

122

# Fertigungstechnik - Erlangen

Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. Manfred Geiger

Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann

Jan-Oliver Brassel

122

Brassel

Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-  
Mikroschweißen

ISSN 1431-6226  
ISBN 3-87525-181-4





Jan-Oliver Brassel

*Prozeßkontrolle beim  
Laserstrahl-Mikroschweißen*



Jan-Oliver Brassel

*Prozeßkontrolle beim  
Laserstrahl-Mikroschweißen*

Bericht aus dem Lehrstuhl für  
Fertigungstechnologie

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. M. Geiger

**LFT**



Meisenbach Verlag Bamberg

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät  
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 12. Oktober 2001  
Tag der Promotion: 15. Februar 2002  
Dekan: Prof. Dr. rer. nat. A. Winnacker  
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. M. Geiger  
Prof. Dr.-Ing. G. Sepold, Univ. Bremen

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Brassel, Jan-Oliver:**

Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen  
/ Jan-Oliver Brassel. - Bamberg : Meisenbach, 2002  
(Fertigungstechnik - Erlangen ; 122)  
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 2002  
ISBN 3-87525-181-4

ISSN 1431-6226

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks  
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,  
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des  
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein  
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-  
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich  
genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung  
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder  
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2002  
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf  
Printed in Germany

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter, später wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Wesentliche Aspekte der Arbeit wurden im Rahmen des europäischen Forschungsvorhabens Brite Euram III „Multi Sensor Assisted Intelligent Laser-Processing (MAIL)“ gefördert.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. M. Geiger, dem Ordinarius des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie, der mir durch sein mir entgegengebrachtes Vertrauen die wissenschaftliche und eigenverantwortliche Bearbeitung dieses Projekts ermöglichte und mich dadurch fachlich wie auch persönlich sehr gefördert hat. Seine wissenschaftlichen Anregungen haben stets den Fortgang der Arbeit unterstützt.

Mein Dank gilt auch Herrn Professor Dr.-Ing. G. Sepold, dem Leiter des Bremer Instituts für angewandte Strahltechnik (BIAS), der freundlicherweise das Koreferat übernommen hat.

Meinen sämtlichen Kollegen, den Diplomanden und den Studenten in der Zeit ihrer Studienarbeiten sowie meinen studentischen Hilfskräften am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie möchte ich für ihre fachlichen Anregungen und die jederzeitige Diskussionsbereitschaft und nicht zuletzt für das kooperative Arbeitsklima danken. Im besonderen möchte ich die Herren Dipl.-Ing (FH) Horst Trägler sowie Jürgen Frötsch an dieser Stelle hervorheben. Sie haben mit ihrem vielseitigen Know-how im systemtechnischen Engineering dazu beigetragen, daß die mit dieser Arbeit theoretisch fixierten Lösungsansätze auch unter Versuchsbedingungen abgesichert und damit für die praktische Anwendung bestätigt wurden.

Dank gebührt auch meinen Vorgesetzten bei der Audi AG, hier im besonderen Herrn M. Kaltenecker, Leiter Sparte Werkzeugbau und Herrn H. Peierl, Leiter Anlagen- und Vorrichtungsbau für ihr gezeigtes Verständnis meiner privaten Zusatzbelastung in der Zeit der Fertigstellung dieser Arbeit.

Aschau i. Chiemgau, im Oktober 2001

Jan-Oliver Brassel



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Laserstrahl-Mikroschweißen in der Fertigung</b>	<b>5</b>
2.1.1	Entscheidungskriterien	5
2.1.2	Systemtechnik	7
2.1.3	Anwendungsbeispiele	13
<b>2.2</b>	<b>Prozeßdiagnostik</b>	<b>15</b>
2.2.1	Strahl-Stoff-Wechselwirkung	16
2.2.2	Einflußgrößen auf den Prozeßverlauf	17
2.2.3	Meßsensorik	19
2.2.4	Prozeßüberwachung beim Laserstrahlschweißen	22
<b>3</b>	<b>Aufgabenstellung</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>Prozeßmodell</b>	<b>29</b>
<b>4.1</b>	<b>Prozeßstadien beim Laserstrahl-Mikroschweißen</b>	<b>30</b>
4.1.1	Aufheizphase	31
4.1.2	Aufschmelzphase	31
4.1.3	Einschweißphase	33
4.1.4	Tiefschweißphase	34
<b>4.2</b>	<b>Experimentelle Verifikation des Prozeßmodells</b>	<b>35</b>
4.2.1	Versuchseinrichtung	35
4.2.2	Detektion der Prozeßstadien	41
4.2.3	Temperaturüberwachung	53
4.2.4	Erweiterung der Systemtechnik	56
4.2.5	Übertragung des Prozeßmodells auf die Kehlnaht	58
<b>5</b>	<b>Prozeßkontrolle durch Neuronale Netze</b>	<b>61</b>
<b>5.1</b>	<b>Konzept zur Verarbeitung der Prozeßdaten</b>	<b>62</b>
5.1.1	Extraktion der Signal-Features	63
5.1.2	Normierung der Signal-Features	64
5.1.3	Training der Netze	64
5.1.4	Test der Klassifikationsleistung	67
<b>5.2</b>	<b>Versuchsbeschreibung</b>	<b>67</b>
5.2.1	Untersuchte Schweißanwendungen	67
5.2.2	Qualitätsmerkmale und Versuchsmatrix	69
5.2.3	Prozeßsignale und Signalmerkmale	70

---

<b>5.3</b>	<b>Klassifikation der Schweißgüte .....</b>	<b>72</b>
5.3.1	Initiale Netzparameter .....	72
5.3.2	Untersuchung der Netztopologie .....	73
5.3.3	Einfluß der Daten-Vorverarbeitung .....	78
5.3.4	Untersuchung der initialen Netzparameter .....	80
<b>5.4</b>	<b>Kontrolle der Schweißparameter .....</b>	<b>82</b>
<b>6</b>	<b>Prozeßkontrolle durch Fuzzy-Methoden .....</b>	<b>85</b>
<b>6.1</b>	<b>Konzept zur Verarbeitung der Prozeßdaten .....</b>	<b>86</b>
6.1.1	Analyse der Signalmerkmale .....	86
6.1.2	Konvertierung der Signalmerkmale .....	88
6.1.3	Inferenzmaschine .....	90
<b>6.2</b>	<b>Experimentelle Grundlagen .....</b>	<b>91</b>
6.2.1	Festlegung der Parametergrenzen .....	92
6.2.2	Versuchsmethodik .....	94
<b>6.3</b>	<b>Fuzzy-Verarbeitung der Prozeßdaten .....</b>	<b>95</b>
6.3.1	Kontrolle der Prozeßatmosphäre .....	96
6.3.2	Kontrolle der Pulsleistung .....	99
6.3.3	Kontrolle der Fokusslage .....	102
<b>6.4</b>	<b>Adaptive Prozeßkontrolle durch Fuzzy-Inferenz .....</b>	<b>105</b>
6.4.1	Verarbeitung der redundanten Prozeßdaten .....	105
6.4.2	Adaptive Kontrolle der Prozeßatmosphäre .....	106
6.4.3	Adaptive Kontrolle der Pulsleistung .....	106
6.4.4	Adaptive Kontrolle der Fokusslage .....	107
<b>7</b>	<b>Prozeßkontrolle durch Online-Steuerung .....</b>	<b>109</b>
<b>7.1</b>	<b>Konzept zur Steuerung des Prozeßverlaufs .....</b>	<b>110</b>
<b>7.2</b>	<b>Indirekte Prozeßkontrolle .....</b>	<b>111</b>
7.2.1	Signalverarbeitung .....	111
7.2.2	Bestimmung des Durchschweißzeitpunkts .....	112
<b>7.3</b>	<b>Direkte Prozeßkontrolle .....</b>	<b>114</b>
7.3.1	Die ZLK-Analyse .....	114
7.3.2	Bestimmung des Einschweißzeitpunkts .....	116
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>119</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>123</b>
<b>10</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>133</b>

# 1 Einleitung

Blitzlampengepumpte Nd:YAG-Lasersysteme bilden bereits seit Jahren erfolgreich die Grundlage präziser Verbindungstechniken innerhalb von industriell genutzten Fertigungssystemen der Feinwerk- und Elektrotechnik. Einerseits können mit den gepulsten (pw) Festkörperlaser, durch Pulsängen im Bereich von 0,1 bis 20 ms, hohe Pulsspitzenleistungen im Kilowattbereich erzeugt werden, andererseits ermöglichen hohe Strahlqualitäten von 10 bis 25 mm-rad große Arbeitsabstände bzw. die Bearbeitung von ausgedehnten Werkstückflächen. Durch den optionalen Einsatz von flexiblen Lichtwellenleitern besitzen die Lasersysteme weiterhin ein hohes Integrationspotential sowohl für bestehende als auch zukünftige Fertigungskonzepte und haben sich entsprechend in der industriellen Praxis durchgesetzt [1].

Durch den spezifischen Prozeßverlauf bei der gepulsten Mikro-Schweißbearbeitung wird die Temperaturbelastung des Werkstücks in der Umgebung der einzelnen Schweißpunkte durch eine schnelle Ableitung der Wärmeenergie in den einzelnen Pulspausen minimal gehalten. Dadurch können neben der Verarbeitung von gut schweißbaren Fe-Werkstoffen auch die in der Elektrotechnik stetig wachsende Anzahl an NE-Legierungen mit hohen Wärmeleitfähigkeiten zuverlässig gefügt werden. Weiterhin entstehen im Bereich einer gepulsten Naht nur geringe thermische Spannungen, wodurch sich die bearbeiteten Bauteile durch eine hohe Maßhaltigkeit bzw. geringe Geometriefehler auszeichnen. Ausgehend von einer Materialwahl und Materialbeschaffung, die im wachsenden Maße vor dem Hintergrund der Wirtschaftlichkeit getroffen wird und einem technisch strengen Anforderungsprofil, das ausnahmslos hohe Verbindungsqualitäten fordert, stellen pw-Lasersysteme oft die einzig praktikable Systemalternative dar, um eine Schweißverbindung als letzten Arbeitsgang bei teilweise schon fertig montierten Baugruppen höchster Präzision und ohne verändernde Einflüsse auf elektrische, magnetische oder mechanische Eigenschaften auszuüben [2]. Daß sich bereits bei gepulsten Nd:YAG-Lasersystemen mit mittleren Pulsleistungen von 10 bis 150 W, je nach Anwendung, mehr als 100 Schweißpunkte pro Minute applizieren lassen, rechtfertigt dabei den großflächigen Einsatz des kompakten Strahlwerkzeugs innerhalb von automatisierten Anlagenkonzepten der industriellen Serien- und Massenfertigung.

Durch die Entscheidung den Technologiesprung zu wagen und eine Fertigungsaustattung für die Massenproduktion durch ein oder mehrere Lasersysteme zu erweitern oder zu ergänzen werden jedoch unweigerlich zusätzliche Investitionen initiiert, die in erster Linie eine Qualifizierung des entsprechenden Fachpersonals betreffen. Da dieser kumulierte Invest, der den betrieblichen Input darstellt nur durch eine deutlich gesteigerte Produktivität des gesamten Fertigungssystems, also dessen Output gerechtfertigt werden kann, muß sowohl die Funktionsfähigkeit als auch die Verfügbarkeit des Strahlwerkzeugs permanent gewährleistet sein<sup>1</sup>. Es gilt folglich, geeignete Konzepte einzusetzen, die eine Überwachung bzw. Kontrolle der geforderten Zielvorgaben ermöglichen.

Die Methodik zur Prozeßüberwachung teilt sich bei schweißtechnischen Anwendungen in zwei grundsätzliche Operationen auf. Die unmittelbare Überwachung der Fertigungsqualität, welche durch eine Kontrolle der jeweils charakteristischen Qualitätsmerkmale der Schweißnaht geprägt ist (z.B. Nahtfestigkeit und Oberflächengüte) sowie die mittelbare Überwachung, die sich in der Einhaltung der für den Schweißvorgang optimierten Prozeßparameter zeigt<sup>2</sup>. Während eine Überwachung von relevanten Qualitätsmerkmalen in der Fertigungspraxis ausschließlich über statistische Prüfverfahren (SPC) erfolgen kann [3], muß der optimierte Betriebspunkt der Laseranlage kontinuierlich über die gesamte Fertigungszeit durch das Bedienerpersonal gewährleistet sein. In beiden Fällen können in Abhängigkeit der Fertigungslosgrößen bzw. konstruktiven Beschaffenheit der Fertigungsanlagen operative Probleme auftreten, die den Einsatz von Systemen zur automatischen Prozeßüberwachung betriebswirtschaftlich ins Spiel bringen.

Speziell für industrielle Mikroschweißanlagen existieren nach derzeitigem Stand nur eine sehr geringe Zahl an praxistauglichen Überwachungssystemen. Einerseits besteht zwar ein fundiertes Wissen über die grundlegenden Abläufe während des Mikro-Schweißprozesses, andererseits finden sich jedoch keine robusten und damit fertigungsbereichstauglichen Systemkonzepte zur automatischen Prozeßüberwachung und Prozeßkontrolle, da sich die im Sub-Millimeterbereich durchgeführten Schweißoperationen äußerst empfindlich gegenüber Störeinflüssen erweisen, wie sie beispielsweise durch Schwankungen innerhalb der Prozeßparameter, der Bauteilkonstellation oder der spezifischen Werkstoffbedingungen hervorgerufen werden können und die innerhalb einer Serienfertigung durchaus an der Tagesordnung sind. Den zum jetzigen Zeitpunkt in der Literatur veröffentlichten Lösungen für Mikro-Schweißaufgaben fehlt bislang die mit dieser Arbeit angestrebte Möglichkeit einer automatischen Prozeßkontrolle.

Der Inhalt dieses Beitrags zielt auf die Schaffung von gebrauchsfertigen Technologielösungen, die für industriell genutzte Mikroschweiß-Systeme sowohl eine Steigerung der technischen Verfügbarkeit als auch die Überwachung der jeweils erforder-

---

<sup>1</sup> An dieser Stelle sei auf das Ökonomische Prinzip verwiesen, mit minimalem Input ein Maximum an Output zu erwirtschaften.

<sup>2</sup> Strategischer Hintergrund für die mittelbare Überwachung ist die Voraussetzung, daß, i.S. der Statistik, mit konstanten Prozeßparametern konstante Schweißergebnisse produziert werden können.

lichen Schweißqualität herbeiführen. Besondere Aufmerksamkeit wird dabei auf eine schrittweise und somit nachvollziehbare Entwicklung der im Einzelnen erarbeiteten Systemmoduln gelegt.

Neben der Spezifikation eines neuartigen multi-sensoriellen Diagnostiksystems bilden Grundlagenuntersuchungen an Einzelpuls-Überlappschweißverbindungen das Fundament dieser erfolgreichen Verknüpfung der Prozeßeingangsgrößen mit den Prozeßausgangsgrößen. Durch den gleichzeitigen Einsatz mehrerer Sensoren und mit Hilfe von Signalverarbeitungssystemen auf Basis von trainierten Neuronalen Netzen sowie der Fuzzy-Technologie, sollen robuste Werkzeuge für die automatische Prozeßüberwachung und Prozeßkontrolle geschaffen werden. Zusätzlich werden Möglichkeiten einer Online-Steuerung des Mikro-Schweißprozesses aufgezeigt, wodurch eine laufende Minimierung der Fehlerquote erreicht werden soll.



## 2 Stand der Technik

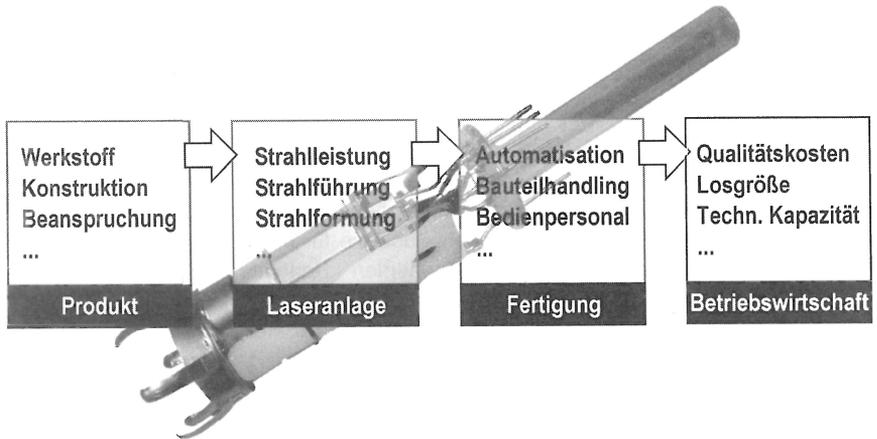
Mit Blick auf die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten von gepulsten Nd:YAG-Lasersystemen zur Mikro-Schweißbearbeitung sollen in diesem Kapitel sowohl die spezifische Systemtechnik kurz beleuchtet werden als auch die für einen fertigungstechnischen Einsatz sich anbietenden Systemkomponenten Beachtung finden. Eine exemplarische Übersicht über aktuelle Anwendungsgebiete der Mikroschweißtechnologie eröffnet im Anschluß den Blick auf die derzeit verfügbaren technischen Lösungskonzepte zur diagnostischen Überwachung und automatisierten Kontrolle des Laserstrahl-Schweißprozesses.

### 2.1 Laserstrahl-Mikroschweißen in der Fertigung

#### 2.1.1 Entscheidungskriterien

Generell soll durch die Auswahl und Spezifikation eines Laserschweißsystems das Ziel erreicht werden, eine konkrete Schweißaufgabe in der Fertigung sowohl unter technologischen als auch betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten optimal zu erfüllen. Der Markt hat sowohl seitens der Hersteller von Nd:YAG-Festkörperlasern als auch durch die zahlreichen Lieferanten von optischen und mechanischen Zusatzsystemen entsprechend darauf reagiert, so daß sich für den potentiellen Anwender ein breites Spektrum an alternativen Anlagenkonzepten für die Mikro-Schweißbearbeitung erschließt. Um das Problem der geeigneten Systemauswahl zu strukturieren, läßt sich gemäß **Bild 2.1** eine allgemeine Einteilung der Einflußkriterien durchführen. Entsprechend der Darstellung beginnt der Weg der Entscheidungsfindung durch die Definition und Festlegung des Produktdesigns bzw. der konstruktiven und mechanischen Randbedingungen der zu bearbeitenden Schweißbaugruppe. Gegenwärtig werden hauptsächlich Stahlwerkstoffe mit guter bis sehr guter Schweißseignung verarbeitet, die eine relativ robuste Prozeßführung erlauben, da sie

die Laserstrahlung bereits bei Raumtemperatur zu einem hohen Prozentsatz absorbieren. Zukünftige Materialvorgaben zielen jedoch auf den verstärkten Gebrauch von unlegierten, elektrisch hochleitfähigen NE-Metallen als Grundwerkstoff [4, 5], die bzgl. der Laserstrahlung jedoch deutlich geringere Absorptionsgrade aufweisen. Die Schweißverarbeitung der NE-Werkstoffgruppe setzt demzufolge eine optimal abgestimmte Prozeßtechnik voraus, um das geforderte Fügeergebnis auch unter Serienbedingungen reproduzierbar zu ermöglichen.



*Bild 2.1 Einflußkriterien auf die Systemauswahl beim Laserstrahl-Mikroschweißen*

Integrative Aspekte bei der Produktgestaltung gewinnen gleichermaßen an Bedeutung, so daß eine permanente Miniaturisierung der einzelnen Funktionseinheiten und somit auch der betroffenen Fügestellen angestrebt wird. Neben der Betrachtung von primären Kenngrößen, wie Pulsenergie und mittlerer Pulsleistung, spiegeln sich die spezifizierten Produktvorgaben hauptsächlich in der dazu erforderlichen Strahlqualität wider. Sowohl bei der Bearbeitung von groß dimensionierten Bearbeitungsebenen (Produktlayout) als auch bei Ausschöpfung maximaler Arbeitsabstände (Produktintegration) darf der Bearbeitungsstrahl seine geforderte Charakteristik nicht verlieren. Sämtliche daraus ableitbaren systemtechnischen Anforderungen an die Laseranlage wirken sich unmittelbar auf die Präzision der mechanischen Einheiten zum automatisierten Bauteilhandling und auf die daran angeschlossene Fertigungsumgebung aus. Selbst unter hohem Stückzahlruck und ständig wechselnden Umgebungsbedingungen sind die einzelnen Kleinstbauteile in kurzer Zeit präzise zu positionieren und zu verarbeiten. Nur unter der Voraussetzung, daß das anspruchsvolle Umfeld einer Serienfertigung beherrscht wird, kann die Strahl-Stoff-Wechselwirkung unter optimierten Bedingungen stattfinden und entsprechende Fügeergebnisse langfristig erzielt werden.

Für den Fall, daß trotzdem Schwankungen bzw. Abweichungen in der Prozeßführung auftreten, müssen diese für ein qualifiziertes Bedienpersonal sofort erkennbar sein und gegebenenfalls durch gezielte Eingriffe in die Prozeßparameter aufgefangen werden. Sollten sich die Fehler bereits in der Produktqualität niedergeschlagen haben, steht eine parallel zum Fertigungsprozeß mitlaufende Klassifikationsinstanz im Blickfeld des Interesses, wodurch fehlerhafte Bauteile unmittelbar ausgesondert werden können. Speziell riskante Qualitätsfolgekosten bei hochwertigen Konsumgütern, ausgelöst durch schadhafte Bauteilkomponenten, gilt es, unter allen Umständen zu vermeiden. Vor diesem Hintergrund soll auch die selbstverständliche unternehmerische Forderung nach hoher technischer Verfügbarkeit und wirtschaftlichem Betrieb der jeweiligen Anlagenkonfiguration durch einen Abgleich der alternativen Systemlösungen mit den betriebswirtschaftlichen Randbedingungen erwähnt werden.

### 2.1.2 Systemtechnik

Die grundsätzliche Aufteilung einer typischen Laseranlage für die Materialbearbeitung in ihre wesentlichen Komponenten kann entsprechend der systemtechnischen Aufgabe erfolgen [6, 7]. So kommt neben der Strahlerzeugung und der Strahlführung bzw. Strahlformung, was als Laseranordnung verstanden wird, auch den Systemkomponenten für die Werkstückhandhabung und den Meß- und Regelungseinrichtungen Bedeutung zu.

Im folgenden soll durch eine kurze Beschreibung der gebräuchlichsten Systemkomponenten bei der Mikro-Schweißbearbeitung eine informelle Basis für die im experimentellen Teil dieser Arbeit genutzte Systemtechnik dargelegt werden.

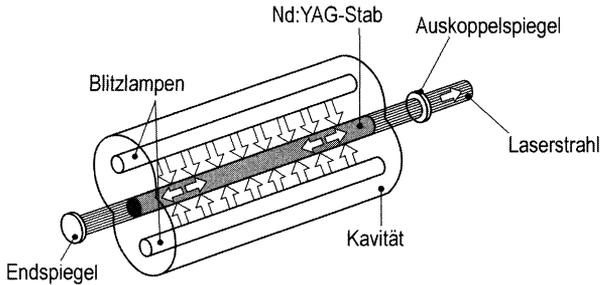
#### Strahlerzeugung

Derzeit im industriellen Einsatz befindliche, konventionelle pw-Nd:YAG-Lasersysteme - mit mittleren Leistungen bis 500 W [1] - nutzen fast ausschließlich Blitzlampen als Energiequelle für die Erzeugung des Laserlichts.

Wie in **Bild 2.2** dargestellt, ist der strahlerzeugende Laserresonator in einer wassergekühlten Einfach- oder Doppel-Ellipsoidkavität, auch Pumpkammer genannt, eingebettet, die mit einer polierten Oberfläche (Reflektor) versehen ist und somit den Anregungsprozeß unterstützt. Der betrachtete stabile Resonator setzt sich dabei aus dem laseraktiven Nd:YAG-Stab, der eine Länge von 100 - 200 mm und einen Durchmesser von 5 - 9 mm besitzt [8] und aus einer der geforderten Pumpleistung entsprechenden Anzahl an Xenon- oder Krypton-Hochleistungs-Entladungslampen zusammen sowie aus jeweils einem voll- und einem teilreflektiven End- bzw. Auskopplspiegel.

Die Energieversorgung der Blitzlampen über im Netzteil installierte Kondensatorenspeicher erfolgt in zwei Stufen. Im „stand-by“ Modus kann über eine kontinuierliche

Entladung der Speicher bei geringer Leistung, der sog. Simmerstrom, eine Vor-Ionisierung der Blitzlampen stattfinden. Im Moment der Pulsanforderung können die Blitzlampen dann, Thyristoren gesteuert, nahezu verzögerungsfrei über die Dauer des Laserpulses durchzünden. Entsprechend ausgestattete Netzteile des Laseraggregates erlauben es zudem, den Leistungsverlauf während der Impulsdauer zu steuern, so daß neben der Standard Rechteckform auch modifizierte, prozeßangepaßte Pulsformen abgegeben werden können.



**Bild 2.2 Strahlerzeugung im Resonator eines pw-Nd:YAG Lasers [9]**

Durch das breitbandige Spektrum an Anregungsfrequenzen der Blitzlampen in Kombination mit der bandbegrenzten Absorption des Nd:YAG-Kristalls beträgt der Wirkungsgrad des Lasersystems nur ca. 3 - 5%. Eine effizientere Methode den Laserkristall anzuregen ist über Laserdioden möglich. Durch eine selektive optische Kopplung zwischen Anregungsdioden und Wirkkristall steigt sowohl der Wirkungsgrad der Strahlerzeugung bis auf den dreifachen Wert als auch wegen der geringeren thermischen Belastung eine höhere Strahlqualität bei hohen Leistungen nutzbar wird. Durch eine modulierte Ansteuerung der Pumpdioden eröffnet sich für zukünftige Systeme eine Möglichkeit, den Pulsverlauf in Echtzeit, d.h. während der Pulsdauer verzögerungsfrei zu verändern.

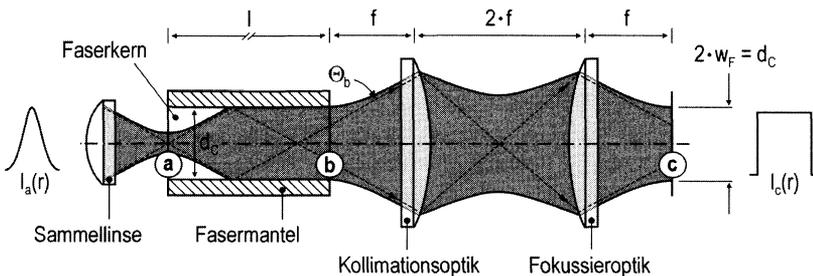
$$\begin{array}{lll}
 \text{a) } Q = \int_0^{\tau_H} P_L(t) \cdot dt & \text{b) } P_H = \frac{Q}{\tau_H} & \text{c) } I_0 = \frac{P_H}{w_F^2 \cdot \pi} \quad (\text{Gl. 2.1})
 \end{array}$$

Für die Materialbearbeitung sind bei der gepulsten Betriebsart neben der Pulsdauer  $\tau_H$ , die gemäß **(Gl. 2.1a, b)** miteinander verknüpften Parameter der Pulsenergie  $Q$  und der Pulsleistung  $P_L$  bzw. der Pulsspitzenleistung  $P_H$  relevant. Durch die Konzentration bzw. Fokussierung der Strahlleistung auf den Brennfleck mit Fokusradius  $w_f$  leitet sich die auf der Bearbeitungsoberfläche maximal nutzbare Strahlungsdichte  $I_0$  ab (siehe **(Gl. 2.1c)**). Daß ein realer Pulsverlauf  $P_L(t)$  sich wegen kurzzeitiger Schwankungen innerhalb der elektrischen Leistungseinheiten von einem

idealisierten bzw. rechteckigen Pulsverlauf durch überhöhte Leistungsspitzen (spikes) unterscheidet, ist für die weiteren Betrachtungen außer Acht gelassen. Somit wird im Verlauf der weiteren Untersuchungen für die Pulsspitzenleistung der über die Energie theoretisch berechnete Wert angegeben. Aufgrund der geforderten hohen Pulsleistungen und der dadurch entstehenden Wärmeentwicklung im Laserkristall kommt es zur Ausbildung einer sog. thermischen Linse im Stab. Die Leistungsdichteverteilung innerhalb des Rohstrahls eines Nd:YAG-Systems, das in gleicher Form auch in dieser Arbeit eingesetzt wird, entspricht deshalb trotz sog. Modenblenden keiner  $TEM_{00}$  bzw. Gauß-Verteilung; stattdessen kommt es zu einer Überlagerung von einer Vielzahl von Moden höherer Ordnung.

### Strahlführung und Strahlformung

Nd:YAG-Lasersysteme zeichnen sich besonders durch die Fokussierbarkeit über transmissive Optiken aus. Dadurch ist es möglich, den Laserstrahl entweder direkt nach dem Resonator auf das Werkstück zu fokussieren oder in optische Stufenindex-Quarzglasfasern bzw. Multimode-Lichtwellenleiter (LWL) mit Längen von 5 bis 100 m einzuspiegeln, so daß das Laserlicht mit vergleichsweise geringen Leistungsverlusten<sup>1</sup> über weite Strecken transportiert werden kann. Trotz der Tatsache, daß bei den Lasersystemen mit „festem“ Strahl sehr hohe Strahlqualitäten erreicht werden, stellen sie doch wegen des relativ starren Aufbaus, der in der Genauigkeit zudem von der Steifigkeit des Lasersystems abhängt, eine im Vergleich verhältnismäßig selten gewählte Systemlösung für das Laserstrahl-Mikroschweißen dar.



*Bild 2.3 Strahlführung und Strahlformung bei Einsatz eines Stufenindex-LWL*

Demgegenüber stehen die „fasergekoppelten“ Systeme, die dank der flexiblen Strahlführung und den für die Schweißbearbeitung ausreichenden Strahleigenschaften die größten Einsatzzahlen verzeichnen. Entsprechend der vereinfachten Dar-

<sup>1</sup> Für Nd:YAG-Strahlen ergeben sich innerhalb der Faser Leistungsverluste durch Absorption kleiner 1% [1]. Sowohl durch Reflexionen bei der Ein- und Auskopplung als auch den Zustand des Kernmaterials (Inkubationseffekte) und geringe Krümmungsradien entlang der Faser können die Verlustanteile in Abhängigkeit von der eingespiegelten Laserleistung jedoch auf bis zu 15% ansteigen [8, 10, 11].

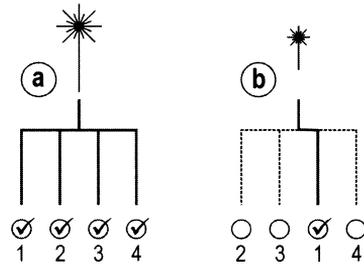
stellung in **Bild 2.3** werden die aus dem Resonator ausgekoppelten Rohstrahlen über eine Sammellinse in die LWL mit Kerndurchmessern  $d_C$  von 0,2 bis 1,0 mm fokussiert (a). Die einzelnen Strahlen propagieren über Totalreflexion an der Innenseite der Kern-Mantelfläche (cladding) zick-zack-förmig über die gesamte Länge des Kerns (core) bis zur Faserendfläche (b) und können dort über entsprechende optische Systeme auf die Bearbeitungsebene (c) abgebildet werden. Durch dieses Verhalten kann die eingangsseitige Rohstrahlqualität nicht mehr am Faserende genutzt werden. Die numerische Apertur (N.A.) der Faser bestimmt dabei einerseits den minimalen Divergenzwinkel des Arbeitsstrahls am Faserende, andererseits kann der Arbeitsstrahl, unabhängig vom Strahldurchmesser am Fasereintritt, nur noch in Abhängigkeit zum Durchmesser des Kerndurchmessers fokussiert werden. Für die dargestellte typische 1:1 bzw. 4-f-Anordnung bedeutet das, daß der kleinste erreichbare Brennfleckdurchmesser  $2 \cdot w_F$  gemäß **(Gl. 2.2)** gleich dem Kerndurchmesser der verwendeten Faser ist.

$$2 \cdot w_F = \frac{f_1}{f_2} \cdot d_C ; \quad \text{mit: } \begin{array}{l} 1 = \text{Fokussierung} \\ 2 = \text{Kollimation} \end{array} \quad (\text{Gl. 2.2})$$

Ein weiteres charakteristisches Merkmal für stufendindex-fasergekoppelte Lasersysteme stellt die im Brennfleck erkennbare steil flankierte Multimode-Leistungsdichteverteilung (top-hat) dar. Speziell für Schweißanwendungen bedeutet diese im Vergleich zu Moden niedriger Ordnung schlechtere Strahlqualität jedoch nur selten einen Nachteil, da durch die homogene Leistungsverteilung eine relativ robuste Positionierung des Brennflecks möglich ist. Die eigentliche Strahlformung über die optischen Instrumente Strahlkollimation und Strahlfokussierung wird dabei i.d.R. über sog. Achromaten erreicht **[12]**, die eine Abbildung der Strahlung bei minimaler sphärischer Abberation ermöglichen.

