungsgeräts ist im Hinblick auf die Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen in erster Linie die Genauigkeit $\Delta\text{Roboter}$ entscheidend. Dabei sind verschiedene Kenngrößen zu berücksichtigen (Bild 2.17). Diese werden vergleichend für Laserportale und Standardknickarmroboter analysiert.

Unter der **Positionier- oder Absolutgenauigkeit** wird die Übereinstimmung zwischen der aktuellen Position der Roboterhand und der rechnerisch aus den in der Steuerung abgelegten Achswerten errechneten Position verstanden. Die **Bahngenauigkeit** beschreibt die Güte der Einhaltung einer vorgegebenen Bahn aus Stützpunkten, die mit linear oder kreisförmig interpolierten Bewegungen verbunden sind. Die **Wiederholgenauigkeit** betrachtet die Abweichungen bei mehrfachem Abfahren von identisch programmierten Bahnen oder Punkten.

Die Absolutgenauigkeit ist insbesondere für die Programmierung des Handhabungsgeräts mit Hilfe von CAD-Daten von Bedeutung. Die Abweichungen können hier die Größenordnung von einigen Millimetern erreichen. Bei der Bewer-

2 Grundlagen und Definitionen

tung einer Schweißbahn durch direkte Programmierung (Teach-In) an der Anlage sind lediglich die Bahn- und Wiederholgenauigkeit von Bedeutung.

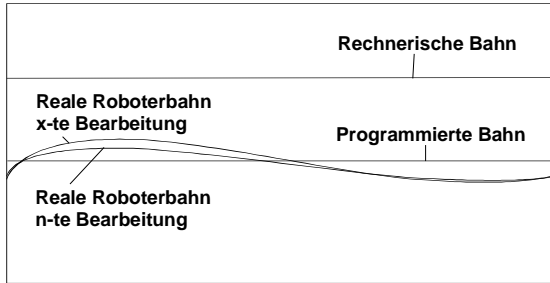


Bild 2.17 Kenngrößen der Robotergenauigkeit

Zur Ermittlung der Bahngenauigkeit an kartesischen und Knickarmkinematiken wurden Untersuchungen am Konturelement Kreis nach DIN 32517, TEIL 3 (1995) durchgeführt, bei denen die Kreisbahnabweichung t_k (Bild 2.18) ermittelt wurde. Untersuchungen an einem Laserportalroboter der Firma Trumpf ergaben Kreisformabweichungen unter 0,15 mm über einen Geschwindigkeitsbereich von 2 bis 5 m/min (HOFFMANN 1992). Im Vergleich dazu liegen typische Kreisbahnabweichungen für einen Knickarmroboter bei 0,5 bis 1,2 mm bei einem vergleichbaren Geschwindigkeitsbereich (GARNICH 1992).

Durch zusätzliche regelungstechnische Maßnahmen in den Robotergetrieben ist es PRITSCHOW U.A. (1992B) gelungen die Kreisbahnabweichung auch für Knickarmroboter auf 0,15 mm zu reduzieren. Am Markt erhältliche Geräte sind jedoch ausschließlich mit konventionellen Steuerungen ausgerüstet und erreichen eine entsprechend geringere Genauigkeit. Die Wiederholgenauigkeit liegt in allen Fällen unter 0,1 mm. In Bild 2.19 sind die erreichten Werte für die Bahngenauigkeit (Kreisbahnabweichung) und Wiederholgenauigkeit der Kinematikkonzepte angegeben.

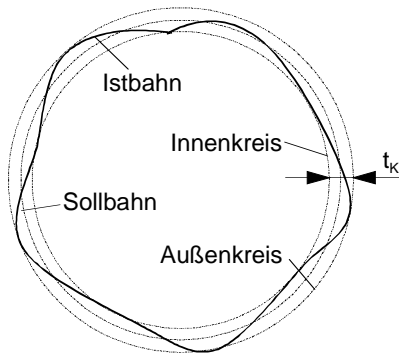


Bild 2.18 Definition der Kreisformabweichung (DIN 32517, TEIL 3)

Am Beispiel von Linearbahnen wurde durch WAHL U.A. (1989) nachgewiesen, daß durch eine Vergrößerung der Anzahl der Stützstellen eine Verminderung der Bahnabweichungen, in diesem Fall von 0,7 auf 0,1 mm, erreicht werden kann. Insbesondere die Einflüsse der Reversierstellen von Einzelachsen können so gesenkt werden.

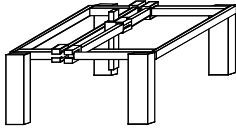
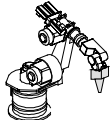
	Portal	Knickarm
		
Bahngenauigkeit	< 0,15 mm	0,4-1,2 mm
Wiederholgenauigkeit	< 0,03 mm	0,02-0,1 mm

Bild 2.19 Typische Kreisbahnabweichungen von Robotern

Ein weiterer Ansatz für eine höhere Bahngenauigkeit in für die Bearbeitung relevanten Bereichen ist ein gezieltes Versetzen der programmierten Bahnpunkte. Das Prinzip ist in Bild 2.20 am Beispiel einer geraden Schweißnaht dargestellt. Diese Art der Programmierung ist jedoch nur in Einzelfällen einsetzbar und sehr

2 Grundlagen und Definitionen

aufwendig, da das Bahnverhalten des Roboters an der konkreten Bearbeitungsstelle bekannt sein muß.

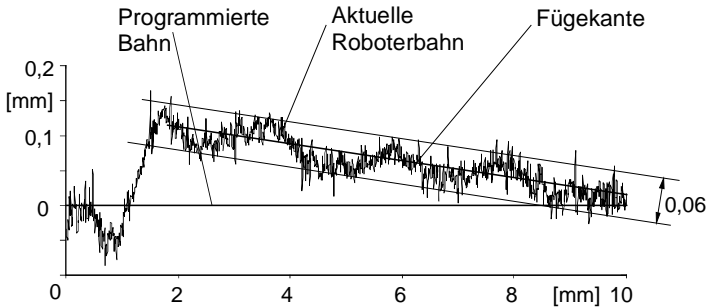


Bild 2.20 Verbesserung der Führungsgenauigkeit am Beispiel einer geraden Naht

Die Ursache für die geringeren Bahngenauigkeiten bei Knickarmrobotern sind in der Kinematik, der Mechanik und der Dynamik zu finden (PRITSCHOW U.A. 1992B). Fehler in der Kinematik führen zu einer Abweichung zwischen dem realen Aufbau des Roboters und dem der Rücktransformation zugrunde liegenden Kinematikmodell. Hier sind insbesondere Fehler bei den Achsabständen, sowie eine nicht exakte Ausrichtung der Achsen zueinander zu nennen. Bei der Betrachtung der Roboterdynamik sind die Schleppabstände der einzelnen Achsen zu beachten. Sie führen zu Bahnungenauigkeiten, die mit wachsender Geschwindigkeit zunehmen.

Unter den mechanischen Abweichungen sind Achsverformungen gegenüber Getriebefehlern vernachlässigbar. Getriebefehler entstehen durch Spiel, Umkehrspannen oder Winkelübertragungsfehler. Sie bilden die Hauptursache für Bahnabweichungen. Erst bei hohen Geschwindigkeiten erreichen Schleppfehler die gleiche Größenordnung. Bei langem Roboterbetrieb können zusätzliche Abweichungen durch Veränderungen am Handhabungsgerät auftreten (REINHART U.A.1998, ZELLER 1995). Ursachen sind sowohl Verschleiß von mechanischen Bauteilen als auch thermische und mechanische Verformung im Betrieb. Die Ursachen für Roboterabweichungen sind in Bild 2.21 zusammengefaßt.

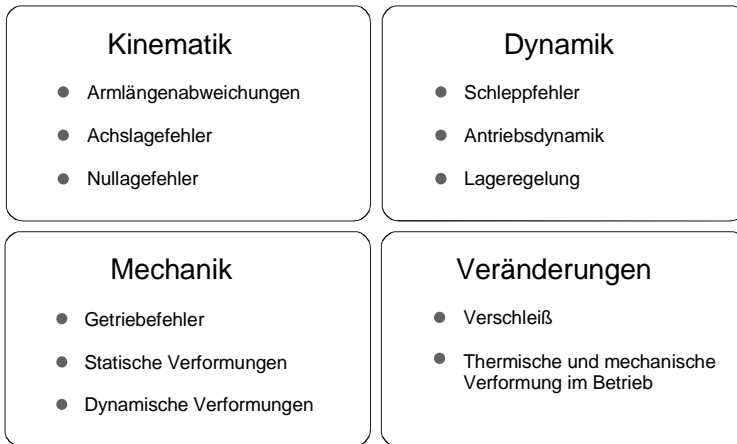


Bild 2.21 Ursachen von Bahnfehlern

Bei Portalrobotern spielen lediglich die thermischen Einflüsse aufgrund von Temperaturschwankungen in der Umgebung eine Rolle. Diese können jedoch leicht durch Nullpunktkorrekturen in definierten Zeitabständen korrigiert werden. Statisch bedingte Verformungen eines Portals können vernachlässigt werden, wie STETTNER (1994) in umfangreichen Untersuchungen nachgewiesen hat. HELD & GILLNER (1992) bestätigen dies für den Spezialfall eines Laserportals mit integrierter Strahlführung.

In letzter Zeit kamen Handhabungsgeräte in Hybridkinematik wie Triceptroboter auf den Markt. Diese versprechen höhere Genauigkeiten zu den Kosten und der Aufstellfläche einer Knickarmkinematik.

2.2.4 Analyse der Bauteilabweichungen

Die Bauteilabweichungen Δ **Fügestelle** können eine Vielzahl von Ursachen haben (Bild 2.22). Dabei wird zwischen dynamischen und statischen Abweichungen unterschieden (ZHAO 1990, S.11-13). Unter dynamischen Abweichungen werden geometrische Veränderungen des Bahnverlaufs während des Bearbeitungsprozesses, beispielsweise durch Wärmedehnungen während des Schweißens, verstanden. Die statischen Abweichungen werden in globale und lokale Abweichungen unterteilt. Globale Abweichungen entstehen durch Lageabweichungen

2 Grundlagen und Definitionen

des Werkstücks. Diese werden zum Beispiel durch Spannfehler, bedingt durch mangelhafte Positionierung des Bauteils in der Vorrichtung oder am Bauteil haftende Späne, verursacht. Lokale Abweichungen werden in Form- und Maßtoleranzen aufgegliedert (ZELLER 1995, S. 11-13).

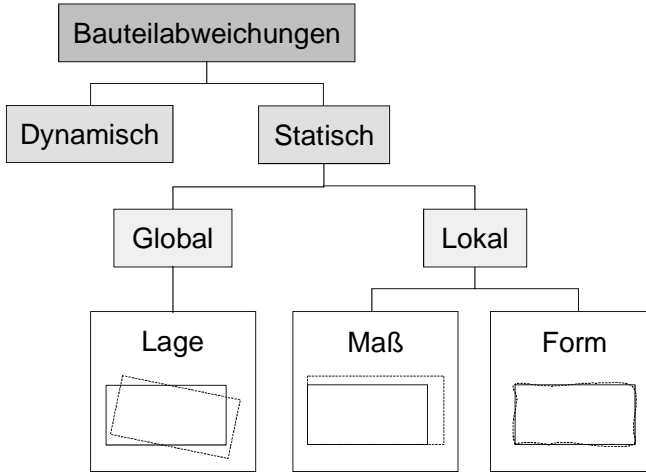


Bild 2.22 Bauteilabweichungen

Die Lage- und Maßabweichungen verursachen Fehler in der Position des Bauteils in Lage und Orientierung. Bei Verbindung mit einem Fügepartner entstehen zudem Formfehler der Stoßkante wie ein Bauteilversatz oder Fügespalte (WOLFF 1994).

Ein für die Lasermaterialbearbeitung relevantes Beispiel für Formtoleranzen sind die Abweichungen in der Lage des Blechrandes an tiefgezogenen Bauteilen, die im Bereich einiger Millimeter liegen. Diese werden durch die unvermeidbare Zipfelbildung am Blechflansch verursacht (KÖNIG & KLOCKE 1995). Maßtoleranzen sind insbesondere bei großflächigen ebenen Bauteilen von Bedeutung, die vor dem Fügevorgang zugeschnitten werden müssen. Beim Zuschnitt von Platten für den Schiffsbau in der Größenordnung einiger Meter werden lediglich Maßgenauigkeiten von etwa 3 Millimetern erreicht (SEYFFARTH 1992).

Dynamische Abweichungen sind von besonders großer Bedeutung bei Werkstoffen, die eine starke Wärmedehnung aufweisen. Beispielsweise kann der thermisch induzierte Bauteilverzug bei Aluminiumprofilen über eine Nahtlänge von

einem Meter eine Verschiebung in der Nahtlage von über einem Millimeter zur Folge haben.

2.2.5 Analyse des Machbarkeitskriteriums

Nimmt man den für eine durchschnittliche Laseranlage zum Laserstrahlschweißen typischen Fokusbereich von 0,5 mm an, ergibt sich für Kehlnähte und Stumpfstöße eine zugelassene maximale Fehlpositionierung in der Ebene von 0,25 mm (vgl. Bild 2.16). Die maximale Bahnabweichung der robotergeführten Bearbeitung beträgt bei entsprechender Programmierung etwa 0,2 mm. Bei Anwendung von Gleichung (2.2) ergibt sich, daß nur minimale Bauteilabweichungen von 0,05 mm zulässig sind. Dies ist jedoch, wie oben dargelegt, nicht immer gegeben. Es kann somit zusammenfassend festgestellt werden, daß in einer Vielzahl an Fällen eine fehlerfreie Bearbeitung nicht gewährleistet ist.

In diesen Fällen sind zusätzliche Komponenten, welche die aktuelle Lage der Fügestelle vermessen, erforderlich (SCHULTZ 1997, S. 127). In der Regel sind dies mehr oder weniger komplexe Sensorsysteme. Sie werden sowohl zur Bahnführung als auch zur Qualitätssicherung eingesetzt (HERZIGER 1990). Deren Analyse und Verbesserung wird den weiteren Inhalt der Arbeit bilden.

2.3 Die Methode der geplanten Versuche

Im Rahmen der Arbeit werden sowohl analytische als auch experimentelle Ansätze untersucht. Die dazu notwendigen Schweißversuche sollen nach der Methode der geplanten Versuche durchgeführt werden. Daher werden hier die dabei zum Einsatz kommenden Grundlagen der statistischen Versuchsplanung erläutert.

2.3.1 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung

Bei der Entwicklung eines neuen Fertigungsprozesses werden die erforderlichen Einstellungen der Maschinenparameter häufig über einen Einstelllauf ermittelt. Dabei werden die Parameter von einem erfahrenen Bediener so lange variiert, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt wird. Die Nachteile dieses nicht systematischen Vorgehens liegen in dem hohen, nicht vorhersehbaren Aufwand, der

2 Grundlagen und Definitionen

fehlenden Dokumentation, der Abhängigkeit der erzielten Produktqualität von der Fähigkeit des einzelnen Mitarbeiters und der mangelnden Berücksichtigung nicht offensichtlicher Einflußgrößen wie der Raumtemperatur.

Daher wurde die Methode der statistischen Versuchsplanung mit dem Ziel entwickelt, über ein systematisches Vorgehen die Dauer der Einstellphase zu reduzieren und das Ergebnis statistisch abzusichern. In Abhängigkeit von dem gewählten Versuchsplanungsverfahren können die Auswirkungen der Einflußgrößen rechnerisch ermittelt oder die Haupteinflußgrößen extrahiert werden (REINHART U.A. 1996, S. 130).

Zur Anwendung statistisch geplanter Untersuchungen wird die in Bild 2.23 dargestellte 3-phasige Vorgehensweise mit den Schritten Planung, Durchführung und Analyse empfohlen.

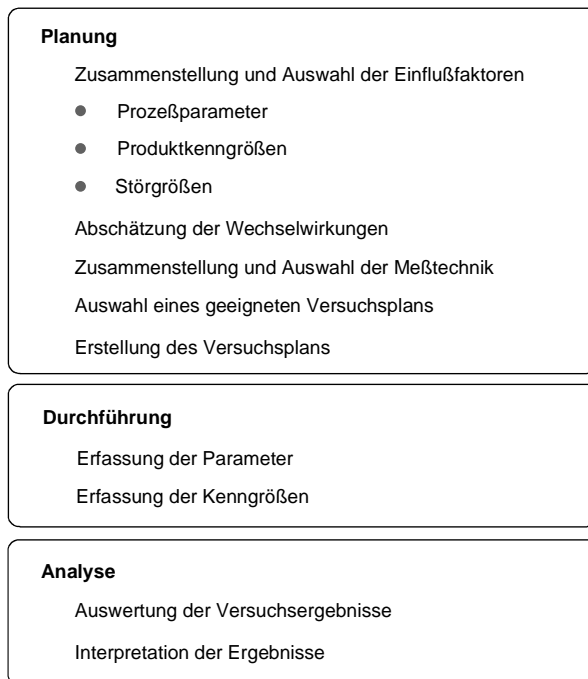


Bild 2.23 3-phasige Vorgehensweise zur Prozeßoptimierung mit statistischer Versuchsmethodik (PFEIFER 1993)

Je geschickter die **Planung** eines Versuchs durchgeführt worden ist, desto geringer ist der Aufwand für die Versuchsdurchführung und desto zuverlässiger ist die Aussage, die aus der Versuchsauswertung gezogen werden kann. Der wesentliche Aufwand liegt in der Zusammenstellung und Auswahl der zu untersuchenden Faktoren sowie der Abschätzung von Wechselwirkungen, die eine wesentliche Voraussetzung für die Reduzierung des Versuchsaufwands darstellt.

Neben der richtigen Einstellung der zu variierenden Prozeßparameter ist bei der **Durchführung** der Versuche eine geeignete Erfassung der Parameter und Kenngrößen von Bedeutung. Bei der **Analyse** der Versuche sind geeignete Methoden zur Auswertung und Interpretation einzusetzen (PFEIFER 1993, S. 97-98).

2.3.2 Planung

Die Grundlage der statistischen Versuchsplanung bilden die sogenannten faktoriellen Versuche. Als einen Faktor bezeichnet man eine unabhängige, willkürlich einstellbare Größe, die vermutlich einen Einfluß auf das Ergebnis eines Versuchs hat. Im Fall des Laserstrahlschweißens sind unter den Faktoren die Prozeßparameter des Schweißprozesses wie Laserstrahlleistung, Schweißgeschwindigkeit oder Schutzgasfluß zu verstehen. Um den Einfluß eines Faktors auf ein Versuchsergebnis festzustellen, muß der Faktor verändert werden. Die Einstellungen des Faktors werden als „Stufen“ oder „Niveaus“ bezeichnet. Der einfachste Fall eines **vollfaktoriellen** Versuchs ist der 2^k -Faktoren Versuch. Hier werden zwei Stufen für jeden der k Faktoren untersucht (SPENHOFF 1991, S. 84-105).

Für die Definition der Größe der Faktorstufen gilt die Faustregel, daß bei geringen Vorkenntnissen über den Prozeß ein großer Stufenabstand zur groben Näherung im nichtoptimalen Gebiet zu wählen ist, während bei guten Vorkenntnissen umgekehrt ein kleiner Stufenabstand zur guten Näherung im optimalen Gebiet eingestellt wird.

Bild 2.24 zeigt das Schema eines faktoriellen Versuchsplans der Form 2^3 . Die einzelnen Faktoren werden mit großen Buchstaben bezeichnet, beispielsweise Faktor A (z.B. Laserleistung), Faktor B (z.B. Schweißgeschwindigkeit), Faktor C (z.B. Schutzgasfluß). Die niedrigere Einstellung des Faktors ist mit (-) gekennzeichnet, die höhere mit (+). Die Anzahl der notwendigen Versuche N wird mit Hilfe der Formel

$$N = 2^k \quad (2.4)$$

2 Grundlagen und Definitionen

ermittelt. Zur Entwicklung des Versuchsplans wird für den Faktor A die erste Stufe mit einem Minus-Vorzeichen, die zweite mit einem Plus, usw. gekennzeichnet. Bei dem Faktor B beginnt die Folge mit zwei Minuszeichen, gefolgt von zwei Pluszeichen, usw. Für jeden weiteren Faktor wird die Anzahl der aufeinander folgenden Zeichen verdoppelt. Für die Vorzeichen der Wechselwirkungen werden die Einstellungen der Faktoren multipliziert.

Lfd. Nr.	Bezeichnung							
	T	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
8	1	1	1	1	1	1	1	1

a,b,... Bezeichnung des Versuchs

A, B,... Faktoren

AB, AC,... Wechselwirkungen

Bild 2.24 Faktorieller Versuchsplan der Form 2^3 (SPENHOFF 1991, S. 86)

Der Plan ist so aufgebaut, daß für jedes Niveau eines Faktors alle Niveaus aller anderen Faktoren untersucht werden. Dadurch erhält man Versuchsergebnisse bei allen möglichen Kombinationen der untersuchten Faktorstufen und kann so auch den Einfluß aller Wechselwirkungen abschätzen.

Beim **teilkfaktoriellen** Versuch wird im Gegensatz zum vollfaktoriellen Versuchsplan bei gleichen Faktoren die Anzahl der Versuche verringert, oder es werden bei gleicher Versuchszahl zusätzliche Faktoren untersucht. Die Reduzierung des Versuchsaufwands beruht darauf, daß einige oder manchmal auch alle Wechselwirkungen vernachlässigt werden, wenn sie von Experten als gering oder nicht vorhanden eingeschätzt werden (REINHART U.A. 1996, S. 134).

Neben der klassischen Versuchsmethodik wurden auch Verfahren erarbeitet, die eine deutliche Reduzierung der Versuchszahlen versprechen. Der bekannteste dieser Ansätze sind die Verfahren nach Taguchi. Weitere Beispiele sind die Verfahren nach Shainin, Plackett und Burman, sowie Hartley. Für deren Beschreibung sei auf die einschlägige Literatur verwiesen (SPENHOFF 1991, S. 153-159). Bei näherer Betrachtung der Verfahren zeigt sich, daß die erwarteten Vereinfachungen nur unter gewissen Randbedingungen greifen und zu falschen Versuchs-

ergebnissen führen können. Aus diesem Grund sollten die Verfahren nur bei genauer Kenntnis der Zusammenhänge und Hintergründe angewendet werden (PFEIFER 1993, S. 121-129).

Da die Erstellung faktorieller Versuchspläne bei komplexen Anwendungen mit großem Aufwand verbunden ist, wurde ein rechnergestützter Ansatz entwickelt, mit dessen Hilfe basierend auf den Zielgrößen, Einflußgrößen und den Haupteffekten faktorielle Versuchspläne automatisch erstellt werden (SEPOLD U.A. 1998).

Falls lediglich eine geringe Anzahl an Faktoren (<4) untersucht werden soll, bildet das Gitterlinienmodell eine Alternative zu den faktoriellen Versuchen. Wie in Bild 2.25 beispielhaft für zwei Faktoren dargestellt ist, wird der Versuchsraum mit einem möglichst engmaschigen Netz an Versuchspunkten überzogen. Nachteilig ist, daß in der Versuchspraxis in der Regel ein hoher experimenteller Aufwand betrieben werden muß (SPENHOFF 1991, S. 22).

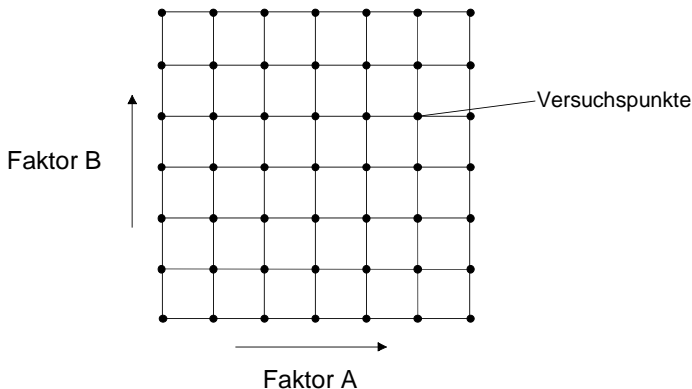


Bild 2.25 Gitterlinienmethode

2.3.3 Durchführung

Bei der Durchführung der Versuche sind ebenfalls Prinzipien der statistischen Versuchsplanung anzuwenden, um die Fehler durch äußere Einflußgrößen zu verringern. Die Prinzipien, die dabei angewendet werden sind die Mittelwertbildung, Zufallszuordnung und die Blockbildung (RETZLAFF U.A. 1975, S. 1).

2 Grundlagen und Definitionen

Das Prinzip der **Mittelwertbildung** beruht darauf, daß der Mittelwert mehrerer Messungen, die unter gleichen Bedingungen ausgeführt sind, dem „richtigen“ Ergebnis näherkommen als die einzelne Messung. Der Mittelwert \bar{x} wird aus dem Probenumfang n , und den Meßwerten x_i nach

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.5)$$

berechnet. Die Standardabweichung s

$$s = \sqrt{\left(\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2\right)} \quad (2.6)$$

ist ein Maß für Streuung der Meßwerte und erlaubt so eine Aussage über die Zuverlässigkeit der Messung (SPENHOFF 1991, S. 31-32).

Die **Zufallszuordnung** oder Randomisierung der Reihenfolge aller Versuche kann als Grundlage der Versuchsplanung angesehen werden. Sie gestattet durch Ausschaltung bekannter und unbekannter systematischer Fehler, insbesondere Trends, eine unverfälschte Schätzung der interessierenden Effekte und bewirkt zugleich Unabhängigkeit der Versuchsergebnisse. Eine Anzahl von Versuchen läßt sich durch **Blockbildung** oft so in Blöcke einteilen, daß innerhalb eines Blocks Meßgeräte, Versuchsbedingungen, Versuchsmuster oder Experimentatoren einheitlicher sind als von Block zu Block. Kombiniert man die Prinzipien Blockbildung und Zufallszuordnung, spricht man vom „Randomized Block Design“ (RETZLAFF U.A. 1975, S. 1-2).

2.3.4 Analyse

Bei den beschriebenen 2^k Faktorenversuchen sind die Faktoren auf lediglich zwei Stufen angeordnet und lassen sich einfach auswerten. Wenn sich die Parameter über viele Stufen ändern, werden zur Auswertung und Analyse **Regressionsverfahren** angewendet. Dabei wird davon ausgegangen, daß zwischen den untersuchten Variablen ein Zusammenhang besteht, der als Funktion dargestellt werden soll. Dabei wird je nach Anzahl der in Beziehung zu setzenden Variablen zwischen ein- und mehrfacher und nach der Form der anzunähernden Funktion in lineare, nichtlineare und polynomiale Regression unterschieden.

Um die Validität des aufgestellten Modells zu überprüfen, stehen verschiedene Methoden der Varianzanalyse zur Verfügung. Im Fall der einfachen linearen Regression besteht die Aufgabe darin, eine Menge von Meßpunkten „möglichst

gut“ an eine Gerade anzunähern. Die Regressionsrechnung beruht auf den Gaußschen Prinzip der kleinsten Quadrate. Danach ist die Gerade der Form

$$y(x) = ax + b$$

so zu legen, daß die Summe der Quadrate der Abstände der Meßpunkte (x_i, y_i) von dieser Geraden V nach

$$V = \sum_i (y_i - y(x_i))^2 = \sum_i (y_i - ax_i - b)^2 \quad (2.7)$$

ein Minimum wird. Ein Maß für die Stärke der linearen Abhängigkeit zwischen zwei Variablen ist der **Korrelationskoeffizient** r . Er berechnet sich nach

$$r = \frac{\text{cov}(xy)}{s(x) \cdot s(y)} \quad (2.8)$$

aus der Standardabweichung $s(x)$ und $s(y)$ und der Kovarianz von x und y

$$\text{cov}(xy) = \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n - 1} . \quad (2.9)$$

Der Betrag des Korrelationskoeffizienten liegt zwischen null und eins. Je näher er bei eins liegt, desto näher schmiegen sich die Meßpunkte der Regressionsgeraden an (RETZLAFF U.A. 1975, S. 107-112).

3 Analyse des Sensoreinsatzes beim Laserstrahlschweißen

In Kapitel 2 wurde aufgezeigt, daß für viele Anwendungen des Laserstrahlschweißens die erforderliche Führungsgenauigkeit bei einer robotergeführten Fokuspositionierung nicht erreicht werden kann. Vielmehr ist der Einsatz von Sensorik erforderlich. Basierend auf einer Analyse der Anforderungen, die an Sensoren zur Bahnführung beim Laserstrahlschweißen gestellt werden, werden zunächst die bestehenden Lösungen aufgezeigt und anhand der Anforderungen analysiert. Der der Arbeit zugrunde liegende Handlungsbedarf wird aufgezeigt und daraus die Inhalte der vorliegenden Arbeit abgeleitet.

3.1 Anforderungen an ein Sensorsystem

Die Anforderungen an ein System zur Vermeidung von Fehlern in der Fokuspositionierung sind nach funktionellen und daraus resultierenden technologischen Anforderungen gegliedert. Unabhängig davon hat der Sensor einige Randbedingungen für eine wirtschaftlich und technisch sinnvolle Integration in eine Laserstrahlschweißanlage zu erfüllen (Bild 3.1).

Die wesentliche **funktionelle Anforderung** an das Sensorsystem besteht in der Positionierung des Laserfokus mit ausreichender Genauigkeit in Auftreffpunkt und Fokuslage. Dabei ist der Fokus mit hohen Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 10 m/min zu bewegen. Da jedoch nicht nur die Nahtlage relativ zum Fokus, sondern auch die Nahtform Schwankungen unterworfen ist, besteht eine weitere Anforderung an das Sensorsystem darin, die Prozeßparameter an die Eigenschaften der Nahtform wie Fügespalt oder Versatz der Fügepartner anzupassen.

Sensorsysteme haben außerdem Anforderungen der Qualitätssicherung, konkret der Qualitätsprüfung zu erfüllen (HAFERKAMP 1993). Um eine Weiterbearbeitung von fehlerhaften Teilen, beispielsweise aufgrund des Ausfalls einer Komponente oder zu großer Abweichungen in der Nahtgeometrie, zu verhindern, ist eine Überwachung und Protokollierung des Bearbeitungsergebnisses erforderlich (NIEPOLD 1983).

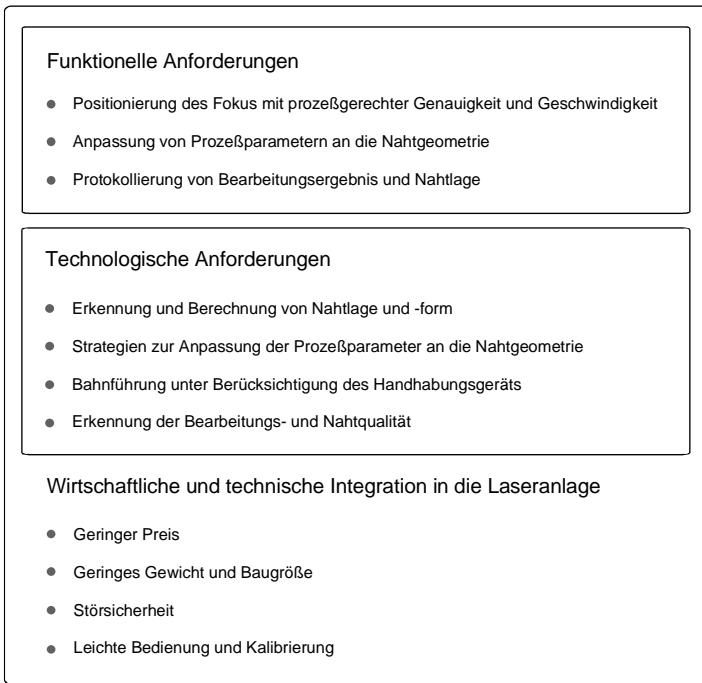


Bild 3.1 Anforderungen an Sensorsysteme

Die **technologischen Anforderungen** lassen sich direkt aus den funktionellen Anforderungen ableiten. Eine korrekte Positionierung des Fokus setzt eine Messung der Nahtlage mit ausreichender Genauigkeit voraus. Da insbesondere die Bearbeitung dreidimensionaler Bauteile betrachtet werden soll, ist eine Messung der Nahtlage in allen sechs Freiheitsgraden erforderlich. Hierzu muß es das Meßprinzip des Sensors erlauben, neben dem seitlichen Nahtversatz und dem Abstand zwischen Bauteil und Sensor auch die Flächennormale zu bestimmen. Das Meßprinzip muß zudem eine Meßauflösung von unter 0,1 mm ermöglichen, um die geforderten Genauigkeiten zu erreichen (TRUNZER 1996, S.13).

Voraussetzung hierfür ist eine sichere Detektion der Naht. Da alle in Kapitel 2 beschriebenen Nahtformen detektiert werden sollen, ist eine schnelle Anpassung der Nahterkennung an die jeweilige Nahtform sowie die Eigenheiten des Bauteils wie Oberfläche und Stoßkante erforderlich (ZELLER 1995, S. 41).

3 Analyse des Sensoreinsatzes beim Laserstrahlschweißen

Weiterhin sind die relevanten Eigenschaften der Stoßform wie ein Fügespalt zu vermessen und in Echtzeit zu berechnen (WIELAND & JAHN 1991). Die Verwendung dieser Größen zur Korrektur der Bearbeitungsbahn erfordert zudem das Vorhandensein von funktionalen Zusammenhängen zwischen der Nahtform und den zur Verfügung stehenden Prozeßparametern in der Sensorsteuerung, sowie die Möglichkeit diese entweder direkt in die Bahnplanung zu integrieren oder über analoge oder digitale Ausgänge zur Weiterverarbeitung zur Verfügung zu stellen.

Die Umsetzung der Meßergebnisse in eine konturangepaßte Bearbeitungsbahn erfordert eine echtzeitfähige Berechnung der Korrektur- bzw. Bewegungswerte der Bearbeitungsbahn, mit einer kurzen Taktzeit in der Größenordnung von 10 ms. Dazu sind ein leistungsfähiger Prozessor mit hoher Verarbeitungsgeschwindigkeit und eine schnelle Schnittstelle zur Handhabungstechnik erforderlich. Um eine fehlerfreie Bewegung zu gewährleisten, muß das System zudem in der Bahnplanung die Möglichkeiten der zum Einsatz kommenden Handhabungstechnik, wie die maximal mögliche Geschwindigkeit oder den Arbeitsraum berücksichtigen.

Das Sensorkonzept muß ferner die Möglichkeit bieten, durch eine Kombination aus Überwachung der beteiligten Komponenten, Beobachtung des Bearbeitungsprozesses oder nachlaufender Analyse der Naht, Fehler in der Lasernaht zu erkennen (REINHART U.A. 1994).

Die **technische Integration in die Laseranlage** hat eine Reihe technischer Anforderungen an den Sensor zur Folge. Dies sind in erster Linie ein geringes Gewicht und Baugröße, um die Zugänglichkeit in der Nähe der Bearbeitungsstelle zu gewährleisten. Ein weiterer Faktor ist die Unempfindlichkeit des Sensors gegen Störungen in der Umwelt wie elektromagnetische Felder, das laserinduzierte Plasmaleuchten, Temperaturänderungen, Dämpfe und Schmutz. Um die Akzeptanz des Systems in der Produktion zu gewährleisten, ist eine einfache Bedienung, Kalibrierung und Justage gefordert. In **wirtschaftlicher** Hinsicht sind ein geringer Preis für Anschaffung, Inbetriebnahme und Betrieb des Sensorsystems wünschenswert (TRUNZER 1996, S. 13-15).

Den Schwerpunkt dieser Arbeit wird die Analyse der **technologischen** Anforderungen bilden. Daraus werden Defizite aufgezeigt und Lösungsansätze abgeleitet.

3.2 Stand der Sensortechnik zur Bahnführung

Sowohl für Prozeß- als auch für Nahtfolgesensoren stehen eine Reihe von physikalischen Meßprinzipien zur Verfügung, die im folgenden auf ihre Eignung im Hinblick auf die vorliegende Aufgabenstellung der Überwachung und Korrektur der Fokusposition hin untersucht werden sollen. Zunächst soll auf die Möglichkeiten rein mechanischer Lösungen eingegangen werden.

3.2.1 Möglichkeiten mechanischer Kompensation

Für Nahtformen, die lediglich Anforderungen an die Fokusposition Δz stellen, wie der I-Naht am Überlappstoß, wurde eine rein mechanische Methode entwickelt, um einerseits die Fokusslage zu gewährleisten und andererseits die Bauteile spaltfrei zu spannen.

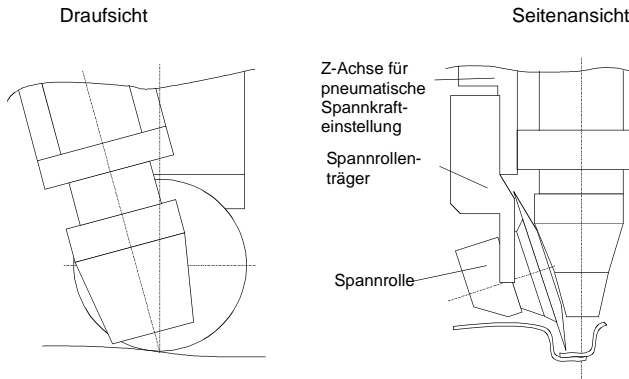


Bild 3.2 Prinzipskizze eines Systemkopfes mit Andrückrolle (TÖNSHOFF U.A. 1995)

Hier wird ein Handhabungsgerät mit Systemkopf und einem führenden Element verwendet, das mechanisch das Oberblech gegen das Unterblech drückt und somit die Bauteile an der Bearbeitungsstelle mit minimalem Fügespalt spannt. Da die Fokussieroptik in Strahlrichtung zum Andrückelement fixiert ist, bleibt die Fokusslage während des Schweißvorgangs konstant (RIPPL 1997). Als Andrückelement kommen alternativ eine Rolle (Bild 3.2) oder auch ein Pin (Bild 3.3) zum Einsatz. Der gesamte Kopf ist in Strahlrichtung in einer Linearführung frei

zu bewegen. Der Ausgleich der Spannkraft durch das Eigengewicht des Kopfes erfolgt über Druckluft in Pneumatik-Zylindern.

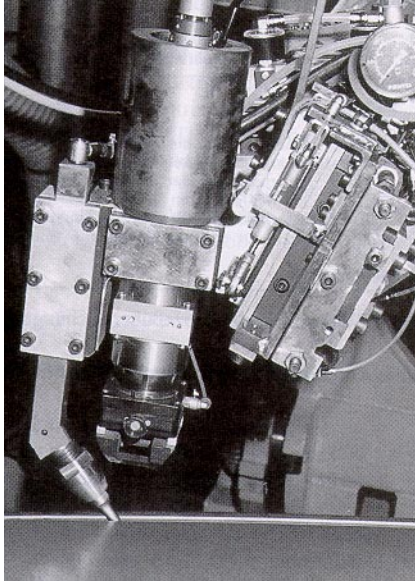


Bild 3.3 Systemkopf mit Andrückpin (FLOHR & BAYERLEIN 1996)

Dieses sehr einfache Prinzip hat Grenzen bei Nahtformen, die einen horizontalen Ausgleich des Auftreffpunkts des Laserfokus erfordern, wie der I-Naht am Stumpfstoß oder der Kehlnaht am Überlappstoß. Die erforderlichen mechanischen Kräfte können in der horizontalen Ebene nicht aufgebracht werden. Hier sind Sensorikkonzepte erforderlich, die im folgenden näher untersucht werden sollen.

3.2.2 Prozeßsensorik

Prozeßsensoren existieren in einer Vielzahl an Ausführungen und Meßprinzipien. Hier werden diejenigen Lösungen vorgestellt und analysiert, die geeignet sind die genannten Anforderungen an Bahnführung und Qualitätssicherung zu erfüllen.

3.2.2.1 Einsatz von Prozeßsensoren zur Bahnführung

Bei konventionellen Schweißverfahren wie dem Metallschutzgasschweißen ist die Bahnführung mit Hilfe von Prozeßgrößen Stand der Technik. Hier wird, je nach Schweißverfahren, der Schweißstrom oder die Schweißspannung zur Seiten- und Höhenführung erfaßt. Zum Zweck der Seitenführung werden dabei entweder zwei parallele Schweißlichtbögen verwendet oder ein Lichtbogen magnetisch oder mechanisch gependelt. Die Differenz der Signale liefert eine Aussage über die Position des Schweißbrenners relativ zur Fugenmitte (PUSCHNER 1983).

Das beschriebene Verfahren wird für alle Stoßformen, bei denen eine ausgeprägte geometrische Kontur zur Verfügung steht, eingesetzt, wie die V-Naht am Stumpfstoß oder die Kehlnaht am Überlapp- oder T-Stoß (CHANDONI & OSTER 1990, KIM & NA 1991). Neuere Entwicklungen erlauben eine Anpassung der Orientierung des Schweißbrenners, so daß eine sensorgeführte Bearbeitung gekrümmter Konturen möglich ist (KAHRSTEDT 1994).

Aus den Prozeßgrößen werden außerdem Informationen über die Stoßgeometrie, wie die Fugenbreite oder das Überstandmaß beim T-Stoß, gewonnen (EICHORN U.A. 1989, LÜTTMANN 1990). Diese dienen als Basis um Prozeßparameter wie Schweißstrom und -spannung, Schweißgeschwindigkeit, Drahtfördergeschwindigkeit oder Pendelweg zu regeln und so eine an die Stoßform angepaßte Nahtbreite und Füllgrad zu erreichen (BRÜMMER 1987, BOROWKA U.A. 1987).

Zur Beobachtung des Laserstrahlschweißprozesses wurden eine Vielzahl von Ansätzen untersucht, die in Bild 3.4 zusammengefaßt sind. Es wurde nachgewiesen, daß eine Variation der Prozeßgrößen Laserleistung, Schweißgeschwindigkeit, Fokusslage, Arbeitsgasfluß oder Drahtfördergeschwindigkeit jeweils eine charakteristische Veränderung des laserinduzierten Plasmas und der akustischen Emissionen zur Folge hat, die mit Hilfe einer Photodiode und eines Richtmikrophons detektiert werden können (ARTINGER U.A. 1990, GEBHARD 1991, BAGGER 1998). Einflüsse der Streckenenergie wurden außerdem mit Hilfe eines Plasmaspektrographen im laserinduzierten Plasma, sowie bei Beobachtung der rückreflektierten Laserstrahlung oder des Schmelzbads mit Hilfe einer Photodiode nachgewiesen (GARNICH & LINDL 1991, ISHIDE U.A. 1992, TSUKIHARA U.A. 1998).