Wie bereits erläutert, eröffnet sich über die Variation von Ausleuchtung und Brennweite der Kollimations- und Fokussieroptik die Möglichkeit ein von der 1:1 Anordnung geändertes Abbildungsverhältnis des Faserendes zu erreichen. So kann etwa mit einer 2:1 Abbildung, die durch den Einsatz von zwei unterschiedlichen Brennweiten entsteht, ermöglicht werden, daß sich der Brennfleckdurchmesser um 50% reduziert. Entsprechend **(Gl. 2.1c)** steigt dann die vorhandene Leistungsdichte bei halbiertem Fokusabstand quadratisch an, wodurch entweder geringere Schweißpunktdurchmesser oder die Verarbeitung von beispielsweise NE-Werkstoffen mit hoher Wärmeleitung realisierbar sind. Bei der Wahl von Brennweite und Brennfleckdurchmesser spielen neben geometrischen Überlegungen, die durch die optische Zugänglichkeit und die Größe der Fügestelle des jeweiligen Werkstücks vorgegeben werden auch materialabhängige Einflußgrößen eine Rolle. So wird, z.B. bei der Verarbeitung von beschichteten Werkstoffen, versucht, durch die Auswahl langer Brennweite einen möglichst großen Arbeitsabstand zu erreichen, damit die Fokussieroptik vor Verschmutzung, z.B. durch abdampfendes Beschichtungsmaterial, geschützt werden kann.

Um innerhalb der Fertigungslandschaft eine nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimale Auslastung bzw. Ausnutzung der Lasersysteme zu gewährleisten, haben sich, entsprechend der in **Bild 2.4** skizzierten Funktionsprinzipien, zwei unterschiedliche Strategien entwickelt. Mit einem einzigen fasergekoppelten Lasersystem kann über sog. Multiplexer, die auf schnell ansteuerbaren Umlenk- oder Drehspiegeln basieren, der Arbeitsstrahl entweder auf verschiedene Lichtwellenleiter oder auf verschiedene Lichtwellenleiter bzw. Bearbeitungszonen parallel aufgeteilt (energy sharing) oder zwischen auseinanderliegenden Schweißstellen wechselseitig bzw. seriell zugeschaltet werden (time sharing). Während im dargestellten ersten Fall (a) die Strahlquelle entsprechend der Anzahl an Schweißpunkten eine relativ hohe Gesamtenergie auf vier LWL simultan aufteilt, kann ein entsprechend geringer dimensionierter Laser im zweiten Fall (b) kleinere Energiepakete zeitversetzt und in frei wählbarer Reihenfolge an die vier verschiedenen Bearbeitungsorte abgeben.



**Bild 2.4** Multiplexer (a)Parallel (b)Seriell

### Position der Strahlachse

Die Konzepte zur Positionierung des Laserstrahls relativ zur Werkstückoberfläche können grundsätzlich in drei unterschiedliche Kategorien eingeteilt werden [2, 10], die einerseits auf der Positionierung des Laserstrahls bzgl. der Fügestelle, andererseits auf der Positionierung des Bauteils bzgl. eines feststehenden Laserstrahls basieren bzw. eine Kombination aus beiden Varianten darstellen. Über die industrielle Einsatzdauer der Lasersysteme haben sich demzufolge eine Vielzahl an alternativen Systemlösungen entwickelt, die entweder generell oder nur für einen spezifischen Einsatzzweck einen technologisch-wirtschaftlich optimalen Betrieb der jeweiligen Laseranlage ermöglichen [13].

Während bei der Bauteilhandhabung vorzugsweise hochgenaue kartesische CNC-Achssysteme, wie z.B. Kreuztische mit aufgesetzten Spannwerkzeugen, eingesetzt werden, existieren für die Manipulation des Arbeitsstrahls zwei Möglichkeiten. Einerseits die aufwendige Lösung den gesamten Bearbeitungskopf zu bewegen oder andererseits nur die kleinen Massen der optischen Elemente zur Strahlformung jeweils neu auszurichten. Exemplarisch für die Handhabung der Strahlachse sind in **Bild 2.5** zwei typische Varianten skizziert. Um auf dem Werkstück einen möglichst großen Arbeitsraum beschreiben zu können, wird das System der Kollimation (K) und Fokussierung (F) entweder als optisches Gesamtpaket von Position (a) nach Position (b) verschoben oder die Strahl-Umlenkeinheit vor der Fokussieroptik gibt durch einfaches Wegklappen den Arbeitsstrahl an einen fest stehenden zweiten Umlenkspiegel bzw. eine Fokussiereinheit an der Position (c) weiter.

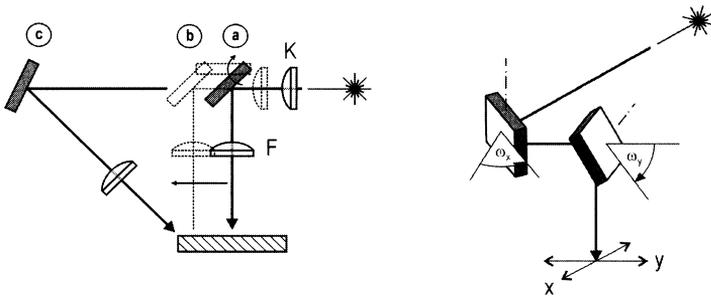


Bild 2.5 Systeme zur Positionierung der Strahlachse

In beiden Fällen muß jedoch ein adaptiver Strahlweglängenausgleich, z.B. durch einen in [14] beschriebenen Lineartranslator erfolgen damit sich die Strahlqualität durch unterschiedliche Abbildungsverhältnisse nicht verändert. Eine andere Möglichkeit besteht darin, durch den Einsatz von Dreh-, Schwing- bzw. Galvanometerspiegeln (scanner) eine schnelle Strahlableitung ( $v_{\max} \approx 10 \text{ m/s}$  [15]) in beliebiger Richtung innerhalb des sog. "Scan-Bereichs" bzw. Bearbeitungsfeldes auf der Werkstückoberfläche zu erreichen. Die dynamischen Grenzen werden dabei durch die Massenträgheit der bewegten Spiegeleinheiten vorgegeben, so daß sich im allgemeinen Ablenkfrequenzen von bis zu 300 Hz erreichen lassen [6]. Die maximale Apertur bzw. Ablenkamplitude in x- und y-Richtung wird dabei durch die beiden Rotorwinkel  $\omega_{x,y}$  vorgegeben, die sich standardmäßig im Bereich ca.  $10^\circ$  befinden [6]. Um die Zerstörschwelle der Spiegel nicht zu überschreiten, wird die Scanner-Konfiguration bei Schweißanwendungen üblicherweise in den Strahlengang des kollimierten Arbeitsstrahls gelegt, so daß sich die Fokussieroptik direkt unterhalb des zweiten Drehspiegels befindet. Für geringe Auslenkwinkel kann dabei eine konventionelle Fokussieroptik verwendet werden, ohne daß sich Abbildungsfehler, z.B. durch Astigmatismus, deutlich auf das Schweißergebnis auswirken. Für die Ausnutzung eines möglichst großen Bearbeitungsfeldes werden jedoch Sonderoptiken, sog. Planfeldoptiken bzw. F-Theta Objektive verwendet, die bei telezentrischer Auslegung einen schräg einfallenden Strahl annähernd senkrecht auf die Werkstückoberfläche abbilden [16].

### Zusatzeinrichtungen

Durch die Verwendung von transmissiven Optiken erlaubt der Nd:YAG-Laser auch den Einsatz von sog. Strahlteilern, die aus dielektrisch beschichteten, reflektiven bzw. transmissiven Substraten bestehen. Aufgrund der optischen Eigenschaft das Prozeßstrahlungsspektrum entsprechend ihrer Vergütung entweder zu reflektieren oder in definierten prozentualen Anteilen zu transmittieren, können durch Strahlteiler in Strahlachse (onaxis) ausgerichtete Diagnosesysteme installiert werden. So erlaubt beispielsweise die Installation einer in Strahlrichtung positionierten Beobachtungskamera sowohl eine exakte Ausrichtung des Brennflecks auf der Werkstoffoberfläche

[17] als auch eine in-situ Prozeßbeobachtung. In Verbindung mit Methoden der Bild- und Lageerkennung wird so beispielsweise eine automatische Ausrichtung der Strahlachse bzgl. spezifischer Bauteilmerkmale implementierbar, was in [18] als sog. "aim&shoot" System bezeichnet wird.

Durch die zusätzliche Verwendung von Inert- bzw. Schutzgasen kann einerseits die Oxidation der Schweißnahtoberfläche reduziert werden, andererseits erlaubt ein gezielter Einsatz von reaktivem Prozeßgas, wie z.B. Sauerstoff, eine deutliche Steigerung des Prozeßwirkungsgrads. Durch die geeignete Installation der Gasströmung als sog. "cross-jet" läßt sich darüberhinaus ein Schutz der Fokussieroptiken vor Schweißspritzern bzw. Kondensaten erreichen.

### 2.1.3 Anwendungsbeispiele

Innerhalb der industriellen Anwendungen der Laserstrahl-Mikroschweißtechnologie kann grundsätzlich zwischen zwei charakteristischen Schweißnahtformen unterschieden werden. Während im einfacheren Fall die Verbindung zwischen den Fügepartnern jeweils durch einen Einzelpuls hergestellt wird, erzeugen im zweiten Fall mehrere, sich teilweise überlappende Schweißpunkte an der Fugestelle eine gepulste bzw. gesteppte Naht [2, 19]. Sinngemäß werden im weiteren Verlauf der Dokumentation die Begriffe Punktschweißen und Nahtschweißen für die beiden Verfahren verwandt. Die Entscheidung welche der beiden Nahtformen appliziert wird hängt, neben wirtschaftlichen Gründen, in erster Linie von den geforderten

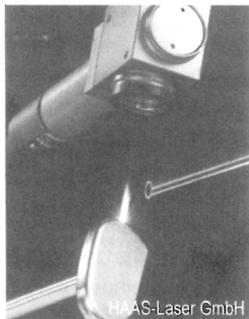


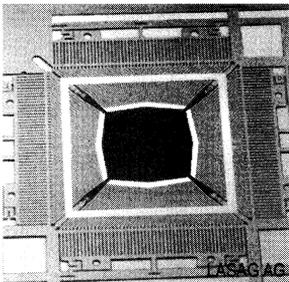
Bild 2.6 Gehäuse

mechanischen bzw. elektrischen Eigenschaften der Verbindung ab. Insbesondere in Bereichen der Gehäusefertigung für die Medizintechnik kann auf die Dichtigkeit der Fugestellen nicht verzichtet werden. So wird in [20, 21, 22] mit der Applikation von gepulsten Schweißnähten eine hermetische Versiegelung der temperaturempfindlichen ( $T < 40^{\circ}\text{C}$ ) Elektronik-einheiten innerhalb von Herzschrittmachergehäusen aus Edelstahl bzw. Titan erreicht (siehe **Bild 2.6**). Der gleiche Anspruch an die Naht-Dichtigkeit besteht häufig auch bei Gehäusen für chemische bzw. elektrische Komponenten. In [23] wird diesbezüglich die Schweißbearbeitung von Li-Ionen-Batteriegehäusen veröffentlicht, die wegen der sehr temperatur-empfindlichen Li-Verbindungen auf die Vorteile der guten Dosierbarkeit der Wärmeeinbringung beim pw-

Nahtschweißen zurückgreifen kann. Weiterhin wird in [24] und [21] gezeigt, daß Hybridgehäuse für ebenfalls temperaturempfindliche elektrische Bauteile der Nachrichten- und Sensortechnik ausschließlich mit pw-Systemen prozeßsicher verschweißt werden können.

Für einfache Kontaktierungsaufgaben in der Elektronikfertigung genügt, im Gegensatz zur Gehäusefertigung, oft ein einzelner Schweißpunkt, um sowohl die erwarteten mechanischen Belastungen aufzunehmen als auch eine ausreichende Stromführung zwischen Schaltungsträger und Funktionsbaustein zu gewährleisten. In [22] wird entsprechend die labormäßige Applikation von Einzelpunkt-Mikroschweißungen an sog. "Lead-Land" Verbindungen von QFP-Bauelementanschlüssen (quadratic flat pack) aus FeNi42 auf Schaltungsbahnen aus SE-Kupfer demonstriert. Darin können Kontaktabstände im Bereich von 0,4 mm verarbeitet werden, wodurch sich das Punktschweißen auch für zukünftige "Fine-Pitch" Aufgabenstellungen als geeignet anbietet.

Daß sich pw-Lasersysteme erfolgreich in Fertigungssysteme der Großserienfertigung integrieren lassen, zeigen die zahlreichen Anwendungen beispielsweise der Philips AG. So werden dort, u.a. die Edelstahlgehäuse von Elektronenstrahlerzeugern für Bildröhren bereits seit einigen Jahren vollautomatisiert laser-schweißbearbeitet [26, 27]. Dabei werden einzelne Unterbaugruppen durch ca. 50 Einzelpunkte gefügt und anschließend zu einem kompletten Strahlerzeuger (siehe **Bild 2.1**) verschweißt. Anhand der Betrachtung der realisierten Fertigungslosgrößen, welche bei mehreren Millionen Baugruppen pro Jahr liegen, kann die hohe technische Verfügbarkeit der einzelnen Lasersysteme abgeschätzt werden. Der Anspruch sich bei den einzelnen Einsatzfeldern auf unterschiedlichste Fügegeometrien einstellen zu müssen, kann dabei dank der hohen Flexibilität der Lasersysteme erfüllt werden.



*Bild 2.7 Leiterbahnstrukturen*

Neben Werkstoffen mit guter Schweißseignung, wie z.B. Edelstahl, stößt besonders die Verarbeitung von Kupferwerkstoffen innerhalb der Elektronikproduktion auf großes Interesse bei der Industrie. Innerhalb der Serienfertigung von Kupfer-Schaltungsträgern für Prozessorchips müssen zur optimalen Abfuhr der Betriebswärme Kühlkörper (heat-sinks) unterhalb der einzelnen Leiterbahnstrukturen (lead-frames) angebracht werden. Durch den in [28] beschriebenen Einsatz des Mikro-Punktschweißverfahrens als Verbindungstechnik zwischen den einzelnen Leiterbahnanschlüssen und dem Kühlkörper, kann dabei eine thermisch und elektrisch hoch-leitfähige Verbindung hergestellt werden (siehe **Bild 2.7**). In [5] werden

weitere zahlreiche Beispiele zur Ausführung von Blech-Drahtverbindungen aus industriell eingesetzten Kupferwerkstoffen aufgezeigt, wobei dabei speziell die Bearbeitung von teilweise kunststoff-isolierten Wicklungsdrähten von Transformatorspulen betrachtet wird. Gleichfalls mit Blick auf die elektrische Leitfähigkeit wurden in [29] und [22, 30] industriell bereits umgesetzte Anwendungen veröffentlicht, die die Schweißbearbeitung von elektrischen Relais- und Drahtkontakten umfassen. In **Bild 2.8** ist dementsprechend ein Steckermodul für die Telekommunikationstechnik dargestellt, auf dem acht Schweißpunkte sequentiell gesetzt werden, die jeweils die

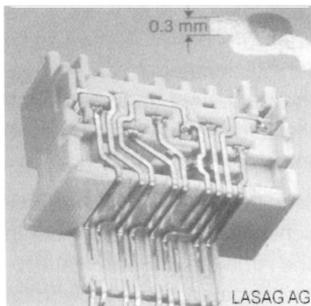


Bild 2.8 Drahtkontakte

ieren von Schreib-/ Leseköpfen für Festplattenlaufwerke berichtet als auch in der Folge das thermische Kontaktieren von Lastwiderständen für elektronische Steuergeräte der Automobilindustrie als Schweißaufgaben genannt werden. Das hochvakuumdichte Verschließen von Druck-, Temperatur- und Bremssensoren und auch das Verschweißen von Schaft und Spindel eines Bohrwerkzeugs werden weiterhin als industrielle Anwendungsgebiete aufgezählt.

Neben der Darstellung der Mikroverbindungstechnik für Aufgaben in der Elektromechanik eignet sich der gepulste Nd:YAG-Laserstrahl aber auch für das automatisierte Fügen von hochwertigem Edelmetall, wie z.B. das Punktschweißen der einzelnen Glieder von Platin-, Gold- und Silberketten, wie sie in **Bild 2.9** gezeigt werden.

## 2.2 Prozeßdiagnostik

Vor einer Diagnose des Prozeßverlaufs beim Laserstrahl-Schweißen müssen sowohl die wesentlichen Einflußgrößen in Ihrer Wirkung auf den Schweißprozeß identifiziert sein als auch grundsätzliche, die Strahl-Stoff-Wechselwirkung beeinflussende Prozeßmechanismen bekannt sein müssen. Im Anschluß kann vor diesem Hintergrund die Auswahl einer zweckmäßigen Sensortechnik erfolgen, die eine sinnvolle Erfassung der einzelnen Phänomene ermöglicht. Eine Darstellung von geeigneten, nach derzeitigem Stand bereits verfügbaren Konzepten und Werkzeugen zur Überwachung bzw. automatischen Kontrolle von Schweißergebnis und Prozeßparametern beim Laserstrahl-Schweißen schließt die Betrachtungen ab.

Kontaktbahnen aus verzinnem Messing mit der dazugehörigen Anschlußlitze verbinden.

Die Punktschweißbearbeitung der Federelemente von Beschleunigungsaufnehmern für automobile ABS-Sensoren wird in [24] beschrieben und weist damit auf das große Feld der mechanischen Einsatzgebiete hin. Daß Produkte aus der Feinwerktechnik zu den typischen Anwendungsfällen für den Einsatz von pw-Lasersystemen zählen, zeigt sich auch anhand der in [31] aufgeführten Fertigungslösungen. Dort wird sowohl von erfolgreich durchgeführten Schweißaufgaben für das hochpräzise, mechanische Fix-

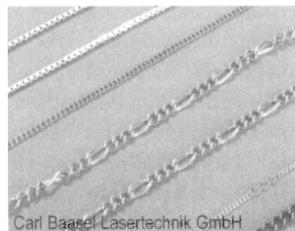


Bild 2.9 Kettenglieder

### 2.2.1 Strahl-Stoff-Wechselwirkung

Bei der Wechselwirkung des Laserstrahls mit dem Werkstückmaterial wird im wesentlichen auf die Bilanzierung der Energieumwandlung abgestellt, bei der neben den direkt absorbierten Strahlungsanteilen auch die reflektierten sowie die transmittierten Beträge zu berücksichtigen sind.

Das Verständnis der physikalischen Wechselwirkungsmechanismen zwischen der elektromagnetischen Laserstrahlung und einem metallischen Festkörper sowie deren Einfluß auf das Bearbeitungsergebnis ist durch zahlreiche Arbeiten in Form von Prozeßmodellen, Simulationen und experimentellen Untersuchungen geschaffen worden [6, 32, 33]. Grundsätzlich beschreiben die betrachteten Arbeiten die Absorption der Laserstrahlung anhand der Einkopplung der Strahlungsleistung in das metallische Gefüge des Grundwerkstoffs. Durch die Übertragung der elektromagnetischen Schwingung auf die im Kristallgitter befindlichen freien Elektronen bzw. das Kristallgitter findet die Umwandlung von Bewegungsenergie in Wärmeenergie statt [34]. Der initiale Wirkungsgrad des Laserprozesses ist deshalb primär an die optische Konstellation gekoppelt, die zwischen der Arbeitsstrahlung und der Oberfläche des Werkstoffs aufgespannt wird. Neben der spezifischen Wellenlänge des Arbeitslasers spielen dabei insbesondere der Einfallswinkel und dadurch auch die Polarisation der Laserstrahlung sowie das Material des Werkstücks und weiterhin die geometrische und chemische Beschaffenheit der bestrahlten Werkstückoberfläche [35] eine Rolle. Einerseits existieren zwar bereits für den Großteil der technisch üblichen Werkstofflegierungen Absorptionswerte, z.B. für Nd:YAG-Strahlung bei Raumtemperatur [36], andererseits können jedoch deutliche Abweichungen von den dort tabellierten Werten erfolgen, sollte eine Bestrahlung außerhalb der Oberflächennormalen gewählt werden oder die Beschaffenheit der Werkstoffoberfläche sich ändern.

Aufgrund der anwachsenden Stoßfrequenz zwischen Leitungselektronen und Kristallgitter nimmt für steigende Temperaturen bei Metallen der Wirkungsgrad der Strahl-Stoff Kopplung deutlich zu, wodurch sich i.d.R. unmittelbar eine Erhöhung des Absorptionsgrads einstellt. Allerdings, für die Kombination von senkrecht einfallender Nd:YAG-Strahlung und Stahlwerkstoffen wird in [32, 36] bei steigender Temperatur bis unterhalb der Schmelztemperatur eine Abnahme des Absorptionsgrads um ca. 20% beobachtet.

In Abhängigkeit der thermo-physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs und der Bestrahlungsdichte ( $I \geq 10^5 \text{ W/cm}^2$ ) kann das Material bis zu seiner Verdampfungstemperatur erwärmt werden, so daß sich Metallatome aus der Schmelzbadoberfläche beginnen herauszulösen und nach oben abströmen. Die Energieübertragung zwischen der einfallenden Laserstrahlung und dem Grundwerkstoff kann von diesem Moment an zunehmend durch die Wechselwirkung der Lichtwellen mit der sich ausbildenden Metaldampf-atmosphäre beeinflusst werden, da zunehmend Anteile der Strahlungsleistung innerhalb des Metaldampfes absorbiert werden.

Oberhalb einer kritischen Schwellintensität ( $I \geq 10^6 \text{ W/cm}^2$ ) wird mit Fortdauer der Bestrahlung dann eine sprunghafte Zunahme der Energieeinkopplung bzw. Verringerung der Strahlreflexion beobachtbar, die sog. anomale Absorption setzt ein. Bedingt

durch den Impuls des durch die hohe Verdampfungsrate sehr dichten Metalldampfes bildet sich im Werkstoff, beginnend von der Oberfläche, eine Strahl- bzw. Dampfkapillare aus, an deren steil stehenden Wänden der einfallende Laserstrahl mehrfach reflektiert bzw. im Idealfall jeweils durch optimale Winkelverhältnisse zu hohen Anteilen absorbiert wird. Der dadurch erhöhte Einkoppelgrad der Laserleistung in den Werkstoff ergibt sich somit als Summe sämtlicher Einzelabsorptionen [32]. Speziell bei der Materialbearbeitung mit CO<sub>2</sub>-Lasern kann, gleichzeitig zu dem oben beschriebenen Schwellverhalten durch das Auftreten der Dampfkapillare, die Ausbildung eines laserinduzierten Plasmas beobachtet werden, das auf der teilweisen Ionisation der Metaldampf-atmosphäre beruht. Die zu diesem Zeitpunkt bereits sehr hohe Energieeinkopplung wächst dabei durch die Wechselwirkung der ungerichteten kurzwelligen Plasmastrahlung mit der Kapillarwand nochmals deutlich auf Werte von annähernd 100% an. Bei weiter ansteigenden Bearbeitungstemperaturen bzw. zu hohen Leistungsdichten kann es indes, durch Absorption und Brechung der einfallenden Laserstrahlung innerhalb einer dann hochdichten Plasmawolke, zu einer Abschirmung der Werkstoffoberfläche kommen. An dieser Stelle sei erwähnt, daß über die Wahl des Prozeßgases eine gezielte Beeinflussung der Plasmabildung bzw. eine spürbare Verringerung der Temperaturabhängigkeit der Plasmaeigenschaften erfolgt. So empfiehlt sich für die Schweißbearbeitung mit sehr großen Leistungswerten beispielsweise Helium [37] als Arbeitsgas. Eine direkte Beeinflussung der Energieübertragung des Nd:YAG-Arbeitsstrahls durch Plasmaabsorption bzw. Plasmaabschirmung, wie sie bei der CO<sub>2</sub>-Lasermaterialbearbeitung bekannt ist, wird in [13, 32] für Stahl- und in [38] für Al-Werkstoffe als nicht bedeutsam für die Einkopplung in die Kapillarwand beschrieben. Durch die beim gepulsten Laserstrahl-Mikroschweißen jedoch gleichfalls entstehende hochdichte Metaldampf-atmosphäre kann der Laserstrahl indes stark gebrochen und dadurch die Energieeinkopplung in den Werkstoff merklich beeinflußt bzw. reduziert werden [2, 39].

## 2.2.2 Einflußgrößen auf den Prozeßverlauf

Das Umfeld für das Laserstrahlschweißen stellt eine Vielzahl an Parametern bereit, die in einer direkten Ursache-Wirkung Beziehung zum Schweißergebnis stehen. In [40] werden diese Parameter nach Eingangs- und Ausgangsgrößen kategorisiert. Während die Ausgangsgrößen des Schweißprozesses in Anlehnung an zahlreiche, standardisierte Qualitätsprüfverfahren der DIN ISO 9000 ff bestimmt und quantifiziert werden können, wurzeln die eingangsseitigen Einflüsse sowohl im Prozeßumfeld als auch innerhalb der Laseranlage. Die wichtigsten Einflußgrößen auf den Laserstrahl-Schweißprozeß sind in **Bild 2.10** wiedergegeben.

Durch die Verknüpfung von Laserleistung und Fokuslage über die Leistungsdichte (Gl. 2.1c) findet eine direkte Beeinflussung des Prozeßverlaufs bzw. des Schweißergebnisses statt. Sowohl die Schweißtiefe als auch die Schweißnahtbreite wird dadurch vorgegeben [41], so daß eine unmittelbare Reaktion auf werkstückspezifische Gegebenheiten erfolgen kann. Entsprechend der Forderung den Schweißprozeß robust zu gestalten, wird bei industriellen Applikationen größtenteils innerhalb der



Bild 2.10 Einflussgrößen auf den Prozeßverlauf

Brennweite der eingesetzten Fokussieroptik gearbeitet ( $z_F = 0$ ). Dadurch ist es möglich, die Schärfentiefe der Strahlabbildung optimal auszunutzen, wodurch die maximale Toleranz bei der vertikalen Positionierung der Strahlachse erreicht wird. Generell steuert die Positionierung der Strahlachse auf der Werkstückoberfläche die Verteilung der Strahlleistung innerhalb der Schweißzone, was insbesondere bei unsymmetrischen Fügekonstellationen, z.B. bei einer Kehlnahtverbindung, von großer Bedeutung ist. Um insbesondere bei Schweißverbindungen im Überlapstoß eine optimale Durchdringung der Fügepartner zu gewährleisten, muß ein minimaler Spalt zwischen den aufgespannten

Blechen gewährleistet werden. Weiterhin sollte die Werkstückoberfläche frei von Verschmutzungen sein, um einerseits die initiale Absorption der Strahlungsenergie zu Prozeßbeginn nicht nachteilig zu beeinflussen und andererseits eine langfristige Beschädigung der Abbildungsoptiken bzw. der Bearbeitungsköpfe durch abdampfende Adsorbate auszuschließen. Speziell bei der Lasermaterialbearbeitung beeinflussen die physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe den Prozeßverlauf. Neben der durch Grundwerkstoff und Oberflächenbeschaffenheit vorgegebenen optischen Absorption bestimmen speziell thermophysikalische Kennwerte, wie z.B. die Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität die Schweißbeignung eines Werkstoffs. Durch den Einsatz von inerten Schutz- bzw. reaktiven Prozeßgasen kann zwar einerseits die Oxidation der Werkstoffoberfläche für den Prozeßverlauf gesteuert werden, andererseits können aber im geschmolzenen Werkstoff, besonders bei der Verarbeitung von Kupfer-Werkstoffen unter Luftatmosphäre, Gase, wie z.B. Sauerstoff gelöst werden, die dann zu Versprödung bzw. Porenbildung führen [5]. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß sich der Zustand der optischen Komponenten innerhalb der Strahlführung und Strahlformung ebenfalls auf das Schweißergebnis auswirken können. So können bereits stark verschmutzte oder beschädigte Schutzgläser die Ursache für ungenügende Schweißergebnisse darstellen.

### 2.2.3 Meßsensorik

Aktuelle Einrichtungen zur Prozeßdiagnostik beim Laserstrahl-Schweißen basieren größtenteils auf der Erfassung und Auswertung von direkten, sog. primären und indirekten, sog. sekundären Prozeßemissionen aus der Bearbeitungszone. Die primären Emissionen bestehen ausschließlich aus den Verlustanteilen der bei der Wechselwirkung mit dem Werkstoff nicht in Prozeßenergie umgewandelten Laser-Strahlungsleistung. Sie wird nominell durch die an der Bearbeitungszone auftretende Strahl-Reflexion bzw. Strahl-Transmission charakterisiert, wobei letztgenannte für die Schweißbearbeitung i.d.R. vernachlässigt werden kann. Die sekundären Emissionen basieren hingegen auf thermo-physikalischen Effekten an der Fügestelle bzw. Vorgängen innerhalb der Schweißzone, die durch die Umwandlung der im Werkstoff absorbierten bzw. eingekoppelten Anteile der Laserenergie auftreten. Neben elektromagnetischen Strahlungen, z.B. durch Plasmen, können diesbezüglich insbesondere auch akustische Emissionen erfaßt werden.

Für die Aufzeichnung der primären und sekundären Strahlungsanteile werden optische Sensoren auf Basis von lichtelektrischen Photodioden verwendet, die in ihrem Empfindlichkeitsbereich ausgehend von kurzwelliger, ultravioletter (UV) Strahlung bis zu langwelliger, infraroter (IR) bzw. Temperaturstrahlung reichen. Als Empfänger von akustischen Emissionen aus der Schweißzone kommen wegen der geringen Baugröße häufig Mikrofone, die aus piezoelektrischen Kontaktwandlern bestehen zum Einsatz. Beide Detektorgruppen werden für den Einsatz häufig durch elektronische Verstärkerschaltungen ergänzt, um mit Blick auf teilweise sehr geringe Strahlungsleistungen eine optimale Sensitivität zu erreichen.

#### Photo-Optische Messung

Durch die Energieeinbringung beim Laserstrahlschweißen wird, je nach Prozeßzustand, von der Bearbeitungszone ein breites Spektrum an elektro-magnetischer Strahlung emittiert. Dabei liegt der Hauptteil der bei der Nd:YAG Bearbeitung von Stahlwerkstoffen abgehenden Strahlungsleistung im Wellenlängenbereich von ca. 0,4  $\mu\text{m}$  (VIS) bis oberhalb von 1  $\mu\text{m}$  (IR) [42]. Die Erfassung dieser Prozeßstrahlung ist mit Photodioden möglich, welche proportional der einfallenden Strahlungsleistung einen meßbaren Photostrom erzeugen (photovoltaischer Effekt). Durch eine geeignete Auswahl der spektralen Empfindlichkeit der Photodetektoren, in Verbindung mit optischen Filtern können spezielle Wellenlängenbereiche untersucht werden. Eine gezielte Überwachung, z.B. der von der Bearbeitungsebene reflektierten Laserstrahlung, ist damit erst möglich. Bei der Schweißbearbeitung mit dem Nd:YAG-Laser werden vorwiegend Detektoren auf Basis von planaren Silizium (Si)- oder Germanium (Ge)-Dioden eingesetzt. Einerseits stimmen deren breitbandige Resonanzbereiche<sup>1</sup> gut mit dem bei der Metallverarbeitung erwarteten Strahlungsspektrum überein, andererseits weisen diese Bauelemente sehr geringe Anstiegszei-

<sup>1</sup>  $\lambda_{\text{Si}} = 400 \dots 1100 \text{ nm}$ ;  $\lambda_{\text{Ge}} = 900 \dots 1800 \text{ nm}$

ten im ns-Bereich auf, so daß eine verzögerungsfreie Kopplung zwischen Prozeßverlauf und Detektionssignal erreicht werden kann.

Bei der photo-optischen Messung stehen zwei Beobachtungsformen bzw. Meßprinzipien zur Verfügung. Eine Positionierung der Dioden in Strahlachse erlaubt, die zur Fokussierung des Arbeitsstrahls installierten Optiken ebenfalls für die Abbildung der Detektionsstrahlung auf die jeweiligen Sensoren zu nutzen. Diese sog. Onaxis-Messung besitzt ein hohes Maß an Robustheit, da die Sensoren direkt in das Gehäuse des Bearbeitungskopfs integriert werden können [4, 17, 43, 44, 45]. Bei der sog. Offaxis-Messung werden die Sensoren außerhalb der Achse des Arbeitsstrahls positioniert und können dadurch, in Abhängigkeit der jeweils gewählten „Blickrichtung“, die in Raumrichtung reflektierte Strahlungsleistung detektieren. Dadurch können entweder Veränderungen in der Geometrie der einzelnen Fügepartner beim Aufschmelzen aufgelöst werden, wie sie z.B. beim Kontaktieren elektronischer Bauelemente auf Leiterbahnen entstehen [4, 46] oder durch eine Positionierung mehrerer Dioden mit unterschiedlichen Raumwinkeln auf die Bearbeitungszone gerichtet, kann beispielsweise eine Erfassung der Schweißtiefe oder der geometrischen Veränderungen erfolgen. Weiterhin können die Sensoren auch mit separaten Abbildungsoptiken ausgerüstet werden [47, 48], wodurch eine sehr präzise Positionierung und Messauflösung bzgl. der Bearbeitungsfläche möglich ist.

### Thermische Messung

Besonders im Bereich der Elektronikfertigung besitzen die zu fügenden Objekte eine geringe Wärmeleitfähigkeit oder wegen ihrer Baugröße kleine Wärmekapazitäten. Die Pyrometrie als eine berührungslose und dadurch rückwirkungsfreie Messung der Wärme- bzw. Temperaturstrahlung an der Fugestelle, stellt daher eine verlässliche Methode der Prozeßdiagnose dar [49]. Durch den strengen Zusammenhang zwischen emittierter Strahlungsleistung im infraroten Spektralbereich und tatsächlicher Werkstofftemperatur kann eine schnelle temperaturproportionale bzw. temperaturäquivalente Prozeßkenngröße ermittelt werden [50].

Die innerhalb der Lasermaterialbearbeitung meist installierten Bandstrahlungs- bzw. Spektralpyrometer sind nur für einen begrenzten Spektralbereich empfindlich. Für die exakte Bestimmung der jeweiligen Temperatur nach dem Wien'schen Gesetz muß der spezifische, die Strahlungsleistung bestimmende Emissionsgrad des Objekts bekannt sein. Der Emissionsgrad stellt dabei allerdings keine Konstante dar, sondern ist deutlich von Temperatur, Material und Oberflächenbeschaffenheit des betrachteten Werkstoffs abhängig. Um diesen Einfluß für praktische Anwendungen zu eliminieren, kann entweder durch die Verknüpfung von zwei, in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen messenden Spektralpyrometern oder kostengünstiger durch zwei Photodioden mit unterschiedlichen Resonanzbereichen, ein sog. Quotienten- oder Verhältnispyrometer, aufgebaut werden [51, 52]. Dadurch ist es möglich, aus zwei getrennt gemessenen Strahlungsleistungen die jeweilige Oberflächentemperatur ohne Kenntnis des transienten Emissionsgrades zu ermitteln [53].

Vor dem Hintergrund chromatischer Abberationen weisen Quotientenpyrometer auch eine große Empfindlichkeit gegenüber Verschiebungen der Fokusslage auf, die in speziellen Fällen sogar eine präzise Erkennung der jeweiligen Fehlstellung erlaubt [52].

## Schallmessung

Im Verlauf von Laserstrahlschweißprozessen entstehen Schallemissionen (acoustic emission, AE) die unmittelbar durch Laserparameter sowie charakteristische Prozeßstadien, wie das Aufschmelzen bzw. das Verdampfen der Werkstoffoberfläche beeinflusst werden und einen breitbandigen Frequenzraum von 10 bis  $10^6$  Hz umspannen. Die wesentlichen Mechanismen für die während des Schweißvorgangs entstehenden Druckwellen finden sich sowohl innerhalb der Füge Stelle als auch im daran angrenzenden Kristallgitter des Werkstoffs. Thermisch induzierte Spannungen durch Volumenänderungen sowie Phasenumwandlungen werden dabei ebenso als Schallquellen genannt [54], wie die im Verlauf der Verdampfungsphase durch abströmende Metallteilchen auftretenden Dichteschwankungen innerhalb der Atmosphäre der Bearbeitungszone [55]. Die Systeme für die Erfassung und Auswertung von Schallemissionen basieren dabei generell auf Verfahren zur Messung von Luft- und Körperschallemissionen. Die Unterscheidung spiegelt dabei die Art des Übertragungsmediums wider. Dementsprechend werden die aus der Bearbeitungszone abgestrahlten Schallwellen entweder mit einem Mikrofon berührungslos über die Umgebungsluft gemessen [56] oder direkt über den bearbeiteten Werkstoff bzw. dessen Spannvorrichtung an einen piezo-elektrischen Aufnehmer übertragen [54]. Bei der Auswahl des Meßverfahrens müssen folgerichtig, neben den konstruktiven Voraussetzungen, die unterschiedlichen Schall-Ausbreitungsgeschwindigkeiten innerhalb der Übertragungsmedien berücksichtigt werden, da zwischen Luft- und Körperschallmessung sehr große Laufzeitunterschiede auftreten können.

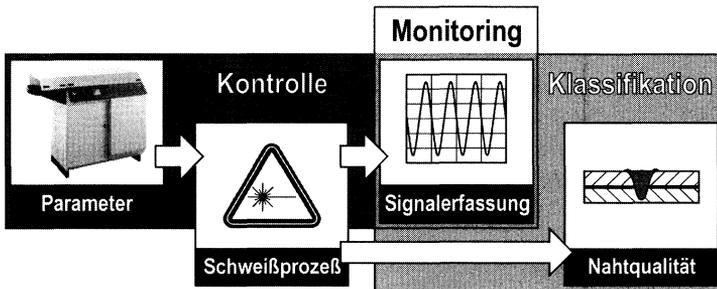
Als deutlich erkennbares Problem bei der akustischen Messung wird von der Abhängigkeit der Meßwerte von der räumlichen Orientierung der Mikrofone bzgl. der Bearbeitungszone als auch von der Beschaffenheit der mechanischen Kopplung zwischen Meßaufnehmer und Werkstück berichtet. So können durch Reparatur oder Demontage von Maschinenteilen neue Schwingungskomponenten innerhalb der Signale von Körperschallmikrofonen entstehen [57], die zu einer merklichen Veränderung der einzelnen Schallsignale beitragen.

Speziell bei der Luftschallmessung besteht zwar die Möglichkeit, den Meßaufnehmer beispielsweise an die Schutzgasdüse oder die Fokussieroptik anzukoppeln und dadurch einen verhältnismäßig robusten Aufbau zu erreichen [58, 59], industriell einsetzbare bzw. bereits eingesetzte Applikationen sind allerdings in nur begrenzter Zahl bekannt [60].

## 2.2.4 Prozeßüberwachung beim Laserstrahlschweißen

Für die Betrachtung der derzeit konzipierten Strategien bzw. bereits umgesetzten Methoden zur Überwachung des Laserstrahl-Schweißprozesses rücken an dieser Stelle neben den expliziten Ansätzen für die Nd:YAG-Bearbeitung auch Lösungswege, die primär für CO<sub>2</sub>-Systemkonzepte entwickelt wurden in das Blickfeld der Betrachtung. Da der grundsätzliche Prozeßverlauf durch die annähernd selben thermo-physikalischen Phänomene geprägt ist, können speziell die Ansätze zur Auswertung der Signaldaten wechselseitig zwischen den beiden Spezifikationen übertragen werden.

Anhand der in **Bild 2.11** aufgezeigten Konzepte, besteht ein Überwachungssystem für den Laserstrahl-Schweißprozeß - je nach Reifegrad - aus den Modulen Monitoring, Klassifikation und Kontrolle. Eine auf Basis der bekannten Einflußfaktoren vollzogene Parametrisierung des Schweißprozesses wirkt sich unmittelbar auf den Prozeßverlauf aus. Durch die Erfassung von geeigneten Prozeßsignalen können entweder provozierte bzw. systematische oder durch stochastische Parameter-Schwankungen hervorgerufene Störeffekte sichtbar gemacht und dokumentiert werden.



*Bild 2.11 Konzepte für die Prozeßüberwachung*

Durch die Darstellung mittels beispielsweise Bildschirmsichtgeräten ist es dem prozeßbegleitenden Maschinenpersonal möglich entweder noch während des Schweißvorgangs oder direkt im Anschluß den Prozeßverlauf zu begutachten. Dieses Konzept wird im weiteren Verlauf als Monitoring bezeichnet. Werden die Signaldaten durch das Überwachungssystem direkt mit der Nahtqualität, z.B. der Schweißnahttiefe oder der Nahtoberfläche (Schuppung, Spritzer, etc.) verknüpft, so wird von einer Klassifikation i.S. einer automatischen Qualitätsbestimmung gesprochen. Vorgabe eines solchen Systems ist es, dem Fertigungspersonal im Idealfall auch solche Fehler aufzuzeigen, die durch eine produktionsbegleitende, z.B. visuelle Prüfung nicht entdeckt werden können. Die Strategie Fertigungsfehler größtenteils oder gar gänzlich zu vermeiden, setzt eine Rückkopplung zwischen der Detektionsebene und den für die Kontrolle spezifizierten Prozeßparametern voraus. Systemtechnisch ist hierbei zwischen den zwei Fällen zu unterscheiden, ob ein

erforderlicher Systemeingriff dabei bereits während des Schweißprozesses (online) oder erst im Anschluß (offline) erfolgen kann.

Im folgenden sollen derzeit verfügbare Systemlösungen zur Prozeßüberwachung kurz vorgestellt und anhand der genannten Überwachungskonzepte untersucht werden. Ein zusammenfassender, tabellarischer Überblick, der dabei betrachteten Arbeiten, wird am Ende dieses Abschnitts durch **Tabelle 2.1** wiedergegeben. Dort können die untersuchten Systeme speziell hinsichtlich der ausgewählten Prozeßsignale bzw. -sensorik und des jeweiligen Überwachungskonzepts gesichtet werden.

## Monitoring

Eine fertigungstaugliche Erfassung und Darstellung der aus den einzelnen Schweißprozessen gewonnenen Informationen erfolgt hauptsächlich über PC-basierte, Mehrkanal-A/D-Wandlerkarten, die im mehrfachen 100 kHz-Bereich ihre einzelnen Eingangskanäle abtasten, und die empfangenen Sensordaten direkt in den Hauptspeicher bzw. auf die Massenspeicher des Leitrechners ablegen können. Für die Weiterverarbeitung der Daten stellen die Meßrechner mit Hilfe geeigneter Softwarewerkzeuge, wie z.B. LabView<sup>®</sup>, eine flexible Plattform zur Darstellung und Auswertung der einzelnen Prozeßinformationen dar.

Bei der transienten Darstellung der Prozeßdaten wird der zeitliche Verlauf der Signalantworten analog zum Schweißvorgang wiedergegeben. Durch den direkten visuellen Vergleich [48, 61, 62, 63] oder die Superpositionierung von einzelnen Meßkurven [64] erfolgt die Interpretation bzw. Bewertung des Prozeßverlaufs auf Basis von charakteristischen Signalkennwerten, die z.B. durch die mittleren Spannungsamplituden oder auch signifikante Zeitpunkte, wie z.B. die Entstehung des Metaldampf- bzw. Plasmaleuchtens geprägt sind [66, 67]. Durch die Darstellung der Kennwerte bzgl. einer schrittweisen Variation der Prozeßparameter [68] kann im weiteren Verlauf die Signifikanz der Auswirkung überprüft werden, wodurch die Effektivität der Kopplung zwischen Parameter und Prozeßsignal widerspiegelt wird. Sowohl die Spezifikation des Sensors als auch die Bestimmung seiner optimalen Position bzgl. der Bearbeitungszone ist dadurch möglich.

Speziell strömungsdynamische Bewegungen innerhalb des aufgeschmolzenen Werkstoffmaterials werden als Grundlage für die sensorgestützte Analyse des Schweißprozesses herangezogen. Neben einer orts aufgelösten Darstellung der von der Schmelzbadoberfläche reflektierten bzw. abgestrahlten Emissionen, über z.B. Offaxis-Dioden, werden auch Methoden der Fourier-Frequenzanalyse (FFT) gewählt, die eine vergleichende Diagnose zwischen den relevanten Bewegungsfrequenzen innerhalb der Schmelzbadbewegung erlaubt. Speziell die durch Metaldampf- bzw. Plasmawolke erzeugten Sekundär-Strahlungsanteile sowie der Schalldruck transportieren verwertbare Informationen über den aktuellen Prozeßzustand [69, 70, 71]. Neben der initialen Strahlung bzw. Druckwelle bei der Entstehung des Metaldampfes bewirken auch die durch die Schmelzbadynamik erzeugten Druckschwankungen deutliche Modulationen des Leucht- und Schallsignals, so daß eine darstellende

Auswertung der entsprechenden Frequenzspektren innerhalb der gesichteten Arbeiten weit verbreitet ist [55, 58, 68, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80].

## Klassifikation

Eine Korrelation von Prozeßsignal und Schweißergebnis setzt neben der Aufzeichnung und Auswertung der Signaldaten auch die eingehende Analyse der jeweilig interessierenden Schweißgüte voraus. Innerhalb der betrachteten Untersuchungen wird dabei beispielsweise auf die metallographische Bestimmung der Schweißnahttiefe zurückgegriffen [81]. Der Vergleich zwischen Meßdaten und Nahtqualität kann entweder orts aufgelöst für das Nahtschweißen erfolgen oder im Anschluß an den jeweiligen Schweißvorgang findet eine globale Bewertung der Qualität bzgl. der gesamten Schweißnahtlänge statt [47]. Teilweise stützen sich die Überwachungssysteme dabei auf Kennlinien, die einen Zusammenhang zwischen einer diskreten Signalamplitude und der Einschweißtiefe herstellen [82]. Bei der Korrelation werden dabei unterschiedliche Methoden eingesetzt. So kann eine Zuordnung auf Basis eines erwarteten, mittleren Referenz- bzw. Sollwerts [75, 83, 84] erfolgen oder durch die zusätzliche Installation von Signifikanzschranken, welche die obere und untere Signalbegrenzungen bzgl. des Referenzwerts festlegen. In beiden Fällen löst die Über- bzw. Unterschreitung einer als kritisch definierten Amplitude eine Systemwarnung aus, die bzgl. des Prozeßverlaufs einen Schweiß- bzw. Nahtfehler dokumentieren soll [85, 86, 87]. Durch die Verknüpfung von Zeitpunkt, Dauer und Höhe der Sollwert-Überschreitung kann das System in [85] und [88] dem Anlagenbediener auch eine über Fuzzy-Methoden berechnete Fehlerwahrscheinlichkeit ausgeben.

Ein weiterer Ansatz für die Analyse der Nahtqualität findet sich häufig im Gebrauch von Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI). Dabei werden Neuronale Netze eingesetzt, die eine implizit vernetzte Korrelation zwischen aus dem Prozeß gewonnenen charakteristischen Signaldaten und dem Schweißergebnis herstellen [89, 90, 91].

## Kontrolle

Bei der Auswertung der für eine Prozeßkontrolle spezifizierten Prozeßsignale steht primär das Zeitkriterium im Vordergrund. Neben dem Gebrauch von E/A-Kennlinien inkl. geeigneter Signifikanzschranken, können dabei auch trainierte Neuronale Netze die Basis für eine schnelle Datenanalyse darstellen [90, 92].

Um den Laserstrahl-Schweißprozess bzgl. zu spezifizierender Parameter aktiv kontrollieren zu können, muß gewährleistet sein, daß, für den Fall des Systemeingriffs, eine ausreichend schnelle Aktorik existiert, die den Energieeintrag in den Werkstoff kurzfristig korrigieren kann. Bei eingehender Betrachtung kristallisieren sich unter dieser Voraussetzung nur wenige Stellglieder als tauglich heraus, so daß neben der Laserleistung [43, 83] und der Fokusslage [77, 92, 93, 94] auch die Manipulation von Vorschubgeschwindigkeit [90, 95] und Position [77] des Bearbeitungskopfes bzgl.

der Nahtlage als sinnvolle Ausgangsbasis für eine Nachführung angesehen werden. Speziell für die extrem kurzen Prozeßzeiten bei gepulsten Nd:YAG-Systemen gelten andere Voraussetzungen. Eine brauchbare Nachführung der Parameter muß hier im Bereich von Millisekunden erfolgen, so daß dabei keine großen Massen bewegt werden dürfen. Eine schnelle Ansteuerung der Fokusslage, wie in [94] für den CO<sub>2</sub>-Laser vorgestellt, kann bei Nd:YAG Systemen nur unter großen Einschränkungen betrieben werden. Das einzig sinnvolle Stellglied für den gepulsten Festkörperlaser stellt demnach die Laserleistung bzw. die Laserenergie dar, beispielsweise durch eine zeitliche Begrenzung der jeweiligen Pulsdauer [9].

### **Zusammenfassende Betrachtung der Überwachungskonzepte**

Nach derzeitigem Stand der Technik und vor dem Hintergrund der anvisierten Überwachung bzw. Kontrolle von Mikro-Schweißprozessen lassen sich innerhalb der aktuell verfügbaren Überwachungskonzepte Defizite erkennen, die weiterführende Untersuchungen rechtfertigen.

Die derzeit verfügbaren Systemlösungen sind vorrangig für quasi-stationäre Prozeßzustände ausgelegt, wie sie hauptsächlich bei der sog. Makro-Schweißbearbeitung auftreten und im Prozeßverlauf eine Relativbewegung zwischen (cw) Laserstrahl und Werkstoff voraussetzen. Unter den physikalischen Randbedingungen, wie sie im Umfeld einer typischen Mikro-Schweißbearbeitung vorherrschen, sind solche Konzepte jedoch nicht oder nur sehr eingeschränkt nutzbar. Weiterhin werden für die Mehrzahl der vorgestellten Überwachungskonzepte CO<sub>2</sub> bzw. Nd:YAG cw-Laser im mehrfachen kW-Leistungsbereich als Strahlquelle eingesetzt, die bzgl. sowohl ihrer Strahl- als auch gesamten Systemcharakteristik nicht mit einem für die Mikro-Bearbeitung spezifizierten pw-Laser zu vergleichen sind.

Die eingehende Betrachtung der wenigen ausschließlich für das Laserstrahl-Mikro-schweißen entwickelten Lösungen zeigt, daß die aus dieser Gruppe bereits kommerziell verfügbaren Überwachungssysteme bis dato keinen großflächigen Einsatz innerhalb der industriellen Serienfertigung gefunden haben. Offensichtlich scheinen die aktuell angebotenen Lösungsstrategien noch nicht dem Anspruch gerecht zu werden, verlässliche Prozeßaussagen sowohl über einen längeren Zeitraum als auch unter „Nicht-Laborbedingungen“ zu geben. Als Grund für diesen Mangel kann speziell die Erfassung und Auswahl von relevanten Prozeßinformationen und die Analyse der aufgezeichneten Daten sowie deren Rückkopplung auf den jeweiligen Prozeßverlauf genannt werden. So basieren die z.Zt. gebrauchsfertigen Systeme einerseits auf noch nicht ausreichend spezialisierten Strahlführungs- bzw. Strahlformungswerkzeugen, so daß sich eine robuste weil wiederholgenaue Prozeßdiagnostik nicht erlaubt. Andererseits konzentrieren sich die jeweiligen Strategien zur Signalverarbeitung bisher ausschließlich auf den Gebrauch von statistisch gemittelten Referenzkurven, die allerdings nur unzureichend in der Lage sind, die teilweise komplexen und instationären Prozeßreaktionen, wie sie den Verlauf einer Mikro-Schweißbearbeitung kennzeichnen, eindeutig identifizierbar zu machen.

Spezifikation	System		Werkstoff Nahtform			Prozeßparameter							Emission				Konzept								
	CO <sub>2</sub> - Laser	Nd:YAG- Laser	continuous wave (cw)	pulsed wave (pw)	Stahlwerkstoffe	Cu-Legierungen	Al-/Mg-/Ti-Legierungen	a)	b)	c)	Leistung/ Energie	Vorschubrate	Fokusslage	Fügespalt	Blechstärke	Strahlachseposition	Oberflächenzustand	Prozeß-/ Schutzgas	primär ( $\lambda_{\text{Laser}}$ )	sekundär (UV - IR)	thermisch	akustisch	Monitoring	Klassifikation	Kontrolle
Alavi [48]		•		•			•			•	•	•							• <sup>1,4</sup>	• <sup>7</sup>			•		
Beersiek [75]	•		•	•	•					•	•	•							• <sup>3,5</sup>	• <sup>5</sup>			•		
Beyer [91]	•									•	•	•	•										•		
Chen [52]	•		•	•			•				•	•		•		•	•			• <sup>2,4</sup>					
Duley [72]	•		•	•		•	•									•				• <sup>4</sup>	• <sup>4</sup>				
Farson [47,89,90]	•		•	•	•		•			•	• <sup>5</sup>		•						• <sup>1</sup>	• <sup>4</sup>	• <sup>4</sup>			•	•
Gasmacher [51]		•	•	•	•					•	•	•							• <sup>1</sup>	• <sup>1,4</sup>			•		
Gong [92]	•		•	•			•	•		•	•	•					•			• <sup>4</sup>					•
Griebesch [63,85,88]	•		•	•						•	•	•	•						• <sup>3</sup>						
Gu [55]	•		•	•	•		•				•	•	•							• <sup>4</sup>	• <sup>4</sup>		•	•	•
Habenicht [71]	•		•	•	•	•	•			•	•	•	•						• <sup>1</sup>	• <sup>5,7</sup>			•		
Hand [80]	•		•	•						•		•								•			•		
Haran [61,77]	•		•	•						•	• <sup>5</sup>			•	• <sup>5</sup>				• <sup>3</sup>				•		•
Hoffmann [94]	•		•	•	•		•				• <sup>5</sup>									• <sup>1</sup>					•
Jurca [81]	•		•	•	•		•			•	•	•							• <sup>3</sup>						
Kim, C.-J. [64,65]	•		•	•			•			•	•	•	•						• <sup>1</sup>	• <sup>4</sup>					
Kinsmann [95]	•		•	•	•		•			•	• <sup>9</sup>								• <sup>1,5</sup>						•
Kußmaul [9,66]	•		•	•		•	•			•	• <sup>9</sup>								•	•	•	• <sup>6</sup>		•	•
Leong [82]	•		•	•			•			•						•			• <sup>1</sup>				•		
Morgan [76,93]	•	•	•	•	•		•					• <sup>5</sup>		•	•				• <sup>3</sup>				•	•	•
Nava-Rüdiger [78]	•		•	•	•			•		•	•	•	•						• <sup>1,5</sup>	• <sup>6</sup>					
Olsen [68]	•		•	•		•	•			•	•	•	•						• <sup>3</sup>						
Orlick [70]	•		•	•			•			•		•	•							• <sup>5,7</sup>			•		
Pöldmaa [62]	• <sup>5</sup>		•	•	•		•			•	•	•							•				•		
Sanders [84]	•	•	•	•	•	•	•	•		•	•	•				•			•				•		
Schnars [79]	•		•	•			•			•		•	•	•		•			• <sup>1</sup>						
Seidel [43]	•		•	•			•			•	• <sup>6</sup>						•		• <sup>1</sup>						•
Stark [69]	•		•	•	•		•			•	•								• <sup>1</sup>		• <sup>7</sup>				
Tönshoff [83]	•		•	•		•	•			•	• <sup>9</sup>								•				•		•
Wiesemann [87]	•	•	•	•	•		•			•	•	•	•	•					• <sup>1,3</sup>				•	•	•
Wisselink [67]	•		•	•			•			•									• <sup>1</sup>				•		
Zimmermann [86]	•		•	•			•			•	•	•	•						• <sup>2</sup>				•		•

1 = Offaxis-Position	4 = Quotienten Pyrometer	7 = Körperschall
2 = On- und Offaxis-Position	5 = CCD-Kamera	8 = Nd,Cr:GSGG-Laser
3 = mehrere Detektoren	6 = Luftschall	9 = Stell-/ Regelgröße

Tabelle 2.1 Übersicht der bekannten Konzepte zur Überwachung des Laserstrahl-Schweißprozesses

### 3 Aufgabenstellung

Das Mikro-Punktschweißen von Bauteilkomponenten aus der Feinwerktechnik und Elektromechanik gehört bereits seit vielen Jahren zum großflächig eingesetzten Technologie-Repertoire der Fertigungsbetriebe. Daß hierbei auch die extrem großen Stückzahlen der Massenfertigung effizient verarbeitet werden können, liegt zu einem großen Teil an einer gezielten Auswahl der verwendeten Werkstoffpaarungen, die, beispielsweise in der Spezifikation als CrNi-Stähle, eine gute Schweißseignung besitzen und deshalb ein breites Prozeßfenster ermöglichen. Die stetige Produkt-Miniaturisierung, die zwar offensichtlich, aber nicht ausschließlich bei den Erzeugnissen der Consumer-Elektronik zu beobachten ist, erzeugt notwendigerweise einen permanenten Entwicklungsdruck bei der Auslegung und Konstruktion von elektromechanischen Baugruppen. Darüberhinaus beansprucht eine vielschichtige Interessengruppe im Unternehmen Mitsprache bei der Spezifikation, der Bauteilgeometrie, dem jeweiligen Bauteilwerkstoff und schließlich dem Endprodukt. Daß dabei speziell die elektrischen Eigenschaften Vorrang vor anderen Charakteristiken haben, stellt eine zunehmende Herausforderung an die Fertigungsingenieure dar.

Das innerhalb der vorliegenden Arbeit betrachtete Einsatzfeld der gepulsten Mikro-Schweißtechnologie wird derzeit vor dem Hintergrund einer tolerierbaren Ausschuß-Quote spezifiziert. Da solche Komponenten zum Zeitpunkt der Laserbearbeitung i.d.R. noch keine hohe Wertschöpfung repräsentieren, lautet die Aufgabe meistens „Fehlererkennung vor Fehlervermeidung“. Mit dieser strikten Vorgabe müssen die einzelnen Fertigungslosgrößen einer intensiven statistischen Kontrolle unterzogen werden, um Reparaturkosten wegen mangelhafter Fügequalitäten oder, im Extremfall, dadurch ausgelöste Garantie-Folgekosten beim Anwender bzw. Kunden minimal zu halten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, schrittweise modular einsetzbare Lösungskonzepte zu entwickeln, die betrieblich verwertbare Instrumente für die Analyse und Identifikation von Laserstrahl-Mikroschweißprozessen darstellen und demzufolge eine technologische Grundlage für automatisierte Überwachungssysteme bilden sollen.

Vor dem Hintergrund des durch diverse Forschungsarbeiten [2, 4, 6, 13] bereits bekannten Prozeßmodells beim Laserstrahl-Mikroschweißen soll, einleitend auf Basis von eigenen Technologieuntersuchungen am Stahlwerkstoff X5CrNi1810, eine für den Prozeßverlauf unter betrieblichen Anforderungen zweckmäßige Diagnosetechnik aufgezeigt werden. Zielrichtung ist die Erkennung sowohl von aus den Modellvorstellungen bekannten Prozeßzuständen als auch ausgewählter Parameterkonfigurationen. Dementsprechend steht nach der Festlegung der systemtechnischen Randbedingungen für die Schweißversuche ein fundiertes Prozeß-Kontrollmodell im Vordergrund, das den experimentellen Ausgangspunkt für eine Verknüpfung von tatsächlichem Prozeßzustand als Folge ausgewählter Prozeßparameter mit spezifischen Signaleigenschaften am Einzelpunkt-Überlappstoß darstellt. Durch die Ergebnisse der experimentellen Vorleistung wird für den weiteren Verlauf der Untersuchungen eine informationstechnische Basis gelegt, auf der sich die einzelnen Überwachungskonzepte abstützen sollen.

Aufbauend auf der eingangs spezifizierten Anlagentechnik erfolgt im Anschluß eine schrittweise Konzeptionierung, praktische Umsetzung sowie experimentelle Charakterisierung von geeigneten Strategien zur Prozeßüberwachung bzw. Prozeßkontrolle.

An erster Stelle soll durch Schaffung einer Klassifikationsinstanz die automatische Begutachtung von Laserschweißverbindungen anhand von online aufgezeichneten Prozeßsignalen parallel zum Fertigungsprozeß ermöglicht werden. Anhand zweier ausgewählter Baugruppen aus der Fertigungstechnik wird dabei besonders die Industrietauglichkeit der vorgestellten Systemspezifikation herausgestellt werden.

Die Vermeidung von Schweißfehlern durch Überwachung und Kontrolle der verantwortlichen Prozeßgrößen ist Aufgabenstellung des darauffolgenden Arbeitsschritts. Mit einer offline Rückführung der relevanten Prozeßinformation auf die aktuelle Parametrisierung der Laseranlage soll eine adaptive Kontrolle von Einzelpunkt-Überlappschweißprozessen möglich werden.

Als abschließender Arbeitspunkt stehen die Möglichkeiten der Online-Steuerung des Mikro-Schweißprozesses im Mittelpunkt. Aufgrund der innerhalb dieser Arbeit eingesetzten Anlagentechnik können nur die experimentellen Grundlagen für die Null-Fehlerstrategie (zero-defect) erarbeitet werden. Die Untersuchungen sollen durch eine fundierte Versuchsstrategie den zuverlässigen Ausgangspunkt für eine technische Realisierung im betrieblichen Arbeitsprozeß innerhalb der betroffenen Produktionsanlagen darstellen.

## 4 Prozeßmodell

Durch die theoretische Modellierung eines technischen Systems wird generell das Ziel verfolgt, die Zusammenhänge zwischen expliziten Eingangsgrößen und beobachteten Ausgangsgrößen mathematisch zu beschreiben. Mit Blick auf die Signalverarbeitung an Laserstrahl-Schweißprozessen läßt sich dieser Anspruch präzisieren: Die im Verlauf eines Schweißprozesses durch ein installiertes Sensorsystem aufgezeichneten Prozeßsignale sollen sowohl mit relevanten Prozeßparametern (z.B. Fokusslage) als auch mit dem jeweiligen Prozeßzustand (z.B. Schweißnahttiefe) direkt verknüpft werden können.

Die instationäre Wechselwirkung zwischen einfallender Strahlungsenergie und Werkstoff beim gepulsten Schweißprozeß löst im Verlauf der zeitlich eng begrenzten Bestrahlungsdauer thermo-physikalische Vorgänge aus, die sich im wesentlichen nur anhand charakteristischer Prozeßzustände unterscheiden lassen. Vor dem Hintergrund des anvisierten Prozeßmodells empfiehlt es sich daher, Teilsysteme zu abstrahieren, die nur geringfügig miteinander gekoppelt sind [96]. Eine grundlegende Definition und analytische Formulierung der einzelnen chronologischen Stadien bzw. Prozeßphasen innerhalb einer Pulslänge wird deshalb als primäre Aufgabe für die weiteren Untersuchungen angesehen.

Im Anschluß folgt eine eingehende Analyse von experimentell aufgezeichneten Prozeßsignalen mit dem Ziel, den Zusammenhang zwischen Modell und Messung zu untersuchen. Insbesondere die bekannte direkte Abhängigkeit der Schweißergebnisse von der Pulsleistung kann dabei als theoretische Grundlage genutzt werden, um den Grad der Korrelation zu qualifizieren. Erst der Nachweis einer eindeutigen bzw. signifikanten Abhängigkeit zwischen den Prozeßparametern und den Meßsignalen rechtfertigt den Gebrauch der Signaldaten als informationstechnische Basis zur Prozeßkontrolle.

Im folgenden wird, in Anlehnung an die grundlegenden Literaturquellen zur Strahl-Stoff-Wechselwirkung (siehe **Abschnitt 2.2.1**), ein nichtverkettetes, analytisches bzw. empirisches Prozeßmodell formuliert, das im weiteren Verlauf durch experimentelle Untersuchungen gestützt werden soll. Besondere Beachtung findet dabei

die Erkennung der einzelnen Prozeßphasen anhand von online aufgezeichneten Signaldaten. Durch die Bestimmung von Eindeutigkeit bzw. Signifikanz und Güte der Identifikation soll die anschließende Verwendung der einzelnen Signale innerhalb von Systemen zur Prozeßkontrolle gerechtfertigt werden.

#### 4.1 Prozeßstadien beim Laserstrahl-Mikroschweißen

Grundsätzlich können innerhalb des Prozeßverlaufs beim Einzelpunktschweißen mit einem pw Nd:YAG-Laser vier charakteristische Phasen erkannt werden, deren zeitliche Ausprägung hauptsächlich von der auf der Werkstückoberfläche bereitgestellten Leistungsdichte abhängig ist. In **Bild 4.1** ist der chronologische Verlauf dieser Stadienfolge für Werte der Leistungsdichte im Bereich von  $I_0 = 10^5 \dots 10^6 \text{ W/cm}^2$  skizziert.