3 Analyse des Sensoreinsatzes beim Laserstrahlschweißen

Prozeßgröße	Sensoren
Plasmastrahlung über und unter dem Werkstück	<ul style="list-style-type: none">● Photodiode● Plasmaspektrograph
Akustische Emissionen	<ul style="list-style-type: none">● Piezoelektrische Körperschallaufnehmer● Luftschallmikrophon
Temperaturverteilung	<ul style="list-style-type: none">● Thermograph● Pyrometer● Thermoelement
Rückgestrahlte Laserleistung	<ul style="list-style-type: none">● Photodiode
Elektronen- und Ionendichteverteilung	<ul style="list-style-type: none">● Plasmaspektrograph
Schmelzbaddynamik	<ul style="list-style-type: none">● Videotechnik

Bild 3.4 Übersicht von Prozeßsensoren (Gebhard 1991, Overmeyer 1996, VDI 1996)

Es wurde nachgewiesen, daß bei Beobachtung von entweder dem laserinduzierten Plasma, dem Schmelzbad oder von akustischen Emissionen mit Prozeßsensoren Aussagen über die Geometrie der Fugestelle und einzelne Arbeitsergebnisgrößen gewonnen werden können (BAGGER U.A. 1991, GATZWEILER U.A. 1988, REINHART U.A. 1994, ZIMMERMANN U.A. 1993). In Bild 3.5 sind beispielhaft einige Versuchsaufbauten zusammengefaßt.

Bei I-Nähten am Überlappstoß können dabei insbesondere erfolgreich Aussagen über den Fügespalt zwischen den Fügepartnern und den Durchschweißgrad erreicht werden (BAGGER U.A. 1991, ECKL 1994, GATZWEILER U.A. 1988, HAND U.A. 1998, REINHART U.A. 1994). Bei der I-Naht am Stumpfstoß liegt der Schwerpunkt der Arbeiten neben der Detektion des Fügespalts auf einer Erkennung des Bauteilversatzes und eines eventuellen Nahtdurchhangs (BRÜGGEMANN & BENZINGER 1997, FRINGS 1994, KIRBY U.A. 1994, SCHNARS U.A. 1992). Für Kehlnähte liegen bisher keine erfolgreichen Untersuchungen vor.

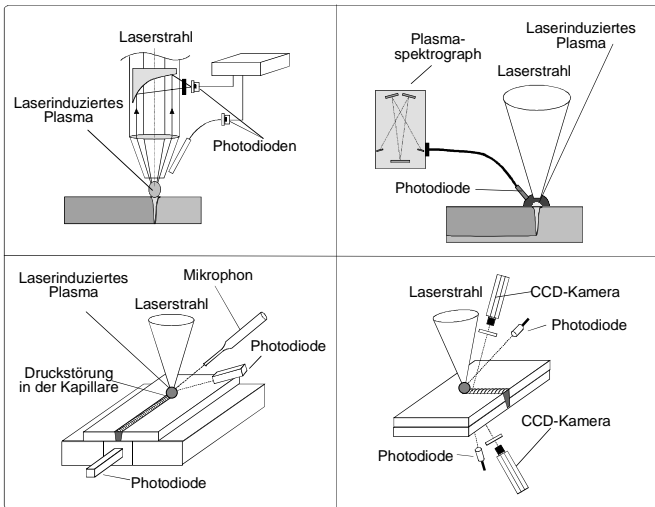


Bild 3.5 Versuchsaufbauten von Prozesssensoren (BAGGER U.A. 1991, GATZWEILER U.A. 1988, REINHART U.A. 1994, ZIMMERMANN U.A. 1993)

Alle Arbeiten haben gemeinsam, daß lediglich qualitative Aussagen über die Nahtgüte gewonnen werden können, die in der Regel nur für den speziellen Anwendungsfall gültig sind. Eine direkte Messung von Größen der Stoßgeometrie ist mit Hilfe der Prozesssensorik derzeit nicht möglich.

In weiteren Ansätzen werden die Möglichkeiten der Prozesssensorik genutzt, um eine Regelung einzelner Stellgrößen durchzuführen. Dies wird für eine Regelung der Parameter der Strahlquelle genutzt, die lediglich die Sicherstellung einer konstanten Laserleistung am Bauteil zum Ziel hat (DEINZER U.A. 1994, SEIDEL U.A. 1993). Die Beobachtung der in die Optik rückreflektierten Prozeßstrahlung erlaubt Aussagen über die Form und Tiefe der Dampfkapillare. ZIMMERMANN U.A. (1999) nutzen dies, um die Laserleistung mit dem Ziel einer konstanten Einschweißtiefe zu regeln. Eine Prozeßregelung basierend auf dem Plasmaleuchten ist bei geeigneter Wahl der Stellparameter auch zur Überbrückung von Fügespalten geeignet, wie OVERMEYER (1996) für die I-Naht am Stumpfstoß und GEBHARD (1991) für die I-Naht am Überlappstoß nachgewiesen haben.

Es wurden erste Ansätze zur Nutzung von Prozesssensoren zur Bahnführung aufgezeigt. SCHUBERTH U.A. (1995) nutzen alternativ die mittels einer Photodiode

3 Analyse des Sensoreinsatzes beim Laserstrahlschweißen

gemessene Plasmaintensität oder zur Regelung der Fokuslage beim Verschweißen einer I-Naht am Überlappstoß. Die schnelle Lagekorrektur der Fokusposition erfolgt mit Hilfe einer adaptiven Optik. KIM U.A. (1998) vermessen die Größe und Temperaturverteilung des Keyhole mit Hilfe der chromatischen Aberration und nutzen dies zur Regelung der Fokuslage mit Hilfe einer Zusatzachse am Bearbeitungskopf.

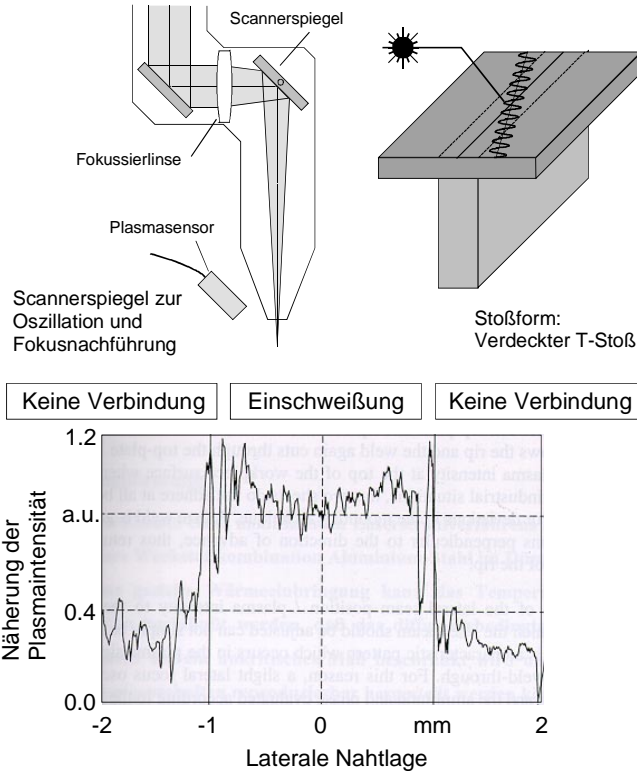


Bild 3.6 Prozesssensorik zur Bahnführung (HOFFMANN U.A. 1996)

HOFFMANN U.A. (1996) verwenden eine Prozeßregelung zur Korrektur des Auftreffpunkts beim Verschweißen einer I-Naht am verdeckten T-Stoß (Bild 3.6). Hier wird die Intensität des laserinduzierten Plasmas mit Hilfe einer Photodiode gemessen. Der Übergang von der Ein- zur Durchschweißung bei einem seitlichen

Austreten des Laserfokus aus der Fügezone hat einen deutlichen, detektierbaren Abfall der Plasmaintensität zur Folge.

Um die Richtung der Abweichung zu erkennen, wird der Fokus mit Hilfe eines im Strahlengang angebrachten Scannerspiegels mit einer Frequenz von 200 Hz oszilliert. Bei Überschreiten der Fügekante wird aus der Phasendifferenz zwischen Signalverlauf und Fokusverschiebung die erforderliche Korrekturrichtung ermittelt. Der Scannerspiegel führt gleichzeitig die Korrektur der mittleren Fokusposition durch.

Alle beschriebenen Verfahren zur Prozeßregelung haben gemeinsam, daß sie auf eindimensional ermittelten Zusammenhängen zwischen den Prozeßparametern und Prozeß- oder Arbeitsergebnisgrößen beruhen. Da ein Laserprozeß jedoch durch eine Vielzahl sich in den Auswirkungen überlagernder Einflußgrößen bestimmt wird, liegt hier die große Fehleranfälligkeit dieser Verfahren. Wird beispielsweise ein Absinken der Plasmaintensität gemessen, kann dies sowohl durch eine beginnende Durchschweißung bei steigender Laserleistung als auch durch einen Abfall der Laserleistung im Bereich der Einschweißung verursacht worden sein.

3.2.2.2 Einsatz von Prozeßsensoren zur Qualitätssicherung

Aus diesem Grund wurden die beschriebenen Ansätze zur Prozeßregelung bisher nicht industriell umgesetzt. Kommerziell verfügbare Systeme, die auf einer Überwachung von Prozeßgrößen beruhen, beschränken sich auf die Überwachung des Bearbeitungsprozesses zur Qualitätssicherung. Dabei wird der integrierende Ansatz des Soll-Istwertvergleichs verwendet. Zu diesem Zweck werden zunächst Prozeßgrößen eines fehlerfreien Prozesses als Referenzsignal aufgezeichnet. Die Meßwerte werden während der Bearbeitung kontinuierlich ausgewertet und mit dem Referenzsignal verglichen. Anschließend wird die Schweißung als „in Ordnung“ oder „Ausschuß“ bewertet (CHARTON u.A. 1998). Um die Sicherheit der Auswertung zu erhöhen kommen teilweise Methoden der Fuzzy Logik und neuronale Netze bei der Bewertung der Meßgrößen zum Einsatz (OGMEN 1998).

Für die Aufnahme der Meßwerte werden von den Herstellern der Systeme zwei verschiedene Ansätze verfolgt (Bild 3.7). Der Laser Welding Monitor (LWM 9000) verwendet mehrere in der Umgebung des Bearbeitungskopfes angebrachte Detektoren, die die UV und IR-Strahlung des laserinduzierten Plasmas, Spritzer,

3 Analyse des Sensoreinsatzes beim Laserstrahlschweißen

sowie das Werkstück unmittelbar hinter dem Schweißpunkt beobachten (JURCA & WIESEMANN 1995). Ein konkurrierender Ansatz ist das Auskoppeln und Detektieren der durch den Lichtwellenleiter rückreflektierten Prozeßstrahlung (TÖNSHOFF & SCHUMACHER 1996). Dieses ausschließlich beim Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Laser einsetzbare Verfahren hat den Vorteil, daß keine zusätzlichen Komponenten an der Schweißstelle erforderlich sind. Die beiden genannten und verwandte Systeme werden bereits erfolgreich in der Industrie eingesetzt (GRIEBSCH U.A. 1996, FLOHR & BAYERLEIN 1996, SHIBATA 1996).

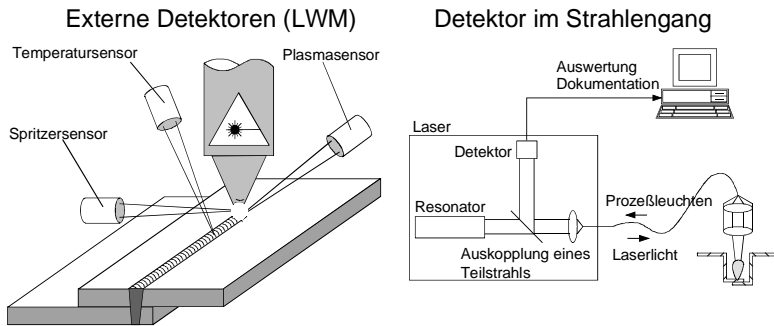


Bild 3.7 Prozesssensorik zur Qualitätssicherung (JURCA 1993, TÖNSHOFF & SCHUMACHER 1996)

Der Vorteil dieser Verfahren liegt in der sicheren Detektion von Schweißfehlern. Aussagen über die Fehlerursache können aus den Signalen nur mit Einschränkung gewonnen werden. Hierzu sind gezielt weitere Prozeßgrößen zu überwachen oder die als fehlerhaft erkannten Teile zu analysieren.

Derzeit befinden sich neue Ansätze in der Entwicklung, um durch Beobachtung der rückreflektierten Laserleistung und des Schmelzbades differenzierte Aussagen über die Nahtqualität, wie beispielsweise das Auftreten von Poren oder die Einschweißtiefe zu gewinnen (BREITSCHWERDT 1999, MÜLLER & DAUSINGER 1999).

3.2.3 Bahnführung durch Nahtfolgesensorik

Zur Erkennung geometrischer Größen steht eine Vielzahl an Sensoren zur Verfügung. Die Betrachtung soll hier auf Systeme beschränkt werden, die grundsätzlich zur Bahnführung geeignet sind.

3.2.3.1 Meßprinzipien

Die Sensoren, die grundsätzlich zur Bahnführung von Robotern in Frage kommen, können in optische und nicht-optische Sensoren gegliedert werden.

Nicht-optische Sensoren

Unter den nicht-optischen Sensoren wird zwischen taktilen und berührungslosen Sensoren unterschieden. Die für die Bahnführung eingesetzten physikalischen Prinzipien werden in Bild 3.8 zusammengefaßt (ZHAO 1990).

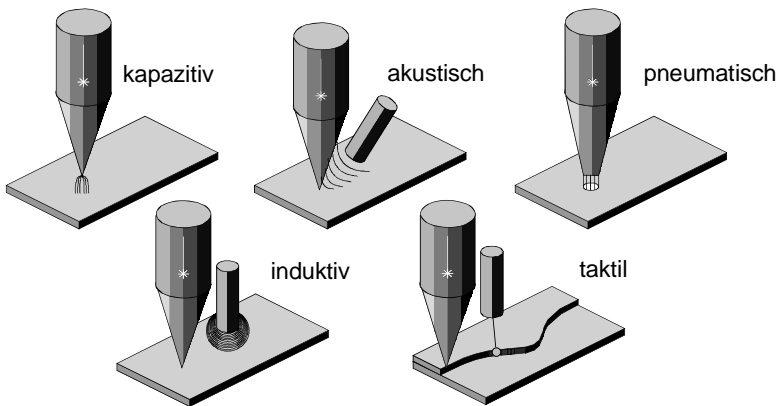


Bild 3.8 Nicht-optische Sensoren

Berührungslos messende Sensoren werden aufgrund der schlechten lateralen Auflösung meist zur Abstandsmessung eingesetzt. Es existieren verschiedene industrielle Umsetzungen, die auf Sensorregelung mit Hilfe einer schnellen Zusatzachse basieren (BIERMANN U.A. 1992, MUELLER & DULEY 1998, SCHMIDT & SICHLER 1992, UMEAGUKWU U.A. 1989). Kapazitive Abstandssensoren haben trotz der Einschränkung auf elektrisch leitende Werkstoffe industriell die weitest größte Bedeutung, insbesondere für das Laserstrahlschneiden (TOPKAYA 1992).

Eine laterale Führung entlang der Naht ist nur durch zusätzlichen Aufwand wie die Verwendung mehrerer induktiver Sensoren bei der Führung entlang einer Kehlnaht am T-Stoß (FUCHS 1987) oder durch eine scannende Zusatzbewegung eines kapazitiv oder induktiv messenden Abstandssensors bei einer Kehlnaht am Überlappstoß (FLORIAN & OHLSEN 1989, SCHMID U.A. 1992) möglich. Aufgrund der niedrigen erreichbaren Vorschubgeschwindigkeiten und Meßgenauigkeiten sind diese Ansätze aus dem Bereich des Lichtbogenschweißens nicht für das Laserstrahlschweißen geeignet.

Das einzige Beispiel für eine erfolgreiche Bahnkorrektur in Seiten- und Höhenlage beim Laserstrahlschweißen mit Hilfe nicht-optischer Sensoren basiert auf einem taktil arbeitenden Sensor, der vorlaufend zur Bearbeitungsstelle angebracht ist (HAFERKAMP & HÖFEMANN 1997). Vorteilhaft ist der sehr einfache Aufbau des Sensorkopfes. Nachteile entstehen durch den starken Verschleiß des Meßfühlers. Zudem ist eine Messung der Orientierung des Bearbeitungskopfes zum Bauteil auch hier nicht möglich.

Aufgrund dieser Einschränkungen sind nicht-optische Sensoren für eine dreidimensionale Bahnführung beim Laserstrahlschweißen unter Berücksichtigung der Stoßgeometrie nicht geeignet. Defizite liegen in der maximal zweidimensionalen Messung, der Spezialisierung auf einzelne Stoßformen und der eingeschränkten Genauigkeit und Bahngeschwindigkeit.

Optische Sensoren

Es existiert eine Vielzahl optischer Meßprinzipien, die eine ein- bis dreidimensionale Messung erlauben. Unter den in Bild 3.9 zusammengefaßten eindimensional messenden Verfahren -astigmatische Fokussierung, Phasenmodulation, Laufzeitmessung und Lasertriangulation- ist nur die Triangulation von praktischer Relevanz für die sensorgestützte Bahnführung (TRUNZER 1996), obwohl einzelne Ansätze zur Abstandskorrektur basierend auf der Laufzeitmessung von Laserpulsen und der Laserinterferometrie untersucht wurden (FILZ 1996, LASER 1985, WHEELER 1998).

Bei einem nach dem Triangulationsprinzip arbeitenden Sensor sendet eine Lichtquelle, in der Regel eine Laserdiode, einen Lichtstrahl auf die Werkstückoberfläche. Der diffus reflektierte Strahl wird von einem zeilenförmigen Bildwandler-element unter einem definierten Winkel aufgenommen. Aus der Position des beleuchteten Bereichs auf dem Bildwandler kann direkt auf den Abstand des Sensors zum vermessenden Werkstückpunkt geschlossen werden.

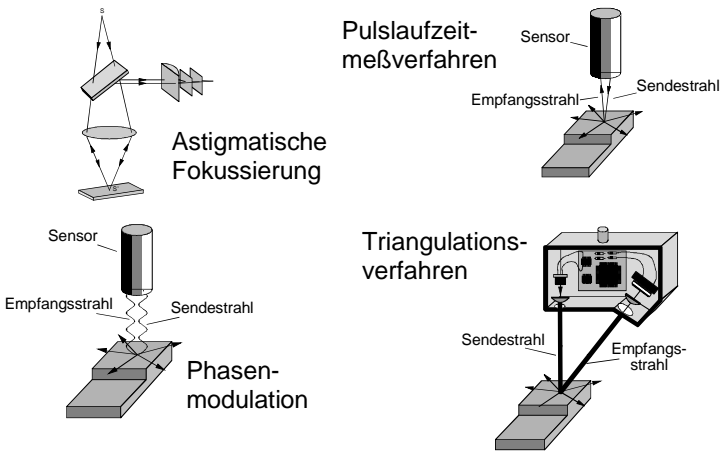


Bild 3.9 Eindimensionale optische Sensoren (TRUNZER 1996A)

Um eine zweidimensionale Kontur zu vermessen, werden als Variationen des Triangulationsprinzips die scannende Triangulation oder das Lichtschnittverfahren angewendet (Bild 3.10). Beim scannenden Triangulationsverfahren ist eine pendelnde Mechanik mit Ablenkspiegeln in den Strahlengang von Sende- und Empfangsstrahl eingebaut. Sie ermöglicht eine Scanbewegung des Laserstrahls (WELLINGTON U.A. 1991). Beim Lichtschnittverfahren wird das Werkstück mit einem Balken beleuchtet, der durch eine Zylinderlinse erzeugt wird.

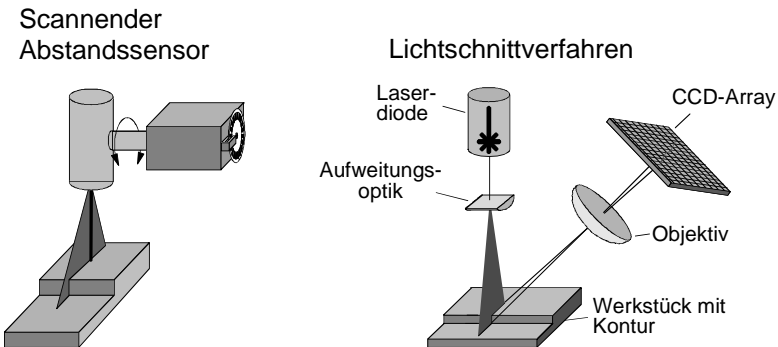


Bild 3.10 Zweidimensionale optische Sensoren

3 Analyse des Sensoreinsatzes beim Laserstrahlschweißen

Der durch die scannende Bewegung oder den Lichtschnitt erzeugte Balken wird von einer Kamera, die in einem bestimmten Winkel zum Projektor steht, aufgenommen. Liegt eine Kante im Blickfeld, so tritt in dem Balken ein Sprung auf. Aus dem Kamerabild kann mittels Bildverarbeitung sowohl die Lage der Naht als auch die Höhe des Sprungs ermittelt werden (SCHWARZ 1994).

Eine dreidimensionale Messung kann erzielt werden, indem anstelle eines einzigen Balkens mehrere parallele Lichtschnitte auf das Bauteil projiziert werden. Dadurch ist das Sensorsystem in der Lage, außer den drei translatorischen Freiheitsgraden der Lage des Arbeitspunktes auch die Orientierung des Werkstückes nach Schleppwinkel, Seitenwinkel und Nahrichtung zu erkennen. Somit sind alle sechs Freiheitsgrade in einer Aufnahme bestimmbar. Durch Einführen einer Relativbewegung senkrecht zur Ebene des Lichtschnitts lassen sich so dreidimensionale Oberflächen erfassen. Diese Vorgehensweise stellt den Standardfall für die Konturerfassung dar (TRUNZER 1996).

Es sind zudem optische Verfahren im Einsatz, die ohne zusätzliche Bewegung eine Oberfläche abtasten können (Bild 3.11).

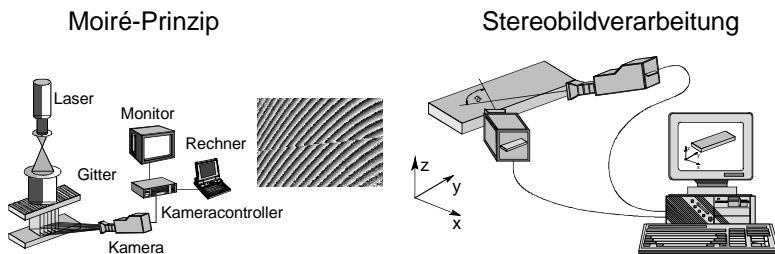


Bild 3.11 Dreidimensionale optische Sensoren

Ein Verfahren beruht auf dem Moiré-Effekt, der entsteht, wenn periodische Muster überlagert werden und miteinander interferieren. Bei dem dabei fast ausschließlich zum Einsatz kommenden Projektionsverfahren wird mit zwei Gittern gearbeitet, wobei das erste Gitter auf die Oberfläche projiziert und das Abbild durch ein zweites Gitter betrachtet wird.

Ein weiteres dreidimensional arbeitendes Verfahren ist die Stereobildverarbeitung. Hierfür wird ein System aus zwei Kameras so angeordnet, daß diese das zu vermessende Objekt aus zwei Richtungen betrachten. Die zwei Einzelbilder können unter genauer Kenntnis der Relativposition der beiden Kameras zueinander

zusammengefaßt und ausgewertet werden, woraus sich eine Tiefeninformation rekonstruieren läßt (HUWER 1993).

Zur Roboterführung werden häufig auch einfachere Systeme mit nur einer Kamera eingesetzt. Neben einer Vielzahl von Anwendungen zur robotergestützten Positionierung sind diese auch zur Bahnführung geeignet (DUNKER 1997, PIETRZAK 1990). Es wurden mehrere Sensorsysteme entwickelt, die nach dem Auflichtreflexionsverfahren arbeiten. Beim Auflichtreflexionsverfahren wird das Bauteil mit einer diffusen Lichtquelle beleuchtet und unter einem Winkel mit Hilfe einer Kamera erfaßt. An der Stelle der Fügekante ergibt sich ein charakteristisches Intensitätsminimum, das durch die Bildverarbeitung erkannt und zur Seitenführung des Brenners beim Lichtbogen- oder Laserstrahlschweißen genutzt wird (FRINGS 1994, FUCHS 1987, STARKE 1983).

Während in der Lichtbogenschweißtechnik ein auf dem Prinzip der Stereokamera basierender Sensor zur dreidimensionalen Erfassung der Bauteillage und -orientierung eingesetzt wird (VOKURKA 1989), ist diese Lösung für das Laserstrahlschweißen nicht geeignet. Die auf der Erkennung identischer Kanten in beiden Bildern beruhende Bildauswertung ist sehr zeitaufwendig, so daß für die hohen Bahngeschwindigkeiten beim Laserstrahlschweißen eine Bahnverfolgung in Echtzeit nicht möglich ist (NAYAK & RAY 1993).

3.2.3.2 Einsatz von Triangulationssensoren zur Bahnführung

Im folgenden sollen die Anwendungen des Triangulationsprinzips für die sensorgestützte Bahnführung näher untersucht werden. Es werden eine Vielzahl verschiedener Triangulationssensoren in verschiedenen Komplexitätsgraden von der eindimensionalen Erfassung mit Hilfe eines Laserpunktes bis zum Mehrstreifenlichtschnittverfahren industriell eingesetzt.

Eindimensionale Triangulationssensoren werden häufig eingesetzt, um in einem zusätzlichen Schritt vor der Bearbeitung je nach den zu erwarteten Lage- oder Formabweichungen entweder die Nahtlage (BACK 1991) oder die gesamte Bearbeitungsbahn (SHIOU 1998) zu vermessen. In Ansätzen aus der konventionellen Schweißtechnik werden Triangulationssensoren vorlaufend zum Schweißbrenner angeordnet und zur Bahnführung genutzt. Dabei wird entweder die zur Durchführung der Schweißung erforderliche Pendelung des Bearbeitungskopfes (DREWS U.A. 1992) oder eine zusätzliche Achse am Sensorsystem zur seitlichen

3 Analyse des Sensoreinsatzes beim Laserstrahlschweißen

Bewegung des Sensors genutzt (RUOFF 1989), um zusätzlich zur Abstandsmessung Informationen über die Seitenlage der Naht zu gewinnen.

Eine Kombination aus Prozeß- und Nahtfolgesensorik stellt die sogenannte aktive Triangulation dar. Hier wird das Prozeßleuchten eines Laserschweißprozesses mit Hilfe eines seitlich montierten Sensors beobachtet. Aus der Position des Intensitätsmaximums in der Kamera kann nach dem Triangulationsprinzip eine Aussage über den Abstand zum Bauteil gewonnen werden. NEGENDANCK & HOFFMANN (1999) nutzen dieses Prinzip für eine Abstandregelung der Fokusslage. Informationen über die Seitenlage können mit diesem Aufbau nicht gewonnen werden.

Vorteilhafter ist der Einsatz zweidimensionaler Triangulationssensoren, bei denen eine integrierte Scanneroptik die seitliche Bewegung des Laserstrahls durchführt. Diese Systeme wurden ursprünglich für die konventionelle Schweißtechnik entwickelt, wo sie zur Seiten- und Höhenführung an V- und Kehlnähten eingesetzt werden (BÖGEL 1990, FERTIGUNG 1992, FLORIAN & OHLSEN 1989, SANDEN & JOHANSSON 1998, WELDING AND METAL FABRICATION 1992, WIELAND & JAHN 1991). Einzelne Systeme werden auch für das Laserstrahlschweißen eingesetzt. Um an dreidimensionalen Konturen eine ausreichende Bahngenauigkeit zu erreichen, bestehen Einschränkungen in der Bahngeschwindigkeit auf 2,5 m/min aufgrund der geringen Rechenleistung der ursprünglich für das Schutzgasschweißen ausgelegten Systeme (QU U.A. 1994).

Eine Alternative zu den scannenden Systemen bilden die Lichtschnittsensoren (KÖLBL 1995). Für die Lasermaterialbearbeitung ist dieses Meßprinzip nicht nur wegen der höheren zulässigen Vorschubgeschwindigkeiten von Vorteil. Bei den scannenden Verfahren können lediglich Stoßformen erkannt werden, die eine geometrische Kontur aufweisen. Die Detektion von Stumpfstoßen erfordert den Einsatz von Lichtschnittsensoren. Diese verfügen neben der Detektion der Höhenlage des Lichtschnitts auch über eine Graubildauswertung, mittels derer ein Intensitätsminimum im Lichtschnitt erfaßt werden kann (FALLDORF 1995, HORN 1994).

Die beschriebenen auf dem Triangulationsprinzip basierenden Verfahren erlauben eine zweidimensionale Messung der Seiten- und Höhenlage der Naht sowie gegebenenfalls des Seitenwinkels. Informationen über eine dreidimensionale Bauteilgeometrie können nur über eine Zusammenfassung mehrerer Messungen

gewonnen werden, was aufgrund der erforderlichen Berücksichtigung der Vorschubgeschwindigkeit aufwendig und fehleranfällig ist.

Hier ist das Mehrstreifenlichtschnittverfahren von Vorteil. Bei dem in Bild 3.12 dargestellten System „SCOUT“ werden fünf parallele Lichtschnitte auf das Bauteil projiziert. Da für jeden einzelnen Lichtschnitt der Abstand zum Bauteil erfaßt wird, können neben dem mittleren Bauteilabstand sowohl Seiten- als auch Schleppwinkel und somit die Flächennormale berechnet werden. Somit wird bereits mit einer Messung eine dreidimensionale Information gewonnen.

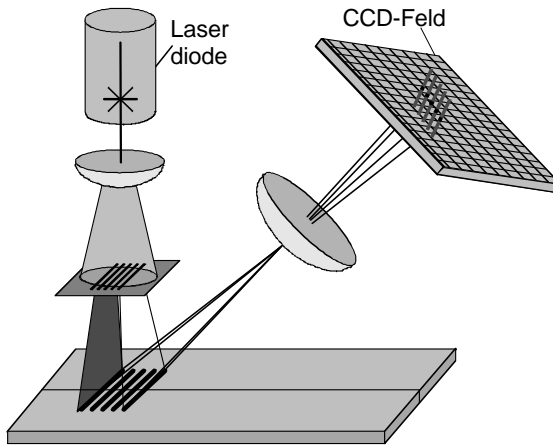


Bild 3.12 Mehrstreifenlichtschnittverfahren (Trunzer u.a. 1993)

Ein weiterer Vorteil des Mehrstreifenverfahrens besteht darin, daß bei einer Messung fünf Meßwerte gleichzeitig erfaßt werden, was trotz der Messung in der Videofrequenz von 50 Hz eine theoretische Abtastrate von 250 Hz ergibt. Der Abstand der einzelnen Lichtschnitte zueinander wurde so gewählt, daß eine möglichst geringe Überschneidung der aufeinander folgenden Messungen auftritt (TRUNZER 1996, S. 33-40). So ergibt sich eine hohe Meßpunktdichte entlang der Naht. Erst ab einer Geschwindigkeit von 40 m/min überlappen die Videobilder nicht mehr (BARTHEL & HOLICK 1993).

Die Meßgenauigkeit beträgt 0,05mm. Unter Berücksichtigung der Dynamik des gesteuerten Handhabungsgeräts kann bis zu einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 m/min eine Bahnengenauigkeit von 0,1 mm erreicht werden (TRUNZER U.A. 1993, BARTHEL 1995). Aufgrund der großen vom Sensorsystem erfaßten Daten-

menge werden hohe Anforderungen an die Schnittstelle zwischen Sensor- und Handhabungssystem gestellt. Inzwischen sind eine Vielzahl von Steuerungen von Knickarm- und Portalrobotern in der Lage, über eigens entwickelte Schnittstellen mit schnellen Sensorsystemen wie dem beschriebenen zu kommunizieren (EUROLASER 1998, IWS 1998).

3.2.3.3 Detektion geometrischer Eigenschaften der Fügezone

Die Vermessung der Stoßgeometrie mit entsprechender Anpassung der Schweißparameter ist beim sensorgeführten Lichtbogen- und Schutzgasschweißen Stand der Technik. Hier werden sowohl Kamerasysteme, die nach dem Auflichtreflexionsverfahren arbeiten (FUCHS 1987) als auch auf dem Triangulationsprinzip basierende Systeme eingesetzt (KÖLBL 1991). Basierend auf der Vermessung und Berechnung des Stoßquerschnitts werden die Prozeßparameter wie Schweißgeschwindigkeit, -spannung und -strom sowie die Fördergeschwindigkeit des Schweißdrahtes angepaßt um eine gleichmäßige Füllung der Schweißfuge zu erzielen (FLORIAN & OHLSEN 1989, NAYAK & RAY 1993). Abgesehen vom Ausgleich eventueller Bauteiltoleranzen ist dieses Vorgehen insbesondere bei Mehrlagenschweißungen von Bedeutung, um Abweichungen in den vorhergehenden Schweißlagen zu kompensieren (SCHWEIßEN & SCHNEIDEN 1998, VOKURKA 1989).

Beim Laserstrahlschweißen werden Nahtfolgesysteme ebenfalls zur Detektion der Fügespaltweite eingesetzt. Hier kommen entweder eine Stereokamera oder Lichtschnittsensoren zum Einsatz.

HUWER (1993) verwendet eine Stereokamera zur Detektion von Fügespalten an Stumpfstoßen. Die Überbrückung des Fügespalts erfolgt durch gezielte Zufuhr von Zusatzwerkstoff. Das System erfaßt neben der Spaltbreite auch die seitliche Nahtlage. Diese wird jedoch nicht zur Bahnführung sondern lediglich zur Nahtführung des Sensorsichtfeldes mit Hilfe einer Zusatzachse verwendet (DILTHEY U.A. 1994B).

Lichtschnittsensoren sind ebenso zur Messung der Fügespaltweite an der I-Naht am Stumpfstoß mit Steuerung der Drahtzufuhr geeignet (EUROLASER 1998). Zusätzlich erlauben sie die Erfassung und Detektion der Spalthöhe bei der Kehlnaht am Überlappstoß (Bild 3.13). Hier erfolgt die Spaltüberbrückung durch gezielte Anpassung der Prozeßparameter Fokusslage und Schweißgeschwindigkeit mit

dem Ziel des vermehrten Abschmelzens des Oberblechs (PISCHETSRIEDER U.A. 1995). Die Defizite dieser Anwendungen liegen in der aufwendigen experimentellen Ermittlung der der Spaltüberbückung zu Grunde liegenden funktionalen Zusammenhänge zwischen Spaltbreite und Prozeßparametern (PISCHETSRIEDER & MEIER 1997).

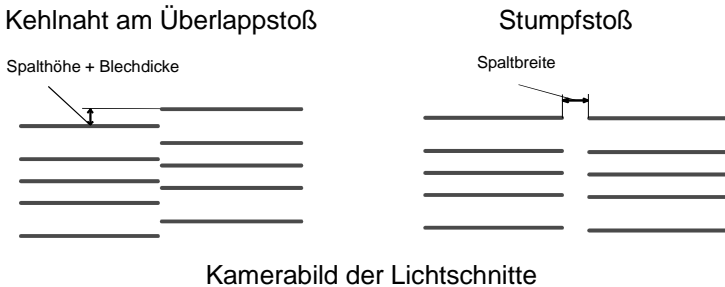


Bild 3.13 Spaltnessung mit dem Mehrstreifenlichtschnittverfahren

BRAUMÖLLER U.A. (1998) schlagen eine rechnerische Methode zur Bestimmung der Drahtföhrermenge basierend auf dem zu füllenden Spaltvolumen vor. Eventuell erforderliche Anpassungen weiterer Parameter werden jedoch nicht berücksichtigt.

3.2.3.4 Einsatz von Nahtfolgesensoren zur Qualitätssicherung

Neben der unverschweißten Stoßkante verfügt auch die Schweißnaht über charakteristische geometrische Merkmale, die mit Hilfe optischer Sensoren erfaßt werden können. Für die Qualität der Schweißnaht sind die in Bild 3.14 zusammengefaßten Merkmale Randkerben, Nahtüberhöhung, Nahtunterwölnung, Kantenversatz und Poren relevant (HEIDENREICH U.A. 1997).

Zur Inspektion der Schweißnähte in Echtzeit werden ausschließlich Triangulationssensoren eingesetzt. Dabei kommen sowohl nach dem Lichtschnittverfahren als auch mit scannender Triangulation arbeitende Systeme zum Einsatz (HEIDENREICH U.A. 1997, MINGE 1998, WILDMANN 1998). Diese werden entweder nachlaufend direkt am Bearbeitungskopf montiert oder in einer eigenen Meßstation angebracht (SHIBATA 1996, WEICK & MEYLE 1998).

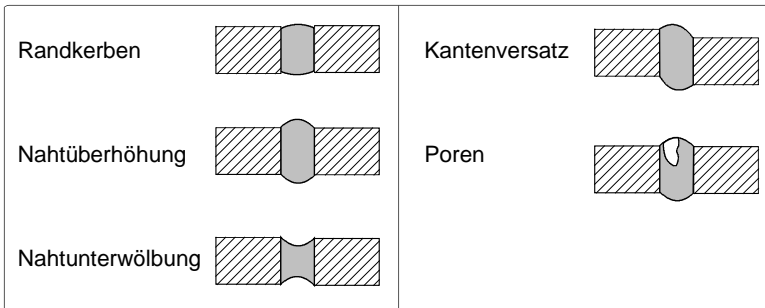


Bild 3.14 Optisch detektierbare Nahtunregelmäßigkeiten

Optische geometrietauflösende Sensoren bilden somit eine Alternative zu Prozeßsensoren in der Qualitätssicherung. Da Ihre Möglichkeiten jedoch auf die Detektion von optisch erkennbaren Nahteigenschaften beschränkt sind, kann auf den Einsatz von Prozeßsensoren nicht verzichtet werden, wenn eine vollständige Qualitätsüberwachung gefordert ist.

3.3 Zusammenfassung und Bewertung der Konzepte

Abschließend werden nun die vorgestellten Ansätze bewertet, mit den in Abschnitt 3.1 erarbeiteten technologischen Anforderungen verglichen und daraus der Handlungsbedarf für die weitere Arbeit abgeleitet.

3.3.1 Bewertung anhand der Anforderungen

3.3.1.1 Prozeßsensorik

Die Bewertung der Ansätze aus dem Bereich der Prozeßsensorik ist zusammenfassend in Bild 3.15 dargestellt.

Erkennung und Berechnung von Nahtlage und -form

Prozeßsensoren sind geeignet, qualitativ Abweichungen in der Fokusposition oder der Nahtform zu detektieren. Die entsprechenden Regelkreise werden jedoch ausschließlich eindimensional ausgelegt, da sie gezielt auf die Kompensati-

on einer Fehlerursache hin ausgelegt sind. Dies ist von Vorteil bei Nahteigenschaften, die optisch nicht erkennbar sind, wie etwa der Lage des unteren Schweißpartners bei verdeckten T-Stößen oder dem Fügespalt bei Überlappstößen. Die geforderte mehrdimensionale Vermessung ist, wie in Abschnitt 3.2.2.1 dargestellt, derzeit nicht möglich.





Anforderungen	Defizite und Bewertung
Erkennung und Berechnung von Nahtlage und -form	nur qualitative Erkennung von Abweichungen 
Strategien zur Anpassung der Prozeßparameter an die Nahtform	nur eindimensionale Regelung einzelner Größen 
Bahnführung unter Berücksichtigung des Handhabungsgeräts	Bahnführung ist nicht möglich 
Erkennung der Bearbeitungs- und Nahtqualität	Abweichungen vom Sollprozeß sicher detektierbar 

Bild 3.15 Bewertung von Prozeßsensoren

Strategien zur Anpassung der Prozeßparameter an die Nahtform

Eine quantitative Vermessung oder Berechnung der Nahtgeometrie ist nicht möglich. Vorhandene Strategien beschränken sich daher auf die Regelung einzelner Prozeßgrößen mit dem Ziel, Abweichungen in der Nahtform auszugleichen. Allerdings kann nicht zwischen Fehlereinflüssen, die identische oder ähnliche Auswirkungen auf die Prozeßgrößen haben, unterschieden werden, wie beispielsweise einer Fokuslageverschiebung und einem Fügespalt bei der I-Naht am Überlappstoß.

Bahnführung unter Berücksichtigung des Handhabungsgeräts

Aufgrund der dargestellten Einschränkungen in der Vermessung der Bearbeitungsbahn können Prozeßsensoren nicht zur Bahnführung von Handhabungsgeräten eingesetzt werden.

Erkennung der Bearbeitungs- und Nahtqualität

Da Prozeßsensoren direkt die Größen des Bearbeitungsprozesses betrachten, sind sie geeignet, Abweichungen im Bearbeitungsvorgang zu erkennen. Alle bekannten Fehler im Schweißprozeß, die eine Auswirkung auf die Nahtqualität haben, können durch einen Vergleich mit einer Referenzschweißung detektiert werden. Somit eignen sich diese Verfahren ausgezeichnet zur Qualitätssicherung.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß eine Erfüllung der Aufgabenstellung ausschließlich durch den Einsatz indirekter Meßmethoden mit Hilfe von Prozeßsensoren nicht möglich ist. Dennoch zeichnen sich einige Aspekte ab, insbesondere im Bereich der Qualitätssicherung, in denen die Prozeßsensoren geometrie-auflösenden Sensoren überlegen sind.

3.3.1.2 Nahtfolgesensorik

Die Bewertung der Nahtfolgesensoren anhand der Anforderungen ist in Bild 3.16 zusammengefaßt.