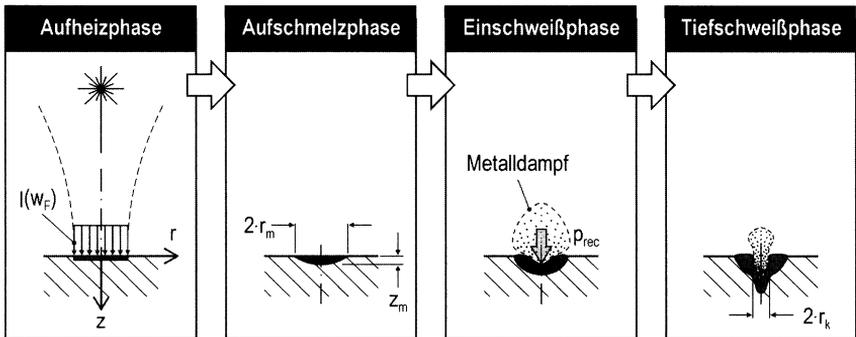


Bild 4.1 Prozeßstadien beim Laserstrahl-Mikroschweißen

Als theoretische Basis wird dabei der vereinfachte Fall einer Blindschweißung in einen in z-Richtung unendlich ausgedehnten Werkstoff betrachtet. Eine daran angeschlossene Übertragung der einzelnen Szenarien auf die praxisrelevante Überlappschweißverbindung läßt sich dadurch erreichen, daß für die weiterführenden Betrachtungen von einer abstandsfreien Positionierung der beiden Bleche zueinander, was auch als sog. „Nullspalt“ verstanden werden soll, ausgegangen wird. Weiterhin wird für die Verteilung der Leistungsdichte auf der Blechoberfläche ein Tophat-Profil angenommen, dessen Radius dem Durchmesser des Arbeitsstrahls im Fokuspunkt entspricht sowie ein während der gesamten Pulsdauer  $t_0 \leq t \leq \tau_H$  idealisierter, rechteckiger Pulsverlauf.

### 4.1.1 Aufheizphase

Bei Pulsbeginn dringt das elektromagnetische Feld der Laserstrahlung in Größenordnung von der optischen Eindringtiefe  $\delta$  ( $\approx 0,001$  mm [6]) in die plane Oberfläche des Festkörpers ein, wird über den normalen Absorptionsgrad  $\alpha$  in den Werkstoff eingekoppelt und dort lokal eng begrenzt in Wärmeenergie umgewandelt. Da die optische Eindringtiefe in der Praxis wesentlich geringer als die Blechstärke des bearbeiteten Werkstoffs ist, kann i.d.R. von einer sog. Oberflächenabsorption ausgegangen werden. Die Höhe des Absorptionsgrades ist dabei hauptsächlich von Material, Temperatur und Oberflächenbeschaffenheit des Grundwerkstoffs sowie Einfallswinkel (Brewstermaximum), Polarisation und Wellenlänge  $\lambda$  des Arbeitsstrahls abhängig. So können beispielsweise neben Antireflex-Deckschichten (coatings) speziell Oxidschichten auf Fe- und NE-Werkstoffen die initiale Leistungsabsorption an der Oberfläche stark erhöhen [4]. Gleichzeitig bilden sich an der Metalloberfläche in Folge der Erwärmung sog. Heiß-Oxide aus, die in Abhängigkeit der Umgebungsatmosphäre eine zusätzliche, teilweise starke Modulation des Absorptionsgrades bewirken können [4].

Da die analytische Berücksichtigung der oben geschilderten, sich gegenseitig beeinflussenden Abhängigkeiten nicht möglich ist, kann eine näherungsweise Berechnung der zeitlichen und räumlichen Temperaturverteilung im Festkörper über die vereinfachte Betrachtung der eindimensionalen instationären Wärmeleitungsgleichung entsprechend (Gl. 4.1) erfolgen [97].

$$T(t, z) = \frac{2 \cdot \alpha \cdot I_0}{L} \cdot \sqrt{\kappa \cdot t} \cdot \operatorname{ierf} \left( \frac{z}{2 \cdot \sqrt{\kappa \cdot t}} \right) \quad (\text{Gl. 4.1})$$

Demnach breitet sich die an der Oberfläche erzeugte Wärmeenergie in einem lateral unendlich ausgedehnten Körper ohne Verluste durch Strahlung und Konvektion, allein durch Wärmeleitung über den sich in Ortsrichtung einstellenden Temperaturgradienten aus. Der Absorptionsgrad und die thermo-physikalischen Kennwerte - Wärmeleitung  $L$  sowie Temperaturleitfähigkeit  $\kappa$  - werden dabei als über die Temperatur konstant angenommen. Speziell die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitung kann jedoch in [98] für viele Metallegierungen entnommen werden, wodurch eine rechnerische, implizite Anpassung möglich ist.

### 4.1.2 Aufschmelzphase

Mit dem Erreichen der Schmelztemperatur  $T(t, 0) = T_m$  an der Oberfläche bildet sich, von der Strahlachse radial ausgehend eine flüssige Schmelzzone aus, die mit fort-

schreitender Pulsdauer in das Medium hineinläuft. Um in dieser Phase den Zeitpunkt des tatsächlichen Schmelzbegins ( $T = T_m$ ) zu berechnen, ist die Schmelztemperatur des Grundwerkstoffs mit der zur Phasenumwandlung benötigten Schmelzwärme zu erweitern. Nach [2] kann die korrigierte Schmelztemperatur  $T_{\Delta m}$  mit der Schmelzenthalpie  $\Delta H_m$  und der spezifischen Wärme  $C_p$  gemäß (Gl. 4.2) berechnet werden.

$$T_{\Delta m} = T_m + \frac{\Delta H_m}{C_p} \quad (\text{Gl. 4.2})$$

Das in diesem Stadium vorherrschende, sog. Wärmeleitungsschweißen, bewirkt ein gleiches Verhältnis zwischen der Schweißtiefe  $z_m$  und dem an der Werkstückoberfläche sichtbaren Zuwachs des Radius  $\Delta r$  der Schmelzzone. Bei weiter fortschreitender Schweißtiefe wird die bis dahin annähernd stationäre Wärmeleitung zunehmend durch konvektive, also hydrodynamische Effekte bestimmt, die durch den anwachsenden Temperaturunterschied zwischen Schmelzbadoberfläche  $T(z = 0)$  und im Werkstück befindlicher Schmelzbadfront  $T(z = z_m)$  angetrieben werden.

$$v = \frac{d\sigma_s}{dT} \cdot \frac{\Delta T}{\mu_s} \cdot \frac{z_m}{2 \cdot r_m} \quad (\text{Gl. 4.3})$$

In [99] wird durch (Gl. 4.3) die Konvektionsgeschwindigkeit  $v$  über die Verknüpfung des temperaturabhängigen Koeffizienten der Oberflächenspannung  $\sigma_s$  mit der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  in z-Richtung, der dynamischen Viskosität  $\mu_s$  und dem Verhältnis Tiefe zu Breite des Schmelzbades bestimmt.

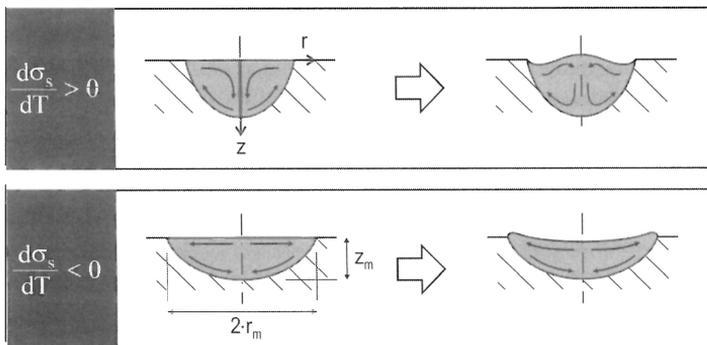


Bild 4.2 Schmelzbadströmungen beim Wärmeleitungsschweißen

Die thermisch induzierte Strömung innerhalb der flüssigen Phase, die sog. Marangoni-Stömung verformt über die Scherkräfte innerhalb der Schmelze einerseits die Schmelzbadoberfläche, andererseits wird dadurch auch die räumliche Ausdehnung des Schmelzbades im Werkstoff nachhaltig beeinflusst [6]. Ob die Strömungsrichtung zur Schmelzbadmitte hin oder entgegengesetzt nach außen zeigt, wird dabei ursächlich durch das Vorzeichen des Koeffizienten der Oberflächenspannung bestimmt, welcher unmittelbar mit den Legierungsbestandteilen des Werkstoffs zusammenhängt. Durch den in **Bild 4.2** dargestellten Vergleich der Ausprägung der Schmelzbadgeometrie läßt sich der Einfluß des Vorzeichens im Gradienten qualitativ abschätzen [4, 100]<sup>1</sup>. Während bei einem positiven Gradienten die Schmelzbadtiefe im Vergleich zur Breite stärker zunimmt, kehrt sich dieses Verhältnis für negative Gradienten um. In beiden Fällen kann jedoch von einer deutlichen Wölbung der Schmelzbadoberfläche ausgegangen werden. Der sich dadurch bzgl. der Ausbreitungsrichtung ergebende Anstellwinkel zwischen der einfallenden Laserstrahlung und der Schmelzbadoberfläche sorgt über die Mechanismen der Fresnel-Absorption [32] für eine erhöhte Einkopplung der Laserleistung.

#### 4.1.3 Einschweißphase

Mit dem Erreichen der Verdampfungstemperatur  $T_V$  an der Schmelzbadoberfläche werden verstärkt Metallatome aus der Schmelze herausgelöst, die dann unmittelbar als Metaldampf in die Atmosphäre austreten.

$$p_{\text{rec}} = 1,79 \cdot \sqrt{\frac{\kappa \cdot T_V}{m_A}} \cdot \frac{\rho_s \cdot \alpha \cdot I_0}{\Delta H_s + (2,23 \cdot \rho \cdot R_G \cdot T_V / M)} \quad (\text{Gl. 4.4})$$

In [101] werden die Prozesse der Verdampfung u.a. mit dem Modell der Knudsen-Schicht beschrieben. Aus der bewegten Masse  $m_A$  der Metallatome, die aus der Metallschmelze der Dichte  $\rho$  nach oben in die Umgebungsatmosphäre abströmen, resultiert über das Momentengleichgewicht ein Rückstoßdruck  $p_{\text{rec}}$  (recoil pressure) auf die Schmelzbadoberfläche. Die analytische Berechnung kann unter Berücksichtigung der sog. Sublimationsenthalpie  $\Delta H_s$ , nach (Gl. 4.4) erfolgen [101]. Durch den sich oberhalb der Wechselwirkungszone entsprechend der absorbierten Leistungsdichte, einstellenden Dampfdruck, wird das Schmelzbad in z-Richtung stark verformt. An den dadurch zunehmend steiler stehenden Schmelzbadrändern wird die Laserleistung vielfach reflektiert und die Einkopplung der Laserleistung in den Werk-

<sup>1</sup> Für eine explizite Diskussion sei auf die angeführten Literaturquellen verwiesen, wo u.a. auch der Sonderfall eines sich mit zunehmender Temperatur änderndes Vorzeichen im Gradienten der Oberflächenspannung vorgestellt wird.

stoff erhöht. In [32, 99] wird diese durch Selbstfokussierung gesteigerte Absorption  $\alpha^*$  gemäß (Gl. 4.5) über ein Kegelmodell berechnet, das annähernd der Geometrie der deformierten Schmelzbadoberfläche entspricht.

$$\alpha^* = \alpha \cdot \frac{1 + (1 - \alpha) \cdot (r/z - (r/z)^2)}{\alpha \cdot (1 - (r/z)) + r/z} \quad (\text{Gl. 4.5})$$

Da die Wechselwirkung zwischen Nd:YAG-Laserstrahlung und Metaldampf, in Form der Entstehung eines laserinduzierten Schweißplasmas, innerhalb der für das Mikro-Punktschweißen gebräuchlichen Leistungsdichten vernachlässigt werden kann [2, 13], erhöht nur das über die Deformationstiefe proportional anwachsende Schachtverhältnis von Schmelzkraterradius zu Einschweißtiefe den Wirkungsgrad der Energieübertragung<sup>1</sup>. Dementsprechend wird im weiteren Prozeßfortschritt auch nicht von einer Abschirmung der Werkstoffoberfläche vor der Laserstrahlung durch eine hochdichte, ionisierte Metaldampfatmosfera ausgegangen.

#### 4.1.4 Tiefschweißphase

Unter der Voraussetzung einer für den Werkstoff ausreichenden hohen Schwell-Leistungsdichte auf der Oberfläche überschreitet die pro Zeiteinheit eingekoppelte Laserenergie pro Flächenelement deutlich die durch stationäre und konvektive Wärmeleitung innerhalb der Schmelze abtransportierte Wärmemenge. Durch den unverzüglich entstehenden großen Wärmestau kann der Rückstoßdruck bei Erreichen einer kritischen Schachtiefe innerhalb der Schmelzzone eine Dampfkapillare, das sog. „keyhole“ oder Stichloch erzeugen.

Im Schmelzbadzentrum wird die Laserenergie fast vollständig in die Kapillare eingekoppelt, wodurch sehr große, lokal stark begrenzte Temperaturgradienten entstehen und die lokale Metaldampfdichte deutlich zunimmt. In der Folge wächst die Einschweißtiefe in einem engen Bereich um die Strahlachse schnell an. Da die Propagationsgeschwindigkeiten der Keyholefront durch den Werkstoff im Bereich von mehreren Metern pro Sekunde liegen, stellt die Tiefschweißphase sehr hohe Anforderungen an die Prozeßbeherrschung. Insbesondere die Vermeidung einer vollständigen Durchdringung des Werkstoffes, das sog. Durchschweißen beider Fügepartner an der Überlappstoßverbindung, bedarf einer optimalen Wahl der Prozeßparameter.

<sup>1</sup> Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß für die Nd:YAG-Schweißbearbeitung die Frage, ob neben der Fresnel- bzw. Wandabsorption auch durch Plasmaabsorption große Teile der Laserleistung in die Oberfläche der Dampfkapillare eingekoppelt werden noch nicht abschließend beantwortet ist. Für die weiteren Untersuchungen innerhalb dieser Arbeit wird jedoch nur von Mechanismen der Vielfachreflexion ausgegangen.

In [4] durchgeführte Messungen an online zum Mikro-Punktschweißprozeß aufgezeichneten Videosequenzen ergaben während der Tiefschweißphase für Laserstrahl-Fokusbmessungen  $2 \cdot w_F > 0,1 \text{ mm}$  und mittleren Leistungsdichten von  $I_0 \approx 6 \times 10^5 \text{ W/cm}^2$  einen Durchmesser des Keyholes an der Oberfläche von  $2 \cdot r_K \approx 0,1 \text{ mm}$ . Um diesen Schmelzkanal zu stabilisieren, muß der an den steil stehenden Schmelzbadflanken abströmende Metalldampf sowohl gegen die Oberflächenspannung der Schmelze als auch gegen deren hydrostatischen Druck arbeiten. Die sich daraus ergebenden radialen und azimutalen Schwingungen an der Keyholewand bewegen sich im Bereich von ca. 3 - 9 kHz [76] und stehen in direktem Zusammenhang sowohl mit der Einschweißtiefe [102] als auch mit den Anlagenparametern.

## 4.2 Experimentelle Verifikation des Prozeßmodells

Nach der theoretischen Formulierung des Prozeßmodells sollen im folgenden Abschnitt die Vorbetrachtungen durch schweißtechnische Experimente mit der oben vorgestellten Anlagentechnik und Meßtechnik verifiziert bzw. erweitert werden. Sinngemäß wird eine auf Basis der bekannten Prozeßstadien Aufheizen, Aufschmelzen, Einschweißen und Tiefschweißen durchgeführte Analyse der Signaldaten im Vordergrund stehen. Die eingehende Untersuchung der einzelnen Prozeßsignale hinsichtlich einer signifikanten Identifikation und Charakterisierung der einzelnen Stadien rechtfertigt im weiteren Verlauf alle weiteren Schritte zur Konzeption und Implementierung der anvisierten Kontrollstrategien. Besondere Aufmerksamkeit wird dabei sowohl auf die Detektoren zur Erfassung der primären Reflexionsstrahlung als auch auf den Metalldampf-Detektor gelegt.

Experimentelle Grundlage für die folgenden Betrachtungen stellt die Auswertung von Prozeßsignalen an Einzelpunkt-Überlappschweißverbindungen dar, die unter Umgebungsatmosphäre gefertigt wurden. Die Betrachtungen werden sich dabei auf die Verwendung von  $s = 0,4 \text{ mm}$  starken Edelstahlblechen aus X5CrNi1810 (Werkstoffnummer: 1.4301) konzentrieren.

### 4.2.1 Versuchseinrichtung

Die im folgenden Abschnitt vorgestellte Anlagentechnik wurde im Rahmen des Brite-Euram Projekts MAIL<sup>1</sup> spezifiziert bzw. entwickelt. Speziell die konstruktive Gestaltung des Bearbeitungskopfes durch die Fa. LASAG AG und die damit verbundene Auslegung des Strahlengangs sind für den weiteren Verlauf der Arbeit von Bedeu-

<sup>1</sup> BE95-1517: „Multi Sensor Assisted Intelligent Laser Processing“ (1995-1998)

tung. Sowohl die experimentelle Überprüfung des Prozeßmodells als auch die daran anschließenden Strategien zur Prozeßkontrolle basieren vollständig auf dieser spezifischen Systemtechnik.

## Laseranlage

Als Strahlquelle wurde ein fasergekoppelter, gepulster (pw) Nd:YAG Festkörperlaser der Fa. HAAS-Laser GmbH, mit einer mittleren Leistung von 50 W eingesetzt<sup>1</sup>. Die Auswahl der jeweiligen Pulsleistung wird bei diesem Gerät direkt über die Einstellung der Blitzlampenspannung und der Pulslänge erreicht.

Die Pulsform besitzt ein nicht veränderbares rechteckiges Profil. Über die frei einstellbaren Pulslängen zwischen 0,2 und 10 ms lassen sich maximale Pulsleistungen von  $P_H = 4000 \text{ W}$  bzw. maximale Pulsenergien von  $Q = 37 \text{ J}$  erzeugen.

Über eine digitale Ein-/Ausgangskarte innerhalb der Steuerung des Laseraggregats können die Laserpulse extern, durch z.B. einen PC basierten Leitrechner ausgelöst werden.

## Strahlführung und Prozeßdiagnostik

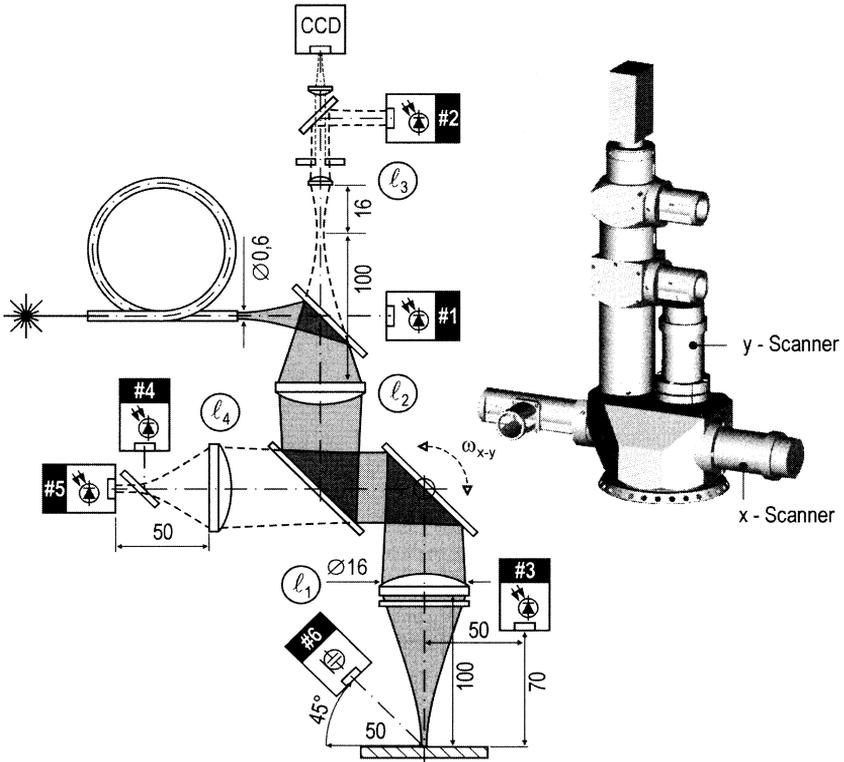
Die in **Bild 4.3** dargestellte Konstruktion des Multi-Sensor-Bearbeitungskopfes verfolgte neben der Festlegung der Optik zur Führung des Arbeitsstrahls auch eine effektive und robuste Erfassung der von der Werkstückoberfläche direkt reflektierten Prozeßstrahlung (Onaxis-Reflexion). Bei der folgenden Beschreibung der einzelnen optischen Komponenten wird daher zwischen den beiden Ausbreitungsrichtungen Arbeitsstrahlengang (Ausbreitungsrichtung: Laser → Werkstück = grauer Bereich) und Reflexionsstrahlengang (Ausbreitungsrichtung: Werkstück → Diagnostik = gestrichelte Linien) unterschieden.

Prinzipiell bildet die Bearbeitungsoptik das freie Faserende eines an den Laserresonator gekoppelten Stufenindex-Lichtwellenleiters (LWL)<sup>2</sup> über zwei Achromaten der Brennweite  $f = 100 \text{ mm}$  zur Kollimation ( $\ell_1$ ) und Fokussierung ( $\ell_2$ ) im Abbildungsverhältnis 1:1 auf die Werkstückoberfläche ab. Die Trennung zwischen Arbeitsstrahl und Diagnostik wird dabei durch zwei im Winkel von  $45^\circ$  zur Ausbreitungsrichtung installierte, chromatische Umlenkspiegel erreicht. Der am Faserende montierte Strahlteiler erlaubt, einerseits geringe Anteile der abgegebenen Laserleistung zu erfassen (Detektor #1), andererseits transmittiert er die in die Schweißoptik reflektierte Primärstrahlung, die dann kollimiert ( $\ell_3$ ) und auf den Onaxis-Sensor (Detektor #2) abgebildet wird. Durch seine Nd:YAG-Reflex Oberfläche selektiert der zweite Strahlteiler vor der Sammellinse ( $\ell_4$ ) ein breitbandiges Spektrum an Sekundärstrahlung, so daß sowohl kurzwelliges Metaldampfleuchten aufgezeichnet werden kann (Detektor #4) als

<sup>1</sup> HAAS-LASER, Typ LAY50 (modifiziert)

<sup>2</sup> HAAS-LASER, Typ LLK-C,  $l = 10 \text{ m}$ ,  $d_c = 0,6 \text{ mm}$ ,  $N.A. = 0,18$

auch die Erfassung von langwelliger Temperaturstrahlung über ein Quotienten-Pyrometer (Detektor #5) möglich ist.



*Bild 4.3 Multi-Sensor-Bearbeitungskopf*

Durch zusätzliche Sperr- und Bandfilter, die unmittelbar vor den einzelnen Sensoren angebracht werden, können die Wellenlängenbereiche aus der Prozeßstrahlung weiter differenziert bzw. isoliert werden. Die Auswahl sowohl der Detektoren als auch der jeweiligen Wellenlängen erfolgte dabei in erster Linie durch die Ergebnisse der in **Abschnitt 2.2.4** untersuchten Quellen. In **Tabelle 4.1** werden die eingesetzten Detektoren bzgl. ihrer Position und der konfigurierten Spektralbereiche  $\lambda_F$  benannt und aufgelistet.

Der Metalldampf-Detektor kann alternativ auch durch einen PSD-Sensor (position sensitive device) ersetzt werden, wodurch neben der Leuchtintensität des Metalldampfes auch die Auswertung der Orientierung der Leuchtfackel bzgl. der Blechebene ermöglicht wird. Im Rahmen der in diesem Kapitel durchgeführten Signal-

analysen wird allerdings ausschließlich die Leuchtintensität untersucht. Der außerhalb des Schweißkopfes installierte Detektor zur Erfassung der Streustrahlung (Detektor #3) sowie ein zusätzlich montiertes Luftschall-Mikrofon<sup>1</sup> (Detektor #6) sind mechanisch fest mit dem Gehäuse verbunden, wobei vor die Detektorfläche des Offaxis-Detektors keine zusätzliche Abbildungsoptik montiert wird.

<b>#1</b>	<b>Laserpuls – Detektor</b>	<b>Si<sup>2</sup></b>	$\lambda_F = 1064$
<b>#2</b>	<b>Onaxis – Detektor</b>	<b>Si<sup>2</sup></b>	$\lambda_F = 1064$
<b>#3</b>	<b>Offaxis – Detektor</b>	<b>Si<sup>3</sup></b>	$\lambda_F = 1064$
<b>#4</b>	<b>Metaldampf – Detektor</b>	<b>Si<sup>2,4</sup></b>	$\lambda_F = [665 \dots 1064[$
<b>#5</b>	<b>Quotienten – Pyrometer</b>	<b>Ge/Si<sup>5</sup></b>	$\lambda_F = [400 \dots 665[ \wedge ]665 \dots 1800]$

*Tabelle 4.1 Spezifikation der optischen Prozeßsensoren*

Als weiteres Merkmal des Bearbeitungskopfes kann über die Kippwinkel  $\omega_{x,y}$  zweier Galvanometerspiegel<sup>6</sup>, die vor der Fokussierlinse positioniert sind, eine schnelle zweidimensionale Änderung der Strahlachsposition auf der Bearbeitungsebene erreicht werden. Bei Einsatz der Standard  $f = 100$  mm Fokussierlinse steht dadurch im Brennpunkt ein Scan-Bereich von ca.  $6 \times 6$  mm<sup>2</sup> zur Verfügung, innerhalb dessen sich der Brennfleck auf dem Werkstück nahezu radialsymmetrisch bzw. kreisförmig ausbildet. Durch den alternativen Einsatz einer  $f = 100$  mm Planfeldoptik<sup>7</sup> kann die maximal erreichbare Bearbeitungsfläche auf ca.  $60 \times 60$  mm<sup>2</sup> erweitert werden. Die in die Strahlachse montierte CCD-Kamera inklusive einer davor montierten Vergrößerungsoptik ermöglicht in Verbindung mit einem für das Bauteilhandling eingesetzten kartesischen x-y Kreuztisch<sup>8</sup> eine schnelle Einstellung des Laserstrahlbrennflecks auf der Bauteiloberfläche. Entsprechend der Spezifikation der Kugelumlaufspindeln des Handhabungsgeräts wird eine Positioniergenauigkeit innerhalb der x-y Ebene von 0,01 mm erreicht.

Mit dem Ziel die Strahlqualität des vorgestellten Schweißsystems zu bestimmen, wurde der Rohstrahl eines im Dauerstrichbetrieb arbeitenden Nd:YAG-Lasers<sup>9</sup> in das Strahlführungssystem - bestehend aus LWL und Bearbeitungskopf - eingespiegelt. Die im Anschluß mit einem Hohnadel-Diagnostikgerät<sup>10</sup> vermessene Leistungsdichte

<sup>1</sup> SENNHEISER, Typ KE4-211

<sup>2</sup> SIEMENS, Typ BPX 61

<sup>3</sup> SIEMENS, Typ BPW 34 S

<sup>4</sup> PHILIPS, Eigenkonstruktion (PSD)

<sup>5</sup> JUDSON, Typ J16Si-5A4-R02M (Zweifarben - Detektor)

<sup>6</sup> CAMBRIDGE TECHNOLOGY, Typ 6450

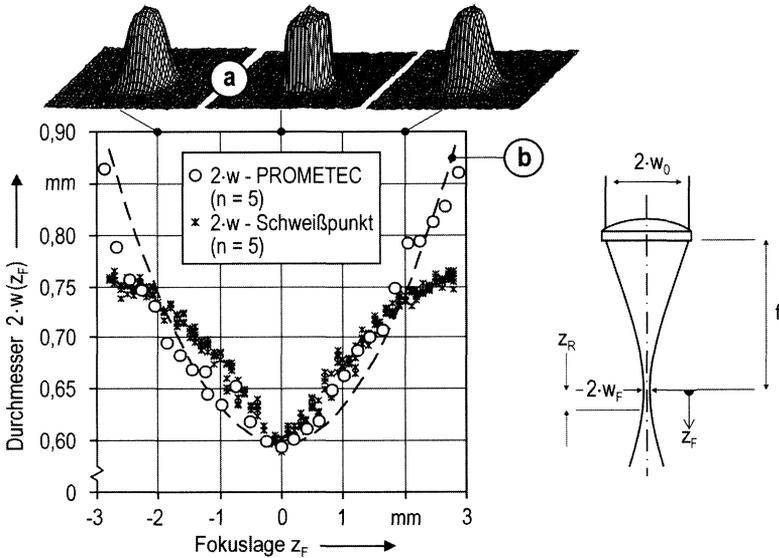
<sup>7</sup> RODENSTOCK, Typ F-Theta 4401-302-0000-21

<sup>8</sup> MICOS, Typ PS-770

<sup>9</sup> HAAS-LASER, Typ LAY1000D

<sup>10</sup> PROMETEC, Typ Laserscope UFF 100

und Strahlkaustik im Bereich der Fokallage repräsentiert die zu erwartende Strahlqualität bei Einsatz des gepulsten Lasers.



**Bild 4.4** Messung der Leistungsdichteverteilung und der Strahlkaustik

Die in **Bild 4.4** dargestellten Meßergebnisse wurden bei einer cw-Laserleistung  $P = 200 \text{ W}$  in Anlehnung an ISO/DIS 11146:1995 [103] koaxial zur optischen Achse durchgeführt und basieren pro Meßpunkt auf jeweils fünf Einzelmessungen. Im Fokus ( $z_F = 0$ ) zeigt sich für die Leistungsdichteverteilung (Punkt a) ein für fasergekoppelte Laser typisches steil flankiertes, radialsymmetrisches Tophat-Profil, das in gleicher Weise auch in [11] dokumentiert ist. Für anwachsende bzw. reduzierte Arbeitsabstände in Strahlachse ( $|z_F| > 0$ ) weist das I-Profil deutlich geringere Steigungen am Strahlrand auf. Die auf Basis einer hyperbolischen Anpassungsprozedur [103] durchgeführte Bestimmung der Propagationsparameter (Punkt b) bestätigt den erwarteten Durchmesser (86%) der Strahltaile  $2 \cdot w_F = 0,6 \text{ mm}$ .

$$w(z)^2 = w_0^2 + \frac{\lambda^2}{(K \cdot \pi \cdot w_0)^2} \cdot z^2 \tag{Gl. 4.6}$$

Die Rayleighlänge wird weiterhin mit  $z_R = 3,4 \text{ mm}$  bestimmt und der Strahlpropagationsfaktor berechnet sich zu  $K = 0,015$ . Diese Kenngrößen werden im weiteren Verlauf als numerische Grundlage für sämtliche Berechnungen, die auf der Strahl-

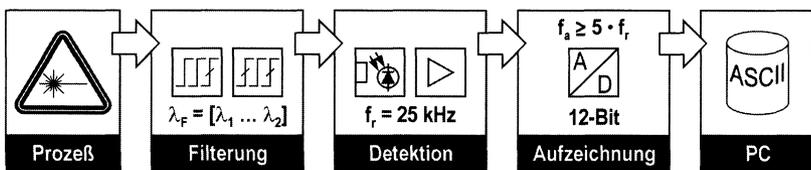
kaustik basieren herangezogen. Die Strahlausbreitung kann demzufolge, unter Verwendung von  $K$  und den bekannten Strahlparametern, gemäß (Gl. 4.6) beschrieben werden.

Um die Meßwerte mit dem Strahlverlauf des gepulsten Lasersystem zu überprüfen, wurden, in Analogie zu obigem Meßaufbau, Einzelpuls-Blindschweißungen an Edelstahlblech X5CrNi1810 bei Pulsenergien von  $Q = 1,8 \text{ J}$  durchgeführt. Durch eine daran angeschlossene optische Vermessung der geschweißten Oberflächendurchmesser läßt sich eine Übereinstimmung der Strahlausbreitung beider Systeme bestimmen, was die Meßwerte indirekt bestätigt und die Übertragung der Strahlparameter legitimiert.

## Signalverarbeitung

Die Spezifikation der Signalverarbeitung verfolgt das Ziel sowohl eine zweckmäßige Erfassung und Speicherung der aus der Bearbeitungszone abgestrahlten Prozeßinformationen zu erreichen als auch eine möglichst robuste Auswertung der Daten innerhalb der nachgeschalteten Diagnose- bzw. Kontrollebenen zu ermöglichen.

Durch die Darstellung in **Bild 4.5** soll die Systemkette zur Erfassung und Speicherung der optischen Prozeßdaten<sup>1</sup> dargestellt werden, die im Verlauf der folgenden Untersuchungen verwendet wird. Als zentraler Leitrechner für die Prozeßsteuerung wird ein Standard PC eingesetzt, auf dem sämtliche Stellsignale sowohl zur Pulsauslösung als auch Datenerfassung koordiniert werden. Die Softwarebasis stellt das Betriebssystem Windows NT<sup>®</sup>, unter dem in LabView<sup>®</sup> implementierte Bediener-schnittstellen den Informationsaustausch zwischen den einzelnen Systemmoduln ermöglichen.



*Bild 4.5 Systemkette zur Verarbeitung der optischen Prozeßsignale*

Die mit Beginn des Laserpulses von den einzelnen Detektoren aufgefangene Reflexionsstrahlung wird über optische Sperr- und Interferenzfilter bzgl. spezifischer Wellenlängenbereiche bzw. Spektren  $\lambda_F$  selektiert. Die direkte bzw. gerichtete Reflexion wird dabei durch den optischen Aufbau des Bearbeitungskopfes (siehe **Bild 4.3**) auf die einzelnen Onaxis-Detektorflächen abgebildet. Durch zusätz-

<sup>1</sup> Die Verarbeitung der akustischen Signale des eingesetzten Luftschall-Mikrofons erfolgt bzgl. Detektion und Aufzeichnung prinzipiell unter gleichen Bedingungen.

lich angebrachte Neutralfilter kann die Höhe des Photostromes bzgl. der an den einzelnen Detektoren individuell empfangenen Strahlungsenergie kalibriert werden.

Durch die Beschaltung der einzelnen Dioden mit einer externen Vorspannung und dem Einsatz von elektronischen Operationsverstärkern (OPA) wird eine gezielte Aufweitung des Meßbereichs bei gleichzeitiger Erhöhung der Empfindlichkeit erreicht. Die Messung der Dynamik der elektronisch verstärkten Sensoren ergab eine mittlere Anstiegszeit von  $t_r = 40 \mu\text{s}$  bzw. eine maximale Meßfrequenz von  $f_r = 25 \text{ kHz}$ , wodurch sich für die meßbaren Signalfrequenzen generell eine Tiefpaßbegrenzung von  $f_g = 12,5 \text{ kHz}$  einstellt.

Die in Abhängigkeit vom Prozeßverlauf modulierte Sensorspannung wird online von einer PCI-BUS 8-Kanal A/D-Wandlerkarte<sup>1</sup> aufgezeichnet. Die zeitdiskrete, äquidistante Abtastung der einzelnen Eingangskanäle erfolgt mit einer 12-Bit Auflösung. Vor dem Hintergrund der elektronischen Bandbegrenzung wurde die Abtastfrequenz bei allen Eingangskanälen auf  $f_a = 125 \text{ kHz}$  bzw.  $166 \text{ kHz}$  eingestellt [104], wodurch sich eine zeitliche Auflösung von  $8 \mu\text{s}$  bzw.  $6 \mu\text{s}$  pro Abtastung ergibt und damit die Gesamtanzahl  $N$  der aufgezeichneten Datenpunkte pro Schweißprozeß festgelegt wird. Ein zusätzlicher Anti-Aliasing-Filter wurde nicht installiert.

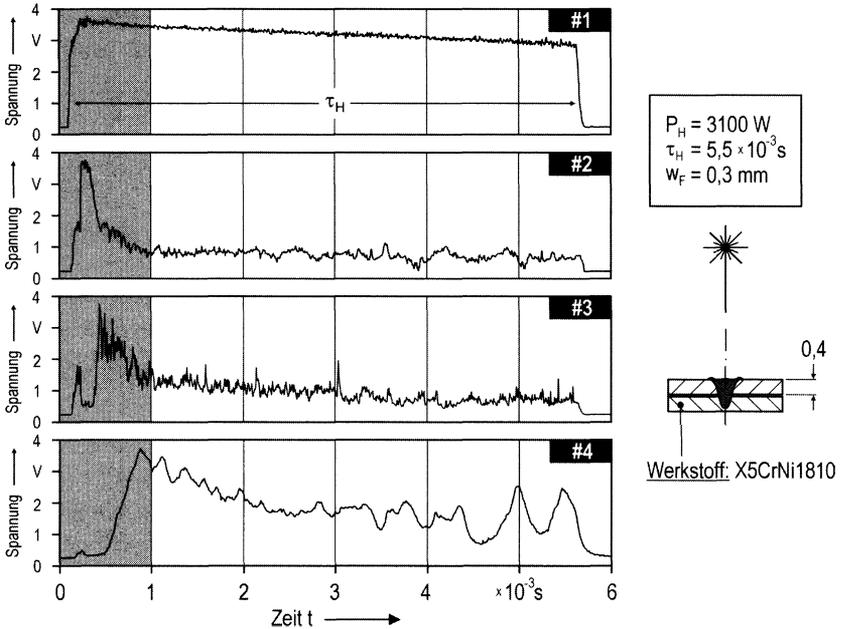
Jeder einzelne Laserpuls wird als separater Schweißprozeß betrachtet, so daß die in Abhängigkeit von der Pulsdauer zeitlich begrenzten Prozeßverläufe als jeweils gesonderter Meßvorgang bzw. Meßdatei (record) auf den Massenspeicher des Leitrechners abgespeichert wurden. Die erfaßten Meßdaten wurden dabei in Form einer ASCII-Spaltenmatrix  $M = [8 \times N]$  strukturiert. Eine schnelle und plattformunabhängige Sichtung bzw. Weiterverarbeitung der Prozeßdaten ist dadurch möglich.

#### 4.2.2 Detektion der Prozeßstadien

In **Bild 4.6** sind die Signalverläufe der Detektoren #1 - #4 für eine Einzelpunkt-Überlappschweißverbindung über die Pulsdauer  $\tau_H$  dargestellt. Die Betrachtung des Laserpuls-Signals (#1) läßt zwei wesentliche Eigenschaften des Pulsverlaufs erkennen: Die eingestellte Soll-Pulsleistung wird in Abhängigkeit der Blitzlampenspannung nach einer mittleren Anstiegszeit von ca.  $0,05 - 0,1 \text{ ms}$  erreicht. Weiterhin zeigt die zeitliche Entwicklung des Rechteck-Pulses, daß die vom Laser abgegebene Leistung über die Pulsdauer linear abnimmt. Die Ursache für diese Abnahme findet sich in der kapazitiven Entladung der Kondensatorspeicher, welche die Blitzlampen mit Spannung versorgen. In [12] wird diesbezüglich die Einhaltung einer 30%-Toleranz, bezogen auf die Pulsmaximalleistung gefordert, was durch den Signalverlauf dokumentiert werden kann. Eine Überwachung der aus der Faser abgegebenen Laserleistung, speziell der Puls-zu-Puls Stabilität [23] beim Mikro-Nachtschweißen, kann demzufolge durch den Laserpuls-Detektor prinzipiell erreicht werden. Weiterhin steht

<sup>1</sup> NATIONAL INSTRUMENTS, Typ PCI-MIO-16E-1

durch die aufgezeichnete Signalenergie  $E_S$  ein zur Pulsenergie äquivalenter Meßwert zur Verfügung, der einen Abgleich mit anderen Sensorsignalen bzw. eine generelle System-Kalibrierung ermöglicht.



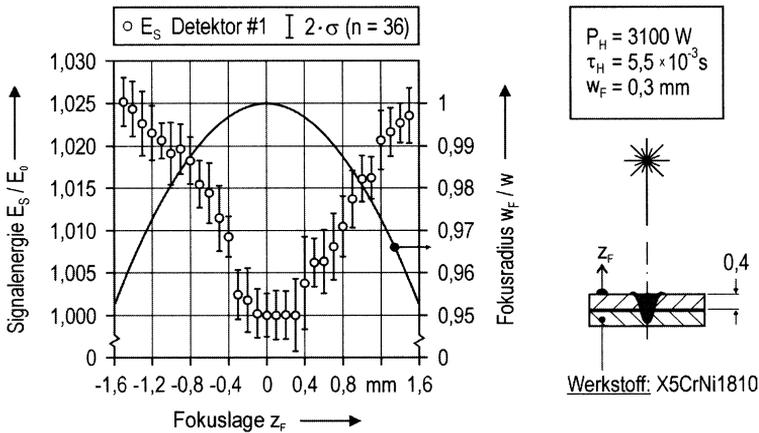
**Bild 4.6** Prozeßsignale für eine Einzelpunkt-Überlappschweißverbindung

Die Signalenergie wird dabei, in Anlehnung an (Gl. 2.1a), gemäß (Gl. 4.7) als Summe der über die Pulsdauer aufgezeichneten diskreten Signalspannungen bzw. N-Meßwerte repräsentiert [105].

$$E_S = \sum_{n=1}^N U_S[n] \quad (\text{Gl. 4.7})$$

Für die in **Bild 4.6** dargestellten Prozeßparameter zeigte eine vorangegangene Auswertung der Laserpuls-Signalenergie an 128 Einzel-Überlappschweißversuchen eine  $|3\sigma|$ -Stabilität von ca.  $\pm 1\%$ . Allerdings, eine durch Defokussierung des Arbeitsstrahls bewirkte Vergrößerung des Wirkflecks auf der Werkstückoberfläche von ca. 5%, wie in **Bild 4.7** dargestellt, zieht einen annähernd proportionalen Anstieg der mittleren Signalenergie des Detektors #1 um ca. 2,5% nach sich, der sich zu der statistischen Schwankung der Laserenergie addiert.

Für einen unfokussierten Arbeitsstrahl ist, gemäß des optischen Strahlengangs bei einer 1:1 Abbildung, der Durchmesser seines Reflexionsstrahls am Ort der Faserendfläche größer als  $d_C = 2 \cdot w_F$ . Die dadurch vorhandene, überschüssige Strahlungsleistung wird am metallischen Faserstecker zurück, in Richtung des Umlenkspiegels bzw. der Sensorfläche des Detektors #1, gespiegelt und überlagert sich mit der Arbeitsstrahlung, was zu einer meßbaren Erhöhung des Photostroms führt. Eine Vermeidung dieser Störung könnte entweder durch eine Anti-Reflexbeschichtung der Oberfläche des Fasersteckers erfolgen oder eine Signalauswertung kompensiert den Effekt durch geeignete Maßnahmen, z.B. durch eine Korrekturkennlinie. Um eine Erwärmung und dadurch mögliche Beschädigung der Faser zu vermeiden, wurde, mit Blick auf die untersuchten, teilweise hohen Pulsenergien auf eine Beschichtung des Fasersteckers verzichtet.



**Bild 4.7** Einfluß der Fokusslage auf die Signalenergie von Detektor #1

Der Blick auf die Signale der Onaxis- und Offaxis-Detektoren #2,3 in **Bild 4.6**, welche die primäre Reflexionsstrahlung aufzeichnen, zeigt, daß eine deutliche Modulation der Spannungsamplituden nur unmittelbar nach Pulsbeginn zu verzeichnen ist (grauer Bereich). Nach einer Prozeßzeit von ca. 1 ms oszillieren beide Signale bis zum Pulsende um einen relativ stationären Wert, was in **[4, 106]** als Indikator für eine vollständig ausgebildete Dampfkapillare beschrieben wird. Folgerichtig kann bei entsprechender Wahl der Pulsleistung die erste Millisekunde im Prozeßverlauf als typisches Zeitintervall angesehen werden, innerhalb dessen sich die Stadien Aufheizen, Einschweißen und Beginn des Tiefschweißens nacheinander einstellen.

Vor dem Hintergrund der präsentierten Prozeßphasen erfolgt jetzt eine detaillierte Untersuchung der Signalverläufe #2-4 im Zeitfenster  $t = [0 \dots 1 \times 10^{-3} \text{ s}]$ . Durch die in **Bild 4.8** dargestellten, übereinander gelegten Signalverläufe der Onaxis-, Offaxis- und Metaldampf-Detektoren #2,3,4 werden signifikante Merkmale, sog. „features“

erkannt. Mit dem Prozeßwissen über die Auswirkungen der einzelnen Prozeßphasen auf die Topologie der Schweißzone, können dann im weiteren Verlauf die ursächlichen Zusammenhänge zwischen den Prozeßstadien und den dazugehörigen spezifischen Signalcharakteristiken formuliert werden.

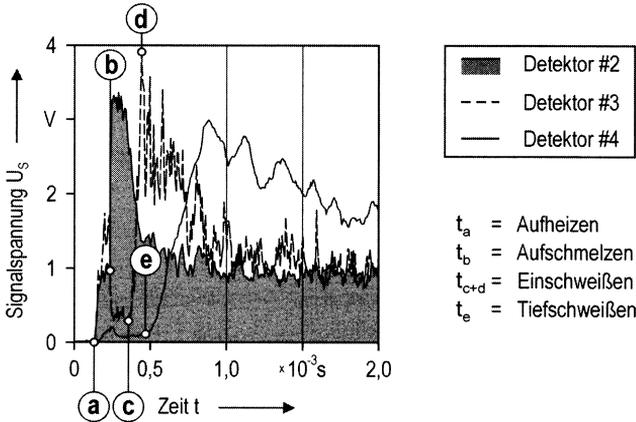


Bild 4.8 Identifikation der Prozeßphasen

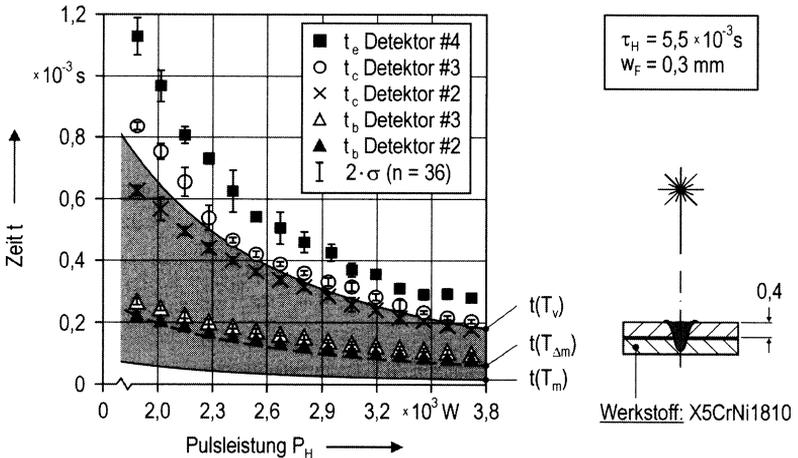


Bild 4.9 Zuordnung der Prozeßphasen

Die nach dem Beginn der Aufheizphase (Punkt a) erkennbaren Features spiegeln in zeitlicher Abfolge den beobachteten Prozeßverlauf wider. Werden die durch die Punkte b bis e markierten Zeitpunkte an einzelnen Schweißprozessen mit jeweils steigender Pulsleistung entnommen, kann in **Bild 4.9** für hohe Leistungswerte eine deutliche Reduzierung der entsprechend gemessenen Zeitintervalle festgestellt werden.

Durch eine gleichzeitige Darstellung der nach **(Gl. 4.1)** theoretisch berechneten Zeitpunkte für das Aufschmelzen ( $t_{T_m}$ ) bzw. Verdampfen ( $t_{T_v}$ ) der Blechoberfläche (grauer Bereich) können die Signalmerkmale in erster Näherung bereits den einzelnen bekannten Prozeßzuständen zugeordnet werden<sup>1</sup>. Nach Pulsbeginn folgen sowohl das Onaxis- als auch das Offaxis-Signal dem Anstieg der Laserleistung bis ein konstanter, vom normalen Absorptionsgrad des Festkörpers, bestimmter Grenzwert erreicht wird. Bei Überschreitung der für die Phasenumwandlung des Metallgitters benötigten Temperatur  $T_{\Delta m}$  aus **(Gl. 4.2)** tritt durch die aufgeschmolzene, eingebene Oberfläche eine instantane Verstärkung der in Strahlachse gerichteten Reflexion ein (Punkt b bzw.  $t_b$  Detektor #2). Die gleichzeitige Abschwächung des Offaxis-Signals auf ein Minimum ( $t_b$  Detektor #3) zeigt, daß in diesem Stadium von der Schweißzone praktisch keine Reflexionsstrahlung in den Raum gestreut wird. Die in **Bild 4.2** skizzierte Deformation der Schmelzbadoberfläche, welche sich durch die nach dem Aufschmelzen unmittelbar einsetzende Konvektionsströmung im Schmelzbad einstellt, reduziert die gerichtete Reflexionsstrahlung direkt nachdem das Amplitudenmaximum im Onaxis-Signal erreicht wurde.

Der Zeitpunkt einer starken Einkerbung der Schmelze, bedingt durch den sich bei Erreichen der Verdampfungstemperatur ausbildenden Rückstoßdruck, wird durch das rasche Ansteigen des Offaxis-Signals markiert ( $t_c$  Detektor #3). Dieses Verhalten basiert auf der Theorie, daß sich eine konkave Oberfläche bzgl. der Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls einstellt, welche die einfallende Arbeitsstrahlung vermehrt in Raumrichtung ablenkt. Die bereits vor diesem Zeitpunkt deutlich sichtbare Reduzierung der Amplitude des Onaxis-Signals ( $t_c$  Detektor #2) könnte allerdings ebenfalls ein Hinweis für den Beginn der Einschweißphase sein. Bemerkenswert ist, daß im Augenblick der beginnenden Verdampfung noch kein signifikanter Anstieg der Signalspannung des Metaldampf-Detektors registriert werden kann. Erst mit fortschreitender Ausbildung der Dampfkapillare steigt das Metaldampf-Signal sprunghaft an ( $t_e$  Detektor #4). Als Grund könnte die Metaldampfdichte innerhalb der Schweißkapillare genannt werden, die erst ab einem kritischen Grenz-Schachtverhältnis auszureichen scheint, um ein wahrnehmbares Prozeßbleuchten zu erzeugen. Verfolgt man jedoch über die weitere Pulsdauer den in **Bild 4.6** stetig abnehmenden Signalverlauf #4, so läßt sich feststellen, daß die an der Oberfläche gemessene Intensität des Metaldampfleuchtens mit fortschreitender Einschweißtiefe abnimmt. Die gleichzeitige Beobachtung, daß das Metaldampf-Signal in diesem Prozeßstadium verstärkt zu fluktuieren beginnt, stimmt mit den Ergebnissen von **[6]** überein.

<sup>1</sup> Die den Berechnungen zugrunde gelegten Kennwerte für den Werkstoff X5CrNi1810 finden sich in **Anhang B** tabelliert.

Innerhalb der im folgenden aufgezeigten Untersuchungen werden die einzelnen Signalmerkmale bzgl. ihrer Korrelation zu den Prozeßphasen überprüft. Dadurch soll eine eindeutige Zuordnung zu den betrachteten Prozeßstadien ermöglicht werden.

### Phase 1: Aufheizen

Während der Aufheizphase kann die Blechoberfläche als ebener Spiegel verstanden werden, der gemäß der optischen Absorption die vom Laser eingestrahlte Leistung teilweise in die Optik zurück reflektiert. Der auf dem Detektor #2 empfangene Reflexionsstrahl ist in diesem Stadium folglich direkt, ohne schmelzbad-geometrische Einflüsse, von der Leistungsdichte des Arbeitsstrahls abhängig. Ein Vergleich von analytischer Berechnung und Messung des Prozeßsignals in Abhängigkeit von der Leistungsdichte würde diese Behauptung unterstützen. In [12, 107] finden sich für diesen Fall Berechnungsbeispiele aus der geometrischen Optik. Die Beschreibung des Strahlverlaufs höherer Moden erfolgt dort mittels des sog. ABCD-Matrixformalismus. Danach breitet sich der Laserstrahl gemäß der Übertragungseigenschaften des durchlaufenen Mediums aus, das dementsprechend durch eine spezifische Übertragungsmatrix formal dargestellt werden kann.

Betrachtet man den Laserstrahl als reinen Gaußstrahl, so kann die Transformation des Strahlenbündels entlang seiner Ausbreitungsrichtung durch die Angabe von Strahlradius  $w$  und Krümmungsradius der Phasenfront  $R$  eindeutig bestimmt werden. Als Basis für die numerische Berechnung wird dabei der in (Gl. 4.8) gezeigte komplexe Strahlparameter  $q(z)$  bzw. dessen gebräuchlichere inverse Darstellung herangezogen. Diese zweikomponentige Bestimmungsgröße erlaubt die Berechnung der Strahldimensionen an jedem beliebigen Ort  $z$  innerhalb eines optischen Systems.

$$q(z) = z + i z_R \quad \longrightarrow \quad \frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R(z)} - i \frac{\lambda}{w(z)^2 \cdot \pi} \quad (\text{Gl. 4.8})$$

Durch die in (Gl. 4.9) beschriebene Verknüpfung mehrerer aufeinanderfolgender optischer Systeme bzw. charakteristischer Übertragungsmatrizen  $M_1 \dots M_i$  zu einer Gesamt-Übertragungsmatrix  $M_{\text{ges}}$  ist die rechnerische Transformation des Ausgangsstrahls  $q_1$  durch das Gesamtsystem möglich.

$$q_{i+1} = M_{\text{ges}} q_1 = M_i M_{i-1} \dots M_2 M_1 q_1 \quad (\text{Gl. 4.9})$$

Nimmt man dementsprechend für die Berechnung der Gesamt-Übertragungsmatrix die Matrizen der innerhalb des vorgestellten Strahlführungssystems verwendeten Einzelkomponenten als Grundlage, kann die Abbildung bzw. die Leistungsdichte des

Reflexionsstrahl auf dem Onaxis-Detektor für jede eingestellte Fokusslage<sup>1</sup> berechnet werden. Vergleicht man demnach die nach (Gl. 4.9) berechnete Strahlungsdichte auf dem Onaxis-Detektor bei einer Variation der Fokusslage mit der im Experiment tatsächlich gemessenen Signalspannung, so zeigt sich in Bild 4.10 eine deutlich erkennbare Übereinstimmung der Werte.

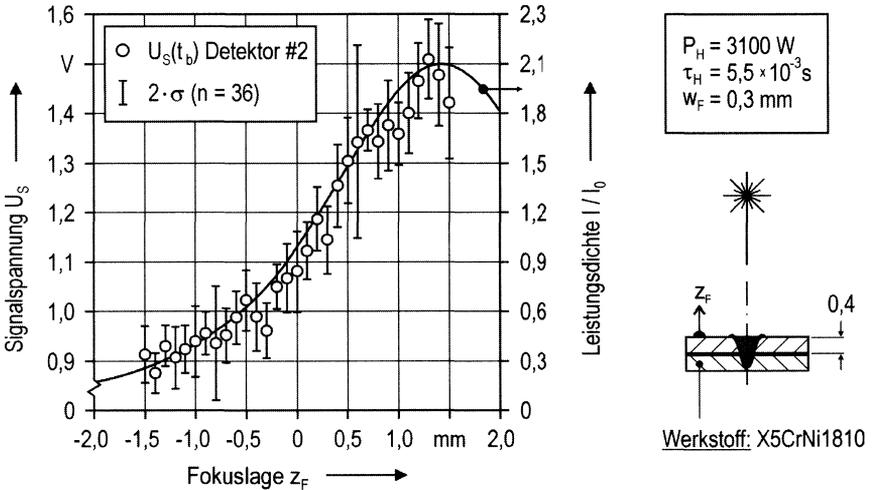


Bild 4.10 Signalspannung im Onaxis-Detektor bei Variation der Fokusslage

Mit diesem Ergebnis kann folglich die Vermutung bestätigt werden, daß die Blechoberfläche zum Zeitpunkt  $t_b$  eben ist und keine geometrische Deformation den Reflexionsstrahl beeinflußt.

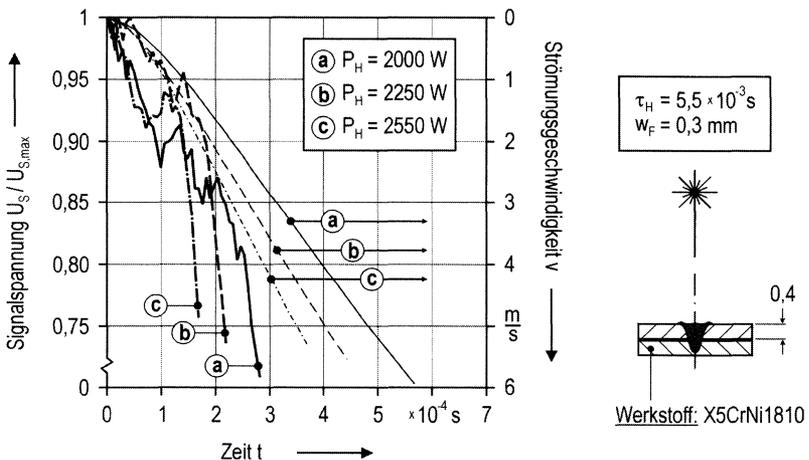
### Phase 2: Aufschmelzen

Mit dem Erreichen der zum Aufschmelzen der Blechoberfläche benötigten Wärmemenge beginnt sich eine Schmelzzone radial zur Laserstrahlachse in den Werkstoff auszubreiten. Im Vergleich zum Festkörper verhält sich die Schmelze an der Oberfläche in diesem Augenblick als annähernd eben, wodurch die Onaxis-Reflexion zu diesem Zeitpunkt ihre maximale Leistung aufweist. Die Amplitude des Onaxis-Maximums reagiert deshalb bzgl. einer Defokussierung des Arbeitsstrahls entsprechend des in Bild 4.10 dargestellten Ergebnisses.

Die schnelle Absenkung der Onaxis-Signalspannung nach dem Erreichen des Amplitudenmaximums kann durch die Berechnung der stationären Strömungsge-

<sup>1</sup> Die für die Berechnung der Strahltransformation spezifizierten Übertragungsmatrizen finden sich in Anhang C.

schwindigkeit innerhalb des Schmelzbades nachvollzogen werden. In **Bild 4.11** wird die Geschwindigkeit für drei unterschiedliche Pulseleistungen (a, b, c) gemäß **(Gl. 4.3)** berechnet und mit den im Experiment tatsächlich gemessenen Signalverläufen des Onaxis-Detektors #2 im Zeitintervall  $t = [t_b \dots t_c]$  verglichen. Nimmt man als Voraussetzung für die Betrachtungen an, daß sich bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten auch eine größere Deformation der Schmelzbadoberfläche zeigt, so stellt sich mit fortdauernder Bestrahlung und unter der Annahme, daß über die Zeitdauer der Untersuchung ein negativer Oberflächenspannungskoeffizient für den Versuchswerkstoff X5CrNi1810 vorherrscht eine zunehmend konkave Schmelzbadoberfläche ein. Der zentrale Reflexionsstrahl wird dadurch verstärkt in Raumrichtung abgelenkt bzw. gestreut, wodurch das Onaxis-Signal folglich proportional absinkt.



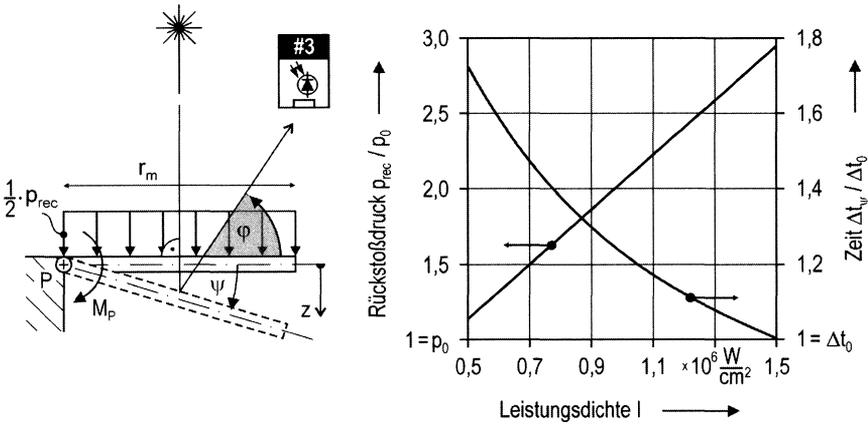
*Bild 4.11 Konvektionsströmung im Schmelzbad während der Aufschmelzphase*

Daß die analytisch berechneten Kurven von den realen Meßwerten abweichen, liegt zu großen Teilen in dem Mißverhältnis zwischen der theoretisch angenommenen rein stationären Strömung innerhalb des Schmelzbads und den hierbei ebenfalls auftretenden instationären Strömungsanteilen. Eine qualitative Interpretation der Onaxis-Signalverläufe kann dennoch erreicht werden, wodurch die Konvektionsströmung als wesentliche Ursache für die oben beschriebene Absenkung im Onaxis-Signal genannt werden kann.

### Phase 3: Einschweißen

Der sich bei Erreichen der Verdampfungstemperatur in der Einschweißphase aufbauende Rückstoßdruck  $p_{rec}$  aus **(Gl. 4.4)** kann als konstante Flächenlast verstanden werden, welche in z-Richtung auf die Schmelzbadoberfläche wirkt. In einer

modellhaften Darstellung, entsprechend **Bild 4.12**, läßt sich das Schmelzbad bzgl. der Laserstrahlachse symmetrisch teilen und die beiden Schmelzbadhälften auf jeweils eine ebene Scheibe reduzieren, die der Oberfläche und der Masse des halben Schmelzbadvolumens entsprechen<sup>1</sup>.



**Bild 4.12** Rückstoßdruck auf die Schmelzbadoberfläche

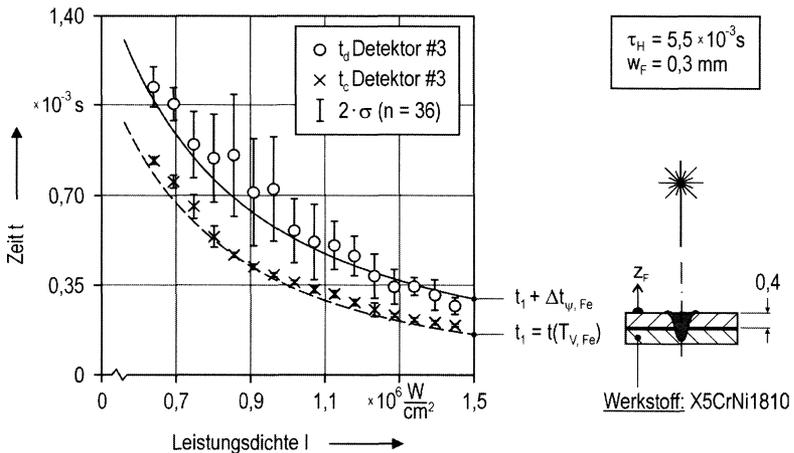
In der weiteren Modellierung wird nur eine Scheibe betrachtet und über ein Gelenk im Punkt P mit dem Festkörper verbunden. Durch den Rückstoßdruck zum Zeitpunkt  $t(T = T_v)$  wird die Scheibe um den Winkel  $\psi$  in z-Richtung ausgelenkt, so daß sich der direkte Reflexionswinkel  $\varphi$  für die einfallenden paraxialen Laserstrahlen proportional ändert.

$$\Delta t_{\psi} = 2 \cdot \sqrt{\frac{1}{3} \cdot \frac{m_s \cdot \psi}{p_{rec} \cdot r_m}} \quad ; \quad \text{mit: } \psi = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \quad (\text{Gl. 4.10})$$

Erwartet man die maximale Spannungsamplitude im Offaxis-Signal (Detektor #3) bei direkter Bestrahlung der Sensorfläche durch den Reflexionsstrahl, so kann gemäß **(Gl. 4.10)** die Zeit  $\Delta t_{\psi}$  berechnet werden, die vom Eintreten der Verdampfungstemperatur, was den Beginn der Metaldampfexpansion markiert, bis zum Erreichen des Maximums innerhalb der Offaxis-Spannungsamplitude verstreicht. Hierbei ist der direkte Reflexionswinkel durch die konstruktiven Abmaße am Schweißkopf fest vorgegeben (siehe **Bild 4.3**). Der in **Bild 4.12** dargestellte rechnerische Verlauf für den Werkstoff Fe zeigt, daß sich bei einer Erhöhung der Leistungsdichte von 0,5 auf

<sup>1</sup> Die grundsätzliche Herleitung der Berechnungsformel ist in **Anhang D** beschrieben.

$1,5 \times 10^6 \text{ W/cm}^2$  der Rückstoßdruck annähernd proportional auf den dreifachen Wert des Umgebungsdrucks  $p_0$  erhöht, während sich der theoretische Zeitraum bis zum Erreichen der Maximalamplitude in der Offaxis-Spannung dabei auf ca. die Hälfte reduziert. Nimmt man diese Ergebnisse für den unlegierten Werkstoff Fe<sup>1</sup> als quantitative Grundlage der Signalanalyse in **Bild 4.13**, so kann, trotz des Einsatzes von X5CrNi1810 als Versuchswerkstoff, eine verhältnismäßig gute Übereinstimmung mit den Meßwerten  $t_c$  und  $t_d$  im Offaxis-Signal beobachtet werden. Die Behauptung, daß der abrupte Anstieg der gestreuten Reflexionsstrahlung in Punkt c in **Bild 4.8** unmittelbar den Beginn der Einschweißphase anzeigt, kann mit diesem Ergebnis bestätigt werden.