Anforderungen	Defizite und Bewertung
Erkennung und Berechnung von Nahtlage und -form	Aufwendige Anpassung an Bauteileigenschaften 
Strategien zur Anpassung der Prozeßparameter an die Nahtform	keine allgemeingültigen Lösungen 
Bahnführung unter Berücksichtigung des Handhabungsgeräts	keine Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens 
Erkennung der Bearbeitungs- und Nahtqualität	nur optisch sichtbare Abweichungen detektierbar 

Bild 3.16 Bewertung von Nahtfolgesensoren

Erkennung und Berechnung von Nahtlage und -form

Die Anforderungen an die Erkennung der Nahtlage mit der für das Laserstrahlschweißen erforderlichen Genauigkeit und Geschwindigkeit wird von existieren-

den Nahtfolgesensoren erfüllt. Ebenso existieren Lösungen zur Vermessung der Nahtform im Hinblick auf Fügespalt und Bauteilversatz. Das Defizit der bestehenden Systeme besteht darin, daß die Anpassung an den jeweiligen Anwendungsfall, charakterisiert durch die Eigenschaften der Stoßform, mit hohem Aufwand verbunden ist. Dies gilt insbesondere für Stoßformen wie den Stumpfstoß, bei denen keine geometrische Kontur für die Nahterkennung zur Verfügung steht und die Naht lediglich anhand einer Veränderung der Intensität durch die Bildverarbeitung detektiert werden kann.

Eine Berechnung der aktuellen Position und Geometrie der Fügezone ist mit den verfügbaren Systemen entsprechend den Anforderungen möglich. Hierzu sind jedoch wiederum anwendungsspezifische Anpassungen erforderlich, um beispielsweise die Abweichungen zwischen der durch die Bildverarbeitung ermittelten Spaltbreite und der realen Spaltbreite, die durch das Vorhandensein einer Fase an der Bauteilkante entstehen können, rechnerisch zu kompensieren.

Strategien zur Anpassung der Prozeßparameter an die Nahtform

Die durch das Sensorsystem gewonnenen Meßwerte werden bisher nicht im möglichen Umfang zur Implementierung adaptiver Schweißfunktionen genutzt. Experimentelle oder rechnerische Methoden zur Ermittlung der funktionalen Zusammenhänge zwischen Stoßgeometrie und Prozeßparametern existieren nur für einzelne einfache Anwendungen.

Bahnführung unter Berücksichtigung des Handhabungsgeräts

Bei Anwendungen, bei denen die Bearbeitungsbahn vollständig über eine Sensorführung generiert wird, werden die Möglichkeiten des Handhabungsgeräts bisher nur unvollständig berücksichtigt. Dies gilt insbesondere für die Grenzen im dynamischen Verhalten des Roboterarms.

Probleme bestehen weiterhin im Hinblick auf die Schnittstellen zwischen Sensor und Handhabungsgerät, die mit großem Aufwand konfiguriert werden müssen. Hier sind die Hersteller von Sensoren und Handhabungsgeräten gefordert.

Erkennung der Bearbeitungs- und Nahtqualität

Geometrieerfassende optische Sensoren werden eingesetzt, um Fehler in Schweißnähten zu detektieren, die sich in einer Veränderung der Nahtgeometrie auswirken. Das Erkennen und Aussortieren fehlerhafter Nähte ist möglich. Aus den Meßwerten kann jedoch nicht auf die Ursache der fehlerhaften Schweißnaht

geschlossen werden. Da die Systeme nachlaufend arbeiten, ist eine Prozeßregelung zur Fehlervermeidung nicht möglich. Somit können optische Systeme die Anforderungen an die Qualitätssicherung alleine nicht erfüllen.

3.3.2 Ableitung des Handlungsbedarfs

Um den Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit abzuleiten, werden die in den Bilder 3.15 und 3.16 dargestellten Bewertungen der Sensorkonzepte zusammenfassend analysiert. Es ist zu erkennen, daß Nahtfolgesensoren zur Erkennung und Berechnung von Nahtlage und -form, Anpassung der Prozeßparameter an die Nahtform und zur Bahnführung unter Berücksichtigung des Handhabungsgeräts die bessere Lösung darstellen. Es bestehen allerdings noch einige Defizite. Zur Erkennung der Bearbeitungs- und Nahtqualität bilden Prozeßsensoren eine sehr zuverlässig arbeitende Lösung. Ein Gesamtsystem, das alle Anforderungen erfüllen soll, muß also aus den Komponenten Nahtfolgesensor zur Bahnführung und Prozeßsensor zur Qualitätssicherung zusammengesetzt sein.

Die Behebung der aufgezeigten Defizite im Bereich der Nahtfolgesensorik werden den weiteren Inhalt dieser Arbeit bilden. Dabei ergibt sich der in Bild 3.17 dargestellte Handlungsbedarf.

Anforderungen	Handlungsbedarf
Erkennung und Berechnung von Nahtlage und -form	Strategien für eine sichere Nahterkennung und -vermessung
Strategien zur Anpassung der Prozeßparameter an die Nahtform	Methode zur Entwicklung adaptiver Schweißfunktionen
Bahnführung unter Berücksichtigung des Handhabungsgeräts	Strategien zur dynamikgerechten Bahnführung
Erkennung der Bearbeitungs- und Nahtqualität	Einsatz von Prozeßsensoren

Bild 3.17 Abgeleiteter Handlungsbedarf

Um eine aufwendige Anpassung der Sensorparameter an die Eigenschaften der aktuellen Bauteile und Stoßart zu vermeiden, werden Strategien für eine sichere Nahterkennung und –vermessung erarbeitet. Fehler durch Abweichungen von der idealen Stoßform, wie beispielsweise Fügespalte, sollen vermieden werden, indem eine Methode erarbeitet wird, um einfach adaptive Schweißfunktionen mit dem Ziel zu entwickeln, Prozeßparameter in geeigneter Form an die aktuelle Nahtform anzupassen. Die Berücksichtigung der Möglichkeiten des Handhabungsgeräts bei der sensorgeführten Bahngenerierung soll durch Strategien zur dynamikgerechten Bahnführung sichergestellt werden.

4 Verbesserung der Nahterkennung

Eine sichere Nahterkennung bildet die Grundlage für eine fehlerfreie Bahnverfolgung. Im Rahmen dieses Kapitels werden zunächst die Grundlagen der Nahterkennung und der zum Einsatz kommende Versuchsaufbau analysiert. Anschließend werden Strategien aufgezeigt, um eine sichere Erkennung der Naht und eine fehlerfreie Vermessung des Fügespalts zu gewährleisten (Bild 4.1).

Anforderungen	Handlungsbedarf
Erkennung und Berechnung von Nahtlage und -form	Strategien für eine sichere Nahterkennung und -vermessung
Strategien zur Anpassung der Prozeßparameter an die Nahtform	Methode zur Entwicklung adaptiver Schweißfunktionen
Bahnführung unter Berücksichtigung des Handhabungsgeräts	Strategien zur dynamikgerechten Bahnführung
Erkennung der Bearbeitungs- und Nahtqualität	Einsatz von Prozeßsensoren

Bild 4.1 Handlungsbedarf im Bereich der Nahterkennung

4.1 Grundlagen der Nahterkennung

Prinzipiell eignet sich jede Konturgeometrie, die vom menschlichen Auge eindeutig erkannt werden kann, für die sensorgestützte Konturverfolgung mit optischer Abtastung. Technisch hängt der Aufwand für die Erkennung stark von der Geometrie der zu detektierenden Kontur ab (HUANG U.A. 1988, YOSHITO 1992). Grundsätzlich von Vorteil sind Konturen, die anhand geometrischer Merkmale wie einer Stufe oder Kante zu erkennen sind, wie dies in Bild 4.2 für einen Überlappstoß oder eine Bauteilkante am Beispiel eines Mehrstreifenlichtschnittsystems dargestellt ist.

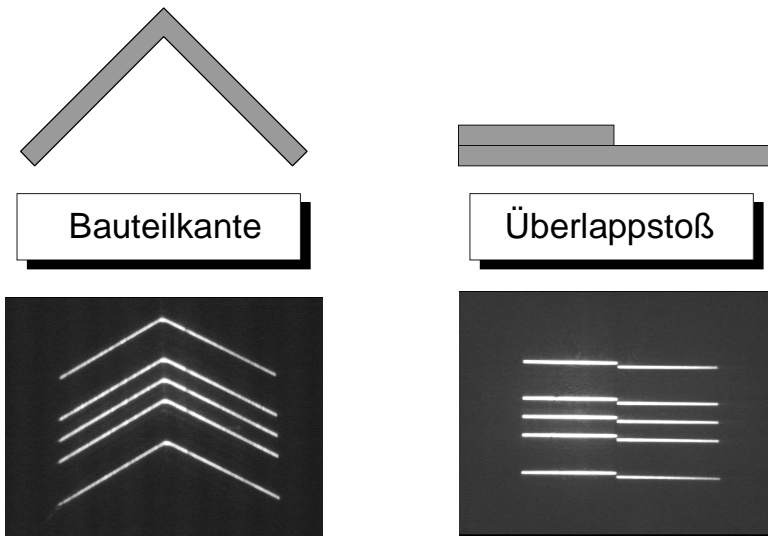


Bild 4.2 Überlappstoß und Bauteilkante im Lichtschnittsystem

Schwierigkeiten bereiten Stoßformen wie der Stumpfstoß, die lediglich über ein Intensitätsminimum im Lichtschnitt erkannt werden können. Hier soll daher der Schwerpunkt auf der Detektion von Stumpfstoßen und verwandten Nahtformen liegen.

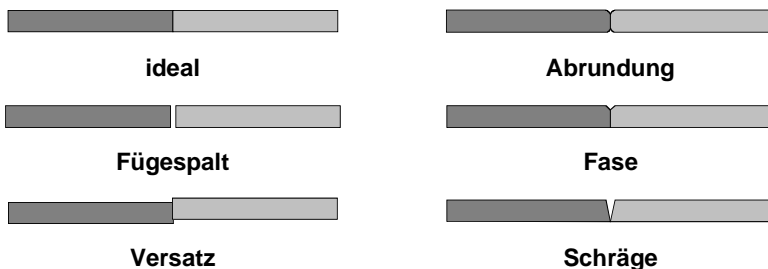


Bild 4.3 Ausprägungen von Fügeanten

Technisch gesehen ist ein Stumpfstoß das Aneinanderfügen von zwei Bauteilen ohne Überlappung. Werden zwei ideale Bauteile im Stumpfstoß aneinander gefügt, ist dieser auch für das Auge nicht mehr erkennbar. In technischen Anwen-

4 Verbesserung der Nahterkennung

dungen liegt in der Regel ein sogenannter realer Stumpfstoß vor. Dieser entsteht durch Abweichungen der Fügekannte von der ideal rechtwinkligen Form oder durch Positionierfehler. Verschiedene Varianten sind in Bild 4.3 dargestellt.

Eine weitere wichtige Einflußgröße aus Sicht der optischen Nahterkennung ist die Bauteiloberfläche. Hier ist das Reflexionsverhalten das entscheidende Merkmal. Um auf der Triangulation basierende optische Meßverfahren einzusetzen, sind diffus reflektierende Oberflächen am besten geeignet (STETTMER 1994). Diese liegen jedoch in der Regel nicht vor.

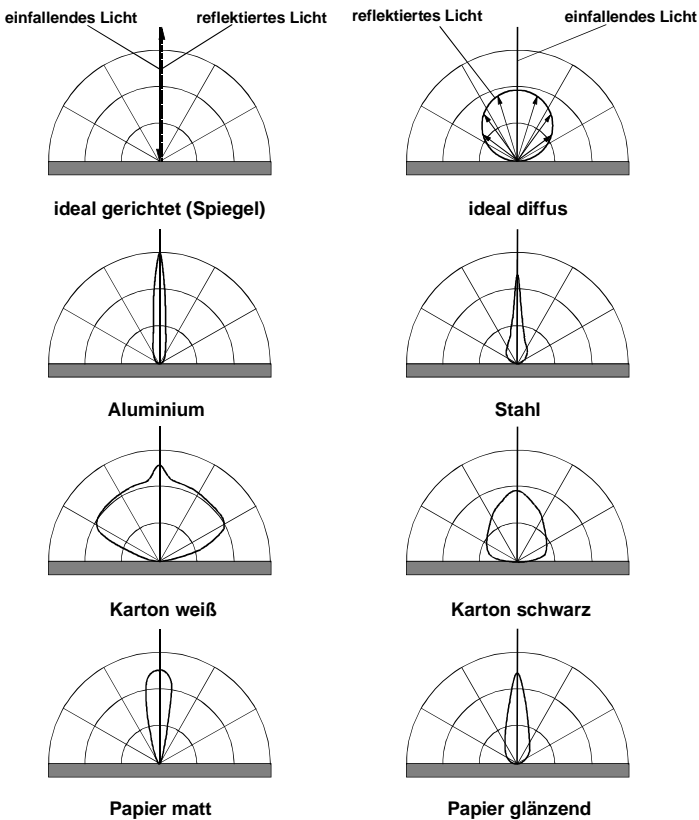


Bild 4.4 Reflexionsverhalten verschiedener Oberflächen (KLEINEMEIER & GIET 1987, SEIDEL 1992, STETTMER 1994)

In Bild 4.4 ist vergleichend das Reflexionsverhalten von Oberflächen verschiedener Werkstoffe, Farben und Rauheiten dargestellt. Es handelt sich dabei lediglich um eine qualitative Darstellung, da die beschriebenen Oberflächen in den vorliegenden Quellen nicht präzise definiert wurden. Es deutlich das unterschiedliche Reflexionsverhalten der verschiedenen Oberflächen zu erkennen. Um ein Nahtfolgesystem zur Verfolgung von Stumpfstößen in einem breiten Anwendungsfeld einzusetzen, muß dennoch eine sichere Erkennung möglich sein. Um dies zu gewährleisten, werden in Abschnitt 4.2 Strategien zur sicheren Nahterkennung für verschiedene Oberflächen aufgezeigt.

4.2 Versuchsbeschreibung

4.2.1 Sensortechnik

Für die Untersuchungen zur Nahterkennung wird das in Bild 4.5 dargestellte Nahtfolgesystem der Firma Trumpf eingesetzt. Es arbeitet nach dem Triangulationsverfahren mit einem Lichtschnitt bei einem Triangulationswinkel von 20° .

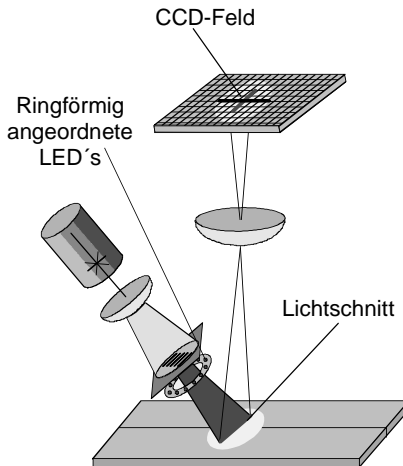


Bild 4.5 Nahtfolgesystem mit Zusatzbeleuchtung

4 Verbesserung der Nahterkennung

Das in Kapitel 3 vorgestellte Grundprinzip eines Lichtschnittsensors wurde hier um eine Zusatzbeleuchtung mittels zwölf kreisförmig angeordneter Leuchtdioden erweitert. Dies erleichtert die Detektion der Fügekante, da zur Auswertung der Helligkeit die gesamte beleuchtete Fläche und nicht nur der Lichtschnitt zur Verfügung steht.

Von Vorteil für die Untersuchungen ist, daß das System eine einfache manuelle Einstellung der Beleuchtungsverhältnisse erlaubt. Es ist möglich, sowohl die Intensität des Lichtschnitts als auch der Leuchtdioden anzupassen. Bei der Versuchsauswertung wird die aktuelle Einstellung jeweils als Prozentsatz der maximal möglichen Helligkeit angegeben.

Weiterhin ist beim Einrichten einer Erkennungsaufgabe durch selektives Ein- und Ausschalten einzelner Leuchtdioden eine Variation der Beleuchtungsrichtung möglich. Dies hat eine entsprechende Verringerung der Beleuchtungsintensität zur Folge und wird bei der Versuchsauswertung entsprechend berücksichtigt.

Das System liefert als Meßgrößen die Seiten- und Höhenlage des Bauteils sowie die Maße des Fügespalts und des Bauteilversatzes mit einer Genauigkeit von 0,05 mm. Die Meßwerte können entweder über eine Anzeige an der Bedienoberfläche abgelesen oder als Analogsignal ausgegeben, mit Hilfe eines Rechners aufgezeichnet und ausgewertet werden.

4.2.2 Versuchsanordnung

Zur Durchführung der Versuche zur Nahterkennung ist der Sensorkopf an einer manuell einstellbaren Dreiachskinematik montiert, die eine Einstellung der Seiten- und Höhenlage sowie des Anstellwinkels erlaubt, wie in Bild 4.6 dargestellt ist. Die zu untersuchenden Bauteile sind entweder fest im Raum montiert oder werden mit Hilfe einer Linearachse in einem einstellbaren Geschwindigkeitsbereich von 1 bis 6 m/min unter dem Sensorkopf hindurch bewegt.

Die Auswahl der Bauteile erfolgte unter dem Kriterium der industriellen Relevanz. Somit wurden Stahlbleche aus St 14, sowie Aluminiumprofile der typischen Strangpreßlegierung AlMgSi0.5 untersucht. Um den Einfluß einer Oberflächenbehandlung abschätzen zu können, wurde die Oberfläche der Aluminiumprofile außerdem durch Fräsen, Eloxieren oder Lackieren mit schwarzer und weißer Farbe modifiziert.

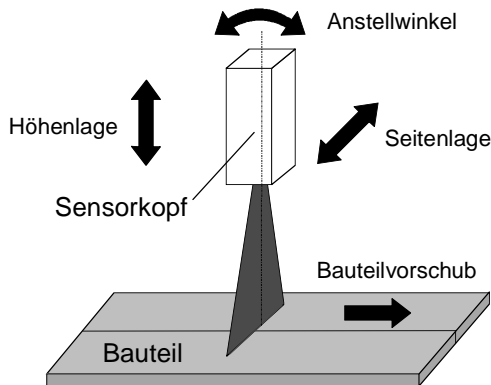


Bild 4.6 Einstellmöglichkeiten in Sensorkopf und Bauteil

Die Stoßkanten wurden alternativ durch Fräsen, Stanzen oder Laserstrahlschneiden vorbereitet. Weitere Eigenschaften der Stoßkante wie Fügespalt oder Bauteilversatz wurden gezielt durch Einfügen von Abstandsblechen eingestellt.

4.3 Optimierung von Nahterkennung und –vermessung

Eine sichere Detektion der Naht bildet die Grundlage der Nahtvermessung. Daher werden die Möglichkeiten für eine sichere Detektion der Lage der Fügekante aufgezeigt, bevor die Vermessung von Fügespalt und Bauteilversatz untersucht wird.

4.3.1 Verbesserung der Nahterkennung

Zunächst werden die bei der Stumpfstößeerkennung zum Einsatz kommenden Grundlagen der Bildverarbeitung vorgestellt. Diese bilden die Grundlage, um anschließend die Voraussetzungen für eine sichere Nahterkennung zu erarbeiten.

4.3.1.1 Grundlagen der Nahterkennung

Die Erkennung eines Stumpfstoßes basiert auf der Auswertung des von der Bauteiloberfläche reflektierten Lichts. Hier ergibt sich an der Stelle der Fügekante

4 Verbesserung der Nahterkennung

ein Minimum, das von der Bildverarbeitung erkannt und ausgewertet wird. Es wird zwischen Lichtschnitt- und Graubildauswertung unterschieden, wie in Bild 4.7 dargestellt ist.

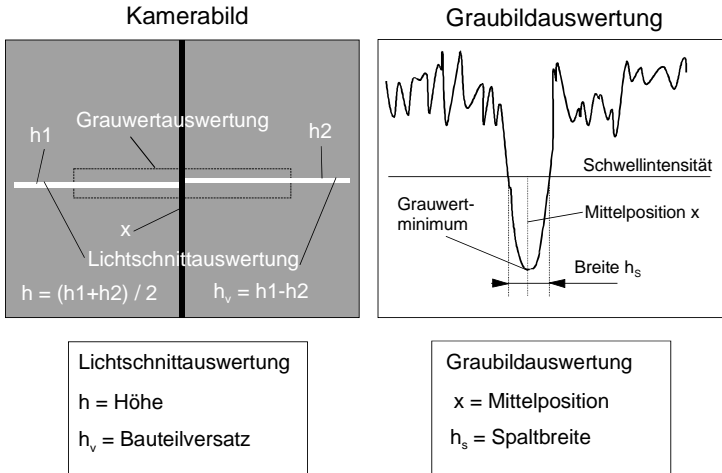


Bild 4.7 Lichtschnitt- und Graubildauswertung

In der Lichtschnittauswertung wird die Höhe des Lichtschnitts im CCD-Feld bestimmt. Daraus wird nach dem Triangulationsprinzip der Abstand des Sensors zur Bauteiloberfläche berechnet. Zudem ist es möglich, durch Auswertung des Höhenunterschieds des Lichtschnitts auf der rechten und linken Seite einen Versatz zwischen den Fügepartnern oder im Fall einer Kehlnaht am Überlappstoß die Spalthöhe zu detektieren.

Die Detektion der Fugekante erfolgt mit Hilfe der Graubildauswertung. Dabei wird das Intensitätsminimum auf Höhe des zuvor detektierten Lichtschnitts erfaßt. Die Breite des Bereichs unterhalb der Schwelligensität erlaubt eine Aussage über die aktuelle Spaltbreite.

4.3.1.2 Untersuchungen zur Nahterkennung

Für eine erfolgreiche Graubildauswertung ist es erforderlich, daß die Gesamtintensität des reflektierten Lichts annähernd konstant bleibt. Wie in Bild 4.4 dargestellt wurde, schwankt die Intensität des reflektierten Lichts in Abhängigkeit

4.3 Optimierung von Nahterkennung und –vermessung

von der Bauteiloberfläche und dem Betrachtungswinkel. Aus diesem Grund ist eine Anpassung der Intensität des eingestrahlichten Lichts notwendig. Die Ergebnisse sind in Bild 4.8 dargestellt. Hier sind für verschiedene Oberflächen die Einstellung der Helligkeit der Leuchtdioden, die experimentell ermittelt wurde, um eine konstante Ausleuchtung der Kamera zu erzielen, aufgetragen. Es ist ein deutlicher Einfluß der Art der Oberfläche zu erkennen.

Oberfläche	Intensität der Leuchtdioden [%]
Stahlblech	40
Aluminiumblech	46,6
Aluminium gefräst (glänzend)	86,6
Aluminium eloxiert (matt)	40
Lackiert weiß	46,6
Lackiert schwarz	60

Bild 4.8 Eingestrahlte Intensität für verschiedene Oberflächen

Für Oberflächen wie Aluminium, die stark gerichtet reflektieren, besteht außerdem ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem Anstellwinkel zum Bauteil und dem Reflexionsverhalten. In Bild 4.9 wird dies anhand der optimalen eingestrahlichten Intensität für verschiedene Anstellwinkel verdeutlicht.

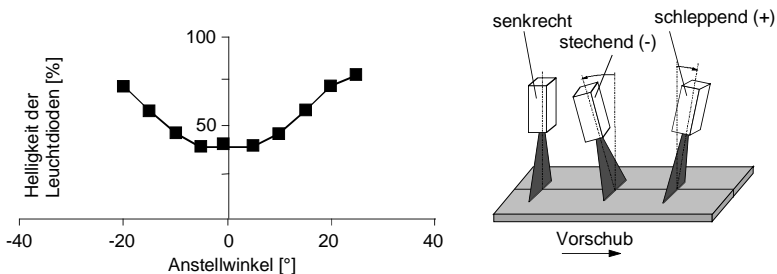


Bild 4.9 Eingestrahlte Intensität über dem Anstellwinkel für Aluminium

Aus diesen Versuchen wird deutlich, daß bei Anwendungen, bei denen Schwankungen des Anstellwinkels auftreten, eine laufende Anpassung der Belichtung während der Bearbeitung erforderlich ist, um eine konstante Intensität im Graubild zu erreichen. Dies kann durch eine automatische adaptive Belichtungsregelung erreicht werden (HORN 1994).

4.3.2 Vermessung von Fügespalten

Wenig Beachtung wurde bislang der Frage des Einflusses der im Sensorsystem eingestellten Beleuchtung sowie der Bauteil- und Oberflächeneigenschaften auf die Breite des gemessenen Fügespalts und Bauteilversatzes geschenkt. HUWER (1993) hat entsprechende Untersuchungen lediglich für ein auf der Stereobildverarbeitung basierendes System durchgeführt. Für auf der Triangulation basierende Verfahren soll die Vermessung der Stoßgeometrie daher hier genauer untersucht werden.

Die Grundlage für die Optimierung der Spaltvermessung bildet eine Analyse der zu detektierenden Stoßformen. Es werden die industriell am häufig anzutreffenden Oberflächen Stahlblech St 14 und Aluminium AlMgSi0.5 ausgewählt. Dabei werden gefräste, laserstrahlgescchnittene und gestanzte Fügekanten untersucht.

4.3.2.1 Analyse der Fügekanten

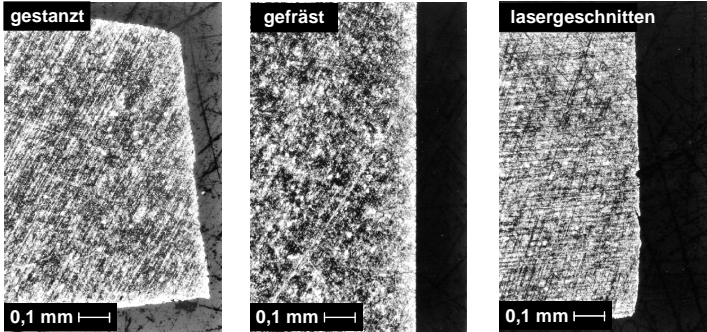
Das Trennen von Bauteilen erzeugt je nach dem verwendeten Verfahren eine charakteristische Fügekante. In Bild 4.10 sind die Geometrien der untersuchten Kanten anhand von Querschliffen dargestellt.

Laserstrahlgescchnittene und gefräste Fügekanten sind sehr gut an die Form des idealen Stumpfstoßes angenähert. Der Winkel zwischen Blechoberseite und Fügekante beträgt annähernd 90° . Abweichungen ergeben sich für beide Werkstoffe bei den gestanzten Proben. Hier ist deutlich ein Unterschied zwischen Ober- und Unterseite des Blechs zu erkennen. Die Fügekanten liegen schräg zur Bauteiloberfläche, so daß sich bereits bei einem technischen Nullspalt ein Fügespalt zwischen den Bauteilen ergibt.

Wie anhand einer größeren Anzahl an Stichproben nachgewiesen wurde, sind die beschriebenen Querschnitte repräsentativ für die verwendeten Bauteile. Mit anderen Werkstoffen, Bauteildicken oder zum Einsatz kommenden Trennwerkzeu-

gen werden qualitativ die gleichen Ergebnisse erzielt. Lediglich bei gefrästen Proben ist in Einzelfällen eine leichte Fase durch ein Entgraten der Bauteile zu erkennen.

Aluminium (AlMgSi 0.5)



Stahl (St 14)

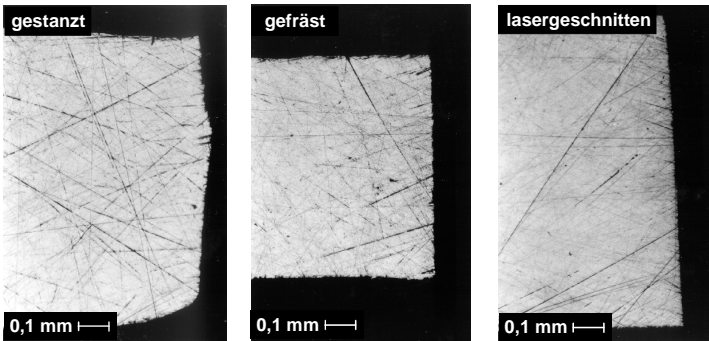


Bild 4.10 Beispielhafte Querschliffe von Fügeanten (Maßstab 1:50)

4.3.2.2 Einfluß der Beleuchtung auf die Nahtvermessung

Zunächst wurde der Einfluß der Beleuchtung auf die gemessene Spaltbreite und den Bauteilversatz untersucht. Dazu wurden jeweils zwei mit dem Laser geschnittene Stahl- und Aluminiumbleche mit einem technischen Nullspalt und einem Bauteilversatz von 0,5 mm verwendet. Am Sensorsystem wurden innerhalb der zulässigen Grenzen, in denen eine Detektion der Naht noch möglich ist,

4 Verbesserung der Nahterkennung

sowohl die Helligkeit der Leuchtdioden und des Lichtschnitts als auch die Beleuchtungsrichtung variiert und die jeweils gemessene Spaltbreite aufgenommen.

Die mittlere gemessene Spaltbreite für die untersuchten Beleuchtungsverhältnisse lag zwischen 0,12 und 0,15 mm, der Bauteilversatz zwischen 0,51 und 0,57 mm. Dies entspricht in etwa der Streuung der Meßwerte bei unveränderter Beleuchtung. Es konnte somit kein Einfluß der Beleuchtungsverhältnisse auf den gemessenen Wert der Spaltbreite oder des Bauteilversatzes festgestellt werden. Auch die gleichzeitig als Referenz für die Gültigkeit der Messung aufgenommene Seiten- und Höhenlage der Naht war unabhängig von der Beleuchtung.

In allen folgenden Versuchen wurde mit konstanter Beleuchtung mit der für die jeweilige Anwendung optimalen Einstellung gearbeitet.

4.3.2.3 Einfluß der Fügekanten auf die Nahtvermessung

Wie sich bereits in den Versuchen zum Einfluß der Beleuchtung andeutete, besteht eine Abweichung zwischen der realen und der gemessenen Spaltbreite. Dies wurde in den im folgenden beschriebenen Versuchen genauer analysiert.

Vermessung der Spaltbreite

Zur Analyse der Spaltbreitenmessung wurden laserstrahlgeschnittenes, gefrästes und gestanztes Aluminium- und Stahlblech untersucht. An den Proben wurde die Spaltbreite in Schritten von 0,1 mm zwischen 0,0 und 1,0 mm variiert und die vom Sensorsystem gemessene Spaltbreite aufgenommen. Es war in allen Fällen möglich, die Lage der Stoßkante vom Nullspalt ausgehend bis zu einer gemessenen Spaltbreite von einem Millimeter zu detektieren.

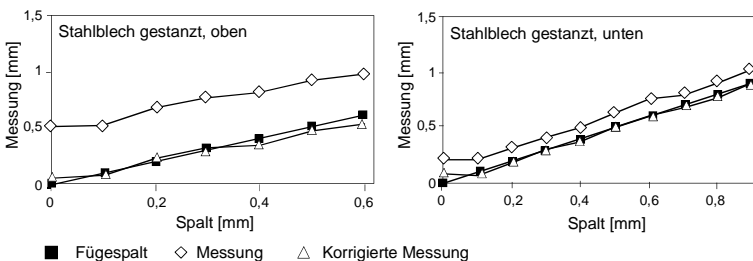


Bild 4.11 Verlauf der Spaltbreite für gestanztes Stahlblech

Es zeigte sich für alle Stoßformen eine positive Abweichung zwischen realer und gemessener Spalthöhe. Dies ist auf die nicht ideal rechtwinklige Form der Stoßkanten zurückzuführen. Die Abweichung ist über den Spaltbreitenverlauf annähernd konstant, wie in Bild 4.11 beispielhaft für gestanztes Stahlblech dargestellt ist. Es ist möglich, den gemessenen Spaltbreitenverlauf mit einem konstanten Offset zu korrigieren. In den Versuchen in Bild 4.11 wurde der Mittelwert der Abweichungen als Korrekturwert angenommen.

Die Höhe der mittleren Abweichung variiert für verschiedene Werkstoffe und Kantenvorbereitungen (Bild 4.12). Charakteristisch für gestanzte Proben ist ein Unterschied zwischen der gemessenen Spaltbreite an Ober- und Unterseite. Dieser kann mit der ungleichmäßigen Kantenform (vgl. Bild 4.10) erklärt werden. Bei laserstrahlgeschnittenen und gefrästen Proben, deren Querschnitt sehr nah an der Form eines idealen Stumpfstoßes liegt, ist auch der Offset nur gering.

Werkstoff	Fügekante	Abweichung in der Spaltbreite
Stahl	gestanzt oben	0,45
Stahl	gestanzt unten	0,11
Aluminium	gestanzt oben	0,10
Aluminium	gestanzt unten	0,09
Aluminium	lasergeschnitten	0,03
Aluminium	gefräst	0,09

Bild 4.12 Abweichungen in der Spaltbreitenmessung

Vermessung des Bauteilversatzes

An den oben beschriebenen Proben wurden ebenfalls Versuche zur Messung eines definiert eingestellten Bauteilversatzes durchgeführt. Hier lagen die Abweichungen zwischen dem realen und dem gemessenen Versatz für alle Fügekanten unter 0,05 mm. Dies liegt im Bereich der Meßgenauigkeit des Sensorsystems. Es kann somit davon ausgegangen werden, daß die Höhe des Bauteilversatzes unab-

4 Verbesserung der Nahterkennung

hängig von Oberfläche und Fügekante gemessen wird. Eventuelle Abweichungen zwischen realem und gemessenem Bauteilversatz sind auf die Meßungenauigkeit des Sensorsystems zurückzuführen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß insbesondere bei Stahlwerkstoffen eine Berücksichtigung der Fügekante bei der Spaltbreitenmessung erforderlich ist. Dies kann durch Programmierung eines konstanten Korrekturwertes geschehen. Die Höhe des Offset hängt von der Geometrie der Fügekante ab. Eine eindeutige Vorhersage der Abweichung allein durch Analyse des Querschliffs der Fügekante ist nicht möglich. Es wird daher empfohlen, den Korrekturwert experimentell zu bestimmen. Dies kann aufgrund des konstanten Abstands zwischen realem und gemessenem Spalt durch eine einmalige Vermessung des Spalts bei einer beliebigen bekannten Spaltbreite geschehen.

Die gemessene Seiten- und Höhenlage sowie der Bauteilversatz werden durch die Geometrie der Fügekante nicht beeinflusst.

4.4 Zusammenfassung und Bewertung

Insbesondere bei der Detektion von Stumpfstößen wird die Nahterkennung stark durch die Bauteiloberfläche beeinflusst. Dieses Verhalten konnte auf das Reflexionsverhalten der Oberfläche zurückgeführt werden. Bei einer konstanten Intensität des reflektierten Licht kann eine sichere Nahterkennung gewährleistet werden. Eine konstante Ausleuchtung der Kamera kann durch eine entsprechende Anpassung der Beleuchtungsintensität mit Hilfe einer automatischen Belichtungsregelung sichergestellt werden.

Die Breite des gemessenen Fügespalts hängt von der Geometrie der Fügekante der Schweißpartner ab. Da der Abstand zwischen dem realen und gemessenen Fügspalt unabhängig von der Spaltbreite konstant bleibt, ist die Bestimmung des Offset einfach durch einmalige Vermessung eines bekannten Spaltes möglich.

Durch die aufgezeigten Strategien zur sicheren Nahterkennung und -vermessung, ist es nun möglich, auf einfache Weise eine Anpassung der Sensorgrößen an die Bauteileigenschaften vorzunehmen. Dies bringt insbesondere Vorteile bei Oberflächen wie Aluminium, die eine stark gerichtete Reflexion aufweisen oder bei Fügekanten, die deutlich von der ideal rechtwinkligen Form abweichen. Hier war die Einrichtung einer Erkennungs- und Vermessungsaufgabe bisher immer mit

großem Aufwand verbunden. Nun ist hierfür eine einmalige Einstellung der Beleuchtungsintensität, bzw. Vermessung des Fügespalts ausreichend.

5 Adaptive Schweißfunktionen

Die bei der Auslegung eines Schweißprozesses vorgesehene Stoßform ist bei der Bearbeitung von realen Bauteilen Abweichungen unterworfen. Dies gilt insbesondere für Fügespalte zwischen den Schweißpartnern. Durch geeignete Anpassung der Prozeßparameter an die Stoßform ist eine Vermeidung dieser Schweißfehler möglich. Dazu sind jedoch funktionale Zusammenhänge zwischen der Spaltbreite und den Prozeßparametern, sogenannte adaptive Schweißfunktionen, erforderlich. Im Rahmen dieses Kapitels werden zunächst die zur Erarbeitung adaptiver Funktionen erforderlichen Grundlagen aufgezeigt und anschließend eine Methode zur effizienten Erarbeitung adaptiver Schweißfunktionen erarbeitet (Bild 5.1).

Anforderungen	Handlungsbedarf
Erkennung und Berechnung von Nahtlage und -form	Strategien für eine sichere Nahterkennung und -vermessung
Strategien zur Anpassung der Prozeßparameter an die Nahtform	Methode zur Entwicklung adaptiver Schweißfunktionen
Bahnführung unter Berücksichtigung des Handhabungsgeräts	Strategien zur dynamikgerechten Bahnführung
Erkennung der Bearbeitungs- und Nahtqualität	Einsatz von Prozeßsensoren

Bild 5.1 Handlungsbedarf

5.1 Grundlagen adaptiver Schweißfunktionen

Als Grundlage für die Entwicklung adaptiver Schweißfunktionen werden hier die wichtigsten Definitionen, sowie vorhandene Ansätze und deren Defizite analysiert.

5.1.1 Begriffsbestimmung

Die Funktionsweise adaptiver Schweißfunktionen beruht auf dem Prinzip eines adaptiven Regelsystems. Unter einem adaptiven Regelsystem wird eine Regelung, bei der sich beeinflussbare Eigenschaften automatisch auf veränderliche oder unbekannte Prozeßeigenschaften einstellen, verstanden. Synonyme für den Begriff „adaptiv“ sind im Sinne dieser Definition selbsteinstellend, selbstanpassend oder selbstoptimierend (CZICHOS 1989, S. 175-177).

Adaptive Regelsysteme sind dadurch gekennzeichnet, daß sie in der Lage sind, eine Selbsteinstellung ihrer Parameter, Struktur oder Signale vorzunehmen. Die in diesem Kapitel beschriebene Anwendung zählt zu der Gruppe der parameteradaptiven Methoden. Dabei wird das Verfahren der gesteuerten Adaption eingesetzt, dessen Prinzip in Bild 5.2 dargestellt ist.

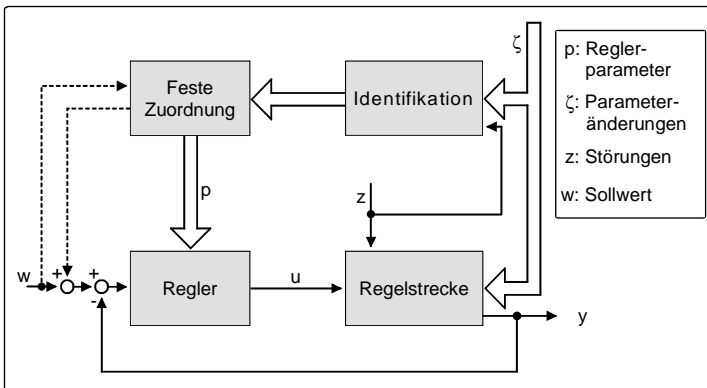


Bild 5.2 Prinzip der gesteuerten Adaption (CZICHOS 1989)

Unter der Voraussetzung, daß das Verhalten eines Regelsystems für unterschiedliche Parameteränderungen ζ der Regelstrecke und Störungen z bekannt ist, wird die erforderliche Anpassung der Reglerparameter p über eine zuvor berechnete **feste Zuordnung** vorgenommen. Dabei handelt es sich genau genommen um keine Regelung, sondern eine Steuerung. Im Anwendungsfall des adaptiven Schweißens entspricht die Parameteränderung ζ der aktuellen Spaltbreite, während die Reglerparameter p den anzupassenden Prozeßparametern entsprechen.

5.1.2 Grundlagen der Überbrückung von Fügspalten

Hier werden zunächst die prinzipiellen Möglichkeiten aufgezeigt, Fügspalte zu überbrücken. Vorhandene Ansätze werden im Hinblick auf ihre Eignung zur Spaltüberbrückung untersucht und deren Defizite aufgezeigt.

5.1.2.1 Möglichkeiten der Spaltüberbrückung

Bei der Überbrückung von Fügspalten kann zwischen zwei Ansätzen unterschieden werden, die in Bild 5.3 dargestellt sind.

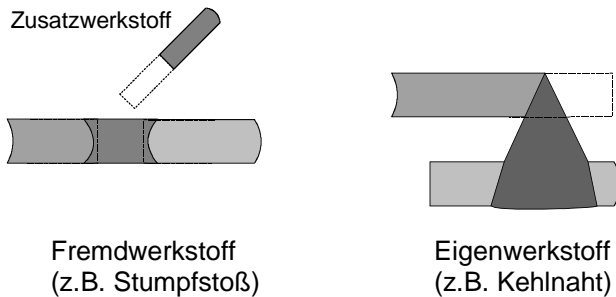


Bild 5.3 Prinzipien der Spaltüberbrückung

Grundsätzlich ist es bei allen Nahtformen möglich, einen extern zugeführten Fremdwerkstoff zur Spaltüberbrückung zu verwenden (KAPPELSBERGER 1987). Dies ist in Bild 5.3 am Beispiel der I-Naht am Stumpfstoß dargestellt. Als Fremdwerkstoff kommt dabei in der Regel drahtförmiger Zusatzwerkstoff, im weiteren als Zusatzdraht bezeichnet, zum Einsatz.

Einige Nahtformen wie die Kehlnaht am Überlappstoß erlauben es, das Material eines Fügepartners zur Spaltüberbrückung zu nutzen. Dies ist insbesondere in den Fällen anzustreben, in denen aus Sicht der Metallurgie kein Zusatzwerkstoff erforderlich ist und dieser lediglich zur Spaltüberbrückung eingesetzt würde.

5.1.2.2 Stand der adaptiven Schweißtechnik

Die Grundlage einer erfolgreichen Spaltüberbrückung bildet die Kenntnis der einzustellenden Prozeßparameter. Dabei sind der zu verschweißende Werkstoff,

die Bauteileigenschaften und die Stoßform für die aktuelle Spaltbreite zu berücksichtigen. Ansätze für funktionale Zusammenhänge zwischen Spaltbreite und Prozeßparametern sind sowohl für die I-Naht am Stumpfstoß als auch für die Kehlnaht am Überlapstoß erarbeitet worden.