**Bild 4.13** Zeitpunkt der Maximalamplitude im Offaxis-Signal vs. Leistungsdichte

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß innerhalb der durchgeführten Untersuchungen sowohl die Pulsleistung als auch die Fokusslage zur Beeinflussung der Leistungsdichte variiert wurden. Beide Parameter erbrachten die gleichen Meßergebnisse. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden allerdings nur die Werte auf Basis einer Veränderung der Pulsleistung dargestellt.

Ein weiterer Hinweis auf die Richtigkeit der Vermutung, daß der Offaxis-Detektor die Einschweißphase optisch erfaßt findet sich bei der Auswertung des gleichzeitig gemessenen Luftschall-Signals (#6) in **Bild 4.14**. Wie bereits in **Abschnitt 2.2.3** geschildert, sind die durch den Metalldampf erzeugten Druckschwankungen innerhalb der Umgebungsatmosphäre als hauptsächliche Signalquelle für die Luftschallmessung zu nennen. Bei Raumtemperatur beträgt die in einer Luftatmosphäre erreich-

<sup>1</sup> Die den Berechnungen zugrunde gelegten Kennwerte für den Werkstoff Fe finden sich in **Anhang B** tabelliert.

bare Schallgeschwindigkeit ca. 340 m/s. Geht man davon aus, daß mit Beginn der Metaldampfexpansion der Schallpegel abrupt ansteigt [6], muß dieser Zeitpunkt durch eine deutliche Anhebung der Signalamplitude von Detektor #6 erkennbar sein. Unter Berücksichtigung des Abstands zwischen dem Luftschall-Mikrofon und der Bearbeitungszone (siehe Bild 4.3), errechnet sich zwischen der beginnenden Expansion des Metaldampfes (Punkt c) und dem ersten Spannungsanstieg im Schallsignal eine Signalverzögerung von  $\Delta t \approx 0,15$  ms, was mit dem experimentell meßbaren Wert übereinstimmt.

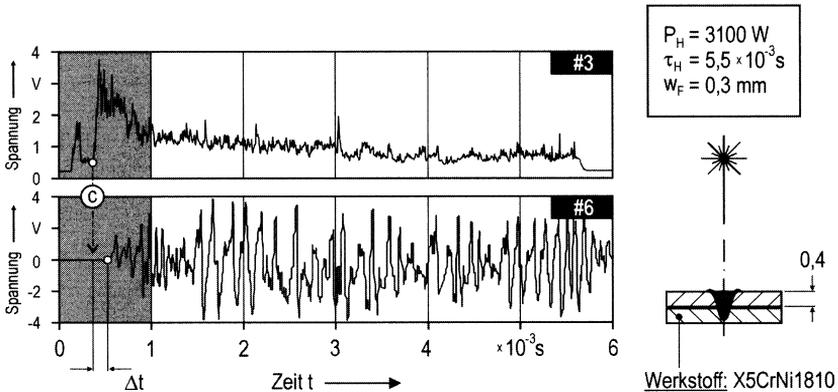


Bild 4.14 Beginn des Schallsignals nach dem Erreichen der Einschweißphase

### Phase 4: Tiefschweißen

Mit der Ausbildung eines in z-Richtung anwachsenden Keyholes bestimmen zunehmend dynamische Effekte der Schmelzbadströmung innerhalb der Dampfkapillare die Signalantworten. So wirken sich z.B. die Moden und Intensität der möglichen Schwingungsformen in der Kapillarwand [77] direkt auf die im Onaxis-Signal sichtbaren Fluktuationen aus. Um eindeutige Aussagen über die Ursachen der gemessenen Signalschwankungen zu erreichen, wird der Signalverlauf von Detektor #2 mit einem Verfahren der Zeitreihenanalyse untersucht. Eine in Anlehnung an [102, 108] durchgeführte Berechnung<sup>1</sup> der sog. Zif – Lempel – Komplexität (ZLK) des Onaxis-Signals ermöglicht die Bestimmung eines von der Signalamplitude unabhängigen Entropiemaßes anhand des untersuchten Signalverlaufs. In Bild 4.15 wird auf Basis der Onaxis-Reflexion der Verlauf der berechneten ZL-Komplexität an einer Einzelpunkt-Überlappschweißverbindung dargestellt.

<sup>1</sup> Da zu einem späteren Zeitpunkt erneut auf die ZLK-Analyse zurückgegriffen wird, sei für eine weiterführende Beschreibung auch auf Kapitel 7 verwiesen.

Der implementierte ZLK-Algorithmus basiert dabei auf dem arithmetischen Mittelwert eines über den Signalverlauf gleitenden Datenfensters mit einer Ausschnittsbreite von  $n = 101$  Signalwerten ( $2 \cdot \Delta t \approx 0,6$  ms), die symmetrisch zum jeweils betrachteten Zeitpunkt  $t_0$  angeordnet sind. Die Höhe der so berechneten Komplexität bzw. Entropie gibt unmittelbar Aufschluß über den zeitlichen Verlauf der Schwingungsdynamik innerhalb der Schweißzone. Deutlich zu erkennen ist, daß im Bereich von ca. 3,5 ms Prozeßzeit die Dynamik ein Minimum erreicht, was in [102] als Moment des Durchschweißens erkannt wird, da die Keyholewand in diesem Moment nur relativ stationäre Schwingungsmoden annehmen kann. Davon ausgehend, daß ein Maximum in der ZLK weiterhin für den Prozeßzustand des Wärmeleitungsschweißens auftritt [102], also auf ein Höchstmaß an Dynamik innerhalb der Schmelze hinweist, bestimmt der rasche Anstieg der Komplexität nach Durchschreiten des lokalen Minimums den Zeitpunkt, von dem an das untere Blech durch den einfallenden Laserstrahl erwärmt wird. Mit der ZLK-Analyse des Onaxis-Signals kann demnach der Durchschweißzeitpunkt  $t_f$  des oberen Blechs bzw. der Einschweißzeitpunkt des Gegenbleches bei einer Einzelpunkt-Überlappschweißverbindung erkannt werden. Es sei nun entsprechend dem Beispiel in **Bild 4.15** der Zeitbereich bis zum Durchschweißen des oberen Bleches betrachtet.

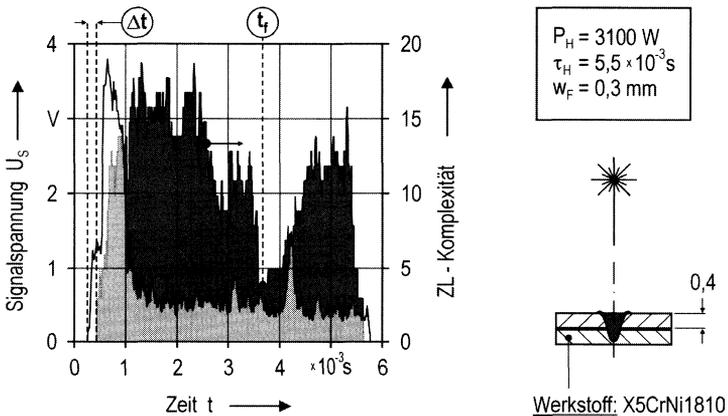


Bild 4.15 Zif-Lempel-Komplexität (ZLK) des Onaxis-Signals

Durch die fortschreitende Einschweißtiefe bzw. die sich in z-Richtung ausdehnende Dampfkapillare kann die Erhöhung des Absorptionsgrades gemäß des Kegelmodells (**Abschnitt 4.1**) berechnet werden. In **Bild 4.16** ist der direkte Vergleich der Onaxis-Signaldaten, im Zeitintervall  $t = [t_c \dots t_f] \approx 3$  ms, mit dem nach (**Gl. 4.5**) ermittelten Reflexionsgrad  $1 - \alpha^*$  (gestrichelte Linie) dargestellt. Als Randbedingung für die Berechnung von  $\alpha^*$  wurde dabei über das beobachtete Zeitintervall ein linearer Zuwachs der Einschweißtiefe von  $z = 0 \dots 0,4$  mm angenommen, wodurch die Modell-

rechnung einen etwas geringeren Gradienten als die Signaldaten aufweist. Weiterhin wurde der Durchmesser der Dampfkapillare gleich dem Fokaldurchmesser gesetzt.

Generell läßt sich in der ersten Hälfte des Zeitintervalls eine relativ gute Übereinstimmung der Werte feststellen, so daß qualitativ von einer nahezu konstanten Propagationsgeschwindigkeit in z-Richtung ausgegangen werden kann. Erst im daran anschließenden Prozeßverlauf zeigt sich, daß die experimentellen Signalwerte um einen relativ stationären Wert schwanken, während die Rechnung gegen eine vollständige Absorption der Strahlleistung konvergiert.

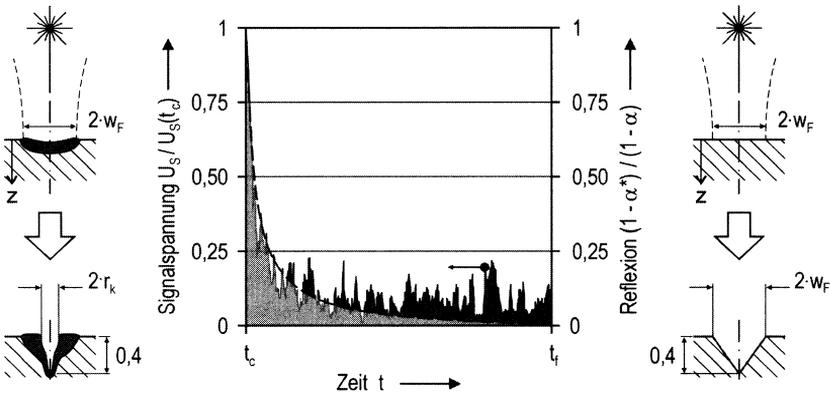


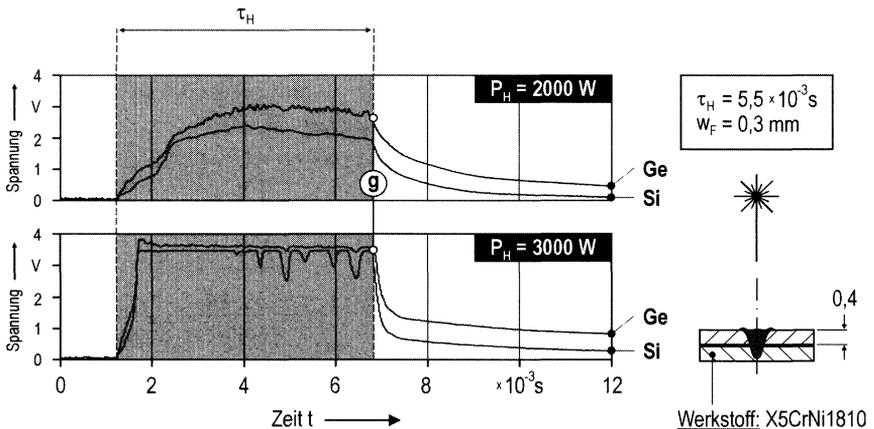
Bild 4.16 Strahl-Reflexion während der Tiefschweißphase

Dieses Ergebnis weist darauf hin, daß der tatsächliche Keyhole-Durchmesser  $2 \cdot r_k$  kleiner als der Fokaldurchmesser sein muß. An den überstehenden Rändern des Schmelzbades wird demgemäß ein annähernd konstanter Anteil der Laserleistung in Strahlrichtung reflektiert. Die detektierbaren Fluktuationen in der Signalspannung sind weiterhin direkt mit den Schwingungen in der Kapillarwand bzw. an der Schmelzbadoberfläche verknüpft.

### 4.2.3 Temperaturüberwachung

Die Installation des Quotienten-Pyrometers (Detektor #5) in Strahlachse ermöglicht innerhalb einer Fertigungslosgröße eine gut reproduzierbare Signalerfassung. Einerseits können dadurch Fehlpositionierungen bzgl. der Schweißzone vermieden werden, andererseits entspricht der Meßfleck immer der Größe des Strahldurchmessers auf der Werkstückoberfläche. Durch den Zweifarbandetektor, als technologische Basis, können Temperaturen auf der Werkstückoberfläche oberhalb ca.  $600^\circ\text{C}$  detektiert werden. Mit dem konstruktiven Aufbau in **Bild 4.3** wird die Nd:YAG freie

Temperaturstrahlung der gesamten Wechselwirkungszone auf die Sandwich-Diode aus Germanium (Ge) und Silizium (Si) abgebildet. Durch die koaxiale Konstellation kommt es, trotz der entsprechenden Sperrfilter, mit der Bildung eines Metaldampfleuchtens zu einer Überstrahlung des Temperatursignals. Insbesondere weist das Si-Signal entsprechend der spektralen Bandbreite der Leuchterscheinung starke Fluktuationen innerhalb der Meßwerte auf, die sich synchron zur Intensität des Metaldampf-Signals verhalten. Innerhalb dieses Zeitbereichs können die Meßwerte nicht mit der gegenwärtigen Werkstücktemperatur korreliert werden. Bei niedrigen Temperaturstrahlungen weisen die Diodenströme weiterhin ein deutlich geringeres Ansprechverhalten auf. Um dementsprechend den Meßbereich während der Erwärmung und Abkühlung der Schweißzone mit dem 12-Bit A/D-Wandler dennoch optimal aufzulösen, wird ein sog. Logarithmus-Verstärker eingesetzt [4]. Anhand der in **Bild 4.17** dargestellten Meßkurven für zwei unterschiedliche Pulsleistungen an Einzelpunkt-Überlappstoßverbindungen läßt sich der generelle Signalverlauf der beiden logarithmisch verstärkten Sensorsignale erkennen.



*Bild 4.17 Charakteristische Signale des Quotienten-Pyrometers*

Entsprechend der Forderung weisen die Signalverläufe am Pulsanfang und direkt nach Pulsende eine hohe Dynamik auf, was anhand des schnellen Ansprechverhaltens der beiden Spannungsamplituden erkennbar ist. In Abhängigkeit von der eingestellten Pulsleistung erreicht die Signalspannung der beiden Sensoren einen relativ stationären Maximalwert, der allerdings im Si-Signal bei höheren Pulsleistungen durch das Metaldampfleuchten erkennbar beeinflusst wird. Bei Pulsende fallen beide Signale entsprechend der abnehmenden Eigenstrahlungsleistung des Schmelzbades wieder ab. Bemerkenswert ist, daß die detektierte Restwärme im Schmelzbad deutlich durch die Breite des Schmelzbades an der Blechoberfläche bestimmt wird. In [109] wird diesbezüglich der Einfluß von Inert- bzw. Edelgasen auf die Schweißpunktgeometrie untersucht. Im Vergleich zu Prozessen an Umgebungsluft, die vor-

zugsweise durchgeführt werden [2], nimmt bei Einsatz von Stickstoff bzw. Argon als Arbeitsgase der Schweißpunktdurchmesser  $2 \cdot r_m$  an der Materialoberfläche deutlich zu. Demnach würde sich ein vergrößertes Schmelzbad in einer, bezogen auf das Pulsende, zeitlich späteren Abnahme des Ge-Signals ( $t = t_f$ ) zeigen.

Um aus den jeweiligen Signalspannungen eine explizite Temperaturinformation zu gewinnen, kann aus den Resonanzfrequenzen der Ge- ( $\lambda_1$ ) und Si-Diode ( $\lambda_2$ ) gemäß (Gl. 4.11) ein äquivalenter Temperaturwert ermittelt werden. Allerdings ist die analytische Berechnung nur für den Fall korrekt, wenn die Emissionsgrade der beobachteten Wellenlängenspektren über den gesamten betrachteten Temperaturbereich gleich sind [50, 53]. Durch den Korrekturwert K wird dabei die Meßtemperatur bzgl. der wahren bzw. der erwarteten Temperatur skaliert.

$$T(t) = \frac{h \cdot c}{k} \cdot \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right) \cdot \left[ \ln \left( K \cdot \frac{U_S(\text{Si}(t))}{U_S(\text{Ge}(t))} \cdot \left( \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^5 \right) \right]^{-1} \tag{Gl. 4.11}$$

Auf Basis der in Bild 4.17 gezeigten exemplarisch ausgewählten Signaldaten können dann entsprechende Temperaturwerte berechnet werden, die in Bild 4.18 für  $K = 4$  dargestellt sind.

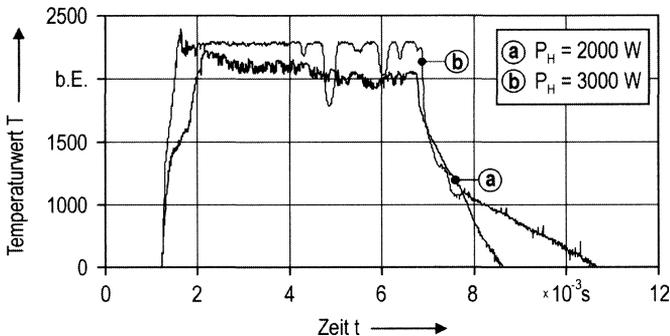


Bild 4.18 Berechnete Temperaturwerte

Es läßt sich in beiden Kurven der Fest-Flüssig Phasenübergang während der Erwärmung ausmachen, der durch einen Wendepunkt innerhalb der Anstiegs- bzw. Abstiegsflanken beider Temperaturverläufe gekennzeichnet wird. Eine höhere Pulsleistung (b) führt unmittelbar zu einer schnelleren Erwärmung ohne ausgeprägten Phasenübergang und, wie bereits in Bild 4.17 zu erkennen, im Verlauf der Tieferschweißphase zu einer Störung der Temperaturwerte aufgrund des starken Metaldampfleuchtens, das trotz der installierten Sperrfilter nicht vollständig ausgeblendet werden kann. Ein weiterer Störfaktor der Quotienten-Pyrometrie liegt in der Tatsache

begründet, daß sich die beiden betrachteten Emissionsgrade über die Prozeßzeit bzw. Prozeßtemperatur unterschiedlich verändern, so daß sich durch die integrale Messung die berechneten Temperaturwerte verfälschen. Besonders für geringe Pulsleistungen (a) weisen die deutlichen Fluktuationen innerhalb des berechneten Temperaturwerts auf Schmelzbadbewegungen innerhalb der Schweißzone hin, die aufgrund von Konvektionsströmungen zwischen den heißen, kurzwelligen und kalten, langwelligen Emissionsbereichen stattfinden. Daß der Temperaturwert für eine geringe Leistung über die Pulsdauer monoton absinkt, läßt sich dabei auf das stetige Anwachsen der Schweißpunktoberfläche zurückführen, wodurch mehr Wärme aus dem Schmelzbadzentrum abtransportiert wird. Das verstärkte Metaldampfleuchten für hohe Pulsleistungen erlaubt hier keine Beobachtung dieses Effekts. Nach Pulsende, also während der Abkühlphase, wird die gespeicherte Wärmeenergie aus der Schweißzone abgegeben, wodurch das Temperatursignal in beiden dargestellten Beispielen schnell abnimmt. Jedoch, für hohe Leistungen (b) kann kein deutlicher Hinweis auf eine theoretisch zu erwartende Haltezeit bzw. einen geänderten Temperaturgradienten durch die freiwerdende Kristallisationswärme erkannt werden.

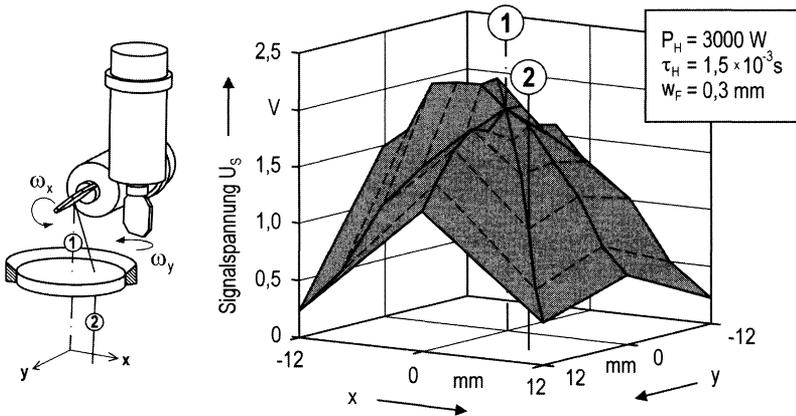
Aus den dargestellten Ergebnissen kann die Eignung der Temperaturmessung für geringe bis mittlere Leistungsdichten abgeleitet werden, wobei sich speziell die Prozeßphasen Aufheizen und Abkühlen gut identifizieren lassen.

#### 4.2.4 Erweiterung der Systemtechnik

In diesem Abschnitt soll sowohl die systemtechnische Erweiterung des Sca- bzw. Bearbeitungskopfes durch die optional einsetzbare Planfeldoptik (siehe **Abschnitt 4.2.1**) untersucht werden als auch eine Variation der Position bzw. des Detektionswinkels des Offaxis-Detektors bzgl. der Werkstückoberfläche.

#### Einsatz einer Planfeldoptik

Durch die Installation der F-Theta Linse kann der mit dem Laserstrahl erreichbare Bearbeitungsbereich im Vergleich zur Standard Fokussierlinse deutlich erweitert werden. Innerhalb dieser Arbeit wurde dafür ein nicht-telezentrisches Objektiv verwendet. Bei dieser Konfiguration fällt bei Auslenkung der Ablenkspiegel die Achse des Laserstrahls schräg auf die Bearbeitungsoberfläche, wodurch die gerichtete Reflexion in die Fokussieroptik entsprechend reduziert wird. Der quantitative Einfluß dieser Verzerrung auf die Signale der Prozeßdiagnostik ist deshalb von besonderem Interesse. In **Bild 4.19** ist die Auswirkung einer Auslenkung des Arbeitsstrahls auf die maximale Spannungsamplitude im Onaxis-Signal dargestellt. Dabei werden innerhalb einer Bearbeitungsebene der Abmessung  $24 \times 24 \text{ mm}^2$  Blindschweißungen an Edelstahlblech X5CrNi1810 durchgeführt, wobei die Positionierung des Arbeitsstrahls über die Kippwinkel der zwei Galvanometerspiegel erfolgt.



*Bild 4.19 Maximalamplitude im Onaxis-Signal bei Einsatz einer Planfeldoptik*

Deutlich zeigt sich der Einbruch in der Signalamplitude, wenn der Arbeitsstrahl aus der optischen Achse (1) in die x-y-Ebene, z.B. nach Position (2), abgelenkt wird. Die bzgl. der Linsenachse annähernd rotationsymmetrische Absenkung der Detektorspannung entspricht dabei dem Reflexionsverhalten des Arbeitsstrahls für eine nicht-senkrechte, zur Blechoberfläche angestellte Bestrahlung.

### Variation der Offaxis-Detektorposition

Die Position des Offaxis-Detektors bzgl. der Blechoberfläche besitzt wesentlichen Anteil an dessen Empfindlichkeit im Signalverhalten. Die quantitative Auswertung in **Bild 4.20** zeigt anhand von Blindschweißversuchen den Einfluß des Detektionswinkels sowohl auf die Signalenergie als auch auf die damit erreichbare Meßdynamik. Als Meßaufbau wurden in die Oberfläche einer metallischen Halbkugel mit Durchmesser  $\approx 200$  mm an definierter Stelle Faseraufnehmer für Stufenindex-LWL ( $d_c = 0,2$  mm) installiert. Eine bzgl. der Halbkugelmittle bzw. des Brennflecks exakte, annähernd kräftefreie Positionierung der einzelnen Offaxis-Detektoren wurde dadurch möglich. Die LWL führen dabei die von der Bearbeitungszone reflektierte Nd:YAG-Streuung zu separaten mit OPA beschalteten Detektoreinheiten. Aus konstruktiven Gründen wurde als Laserstrahlquelle innerhalb dieser Untersuchung ein gepulstes Nd:YAG System der Fa. HAAS-Laser GmbH mit freilaufendem Strahl eingesetzt. Bei einer maximalen Pulslänge von  $\tau_H = 2,0 \times 10^{-3}$  s können mit dem Lasersystem Pulsleistungen bis 5,0 kW erreicht werden.

Vergleicht man die Energiewerte für die unterschiedlichen Detektionswinkel, so läßt sich erkennen, daß mit flacheren Positionen die empfangene Signalenergie entsprechend abnimmt. Neben der durch das sog. „Lambert-cos Gesetz“ beschriebenen Winkelabhängigkeit der primären Reflexionsstrahlung während der Aufheizphase

reduziert insbesondere das während der Ein- und Tiefschweißphase anwachsende Schachtverhältnis des Keyholes die unter flachem Raumwinkel reflektierte Strahlungsleistung. Weiterhin muß bei kleineren Beobachtungswinkeln, für ein ausreichendes Signal-Rauschverhältnis, der Verstärkungsfaktor  $K$  der dazugehörigen Detektoren überproportional erhöht werden. Diese Maßnahme führt jedoch unweigerlich zu starken Einbußen bei der erreichbaren Meßdynamik, was für den Gebrauch als zusätzlicher Nachteil zu nennen ist.

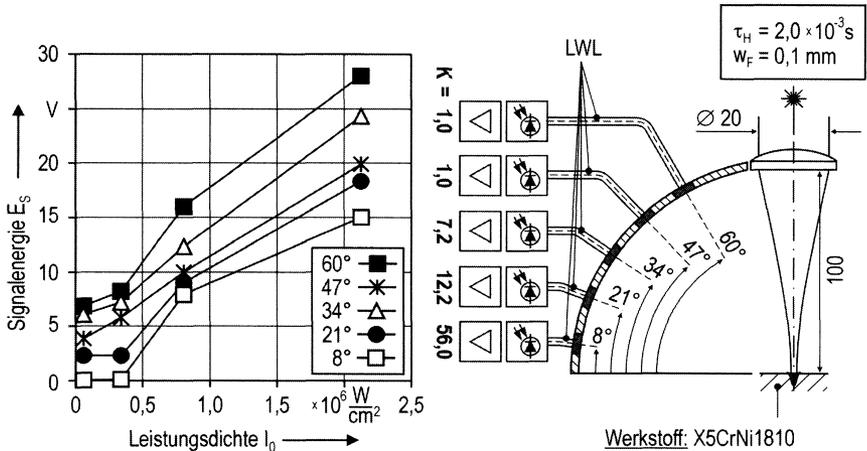


Bild 4.20 Offaxis-Signalenergie für unterschiedliche Detektionswinkel

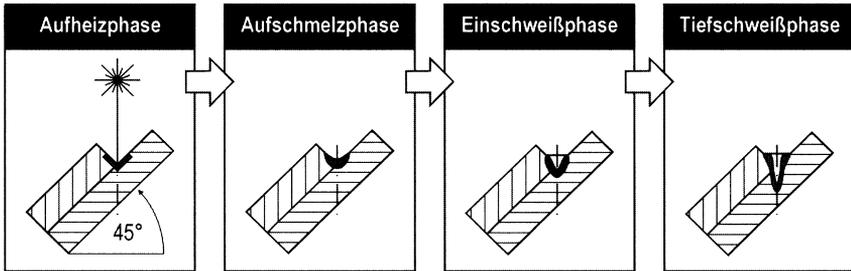
#### 4.2.5 Übertragung des Prozeßmodells auf die Kehlnaht

Insbesondere in der Feinwerktechnik und bei der schweißtechnischen Verbindung von Anschlußelementen elektronischer Bauteile mit der Leiterbahnstruktur, stellt die Applikation von Kehlnähten eine sinnvolle Fügegeometrie dar [4].

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurde keine explizite Untersuchung des zeitlichen Prozeßverlaufs an Kehlnaht-Einzelpunktschweißungen durchgeführt. Allerdings, bei der experimentellen Analyse von Prozeßsignalen aus Kehlnahtschweißungen zeigten sich Parallelen zur herkömmlichen Überlapp-Einzelpunktschweißung. Daß das Prozeßmodell für die Einzelpunkt-Überlappschweißverbindung auch für Kehlnahtprozesse Gültigkeit besitzt, kann anhand der Darstellung in Bild 4.21 skizziert werden, bei welcher der typische Prozeßverlauf für eine Kehlnahtschweißung unter 45° Einstrahlungswinkel dargestellt ist.

Mit Beginn der Aufschmelzphase nähert sich dort das Schmelzbad der Einzelpuls-Kehlnaht in Geometrie und Oberflächengestalt zunehmend der Ausprägung an, die

bei Einsatz des Einzelpunkt-Überlappstoßes auftritt (siehe **Bild 4.1**). Für die Auswertung des Reflexionsstrahls an der Kehlnaht bedeutet das, daß große Unterschiede in den Signalantworten zum Überlappstoß nur während der Aufheiz- und Aufschmelzphase zu erwarten sind. Vor diesem Hintergrund sind große Teile der Erkenntnisse, die im Verlauf der vorangestellten experimentellen Untersuchungen gewonnen wurden, auf den Kehlnahtprozeß übertragbar.



*Bild 4.21 Prozeßphasen an der Kehlnaht*

Bei direktem Vergleich der Prozeßstadien zeigt sich, daß die Phänomene grundsätzlich ähnlich ablaufen. Allerdings existieren dennoch Unterschiede, die bzgl. der Prozeßdiagnostik bzw. Merkmalextraktion zu beachten sind. Durch die Anstellung des Laserstrahls und den damit verbundenen Aufbau einer makroskopischen Strahlenfalle innerhalb des Stufensprungs ist der Wirkungsgrad der Einkopplung deutlich erhöht, wodurch sich die einzelnen Prozeßphasen generell schneller einstellen und sich die Zeitfenster für die damit verbundenen Signalmerkmale wesentlich kürzer ausprägen. Weiterhin wird innerhalb der Abschnitte Aufheizen und Aufschmelzen die Reflexionsstrahlung zum größten Teil in Raumrichtung gelenkt, wodurch sich der Phasenübergang Fest-Flüssig speziell in den Offaxis-Signalen (Detektor #3) erkennen läßt und dadurch beispielsweise Rückschlüsse auf die Strahlposition gezogen werden können [46].



## 5 Prozeßkontrolle durch Neuronale Netze

Innerhalb der betrieblichen Fertigung von elektronischen Baugruppen sind i.d.R. keine Laborzustände zu erwarten. Selbst unter der Voraussetzung optimaler Anlagen- und Werkzeugbedingungen bedeutet eine Signalerfassung innerhalb des Produktionsbereichs, per se mit verrauschten Datensätzen „leben zu müssen“. Konventionelle Methoden der Datenverarbeitung, wie z.B. die Beschreibung der Signalantworten durch explizite mathematische Funktionen, werden dadurch erschwert bzw. teilweise verhindert.

Eine Untersuchung der vielfältigen Einflußmöglichkeiten der Laser- und Umgebungsparameter auf die Prozeßsignale bzw. deren Wechselwirkungen am konkreten Anwendungsfall bedeutet weiterhin ein erhebliches Maß an Engineering. Sowohl der technologische als auch der wirtschaftliche Nutzen eines automatisierten Überwachungssystems hängt jedoch unmittelbar mit der Güte der Verbindung zwischen Signal und Prozeß zusammen. Aus Sicht des Praktikers wäre demnach der Einsatz eines Systems wünschenswert, daß einerseits fehlertolerant im Sinne der Datenbasis und andererseits flexibel bzgl. der Schweißanwendung ist.

Vor dem Anforderungsprofil komplexe, nicht-lineare Systeme ohne Expertenwissen (Black-Box-Prinzip) in zuverlässigen Transferfunktionen für eine Prozeßkontrolle abzubilden, stellen sich Künstliche Neuronale Netze (KNN) als eine geeignete Plattform dar. Das Prozeßwissen bzw. die Verknüpfung zwischen den Signaldaten (input) und der daraus abgeleiteten Prozeßbewertung (output) wird dabei nicht durch symbolische, logisch-explizite Repräsentationen modelliert, sondern implizit durch die Gesamtstruktur bzw. die Topologie des jeweiligen Netzwerkes wiedergegeben. Aus dem konnektionistischen Ansatz, die Information durch ein vielschichtiges Netzwerk aus linear kombinierten, getrennt voneinander arbeitenden Einheiten, sog. Neuronen, zu führen, resultiert die Möglichkeit, Abhängigkeiten in (fast) beliebiger Dimension zu modellieren. Daß dabei, im Vergleich zu analytisch-funktionalen Beschreibungen, die Lösung von einem KNN „nur“ approximiert wird, also keine präzise Zielwertermittlung stattfindet, erfüllt allerdings die Anforderungen bei rein klassifizierenden Aufgaben, wie z.B. die „Gut-“ und „Schlecht-“ Erkennung innerhalb der Qualitätskontrolle. Anhand der in **Abschnitt 2.2.4** vorgestellten Arbeiten zur Prozeßüberwachung beim

Laserschweißen ist zu bemerken, daß innerhalb der betrachteten Literaturquellen ein relativ einfaches „Feed-Forward-Netz“ auf Basis des „Back-Propagation-Algorithmus“ (BP) zur Lösung von Klassifikationsaufgaben bevorzugt wird. Innerhalb der folgenden Untersuchungen wird ebenfalls auf diesen Netztyp als Plattform zurückgegriffen. Auf eine umfassende, detaillierte Darstellung der Funktionsweise von Feed-Forward-Netzen, speziell der mathematischen Beschreibung, des sog. „überwachten“ BP-Lernvorgangs<sup>1</sup>, wird an dieser Stelle verzichtet. Statt dessen sei hier auf weiterführende Literaturquellen zu diesem Thema verwiesen [110, 111].

## 5.1 Konzept zur Verarbeitung der Prozeßdaten

Die in dieser Arbeit verfolgte Strategie zur Realisierung einer Prozeßkontrolle auf Basis eines Neuronales Netzes basiert prinzipiell auf der Idee, durch die gleichzeitige Verarbeitung von Signaldaten mehrerer Prozeßdetektoren eine zuverlässige Klassifikation der Schweißergebnisse zu erreichen [112]. Die verschiedenartigen Beobachtungsdetektoren werden zu einem redundanten Klassifikationskonzept zusammengeführt, das bei der Prozeßbeobachtung eine robuste Identifikation des Schweißergebnisses ermöglichen soll.

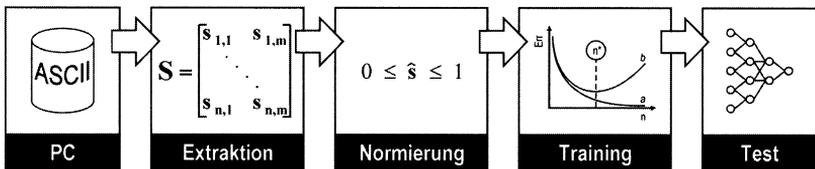


Bild 5.1 Konzept zum Aufbau des KNN-Klassifikators

Das in **Bild 5.1** dargestellte Konzept zur Verarbeitung der Signaldaten bzw. der Aufbau des KNN-Klassifikators knüpft direkt an die in **Abschnitt 4.2.1** spezifizierte Systemkette zur multisensoriellen Signalerfassung an. Die auf dem Leitrechner abgespeicherten Rohdatensätze werden demzufolge sukzessive einer automatischen Merkmalextraktion und anschließender Normierung unterzogen, um abschließend die eigentliche „Neuronale-Verarbeitung“ durchzuführen, die im wesentlichen durch das Training und die quantitative Bewertung der einzelnen Netzkonfigurationen charakterisiert ist.

<sup>1</sup> Es handelt sich dabei um eine iterative Optimierungsprozedur, die nach der Methode der Gradientensteigerung auf einer mehrdimensionalen Fehleroberfläche nach lokalen Minima sucht.

### 5.1.1 Extraktion der Signal-Features

Gemäß der spezifizierten Datenverarbeitung liegen die online aufgezeichneten Prozeßinformationen in Form einer  $8 \times N$  Spaltenmatrix vor, die in Abhängigkeit von der Abtastfrequenz ein Datenvolumen von  $N \approx 2000$  Datenpunkten (samples) pro Schweißversuch aufweist. Mit Blick auf eine vernünftige Dimensionierung der KNN bedarf es einer effektiven und sinnvollen Reduzierung dieser Datenmenge. Ziel ist es, durch eine geeignete Vorverarbeitung (pre-processing) der Rohdaten einerseits die nachgeschaltete Klassifikationsinstanz nicht zu überfordern, andererseits aber die aussagefähigen Informationsanteile innerhalb der Daten durch einen zu großen Grad an Abstraktion nicht zu verlieren bzw. zu verfälschen. An dieser Stelle sei die Vorverarbeitung als Extraktion definiert, deren primäre Aufgabe die Erzeugung von eindeutigen bzw. signifikanten Merkmalen innerhalb der Rohdaten ist.

Grundsätzlich lassen sich zwei Möglichkeiten erkennen, die für eine - i.S. des anvisierten Serieneinsatzes - automatisiert durchführbare, analytische Extraktion bzw. Merkmalgewinnung in Betracht kommen und deshalb im weiteren Verlauf der Untersuchungen Anwendung finden.

Bei der spezifischen Merkmalsextraktion werden anhand speziell für die Problemstellung entwickelter Algorithmen vorher definierte Signalmerkmale bestimmt, die an Stelle der Rohdaten dem KNN als Eingabe präsentiert werden. So lassen sich vor dem Hintergrund der aus dem Prozeßmodell in **Kapitel 4** bekannten Ergebnisse bereits geeignete Signal-Features erkennen, die für eine Implementierung von spezifischen Extraktionsalgorithmen an Einzelpunkt-Überlappschweißverbindungen in Betracht kommen und dadurch eine eindeutige Beurteilung des jeweiligen Prozeßzustandes zulassen. In [113] werden weiterhin heuristische Verfahren angeführt, die hauptsächlich nach intuitiven Gesichtspunkten operieren.

$$\vec{s} = \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_n \end{pmatrix} \longrightarrow \mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_{1,1} & \cdots & s_{1,m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n,1} & \cdots & s_{n,m} \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 5.1})$$

Im Gegensatz zur den spezifischen Verfahren werden bei der problem-unspezifischen Merkmalsextraktion die Rohdaten zwar ebenfalls durch Algorithmen umgewandelt, wobei die Art der Umwandlung allerdings nicht speziell dafür entwickelt wird. Beispielfhaft sind hier die Ermittlung von Frequenzkoeffizienten auf Basis der Diskreten-Fourier-Transformation (DFT) [114] genannt sowie die Darstellung der Signaldaten anhand abschnittsweise berechneter Summenwerte, was als sog. RMS-Verfahren (root-mean-square) verzeichnet ist [78, 92]. Sowohl die DF-Transformation als auch die RMS-Methode müssen, im Gegensatz zu den spezifischen Extraktionsverfahren, für den Einsatz an unterschiedlichen Schweißanwendungen bzw.

Schweißgeometrien nicht jeweils neu parametrisiert werden, wodurch sich diese Verfahren generell zur Anwendung anbieten.

Unabhängig von der Art der Extraktion können die aus einem Rohdatensatz errechneten Signal-Features  $s_1 \dots s_n$  gemäß (Gl. 5.1) zu einem  $n$ -dimensionalen Spaltenvektor, dem sog. Merkmalvektor  $\bar{s}$  zusammengefaßt werden [113]. Für einen Umfang von  $m$  Schweißversuchen läßt sich daraus eine charakteristische Merkmalmatrix  $S$  der Dimension  $n \times m$  ableiten, die eine strukturierte Ausgangsbasis für die Eingabe der Prozeßinformationen in das KNN darstellt.

### 5.1.2 Normierung der Signal-Features

Nach der Extraktion können die Wertebereiche der Signalmerkmale noch stark voneinander abweichen. In [115] wird deshalb eine Normierung der KNN-Eingangsdaten empfohlen, um zu verhindern, daß durch große Unterschiede in den einzelnen Eingaben einzelne Verbindungsgewichte zwischen den Neuronen bereits am Anfang des Netztrainings „übersättigt“ werden und der Lernprozeß dadurch gestört wird. Aus diesem Grund werden die einzelnen Komponenten der Merkmalvektoren innerhalb der dazugehörigen  $m$ -Zeilen der Merkmalmatrix auf Einheitslänge bzgl. des Maximalwertes normiert (siehe (Gl. 5.2)) [116].

$$\hat{s}_{j,k} = \frac{s_{j,k}}{\max(S_{j,1\dots m})} \quad \longrightarrow \quad 0 \leq \hat{s}_{j,k} \leq 1 \quad (\text{Gl. 5.2})$$

Die dadurch neu erzeugten, normierten Merkmale sind innerhalb ihrer Merkmalklasse  $j = 1, \dots, n$  sämtlich auf das Einheitsintervall  $0 \dots 1$  definiert, ohne daß dabei, wie in [113] gefordert, Informationen von unterschiedlichen Merkmalklassen miteinander kombiniert bzw. vermengt werden.

### 5.1.3 Training der Netze

Bevor im weiteren Verlauf der Prozeß zum Training der einzelnen KNN's vorgestellt wird, erfolgt eine kurze Beschreibung bzw. formelle Festlegung der innerhalb der Versuche untersuchten Netzparameter.

Die als experimentelle Grundlage für die Untersuchungen eingesetzten mehrlagigen bzw. mehrstufigen Feed-Forward-Netze bestehen generell aus drei unterschiedlichen Schichttypen, die in Anlehnung an [110] in Bild 5.2 beispielhaft dargestellt sind. Der Informationsfluß findet dabei grundsätzlich nur in eine Richtung statt. Die an der Eingabeschicht  $X$  (input-layer), bestehend aus den Eingangsneuronen  $X_{1\dots n}$ , in das KNN eingeladete Prozeßinformation wird über gewichtete Verbindungskanten zu den verborgenen bzw. versteckten Schichten  $V$  (hidden-layer) propagiert, um ab-

schließlich die Elemente der Ausgabeschicht Y (output-layer) zu erreichen, wo das jeweilige Klassifikationsergebnis ausgegeben wird.

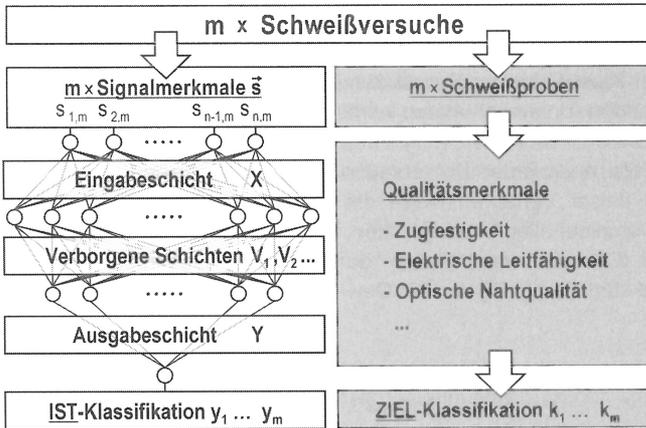


Bild 5.2 Netzstruktur und Informationsfluß

Betrachtet man dabei eine einzelne funktionelle Verarbeitungseinheit bzw. ein Neuron  $j$ , so basiert dessen Ausgabewert  $y_j$  auf der Summe sämtlicher Eingangswerte  $x_{1,j} \dots x_{n,j}$ , multipliziert mit den jeweiligen Verbindungsgewichten  $w_{1\dots n}$ . Dieser als Netto-Input  $net_j$  bezeichnete Wert berechnet sich gemäß (Gl. 5.3) über die sog. Aktivierungsfunktion  $act$  zum Ausgabewert  $o_j$  des einzelnen Neurons.

$$net_j = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_{i,j} \quad \longrightarrow \quad o_j = act(net_j) \quad (Gl. 5.3)$$

Während des überwachten Lernvorgangs des KNN werden die Verbindungsgewichte über die gesamte Netzstruktur schrittweise angepaßt. Dabei wird die aktuelle IST-Ausgabe  $y$  des Netzes mit dem ZIEL-Ausgabewert  $k$  verglichen, wodurch sich der Ausgabefehler errechnen läßt, der in der Backpropagation-Phase als Ausgangsbasis für die Anpassung der einzelnen Verbindungsgewichte dient. Der ZIEL-Ausgabewert stellt demnach eine Grundvoraussetzung für den Trainingsprozeß dar. Die Durchführung von Schweißversuchen einer festen Anzahl erfordert deshalb neben der Datenaufzeichnung auch die vollständige Ermittlung der jeweiligen, tatsächlich gefertigten Schweißqualitäten; d.h., daß für jeden Schweißpunkt der Signal Datensatz und das entsprechende Klassifikationsergebnis vorhanden sein müssen. Es gilt folglich, für die Beurteilung einen Katalog von Qualitätsmerkmalen festzulegen, welche die geforderte Schweißgüte beschreiben. Auf Basis von standardisierten Test- und Prüfverfahren, z.B. durch die Durchführung von einachsigen Zugversuchen oder an-

hand der visuellen Bewertung von aufgetretenen Nahtunregelmäßigkeiten kann im Anschluß die Beurteilung jedes einzelnen Schweißversuchs entsprechend der Qualitätsforderung stattfinden und die Einteilung in dementsprechende Klassifikationsklassen, wie z.B. „Gut“ und „Schlecht“ erfolgen. Sowohl die Signalmerkmale als auch die dazugehörigen Klassifikationsergebnisse werden dem KNN für den Lernprozeß bereitgestellt, wodurch der festgestellte Fehler zwischen Netzausgabe und tatsächlicher Klassifikation während der Trainingsphase reduziert werden kann. Für die vorliegenden Untersuchungen wurde dabei auf das sog. Batchverarbeitungs-Training bzw. das Offline-Training zurückgegriffen [111, 117]. Anstatt die Verbindungsgewichte nach jeder Präsentation eines Trainingsdatensatzes anzupassen, werden bei dieser Verfahrensweise die einzelnen Ausgabebefehle nach dem vollständigen Durchlauf aller Trainingsdaten, was einer sog. Trainingsepoche entspricht, gemäß (Gl. 5.4) zum summierten quadratischen Gesamtfehler bzw. globalen Fehler  $Err$  akkumuliert [110] und die Gewichte auf dieser Basis aktualisiert.

$$Err = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^a (k_i - y_i)^2 \quad (Gl. 5.4)$$

Vor der Trainingsphase wird die Merkmalmatrix nach dem Zufallsprinzip in zwei Mustergruppen aufgeteilt. Anhand der Lernmuster kann der globale Ausgabebefehl des Netzes vom BP-Algorithmus minimiert werden, während der eigentliche Klassifikationsfehler der nicht am Lernprozeß teilnehmenden Testmuster ein Maß für die sog. Generalisierungsfähigkeit darstellt und somit das Kriterium für die quantitative Klassifikationsleistung bestimmt<sup>1</sup>.

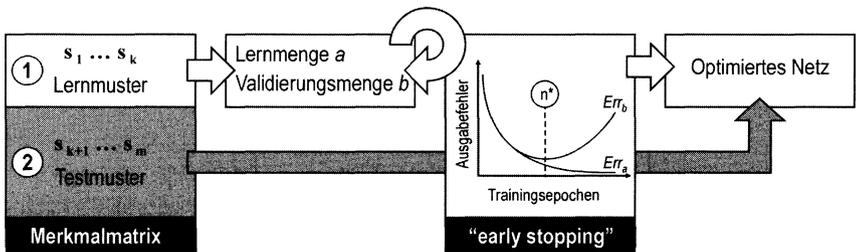


Bild 5.3 Trainingsprozeß und Klassifikationstest

Wie in **Bild 5.3** aufgezeigt, werden in Schritt (1) anhand der Lerndaten  $a$  die Verbindungsgewichte während der Trainingsepochen zwischen den Neuronen derart angepaßt, daß der Ausgabefehler  $Err_a$  minimiert wird. Die im Anschluß (2) bereitgestellten

<sup>1</sup> Unter Generalisierung sei die Fähigkeit verstanden, vom beispielbasierten bzw. konkreten auf den allgemeinen Fall zu schließen. Das KNN soll an dieser Stelle also in der Lage sein, anhand der spezifischen Eigenschaften der Lernmuster eine generelle Abbildungsvorschrift abzuleiten.

Validierungsdaten  $b$  stellen eine neue Basis für das Netz dar und dienen dazu, den Ausgabefehler für unbekannte Daten ( $Err_b$ ) zu ermitteln. Unter Anwendung des sog. „early-stopping“ Verfahrens [117] wird erreicht, daß der Lernprozeß abgebrochen wird bzw. die bei Trainingsepoche  $n^*$  gültigen Verbindungsgewichte innerhalb der untersuchten Netztopologie nicht weiter verändert werden, wenn der Validierungsfehler einen minimalen Wert annimmt. Ein Übertrainieren (overfitting) des Netzes [118] durch reines Auswendiglernen der spezifischen Eigenschaften der Lernmuster, was durch einen stark abnehmenden Lernfehler bei gleichzeitig deutlicher Zunahme des Validierungsfehlers gekennzeichnet ist, wird dadurch effektiv vermieden. Das KNN weist in diesem Zustand folglich die höchste Klassifikationsleistung bzgl. neuer, unbekannter Daten auf.

#### 5.1.4 Test der Klassifikationsleistung

Der praktische Test des durch den Trainingsprozeß optimierten Klassifikators wird mit dem bis dato nicht präsentierten Teil der Datenmuster aus der Merkmalmatrix vollzogen. Durch die Reaktion des KNN auf den Validierungsfehler haben die Validierungsdaten indirekten Einfluß auf den Lernprozeß. Wie in **Bild 5.3** dargestellt, werden aus diesem Grund die „unbekannten“ Testmuster für die Bestimmung der Generalisierungs- bzw. Klassifikationsleistung herangezogen. Dieser Vorgang ist als Interpolation zwischen den bereits trainierten Lernmustern zu verstehen. Als Maß für die Klassifikationsleistung dient das Kriterium: Welchen Anteil von Testmustern kann das Netz richtig klassifizieren? Die Bewertung des jeweiligen Klassifikators erfolgt auf Basis des in [119] vorgestellten prozentualen Gütemaßes, das die gefällten Fehlentscheidungen auf die Gesamtanzahl der präsentierten Testmuster bezieht.

## 5.2 Versuchsbeschreibung

### 5.2.1 Untersuchte Schweißanwendungen

Die experimentellen Untersuchungen konzentrieren sich auf zwei Schweißanwendungen für den Elektronikbereich. Die erste Anwendung (Probe A) zielt auf einen Elektronenstrahlerzeuger für Fernsehbiröhren bzw. Datensichtgeräte der Fa. Philips (siehe **Bild 2.1**). Das fertige Produkt besteht dabei aus einem komplexen System von mehreren gezogenen und gestanzten Einzelbauteilen, wobei für die Versuche repräsentativ ein Kathodenkörper gemäß **Bild 5.4** betrachtet werden soll, auf dem durch die Applikation von zwei Einzelpunkt-Überlappschweißverbindungen eine mechanisch feste und elektrisch leitfähige Verbindung zwischen einer Kontaktfeder und dem Grundgehäuse erzeugt wird. Bei Probe B handelt es sich um einen speziell

entworfenen Versuchsträger der Fa. Curamik, bei dem sog. DCB-Substrate<sup>1</sup> [120] für Hochleistungs-Halbleitermoduln mit elektrischen Anschlußelementen (terminals) versehen werden, um dadurch z.B. eine steckbare Integration in andere Schaltungsplatinen zu ermöglichen.

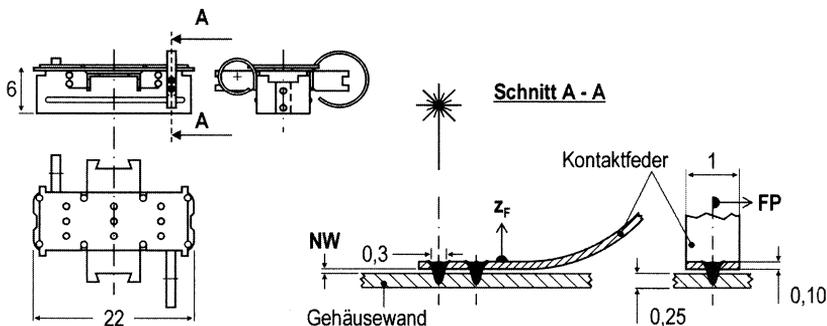


Bild 5.4 Bauelement für Elektronenstrahlerzeuger der PHILIPS AG (Probe A)

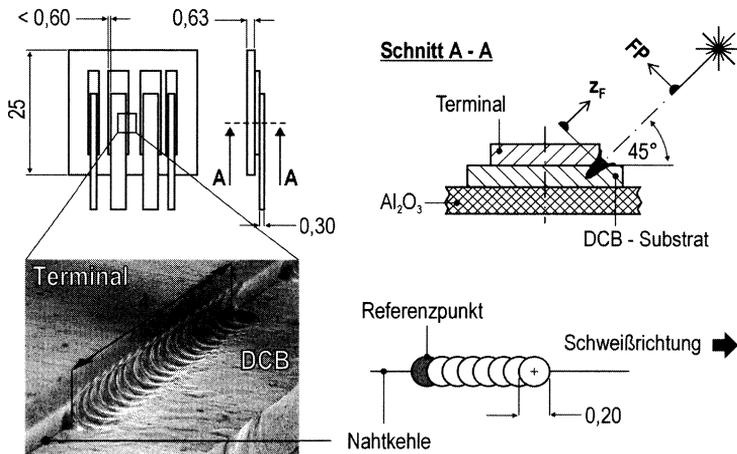


Bild 5.5 Bauelement für Schaltungen der CURAMIK electronics GmbH (Probe B)

Wie in **Bild 5.5** dargestellt, werden die Anschlußelemente durch mehrere, sich teilweise überlappende Einzelpuls-Schweißverbindungen in Kehlnahtanordnung auf die DCB-Substrate (pads) geschweißt. Der Überlappungsgrad beträgt dabei konstante

<sup>1</sup> DCB = „direct-copper-bonding“; ein Verfahren, bei dem eine Kupferfolie, die das Schaltungslayout widerspiegelt, eutektisch mit einer Trägerkeramik verbunden wird.

50%, so daß eine Nahtlänge von  $l = 4$  mm durch die Aneinanderreihung von 20 Einzelpunkten erzeugt wird. Aus **Tabelle 5.1** können die grundlegenden Spezifikationen für die beiden untersuchten Schweißanwendungen entnommen werden.

Spezifikation	Probe A	Probe B
Nahtform	Überlappnaht	Kehlnaht
Modus	Einzel puls	Gepulste Naht ( $l = 4$ mm)
Materialpaarung	Kontaktfeder: FeNi 42 Gehäuse: X8CrNi 1812	Terminal: OF-Cu DCB-Substrat: OF-Cu
Prozeßatmosphäre	Umgebungs luft	Umgebungs luft

*Tabelle 5.1 Grundlegende Spezifikation der Schweißprozesse*

Bei der Applikation von gepulsten Nähten, also sich teilweise überlappenden Schweißpunkten, können die Signalmerkmale aus den jeweiligen Aufheiz- und Aufschmelzphasen sehr große Schwankungsbreiten aufweisen. Als Ursache sind die sich während der Erstarrung der einzelnen Schweißpunkte frei ausbildenden Nahtoberflächen zu nennen, die keine gleichbleibend determinierte, sondern eine stochastische Geometrie annehmen. Der Arbeitsstrahl trifft demnach mit jedem neuen Puls auf eine Werkstückoberfläche, die bzgl. der Reflexionsstrahlung keiner Gesetzmäßigkeit folgt. Für eine reproduzierbare Prozeßdiagnostik auf Basis der bekannten Signalmerkmale können deshalb innerhalb der einzelnen Schweißnähte von Probe B nur die Signale des jeweils ersten Schweißpunktes ausgewertet werden, da nur zu diesem Zeitpunkt eine technisch ebene Oberfläche vorliegt.

## 5.2.2 Qualitätsmerkmale und Versuchsmatrix

Die Bewertung der Schweißergebnisse an den untersuchten Schweißproben erfolgt gesamtheitlich anhand vorher festgelegter Prüfmerkmale. Dabei konzentrieren sich die Betrachtungen im wesentlichen auf die Quantifizierung bzw. die Erfüllung von mechanischen und elektrischen Anforderungskriterien, wie z.B. in [121] beschrieben, sowie eine visuelle Bewertung von Nahtoberfläche (z.B. Schuppung) und Nahtumgebung (z.B. Schweißspritzer). Vor dem Hintergrund des Qualitätslastenhefts wurden ausgewählte laseranlagenseitige Prozeßgrößen optimiert, die sich als wesentliche Ursache für Fertigungsfehler bei der Bearbeitung der untersuchten Proben herauskristallisierten. Auf Basis der Kennwerte Pulsenergie, Fokusslage und Fokussposition sowie Fügspalt bzw. Nahtweite wurden erfahrungsbasierte Schwankungsbreiten festgelegt, die mit Blick auf einen Serieneinsatz zu erwarten sind. So wurde beispielsweise bei Betrachtung der Variation der Laserenergie von einer Trübung der Fokussierlinse über die Fertigungszeit bzw. einer systemspezifischen Leistungsschwankung von ca.  $\pm 5\%$  ausgegangen.

Die in **Tabelle 5.2** dargestellte Versuchsmatrix fungierte im weiteren Verlauf der Untersuchungen als Parametergrundlage. Dabei ergibt sich die gesamte Versuchsgröße aus der Permutation der einzelnen Parameter, multipliziert mit der jeweiligen Anzahl an Wiederholungsversuchen, die für Probe A acht und für Probe B zehn umfaßten.

Kennwert	Probe A						Probe B				
Pulsenergie Q [J]	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	17	18	19	20	
Fokuslage z <sub>F</sub> [mm]	-0,5			0			-0,5		0		+0,5
Fokusposition FP [mm]	0		+0,2		+0,4		-0,10	-0,05	0	+0,05	+0,10
Fügespalt NW [mm]	0			0,2			-				
Versuchsgröße m	576						600				
„Gut“ / „Schlecht“	80 / 496						110 / 490				

Tabelle 5.2 Versuchsmatrix

Die geforderte Schweißaufgabe, d.h. die Herstellung einer Fügeverbindung, konnte über beide Versuchsmatrizen hinweg prinzipiell erfüllt werden. Allerdings ergab die Qualitätsprüfung der Schweißproben für Parameterkombinationen, die aus Werten der Randbereiche zusammengesetzt wurden häufig die Klassifikation „Schlecht“. Als Aufgabe des KNN-Klassifikators wurde die vollständige Identifikation aller nicht akzeptablen Proben, d.h. „Schlecht“-Teile, definiert. Als Vorgabe für die Bewertung der Klassifikationsgüte ergab die manuelle Klassifikation des gesamten Versuchsfeldes für Probe A eine „Gut“/„Schlecht“ Aufteilung von annähernd 1:6 bzw. für Probe B ca. 1:4.

### 5.2.3 Prozeßsignale und Signalmerkmale

Die verwendeten Prozeßsignale basierten auf der in **Abschnitt 4.2.1** vorgestellten Systemtechnik, wobei **Tabelle 5.3** eine Übersicht über die im Schweißkopf jeweils installierten bzw. aktivierten Prozeßdetektoren darstellt.

Nummer d. Detektors	#1	#2	#3	#4	#5(Ge)	#5(Si)	#6
Probe A	●	●	●	PSD <sup>1</sup>	●	●	●
Probe B	●	●	●● <sup>2</sup>	●	●	●	●

Tabelle 5.3 Eingesetzte Detektoren

<sup>1</sup> Gleichzeitige Auswertung sowohl der Strahlungsintensität als auch der Richtungsinformation.

<sup>2</sup> Durch einen zusätzlichen Offaxis-Sensor (Detektor #3b), der bzgl. der Laserstrahlachse um 90° gedreht positioniert ist, kann die diffuse Reflexionsstrahlung sowohl in frontaler als auch in seitlicher Ausdehnung zur Nahtlage erfaßt werden. Ziel ist es, dadurch eine verbesserte Auflösung von makroskopischen Geometrie-Effekten während der Aufschmelzphase zu erreichen.

Als Entscheidungsgrundlage, welche Prozeßsignale bzw. Prozeßdetektoren zum Einsatz kommen sollten, dienten die in **Abschnitt 4.2** beschriebenen Analysen zum Prozeßmodell und den dazugehörigen Prozeßsignalen. Speziell die Ergebnisse aus den Untersuchungen an der Einzelpunkt-Überlappstoßverbindung konnten bei Probe A als Ausgangspunkt für einen automatisierten Merkmal- bzw. Feature-Extraktor nutzbar gemacht werden. So wurden auf Basis der bekannten Signal-Prozeß Korrelationen die individuellen Extraktionsalgorithmen entworfen, die z.B. die spezifischen Onaxis-Signalwerte innerhalb der Aufheiz- und Aufschmelzphase des Schweißprozesses detektieren bzw. berechnen. In Summe wurden für Probe A 36 Ortsraum-Features aus den acht Eingangskanälen erzeugt.

Für die Untersuchungen an Probe B wurden die Extraktionsalgorithmen im wesentlichen beibehalten und nur hinsichtlich der veränderten Konstellation bzgl. der eingesetzten Detektoren sowie der unterschiedlichen Prozeßzeit angepaßt. Abschließend konnten 22 Ortsraum-Features aus der Merkmalmatrix direkt übernommen werden. Eine explizite Analyse der einzelnen Signalantworten, bezogen auf die veränderte Nahtgeometrie, wurde nicht durchgeführt. Wie bereits erläutert, erfolgte zudem nur jeweils die Aufzeichnung des ersten Schweiß- bzw. Referenzpunkts (siehe **Bild 5.5**) an einer Schweißnaht.

Vor dem Hintergrund der in **[89]** und **[119]** präsentierten Ergebnisse ermittelte der Extraktor als weiteren Umfang für beide Schweißproben unspezifische Merkmale aus den acht Signalkanälen in Form der jeweils ersten 20 Frequenzkoeffizienten der zeitdiskreten Fourier-Transformation  $F_d[j\omega]$ . Dabei wurden die einzelnen Amplituden- bzw. Spannungswerte sowie die dazugehörige Phasenverschiebung  $e^{-j\omega}$  nach der Faltung gemäß (**Gl. 5.5**) normiert und logarithmiert, wobei die Logarithmierung des Frequenzraums einer Linearisierung gleichkommt, da der Energieanteil in den hohen Frequenzen exponentiell abfällt **[104]**.

$$F_d[j\omega] = \sum_{n=1}^N U_s[n] \cdot e^{-j\omega n} \quad \longrightarrow \quad \text{DFT}[n] = \log_{10} \|F_d[j\omega]\| \quad (\text{Gl. 5.5})$$

Unter Berücksichtigung der Abtastrate von  $f_a = 125$  kHz teilt sich für Probe A das Frequenzspektrum in 333,3 Hz und für Probe B in 100 Hz Abschnitte auf. Die ersten 20 Koeffizienten der DFT-Analyse stehen dementsprechend für die Frequenzbereiche 333,3 Hz ... 6,6 KHz (Probe A) bzw. 100 Hz ... 2 kHz (Probe B). Vor dem Hintergrund der in **Abschnitt 4.2.1** bezifferten elektronischen Bandbegrenzung der Detektoren transportieren die berücksichtigten DFT-Koeffizienten demnach für beide Proben tatsächlich meßbare Frequenzinformationen.

### 5.3 Klassifikation der Schweißgüte

Die systemtechnische Grundlage für die Netzwerksimulation stellt die FORWISS Artificial Neural Network Simulation Toolbox (FAST), Version 2.2 der Universität Erlangen-Nürnberg dar [122]. Durch die Möglichkeit die Daten Ein- und Ausgabe über Dateien im Filesystem eines UNIX-Systemrechners kommandozeilenorientiert zu steuern, eignet sich FAST besonders gut für den angestrebten Batchbetrieb.

Bei der Ermittlung einer optimalen Netzkonfiguration, i.S. einer maximalen Klassifikationsleistung, lehnt sich die Untersuchung an das in der Literatur vorgeschlagene Vorgehen [111]. Beginnend mit der Anzahl der Neuronen und Schichten innerhalb der Netzwerktopologie werden im Anschluß, auf Basis einer zu diesem Zeitpunkt optimierten Netzwerkarchitektur, die Art der Datenvorverarbeitung überprüft und abschließend die Startwerte der initialen Netzparameter plausibilisiert.

#### 5.3.1 Initiale Netzparameter

Vor Versuchsdurchführung erfolgte die Festlegung der Startwerte für die wesentlichen Parameter des Netzwerksimulators. Als Aktivierungsfunktion innerhalb der versteckten Schichten wurde die FSigmoide  $FSig(x)$  verwendet, für die Berechnung der Aktivität in den Ausgabeneuronen wurde die Sigmoidfunktion  $Sig(x)$  ausgewählt (siehe (Gl. 5.6a, b)).

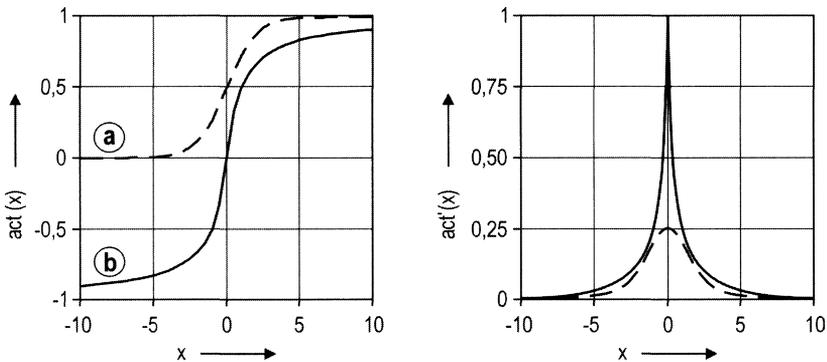
$$a) \text{ Sig}(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \qquad b) \text{ FSig}(x) = \frac{x}{1 + |x|} \qquad (\text{Gl. 5.6})$$

Während die Sigmoidfunktion, wie in Bild 5.6 dargestellt, in den Randbereichen schneller konvergiert und daher besser für eine gezielte Ausgabekodierung geeignet ist, stellt die FSigmoidfunktion eine algorithmische Alternative zur Sigmoidfunktion dar, wodurch sie numerisch schneller zu berechnen ist, was speziell bei der linearen Verkettung von mehreren Operationseinheiten von Vorteil ist.