Vorhandene Ansätze zur Verschweißung einer mit einem Fügespalt behafteten **I-Naht am Stumpfstoß** beruhen auf einer Spaltüberbrückung sowohl ohne als auch mit extern zugeführtem Zusatzwerkstoff. Wird kein Zusatzwerkstoff verwendet, ist eine Spaltüberbrückung sinnvoll lediglich beim Verschweißen unterschiedlich dicker Bleche möglich. Hier wird die Spaltfüllung durch verstärktes Abschmelzen des dickeren Blechs erreicht. Mit Hilfe dieses Ansatzes können jedoch lediglich Fügespalte im Bereich von 30% der kleineren Blechdicke überbrückt werden (HSU U.A. 1998).

Falls größere Fügespalte zu überbrücken sind, ist eine Zufuhr von Zusatzwerkstoff erforderlich. Dabei soll das zugeführte Drahtvolumen dem aktuellen Spaltvolumen entsprechen (HEIDER 1991). Die Drahtfördergeschwindigkeit v_d wird hier aus der Spaltbreite h_s , der Blechdicke t , dem Drahtdurchmesser D_d , der Vorschubgeschwindigkeit v und dem gewünschten Füllgrad f_d nach der Formel

$$v_d = \left(\frac{4 \cdot f_d \cdot t \cdot v}{\pi \cdot D_d^2} \right) h_s \quad (5.1)$$

berechnet (BRAUMÖLLER U.A. 1999, HUWER 1993).

Für den Fall konstanter Einflußgrößen besteht also ein linearer Zusammenhang zwischen der Spaltbreite und der Drahtfördergeschwindigkeit. Bei größeren Spaltbreiten wird eine Anpassung der Streckenenergie über Laserstrahlleistung und Schweißgeschwindigkeit gefordert (DILTNEY U.A. 1994A). Es werden jedoch keine Angaben über funktionale Zusammenhänge zwischen Spaltbreite, Drahtfördergeschwindigkeit und der erforderlichen Anpassung der Streckenenergie gemacht.

Einflüsse auf das Schweißgutvolumen durch Gefügemwandlungen während des Schweißens sind bei diesen Betrachtungen nicht berücksichtigt. Bei den in dieser Arbeit betrachteten Werkstoffen St 14 und AlMgSi0.5 liegen die resultierenden relativen Volumenänderungen nach dem Schweißprozeß bei einem Wert von unter einem Prozent (DAEVES 1953, KAMMER 1998). Aus diesem Grund werden die Einflüsse durch Gefügemwandlungen im Weiteren ebenfalls vernachlässigt.

Für die **Kehlnaht am Überlappstoß** ist nachgewiesen worden, daß eine Spaltüberbrückung allein durch Abschmelzen des Oberblechs ohne Zufuhr von Zusatzwerkstoff möglich ist. Dies geschieht durch eine Kombination aus Verschiebung des Fokus auf das Oberblech und gleichzeitiger Verringerung der Schweißgeschwindigkeit. Der in Bild 5.4 am Beispiel einer Verschweißung von Stahlblechen einer Dicke von 0,8 mm dargestellte lineare Zusammenhang wurde experimentell ermittelt und durch weitere Schweißversuche bestätigt (PISCHETSRIEDER U.A. 1995). Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Werkstoffe und Werkstückdicken ist möglich, erfordert jedoch eine aufwendige experimentelle Anpassung der Funktionen (PISCHETSRIEDER & MEIER 1997). Ansätze zur Berechnung der funktionalen Zusammenhänge existieren derzeit nicht.

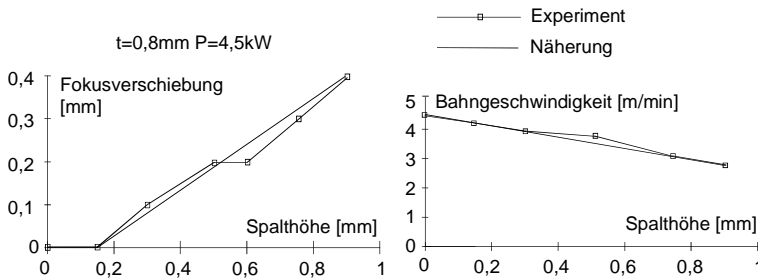


Bild 5.4 Adaptive Schweißfunktion der Kehlnaht am Überlappstoß

Für die Spaltüberbrückung an der **I-Naht am Überlappstoß** existiert ein Ansatz zur Spaltüberbrückung basierend auf einer Prozeßregelung der Parameter Bahngeschwindigkeit und Drahtvorschub. Direkte Zusammenhänge zwischen Fügespalt und Prozeßparametern wurden nicht erarbeitet, da diese Regelung allein auf der Messung der durch den Fügespalt beeinflussten optischen und akustischen Prozeßsignale beruht (GEBHARD 1991).

5.1.2.3 Defizite der vorhandenen Ansätze

Die im vorherigen Abschnitt vorgestellten Ansätze zur Spaltüberbrückung weisen einige Defizite auf, da sie jeweils nur in einem engen Anwendungsbereich eingesetzt werden können.

Der rechnerische Ansatz zur Spaltüberbrückung bei der I-Naht am Stumpfstoß ist nicht allgemein gültig, da bei größeren Spalthöhen eine Anpassung der Strecken-

energie erforderlich ist, um die zugeführte Drahtmenge aufzuschmelzen. Es existieren jedoch keine Ansätze zur Bestimmung der Streckenenergie.

Dieser Ansatz ist zudem nicht bei Werkstoffen anwendbar, die aufgrund der metallurgischen Eigenschaften eine Zufuhr von Legierungselementen mittels Zusatzdraht benötigen, da der fehlende Zusatzwerkstoff bei geringen Spaltmaßen zu einem deutlichen Abfall der Nahtqualität führt. In Bild 5.5 ist dies anhand des vergleichenden Verlaufs der mittleren Festigkeit einer Schweißung der Aluminiumlegierung AlMgSi0.5 dargestellt, bei der die Drahtmenge nach (5.1) berechnet wurde. Bei diesem Werkstoff wird der Zusatzwerkstoff zur Verminderung der Heißrißneigung benötigt.

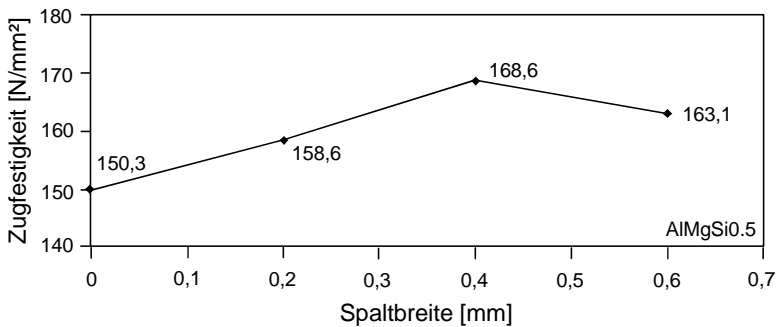


Bild 5.5 Festigkeitsverlauf bei unterschiedlichen Fügespalten

Für Kehlnähte wurde die Machbarkeit einer Spaltüberbrückung durch adaptives Schweißen nachgewiesen. Es sind jedoch keine Ansätze vorhanden, um die Lösungen auf andere Werkstoffe und Anwendungen zu übertragen.

Aufgrund der beschriebenen Defizite sollen hier Vorgehensweisen erarbeitet werden, mit deren Hilfe adaptive Schweißfunktionen schnell und einfach ermittelt werden können.

5.2 Versuchsbeschreibung

5.2.1 Auswahl der Werkstoffe und Nahtformen

Unter den industriell relevanten Nahtformen werden für die Durchführung der Versuche die Kehlnaht und der Stumpfstoß ausgewählt. Bei den Stumpfstößen, sollen insbesondere Werkstoffe, die aufgrund der Werkstoffeigenschaften Zusatzwerkstoff benötigen, betrachtet werden, da hier die bekannten Ansätze (vgl. Abschnitt 5.1.2.2) nicht eingesetzt werden können. Für Nahtformen, bei denen die Spaltbreite mit optischen Nahtfolgesensoren nicht vermessbar ist wie Überlapp- oder T-Stöße, können derzeit keine adaptiven Schweißfunktionen eingesetzt werden, da eine direkte Messung der Spalthöhe mittels Prozeßsensoren nicht möglich ist, wie in Abschnitt 3.2.2 aufgezeigt wurde.

Auch die Auswahl der Werkstoffe erfolgte unter dem Kriterium der industriellen Relevanz. Als Beispiel für einen einfach ohne Zusatzwerkstoff zu verschweißenden Werkstoff wurde Stahlblech St 14, ein typischer Werkstoff für Umformbauteile, ausgewählt. Dieser Werkstoff kommt für die Untersuchungen an der Kehlnaht am Überlappstoß zum Einsatz. Dabei werden unbeschichtete Bleche mit Dicken von 0,6 mm, 0,8 mm und 1,2 mm sowie verzinkte Bleche der Stärke 0,8 mm untersucht.

Die Schweißungen zur Spaltüberbrückung an der I-Naht am Stumpfstoß werden an Bauteilen der Legierung AlMgSi0.5 durchgeführt, einem typischen Material für Strangpreßprofile. Bei diesem Werkstoff ist eine Zufuhr von Zusatzwerkstoff erforderlich, um die Bildung von Heißrissen zu verhindern. Hierfür wird der Zusatzwerkstoff AlSi5 in Drahtform mit einem Durchmesser von 1,0 mm eingesetzt.

Um eine unerwünschte Veränderung der Bauteil- und Stoßgeometrie durch die starke Wärmedehnung von Aluminiumwerkstoffen während der Schweißung zu vermeiden, wurden für die Versuche anstelle von Blechen Strangpreßprofile mit einer Stärke von 1,2 mm verwendet, die im Stumpfstoß aneinander gefügt wurden, wie in Bild 5.6 dargestellt ist.

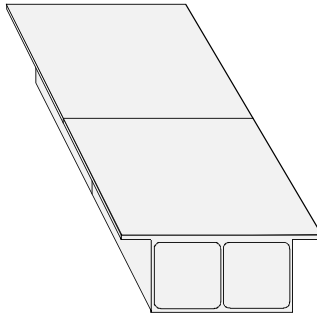


Bild 5.6 Versuchsbauteile für die I-Naht am Stumpfstoß

Die zum Einsatz kommenden Werkstoffe wurden exemplarisch ausgewählt, um anhand des Beispiels eine Methode zur Entwicklung adaptiver Funktionen zu erarbeiten. Das Ziel der Arbeiten soll darin bestehen, eine einfach auf neue Anwendungen übertragbare Lösung zu finden, da eine Berücksichtigung aller möglichen Werkstoffe und Stoßformen ohnehin nicht möglich ist. Das Kriterium der Übertragbarkeit gilt dabei sowohl für die Werkstoffe als auch für die Stoßformen.

5.2.2 Versuchsaufbau

Die Schweißversuche an den Proben aus St 14 werden mit einem CO₂-Laser der Firma Trumpf einer maximalen Leistung von 5 kW durchgeführt. Dieser kann sowohl im kontinuierlichen als auch im gepulsten Betrieb eingesetzt werden. Die Strahlführung erfolgt mit Hilfe eines flexiblen Spiegelsystems. Der Strahl ist mit einer Brennweite von 300 mm auf einen Fokusbereich von 0,6 mm fokussiert. Das Schutzgas Argon wird koaxial durch die Schweißdüse zugeführt.

Für die Schweißungen an den Aluminiumbauteilen wird aufgrund des besseren Absorptionsverhaltens von Aluminium bei kürzeren Wellenlängen ein Nd:YAG-Laser der Firma HAAS in Verbindung mit einer Lichtleitfaser zur Strahlführung eingesetzt. Dieser verfügt über eine maximale Leistung von 3 kW und wird mit einer Brennweite von 150 mm auf einen Fokusbereich von 0,3 mm fokussiert. Das Schutzgas, eine Mischung aus je 50 Prozent Argon und Helium, wird stechend über eine seitlich montierte Düse an die Bearbeitungsstelle geleitet, wie in Bild 5.7 dargestellt ist. Der Zusatzwerkstoff wird schleppend zugeführt.

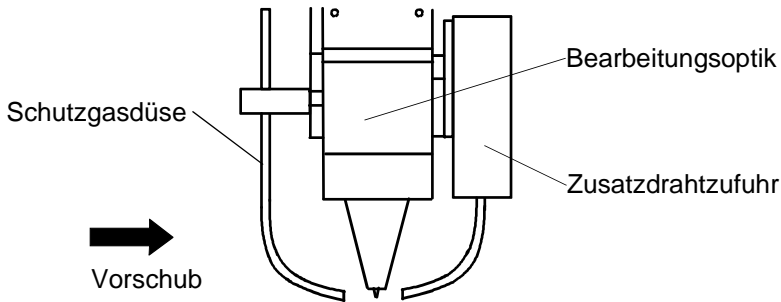


Bild 5.7 Bearbeitungskopf zum Verschweißen von Aluminiumbauteilen

Zur Erzeugung der Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Bauteil kommen zwei verschiedene Ansätze zum Einsatz. In den Grundlagenuntersuchungen wird ein Bauteilvorschub definierter Geschwindigkeit mit Hilfe einer Linearachse realisiert. Um Verschiebungen der Fokusslage und des Auftreffpunktes einzustellen, ist der Bearbeitungskopf an der bereits in den Versuchen zur Nahterkennung zum Einsatz kommenden Kinematik (vgl. Bild 4.6) montiert, die eine manuelle Anpassung der Position mit einer Genauigkeit von 0,1 mm erlaubt. Zu untersuchende Fügespalte werden gezielt mit Hilfe von Einlegeblechen eingestellt.

In den Untersuchungen zur Integration der adaptiven Schweißfunktionen in ein Sensorsystem erfolgt die Bewegung des Bearbeitungskopfes durch einen Knickarmroboter der Firma KUKA als Handhabungsgerät, bei dem die Bearbeitungsbahn mit Hilfe des Nahtfolgesensors SCOUT generiert wird. Die Vermessung der Spaltbreite und Anpassung der Prozeßparameter entsprechend der zu erarbeitenden adaptiven Funktionen wird ebenfalls mit Hilfe des Nahtfolgesensors durchgeführt.

5.3 Entwicklung adaptiver Schweißfunktionen

Zunächst wird hier der Einfluß von Fügespalten auf das Schweißergebnis untersucht und prozeß- und sensortechnische Möglichkeiten für deren Kompensation erarbeitet. Bei der Entwicklung einer Methode zur effizienten Erarbeitung adaptiver Schweißfunktionen werden sowohl analytische als auch experimentelle Ansätze untersucht.

5.3.1 Versuche zur Auswahl geeigneter Prozeßparameter

Es ist derzeit aufgrund der Komplexität des Laserschweißprozesses nicht möglich, mit rein analytischen Modellen die Prozeßparameter einer gegebenen Anwendung zu bestimmen. Dies soll auch nicht Gegenstand dieser Arbeit sein. Es wird in den hier zu entwickelnden Ansätzen davon ausgegangen, daß die optimalen Parameter für eine Nullspaltschweißung bereits bekannt sind oder experimentell mit geeigneten Methoden (z.B. BEHLER 1993) erarbeitet wurden.

In einem ersten Schritt sollen die Parameter erarbeitet werden, die geeignet sind durch gezielte Anpassung einen Fügespalt zu überbrücken. Dies wird hier beispielhaft für die Kehlnaht am Überlappstoß, zunächst ohne den Einsatz von Zusatzwerkstoff, erläutert. Als Grundlage für die Bewertung der Schweißversuche soll die Analyse des erforderlichen Nahtquerschnitts A_{Naht} dienen, die in Bild 5.8 dargestellt ist.

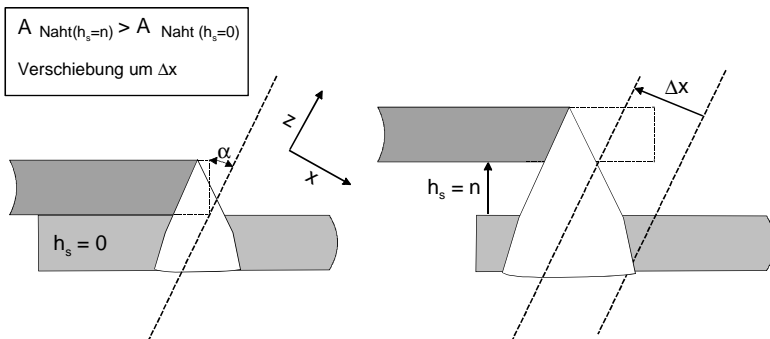


Bild 5.8 Theoretische Überlegungen zur Spaltüberbrückung

Die Größe des Anstellwinkels α wird durch die Randbedingungen der umzusetzenden Anwendung bestimmt. Um einen möglichst großen tragenden Querschnitt zu erreichen, sollte der Strahl so flach wie möglich angestellt werden. Aus Gründen der Einkopplung der Laserstrahlung ins Werkstück, der Forderung nach einer Durchschweißung oder der Zugänglichkeit zur Bearbeitungsstelle kann jedoch in der Regel nur ein kleinerer Winkel umgesetzt werden. Bei der Kehlnaht am Überlappstoß sind Anstellwinkel zwischen 0° und 45° üblich. Die im folgenden angestellten Betrachtungen sind unabhängig vom Wert von α gültig, solange eine Durchschweißung und ein vollständiges Abschmelzen des Oberblechs vorliegt.

5 Adaptive Schweißfunktionen

Aus einer Betrachtung der Querschnittsflächen geht hervor, daß zur Überbrückung eines Fügespalts durch Abschmelzen des Oberblechs sowohl eine Vergrößerung des Nahtquerschnitts als auch eine Verschiebung der Naht in negativer x-Richtung erforderlich ist.

Die Auswahl der zu untersuchenden Schweißparameter erfolgt entsprechend DIN EN ISO 9956, TEIL 11 (1996), in der Schweißanweisungen für das Laserstrahlschweißen beschrieben werden. Für den beschriebenen Anwendungsfall sind dies

- Laserstrahlleistung,
- Pulsfrequenz des Lasers,
- Position des Laserstrahls in Querrichtung (Auftreffpunkt)
- Arbeitsabstand (Fokuslage),
- Vorschubgeschwindigkeit sowie
- Gasdurchflußmenge.

Parameter	Einstellung		
	niedrig	Zentrum	hoch
Laserstrahlleistung [kW]	3,3	3,7	4,2
Pulsfrequenz [kHz]	2	5	8
Auftreffpunkt [mm]	-0,2	0	0,2
Fokuslage [mm]	-0,5	0	0,5
Vorschubgeschwindigkeit [m/min]	3,5	4,0	4,5
Gasdurchflußmenge [l/h]	23	28	33

Bild 5.9 Parametereinstellungen des vollfaktoriellen Versuchsplans

Der optimale Parametersatz für Schweißungen am Nullspalt wurde in Vorversuchen erarbeitet. Er ist in Bild 5.9 gemeinsam mit den gewählten hohen und niedrigen Einstellungen der Faktoren dargestellt.

Zunächst wurde ein faktorieller Versuch der Form 2^2 durchgeführt, in dem lediglich die Parameter Laserstrahlleistung P und Vorschubgeschwindigkeit v variiert wurden. Die Versuche bestätigten die Vermutung, daß die beiden Einflußgrößen unter Berücksichtigung einer konstanten Streckenenergie S (vgl. Kapitel 2)

$$S = \frac{P}{v} \quad (2.2)$$

ineinander übergeführt werden können. Aus diesem Grund wird in den weiteren Versuchen die Laserstrahlleistung konstant gehalten und die Vorschubgeschwindigkeit variiert. Dadurch konnte eine Reduzierung der Anzahl der Versuche erzielt werden. Es wird ein vollfaktorieller Versuchsplan der Form 2^5 aufgestellt, der mit dem Ziel ausgewertet werden soll, den Einfluß der Parameter auf die oben genannten Kriterien Nahtquerschnitt und Nahtlage sowie Nahtqualität zu ermitteln. Die Ergebnisse der Auswertung der Versuche mittels Querschneiden und Sichtprüfung sind in Bild 5.10 zusammengefaßt.

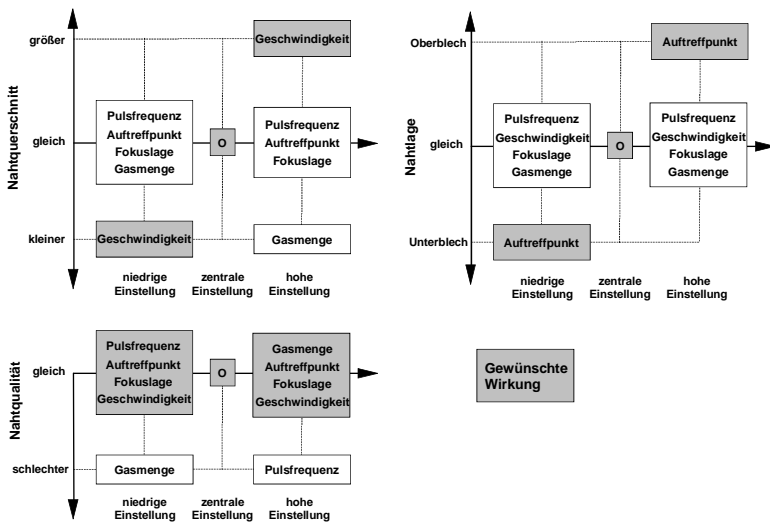


Bild 5.10 Einfluß der Parametervariation auf die Zielgrößen

Es zeigte sich, daß eine Veränderung der Pulsfrequenz keinen Einfluß auf den Nahtquerschnitt oder die Nahtlage hat. Es kommt lediglich zu einer Verschlechterung der Nahtqualität. Dieses Verhalten wurde grundsätzlich auch von NG (1998) ermittelt. Bei einer Veränderung der Gasdurchflußmenge kommt es bei der niedrigeren Einstellung zu einer deutlichen Verschlechterung der Nahtqualität aufgrund eines unruhigeren Schweißprozesses, während bei einer Erhöhung der Gasdurchflußmenge die Einschweißtiefe deutlich abnimmt. Diese Tendenz wird von UNTERMANN U.A. (1992) bestätigt. Durch eine Veränderung von Schutzgasmenge oder Pulsfrequenz kann der Nahtquerschnitt somit nicht in einer für die Spaltüberbrückung günstigen Form beeinflusst werden.

Aufgrund der für das Verschweißen von Stahlwerkstoffen gebräuchlichen langen Brennweite und der damit verbundenen großen Tiefenschärfe hatte die Veränderung der Fokusslage in dem gewählten Bereich keinen Einfluß auf das Schweißergebnis. Daher wird in den weiteren Untersuchungen auf eine Veränderung von Fokusslage, Pulsfrequenz und Schutzgasfluß zur Spaltüberbrückung an Kehlnähten verzichtet. Es werden die jeweils optimalen Parameter eingestellt.

Es zeigte sich, daß eine Verschiebung des Auftreffpunktes des Laserstrahls um Δx eine Verschiebung der Nahtlage, ebenfalls um Δx , zur Folge hat. Bei der Auswertung der Bahngeschwindigkeit zeigte sich eine Korrelation zwischen dem aufgeschmolzenen Nahtquerschnitt und der Streckenenergie. Als Ergebnis dieser Versuche werden die Parameter Streckenenergie, dargestellt durch die Bahngeschwindigkeit, und Auftreffpunkt als zu untersuchende Einflußgrößen für die Spaltüberbrückung an der Kehlnaht am Überlappstoß ausgewählt.

Für Schweißungen mit Zusatzwerkstoff an der Kehlnaht am Überlappstoß und der I-Naht am Stumpfstoß wurden die Versuchsreihen analog wiederholt. Die dabei ermittelten entscheidenden Einflußgrößen waren die Streckenenergie und die Drahtfördermenge sowie im Fall der Kehlnaht wiederum der Auftreffpunkt.

5.3.2 Erarbeitung geometriebasierter Modelle

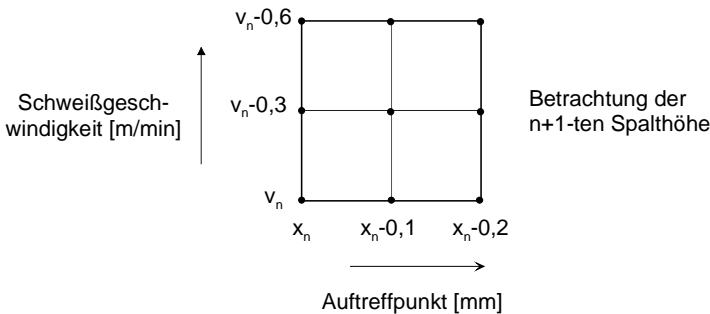
In einem weiteren Schritt sollen Zusammenhänge zwischen der erforderlichen Anpassung der beschriebenen Einflußgrößen und der Spaltbreite erarbeitet werden. Dies wird an der Kehlnaht am Überlappstoß am Werkstoff St 14 ohne Zusatzwerkstoff und an der I-Naht am Stumpfstoß am Werkstoff AlMgSi0.5, der aus Gründen der Gefügeausbildung Zusatzwerkstoff benötigt, durchgeführt.

5.3.2.1 Kehlnaht am Überlappstoß

Zunächst werden weitere Schweißversuche durchgeführt, mit denen die optimalen Parameter zur Spaltüberbrückung ermittelt werden sollen. Basierend auf diesen Ergebnissen wird anschließend versucht, ein theoretisches Modell der Zusammenhänge zwischen Streckenenergie und Auftreffpunkt einerseits, sowie Nahtlage und Nahtquerschnitt andererseits abzuleiten. Das Modell wird zuletzt anhand dieser und weiterer Schweißungen an spaltbehafteten Bauteilen bewertet.

Die Schweißversuche werden an Blechen einer Dicke von 0,8 mm durchgeführt, die in Form einer Kehlnaht am Überlappstoß verschweißt werden sollen. Dabei werden jeweils eine definierte Spalthöhe eingestellt und die Schweißparameter Bahngeschwindigkeit und Auftreffpunkt optimiert. Um einen unerwünschten Einfluß durch Defokussierung auf dem Oberblech zu vermeiden, wurde die Fokusslage jeweils um den Wert der aktuellen Spalthöhe angepaßt.

Die Optimierung der Schweißparameter erfolgt mit Hilfe des Gitterlinienmodells. Es ist in diesem Fall aufgrund der geringen Anzahl der Faktoren und der bereits bekannten Wirkrichtung der Parameter anwendbar. Dabei wurden pro Spalthöhe jeweils neun Schweißversuche nach dem in Bild 5.11 dargestellten Schema durchgeführt. Ausgehend von den optimalen Parametern der vorhergehenden Spalthöhe wurden jeweils drei Einstellungen der Parameter untersucht.



v_n : optimale Schweißgeschwindigkeit der n -ten Spalthöhe

x_n : optimaler Auftreffpunkt der n -ten Spalthöhe

Bild 5.11 Untersuchungen zur Spaltüberbrückung

5 Adaptive Schweißfunktionen

In Bild 5.12 sind die jeweils optimalen Parametereinstellungen für einen Spaltbreitenbereich von 0 bis 0,9 mm angegeben. Oberhalb dieser Grenze waren keine fehlerfreien Schweißungen mehr möglich (PISCHETSRIEDER & MEIER 1997).

Spalthöhe [mm]	Schweiß- geschwindigkeit [m/min]	Auftreffpunkt [mm]
0	4,0	0
0,15	4,0	-0,1
0,3	3,7	-0,1
0,45	3,4	-0,2
0,6	3,1	-0,2
0,75	2,5	-0,3
0,9	2,2	-0,4

Bild 5.12 Optimierte Parameter zur Spaltüberbrückung

Eine Analyse der Geometrie der sich bei den Schweißungen ergebenden Nahtquerschnitte, die in Bild 5.14 dargestellt sind, soll als Basis für die Herleitung eines allgemeingültigen Zusammenhangs zwischen Schweißgeschwindigkeit und Auftreffpunkt sowie der Spalthöhe dienen. Die geometrischen Überlegungen basieren auf der in Bild 5.13 dargestellten verallgemeinerten Beschreibung der Nahtgeometrie. Die Querschliffe in Bild 5.14 belegen diesen Ansatz zumindest ab einem Fügspalt von 0,3 mm.

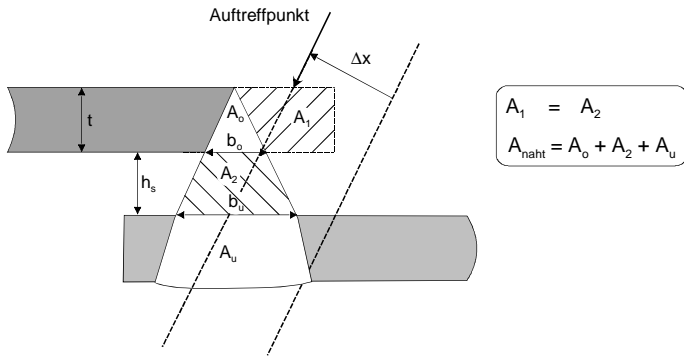


Bild 5.13 Beschreibung der Nahtgeometrie

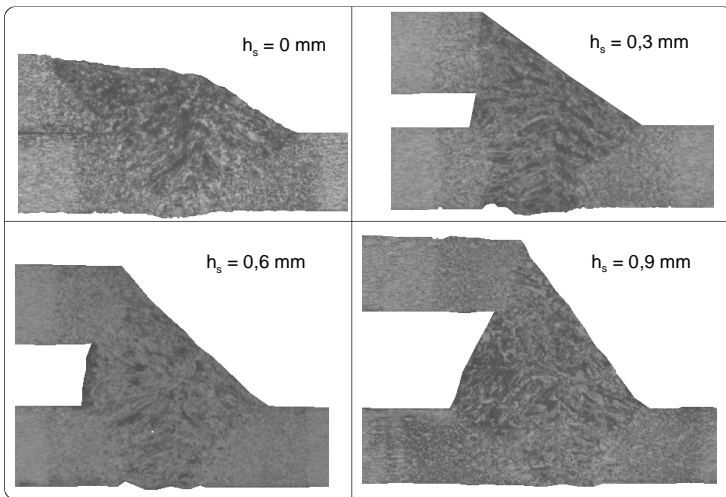


Bild 5.14 Querschliffe von Spaltverschweißungen (St 14, $t=0,8\text{mm}$)

Aus der Analyse der Querschliffe werden folgende Grundannahmen getroffen.

- Der Querschnitt des abschmelzenden Bleches A_1 ist gleich dem spaltfüllenden Querschnitt A_2 .
- Der obere Teil des Nahtquerschnitts ($A_2 + A_o$) kann durch der Dreieck der Basislänge b_u und der Höhe ($h_s + t$) angenähert werden.

5 Adaptive Schweißfunktionen

- Die Basislänge b_u ist unabhängig von der Spaltbreite annähernd konstant.

Zudem sei der Parametersatz für den Nullspalt (P_0, v_0, v_{d0}) bekannt.

Somit ergibt sich der lineare Zusammenhang

$$A_{\text{Naht}} = A_o + A_2 + A_u = \frac{1}{2} b_u (h_s + t) + A_u = \frac{1}{2} b_u h_s + \left(\frac{1}{2} b_u t + A_u\right) \quad (5.2)$$

zwischen dem Nahtquerschnitt A_{Naht} und der Spalthöhe h_s . Nach BEYER U.A. (1987) und CLEEMANN (1987) besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Streckenenergie S und dem Nahtquerschnitt. Dieser kann nach Einführung der Konstante c_1 allgemein in der Form

$$A_{\text{Naht}} = \frac{1}{c_1} S \quad (5.3)$$

dargestellt werden. Mit der optimalen Streckenenergie S_0 bei Nullspalt

$$S_o = S(h_s = 0) = c_1 \left(\frac{1}{2} b_u t + A_u\right)$$

ergibt sich

$$S = \frac{c_1}{2} (b_u h_s) + S_o. \quad (5.4)$$

Mit

$$S = \frac{P}{v}, \quad S_o = \frac{P}{v_0} \quad \text{und} \quad c_{\text{vkm}} = \frac{c_1 \cdot b_u}{2 \cdot P}$$

folgt daraus der Zusammenhang zwischen Bahngeschwindigkeit und Spalthöhe

$$\frac{1}{v} = c_{\text{vkm}} h_s + \frac{1}{v_0} \quad \text{oder} \quad v = \frac{v_0}{c_{\text{vkm}} v_0 h_s + 1} \quad (5.5)$$

mit der optimalen Bahngeschwindigkeit bei Nullspalt v_0 .

Die Konstante c_{vkm} muß dabei für die jeweilige Anwendung empirisch ermittelt werden, da derzeit keine allgemeingültigen, übertragbaren rechnerischen Zusammenhänge zwischen dem Nahtquerschnitt und der Streckenenergie existieren.

Zur Bestimmung der Lage des Auftreffpunktes wird zunächst eine Beziehung zwischen dem abzuschmelzenden Querschnitt A_1 und der Spalthöhe abgeleitet. Aus

$$A_2 = (b_u + b_o) \frac{h_s}{2}, \quad \frac{b_o}{b_u} = \frac{t}{t + h_s} \quad \text{und} \quad A_1 = A_2$$

ergibt sich

$$A_1 = \left(1 + \frac{t}{t + h_s}\right) \frac{b_u}{2} h_s. \quad (5.6)$$

Um ein optimales Aufschmelzen des Querschnitts A_1 zu gewährleisten, ist der Auftreffpunkt des Laserstrahls proportional zum Anwachsen des Querschnitts zu verschieben. Bei Einführung der Konstanten c_3 ergibt sich so der Zusammenhang

$$\Delta x = c_3 A_1.$$

Mit

$$c_{xkm} = c_3 \frac{b_u}{2}$$

besteht somit der Zusammenhang

$$\Delta x = c_{xkm} \left(1 + \frac{t}{t + h_s}\right) h_s \quad (5.7)$$

zwischen der Verschiebung des Auftreffpunktes und der Spalthöhe, wobei die Konstante c_{xkm} wiederum empirisch ermittelt werden muß.

In den marktüblichen Sensorsystemen können nur aus geradlinigen Anteilen zusammengesetzte Funktionen zwischen gemessener Spaltbreite und den Prozeßparametern abgebildet werden. Aus diesem Grund wird es erforderlich sein, die erarbeiteten Funktionen mit einer prozeßtechnisch zulässigen minimalen Anzahl an Stützstellen zu linearisieren. Daher werden in der weiteren Betrachtung auch die einfachste geradlinige Funktion, die lineare Näherungslösung mit nur einer Stützstelle untersucht.

Die sich ergebenden linearen Funktionen

$$\Delta x = c_{xkn} h_s \quad \text{und} \quad (5.8)$$

$$v = v_o - c_{vkn} h_s$$

sind aus der Potenzreihenentwicklung der Funktion $(1+x)^{-1}$ abgeleitet. Dabei sind die Konstanten c_{xkn} und c_{vkn} so zu wählen, daß sich im technisch relevanten Bereich der Spaltbreite eine möglichst geringe Abweichung zwischen der auf dem Modell basierenden und der Näherungslösung ergibt. Die sich ergebenden Diffe-

renzen sind in Bild 5.15 am Beispiel einer typischen Funktion und deren Näherung dargestellt. Hier wurde die Näherungslösung für den Spaltbreitenbereich von 0 bis 1,0 Millimeter optimiert.

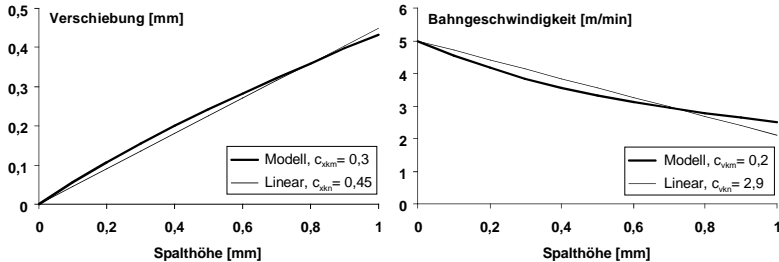


Bild 5.15 Abweichung zwischen exakter und Näherungslösung

5.3.2.2 I-Naht am Stumpfstoß

Da im Gegensatz zur Kehlnaht am Überlappstoß bereits Voruntersuchungen zur Spaltüberbrückung vorlagen, konnte bei der I-Naht am Stumpfstoß auf die Grundlagenuntersuchungen zur Erarbeitung der geometrischen Überlegungen zur Spaltüberbrückung verzichtet werden. Es werden vielmehr auf der Basis der in Abschnitt 5.1.2.2 beschriebenen Vorarbeiten verschiedene theoretische Ansätze erarbeitet und erprobt. Dabei werden folgende Randbedingungen berücksichtigt:

- Es besteht ein linearer Zusammenhang zwischen dem Spaltvolumen und dem zugeführten Drahtvolumen
- Eine Veränderung des Auftreffpunktes oder der Fokuslage sind nicht vorgesehen.
- Die Zufuhr von Zusatzwerkstoff ist bereits bei einem Nullspalt erforderlich.
- Es soll eine lineare Zunahme des Nahtquerschnitts mit der Spaltbreite erzielt werden. Dazu ist eine Anpassung der Streckenenergie erforderlich. Dies geschieht wiederum über eine Einstellung der Bahngeschwindigkeit.
- Der Parametersatz für den Nullspalt (P_0 , v_0 , v_{a0}) ist bekannt.

Grundsätzlich sind verschiedene Zielstellungen zur Auslegung der adaptiven Funktionen denkbar, wie das Vermeiden eines Nahtdurchhangs oder die Einstel-

lung einer konstanten Nahtüberhöhung oder eines konstanten Mischungsverhältnisses zwischen Grundwerkstoff und Zusatzwerkstoff in der Naht. Exemplarisch wird hier die Einstellung einer konstanten Nahtüberhöhung dargestellt. Die daraus resultierende Beschreibung des Nahtquerschnitts ist in Bild 5.16 dargestellt.

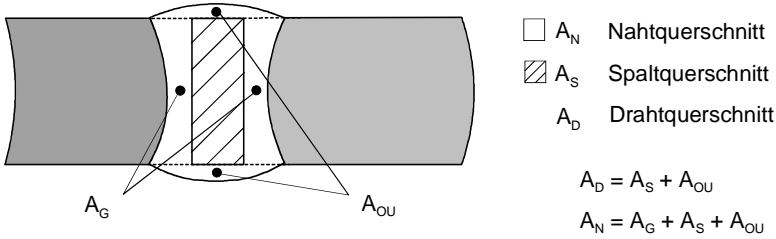


Bild 5.16 Beschreibung des Nahtquerschnitts der I-Naht am Stumpfstoß

Zunächst wird der funktionale Zusammenhang zwischen der Schweißgeschwindigkeit und dem Fügespalt erarbeitet. Dabei gilt für eine konstante Laserstrahlleistung in Abwandlung von (5.3) für den Nahtquerschnitt

$$A_{\text{Naht}} = \frac{c_1}{v} \quad (c_1 = \text{konstant}). \quad (5.9)$$

Aufgrund der oben beschriebenen Annahme einer konstanten Nahtüberhöhung gilt dabei

$$A_{OU} = \text{konst} \quad \text{und} \quad A_G = \text{konst}.$$

A_{Naht} setzt sich nach

$$A_{\text{Naht}}(h_s) = A_{\text{Naht}}(h_s = 0) + A_s = \frac{c_1}{v_0} + t \cdot h_s$$

aus dem Nahtquerschnitt bei Nullspalt und dem aktuellen Spaltvolumen zusammen. Durch Umformen und mit

$$c_{im} = \frac{t}{c_1} \quad (5.10)$$

folgt daraus der nach (5.5) bekannte Zusammenhang zwischen Bahngeschwindigkeit und Spalthöhe

$$\frac{1}{v} = c_{im} h_s + \frac{1}{v_0} \quad \text{oder} \quad v = \frac{v_0}{c_{im} v_0 h_s + 1}. \quad (5.11)$$

5 Adaptive Schweißfunktionen

mit der empirischen Konstante c_{im} .

Zur Bestimmung des erforderlichen Drahtvolumens wird der nach (5.1) bekannte Zusammenhang zwischen Drahtfördermenge und zu füllendem Querschnitt in

$$A_s = t \cdot h_s \text{ und } A_D = \frac{v_d}{v} \left(\frac{D_d^2 \pi}{4} \right) \quad (5.12)$$

aufgelöst. Mit

$$A_D(h_s) = A_D(h_s = 0) + A_s$$

und daraus

$$\frac{v_d}{v} \left(\frac{D_d^2 \cdot \pi}{4} \right) = \frac{v_{d0}}{v_0} \left(\frac{D_d^2 \cdot \pi}{4} \right) + t \cdot h_s$$

folgt durch Auflösen die Formel für die Drahtgeschwindigkeit

$$v_d = v_{d0} \frac{v}{v_0} + \frac{4 \cdot t \cdot v}{D_d^2 \cdot \pi} h_s \quad (5.13)$$

Wird darin der Zusammenhang (5.13) für die Bahngeschwindigkeit eingesetzt, ergibt sich

$$v_d = \left(\frac{v_0}{c_{im} v_0 h_s + 1} \right) \left(\frac{v_{d0}}{v_0} + \frac{4 \cdot t}{D_d^2 \cdot \pi} h_s \right) \quad (5.14)$$

Wird anstelle der exakten Formel wiederum die Näherungslösung für die Bahngeschwindigkeit

$$v = v_0 - c_{in} \cdot h_s \quad (5.15)$$

verwendet, ergibt sich für die Drahtgeschwindigkeit

$$v_d = v_{d0} + \left(\frac{4 \cdot t \cdot v_0}{D_d^2 \cdot \pi} - \frac{v_{d0} \cdot c_{in}}{v_0} \right) h_s - \left(\frac{4 \cdot t \cdot c_{in}}{D_d^2 \cdot \pi} \right) h_s^2,$$

oder für die lineare Näherung

$$v_d = v_{d0} + \left(\frac{4 \cdot t \cdot v_0}{D_d^2 \cdot \pi} - \frac{v_{d0} \cdot c_{in}}{v_0} \right) h_s \quad (5.16)$$

oder mit

$$c_d = \frac{4 \cdot t \cdot v_0}{D_d^2 \cdot \pi} - \frac{v_{d0} \cdot c_{in}}{v_0}$$

$$v_d = v_{d0} + c_d \cdot h_s \quad .$$

Die sich ergebenden Funktionen für die Nahtformen Kehlnaht am Überlappstoß und I-Naht am Stumpfstoß sind in Bild 5.17 zusammengefaßt.

Kehlnaht am Überlappstoß	Schweißgeschwindigkeit	Auftreffpunkt
Modell	$v = \frac{v_0}{c_{vkn} v_0 h_s + 1}$	$\Delta x = c_{xkn} \left(1 + \frac{t}{t + h_s}\right) h_s$
Näherung	$v = v_0 - c_{vkn} h_s$	$\Delta x = c_{xkn} h_s$

I-Naht am Stumpfstoß	Schweißgeschwindigkeit	Drahtgeschwindigkeit
Modell	$v = \frac{v_0}{c_{im} v_0 h_s + 1}$	$v_d = \left(\frac{v_0}{c_{im} v_0 h_s + 1}\right) \left(\frac{v_{d0}}{v_0} + \frac{4 \cdot t}{D_d^2 \cdot \pi} h_s\right)$
Näherung	$v = v_0 - c_{in} \cdot h_s$	$v_d = v_{d0} + \left(\frac{4 \cdot t \cdot v_0}{D_d^2 \cdot \pi} - \frac{v_{d0} \cdot c_{in}}{v_0}\right) h_s$

Bild 5.17 Ansätze für adaptive Funktionen

Der jeweilige Verlauf der Funktionen ist von Konstanten abhängig, die eine einfache Anpassung der Funktionen an die Eigenschaften des aktuellen Anwendungsfalls erlauben. Der Einfluß der Konstanten auf den Funktionsverlauf ist in Bild 5.18 beispielhaft für die auf dem Modell basierende Lösung bei der Kehlnaht am Überlappstoß und der I-Naht am Stumpfstoß für verschiedene Konstanten dargestellt.

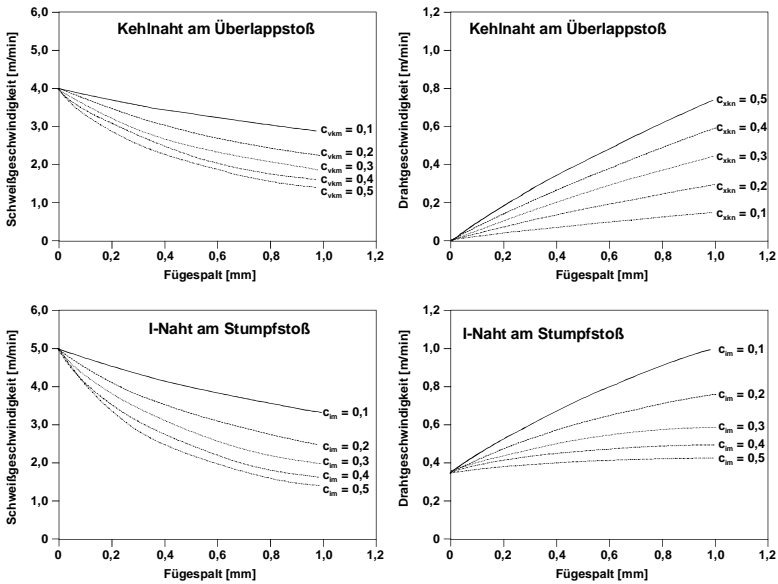


Bild 5.18 Einfluß der Konstanten auf die Schweißfunktionen

5.3.3 Erprobung der theoretischen Ansätze

Um die Gültigkeit der theoretisch abgeleiteten Ansätze zu bewerten, werden diese mit Ergebnissen aus Schweißversuchen verglichen. Die geschieht wiederum für die beiden ausgewählten Nahtformen.

5.3.3.1 Kehlnaht am Überlappstoß

Zur Überprüfung der theoretischen Ableitung der Prozeßparameter für die Kehlnaht am Überlappstoß wird die Übereinstimmung der in den Vorversuchen ermittelten Prozeßparameter mit den abgeleiteten Funktionsverläufen untersucht. Dazu werden mittels Regression der in den Voruntersuchungen erarbeiteten Versuchswerte auf Funktionen der oben abgeleiteten Formen die Konstanten c_{vkn} , c_{xkn} , c_{vkn} und c_{xkn} ermittelt und die sich ergebenden Verläufe verglichen.

Für die in Bild 5.12 dargestellte Versuchsreihe an Blechen einer Dicke von 0,8 mm sind die sich ergebenden Funktionen in Bild 5.19 zusammengefaßt. Es sind jeweils die Schweißergebnisse sowie die aus dem geometrischen Modell abgeleiteten Lösung und eine lineare Näherungslösung aufgetragen. Die lineare Näherungslösung wird dabei durch lineare Regression der Versuchswerte gewonnen.

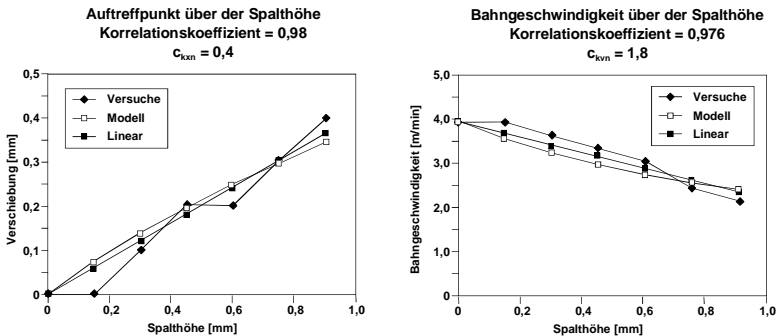


Bild 5.19 Versuchsergebnisse und Näherungslösung an St 14 ($t=0,8$ mm)

Zur Bewertung der Güte der jeweiligen linearen Näherung wurde für den Ansatz der Streckenenergie und der Verschiebung des Auftreffpunktes der Korrelationskoeffizient bestimmt. Die hohen Werte von 0,976 für die Streckenenergie und 0,980 für den Auftreffpunkt deuten an, daß in beiden Fällen ein linearer Ansatz mit nur einem Stützpunkt für die adaptiven Schweißfunktionen zulässig ist. Um dies weiter zu erhärten, wurden die oben beschriebenen Versuche für Schweißungen an unbehandelten Stahlblechen der Dicken 0,6 und 1,2 mm, sowie an verzinkten Stahlblechen der Dicke 0,8 mm wiederholt, die linearen Näherungslösungen berechnet und der Korrelationskoeffizient bestimmt. Die Ergebnisse sind in Bild 5.20 zusammengefaßt.

Da der Korrelationskoeffizient bis auf einen Fall einen hohen Wert von über 0,97 erreicht, wird für die Kehlnaht am Überlappstoß die Verwendung einer linearen Näherungslösung als zulässig erachtet. Im Fall der Fokusverschiebung bei Blechen einer Dicke von 0,6 mm ergibt sich die hohe Abweichung in ersten Linie dadurch, daß lediglich eine geringe Zahl an Versuchswerten zur Verfügung steht, da nur sehr geringe Spalthöhen überbrückt werden können. Zudem zeigte sich, daß die Konstante c_{kkn} , die den Zusammenhang zwischen dem Auftreffpunkt und der Spalthöhe beschreibt, in allen Fällen konstant bei 0,4 liegt. Dies kann als all-

5 Adaptive Schweißfunktionen

gemeingültiger Anhaltswert für Schweißungen der Kehlnaht am Überlappstoß an Stahlblechen angesehen werden. Für die Konstante c_{vkn} kann kein eindeutiger Zusammenhang festgestellt werden. Es ergibt sich eine Zunahme von c_{vkn} mit abnehmender Blechdicke.

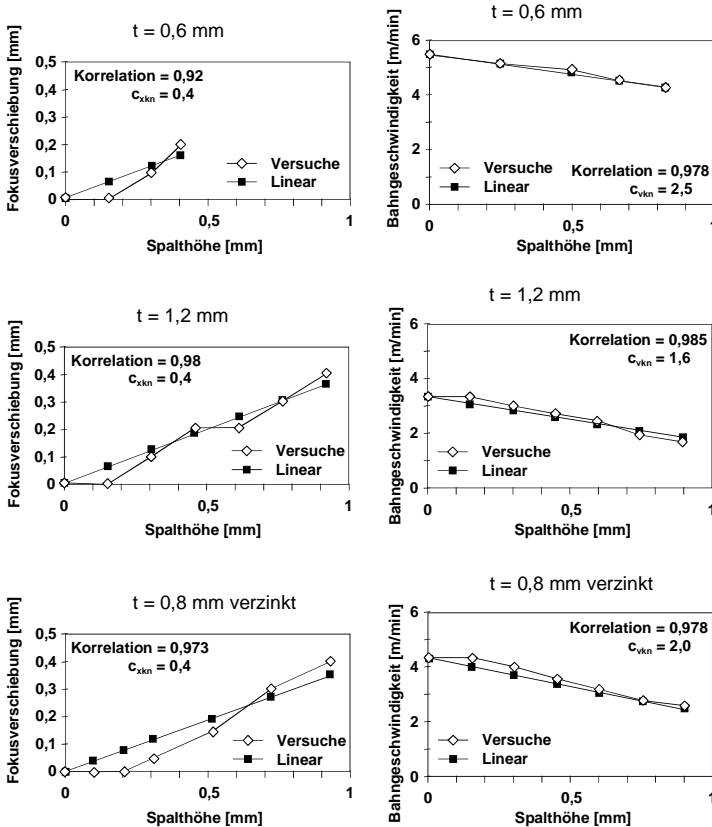


Bild 5.20 Adaptive Schweißfunktionen der Kehlnaht am Überlappstoß

5.3.3.2 I-Naht am Stumpfstoß

An den in Abschnitt 5.2 beschriebenen Aluminiumprofilen wurden entsprechend dem Vorgehen bei der Kehlnaht am Überlappstoß definierte Spaltbreiten einge-

stellt und jeweils Schweißgeschwindigkeit und Drahtvorschub mit Hilfe der Gitterlinienmethode optimiert. Anschließend wurden die Koeffizienten c_{im} und c_{in} durch Minimierung der Fehlerquadrate ermittelt. Die sich ergebenden Funktionen sind in Bild 5.21 gemeinsam mit den Versuchsergebnissen dargestellt.

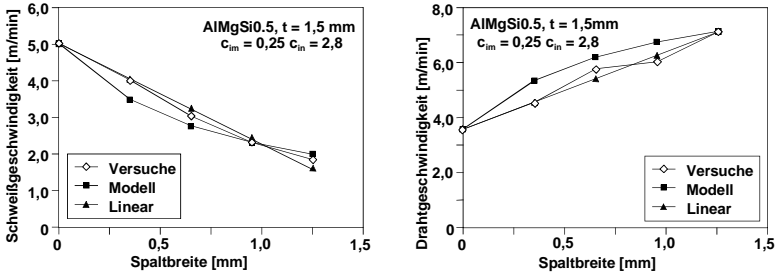


Bild 5.21 Versuchsergebnisse und rechnerische Lösung für die I-Naht am Stumpfstoß

Es zeigt sich, daß sowohl für die Schweiß- als auch für die Drahtzufuhrgeschwindigkeit durch den linearen Näherungsansatz eine genauere Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen erzielt wird. Eine mögliche Ursache ist, daß in den Schweißversuchen, bei denen die Prozeßparameter im Hinblick auf eine fehlerfreie Naht und das Einstellen einer Nahtüberhöhung optimiert wurden, einige der beim Aufbau des Modells definierten Randbedingungen in Bezug auf den Nahtquerschnitt nicht eingehalten wurden. Dies betrifft insbesondere die Forderung nach einem konstanten im Grundwerkstoff aufgeschmolzenen Querschnitt A_G . In den realen Versuchen nimmt dieser mit steigendem Fügespalt kontinuierlich bis auf einen Wert A_{Gmin} ab.

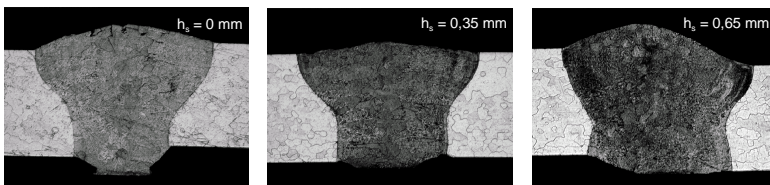


Bild 5.22 Querschliffe verschiedener Fügespaltbreiten ($t = 1,5$ mm)

Eine Auswertung der Querschliffe in Bild 5.22 unter diesem Gesichtspunkt zeigt, daß der Nahtquerschnitt bei einer Spaltbreite von 0,35 mm ungefähr dem bei ei-

nem Nullspalt entspricht. Erst bei einem Fügespalt von 0,65 mm ist eine deutliche Verbreiterung der Naht zu erkennen.

Wie bereits diese ersten Versuche zeigten, ist es nur mit großem Aufwand möglich, Schweißversuche unter Randbedingungen entsprechend dem Modell durchzuführen. Daher soll die Gültigkeit der Modelle in einem umgekehrten Ansatz verifiziert werden. In diesem werden die erarbeiteten Modelle als adaptive Funktionen in die Steuerung eines Nahtfolgesystems integriert, Schweißungen an Bauteilen mit variablen Fügespalten durchgeführt und die Ansätze anhand der erzielten Schweißqualität beurteilt. Dabei sollen sowohl mit mehreren Stützpunkten möglichst nah an die exakte Lösung angenäherte als auch geradlinige Funktionen untersucht werden.

Bevor dies geschehen kann, ist zunächst eine Methodik zu entwickeln, mit deren Hilfe adaptive Schweißfunktionen und die unbekannten Konstanten für neue Anwendungen effizient ermittelt werden können.

5.3.4 Anpassung adaptiver Schweißfunktionen

5.3.4.1 Vorgehensweise

Die in Abschnitt 5.3.2 theoretisch abgeleiteten funktionalen Zusammenhänge erlauben noch keine direkte Berechnung der Parameter in Abhängigkeit von der Spalthöhe, da die Konstanten nicht bekannt sind. Derzeit existieren keine allgemeingültigen Zusammenhänge zwischen der Streckenenergie und dem Nahtquerschnitt. Der Grund hierfür ist das komplexe Zusammenspiel einer Vielzahl von Einflußgrößen, welche die Ausbildung des Nahtquerschnitts beeinflussen. In Bild 5.23 ist beispielhaft der Einfluß der Art des Schutzgases und der Strahlqualität des Lasers auf den Nahtquerschnitt aufgezeigt (CLEEMANN 1987, HÜGEL 1992).

Es wurden aufwendige Simulationsmodelle entwickelt, mit deren Hilfe die resultierenden Nahteigenschaften basierend auf den Schweißparametern berechnet werden können (BECK 1996, LAMPA U.A. 1997, KNOROWSKI & FUERSCHBACH 1998, RADAJ U.A. 1996, RESCH & KAPLAN 1998, RICK U.A. 1996, SEMAK U.A. 1998). Die Erstellung der Modelle ist jedoch sehr aufwendig, insbesondere die Abbildung der Strahleigenschaften und der Bauteilgeometrie (LENZ U.A. 1998). Daher ist der Einsatz der Simulation zur Bestimmung der gesuchten Konstanten

nur dann sinnvoll, wenn bereits Simulationsmodelle, zum Beispiel zur Bestimmung der Nullspaltparameter, vorhanden sind. Da dies in den meisten Fällen nicht der Fall ist, werden hier experimentelle Ansätze gewählt, um den Verlauf der Funktionen zu bestimmen.

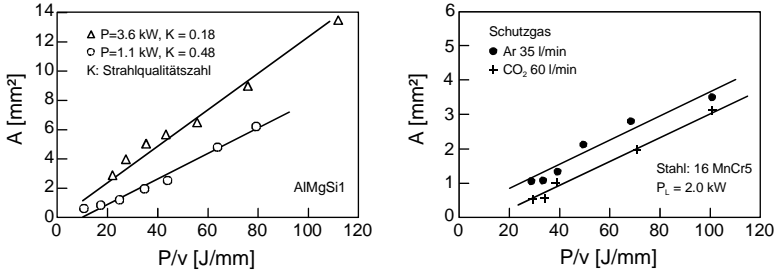


Bild 5.23 Einflußgrößen auf den Nahtquerschnitt (CLEEMANN 1987, HÜGEL 1992)

Es existieren im Fall der Kehlnaht am Überlappstoß zwei unabhängige Konstanten c_{vkn} und c_{xkn} , während bei der I-Naht am Stumpfstoß sowohl für die Schweiß- als auch für die Drahtzufuhrgeschwindigkeit die identische Konstante c_{im} eingesetzt wird. Um den Verlauf der Funktionen zu bestimmen, sollen nun experimentelle Methoden erarbeitet werden, um die unbekannten Konstanten möglichst einfach zu bestimmen.

Zur Bestimmung der Konstanten werden zwei Vorgehensweisen untersucht. In einem ersten Ansatz werden die Konstanten aus einer Auswertung der Nahtquerschnitte bestimmt und anschließend die Funktionen berechnet. Dies soll für die I-Naht am Stumpfstoß geschehen. Diese Methode ist jedoch für die Berechnung des Auftreffpunktes nicht geeignet. In diesem Fall soll versucht werden den Verlauf der Funktionen direkt zu bestimmen. Dies wird an der Kehlnaht am Überlappstoß durchgeführt.

5.3.4.2 Berechnung der Konstante c_{im} für die I-Naht am Stumpfstoß

Für die I-Naht am Stumpfstoß läßt sich unter der Voraussetzung konstanter Strahlparameter die Konstante c_{im} durch Zusammenfassung und Umformung der Formeln (5.9) und (5.10) nach

$$c_{im} = \frac{t}{A_{Naht} \cdot v} \left[\frac{\text{min}}{\text{m} \cdot \text{mm}} \right] \quad (5.17)$$

beschreiben. Um c_{im} zu bestimmen wurden daher Schweißversuche an Aluminiumproben mit variabler Schweißgeschwindigkeit durchgeführt und der Mittelwert des resultierenden Nahtquerschnitts bestimmt. Zu diesem Zweck wurden für fünf Geschwindigkeiten je drei Querschliffe aus zwei Proben entnommen und vermessen.

Die auf diese Weise ermittelten Werte für c_{im} lagen zwischen 0,23 und 0,27 bei einem Mittelwert von 0,2528. Es zeigte sich somit eine gute Übereinstimmung mit dem in Abschnitt 5.3.3.2 aus der Korrelation der Versuche mit dem Modell abgeleiteten Wert von 0,25.

Dieser Ansatz funktioniert nur für die exakte auf dem Modell des Nahtquerschnitts basierte Lösung. Bei der linearen Näherungslösung besteht kein mit ausreichender Genauigkeit ableitbarer Zusammenhang von c_{im} mit den Nahteigenschaften. Daher muß die im folgenden vorgestellte Methode der direkten Bestimmung des Verlaufs verwendet werden.

5.3.4.3 Bestimmung des Verlaufs der Funktionen für die Kehlnaht am Überlappstoß

Für Funktionen, für die die Konstanten der adaptiven Funktionen nicht direkt bestimmt werden können, wird hier eine Methode vorgestellt, mit deren Hilfe der Verlauf der funktionalen Zusammenhänge direkt anhand von Stützstellen bestimmt wird. Dies wird am Beispiel der Kehlnaht am Überlappstoß gezeigt. Bei dieser Nahtform ist weder für die exakte noch für die Näherungslösung eine Bestimmung der Konstanten nach obigem Ansatz möglich.

Bei dem hier vorgestellten Ansatz soll der Verlauf der Funktionen durch die Bestimmung von optimierten Parametersätzen für größere Spalthöhen, die als Stützwerte für die Kurven dienen, ermittelt werden. Dabei ergibt sich eine Ungenauigkeit im Verlauf der Funktion in der Höhe der Stufe der Parametereinstellung. Aufgrund der in Bild 5.18 aufgezeigten Form der Kurven ist diese Abweichung um so geringer, je größer die Spaltbreite bei der Versuchsdurchführung ist, wie in Bild 5.24 am Beispiel einer linearen Funktion verdeutlicht wird.

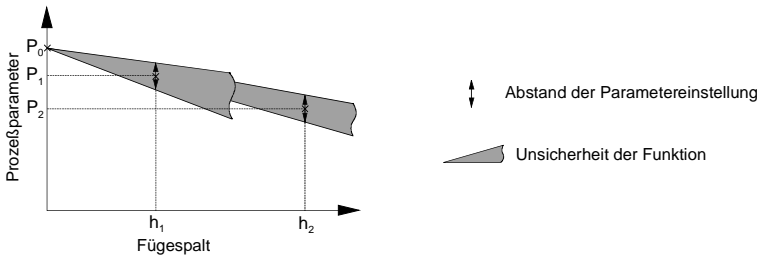


Bild 5.24 Fehler der adaptiven Funktion

Der Auswahl der Stufenhöhe der Parametereinstellung in der Versuchsplanung kommt große Bedeutung zu. Eine untere Grenze leitet sich einerseits aus der maximalen Anzahl der durchzuführenden Versuche ab. Zudem können bei zu geringer Stufung keine Unterschiede im Schweißergebnis erkannt werden. Eine obere Grenze ergibt sich durch die Forderung, daß die ermittelten Parameter sicher im Prozeßfenster des Schweißprozesses liegen. Ein sinnvoller Abstand für die Stufung der Prozeßparameter ist die Hälfte der Größe des Prozeßfensters für die jeweiligen Parameter.

Das Prozeßfenster beschreibt die zulässigen Abweichungen der Prozeßparameter. Innerhalb des Prozeßfensters sind Abweichung in der Nahtqualität bei Einhaltung der Qualitätsanforderungen möglich (SCHULTZ 1997). Es wird in der Regel gemeinsam mit der Ermittlung der Parameter des Nullspalts bestimmt. Die Ermittlung des Prozeßfensters für Schweißungen verschiedener Strahlquellen, Werkstoffe und Stoßformen war Gegenstand einer Vielzahl von Arbeiten (BEHLER 1993, KREUTZ 1991, STEEN 1991, TREUSCH 1993). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll das Prozeßfenster ebenso wie der Parametersatz des Nullspalts als gegebene Größe angesehen werden.

Falls der maximal mögliche oder zulässige Fügespalt bekannt ist, kann mit diesem Ansatz für den maximalen Fügespalt ein optimaler Parametersatz bestimmt, die Konstanten berechnet und der Verlauf der Funktionen ermittelt werden. Die Optimierung der Prozeßgrößen kann analog der im jeweiligen Fall zum Einsatz kommenden Methode zur Bestimmung der Nullspaltparameter erfolgen. Dabei sind die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Ansätze der Versuchsmethodik zu verwenden.

5 Adaptive Schweißfunktionen

In den meisten Fällen ist die maximal überbrückbare Spalthöhe nicht bekannt. Hier wird ein iterativer Ansatz vorgeschlagen. Dieser ist in Bild 5.25 am Beispiel einer linearen Funktion verdeutlicht. Zu Beginn der Versuche wird ein sicher überbrückbares Spaltmaß eingestellt. Ein guter Anhaltswert hierfür ist die Hälfte der Blechdicke der zu verschweißenden Fügepartner. Für diesen wird mit der möglichen Genauigkeit ein optimaler Parametersatz bestimmt, der als Stützwert für eine vorläufige adaptive Funktion dient.

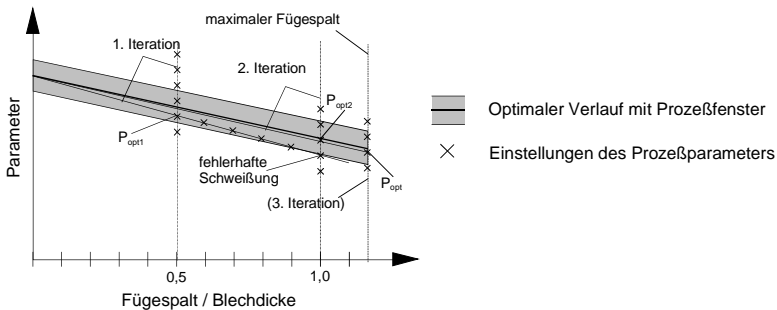


Bild 5.25 Iterative Bestimmung einer adaptiven Schweißfunktion

Anschließend wird die Spaltbreite in definierten Schritten erhöht und jeweils mit dem sich durch die Funktion ergebenden Parametersatz verschweißt bis keine den Qualitätsanforderungen entsprechende Schweißnaht mehr erzielt wird. An dieser Stelle werden die Parameter erneut im Hinblick auf das optimale Schweißergebnis variiert und korrigierte Schweißfunktionen bestimmt. Falls gewünscht, werden die Versuche anschließend mit größeren Spalthöhen fortgesetzt und der Ablauf wiederholt. In der Regel ist bereits nach der zweiten Iteration die erforderliche Genauigkeit erreicht, bei der auch durch weitere Optimierung keine größeren Spaltbreiten überbrückt werden können. Aus dem Verlauf der Funktion können nun die fehlenden Konstanten bestimmt werden.

Dieser Ansatz kann sowohl für die lineare Näherungslösung als auch für die exakte Berechnung durchgeführt werden.

5.3.4.4 Vergleichende Bewertung des experimentellen Aufwands

Um eine Bewertung des vorgeschlagenen Ansatzes zu ermöglichen, soll hier der Aufwand für die experimentelle Bestimmung des Verlaufs der adaptiven Funkti-

on abgeschätzt werden. Dabei wird die erarbeitete Vorgehensweise zum experimentellen Abgleich der Funktionen (vgl. Bild 5.25) mit der Bestimmung der optimalen Parameter über den Spaltbreitenverlauf nach üblichen Methoden verglichen. Dies wird beispielhaft für die bekannte Anwendung der Kehlnaht am Überlappstoß durchgeführt.

Dabei werden übereinstimmend für beide Ansätze die folgenden Voraussetzungen angenommen.

- Die Spaltbreite wird in Schritten von 0,2 mm erhöht.
- Die maximal zulässige Spaltbreite ist 1,0 mm.
- Zur Optimierung der Prozeßparameter sind pro Spaltbreite jeweils vier Stufen zu untersuchen.

Bei Verwendung eines konventionellen Ansatzes ist es erforderlich, für jede der sich ergebenden fünf Stufen der Spaltbreite eine Optimierung der Parameter durchzuführen. Da in diesem Fall keine Aussagen über die Wechselwirkungen der Parameter Fügespalt, Schweißgeschwindigkeit und Auftreffpunkt vorliegen, ist eine Untersuchung gemäß einem mehrstufigen vollfaktoriellen Versuchsplan erforderlich. Die Anzahl **N** der Versuche wird hier für **l** Stufen der Spaltbreite und jeweils **m** Stufen für die Prozeßparameter nach

$$N = l \cdot m \cdot m \quad (5.18)$$

bestimmt. Somit ergibt sich eine Anzahl von 80 Versuchen.

Falls die Art der Funktion abgesehen von der experimentell zu bestimmenden Konstante bekannt ist, ist im ungünstigsten Fall eine Iteration in drei Stufen, wie in Abschnitt 5.3.4.3 dargestellt, beginnend bei einer Spaltbreite von 0,4 mm, erforderlich. Dadurch ergibt sich eine Versuchsanzahl von 48. Ist die maximale Spaltbreite bekannt, ist lediglich die Optimierung an einer Stufe mittels 16 Versuchen erforderlich.

Bereits an diesem Beispiel wird deutlich, daß durch die Vorherbestimmung des prinzipiellen Funktionsverlaufs der experimentelle Aufwand deutlich verringert wird. Unter ungünstigeren Voraussetzungen, etwa bei einem stärker gekrümmten Verlauf der Funktion oder bei einer größeren zulässigen Spaltbreite, fällt der Unterschied deutlich größer aus, da im Fall der konventionellen Lösung eine größere Anzahl an Stufen zu untersuchen ist.

Falls es wie bei der exakten Lösung bei I-Naht am Stumpfstoß direkt möglich ist, die Konstante aus dem Nahtquerschnitt zu bestimmen (vgl. Abschnitt 5.3.4.2), berechnet sich die Anzahl der erforderlichen Versuche N aus der Anzahl der Geschwindigkeitsstufen o multipliziert mit der Anzahl der Proben pro Stufe p nach

$$N = o \cdot p. \quad (5.19)$$

Somit sind bei fünf Geschwindigkeitsstufen und zwei Proben pro Stufe lediglich 10 Versuche erforderlich. Aus diesem Grund bietet es sich an, bei der I-Naht am Stumpfstoß die exakten Ansätze zu verwenden.

Bei der Kehlnaht am Überlappstoß hingegen wird vorgeschlagen, mit der bereits in Abschnitt 5.3.3.1 erprobten linearen Näherung zu arbeiten, da hier der Aufwand der Linearisierung bei Integration in ein Nahtfolgesystem eingespart werden kann.

5.3.5 Integration in ein Nahtfolgesystem

In einem letzten Schritt soll nun die Eignung der ermittelten adaptiven Funktionen zur Spaltüberbrückung durch Integration in ein Nahtfolgesystem bestätigt werden.

Für die Untersuchungen soll das nach dem Mehrstreifenlichtschnittverfahren arbeitenden Nahtfolgesystem SCOUT zum Einsatz kommen. Es verfügt sowohl über die Funktionalität zur Vermessung des Fügespalts als auch über die Möglichkeit, in Abhängigkeit von der Spalthöhe Parameter der Bahnführung wie Fokuspotion oder Bahngeschwindigkeit zu steuern. Weiterhin können spaltbreitenabhängige Analogsignale ausgegeben werden, die zur Steuerung des Drahtgeschwindigkeit oder der Laserstrahlleistung genutzt werden können.

Die ermittelten Zusammenhänge zwischen dem Fügespalt und den Ausgabeparametern werden im Sensorsystem über sogenannte Tabellenfunktionen definiert. Dabei können Stützwerte für die Funktion angegeben werden, zwischen denen das Sensorsystem linear interpoliert. Geradlinige Zusammenhänge wie bei der Kehlnaht am Überlappstoß können somit durch die Vorgabe von zwei Stützwerten definiert werden.

Die bei der Verschweißung der I-Naht am Stumpfstoß zum Einsatz kommenden exakten Lösungen können nicht direkt eingegeben werden. Sie müssen in geradlinige Segmente aufgespalten werden. Die sich dabei ergebenden Abweichungen

sind in Bild 5.26 am Beispiel der Schweißgeschwindigkeit verdeutlicht. Für die Versuche wurden sowohl die geradlinige Lösung als auch Ansätze mit einem und zwei Hilfspunkten untersucht. Die Position der Stützwerte wurde mit den Ziel der Minimierung des Sekantenfehlers bestimmt.

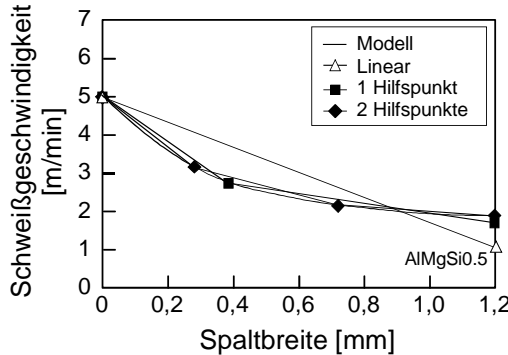


Bild 5.26 Tabellenfunktionen am Beispiel der Schweißgeschwindigkeit bei der I-Naht am Stumpfstoß

Für beide Nahtformen wurden die Tabellenfunktionen an sensorgeführten Schweißungen mit variabler Spaltbreite erprobt. Für die Kehlnaht am Überlappstoß konnten mit dem linearen Ansatz bis zur maximalen Spalthöhe $h_{\max}=0,9$ mm fehlerfreie Nähte mit Festigkeiten in der Größenordnung spaltfreier Nähte erzielt werden. Diese Spalthöhe ist im praktischen Einsatz für die Mehrzahl der Fälle ausreichend. Es wurde nachgewiesen, daß bei Integration von Zusatzwerkstoffen in analog zu entwickelnde adaptive Schweißfunktionen größere Spalthöhen überbrückt werden könnten. Dies ist jedoch in den meisten Fällen nicht erforderlich (PISCHETSRIEDER 1996).

Für die I-Naht am Stumpfstoß wurden die linearisierten Näherungsansätze mit einer verschiedenen Anzahl an Hilfspunkten untersucht. In allen Ansätzen wurde bis zu einer maximalen Spaltbreite von 1,0 mm, was dem Durchmesser des Zusatzwerkstoffs entspricht, fehlerfreie Nähte mit Festigkeiten im Bereich des Grundwerkstoffs erzielt. Ohne adaptive Funktionen kommt es bereits bei Spaltbreiten ab 0,3 mm zu einer Abnahme der Festigkeit. Bei der Analyse der Schweißnähte durch Sichtprüfung, Querschliffe und Zugversuche konnten keine Unterschiede im Schweißergebnis zwischen den Tabellenfunktionen mit einem und zwei Hilfspunkten erkannt werden.

Die Verwendung des linearen Ansatzes ohne Hilfspunkte führt zu einer Abweichung in der Nahtgeometrie, die jedoch im gewählten Beispielprozeß keine Einbußen in Festigkeit und Nahtqualität mit sich bringt. Es kann nichts darüber ausgesagt werden, ob dies in allen Fällen und bei Anwendungen mit kleinerem Prozeßfenster ebenso gültig ist. Aus diesem Grund wird in diesem Fall die Verwendung eines Hilfwertes vorgeschlagen.

Allgemein hängt die Anzahl der Hilfwerte von der Krümmung der zum Einsatz kommenden Funktion ab. Bei Abschätzung des Sekantenfehlers ist die Bestimmung der optimalen Anzahl jedoch sehr einfach möglich.

5.4 Zusammenfassung und Bewertung

Der Einsatz adaptiver Schweißfunktionen erlaubt eine Erweiterung der überbrückbaren Spaltbreite auf einen Wert in der Größenordnung der einfachen Blechdicke. Dadurch wird einerseits das Einsatzspektrum des Laserstrahlschweißens auf Anwendungen, in denen kein Nullspalt garantiert werden kann, erweitert. Zudem kann in vielen Fällen eine aufwendige Spanntechnik zur Spaltverminderung eingespart werden. Dadurch trägt die Implementierung einer adaptiven Funktion zur Wirtschaftlichkeit der Laseranwendung bei.

Dies gilt allerdings uneingeschränkt nur, wenn in der Anlagenkonfiguration bereits ein Nahtfolgesystem mit der Funktionalität zur Spaltvermessung vorhanden ist. Andernfalls ist eine Aufwands- und Kostenabschätzung zwischen Spann- und Sensortechnik unter Berücksichtigung der technologischen Randbedingungen und Kriterien der Machbarkeit erforderlich.

Es wurde zudem aufgezeigt, daß bei Entwicklung der adaptiven Funktionen anhand vorausgehender geometrischer Analysen des Nahtquerschnitts eine deutliche Verringerung des experimentellen Aufwands erreicht werden kann.

Die erfolgreiche Integration der Ergebnisse in ein Sensorsystem hat bestätigt, daß der vorgeschlagene Ansatz einer geometrischen Analyse der Nahtform in der Anwendung umgesetzt werden kann. Durch den experimentellen Abgleich der Konstanten der Funktionen werden Schwierigkeiten bei der Beschreibung der Prozeßgrößen, insbesondere der Strahlparameter, vermieden und auf einfache Weise eine allgemeingültige Lösung erreicht.

6 Strategien zur dynamikgerechten Bahnführung

Das Laserstrahlschweißen stellt nicht nur hohe Anforderungen an die Genauigkeit, sondern, aufgrund der hohen Vorschubgeschwindigkeiten, auch an die Dynamik der zum Einsatz kommenden Handhabungsgeräte. Daher kommt es, insbesondere bei Bahnverläufen, die eine starke Umorientierung des Bearbeitungskopfes erfordern, zu Fehlern in der Bearbeitungsbahn im Form von Schwingungen der Roboterhand und Abweichungen in der Vorschubgeschwindigkeit. Dies ist besonders kritisch bei der sensorgeführten Bahnbearbeitung, wo der exakte Bahnverlauf prinzipbedingt nicht genau bekannt ist. Um Schweißfehler durch dynamische Abweichungen zu vermeiden, werden zunächst die Ursachen dieser Schwingungen analysiert und anschließend Möglichkeiten zu deren Vermeidung aufgezeigt (Bild 6.1).

Anforderungen	Handlungsbedarf
Erkennung und Berechnung von Nahtlage und -form	Strategien für eine sichere Nahterkennung und -vermessung
Strategien zur Anpassung der Prozeßparameter an die Nahtform	Methode zur Entwicklung adaptiver Schweißfunktionen
Bahnführung unter Berücksichtigung des Handhabungsgeräts	Strategien zur dynamikgerechten Bahnführung
Erkennung der Bearbeitungs- und Nahtqualität	Einsatz von Prozeßsensoren

Bild 6.1 Handlungsbedarf

6.1 Grundlagen des dynamischen Verhaltens des Systems Sensor-Roboter

Die bei einem gegebenen Bahnverlauf zulässige Vorschubgeschwindigkeit wird sowohl durch die dynamischen Eigenschaften des Handhabungsgeräts als auch durch den Sensorverlauf definiert. Zunächst sollen beide Einflußfaktoren analysiert werden.

6.1.1 Einflüsse des Handhabungsgeräts

Das dynamische Verhalten eines Handhabungsgeräts wird über die bei einer gegebenen Kontur erreichbare Geschwindigkeit und Bahngenauigkeit definiert. Besonders hohe Anforderungen stellen Konturen, die eine starke Richtungsänderung erfordern. Die dabei auftretenden Effekte sollen hier am Beispiel einer 90°-Ecke aufgezeigt werden. Dabei werden als Strategien einerseits das Umfahren ohne Geschwindigkeitsreduzierung und andererseits das Umfahren mit Geschwindigkeitsreduzierung bei Minimierung der Bahnfehler unterschieden.

Beim Umfahren von Ecken ohne Geschwindigkeitsreduzierung treten Verrundungs- und Überschwingfehler auf. Eine wichtige Einflußgröße ist dabei die Geschwindigkeitsverstärkung K_v der Roboterachsen. K_v ist nach

$$K_v = \frac{v_k}{s_k} \quad (6.1)$$

definiert als der Quotient aus der Korrekturgeschwindigkeit v_k und der Positionsabweichung s_k der Roboterachse. In Bild 6.2 ist der resultierende Bahnverlauf bei Verwendung eines Knickarmroboters für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten und Geschwindigkeitsverstärkungen aufgetragen (ROGOS 1989).

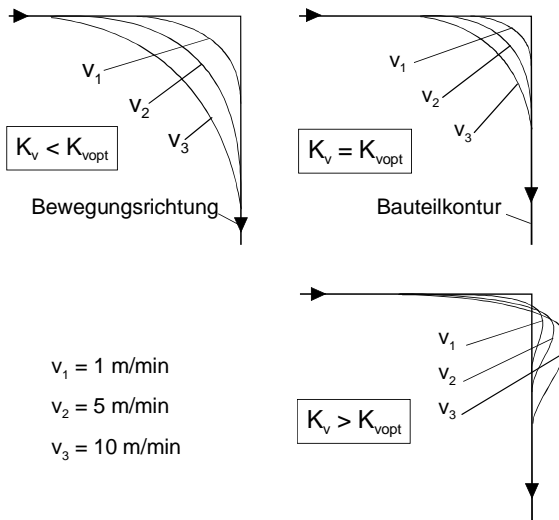
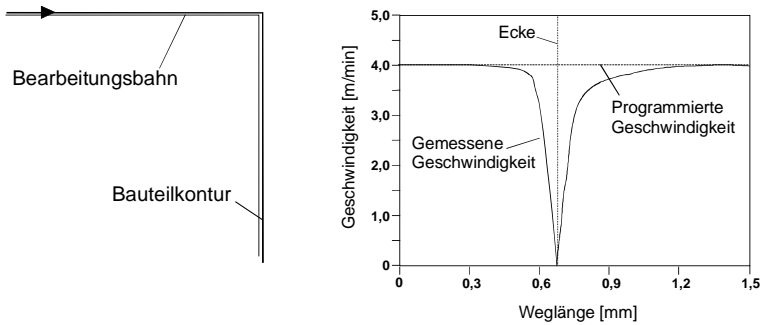


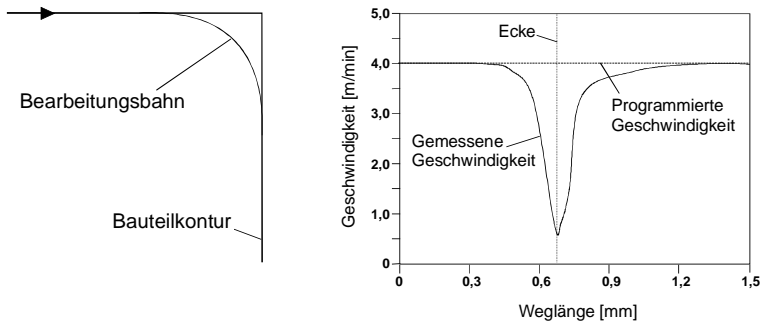
Bild 6.2 Typische dynamische Bahnabweichungen bei Robotern (ROGOS 1989)

6.1 Grundlagen des dynamischen Verhaltens des Systems Sensor-Roboter

Eine zu geringe Geschwindigkeitsverstärkung führt zu deutlichen Abweichungen von der gewünschten Bahn, die mit steigender Geschwindigkeit zunehmen. Wird K_v zu hoch eingestellt, kommt es zu ebenfalls geschwindigkeitsabhängigem Überspringen. Bei optimaler Einstellung von K_v kann die Bahnabweichung deutlich verringert werden.



Möglichst geringe Bahnabweichung



Möglichst konstante Geschwindigkeit

Bild 6.3 Geschwindigkeitsverlauf bei der Umfahrung von Ecken

Für Portalanlagen wurde ein linearer Zusammenhang zwischen dem Schleppabstand S und der realen Vorschubgeschwindigkeit nach

$$S = c_v \cdot v \quad (6.2)$$

ermittelt, wobei die Höhe von c_v durch die Einstellung von K_v beeinflusst wird (HOFFMANN 1992). Messungen haben ergeben, daß trotz der Vorgabe einer kon-

stanten Geschwindigkeit eine deutliche Verzögerung an den Ecken auftritt, wie in Bild 6.3 dargestellt ist (GEIGER U.A. 1992). Wenn die Strategie möglichst geringer Bahnabweichungen verfolgt wird, liegt die Verringerung der Geschwindigkeit in einer ähnlichen Größenordnung wie bei der Strategie der konstanten Geschwindigkeit.

Für Knickarmroboter können keine allgemeingültigen Aussagen getroffen werden. Aufgrund der Kinematik hängen die zur Umfahrung der Ecken erforderlichen Achsbewegungen und damit auch das Bahnverhalten von der Position der Kontur im Arbeitsraum ab. Aufgrund der Vielzahl an verfügbaren Kinematiken existieren bislang nur an den speziellen Anwendungsfall angepasste Methoden (z.B. LOO U.A. 1990), um das dynamische Verhalten von aus Rotationsachsen zusammengesetzten Kinematiken vorhersagen zu können. Im Rahmen dieser Arbeit soll daher eine Methode erarbeitet werden, mit deren Hilfe das jeweilige Verhalten des aktuell zum Einsatz kommenden Knickarmroboters schnell erarbeitet werden kann.

6.1.2 Einflüsse der Sensorik

Nahtfolgesensoren zur Bahnführung sind vorlaufend zur Bearbeitungsstelle angebracht. Der Einfluß des Sensorvorlaufs auf die erreichbaren Bahngeschwindigkeiten bei einer vorgegebenen Richtungsänderung wurde in einer Vielzahl von Arbeiten untersucht, die sich mit der Entwicklung von Nahtfolgesensoren beschäftigen. Dabei wird zwischen einer starren Sensorkopplung und einer Konfiguration, die eine Nachführung des Bearbeitungskopfes mittels Stellachsen ermöglicht, unterschieden (HORN 1994).

Bei einer starren Sensorankopplung führen Bahnrichtungsänderungen zu Verschiebungen der Kontur im Sensormessfenster. Damit der Sensor die Bahn nicht aus seinem Meßfenster verliert, müssen die in Bild 6.4 für einen Knick oder einen Radius in der Naht aufgezeigten Geometriebedingungen erfüllt sein.

Werden Sensorsysteme an eine Kinematik gekoppelt, die eine Nachstellung der Orientierung erlaubt, verliert diese Bedingung an Bedeutung. Hier gilt die in Bild 6.5 dargestellte Geometriebedingung (PRITSCHOW U.A. 1992A)

$$\alpha < \arctan \frac{f}{s_v} + \frac{1}{2} \dot{\omega}_{\max} \left(\frac{s_v}{v_B} - 2 \cdot T_{\text{sen}} \right)^2. \quad (6.3)$$

6.1 Grundlagen des dynamischen Verhaltens des Systems Sensor-Roboter

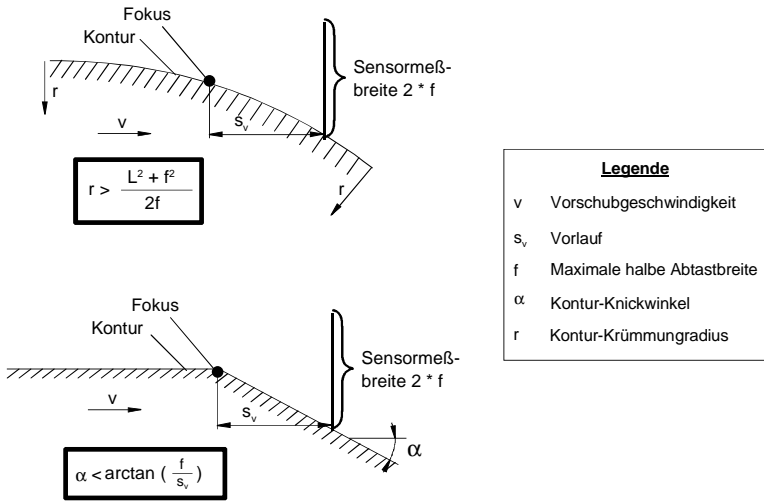


Bild 6.4 Geometriebedingungen bei starrer Sensorkopplung (NAYAK & RAY 1993, PRITSCHOW U.A. 1992A)

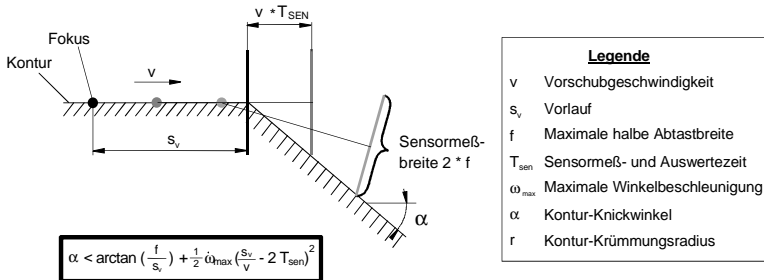


Bild 6.5 Geometriebedingungen bei Nachstellung der Orientierung

Durch Umformung lässt sich daraus die erforderliche Winkelbeschleunigung $\dot{\omega}$ des Handhabungsgeräts nach

$$\dot{\omega} > \frac{2 \cdot (\alpha - \arctan \frac{f}{s_v})}{(\frac{s_v}{v} - 2 \cdot T_{sen})^2} \quad (6.4)$$

berechnen. Für gekrümmte Konturen ist der erforderliche Knickwinkel aus dem Radius der Kontur über

$$\alpha = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{s_v}{2 \cdot r}\right) \quad (6.5)$$

zu bestimmen (BRONSTEIN & SEMENDJAJEW 1987).

Im Rahmen dieser Arbeit, welche die prozeßtechnische Optimierung vorhandener Systeme zum Ziel hat, werden die Sensorgrößen f , s_v und T_{sen} als gegeben angenommen. Die maximal mögliche Winkelbeschleunigung ω hängt von den Eigenschaften des zum Einsatz kommenden Handhabungsgeräts ab.

6.1.3 Auswirkungen auf die sensorgeführte Bahnbearbeitung

Werden schnelle Nahtfolgesysteme, die steuernd oder regelnd in die Robotersteuerung eingreifen, in Verbindung mit einem Handhabungsgerät eingesetzt, versuchen diese, bei konstanter Bahngeschwindigkeit die vorgegebene Bahn einzuhalten. Falls dies aufgrund der in Abschnitt 6.1.1 geschilderten Einschränkungen in der Dynamik nicht möglich ist, kommt es zu einem ungewünschten Bahnverhalten und zum Auftreten von Schwingungen. Um diese Schwingungen auszuschließen, ist es erforderlich, die Vorschubgeschwindigkeit an den kritischen Stellen auf ein für den Roboter zulässiges Maß zu reduzieren.

Derzeit sind keine Möglichkeiten bekannt, um für eine gegebene Anlage mit einem Handhabungsgerät in Knickarmkinematik Zusammenhänge zwischen den Eigenschaften der Bearbeitungsbahn wie Knickwinkel oder Krümmungsradius und der zulässigen Bahngeschwindigkeit zu ermitteln.

6.2 Beschreibung der Versuchsanlage

In den Versuchen zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens des Gesamtsystems Sensor-Roboter kommt ein Sechssachsroboter mit Knickarmkinematik der Firma KUKA zum Einsatz. Er verfügt über eine Tragkraft von 30 kg und einen maximalen Arbeitsradius von 1,35 m. Der Sensorkopf des Nahtfolgesensors SCOUT ist in einem Abstand von $s_v = 35$ mm vorlaufend zur Bearbeitungsstelle montiert.

Die Untersuchungen wurden an den in Bild 6.6 qualitativ dargestellten Konturen durchgeführt. Bei den geknickten Bauteilen wurde der Abstand zwischen den Knicken mit 10 mm ausreichend groß gewählt, so daß keine Wechselwirkungen zwischen aufeinanderfolgenden Konturelementen auftreten. Es wurden Knickwinkel von 5° , 10° , 15° und 20° in der waagrechten und senkrechten Ebene und Krümmungsradien von 60 mm, 90 mm und 350 mm in der waagrechten Ebene untersucht.

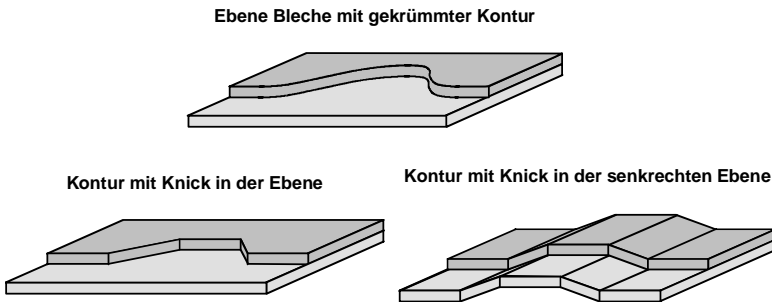


Bild 6.6 Bahnverläufe zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens

Zur Analyse des Bewegungsverhaltens wurde während der Untersuchungen der aktuelle Istwert der Lageregler aufgezeichnet. Voruntersuchungen hatten ergeben, daß dieser Wert ausreichend genau mit der aktuellen Roboterposition übereinstimmt. Bei Auswertung des Bewegungsverhaltens können einerseits die Kenngrößen der aktuellen Bewegung wie Position und Geschwindigkeit ermittelt und andererseits Schwingungen detektiert werden. Die Schwingungen weisen in der Regel eine derart hohe Amplitude auf, daß sie bereits bei optischer Betrachtung der Bewegung erkannt werden.

Um Einflüsse durch unterschiedliche Achsbewegungen zu vermeiden, wurden die Probeteile für die Untersuchungen zunächst abwechselnd an der identischen Stelle im Arbeitsraum untersucht. Hier wurden die Bahngeschwindigkeit und die Orientierungsführung des Sensorsystems variiert.

Die Orientierungsführung O_v ist ein Parameter des zum Einsatz kommenden Nahtfolgesystems, der vorgibt, wie stark die Bahnführung des Sensors Umorientierungen in der gemessenen Bahn folgt. Durch diese Funktion des Sensorsystems wird gewährleistet, daß nur größere Veränderungen in der Bahn zu einer Umorientierung führen. Der Ausgleich der Orientierung an kleineren Dellen oder

Scharten in der Bauteilkante hätte eine sehr unruhige Bahnführung zu Folge. Für $O_v = 0$ ist die Orientierung des Bearbeitungskopfes starr.

Um die Allgemeingültigkeit der Aussagen dieser Versuche zu überprüfen wurde in einer zweiten Versuchsreihe die Anordnung der Probeteile im Arbeitsraum und die Position der Bearbeitungsstelle zur Roboterhand variiert. Außerdem wurden vergleichende Untersuchungen mit einem zweiten Knickarmroboter der Firma KUKA durchgeführt.

6.3 Untersuchungen zum dynamischen Verhalten

Im folgenden soll eine Methode aufgezeigt werden, um für eine gegebene Anlage Zusammenhänge zwischen der Konfiguration des Roboters, den Eigenschaften der Bearbeitungsbahn und der zulässigen Bahngeschwindigkeit zu erarbeiten und in geeigneter Form in die Sensorsteuerung zu integrieren.

6.3.1 Erarbeitung eines roboterspezifischen Kennwerts

Im Rahmen der ersten Versuchsreihe wurden für die verschiedenen Krümmungsradien und Knickwinkel die Bahngeschwindigkeit und die Orientierungsführung variiert. Dabei wurde die Bahngeschwindigkeit für jede Probe von 1 m/min ausgehend in Schritten von 1 m/min erhöht, bis es zum Auftreten von Schwingungen kam. Für jede Geschwindigkeitsstufe wurden außerdem die minimal erforderliche Orientierungsführung und der Effekt einer Erhöhung von O_v untersucht.

Bei der Variation der Orientierungsführung zeigte sich, daß der minimal erforderliche Wert ausschließlich von der Geometrie der Proben beeinflusst wird. Hier wurde die Größe des Sensorsichtfelds, also die Einhaltung der in Bild 6.4 dargestellten Geometriebedingung als wichtige Randbedingung ermittelt. Dies zeigt sich daran, daß trotz nahezu identischer Achsbewegungen deutliche Unterschiede in der zu programmierenden Orientierungsführung bei senkrechten und waagrechten Knicken der Bahn auftreten.

Dieses Verhalten ist darauf zurückzuführen, daß das Sensorsichtfeld eine Breite f_b von 15 mm und eine Höhe f_h von 30 mm aufweist. Aus diesem Grund können Bleche mit Knicken in senkrechter Richtung mit Knickwinkeln bis 20° mit konstanter Orientierungsführung verfolgt werden, während bei Knicken in der Ebene

bereits bei einem Knickwinkel über 5° eine Anpassung der Orientierung erforderlich ist.

Eine Erhöhung der Geschwindigkeit macht keine Anpassung der Orientierungsführung erforderlich. Umgekehrt tritt bei den verwendeten Probekörpern, die aufgrund der gefrästen Nahtvorbereitung keine Scharten an der Bauteilkante aufweisen, keine Verschlechterung der Bahnführung durch eine Erhöhung von O_v auf. In den weiteren Untersuchungen wurde eine konstante Orientierungsführung von $O_v = 0,02$ eingestellt, die ausreichend ist, um auch Knickwinkel von 20° sicher zu verfolgen.

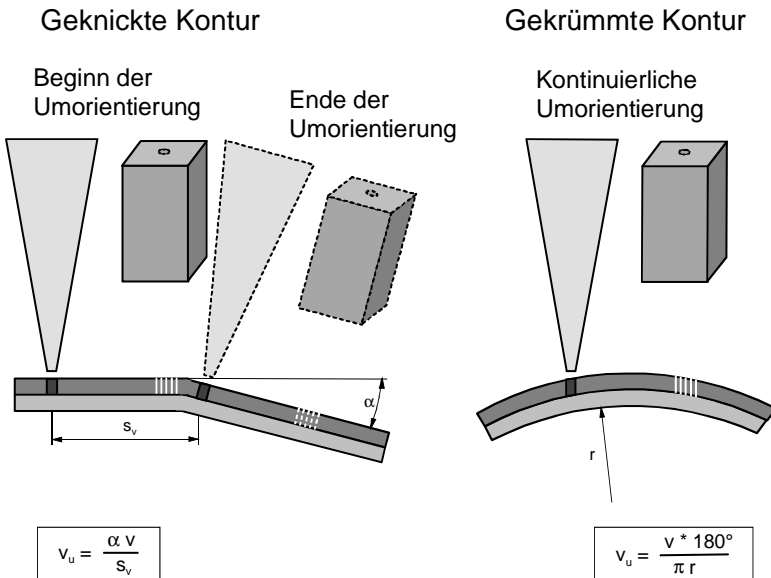


Bild 6.7 Definitionen der Umorientierungsgeschwindigkeit

Um in Anlehnung an die Geometriebedingung (5.3) eine vergleichende Beurteilung der Anforderungen an das dynamische Verhalten des Knickarmroboters zu ermöglichen, wird die Größe der Umorientierungsgeschwindigkeit v_u eingeführt. v_u ist definiert als der Quotient aus dem Winkel der erforderlichen räumlichen Umorientierung des Bearbeitungskopfes und der dafür notwendigen Zeit. In Bild 6.7 werden zwei Möglichkeiten zur Berechnung der Umorientierungsgeschwindigkeit vorgestellt. Eine Auswertung des Bahnverhaltens ergab, daß die hier ge-

6 Strategien zur dynamikgerechten Bahnführung

troffene Annahme einer über den betrachteten Bereich konstanten Geschwindigkeit der Umorientierung zulässig ist.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Einfluß der Bahngeschwindigkeit auf die Bahnführung sind in Bild 6.8 zusammengefaßt. Für die ebenen Nahtformen sind jeweils die maximal zulässige Geschwindigkeit, bei der keine Schwingungen in der Bewegung auftraten und die dazugehörige Umorientierungsgeschwindigkeit v_u bei einem Sensorvorlauf von $s_v = 35$ mm aufgetragen.

Geometrie		maximale Geschwindigkeit	Umorientierungsgeschwindigkeit
geknickte Bleche	10°	6 m/min	28,57 °/s
	15°	4 m/min	28,57 °/s
	20°	3 m/min	28,57 °/s
gekrümmte Bleche	60 mm	2 m/min	29,30 °/s
	90 mm	3 m/min	29,33 °/s
	350 mm	10 m/min	25,11 °/s

Bild 6.8 Erreichbare Bahn- und Umorientierungsgeschwindigkeiten

Bei den gekrümmten Blechen mit einem Radius von 350 mm wurde die Bahngeschwindigkeit durch die in der Robotersteuerung festgelegte Maximalgeschwindigkeit von 10 m/min begrenzt. Abgesehen von dieser Ausnahme ist zu erkennen, daß die erreichte Umorientierungsgeschwindigkeit v_u annähernd konstant bei einem Wert von etwa 29° pro Sekunde liegt. Somit wurde ein erster Richtwert zur Bestimmung der zulässigen Bahngeschwindigkeit gefunden.

In weiteren Untersuchungen wurden die Versuche an verschiedenen Stellen und Orientierungen im Arbeitsraum wiederholt. Es zeigte sich, daß annähernd über den gesamten Arbeitsraum der oben genannte Grenzwert gültig ist. Lediglich an den Grenzen des Arbeitsraums oder beim Durchfahren von Punkten wie singulären Stellen, an denen die Achsen extreme Geschwindigkeiten erreichen, waren deutlich geringere Bahngeschwindigkeiten möglich. An diesen Stellen gelten

jedoch in allen Fällen, also auch für geradlinige Bewegungen, Einschränkungen in der maximalen Bahngeschwindigkeit unabhängig von der erforderlichen Umorientierung.

In einem dritten Schritt wird der Einfluß der Werkzeuglänge l_w , definiert als der Abstand zwischen dem Arbeitspunkt und der Roboterhand, untersucht. Die sich dabei ergebenden geometrischen Verhältnisse bei einer Werkzeugbewegung um die Strecke s_{Werkzeug} mit gleichzeitiger Umorientierung um α sind in Bild 6.9 zusammengefaßt.

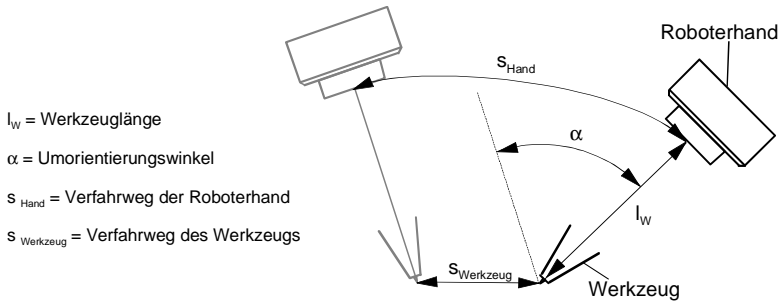


Bild 6.9 Einfluß der Werkzeugkorrektur

Die von der Roboterhand zurückzulegende Wegstrecke s_{Hand} berechnet sich über

$$s_{\text{Hand}} = s_{\text{Werkzeug}} + l_w \cdot \pi \cdot \frac{\alpha}{360^\circ} \quad (6.6)$$

Daraus läßt sich die erforderliche Geschwindigkeit der Roboterhand nach

$$v_{\text{Hand}} = v_{\text{Werkzeug}} + l_w \cdot \pi \cdot \frac{v_u}{360^\circ} \quad (6.7)$$

bestimmen.

Nach SCHULTZ (1997, S. 74-75) stellt die Geschwindigkeit der Roboterhand den begrenzenden Faktor einer Umorientierungsbewegung dar. Dies wurde in den Versuchen mit variabler Werkzeuglänge bestätigt, in denen sich ein näherungsweise umgekehrt proportionales Verhalten zwischen Werkzeuglänge und zulässiger Umorientierungsgeschwindigkeit zeigte. Der Geschwindigkeitsanteil v_{Werkzeug} der Vorschubbewegung ist im Grenzbereich der zulässigen Bahngeschwindigkeit vernachlässigbar.

Der Ansatz einer konstanten Umorientierungsgeschwindigkeit zur Auslegung der zulässigen Vorschubgeschwindigkeit ist nur für eine konstante Werkzeuglänge gültig. Wird das Werkzeug verändert, ist eine Anpassung des Grenzwerts erforderlich. Da in der Regel mit einer konstanten Werkzeuglänge gearbeitet wird, ergibt sich keine Einschränkung in der Anwendbarkeit des Ansatzes.

Vergleichende Untersuchungen an einem weiteren Roboter haben gezeigt, daß der Grenzwert von v_u anlagenspezifisch und somit nicht allgemeingültig ist. Aufgrund der Komplexität der Einflußfaktoren aus Robotersteuerung und Leistungsvermögen der Antriebe ist eine analytische Ableitung der maximalen Umorientierungsgeschwindigkeit nur mit großem Aufwand möglich. Daher wird eine experimentelle Bestimmung des anlagenspezifischen Grenzwerts von v_u vorgeschlagen.

Dies ist durch das Abfahren einer programmierten Umorientierungsbewegung mit verschiedenen Geschwindigkeiten sehr einfach möglich. Der Grenzwert der zulässigen Geschwindigkeit ist erreicht, wenn es zum Auftreten von Schwingungen in der Bewegung kommt.

6.3.2 Umsetzung der Ergebnisse in der Sensorsteuerung

Um in der sensorgeführten Bahnbearbeitung das Auftreten von Schwingungen zu vermeiden, ist es erforderlich, die Bahngeschwindigkeit jeweils so anzupassen, daß der für die aktuelle Anlage gültige Wert der Umorientierungsgeschwindigkeit nicht überschritten wird. Dazu ist eine Analyse der Bearbeitungsbahn erforderlich. Da sich die Nahtformen an einem Bauteil, das in größeren Stückzahlen produziert wird, nur in geringem Maße unterscheiden, ist es zulässig dies für das jeweilige Bauteil nur einmalig durchzuführen.

Zu diesem Zweck ist die Nahtkontur zu vermessen, indem die Bahn mit Hilfe des Nahtfolgesensors abgefahren und die aktuellen Punkte abgespeichert werden. Module zur technologieorientierten Bahnplanung, die als Grundlage der Offline-Programmierung entwickelt wurden, sind geeignet um aus dieser Punktemenge einen aus Kreis- und Geradensegmenten zusammengesetzten Bahnverlauf zu berechnen (BACKES 1997). Dieser wird im Hinblick auf Krümmungen und Knicke analysiert und unter Berücksichtigung der maximalen Umorientierungsgeschwindigkeit ein bahnspezifischer Geschwindigkeitsverlauf generiert. Durch

Programmierung dieses Geschwindigkeitsverlaufs in die Sensorsteuerung ist eine schwingungsfreie Bahnbearbeitung gewährleistet.

Um einen fehlerfreien Schweißprozeß zu gewährleisten, ist trotz schwankender Bahngeschwindigkeit eine konstante, oder einer implementierten adaptiven Schweißfunktion entsprechende, Streckenenergie einzustellen. Die möglichen Strategien in Form von Anstellen des Bearbeitungskopfes und Laserleistungssteuerung sind in Bild 6.10 dargestellt (BACKES & BAUER 1997).

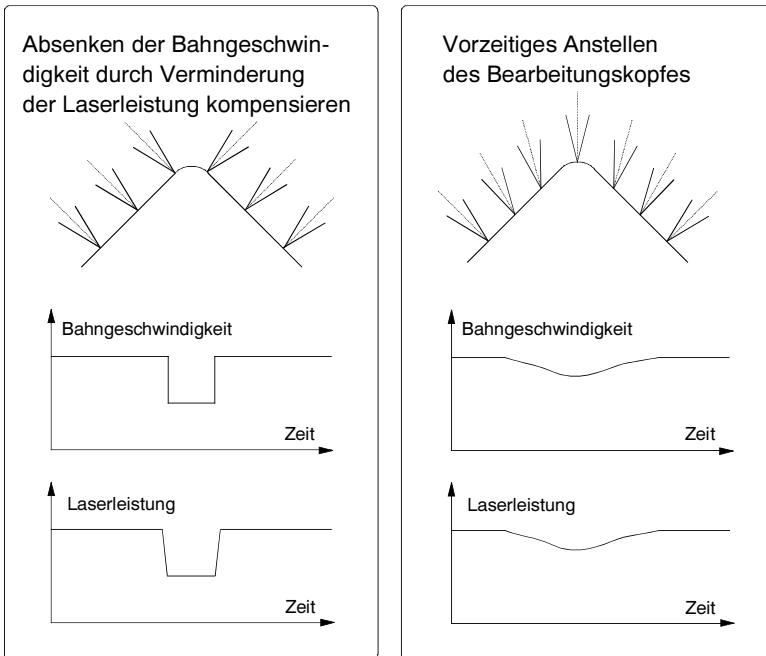


Bild 6.10 Strategien zur Bahnplanung bei starker Umlagerung

Eine Anpassung der Laserstrahlleistung ist möglich, solange die zur Ausbildung des Tiefschweißeffekts erforderliche Mindestintensität der auftreffenden Strahlung erreicht wird. Falls dies nicht gewährleistet ist, ist eine Modifikation des Bahnverlaufs und Absenkung der Umlagerungsgeschwindigkeit durch vorzeitiges Anstellen des Bearbeitungskopfes möglich. Moderne Sensorsteuerungen verfügen über die Funktionalität beide Strategien umzusetzen.

6.4 Zusammenfassung und Bewertung

Bei der Bearbeitung dreidimensionaler Bauteile sind häufig Konturen zu verschweißen, die eine starke Umorientierung des Bearbeitungskopfes erfordern. Hier kommt es aufgrund der Einschränkungen in der Dynamik der zum Einsatz kommenden sensorgeführten Handhabungsgeräte häufig zum Auftreten starker Schwingungen in der Bewegung. Diese können nur durch eine Reduzierung der Vorschubgeschwindigkeit oder Anpassungen des Bewegungsverlaufs wie Anstellen des Bearbeitungskopfes vermieden werden.

Eine rein experimentelle Optimierung des Bewegungsverhaltens anhand der aktuellen Anwendung ist mit großem Aufwand verbunden, da nicht nur der Geschwindigkeitsverlauf, sondern auch Prozeßparameter wie beispielsweise die Laserleistung angepaßt werden müssen. Aus diesem Grund werden theoretisch mögliche Anwendungen oftmals nicht oder nur mit einer technologisch ungünstigeren Nahtform, die weniger Toleranzanforderungen stellt, umgesetzt.

Durch die Definition des anlagenspezifischen Kennwertes der Umorientierungsgeschwindigkeit kann dieser Aufwand deutlich vermindert werden. Die maximal zulässige Umorientierungsgeschwindigkeit ist lediglich einmalig zu bestimmen und kann als Merkmal zur Analyse des Bewegungsablaufs herangezogen werden. Es konnte aufgezeigt werden, daß die Methode zur Bestimmung des Kennwertes allgemeingültig ist, auch wenn dieser für jede Anlagenkonfiguration erneut bestimmt werden muß.

Die Bauteil- und Prozeßanalyse basierend auf der Umorientierungsgeschwindigkeit kann außerhalb der Anlage geschehen, so daß die Einfahrzeiten deutlich verringert werden. Dies führt zu einer Verringerung der Nebenzeiten und damit zu einer Verbesserung der Auslastung der Anlage. Somit trägt die Verwendung der Methode auch zur Wirtschaftlichkeit der Laseranwendung bei.

7 Kosten-Nutzen-Analyse der sensorgeführten Bahnbearbeitung

Trotz Berücksichtigung der in den vergangenen Kapiteln aufgezeigten Methoden zur schnellen und einfachen Nutzung und Programmierung von Nahtfolgesensoren ist deren Einsatz mit einem hohen technologischen und wirtschaftlichen Aufwand verbunden. Neben den Investitionskosten für die Beschaffung der Sensorkomponenten ist dabei insbesondere der Aufwand für Inbetriebnahme, Wartung und Bedienung der häufig komplexen Sensorsysteme zu nennen, die erhöhte Anforderungen an die Qualifikation der Anlagenbediener stellen. Zudem stellt die Integration einer weiteren Komponente immer ein zusätzliches Fehlerpotential dar, das sich auf die Verfügbarkeit der Gesamtanlage auswirken kann.

Aus diesem Grund wird an dieser Stelle eine Abschätzung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses des Sensoreinsatzes beim Laserstrahlschweißen durchgeführt. Dabei sollen verschiedene Alternativen der Toleranzbeherrschung beim Laserstrahlschweißen von der Spanntechnik bis zum Einsatz sensorgeführter adaptiver Schweißfunktionen nach wirtschaftlichen und technologischen Gesichtpunkten bewertet und Kriterien zur Auswahl der am besten geeigneten Lösung vorgestellt werden.

In der Regel konkurriert das Laserstrahlschweißen je nach Anwendungsfall mit alternativen Fügeverfahren wie dem Widerstanzpunktschweißen, Stanznieten, Elektronenstrahlschweißen, Lichtbogenschweißverfahren oder dem Quetschnahtschweißen. Der Vergleich der lasergestützten Lösung mit alternativen Verfahren und die zugrunde liegenden Entscheidungskriterien sollen jedoch nicht Gegenstand der Analyse sein, da hierzu bereits eine Vielzahl an Überlegungen durchgeführt wurden (z.B. BAUER 1991, MERTENS 1998, NEUMANN 1985, RUGE 1985).

7.1 Alternativen der Toleranzbeherrschung beim Laserstrahlschweißen

Aufgrund der hohen Toleranzanforderungen des Laserstrahlschweißens, die in Kapitel 2 aufgezeigt wurden, erfordert das Verfahren einen hohen Aufwand an die Positionierung der Bauteile und die Handhabung. Dabei sind grundsätzlich

vier alternative Ausbaustufen denkbar, die im folgenden kurz vorgestellt werden sollen.

Alternative 1: Konventionelle Spanntechnik

Bei dieser Lösung erfolgt das Halten und Spannen mit Hilfe stationär im Raum angebrachter Vorrichtungen, welche die Zuordnung der Schweißpartner zueinander gewährleisten. Insbesondere bei dreidimensionalen Bauteilen, handelt es sich dabei um sehr aufwendige Konstruktionen, wie in Bild 8.1 anhand eines Beispiels dargestellt ist.

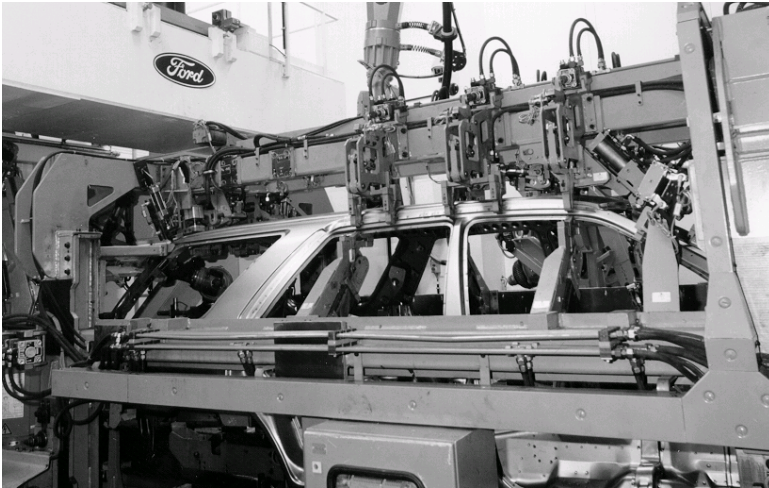


Bild 8.1 Konventionelle Spanntechnik

Alternative 2: Mechanische Kompensation

Um ein genaueres Positionieren des Bearbeitungskopfes in der Fügezone zu erreichen, werden lokale Führungselemente am Bearbeitungskopf eingesetzt. Beispiele für diese mechanische Kompensation von Toleranzen wurden bereits in Abschnitt 3.2.1 vorgestellt. Neben der Führung des Bearbeitungskopfes wird auch in eingeschränktem Maße ein vertikales Spannen der Bauteile, beispielsweise zur Verminderung eines Fugespalts erzielt.

Aufgrund der lokalen Wirkung derartiger Elemente kann auf den Einsatz einer konventionellen Spanntechnik, insbesondere zur Aufnahme der durch das Füh-

rungelement induzierten Vertikalkräfte und zur horizontalen Positionierung nicht verzichtet werden. Allerdings werden an die Gestaltung der Spannelemente in der Fügezone weniger Anforderungen in Bezug auf die Genauigkeit gestellt. Diese können zudem in einem größeren Abstand angebracht werden.

Alternative 3: Nahtfolgesensorik

Eine weitere Ergänzung der Anlagentechnik sind schnelle Nahtfolgesensoren zum Toleranzausgleich. In diesem Fall wird auf den Einsatz lokaler Spannelemente verzichtet. Der typische Aufbau und die Funktionsweise einer derartigen Anlage wurde in Abschnitt 2.1.3.3 vorgestellt.

Auch hier ist eine konventionelle Spanntechnik zum Halten und Grobpositionieren der Bauteile erforderlich. Da eine Aufnahme von Kräften in der Fügezone, beispielsweise zur Verminderung des Bauteilverzugs, nach wie vor erforderlich ist, ist es in der Regel nicht möglich, die Vorrichtung im Vergleich zu einer nicht sensorgeführten Lösung zu vereinfachen.

Alternative 4: Nahtfolgesensorik mit adaptivem Schweißen

Das adaptive Schweißen stellt eine erweiternde Option für das sensorgeführte Schweißen dar. Die auf dem Markt erhältlichen Nahtfolgesysteme für das Laserstrahlschweißen verfügen in der Regel über die Möglichkeiten, derartige Lösungen zu implementieren. Somit beschränkt sich der Zusatzaufwand für die Nutzung derartiger Funktionen auf die Entwicklung und Programmierung. Es ist unter Umständen lediglich ein minimaler Aufwand für die elektrische Verschaltung von Hardwarekomponenten erforderlich. Aufgrund der geringeren Anforderungen an die maximale Spalthöhe ist es allerdings möglich, an der Bearbeitungsstelle eine weniger aufwendige Spanntechnik, ähnlich Alternative 2, einzusetzen.

7.2 Wirtschaftliche Bewertung der Alternativen

Aufgrund der stark anwendungs- und werkstoffspezifischen Ausprägung einer Laserschweißanlage ist es nicht sinnvoll, eine allgemeingültige Bewertung der Wirtschaftlichkeit der Alternativen durchzuführen. So unterscheiden sich beispielsweise CO₂- und Nd:YAG-Laseranlagen erheblich in Investitions- und Betriebskosten. Außerdem hängen die Investitionskosten für die Spanntechnik stark von der Geometrie der Fügepartner ab.

Aus diesem Grund soll die Untersuchung und Bewertung der Alternativen anhand eines praxisrelevanten Beispiels erfolgen. Als Anwendungsbeispiel soll die Dachnahtschweißung an einem PKW dienen. Diese wird in aktuellen Anwendungen mit und ohne Sensorführung in verschiedenen Nahtformen verschweißt.

Das Bewertungskriterium für eine Wirtschaftlichkeitsrechnung beim Laserstrahlschweißen sind die Kosten pro Meter Schweißnahtlänge K_M . Diese berechnen sich aus dem Maschinenstundensatz K_H und der Schweißgeschwindigkeit v nach

$$K_M = \frac{K_H}{v} \text{ [DM/m]}. \quad (7.1)$$

Die Berechnung des Maschinenstundensatzes einer Laserschweißanlage erfolgt in Anlehnung an GARNICH (1992). Danach setzen sich die Investitionskosten einer Anlage aus den Kosten der Strahlquelle (Laser, Strahlführung, Kühlung), der Handhabung (Führungsmaschine und Sensorik) und prozeßspezifischen Komponenten wie der Gasversorgung zusammen. Für die hier durchzuführenden Überlegungen werden in die Berechnung außerdem die Kosten für die Spanntechnik und den Bearbeitungskopf aufgenommen. Die variablen Betriebskosten setzen sich aus Instandhaltungs- und Stromkosten sowie den Kosten für Arbeitsgase und Blitzlampen zusammen.

Die in der folgenden Berechnung angegebenen Kosten sind als ungefähre Richtwerte anzusehen. Sie beruhen größtenteils auf Angaben der Betreiber oder Hersteller der beschriebenen Anlagen oder Komponenten und teilweise auf eigenen Schätzungen.

Bei der Bewertung der Alternativen können die variablen Kosten sowie die Kosten für Strahlquelle und Handhabung unabhängig von der gewählten Spann- und Sensortechnik als konstant angesehen werden. Im betrachteten Beispiel einer Dachnahtschweißung an einem PKW soll ein Knickarmroboter in Verbindung mit einem Nd:YAG-Laser zum Einsatz kommen. Daraus resultieren Investitionskosten für Strahlquelle und Gasversorgung in Höhe von etwa 500.000 DM und für die Handhabungstechnik von 100.000 DM, sowie variable Kosten von 65 DM/h. Die Raumkosten betragen 5 DM/h. Dazu kommen die Kosten für Spanntechnik, Bearbeitungskopf und Sensorik, die abhängig von der zum Einsatz kommenden Alternative sind. Als kalkulatorische Zinsen werden 10% p.a. bei einer Abschreibung auf 5 Jahre mit 1600 Stunden Betriebsdauer pro Jahr angenommen.

Alternative 1: Konventionelle Spanntechnik

Falls auf den Einsatz von Elementen zur Toleranzkompensation verzichtet werden soll, werden hohe Anforderungen an die Spanntechnik gestellt. Somit ergeben sich Kosten für die Spanntechnik in Höhe von etwa 120.000 DM. Für den Bearbeitungskopf ohne aktive Komponenten sind etwa 10.000 DM anzusetzen. Kosten für Sensorik entfallen bei dieser Alternative.

Aufgrund der Bauteiltoleranzen ist es in dieser Anordnung lediglich möglich, die Verbindung als I-Naht am Überlappstoß zu verschweißen. Dabei kann eine Schweißgeschwindigkeit von 3 m/min erreicht werden.

Alternative 2: Mechanische Kompensation

Durch den Einsatz eines toleranzausgleichenden Elements am Bearbeitungskopf erhöhen sich dessen Kosten auf etwa 15.000 DM. Dafür werden geringere Anforderungen an die Spanntechnik gesetzt, so daß sich die Kosten auf 100.000 DM verringern. Sensorik wird wiederum nicht eingesetzt. Als Nahtform wird nach wie vor die I-Naht am Überlappstoß verschweißt.

Alternative 3: Nahtfolgesensorik

Bei Einsatz einer Nahtfolgesensorik kann auf eine aufwendige Spanntechnik an der Bearbeitungsstelle nicht verzichtet werden, da die Entstehung eines zu großen Fügespaltes verhindert werden muß. Somit fallen wiederum Kosten von etwa 120.000 DM an. Es ist ein Bearbeitungskopf für 10.000 DM ausreichend. Für die Sensorik selbst müssen etwa 60.000 DM als Investitionskosten gerechnet werden.

Nahtfolgesensoren erlauben den Ausgleich horizontaler Bauteiltoleranzen, so daß die Verbindung in diesem Fall als Kehlnaht am Überlappstoß bei einer Schweißgeschwindigkeit von 5 m/min umgesetzt werden kann.

Alternative 4: Nahtfolgesensorik mit adaptivem Schweißen

Bei Einsatz adaptiver Schweißfunktionen verringern sich die Kosten für die Spanntechnik wiederum auf etwa 100.000 DM. Alle anderen Kostenpunkte sind identisch zu Alternative 3. Da die Implementierung einer adaptiven Schweißfunktion mit einer spalthöhenabhängigen Verringerung der Schweißgeschwin-

7 Kosten-Nutzen-Analyse der sensorgeführten Bahnbearbeitung

digkeit verbunden ist, wird die durchschnittliche Vorschubgeschwindigkeit mit 4 m/min angesetzt.

Die aus diesen Angaben resultierenden Kosten pro Meter Schweißnaht sind in Bild 7.2 zusammengefaßt.

	Alternative 1	Alternative 2	Alternative 3	Alternative 4
Investitionskosten [DM]				
Strahlquelle	500.000	500.000	500.000	500.000
Spanntechnik	120.000	100.000	120.000	100.000
Handhabung	100.000	100.000	100.000	100.000
Bearbeitungskopf	10.000	15.000	10.000	10.000
Sensorik	0	0	60.000	60.000
Summe Investitionskosten [DM]	730.000	715.000	790.000	770.000
Abschreibung [DM/h]	91,25	89,38	98,75	96,25
Zinsen [DM/h]	22,81	22,34	24,69	24,06
Raumkosten [DM/h]	5,00	5,00	5,00	5,00
Betriebskosten [DM/h]	65,00	65,00	65,00	65,00
Maschinenstundensatz [DM/h]	184,06	181,72	193,44	190,31
Vorschubgeschwindigkeit [m/min]	3,0	3,0	4,0	3,5
Kosten pro m Schweißlänge [DM/m]	1,02	1,01	0,81	0,91

Bild 7.2 Kostenvergleich der Alternativen

Es ergibt sich, daß der Einsatz von Sensorik ohne adaptive Funktionen (Alternative 3) trotz des höchsten Maschinenstundensatzes die geringsten Kosten pro Meter Schweißlänge verursacht. Dies ist auf die höhere Schweißgeschwindigkeit zurückzuführen. Realisiert werden kann dieser Vorteil jedoch nur dann, wenn auch eine entsprechend höhere Auslastung der Anlage möglich ist. Der geringste Maschinenstundensatz ergibt sich bei Einsatz eines Spannelements am Bearbei-

tungskopf (Alternative 2). Der entscheidende Faktor ist hier die Einsparung der Kosten der Spanntechnik.

Die hier erzielten Ergebnisse erlauben keine allgemeingültige Aussage über die Wirtschaftlichkeit der Alternativen. Insbesondere bei Anwendungen, bei denen die Kosten der Spanntechnik weniger ins Gewicht fallen oder bei denen keine Substitution der Nahtform möglich ist, werden die jeweiligen Kosten deutlich anders ausfallen.

Eine Entscheidung über die Alternativen kann nicht ausschließlich aus dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit erfolgen. Dies gilt insbesondere für ein technologisch anspruchsvolles Verfahren wie die Lasermaterialbearbeitung. Ist es beispielsweise nicht möglich, über die Spanntechnik einen Fügespalt unter 0,3 mm zu garantieren, scheiden die Alternativen 1 und 3 von vorne herein aus. Falls verzinkte Bleche eingesetzt werden und gleichzeitig Dichtigkeit der Naht gefordert wird, ist es nicht möglich, Alternative 2 einzusetzen, da das Schließen des Fügespalts durch die Rolle ein Ausdampfen des Zinks zwischen den Blechen verhindert, was Auswürfe in der Naht zur Folge hat.

Aus diesem Grund werden im folgenden Kapitel die Möglichkeiten für eine technologische Bewertung der Ansätze erarbeitet. Basierend auf einer Analyse der auftretenden Toleranzen sollen Aussagen über die Machbarkeit der Alternativen für Spann- und Sensortechnik getroffen werden.

7.3 Technologische Bewertung

Die technologische Bewertung der Machbarkeit der Alternativen baut auf den grundsätzlichen Überlegungen aus Abschnitt 2.2 auf. Dort werden die auftretenden Toleranzen an Bauteilen und Handhabung sowie die zulässigen Abweichungen einiger Nahtformen grob analysiert. Für die hier durchzuführende technologische Bewertung ist jedoch eine feinere Analyse der Kenngrößen erforderlich. Die zu berücksichtigenden Größen sind in Bild 7.3 zusammengefaßt.

	x-Richtung	z-Richtung	Fügespalt
Toleranzen Fügestelle Fügekante in Spannvorrichtung Fügekante mit Andrückrolle	Δx_{Spann} Δx_{Spann}	Δz_{Spann} Δz_{Spann}	h_{Spann} h_{Rolle}
Genauigkeit Handhabung Roboter Mechanische Kompensation Sensorik	Δx_{Rob} Δx_{Rob} Δx_{Sensor}	Δz_{Rob} Δz_{Rolle} Δz_{Sensor}	
Zulässige Abweichung Prozeß Prozeß Adaptive Schweißfunktion	$\Delta x_{\text{Prozeß}}$ $\Delta x_{\text{Prozeß}}$	$\Delta z_{\text{Prozeß}}$ $\Delta z_{\text{Prozeß}}$	$h_{\text{Prozeß}}$ h_{Adaptiv}

Bild 7.3 Kenngrößen der Machbarkeitsanalyse

Für eine Machbarkeitsanalyse der vorgestellten Alternativen sind nicht die Toleranzen der einzelnen Fügepartner von Bedeutung, sondern die resultierende Abweichung in der Nahtlage und die Höhe des Fügespalts. In einer Spannvorrichtung sind beispielsweise Verformungen der Bauteile möglich, mit deren Hilfe Lageabweichungen ausgeglichen oder verstärkt werden.

Die bei Einsatz geeigneter Spannelemente erzielbaren Abweichungen können nicht allgemeingültig analysiert werden, da sie stark vom aktuellen Anwendungsfall bestimmt werden. Neben den Toleranzen sind unter anderem die Steifigkeit der Bauteile oder konstruktionsbedingte Unterschiede in der Geometrie der Fügepartner, zum Beispiel an Sicken, zu berücksichtigen. Aus diesem Grund werden hier die Abweichungen der Nahtlage bei Verwendung einer geeigneten Spannvorrichtung als gegebene Eingangsgrößen herangezogen.

Bei der Analyse der Handhabungstechnik ist neben dem aus Bahn- und Wiederholgenauigkeit des Roboters resultierenden Bahnverhalten alternativ die bei Einsatz einer Nahtfolgesensorik oder einer mechanischen Kompensation erzielbare Genauigkeit zu betrachten. Eine mechanische Kompensation der Fokuslage hat eine zusätzliche Funktion als Spannelement und kann somit eine Reduzierung

der Spalthöhe im Vergleich zur konventionellen Spanntechnik erreichen. Um die Funktionalität des mechanischen Fokuslageausgleichs abzubilden werden die Toleranzen der Spanntechnik in diesem Fall vereinfacht als Null angenommen.

Bei der Betrachtung des Schweißprozesses sind die jeweils mit und ohne adaptive Schweißfunktion überbrückbare Spaltbreite oder -höhe von Bedeutung. Die zulässigen Abweichungen des Schweißprozesses sind nur für die in der jeweiligen Anwendung spezifizierte Nahtform gültig. Wird eine andere Nahtform ausgewählt, gelten entsprechend modifizierte Grenzwerte.

Im Rahmen der Machbarkeitsanalyse ist die in Abschnitt 2.2.1 definierte Bedingung in modifizierter Form als

$$\Delta\text{Fügestelle} + \Delta\text{Handhabung} \leq \Delta\text{Prozeß} \quad (7.1)$$

auf die spezifizierten Alternativen anzuwenden. Dabei muß das Kriterium sowohl in x- und z-Richtung als auch für das Spaltmaß erfüllt werden. Für die Beurteilung der Kriterien werden die in Bild 7.4 dargestellten Ablaufpläne vorgeschlagen. Bei Einsatz von Nahtfolgesensoren sind die Abweichungen der Fügestelle nicht zu berücksichtigen, da diese über die Sensorik ausgeglichen werden. Das gleiche gilt für Toleranzen in z-Richtung bei Verwendung einer mechanischen Kompensation.

Durch die Ablaufpläne wird für jede der vier Alternativen die technologische Machbarkeit ermittelt. Als Ergebnis der Analyse können eine, mehrere oder keine Alternative zulässig sein.

Ist keine der Alternativen möglich, kann das Laserschweißen in der aktuellen Anwendung und Anlagentechnik nicht eingesetzt werden. Mögliche Lösungsansätze sind hier die Modifikation der Bauteilkonstruktion wie beispielsweise der Übergang auf eine andere Stoßform, die Verwendung einer verbesserten Anlagentechnik oder der Übergang auf ein alternatives Fügeverfahren.

Sind mehrere Alternativen möglich, sind diese nach der in Abschnitt 7.2 dargestellten Methode im Hinblick auf ihre Wirtschaftlichkeit zu bewerten. Eine endgültige Entscheidung für die Lasertechnik kann jedoch erst nach einem technologischen und wirtschaftlichen Vergleich mit alternativen Fügeverfahren getroffen werden.

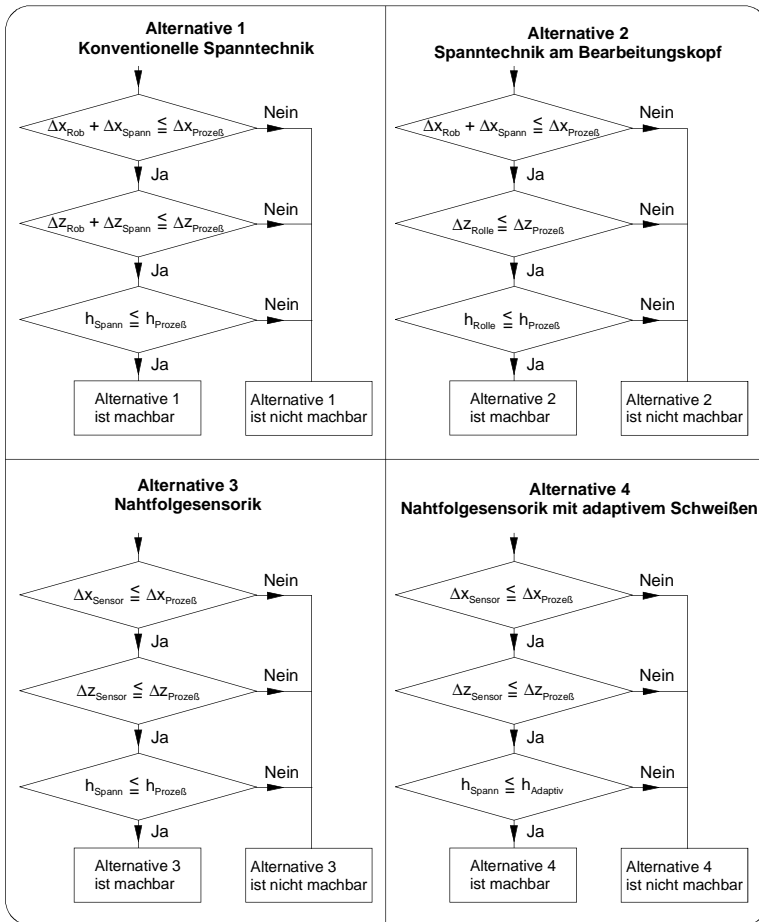


Bild 7.4 Ablaufplan der Machbarkeitsanalyse

8 Anwendungsbeispiel

Die erarbeiteten Ansätze wurden an einer industriellen Anlage zum Verschweißen von Aluminiumprofilen erprobt.

8.1 Beschreibung der Fertigungsaufgabe

In einer industriellen Anlage besteht die Aufgabe, Ladebordwände aus Aluminiumprofilen herzustellen. Diese sollen in Nut- und Federtechnik zusammengesetzt und mit einem CO_2 -Laser bei einer maximalen Leistung von 2,5 kW verschweißt werden. Aufgrund der Neigung des Profilwerkstoffs AlMgSi0.5 zu Heißrissen wird der Zusatzwerkstoff AlSi5 in Drahtform mit einem Durchmesser von 1,0 mm eingesetzt.

Zu diesem Zweck wurde eine automatisierte Anlage aufgebaut, in der die Bauteile über einen Handhabungsautomaten an die Schweißstelle gebracht, stehend eingespannt und verschweißt werden. Zur Erzeugung des Schweißvorschubs und zur Korrektur der seitlichen Nahtlage kommt eine speziell für den Anwendungsfall entwickelte Kinematik mit je zwei Linearachsen pro Profilseite zum Einsatz.

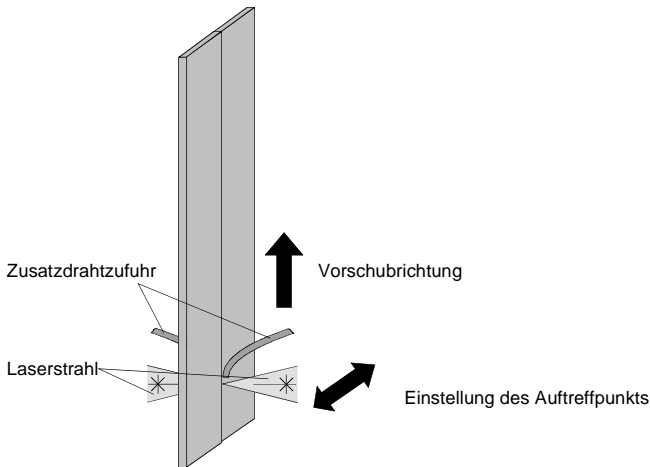


Bild 8.1 Schweißablauf

8 Anwendungsbeispiel

Ein Profilpaar wird gleichzeitig von beiden Seiten verschweißt, wobei jeweils am gleichen Profilde mit dem Schweißprozeß begonnen wird, wie in Bild 8.1 dargestellt ist. Aufgrund von Einschränkungen in der Handhabung ist eine Änderung der Schweißreihenfolge nicht möglich. Allerdings können auf den beiden Profilseiten verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten eingestellt werden. Die zweite Linearachse ist senkrecht zur Vorschubrichtung angeordnet und ermöglicht die Einstellung des Auftreffpunkts des Laserstrahls.

Für eine komplette Ladebordwand werden bis zu zehn Profile zusammengesetzt. Für verschiedene Varianten der Ladebordwand kommen unterschiedliche Profilformen zum Einsatz. Diese unterscheiden sich lediglich in der Profilbreite, wobei die Geometrie der Fügezone identisch ausgebildet ist. Der Querschnitt eines typischen Profils und die Geometrie der Fugestelle sind in Bild 8.2 dargestellt.

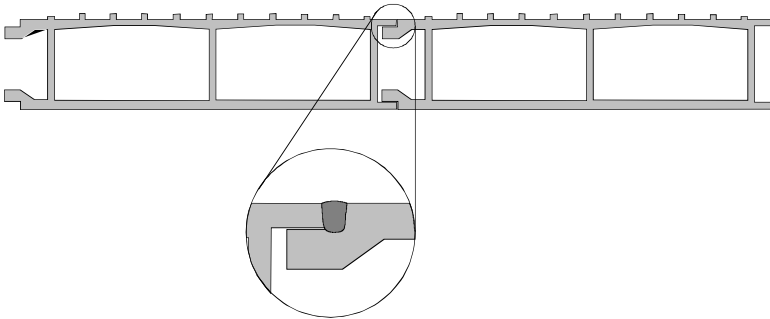


Bild 8.2 Typischer Profilquerschnitt und Geometrie der Fügezone

Aufgrund der Maßtoleranzen der Bauteile und der Anordnung der Spannelemente treten Positions- und Formabweichungen an der Schweißstelle auf, die in Bild 8.3 zusammengefaßt sind. Aus Gründen der Zugänglichkeit ist es nicht möglich, die Bauteile direkt an der Schweißstelle zu spannen. Der Anschlag, der die seitliche Lage des Profils definiert, befindet sich an der der Schweißstelle abgewandten Profilseite. Aus diesem Grund ist die Lage der Schweißstelle einer Abweichung in Höhe der Maßtoleranz der Bauteilbreite Δb von $\pm 1,4$ mm unterworfen.

Die Länge der Stege der Nut-und-Feder-Verbindung hat eine Toleranz von $\Delta l = \pm 0,2$ mm. Dieses Toleranzmaß gilt unabhängig voneinander für beide Stege. Die Lage der Auflageflächen auf dem zweiten Fügepartner kann bis zu $\Delta s = 0,2$

mm von einander abweichen. Somit ergibt sich durch die statischen Abweichungen im ungünstigsten Fall ein Fügespalt von 0,6 mm.

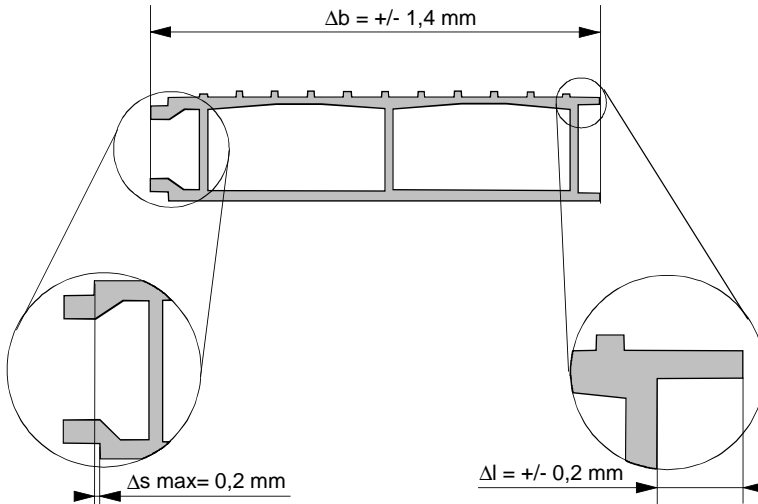


Bild 8.3 Relevante Bauteiltoleranzen

Zu den statischen Toleranzen kommen dynamische Abweichungen hinzu, die sich durch den beim Schweißprozeß induzierten Wärmeverzug ergeben. Die thermische Verformung durch den Schweißprozeß hat zur Folge, daß die Bauteile sich V-förmig auseinander bewegen (vgl. Bild 8.4). Selbst wenn dieser Verformung durch Verspannen der Bauteile am Profilende entgegen gewirkt wird, ergibt sich dadurch ein Fügespalt von bis zu 1,5 mm in der Profilmittte.

Bei Überlagerung aller Einflüsse ergibt sich somit eine Lagetoleranz der Fügestelle Δx von 2,8 mm und ein maximaler Fügespalt h_s von 2,1 mm.

Aufgrund der hohen Lagetoleranzen der Naht ist der Einsatz eines Nahtfolgesystems erforderlich. Es wird das nach dem Mehrstreifenlichtschnittverfahren arbeitende System SCOUT eingesetzt. Dies vermißt vorlaufend die Seitenlage der Naht und den aktuellen Fügespalt. Durch Eingriff in die Steuerung des Handhabungsgeräts ist sowohl die Korrektur des Auftreffpunkts über die waagrechte Linearachse als auch das Einstellen der Schweißgeschwindigkeit über die Vorschubachse möglich.

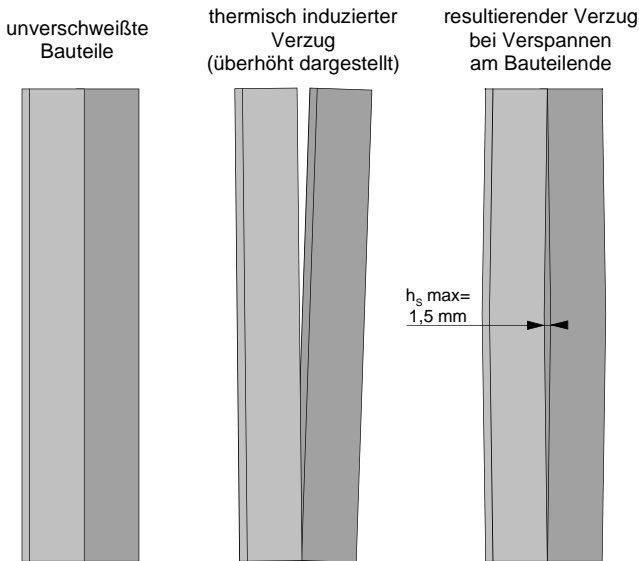


Bild 8.4 Bauteilverzug durch thermische Beanspruchung

Bei der Erarbeitung der Prozeßparameter zeigte sich früh, daß die hohen Fügspalte in einem reinen Laserstrahlschweißprozeß nicht überbrückt werden können, da ein sicheres Aufschmelzen beider Fügekanten nicht gewährleistet ist. Eine Defokussierung des Laserstrahls ist nicht möglich, da in diesem Fall die für die Ausbildung eines Tiefschweißeffekts erforderliche Intensität nicht mehr erreicht wird. Aus diesem Grund wurde zusätzlich eine Plasmastrahlquelle integriert. Dadurch ergibt sich eine bessere Verteilung der Energieeinbringung und somit breitere Nähte. Durch dieses hybride Verfahren können auch Fügspalte von über 2 mm sicher überbrückt werden.

8.2 Entwicklung der adaptiven Schweißfunktion

Um die optimalen Parameter für die Spaltüberbrückung zu finden und in die Sensorsteuerung zu programmieren, war eine adaptive Schweißfunktion zu erarbeiten. Aufgrund des geradlinigen Nahtverlaufs war die Berücksichtigung einer eventuellen Umorientierung nicht erforderlich.

8.2.1 Analyse der Prozeßparameter

Als Grundlage für die adaptive Funktion wurden zunächst die zur Verfügung stehenden Prozeßparameter analysiert. Grundsätzlich können von Seiten der Strahlerzeugung sowohl die Laserstrahlleistung als auch der Plasmastrom eingestellt werden. Weiterhin können sowohl die Vorschub- als auch die Drahtgeschwindigkeit variiert werden.

Aufgrund der Vorgabe einer maximalen Schweißgeschwindigkeit wird die Laserleistung konstant auf dem Maximalwert von 2,5 kW belassen. Der Plasmastrom wird auf 85 A eingestellt, wobei hier eine Erhöhung der Leistung auf bis zu 90 A gegeben ist. Somit ergeben sich Vorschub- und Drahtgeschwindigkeit als die Einstellgrößen der adaptiven Funktionen. Aus diesem Grund können die Überlegungen in Abschnitt 5.3.2.2 zur Entwicklung adaptiver Funktionen an der I-Naht am Stumpfstoß als Grundlage für die Aufgabenstellung herangezogen werden.

8.2.2 Theoretische Überlegungen

Die in dieser Aufgabenstellung vorliegende Nahtgeometrie weicht von der in Bild 5.14 zugrunde gelegten Geometrie einer idealen I-Naht am Stumpfstoß ab, da in diesem Fall keine Durchschweißung vorliegt, wie in Bild 8.2 zu erkennen ist. Aus diesem Grund müssen die theoretischen Überlegungen, aus denen die adaptive Funktion abgeleitet wird, überdacht werden. Der aktuelle vorliegende Nahtquerschnitt ist in Bild 8.5 dargestellt. Abgeleitet aus (5.12) und (5.17) ergeben sich die folgenden Zusammenhänge für den Nahtquerschnitt.

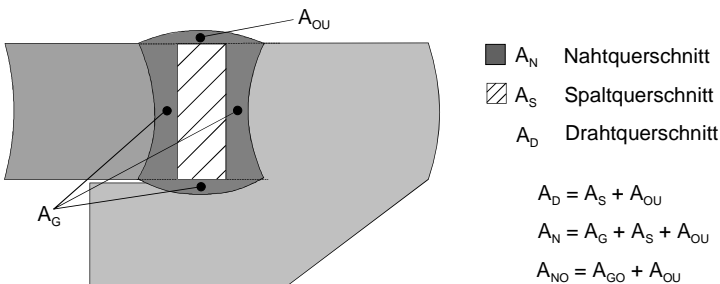


Bild 8.5 Analyse des Nahtquerschnitts

8 Anwendungsbeispiel

$$A_{\text{Naht}} = \frac{t}{c_{\text{IM}} \cdot v} \quad \text{und} \quad A_{\text{N0}} = \frac{t}{c_{\text{IM}} \cdot v_0} \quad (8.1)$$

$$A_{\text{G0}} = A_{\text{N0}} - A_{\text{OU}} \quad \text{mit} \quad A_{\text{ou}} = \frac{v_{\text{d}} \cdot D_{\text{d}}^2 \cdot \pi}{4 \cdot v_0} \quad (8.2)$$

Die Parameter der Schweißung am Nullspalt $v_0 = 4 \text{ m/min}$ und $v_{\text{d0}} = 3,5 \text{ m/min}$, sowie die Konstante $c_{\text{IM}} = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ min/mm}^2$ sind aus Vorversuchen bekannt.

Es ist so viel Zusatzwerkstoff zuzuführen, daß stets eine konstante Nahtüberhöhung A_{OU} gewährleistet ist. Die Vorschubgeschwindigkeit ist so einzustellen, daß der Nahtquerschnitt ausreicht, um das vollständige Spaltvolumen und den Minimalanteil im Grundwerkstoff

$$A_{\text{G min}} = \frac{A_{\text{GO}}}{2} \quad (8.3)$$

aufzuschmelzen. Eine Veränderung der Schweißgeschwindigkeit ist somit erst erforderlich, wenn die aus (8.3) abgeleitete Bedingung

$$A_{\text{SG}} = \frac{A_{\text{G0}}}{2}$$

mit

$$A_{\text{SG}} = h_{\text{SG}} \cdot t \quad (8.4)$$

erreicht ist. Der Verlauf der adaptiven Schweißfunktion ist daher aus zwei Teilen zusammengesetzt. Die Übergangsspaltbreite h_{SG} berechnet sich für die vorliegende Blechstärke $t = 2 \text{ mm}$ durch Zusammenfassen und Umformen aus (8.1), (8.2) und (8.4) nach

$$h_{\text{G}} = \frac{1}{2 \cdot c_{\text{IM}} \cdot v_0} - \frac{v_{\text{d0}} \cdot D_{\text{d}}^2 \cdot \pi}{8 \cdot v_0 \cdot t} = 0,35 \text{ mm} . \quad (8.5)$$

Für $h_{\text{s}} < h_{\text{SG}}$ ist der Nahtquerschnitt

$$A_{\text{N}} = A_{\text{N0}}$$

und somit die Schweißgeschwindigkeit

$$v = v_0 \quad (8.6)$$

konstant. Für $h_{\text{s}} > h_{\text{SG}}$ gilt

$$A_{\text{Naht}} = A_{\text{N0}} + t \cdot (h_{\text{s}} - h_{\text{SG}}) . \quad (8.7)$$

Durch Umformung ergibt sich der Zusammenhang

$$v = \frac{v_0}{1 + v_0 \cdot c_{IM} \cdot (h_s - h_{SG})} \quad (8.8)$$

für die Schweißgeschwindigkeit.

Die Drahtgeschwindigkeit berechnet sich nach Umformung aus (6.12) über den gesamten Spaltbreitenverlauf mittels

$$v_d = v_{d0} \frac{v(h_s)}{v_0} + \frac{4 \cdot t \cdot v(h_s)}{D_d^2 \cdot \pi} h_s \quad (8.9)$$

In diesem Fall war es erforderlich, die Form der adaptiven Schweißfunktion neu zu erarbeiten, da der vorliegende Nahttyp in dieser Form noch nicht untersucht worden war. Die Funktionen sind jedoch nun auf alle weiteren Anwendungen übertragbar, in denen Stumpfstöße ohne Durchschweißung mit Zusatzwerkstoff verschweißt werden.



Bild 8.6 Spannvorrichtung mit Erfassung des Bauteilverzugs

8.3 Experimentelle Erprobung

Zur Bewertung des Ansatzes wurden unabhängig von den theoretischen Überlegungen Schweißversuche an verschiedenen definiert eingestellten Spaltbreiten durchgeführt. Um eine Verfälschung des Ergebnisses durch den Bauteilverzug zu verhindern, wurden dazu gekürzte Probebauteile verwendet und in einer eigens angefertigten Spannvorrichtung, welche die Erfassung eines eventuellen Verzugs erlaubt (Bild 8.6), verschweißt.

In Bild 8.7 sind die Funktionen, die sich aus dem theoretischen Ansatz bei der gegebenen Fertigungsaufgabe ergeben, den Ergebnissen der Schweißversuche gegenübergestellt. Es ist eine gute Übereinstimmung zwischen theoretischem und experimentellem Verlauf zu erkennen.

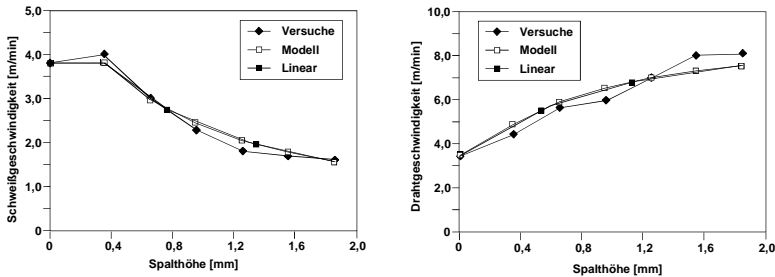


Bild 8.7 Verlauf der adaptiven Funktionen

In der Steuerung des Nahtfolgesensors wurde der Funktionsverlauf über drei, bzw. zwei Stützwerte linear angenähert. In der sensorgeführten Bearbeitung konnten mit diesen Parametern Spaltbreiten bis zu 2,5 mm prozeßsicher verschweißt werden. Der auf geometrischen Überlegungen basierende Ansatz zur Entwicklung adaptiver Schweißfunktionen konnte somit auch in der Praxis erfolgreich umgesetzt werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die im letzten Jahrzehnt herrschende Euphorie über das Potential der Schlüsseltechnologie Laser ist in letzter Zeit einer kritischen Nüchternheit, insbesondere von Seiten der Industrie, gewichen. Es hat sich gezeigt, daß bei weitem nicht alle Lösungen, die erfolgreich unter Laborbedingungen an ausgewählten Geometrien erarbeitet wurden, auch in der praktischen Anwendung umgesetzt werden können. Die Lasertechnologie hat es schwer, in einem industriellen Umfeld, das durch die Forderung nach hoher Wirtschaftlichkeit, Prozeßsicherheit und Qualität geprägt ist, zu bestehen. Besonders deutlich wird dies beim Laserstrahlschweißen, in dem nur ein Bruchteil der im Labor beherrschten Anwendungen in der Vergangenheit auch in der Serienfertigung umgesetzt werden konnte.

Die problematischen Randbedingungen des Verfahrens Laserstrahlschweißen stellen die hohen Anforderungen an die Positionierung des Laserstrahls bei gleichzeitig großen Vorschubgeschwindigkeiten dar. Sowohl die Bauteilvorbereitung als auch die Fähigkeiten der am Markt erhältlichen Handhabungsgeräte erfüllen die Anforderungen der Laserstrahlschweißtechnik nur unzureichend.

Der hier gewählte Ansatz zur Verbesserung des industriellen Potentials der Laserstrahlschweißtechnik ist der Einsatz von Sensorik. Prozeßsensoren sind sehr gut für die Qualitätssicherung geeignet. Sie können jedoch nicht zur Bahnführung eingesetzt werden. Optische Nahtfolgesensoren hingegen sind inzwischen sehr weit entwickelt und erfüllen die Anforderungen einer hohen Genauigkeit und Geschwindigkeit der Bahnführung. Defizite von Nahtfolgesensoren liegen in der mangelnden Berücksichtigung von Abweichungen von der idealen Stoßgeometrie wie Fügespalt oder Bauteilversatz.

Das Ziel dieser Arbeit bestand darin, durch geeignete Strategien eine fehlerfreie Fokuspositionierung sicherzustellen und somit die Grundlagen für eine fehlerfreie Schweißbearbeitung zu gewährleisten. Zu diesem Zweck wurden Lösungen zur Verfügung gestellt, mit deren Hilfe die Funktionalität schneller, nach dem Triangulationsprinzip arbeitender Nahtfolgesensoren zur Anpassung an nicht ideale Naht- und Stoßformen verbessert wird.

Grundvoraussetzung für eine fehlerfreie Bahnführung ist eine sichere Erkennung der Naht und der Stoßform. Dies ist besonders kritisch bei der I-Naht am Stumpfstoß. Um trotz der von der Oberfläche und dem Einstrahlungswinkel abhängigen Intensität der reflektierten Strahlung eine gleichmäßige Ausleuchtung

des Detektors zu gewährleisten, ist eine automatische Belichtungsregelung erforderlich. Bei der Vermessung der Spaltbreite besteht eine stoßkantenspezifische Differenz zwischen der gemessenen und der realen Spaltbreite. Da diese über den Spaltbreitenverlauf konstant ist, ist eine Korrektur der Meßwerte durch Programmierung eines Offset möglich.

Im nächsten Schritt wurden für die Kehlnaht am Überlappstoß und die I-Naht am Stumpfstoß adaptive Schweißfunktionen erarbeitet, mit deren Hilfe Prozeßparameter in geeigneter Form angepaßt werden, um Fügespalte zwischen den Schweißpartnern zu überbrücken. Die für diese Untersuchungen erforderlichen Schweißversuche wurden nach den Methoden der statistischen Versuchsplanung geplant, durchgeführt und analysiert.

Zur Spaltüberbrückung wurden bei der Kehlnaht am Überlappstoß Schweißgeschwindigkeit und Fokuslage angepaßt, bei der I-Naht am Stumpfstoß die Schweiß- und Drahtgeschwindigkeit. Die Form der funktionalen Zusammenhänge zwischen den jeweiligen Prozeßparametern und der Spaltbreite wurde durch theoretische geometrische Überlegungen abgeleitet. Dabei wurde die Einstellung eines geeigneten Nahtquerschnitts als Kriterium herangezogen. Vergleichend wurden jeweils auch Näherungslösungen betrachtet. Die Parametrisierung der Funktionen mit Hilfe von Konstanten bietet die Möglichkeit, diese an den aktuellen Anwendungsfall anzupassen. Die Ermittlung der Konstanten erfolgt entweder durch direkte Berechnung mittels Auswertung von Nahtquerschnitten oder durch experimentelle Bestimmung von Stützwerten des Funktionsverlaufs.

Anhand von Probeschweißungen wurde aufgezeigt, daß die dargestellte Methode geeignet ist, funktionale Zusammenhänge zu ermitteln, die sehr gut mit den aufwendig durch Optimierung der Parameter für den gesamten Spaltbreitenverlauf ermittelten exakten Funktionen übereinstimmen. Mit den erarbeiteten Funktionen ist es möglich, Fügespalte bis zur Höhe der Blechdicke zu überbrücken.

Die Bearbeitung dreidimensionaler Nähte scheitert häufig daran, daß die Dynamik der zum Einsatz kommenden Kombination aus Handhabungsgerät und Sensor nicht ausreicht, um die Bahn schwingungsfrei in der geforderten Genauigkeit und Geschwindigkeit zu verfolgen. Als Kriterium für eine schwingungsfreie Bahnverfolgung wurde die Umorientierungsgeschwindigkeit definiert. Die Höhe des anlagen- und werkzeugspezifischen Kennwertes ist einfach experimentell zu ermitteln. Durch eine dem Bahnverlauf entsprechende Anpassung der Bahngeschwindigkeit, Steuerung der Laserstrahlleistung zur Einstellung einer konstan-

ten Streckenenergie oder vorzeitiges Anstellen des Bearbeitungskopfes kann ein fehlerfreier Bewegungsverlauf und Schweißprozeß gewährleistet werden. Moderne Sensorsysteme bieten die Möglichkeiten, diese Lösungen in der Bahnbearbeitung zu berücksichtigen.

Anhand einer Abschätzung der auftretenden Kosten wurde aufgezeigt, daß sensorgeführte Lösungen auch unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten Vorteile bringen, insbesondere falls durch den Übergang auf eine andere Stoßform eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit erreicht werden kann. Letztlich ist jedoch bei der Auswahl der Anlagenkonfiguration die technologische Machbarkeit, also das Beherrschen der Bauteiltoleranzen, entscheidend.

Abschließend wurde ein Anwendungsbeispiel vorgestellt, in dem eine adaptive Schweißfunktion für eine I-Naht am Stumpfstoß ermittelt wurde. Es kam eine hybride Strahlquelle aus Laser- und Plasmastrahlung zum Einsatz. Es konnte aufgezeigt werden, daß der beschriebene Ansatz geeignet ist, um die neuen Randbedingungen der Strahlquelle in einfacher Weise zu berücksichtigen. Trotz leicht veränderter geometrischer Randbedingungen konnten durch Nutzung der erarbeiteten Vorgehensweise Funktionen ermittelt werden, mit denen auch sehr große Spaltbreiten bis über zwei Millimeter überbrückt werden können.

Wie in der Arbeit an vielen Stellen deutlich wurde, werden die Grenzen des Einsatzes des Laserstrahlschweißens heute noch stark durch die zur Verfügung stehende Systemtechnik vorgegeben. Hier ist an erster Stelle die Handhabungstechnik zu nennen, die es derzeit nur eingeschränkt zuläßt, die Möglichkeiten hochentwickelter Sensorsysteme, wie die in der Arbeit zum Einsatz kommenden, auszunutzen. Der Laseranwender ist gezwungen, zwischen teuren Spezialentwicklungen oder kostengünstigen Standardgeräten, die die Anforderungen an Genauigkeit und Dynamik nur unter großem Aufwand erfüllen, zu wählen. Eine entscheidende Verbesserung kann nur erreicht werden, wenn deutliche Fortschritte in den zur Verfügung stehenden Geräten gemacht werden. Handhabungsgeräte in Hybridkinematik wie Triceptroboter bieten hier einen vielversprechenden Ansatz.

Die Laserschweißtechnik wird sich darüber hinaus einer Reihe neuer Anforderungen stellen müssen. Bislang sind industrielle Laserschweißanwendungen fast ausschließlich reine Massenfertigung in großen Stückzahlen. In Zukunft wird auch für den Laser eine variantenreiche Fertigung in geringen Losgrößen gefordert. Die vorhandene Handhabungs- und Sensortechnik ist geeignet, die dafür

notwendige Flexibilität zur Verfügung zu stellen. Für eine erfolgreiche Umsetzung sind jedoch neue Programmier- und Steuerungsstrategien gefordert.

Aufgrund der starken Spezialisierung der Anlagenkonfiguration im Hinblick auf die aktuelle Anwendung erfordert eine wirtschaftliche Fertigung derzeit eine Auslastung der Anlage mit einer Schweißaufgabe. Dies wird jedoch in Zukunft nicht möglich sein, da beispielsweise an mehreren Standorten marktnah in kleineren Stückzahlen produziert wird. Um dennoch die Auslastung der Anlage zu gewährleisten, ist es erforderlich, diese so konfigurierbar zu gestalten, daß verschiedene Anwendungen mit mehreren Laserprozessen gefertigt werden können. Ein möglicher Lösungsansatz wird ein modularer Aufbau der Systemtechnik sein.

Neben der Wirtschaftlichkeit der Fertigung werden die Qualitätsanforderungen weiter zunehmen. Dies betrifft sowohl die Prozeßsicherheit als auch die Zuverlässigkeit der Anlagentechnik. In Zukunft wird eine Beschränkung auf die sichere Erkennung von Bearbeitungsfehlern nicht mehr ausreichend sein. Vielmehr wird die sogenannte Null-Fehler-Produktion gefordert. Für das Laserstrahlschweißen kann dies nur durch eine mehrdimensionale Prozeßregelung erreicht werden. Im Bereich der Anlagentechnik wird die mannlose Fertigung und die Möglichkeit zur Fernwartung auch für die Lasertechnik gefordert, was nur durch eine zuverlässige Fehlererkennung und Diagnose gewährleistet werden kann. Durch die genannten Entwicklungen ergeben sich auch weiterhin anspruchsvolle Aufgaben an die Sensortechnik in der Lasermaterialbearbeitung.

10 Literaturverzeichnis

AKINKUOYE 1987

Akinkuoye, O.: Mega Trend in Automated Manufacturing: The Design and Development of Laser Beam Machining Robot. In: Belforte, D.: Second International Conference Combining Laser and Robot Technologies. Michigan: SME 1987

ALDER & BLOEHS 1998

Alder, H.; Bloehs, W.: Perspectives of Welding with a 6 kW-Nd:YAG-Laser for the automotive industry. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S. G20-G24.

ARTINGER U.A. 1990

Artinger, G.; Hanicke, L. u.a.: Untersuchung akustischer und optischer Meßverfahren zur Diagnose des Laserstrahlschweißens. Schweißen und Schneiden 42 (1990) 7, S. 333-337.

BACK 1991

Back, B.: Adaptive Welding Increases Quality. Photonics Spectra 25 (1991) 1, S. 181-185.

BACKES 1997

Backes, F.: Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserbearbeitung. Bamberg: Meisenbach, 1997.

BACKES & BAUER 1997

Backes, F.; Bauer, L.: Werkstattorientierte Offline-Programmierung und Simulation für die 3D-Laserstrahlbearbeitung. In: Geiger, M.; Reinhart, G.; u.a.: Präzisionslaserstrahlfertigungstechnik für den Maschinenbau. Erlangen: Gruner 1997, S. 33-51.

BAGGER 1998

Bagger, C.: Fundamental Laser Welding Process Investigations. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S. C43-C52.

BAGGER U.A. 1991

Bagger, C.; Lyngby, I. u.a.: On-line control of the CO₂ laser welding process. In: Deutscher Verband für Schweißtechnik e.V. (DVS):

Strahltechnik, Karlsruhe. Düsseldorf: DVS-Verlag 1991, S. 1-6.
(DVS-Berichte 135)

BARTHEL 1995

Barthel, K.: Nahtverfolgungssystem für das Laserstrahlschweißen.
Blech Rohre Profile 42 (1995) 5, S. 336-337.

BARTHEL & HOLICK 1993

Barthel, K.; Holick, F.: SCOUT Nahtfolgesystem. In: Waidelich, W.:
Laser in der Technik. Berlin: Springer 1993, S. 550-553.

BARTHEL & TRUNZER 1994

Barthel, K.; Trunzer, W.: Sensor verfolgt die Schweißnaht. Laser-
Praxis (1994) 5, S. 18-21.

BAUER 1991

Bauer, C.: HandBuch der Verbindungstechnik. München: Carl Hanser
1991.

BECK 1996

Beck, M.: A Survey of Modelling Laser Deep Welding. In: Dausinger,
F.; Bergmann, H.W.; Sigel, J.: Proceedings of the 6th European Con-
ference on Laser Treatment of Materials ECLAT '96. Wiesbaden,
Dinges & Frick 1996, S. 61-69.

BECKMANN 1989

Beckmann, L.: Sensorgesteuertes Schweißen mit Robotern. In: Robo-
ter '89 Lichtbogenschweißen Lichtbogenschneiden Verwandte Ver-
fahren, Fellbach. Düsseldorf: DVS-Verlag 1989, S. 32-35. (DVS-
Berichte 118)

BEHLER 1993

Behler, K.: Schweißen mit CO₂-Lasern. In: Herziger, G.; Loosen, P.:
Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung. München: Carl Hanser
1993, S. 135-159.

BELFORTE 1988

Belforte, D.: Laser applications in the auto industry. In: Hügel, H.: La-
sers in Manufacturing, Stuttgart. Berlin: Springer 1988, S.61-70.

BEYER U.A. 1987

Beyer, E.; Behler, W.; Sokolowski, W.: Einfluss der Laserstrahl- und Prozeßparameter auf die Nahtgeometrie beim Schweißen. In: Waide-lich, W.: Laser/Optoelektronik in der Technik. 1. Aufl. Berlin: Springer 1987, S.517-522.

BEYER U.A. 1988

Beyer, E.; Herziger, G.; Poprawe, R.: Stand und Entwicklungstenden-zen der Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlen. Schweißen und Schneiden 40 (1988) 12, S. 620-622.

BEYER U.A. 1993

Beyer, E.; Gillner, A.; Wolff, U.: Anlagen und Komponenten zur La-sermaterialbearbeitung. In: Herziger, G.; Loosen, P.: Werkstoffbear-beitung mit Laserstrahlung. München: Carl Hanser 1993, S. 276-296.

BIERMANN U.A. 1992

Biermann, S.; Topkaya, M.; Jagiella, M.: Capacitive Clearance Sensor System for High Quality Nd:YAG Laser Cutting and Welding of Sheet Metals. In: Mordike, B.L.: European Conference on Laser Treatment of Materials, Göttingen. Oberursel: DGM Informationsge-sellschaft Verlag 1992, S. 51-55.

BÖGEL 1990

Bögel, H.: Laser führt Schweißroboter mit Pilotsensor. Laser-Praxis (1990) 1, S. 67-68.

BOROWKA U.A. 1987

Borowka, J.; Eichhorn, F. u.a.: Fortschritte in der Entwicklung adapti-ver Schweißkopfführungssysteme beim Lichtbogenschweißen. In: DVS: Schweißen und Schneiden '87, Hannover. Düsseldorf: DVS-Verlag 1987, S. 113-118.

BRAUMÖLLER U.A. 1998

Braumöller, J.; Grüneberg, D. u.a.: Laser welding with joint width measurement and controlled wire delivery. In: Mordike, B.L.: Europe-an Conference on Laser Treatment of Materials, Hannover. Frankfurt: Werkstoff Informationsgesellschaft mbH 1998, S. 321-325.

BRAUMÖLLER U.A. 1999

Braumöller, J.; Grüneberg, D. u.a.: Laserstrahlschweißen mit Nahtverfolgung. In: DVS: Schweißen und Schneiden '99, Weimar. Düsseldorf: DVS-Verlag 1999, S. 263-265.

BREITSCHWERDT 1999

Breitschwerdt, S.: On-line-Prozeßüberwachung zur Schweißtiefen- und Nahtlagenkontrolle „QUALAS“. In: DVS: Qualifizierung von Laserverfahren, Weimar. Düsseldorf: DVS-Verlag 1999, S. 110-111.

BRONSTEIN & SEMENDJAJEW 1987

Bronstein, N.; Semendjajew, K.: Taschenbuch der Mathematik. Thun: Harri Deutsch 1987.

BRÜGGEMANN & BENZINGER 1997

Brüggemann, G.; Benzinger, T.: Prozeßkontrolle durch Schallemissionsanalyse beim Laserstrahlschweißen. Schweißen und Schneiden 49 (1997) 5, S. 288-296.

BRÜMMER 1987

Brümmer, F.: Regelung der Schweißnahtgeometrie durch ein bildgebendes Sensorsystem – Vorgehen und Anwendungsbeispiele. In: DVS: Schweißen und Schneiden '87, Hannover. Düsseldorf: DVS-Verlag 1987, S. 130-133.

CHANDONI & OSTER 1990

Chandoni, K.; Oster, E.: Sensorlose Schweißkopfführungssysteme. Technica 39 (1990) 22, S. 103-109.

CHARTON U.A. 1998

Charton, S.; Voisin, Y. u.a.: On Line Control of Pulsed Nd:YAG Laser Welds. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S. C208-C215.

CHRYSSOLOURIS 1991

Chryssolouris, G.: Laser Machining Theory and Practice. New York: Springer 1991.

CLEEMANN 1987

Cleemann, L. (Hrsg.): Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern. Düsseldorf: VDI-Verlag 1987.

COSTE U.A. 1998

Coste, F.; Aubry, P. u.a.: A Rapid Seam Tracking Device for YAG and CO₂ high speed Laser Welding. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S. F217-F223.

CUCCHI U.A. 1991

Cucchi, M.; Pera, L.; Marioni, G.: Laser robotics for cutting and welding in the automotive industry. In: Deutscher Verband für Schweißtechnik e.V. (DVS): Strahltechnik, Karlsruhe. Düsseldorf: DVS-Verlag 1991, S.108-112. (DVS-Berichte 135)

CZICHOS 1989

Czichos, H.: Hütte Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften. Berlin: Springer 1989.

DAEVES 1953

Daeves, K.: Werkstoff-Handbuch Stahl und Eisen. 3. Aufl. Düsseldorf: Stahleisen 1953.

DEINZER U.A. 1994

Deinzer, G.; Otto, A. u.a.: Optimizing Systems for Laser Beam Welding. In: Geiger, M.; Vollertsen F.: Laser Assisted Net Shape Engineering. Bamberg: Meisenbach 1994, S. 193-206.

DELBOSCO 1992

Delbosco, W.: Robotised Solution for Laser Cutting and Welding. In: Beyer, E.: Laser applications in the automotive industry, Florenz: I-SATA 1992, S. 491-501.

DILTHEY & KROPLA 1994

Dilthey, U.; Kropla, O.: Sensorgeführtes Laserstrahlschweißen mit Zusatzdraht. In: Sievers, E.-R.: Materialbearbeitung mit CO₂-Laserstrahlen höchster Leistung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994, S. 45-47.

DILTHEY U.A. 1994A

Dilthey, U.; Fuest, D.; Kropla, O.: Ein Sensorsystem für das Laserschweißen mit Zusatzdraht. Blech Rohre Profile 41 (1994) 7/8, S. 454-458.

DILTHEY U.A. 1994B

Dilthey, U.; Fuest, D.; Kropla, O.: Sensorgesteuertes Laserstrahlschweißen mit Zusatzdraht. Laser und Optoelektronik 26 (1994) 1, S. 44-48.

DIN 1912, TEIL 1

DIN 1912, Teil 1: Zeichnerische Darstellung Schweißen, Lötten. Berlin: Beuth 1976.

DIN 32517, TEIL 3

DIN 32517, Teil 3 (Entwurf): Abnahmeprüfungen für CO₂-Laserstrahlanlagen zum Schweißen und Schneiden, Berlin: Beuth 1995.

DIN EN ISO 9956, TEIL 11

DIN EN ISO 9956, Teil 11: Anforderung und Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe, Berlin: Beuth 1996.

DIN EN ISO 11145

DIN EN ISO 11145: Laser und Laseranlagen Begriffe und Formelzeichen, Berlin: Beuth 1995.

DREWS U.A. 1992

Drews, P.; Schulze Wehninck, F.J. u.a.: Sensorsystem zur Fugenverfolgung und Fugengeometrieerfassung beim automatisierten Schutzgasschweißen. Robotersysteme 8 (1992) 3, S. 148-154.

DRUNK & HILD 1990

Drunk, G.; Hild, N.: Sensortechnik. In: Warnecke, H.-J.; Schraft, R.D.: Industrieroboter Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Berlin: Springer 1990, S. 86-111.

DUNKER 1997

Dunker, R.: Kamerageführte Roboter sind nicht aufzuhalten. Industrieanzeiger 119 (1997) 14, S. 68-69.

ECKL 1994

Eckl, F.: Aspekte zur Qualitätssicherung beim Laserschweißen im Automobilbau. München 1994.

EICHHORN U.A. 1989

Eichhorn, F.; Borowka, J.; Habedank, G.: Sensorgeführtes Roboterschweißen dünner Bleche - ein neues prozeßorientiertes Schweißkopfführungssystem zur Erkennung von Toleranzen der Fügestellengeometrie. In: Roboter '89 Lichtbogenschweißen Lichtbogenschneiden Verwandte Verfahren, Fellbach. Düsseldorf: DVS-Verlag 1989, S. 40-42. (DVS-Berichte 118)

EUROLASER 1996

Gruber, F. (Red.): BMW zeigt, wo's lang geht. EuroLaser 3 (1996) 3, S. 30-35.

EUROLASER 1998

Gruber, F. (Red.): Die Präzision der 3D-Naht. EuroLaser 5 (1998) 1, S. 32-35.

FALLDORF 1995

Falldorf, H.: Nahtverfolgung für das Laserstrahlschweißen unter besonderer Berücksichtigung eines vom Schweißautomaten unabhängigen Systems. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995. (Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik 467)

FELDMANN U.A. 1994

Feldmann, K.; Schönherr, U.; Zeller, J.: Programming and Control of Laser Beam Processing by Fast Sensor Guided Robots. In: Geiger, M.; Vollertsen F.: Laser Assisted Net Shape Engineering. 1. Aufl. Bamberg: Meisenbach 1994, S.749-758.

FERTIGUNG 1990

Füll, G. (Red.): Laser - das noch unbekannte Werkzeug. Fertigung 17 (1990) 9, S. 63-72.

FERTIGUNG 1992

Winkler, H. (Red.): Intelligente Sensorsysteme. Fertigung 20 (1992) 11, S. 42-44.

FERTIGUNG 1994

Angeli, H. (Red.): Laserkopf mit Steilkegel. Fertigung 22 (1992) 5, S. 26-27.

FILZ 1996

Filz, K.: Applications of a Laser Tracking System for real-time pose measurements. In: Prenninger, J.: New Trends in Robot Technology and Industrial Metrology. Wien: Profactor 1996, S. INF2/1-INF2/8.

FLOHR 1995

Flohr, J.: Beispiele für Systemlösungen. In: VDI Technologiezentrum physikalische Technologien: Vom Prozeß zum Produkt - Systemlösungen in der Lasertechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995, S. 93-99.

FLOHR & BAYERLEIN 1996

Flohr, J.; Bayerlein, H.: Prozeßoptimierung beim Laserschweißen im Karosseriebau. In: Dausinger, F.; Bergmann, H.W.; Sigel, J.: Proceedings of the 6th European Conference on Laser Treatment of Materials ECLAT '96. Wiesbaden, Dinges & Frick 1996, S. 41-48.

FLORIAN & OHLSSEN 1989

Florian, W.; Ohlsen, K.: Eignung von berührungslos messenden Sensoren für das Schweißen mit Robotern. Rogos, J.(Hrsg.): Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik. Berlin: Springer 1989, S. 87-106.

FRINGS 1994

Frings, A.: Fehlersuche. Maschinenmarkt 100 (1994) 20, S. 24-26.

FUCHS 1987

Fuchs, K.: Flexible, sensorgesteuerte Roboterschweißsysteme. Aachen: Fotodruck Mainz 1987.

GARNICH 1992

Garnich, F.: Laserbearbeitung mit Robotern. Berlin: Springer 1992. (iwb Forschungsberichte 50)

GARNICH & LINDL 1991

Garnich, F.; Lindl, H.: Plasmaspektroskopie in Laser Beam Welding. In: Waidelich, W.: Laser in der Technik. Berlin: Springer 1991, S. 424-428.

GARNICH & SCHWARZ 1990

Garnich, F.; Schwarz, H.: Laser führt Laser. Roboter 7 (1990) 3, S. 14-19

GATZWEILER U.A. 1988

Gatzweiler, W.; Maischner, D.; Beyer, E.: Messung von Plasma-
dichtefluktuat und Schallemission beim Laserstrahlschweißen zur
Prozeßüberwachung. Laser und Optoelektronik 20 (1988) 5, S. 64-69.

GEBHARD 1991

Gebhard, M.: Untersuchungen zur Prozeßüberwachung beim CO₂-
Laserschweißen von verzinkten Blechen im Überlappstoß. München
1991.

GEIGER & LUTZ 1995

Geiger, M.; Lutz, N.: Lasertechnologie für die Fabrik 2000. In: Gei-
ger, M.: Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik
2000. Bamberg: Meisenbach 1995, S. 3-12.

GEIGER U.A. 1992

Geiger, M.; Gropp, A.; Hoffmann, P.: Technological Comparison of
CO₂- and Nd:YAG-Laser Manufacturing Systems. In: Beyer, E.: Laser
applications in the automotive industry, Florenz: ISATA 1992, S. 511-
518.

GEIGER U.A. 1997

Geiger, M.; Otto, A.; u.a.: Produkt- und Prozeßinnovationen durch
intelligente Systemtechnik. In: Jüptner, W.; Sepold, G.: Lasermateri-
albearbeitung im Transportwesen. Bremen: IDEE & Druck 1997,
S.69-79. (Strahltechnik 5)

GRIEBSCH U.A. 1996

Griebisch, J.; Schlichtermann, L. u.a.: Selbstlernendes Mehrdetekto-
rensystem für die On-Line Prozeßkontrolle beim Laserschweißen von
Automobilkarossen. In: Dausinger, F.; Bergmann, H.W.; Sigel, J.:
Proceedings of the 6th European Conference on Laser Treatment of
Materials ECLAT '96. 1. Aufl. Wiesbaden, Dinges & Frick 1996, S.
89-96.

HAFERKAMP 1993

Haferkamp, R.: Entwicklung eines Informationssystems zur Unter-
stützung der Qualitätssicherung in der schweißtechnischen Fertigung.
Clausthal 1993.

HAFERKAMP & HÖFEMANN 1997

Haferkamp, H.; Höfemann, M.: Lasersystemtechnik für den Automobilbau. In: Jüptner, W.; Sepold, G.: Lasermaterialbearbeitung im Transportwesen. Bremen: IDEE & Druck 1997, S. 7-20. (Strahltechnik 5)

HAND U.A. 1998

Hand, D.P.; Peters, C. u.a.: Automatic detection of errors in Nd:YAG laser overlap welding of zinc coated steel. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S. C86-C92.

HEIDENREICH U.A. 1997

Heidenreich, B.; Holm, D.; Kalms, M.K.: Neues optisches Inspektionssystem für das Hochgeschwindigkeitsschweißen. In: Jüptner, W.; Sepold, G.: Lasermaterialbearbeitung im Transportwesen. Bremen: IDEE & Druck 1997, S. 57-65. (Strahltechnik 5)

HEIDER 1991

Heider, P.: Zusatzdraht erweitert das Einsatzgebiet trotz Restriktion der Laserleistung auf 3kW. In: Waidelich, W.: Laser in der Technik. Berlin: Springer 1991, S. 539-546.

HELD & GILLNER 1992

Held, J.; Gillner, A.: Modular Manufacturing Systems for Laser Welding, Cutting and Heat Treatment. In: Beyer, E.: Laser applications in the automotive industry, Florenz: ISATA 1992, S. 535-542.

HERZIGER 1990

Herziger, G.: Anwendungen und Perspektiven der Lasertechnik. Opladen: Westdeutscher Verlag 1990. (Vorträge N 380)

HOFFMANN 1992

Hoffmann, P.: Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen. München: Carl Hanser 1992. (Fertigungstechnik - Erlangen 29)

HOFFMANN U.A. 1996

Hoffmann, P.; Schuberth, S.; Zuber, M.: Iterative Qualitätskontrollen für präzises Laserschweißen. In: Dausinger, F.; Bergmann, H.W.; Sigel, J.: Proceedings of the 6th European Conference on Laser Treat-

ment of Materials ECLAT '96. 1. Aufl. Wiesbaden, Dinges & Frick 1996, S. 159-168.

HORN 1994

Horn, A.: Optische Sensorik zur Bahnführung von Industrierobotern mit hohen Bahngeschwindigkeiten. Berlin: Springer 1994. (ISW Forschung und Praxis 103)

HORNIG & REINHART 1990

Hornig, J.; Reinhart, G.: Laser bei BMW. Laser 6 (1990) 4, S. 240-245.

HSU U.A. 1998

Hsu, R.; Engler, A.; Heinemann, S.: The Gap Bridging Capability in Laser Tailored Blank Welding. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S. F224-F231.

HUANG U.A. 1988

Huang, N.; Abbott, M.-G.; Beattie, R.-J.: Approaches to low level image processing for vision guided seam tracking. In: IEEE: 9th International Conference on Pattern Recognition, Rome. Washington: IEEE Comput. Soc. Press 1988, S. 601-603.

HUANG U.A. 1992

Huang, Q.; Karnerno, B.; Skoog, H.: Practical Aspects on a Nd:YAG Laser-Robot for Sheet Metal Welding. In: Beyer, E.: Laser applications in the automotive industry, Florenz: ISATA 1992, S. 155-163.

HÜGEL 1992

Hügel, H.: Strahlwerkzeug Laser. Stuttgart: Teubner 1992.

HÜGEL 1995

Hügel, H.: Lasertechnik, Stand der Wissenschaft. In: VDI Technologiezentrum physikalische Technologien (Hrsg.): Vom Prozeß zum Produkt - Systemlösungen in der Lasertechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995, S. 9-15.

HUWER 1993

Huwer, A.: Sensorsystem zur Erfassung variabler Fügespaltweiten beim Laserstrahlschweißen im Stumpfstoß. Aachen: Shaker 1993. (Aachener Berichte Fügetechnik 3/93)

ISHIDE U.A. 1992

Ishide, T.; Nagura, Y. u.a.: High Power YAG Laser Welding and Its In-process Monitoring Using Optical Fibers. In: Mordike, B.L.: European Conference on Laser Treatment of Materials, Göttingen. Oberursel: DGM Informationsgesellschaft Verlag 1992, S. 81-86.

IWS 1998

IWS (Hrsg.): Sensorgesteuerte 3D-Geometrierfassung und Konturverfolgung für die Lasermaterialbearbeitung. Dresden: 1998

JOKINEN U.A. 1998

Jokinen, T.; Hovikorpi, J. u.a.: The effect of an air gap on the properties of high power Nd:YAG Laser Welds. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S. F103-F112.

JURCA 1993

Jurca, M.: On-line Monitor for the CO₂ Laser Welding Process. In: Waidelich, W.: Laser in der Technik. 1.Aufl. Berlin: Springer 1993, S. 499-502.

JURCA & WIESEMANN 1995

Jurca, M.; Wiesemann, W.: Selbstlernende Prozeßüberwachung. Laser-Praxis (1995) 10, S.94-95

KAHRSTEDT 1994

Kahrstedt, U.: Konzeption und Realisierung eines Lichtbogensensors zum Roboterschweißen räumlich gekrümmter Fugenverläufe ohne Bahnprogrammierung. Aachen: Shaker 1994. (Aachener Berichte Fügetechnik 3/94)

KAMMER 1998

Kammer, C.: Grundlagen und Werkstoffe. 15. Aufl. Oldenburg: Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation GmbH 1998. (Aluminium Taschenbuch 1)

KAPPELSBERGER 1987

Kappelsberger, E.: Werkstückspezifische Bedingungen beim Laserschweißen. In: Waidelich, W.: Laser/Optoelektronik in der Technik. Berlin: Springer 1987, S. 533-539.

KAUF 1997

Kauf, M.: Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage. Bamberg: Meisenbach 1997. (Fertigungstechnik - Erlangen 62)

KEHRER 1997

Kehrer, O.: Optimieren von Laserschweißungen mittels statistischer Versuchsplanung mit Beispielen aus dem Getriebekomponentenbau. In: TU Wien: Internationale Konferenz Schweißtechnik, Werkstoffe und Werkstoffprüfung, Bruchmechanik und Qualitätsmanagement. Wien: 1997, S. 155-166.

KIM & NA 1991

Kim, J.; Na, S.: A study on arc sensor algorithm for weld seam tracking in gas metal arc welding of butt joints. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (Journal of Engineering Manufacture) 205 (1991) B4, S. 247-255.

KIM U.A. 1998

Kim, C.-J.; Kim, M.-S.; Chung, C.-M.: Demonstration of Auto-focus Control by Chromatic Filtering. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S.C226-C235.

KIRBY U.A. 1994

Kirby, C.; Abels, P. u.a.: Process Monitoring for Laser Beam Welding and Applications. In: Geiger, M.; Vollertsen F.: Laser Assisted Net Shape Engineering. Bamberg: Meisenbach 1994, S. 125-134.

KLEINEMEIER & GIET 1987

Kleinemeier, B.; Giet, J.: Halbleitersensoren für die Bilderfassung in der Materialinspektion. Technisches Messen 54 (1987) 4, S. 146-154.

KNOROWSKI & FUERSCHBACH 1998

Knorowski, G.A.; Fuerschbach, P.W.: A CO₂ Laser Weld Shape-Predicting Neural Network. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S. F232-F241.

KÖBL 1991

Kölbl, W.: Die Naht im Auge behalten. Roboter 9 (1991) 2, S. 32-34.

KÖLBL 1995

Kölbl, W.: Affordable optical seam tracking. Industrial Robot 22 (1995) 6, S. 19-21.

KÖNIG & KLOCKE 1995

König, W.; Klocke, F.: Blechbearbeitung. Berlin: VDI-Verlag 1995. (Fertigungsverfahren 5)

KREUTZ 1991

Kreutz, E.W.: Schweißen. In: Bimberg, D.: Materialbearbeitung mit Lasern. Ehningen bei Böblingen: Expert 1991, S. 100-119. (Kontakt & Studium 343)

LAMPA U.A. 1997

Lampa, C.; Kaplan, A.; u.a.: An analytical thermodynamic model of laser welding. Applied Physics 30 (1997), S. 1293-1299.

LASER 1985

Kock, F. (Red.): Laserauge in Roboterhand. Laser 1 (1985) 11, S. 26-29.

LEIBINGER 1997

Leibinger, B.: Der Laser in der Fertigungstechnik - Geschichte und Perspektiven eines innovativen Produktes. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Münchener Kolloquium '97: Mit Schwung zum Aufschwung, München. Landsberg/Lech: moderne industrie 1997, S. 81-101.

LENZ U.A. 1998

Lenz, B.; Reinhart, G.; Rick, F.: Process Prototyping – Finite Element Modelling of the Laser Welding Process. In: Lasers in Engineering (1998) 7, S. 253-264.

LOO U.A. 1990

Loo, M.; Hamidieh, Y.; Milenkovic, V.: Generic path control for robot applications. Society of Manufacturing Engineers 1990, S. 1-16.

LÜTTMANN 1990

Lüttmann, U.: Weiterentwicklung von Lichtbogensensorsystemen zur Verringerung des Programmieraufwands unter besonderer Berücksichtigung der Toleranzen der Fugenvorbereitung. Düsseldorf: DVS-Verlag 1990. (Schweißtechnische Forschungsberichte 38)

MAZUMDER 1983

Mazumder, J.: Laser welding. In: Bass, M.: Laser Materials Processing. New York: North Holland 1983, S. 113-200. (Materials Processing-Theory and Practices 3)

MERTENS 1998

Mertens, A.: Neue Entwicklungen für das Tailored Blanking im Automobilbau. In: Reinhart, G.: Laser in der Produktion Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz, München. München: Herbert Utz 1998, S. 5-1 – 5-21.

MILBERG 1997

Milberg, J.: Produktion – Eine treibende Kraft für unsere Volkswirtschaft. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Münchener Kolloquium '97: Mit Schwung zum Aufschwung, München. Landsberg/Lech: moderne industrie 1997, S. 81-101.

MINGE 1998

Minge, B.: Den Schweißprozeß fest im Griff. Qualität und Zuverlässigkeit 43 (1998) 9, S. 1112.

MIYAMOTO 1998

Miyamoto, I.: Recent Status of Laser Materials Processing in Japanese Industry. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S. A122-A131.

MUELLER & DULEY 1998

Mueller, R.E.; Duley, W.W.: Applications of a Capacitive Autofocus System to Laser Welding. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S. C262-C267.

MÜLLER & DAUSINGER 1999

Müller, M.G.; Dausinger, F.: On-line-Detektion innerer Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen. In: DVS: Qualifizierung von Laserverfahren, Weimar. Düsseldorf: DVS-Verlag 1999, S. 106-109.

NAYAK & RAY 1993

Nayak, N.; Ray, A.: Intelligent Seam Tracking for Robotic Welding. London: Springer 1993.

NEGENDANCK & HOFFMANN 1999

Negendanck, M.; Hoffmann, P.: Sensor- /Aktorsysteme für einen fehlertoleranten Laserstrahlschweißprozeß. In: DVS: Qualifizierung von Laserverfahren, Weimar. Düsseldorf: DVS-Verlag 1999, S. 95-97.

NEUMANN 1985

Neumann, A.: Grundlagen, Tragfähigkeit, Gestaltung. 5. Aufl. Düsseldorf: DVS-Verlag 1985. (Schweißtechnisches Handbuch für Konstrukteure 1)

NG U.A. 1998

Ng, E.; Watson, I.; Allen, C.: Multi-factorial analysis of Nd:YAG laser welding of high carbon steels: Effect of laser parameters and weld geometry. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S. F46-F55.

NIEPOLD 1983

Niepold, R.: Externe Sensoren. In: Schweißen und Schneiden '83 Vorträge der großen Schweißtechnischen Tagung, Aachen. Düsseldorf: DVS-Verlag 1983, S. 131-135. (DVS-Berichte 83)

NITSCH & KAIERLE 1994

Nitsch, H.; Kaierle, S.: Der Schweißnaht auf der Spur. Roboter 12 (1994) 4, S. 24-28.

OGMEN 1998

Ogmen, M.: Self-Adapting Neural/Fuzzy Networks for the Real Time Process Control of Laser Welding. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S. C188-C197.

OVERMEYER 1996

Overmeyer, L.: Beitrag zur Prozeßkontrolle und -regelung beim Schneiden und Schweißen mit CO₂-Laserstrahlung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 570)

PIETRZAK 1990

Pietrzak, K.: Robust Seam Tracking algorithm based on majority voting logic. In: SPIE: Automated Inspection and High-Speed Vision Architectures III, Philadelphia. Philadelphia: SPIE 1990, S. 218-229.

PFEIFER 1993

Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement – Strategien – Methoden – Techniken. München: Hanser 1993.

PISCHETSRIEDER 1996

Pischetsrieder, A.: Adaptive Welding of Fillet Welds Using A Fast Seam-Tracking Sensor. In: Ahlers, R.-J.; Reinhart, G. (hrsg.): Rapid Prototyping, Proceedings Euroopto Series (Volume 2787), Besancon. Washington: SPIE 1996

PISCHETSRIEDER & MEIER 1997

Pischetsrieder, A.; Meier, H.-S.: Integration von Sensorik zur Qualifizierung der Lasertechnik. In: Geiger, M.; Reinhart, G.; u.a.: Präzisionslaserstrahlfertigungstechnik für den Maschinenbau. Erlangen: Gruner 1997, S. 53-72.

PISCHETSRIEDER U.A. 1995

Pischetsrieder, A.; Reinhart, G.; Trunzer, W.: Sensorgeführtes adaptives Laserschweißen von Kehlnähten. In: Geiger, M.: Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000. Bamberg: Meisenbach 1995, S. 332-333.

POPRAWÉ 1995

Poprawe, R.: Laser im System der Produktion. In: VDI Technologiezentrum physikalische Technologien (Hrsg.): Vom Prozeß zum Produkt - Systemlösungen in der Lasertechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995, S. 1-7.

POPRAWÉ U.A. 1998

Poprawe, R.; Ehrhardt, A.; u.a.: Advancements in Welding with High-Power Lasers. In: Laser Institute of America: ICALEO '98, Orlando. Orlando: LIA 1998, S. 64-73.

PRITSCHOW U.A. 1992A

Pritschow, G.; Horn, A.; Grefen, K.: Dynamisches Verhalten und Grenzen sensorgeführter Industrieroboter mit vorausblickendem Sensor. Robotersysteme 8 (1992) 3, S. 155-161.

PRITSCHOW U.A. 1992B

Pritschow, G.; Klingel, H. u.a.: Erhöhung der Bahngenauigkeit von Industrierobotern. Robotersysteme 8 (1992) 3, S. 162-170.

PUSCHNER 1983

Puschner, P.: Prozeßsignale. In: Schweißen und Schneiden '83 Vorträge der großen Schweißtechnischen Tagung, Aachen. Düsseldorf: DVS-Verlag 1983, S. 124-128. (DVS-Berichte 83)

QU U.A. 1994

Qu, Z.; Kaupila, J.; Moisio, T.: A Seam Tracking System for Sheet Metal Pipe Fabrication by Laser Beam Welding. In: Geiger, M.; Vollertsen F.: Laser Assisted Net Shape Engineering. 1. Aufl. Bamberg: Meisenbach 1994, S. 741-748.

RADAJ U.A. 1996

Radaj, D.; Sudnik, W.; Erofeew, W.: Simulation des Laserstrahlschweißens auf dem Computer – Konzept und Realisierung. Konstruktion 48 (1996), S. 367-372.

RAJU 1992

Raju, V.: Lasers in the US Manufacturing Industry. In: Beyer, E.: Laser applications in the automotive industry, Florenz: ISATA 1992, S. 519-525.

REEK 1998

Reek, A.: Fehlervermeidung und -erkennung durch intelligente Sensorik. In: Reinhart, G.: Laser in der Produktion Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz, München. München: Herbert Utz 1998, S. 4-1 – 4-16.

REINHART 1997

Reinhart, G.: Innovative Prozesse und Systeme – Der Weg zu Flexibilität und Wandlungsfähigkeit. In: Reinhart, G.; Milberg, J.: Münchener Kolloquium '97: Mit Schwung zum Aufschwung, München. Landsberg/Lech: moderne industrie 1997, S. 81-101.

REINHART U.A. 1994

Reinhart, G.; Lindl, H.; Trunzer, W.: Planning and Integration of Laser Systems into Flexible Production Structures. In: Geiger, M.; Vollertsen F.: Laser Assisted Net Shape Engineering. Bamberg: Meisenbach 1994, S. 687-704.

REINHART U.A. 1996

Reinhart, G.; Lindemann, U.; Heinzl, J.: Qualitätsmanagement: ein Kurs für Studium und Praxis. Berlin: Springer 1996.

REINHART U.A.1998

Reinhart, G.; Gräser, R.-G., Klingel, R.: Qualification of Standard Industrial Robots to Cope with Sophisticated Assembly Tasks. In: Annals of th CIRP Vol. 47/1/1998, S. 1-4.

RESCH & KAPLAN 1998

Resch, M.; Kaplan, A.: Heat Conduction Modelling of Laser Welding. In: Mordike, B.L.: Lasers in Engineering, Vol 7. Overseas Publishers Association 1998, S. 229-240.

RETZLAFF U.A. 1975

Retzlaff, G.; Rust, G.; Waibel, J.: Statistische Versuchsplanung. Weinheim: Verlag Chemie 1975.

RICK U.A. 1996

Rick, F.; Reinhart, G.; Lindl, H.: Improvement of laser oriented processes using simulation techniques. In: Dausinger, F.; Bergmann, H.W.; Sigel, J.: Proceedings of the 6th European Conference on Laser Treatment of Materials ECLAT '96. Wiesbaden, Dinges & Frick 1996, S. 621-628.

RIPPL 1997

Rippl, P.: Fertigungssysteme zum Laserstrahlschweißen mit Industrierobotern im Karosserie-Rohbau. In: Jüptner, W.; Sepold, G.: Lasermaterialbearbeitung im Transportwesen. Bremen: IDEE & Druck 1997, S. 31-43. (Strahltechnik 5)

ROESSLER U.A. 1992

Roessler, D.M.; Jenuwine, W.C. u.a.: Laser material processing in general motors corporation. In: Beyer, E.: Laser applications in the automotive industry, Florenz: ISATA 1992, S.37-51.

ROFIN SINAR 1998

Rofin Sinar (Hrsg.): Einführung in die industrielle Lasermaterialbearbeitung. Hamburg: Mai 1998.

ROGOS 1989

Rogos, J.(Hrsg.): Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik. 1.Aufl. Berlin: Springer 1989.

RUGE 1985

Ruge, J.: Verfahren und Fertigung. 3. Aufl. Berlin: Springer 1993. (Handbuch der Schweißtechnik 2)

RUOFF 1989

Ruoff, W.: Optische Sensorsysteme zur On-line Führung von Industrierobotern. Berlin: Springer 1989. (ISW Forschung und Praxis)

SALMINEN & MOISIO 1991

Salminen, A.S.; Moio, T.I.S.: Laser beam welding with filler wire – effect on the welded joint. In: Deutscher Verband für Schweißtechnik e.V. (DVS): Strahltechnik, Karlsruhe. Düsseldorf: DVS-Verlag 1991, S. 196-200. (DVS-Berichte 135)

SANDEN & JOHANSSON 1998

Sanden, M.; Johansson, S.: Laser Seam Finder Outperforms Mechanical Version. Photonics Spectra 32 (1998) 5, S. 31.

SCHINZEL & REICHELT 1998

Schinzel, C.; Reichelt, U.: Laser Welding for the Aluminium Body in White Production. In: Mordike, B.L.: European Conference on Laser Treatment of Materials, Hannover. Frankfurt: Werkstoff Informationsgesellschaft mbH 1998, S. 321-325.

SCHMID U.A. 1992

Schmid, D.; Sichler, K.; Michalak, E.: Sensorunterstützte Bahnprogrammierung beim Laserschweißen mit Roboter. Robotersysteme 8 (1992) 1, S. 21-24.

SCHMID & SICHLER 1992

Schmidt, D.; Sichler, K.: Abstandsregelung. Laser 8 (1992) 5, S. 24-26.

SCHNARS U.A. 1992

Schnars, U.; Sepold, G.; Jüptner, W.: Quality Assurance of Laser Beam Welding by Evaluation of Plasma-Density-Fluctuations. In:

Beyer, E.: Laser applications in the automotive industry, Florenz: I-SATA 1992, S. 103-109.

SCHRAFT U.A. 1988

Schraft, R.-D.; Hardock, G.; König, M.: Aufgabenangepasste Laserzelle zur Materialbearbeitung, bestehend aus einem Industrieroboter und einem Laserstrahlführungssystem. In: Warnecke, H.J.: Laser in der Produktion, Stuttgart. Berlin: Springer 1988, S. 97-121.

SCHUBERTH U.A. 1995

Schubert, S.; Hutfless, J.; Geiger, M.: Focal position control circuit for laser welding using adaptive optics. In: Geiger, M.: Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000. Bamberg: Meisenbach 1995, S. 366-367.

SCHULTZ 1997

Schultz, M.: Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformbauteilen. Bamberg: Meisenbach 1997. (Fertigungstechnik - Erlangen 58)

SCHWARZ U.A. 1991

Schwarz, H.; Trunzer, W.; Garnich, F.: Laserschweißen von Kehlnähten mit Sensoreinsatz. In: Waidelich, W.: Laser in der Technik. Berlin: Springer 1991, S. 415-418.

SCHWARZ 1994

Schwarz, H.: Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik. Berlin: Springer 1994. (iwb Forschungsberichte 68)

SCHWEIßEN & SCHNEIDEN 1998

Rippegather, D. (Red.): Tragbarer Schweißroboter mit optoelektronischem Laservermessungssystem. Schweißen und Schneiden 50 (1998) 2, S. 88-89.

SEIDEL 1992

Seidel, M.: Schnelle, sensorgeführte Konturbearbeitung mit Industrierobotern. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. (Fortschritt Berichte VDI Reihe 2 277)

SEIDEL U.A. 1993

Seidel, B.; Sokolowski, W. u.a.: Online Process Control in Laser Beam Welding by Means of Power Regulation in RF-Excited CO₂-Lasers. In: Waidelich, W.: Laser in der Technik. Berlin: Springer 1993, S. 376-380.

SEMAK U.A. 1998

Semak, V.; Steele, R. u.a.: Numerical Prediction and Measurement of the Weld Depth Dependence on the Beam Focal Position During Laser Welding. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S. F150-F153.

SEPOLD U.A. 1998

Sepold, G.; Schubert, E.; Weise, S.: Softwareentwicklung zur statistischen Versuchsplanung beim Laserstrahlschweißen. Schweißen und Schneiden 50 (1998) 4, S. 229-234.

SEYFFARTH 1992

Seyffarth, P.: Allgemeine technologische und werkstofftechnische Aspekte des Laserstrahlschweißens von Stahl. In: Sievers, E.-R.: Fügen mit CO₂-Hochleistungslasern. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992, S. 11-16.

SHIBATA 1992

Shibata, K.: Laser Processing in the Japanese Automotive Industry. In: Beyer, E.: Laser applications in the automotive industry, Florenz: I-SATA 1992, S. 431-438.

SHIBATA 1996

Shibata, K.: Schweißen von Tailored Blanks bei Nissan. In: Dausinger, F.; Bergmann, H.W.; Sigel, J.: Proceedings of the 6th European Conference on Laser Treatment of Materials ECLAT '96. Wiesbaden, Dinges & Frick 1996, S. 49-58.

SHIOU 1998

Shiou, F.-J.: Strategien und Meßverfahren zur Erfassung dimensioneller Bauteilgrößen für die Laserbearbeitung. Aachen: Shaker 1998. (Berichte aus der Produktionstechnik 19/98)

SPENHOFF 1991

Spenhoff, E.: Prozeßsicherheit durch statistische Versuchsplanung in Forschung, Entwicklung und Produktion. München: gfmt 1991.

STARKE 1983

Starke, G.: Nahtführungssensor zur adaptiven Steuerung von Handhabungseinrichtungen zum Lichtbogenschweißen. Aachen: Fotodruck J. Mainz 1983.

STEEN 1991

Steen, W.: Laser Material Processing. London: Springer 1991.

STETTNER 1994

Stettner, J.: Sensorgestützte Kollisionsvermeidung bei Industrierobotern. Aachen: Shaker 1994. (Berichte aus der Produktionstechnik 23, 94)

TÖNSHOFF 1997

Tönshoff, H.K.: Laser-based manufacturing – competition or ideal complement to conventional production technologies. In: Geiger, M.; Vollertsen F.: Laser Assisted Net Shape Engineering 2. Bamberg: Meisenbach 1997, S.3-17.

TÖNSHOFF & SCHUMACHER 1996

Tönshoff, H.; Schumacher, J.: Rechnergestützte Überwachung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen. Maschinenmarkt 102 (1996) 11, S. 48-53.

TÖNSHOFF U.A. 1995

Tönshoff, H.K.; Breuer, P. u.a.: Qualitätssicherung beim Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Karosseriebauteilen. In: Geiger, M.: Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000. Bamberg: Meisenbach 1995, S. 187-196.

TOPKAYA 1992

Topkaya, A.; Biermann, S.; Jagiella, M.: Noncontact Clearance Control System for Nd:YAG Laser Cutting and Welding Systems. In: Beyer, E.: Laser applications in the automotive industry, Florenz: I-SATA 1992, S. 567-574.

10 Literaturverzeichnis

TREIBER 1990

Treiber, H.: Der Laser in der industriellen Fertigungstechnik. Darmstadt: Hoppenstedt Technik Tabellen 1990.

TREUSCH 1993

Treusch, H.-G.: Bearbeitungsverfahren mit Festkörperlasern. In: Herziger, G.; Loosen, P.: Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung. München: Carl Hanser 1993, S. 199-275.

TRUNZER 1996

Trunzer, W.: Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren. Berlin: Springer 1996. (iwb Forschungsberichte 94)

TRUNZER U.A. 1993

Trunzer, W.; Lindl, H.; Schwarz, H.: Einsatz eines voll 3D-fähigen schnellen Sensorsystems zur Nahtverfolgung beim Laserstrahlschweißen. In: Waidelich, W.: Laser in der Technik. Berlin: Springer 1993, S. 405-410.

TSUKIHARA U.A. 1998

Tsukihara, H.; Ichikawa, E. u.a.: An Approach to Monitor YAG Laser Welding Process Using its Reflected Laser Power. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S. C93-C102.

ULLRICH 1987

Ullrich, R.: Robots and Lasers / Robots Versus Lasers: An Introduction. In: Belforte, D.: Second International Conference Combining Laser and Robot Technologies. Michigan: SME 1987

UMEAGUKWU U.A. 1989

Umeagukwu, C.; Maqueira, B.; Lambert, R.: Robotic Acoustic Seam Tracking: System Development and Application. IEEE Transactions on Industrial Electronics 36 (1989) 3, S. 338-348.

UNTERMANN U.A. 1992

Untermann, T.; Decker, I. u.a.: Einfluß der Prozeßgase und der Gasführung beim Laserstrahlschweißen von niedrig- und hochlegierten Stählen. In: Sievers, E.-R.: Fügen mit CO₂-Hochleistungslasern. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992, S. 61-68.

UTNER 1990

Utner, W.: Sensorsysteme für das Schutzgasschweißen. In: Warnecke, H.-J.; Schraft, R.D.: Industrieroboter Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Berlin: Springer 1990, S. 111-117.

VDI 1996

Verein deutscher Ingenieure (Hrsg.): Fügen mit Festkörperlasern. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. (Laser in der Materialbearbeitung 6)

VDMA 1997

VDMA – Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (Hrsg.): Laser für die Materialbearbeitung – Märkte und Trends. Frankfurt/Main: Maschinenbau Verlag 1997, S. 13-14.

VENKATESAN & ARCHIBALD 1990

Venkatesan, S.; Archibald, C.: Three degree of freedom tracking in real time using a wrist-mounted laser range finder. In: Intelligent Autonomous Systems, Amsterdam. Amsterdam: IOS 1990, S. 386-392

VOKURKA 1989

Vokurka, K.: Das Auge des Schweißroboters. Roboter 7 (1989) 3, S. 74-76.

WAGNER 1990

Wagner, R.: Optische Sensorsysteme für den Einsatz mit Handhabungssystemen unter besonderer Berücksichtigung des Lichtbogen-schweißens. Aachen: RWTH Aachen 1990. (Prozeßsteuerung in der Schweißtechnik 16)

WAHL U.A. 1989

Wahl, R.; Bloehs, W.; Dausinger, F.: Genauigkeitsanforderungen beim Laserstrahlschweißen mit Industrierobotern. In: Waidelich, W.: Optoelektronik in der Technik. Springer 1989, S. 558-562.

WELDING AND METAL FABRICATION 1992

Thormaehlen, K. (Hrsg.): Vision weld tracking aids Swedish car body building. Welding and Metal Fabrication 6 (1992) 9, S. 445.

WELLINGTON U.A. 1991

Wellington, S.; King, G.; Crowdwe, R.: A tracking vision sensor system. In: IEEE: Colloquium on Binary Image Processing – Techniques and Applications, London. London: IEEE 1991, S. 3/1-5.

WEICK & MEYLE 1998

Weick, J.-M.; Meyle, L.: Man geht auf Nummer Sicher. Laser-Praxis 14 (1998) 1, S. 13-15.

WEISS 1997

Weiss, S.: High-Power Lasers: Evolution Weeds out the Weak. Photonics Spectra 31 (1997) 6, S. 110-115.

WHEELER 1998

Wheeler, M.: Laser Vision Aids Robotic Welders. Photonics Spectra 32 (1998) 2, S. 48.

WIELAND & JAHN 1991

Wieland, P.; Jahn, G.: Entwicklung eines optischen Sensors zur Schweißnahtverfolgung. In: Waidelich, W.: Laser in der Technik. Berlin: Springer 1991, S. 148-152.

WILDMANN 1998

Wildmann, D.: On-line Quality System Assures Highest Production Reliability of Laser Welded Blanks. In: Beyer, E.; Chen, X.; Miyamoto, I.: ICALEO '98, Orlando. Orlando: Laser Institute of America 1998, S. C198-C207.

WIRTH 1996

Wirth, P.: Ungenutzte Potentiale. Laser-Praxis 12 (1996) 4, S. 8.

WÖRN & SEDLMAIR 1989

Wörn, H.; Sedlmair, N.: Sensoren für den industriellen Einsatz. In: Rogos, J.(Hrsg.): Intelligente Sensorsysteme in der Fertigungstechnik. 1.Aufl. Berlin: Springer 1989, S. 6-46.

WOLFF 1994

Wolff, U.F.: Integration der Laserbearbeitung in ein Produktionssystem – Zur Vorgehensweise bei der Einführung innovativer Produktionstechnik – Fügen mit CO₂-Laserstrahlung. Aachen: Shaker 1994. (Berichte aus der Lasertechnik)

YOSHITO 1992

Yoshito, S.: Fuzzy seam tracking controller. In: IEEE: Industrial Electronics Control, Instrumentation and Automation, San Diego. Piscataway: IEEE 1992, S. 966-970.

ZELLER 1995

Zeller, F.-J.: Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter. München: Carl Hanser 1995. (Fertigungstechnik - Erlangen 51)

ZHAO 1990

Zhao, W.: Sensorgeführte Industrieroboter zur Bahnverfolgung. München: Carl Hanser 1990. (Produktionstechnik - Berlin 79)

ZIMMERMANN U.A. 1993

Zimmermann, K.; Klein, R.; Poprawe, R.: Aspects for Quality Assurance with a Plasma Monitoring System during Laser Beam Welding. In: Waidehlich, W.: Laser in der Technik. 1.Aufl. Berlin: Springer 1993, S.503-510.

ZIMMERMANN U.A. 1999

Zimmermann, C.; Petring, D. u.a.: Überwachung der Einschweißtiefe und Qualitätskontrolle beim Laserstrahlschweißen. In: DVS: Qualifizierung von Laserverfahren, Weimar. Düsseldorf: DVS-Verlag 1999, S. 102-105.