Durch die geringere Randkonvergenz, d.h. den innerhalb der Randbereiche im Vergleich flacheren Gradienten, besitzt die  $FSig(x)$  Funktion bzgl. des BP-Algorithmus eine positive Eigenschaft. In der sog. Backward-Phase ändert das Fehlersignal auf Basis der Ableitung der Aktivierungsfunktion die jeweiligen Verbindungsgewichte. Für Eingabewerte in das Neuron, die groß gegenüber dem Null-Niveau sind, ändert sich die Ableitung  $act'(x)$  der  $FSig$ -Funktion numerisch prägnanter als bei der Sigmoidfunktion. Es findet also bei der  $FSig$ -Funktion selbst im Randbereich der Aktivierung noch „Lernen“ statt, wohingegen  $Sig(x)$  dort schnell in den Sättigungsbereich konvergiert und entsprechend kaum noch „Lernen“ erfolgt. Praktisch bedeutet diese Voraussetzung, daß selbst zum Ende des Lernprozesses, wenn die Verbindungs-

gewichte der einzelnen Neuronen bereits ihre annähernd stationären Werte erreicht haben, sich diese i.S. einer optimalen Gesamtleistung des Netzes immer noch anpassen können.

Die externe Aufteilung zwischen Trainings- und Testmuster ergab einen Quotienten von 75 zu 25 bzw. 3:1, wodurch 75% der Datensätze dem Netz als stochastisch ausgewählte Trainings- bzw. Validierungsdaten zur Verfügung standen. Das FAST-interne Verhältnis von Trainings- zu Validierungsdaten lag gleichfalls bei 3:1, wodurch sich ein globaler Trainingsdatenanteil von ca. 60% bezogen auf die gesamte Datenbasis ergab.



*Bild 5.6 Vergleich der eingesetzten Aktivierungsfunktionen*

Jedes konfigurierte Netzwerk wird jeweils 20 mal mit unterschiedlich initialisierten Zufalls-Verbindungsgewichtungen zwischen den Neuronen gestartet. Einerseits kann dadurch eine statistische Absicherung der Ergebnisse erreicht werden, dargestellt durch die Standardabweichung, andererseits streut man durch dieses Vorgehen die Anfangsbedingung innerhalb einer Versuchsreihe (symmetry breaking). Netze, die wegen ungünstiger Start-Verbindungsgewichte in einem lokalen Minimum auf der Fehleroberfläche „stecken“ bleiben, können so schnell identifiziert werden [110]. Die Lernrate, die das Maß für die Größe der Gewichtungsanpassung zwischen den einzelnen Trainingsepochen darstellt und die Konvergenzgeschwindigkeit in der Lernphase bestimmt, wurde für die ersten Versuchsreihen auf den Wert von  $\eta = 0,01$  festgelegt. Eine Modifikation der Lernrate über den sog. Trägheitsterm erfolgt nicht, der Wert wird während der gesamten Untersuchungsdauer auf 0,8 gesetzt [122].

### 5.3.2 Untersuchung der Netztopologie

Bei der Bestimmung einer optimalen Netztopologie wurde, in Anlehnung an [110, 111], von einer minimalen Netzwerkgröße mit nur einer versteckten Schicht

$V = 1$  ausgegangen. Weiterhin wurde eine, den beiden Qualitäts-Kategorien entsprechende, binäre Ausgabekodierung festgelegt. Das einzige Ausgabeneuron  $Y = 1$  wird entweder aktiviert ( $y = 1$ ), für den Fall „Gute Schweißnaht“, oder bleibt deaktiviert ( $y = 0$ ), für den Fall „Schlechte Schweißnaht“.

Die Größe der Eingabeschicht des KNN-Klassifikators berechnet sich entsprechend der Anzahl der verwendeten Signalmerkmale. So konzentrieren sich die grundlegenden Untersuchungen auf die getrennte Verwendung der Ortsraum- bzw. Time-Features (TF), der DFT-Koeffizienten (DFT) und die Kombination aus beiden Merkmalgruppen (TF+DFT). Diesbezüglich ergab sich für die Eingabeschicht die in **Tabelle 5.4** gezeigte Anzahl  $X$  an Eingangsneuronen.

Verwendete Signalmerkmale	TF	DFT	TF + DFT
Eingangsneuronen $X$ (Probe A)	36	160	196
Eingangsneuronen $X$ (Probe B)	22	160	182

*Tabelle 5.4 Spezifikation der Eingangsneuronenzahl*

### Verarbeitung mit einer verborgenen Schicht

Bei einer schrittweisen Erhöhung der Neuronenanzahl in der verborgenen Schicht von  $V_1 = 5/ 10/ 15/ 20/ 30/ 50$  für Probe A, bzw.  $V_1 = 5/ 10/ 20/ 30/ 50/ 100$  für Probe B konnten die in **Bild 5.7** und **Bild 5.8** dargestellten Klassifikationsergebnisse erzielt werden.

Als grundlegendes Resultat zeigt sich für beide Proben, daß ein dreischichtiges Netz mit 20 Neuronen in der versteckten Schicht die Klassifikationsaufgabe mit dem geringsten Fehler erfüllt. Die relativ geringe Anzahl an verborgenen Neuronen innerhalb der ersten Schicht stimmt dabei annähernd mit der Abschätzung nach einer Faustformel aus [116] überein (siehe (Gl. 5.7)).

$$V_1 \approx \sqrt{\text{Anzahl}(X) + \text{Anzahl}(Y)} \quad (\text{Gl. 5.7})$$

Ein gravierender Unterschied zwischen beiden Untersuchungsergebnissen findet sich in der Art der optimalen Datenvorverarbeitung. Für Probe A beträgt die höchste Klassifikationsleistung bei gleichzeitiger Verwendung von TF und DFT Daten ca. 97%, während für Probe B das beste Ergebnis von 94% nur bei alleiniger Einstellung der DFT Daten zu erreichen ist. Dabei ist zu beachten, daß die ausschließliche Verwendung der Ortsraum-Features für Probe A einen nur geringfügig höheren Klassifikationsfehler aufweist als bei einem gemeinsamen Einsatz von TF und DFT Signalmerkmalen. Aufgrund der im Vorfeld durchgeführten intensiven Untersuchungen zu der Korrelation zwischen Prozeß und Signal am Einzelpunkt-Überlappstoß kann der Prozeßzustand durch die spezifischen TF-Merkmale offensichtlich in guter Näherung

wiedergegeben werden. Die unmittelbare Übertragung der für die Überlapp-Naht spezialisierten Extraktionsalgorithmen auf die Kehlnahtgeometrie der Probe B bewirkt, im Vergleich zu Probe A, für die TF-Klassifikation ein im Durchschnitt um den Faktor vier schlechteres Ergebnis.

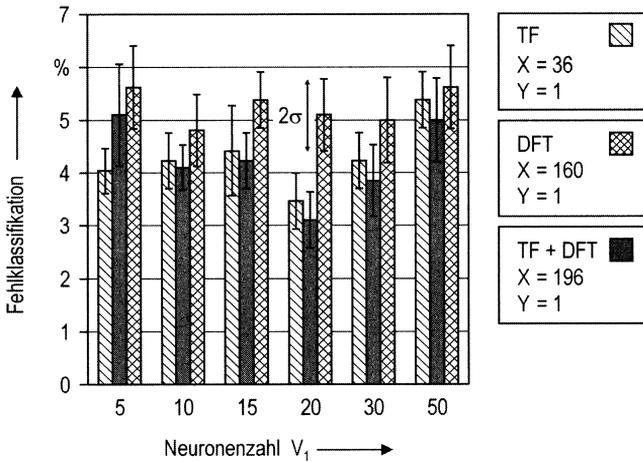


Bild 5.7 Variation der Neuronenzahl in der Schicht  $V_1$  (Probe A)

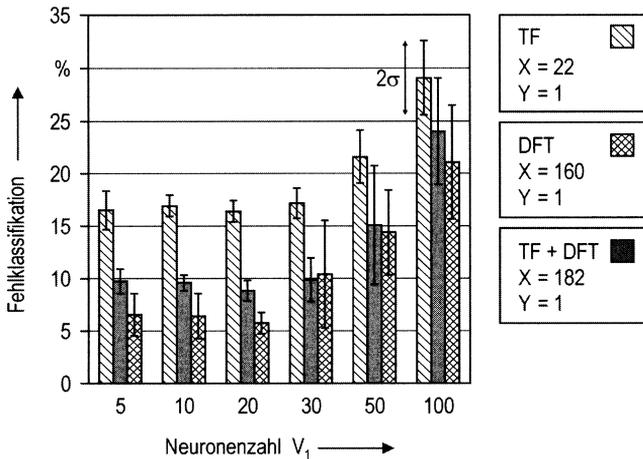


Bild 5.8 Variation der Neuronenzahl in der Schicht  $V_1$  (Probe B)

Eine Betrachtung der unspezifischen DFT-Merkmale läßt ein differenziertes Bild erkennen. Für Probe A schwankt das DFT-Ergebnis über die gesamte Neuronenzahl um einen Fehlerwert von ca. 5%. Bei Probe B wird die DFT-Klassifikationsgüte bei Erreichen der Neuronenzahl  $V_1 = 30$  sprunghaft schlechter, bei einer gleichzeitig deutlichen Zunahme der Ergebnis-Schwankungsbreite. Generell zeigen überdimensionierte Netze mit zu vielen versteckten Verarbeitungseinheiten eine unzureichende Generalisierungsleistung [111, 118]. Die Berücksichtigung der Frequenzbereiche bzw. der Frequenzauflösung, die mit den DFT-Daten für beide Proben bereitgestellt werden, liefert bei der Ursachenforschung eine Begründung für die Ergebnisse. Während für Probe A ein ca. 6 kHz breites Frequenzspektrum durch 20 Stützstellen pro Kanal repräsentiert wird, verteilen sich die gleiche Anzahl an DFT-Koeffizienten für Probe B auf einen einzigen Bandbereich der Breite 2 kHz. Das KNN bildet demzufolge, in der Lernphase für Probe B, die Frequenzen mit Überschreiten einer kritischen Anzahl an versteckten Neuronen zu spezifisch ab, so daß die Generalisierungsfähigkeit offensichtlich darunter leidet. Durch die von vornherein relativ grobe Abbildung des Frequenzbandes bei Probe A wird besagter Effekt der Überdimensionierung wegen einer zu groß gewählten Neuronenzahl in der versteckten Schicht abgeschwächt. Die Folgen einer zu großen Topologie auf die Klassifikationsgüte lassen sich erneut bei nochmaliger Untersuchung der Ergebnisse für eine reine TF-Klassifikation feststellen. Die Information der 36 TF-Features bei Probe A wird mit Erreichen der Neuronenzahl von  $V_1 = 30$  durch die Netztopologie nicht mehr verdichtet, sondern aufgefächert, wodurch die Genauigkeit der Abbildung unmittelbar abnimmt. Für die 22 TF-Features der Probe B beginnt dieser Zustand der Informations-Dekodierung [111] bereits vor der Anzahl von  $V_1 = 30$  versteckten Neuronen. Eine Analyse der Ergebnisse auf Basis der nominellen Anzahl von „Gut-“ bzw. „Schlecht-“Teilen innerhalb der beiden untersuchten Versuchsgruppen ist in **Tabelle 5.5** dargestellt.

	Datenbasis	3 : 1	Gut/ Schlecht	KNN	Fehler [%]
Probe A	576	432 / 144	→ 40 / 104	35 / 104	12,5 / 0
Probe B	600	450 / 150	→ 40 / 110	33 / 108	17,5 / 2

Tabelle 5.5 Ergebnisverteilung

Innerhalb der Auflistung wurden dabei jeweils die Klassifikationsleistungen für die 196-20-1 Architektur bei Probe A bzw. 160-20-1 bei Probe B herangezogen. Durch die 75/25 bzw. 3:1 Aufteilung der Datenbasis stehen bei Probe A 144 und bei Probe B 150 Datensätze zur Messung der Klassifikationsleistung zur Verfügung. Die Verteilung dieser Datensätze auf die beiden Qualitäts-Kategorien „Gut“ und „Schlecht“ ergibt für Probe A eine Verteilung von 40:104 bzw. für Probe B eine solche von 40:110. Der KNN-Klassifikator erkennt im besten Fall für Probe A die schlechten Schweißversuche zu 100%, während die guten mit einem Fehler von 12,5% klassifiziert werden. Bei Probe B beurteilt das Netz zwei schlechte Schweißversuche irrtümlich als gut (2% Fehler) und kann die guten Schweißnähte zu

82,5% richtig einordnen. Unter dem bekannten Vorsatz der „Fehlererkennung vor Fehlervermeidung“ zeigt sich für Probe A demnach ein unter Praxisbezug optimales Ergebnis.

### Verarbeitung mit zwei verborgenen Schichten

Es soll jetzt untersucht werden, ob durch die Installation einer zweiten versteckten Verarbeitungsschicht  $V_2$  das Klassifikationsergebnis verbessert werden kann.

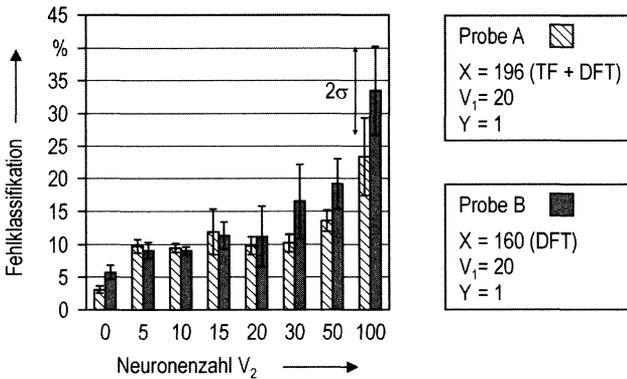


Bild 5.9 Variation der Neuronenzahl in der Schicht  $V_2$

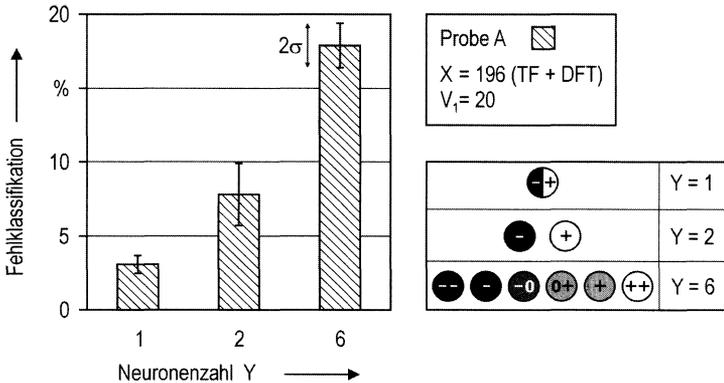
Das in **Bild 5.9** dargestellte Ergebnis zeigt jedoch eindeutig, daß für beide Proben der Klassifikationsfehler unabhängig von der Größe der zweiten Verarbeitungsebene zunimmt. Durch die Aktivierung einer zweiten versteckten Schicht scheint die Komplexität bzw. Größe der Netzwerkarchitektur dem Problem nicht mehr angemessen. Im Vergleich zu den einschichtigen Varianten nimmt der Klassifikationsfehler von Beginn an um den Faktor zwei zu. Bei Erreichen einer Schichtgröße von  $V_2 > 20$  tritt bzgl. der ersten versteckten Schicht  $V_1$  die Überbestimmung der weitergeleiteten Merkmalsinformation durch Dekodierung ein, was sich unmittelbar in einer sprunghaften Verschlechterung der Klassifikationsleistung niederschlägt.

### Vergrößerung der Ausgabeschicht

Eine Variation der Ausgabekodierung, d.h. eine Erhöhung der Neuronenzahl innerhalb der Ausgabeschicht, stellt sicher, ob sich eine feiner abgestufte Einteilung der Qualitätsklassen bei der Ausgabekodierung positiv auf die Klassifikationsleistung an Probe A auswirkt. Neben der binären Ausgabe durch ein Neuron stehen dabei der Einsatz von zwei getrennt arbeitenden Verarbeitungseinheiten für jeweils „Gut“ und „Schlecht“ zur Auswahl. Weiterhin wird die Aufstellung einer sechs Neuronen umfas-

senden Ausgabeschicht untersucht, die eine dementsprechend feiner unterteilte Qualitätsaussage ermöglicht.

Mit dem in **Bild 5.10** dargestellten Resultat kann dokumentiert werden, daß, im Gegensatz zur Ausgabe mit einem einzigen Neuron, durch eine weiter aufgefacherte Ausgabekodierung, die eine detaillierte Bewertung der einzelnen Schweißgüten erlaubt, der Klassifikationsfehler deutlich zunimmt.



*Bild 5.10 Einfluß der Ausgabekodierung auf das Klassifikationsergebnis*

Für den Fall einer mächtigen Ausgabeschicht steigt die Fehlerwahrscheinlichkeit exponentiell mit der Anzahl der Ausgabeneuronen, da bei der Bewertung der Klassifikationsleistung jedes falsch aktivierte Ausgabeneuron mitgezählt wird. Allerdings würde dieser Sachverhalt auch für eine manuell durchgeführte Klassifikationsleistung zutreffen, wenn die Diversifikationsmerkmale sehr eng zusammenliegen und die Bewertung dadurch zu komplex bzw. eine eindeutige Zuordnung erschwert wird.

### 5.3.3 Einfluß der Daten-Vorverarbeitung

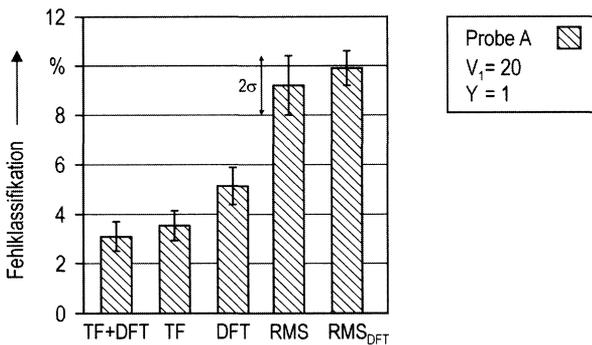
Im Vergleich zu der bislang verwendeten merkmals-unspezifischen DFT-Analyse soll jetzt die RMS-Methode auf die Roh-Signaldaten angewendet werden. Durch den in **(Gl. 5.8)** gezeigten Formalismus kann die Anzahl der zu verarbeitenden Datenpunkte in einfacher Weise deutlich reduziert werden. Der Signaldatensatz, bestehend aus  $N$  Datenpunkten, wird durch das Verfahren in  $b$  Bereiche der festen Länge  $k$  unterteilt bzw. vereinzelt. Für jeden separaten Bereich wird dann im Anschluß die RMS-Summe berechnet. Für die Untersuchungen wurden die einzelnen Signale dazu in jeweils  $b = 30$  Bereiche unterteilt ( $X = 240$ ).

Bei einer nach der vorgestellten Berechnungsvorschrift durchgeführten Verarbeitung der DFT-Daten wurden jeweils 5 DFT-Koeffizienten zu einem Band zusammengefaßt

und über die RMS-Methode gemittelt [123], so daß durch jeweils 20 DFT<sub>RMS</sub>-Eingabekoeffizienten pro Kanal ein kompletter Spektralbereich mit 100 DFT-Frequenzkoeffizienten abgedeckt wurde.

$$RMS_b = \sqrt{\sum_{i=b \cdot k}^{(b+1) \cdot k - 1} X_i^2} ; \quad \text{mit: } k = \frac{N}{b} \quad (\text{Gl. 5.8})$$

Anhand des in **Bild 5.11** wiedergegebenen Vergleichs der untersuchten Extraktionsverfahren konnte der Klassifikationsfehler durch die RMS-Methode nicht reduziert werden, vielmehr erzeugen die zusammengefaßten Daten eine deutlich erkennbar schlechtere Klassifikationsleistung, die sich mit einem mittleren Fehlerwert von ca. 10% niederschlägt.



*Bild 5.11 Vergleich von unterschiedlichen Extraktionsverfahren*

Aus diesem Ergebnis läßt sich für die Vorverarbeitung der Rohdaten ableiten, daß die in den Datensätzen transportierte Prozeßinformation sehr präzise entnommen werden muß, um eine optimale Repräsentation des Prozeßverlaufs zu gewährleisten. Speziell die problem-unspezifischen Extraktionsmethoden stehen dieser Anforderung jedoch entgegen. Durch eine alleinige Berechnungen der Signalfeatures sowohl durch das RMS- als auch das DFT-Verfahren werden die Phänomene innerhalb der Signaldaten mit einer programmierten Unschärfe abgebildet, wodurch eine sehr präzise Differenzierung mit geringstem Fehler nicht möglich zu sein scheint.

### 5.3.4 Untersuchung der initialen Netzparameter

Das eingangs vereinbarte feste Aufteilungsverhältnis zwischen Lern- und Testdatenmuster von 3:1 soll abschließend aufgelöst werden und hinsichtlich einer Verringerung der Lernmustergröße untersucht werden. Als Hintergrund kann der Wunsch genannt werden, mit einem möglichst kleinen Datenvolumen den KNN-Klassifikator zu initialisieren, so daß ein erneutes Trainieren unter zeitoptimalen Bedingungen möglich ist. In Erweiterung soll der Einfluß der Lernrate, die das wesentliche Maß für die Trainingsgeschwindigkeit darstellt, auf die Klassifikationsgüte aufgezeigt werden.

#### Trainings-Quotient

Der Trainings-Quotient wird für beide Proben, ausgehend von dem bisherigen Verhältnis von 3:1, schrittweise auf die Werte 2:1, 1:1 und 1:3 verringert, wodurch sich die jeweils einstellenden Klassifikationsleistungen gemäß der Darstellung in Bild 5.12 verteilen.

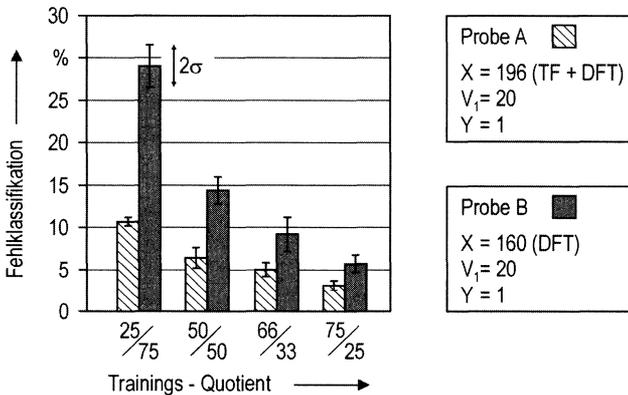


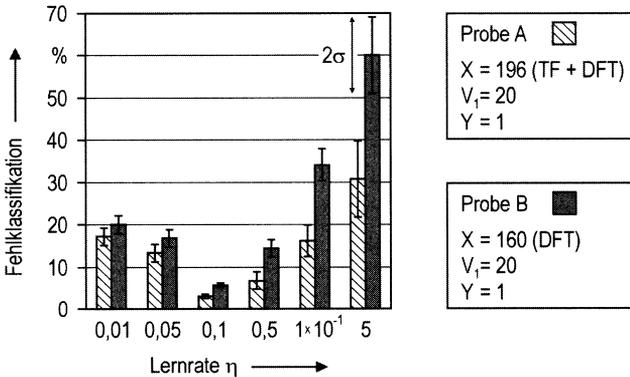
Bild 5.12. Klassifikationsgüte in Abhängigkeit des Trainings-Quotienten

Die Bestimmung einer optimalen Datenmenge für die höchste Klassifikationsgüte führt zu dem erwarteten Ergebnis, daß ein minimaler Klassifikationsfehler, die entsprechend optimierte Parametrierung des KNN vorausgesetzt, für eine größtmögliche Anzahl an Lernmustern erreicht wird. Für den praktischen Einsatz bedeutet dies, daß ohne die Schaffung einer fundierten Lern-Datenbasis bzw. Referenz-Datenmenge keine ausreichende Generalisierung des Neuronalen Netzes stattfinden kann. Für einen optimalen Betrieb sollte der KNN-Klassifikator parallel zum Fertigungsprozeß (on-the-fly) kontinuierlich trainiert werden, so daß die Datenbasis sowohl permanent erweitert wird als auch solche Signaleffekte durch das KNN aufgenommen wer-

den können, die sich durch eine mechanische Änderung innerhalb der Fertigungseinrichtung ergeben.

**Lernrate**

Innerhalb der Literatur ist kein einheitliches Vorgehen zur Bestimmung der optimalen Lernrate erkennbar. Vielmehr wird häufig die sog. „trial-and-error“ Prozedur empfohlen [111], bei der, wie in der folgenden Untersuchung nachempfunden, von einem festen Wert ausgehend die Lernrate sukzessive erhöht bzw. verringert wird bis sich ein optimales Klassifikationsergebnis einstellt. Auf Basis des Klassifikationsfehlers wird die Lernrate dementsprechend bzgl. anderer Werte, die vom Ausgangswert 0,01 abweichen untersucht. Das in **Bild 5.13** gezeigte Verhalten der Ausgabegüte bestätigt jedoch die Wahl des anfänglich festgelegten Werts. Beachtlich ist, daß sämtliche Netze, über die gesamten Versuchsreihen hinweg, gegen einen stationären Fehlerwert konvergieren, also tatsächliches Lernen stattfindet. Die Fehleroberfläche, die durch die TF+DFT-Daten von Probe A aufgespannt wird, erzeugt demzufolge selbst bei sehr großen Lernraten noch moderate 30% an mittlerem Klassifikationsfehler.



*Bild 5.13 Klassifikationsgüte in Abhängigkeit von der Lernrate*

Im Vergleich zeigt der Einsatz nur der DFT-Koeffizienten bei Probe B, daß durch diese Einschränkung eine deutlich stärkere Reaktion auf große Lernraten erfolgt, was durch einen im Vergleich doppelt so hohen Fehlerwert (60%) dokumentiert wird.

Für kleine Lernraten läßt sich bei beiden Proben ein annähernd gleiches Fehlerverhalten ausmachen. Offensichtlich gestaltet sich die Fehleroberfläche bei Probe A durch den zusätzlichen Einsatz der TF-Signalmerkmale homogener, als wenn dem KNN nur DFT-Daten zur Verfügung gestellt werden.

## 5.4 Kontrolle der Schweißparameter

Bislang wurde anhand der jeweiligen Datensätze implizit entschieden auf welche Schweißqualität die darin enthaltene Signalinformation schließen läßt. In der folgenden Untersuchung soll jetzt der Ansatz geprüft werden, ob das KNN in der Lage ist, die Daten mit den spezifischen Prozeßparametern zu verknüpfen. Im Detail bedeutet diese Aufgabe für den Klassifikator diejenigen Prozeßparameter zu identifizieren, die für ein schlechtes Schweißergebnis verantwortlich sind.

Unter der Annahme, daß ein bestimmter Anteil von Prozeßparametern, aus der Gruppe sämtlicher Wertekombinationen, im Rahmen der Statistik eindeutig eine „gute“ oder „schlechte“ Schweißqualität produziert, können Relationen zwischen dem Parametervektor  $\vec{p}$  und den Klassen „gut“ und „schlecht“ hergestellt werden. Das betrachtete Parameterfeld kann entsprechend (**Gl. 5.9**) bzgl. der Komponenten in die beiden festgelegten Qualitätsgruppen aufgeteilt werden.

$$a) \vec{p}_{\text{gut}} = \left\{ p_i; p_i \in \begin{pmatrix} Q \\ Z_F \\ FP \\ NW \end{pmatrix} \right\} \quad b) \vec{p}_{\text{schlecht}} = \left\{ p_i^*; p_i^* \in \begin{pmatrix} Q^* \\ Z_F^* \\ FP^* \\ NW^* \end{pmatrix} \right\} \quad (\text{Gl. 5.9})$$

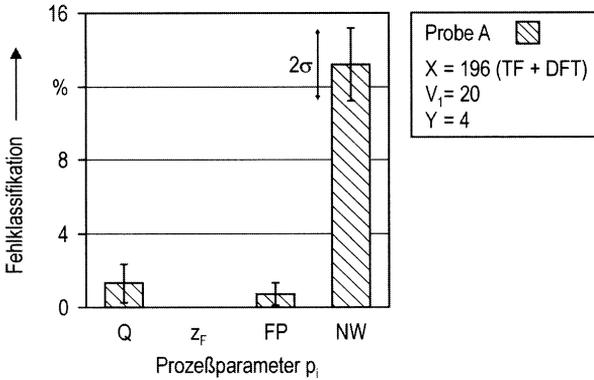
Weiterhin wird angenommen, daß die ungenügenden Schweißqualitäten aus der Variation von guten Parametervektoren entstehen, der betrachtete schlechte Vektor also in einer oder mehr Komponenten von einem sog. „Vorbildvektor“ abweicht, was jeweils als Bit-Abstand „1“ interpretiert werden kann.

$$\mathbf{b}_i \begin{cases} = 0; & \text{falls } \mathbf{p}_i^* = \mathbf{p}_i \\ = 1; & \text{falls } \mathbf{p}_i^* \neq \mathbf{p}_i \end{cases} \longrightarrow \vec{\mathbf{b}} = (0; 1)^4 \quad (\text{Gl. 5.10})$$

Durch zeilenweisen Vergleich mit sämtlichen guten Vektoren gemäß (**Gl. 5.10**) kann in der Folge für jeden Parametervektor ein binärer Abstandsvektor  $\vec{\mathbf{b}}$  erzeugt werden. Unter der Voraussetzung eines minimalen Bit-Abstands, was dem Gedanken des sog. „Nächsten-Nachbar-Algorithmus“ (nearest neighbour) entspricht, werden durch diese Prozedur innerhalb eines „schlechten“ Parametermusters algorithmisch die unkorrekten Komponenten identifiziert und mit einer „1“ belegt. Abschließend besitzt man eine Darstellung, in der neben der Qualitätsaussage auch die für die Abweichung verantwortlichen Prozeßparameter einzelnen Merkmalvektoren zugeordnet werden können.

Eine Anzeige der Ursache für eine Qualitätsminderung ist dadurch möglich. Als experimentelle Grundlage für die quantitative Überprüfung dieser Strategie wurden die TF+DFT Daten aus der Versuchsmatrix von Probe A (siehe **Tabelle 5.2**) herangezogen.

gen. Um innerhalb der Trainingsphase die jeweiligen Signalmerkmale mit ihren dazugehörigen Abstandsvektoren zu verknüpfen, muß die Ausgabeschicht des KNN allerdings auf vier Ausgabeneuronen (Pulsenergie, Fokusslage, Fokussposition, Fügspalt) vergrößert werden, so daß auf Basis der Ergebnisse in **Abschnitt 5.2.2** die erweiterte, optimierte Topologie einer 196-20-4 Struktur entspricht. Für die Ergebnisbetrachtung wurden für zehn unterschiedliche, statistisch zusammengestellte Trainingsmengen 20 jeweils neu initialisierte Netze gerechnet.



*Bild 5.14 Identifikation der Prozeßparameter*

Anhand der Darstellung in **Bild 5.14** zeigt sich, daß der mittlere Generalisierungsfehler, abgesehen vom Parameter Fügspalt (NW), bei den Prozeßgrößen Pulsenergie (Q), Fokusslage ( $z_F$ ) und Fokussposition (FP) maximal 1,3% annimmt, was bedeutet, daß der Klassifikator für diese Parameter eine annähernd 100%ige „gut-schlecht“ Erkennung leistet.



## 6 Prozeßkontrolle durch Fuzzy-Methoden

Für den Fall, daß innerhalb einer Serienfertigung Mikro-Schweißnähte bzgl. der relevanten Qualitätskriterien als unzureichend klassifiziert werden, bedarf es einer Strategie, um die Ursache des Fertigungsfehlers schnell zu diagnostizieren. Für das Bedienerpersonal einer Laser-Mikroschweißanlage ist es jedoch häufig unmöglich, innerhalb einer möglichst kurzen Zeitspanne, eine eindeutige Rückführung der festgestellten Schweißfehler auf die dafür verantwortlichen Anlagenparameter durchzuführen. Unter dem Aspekt minimaler Stillstandszeiten ist der Einsatz eines Kontrollsystems sinnvoll, das kontinuierlich die Prozeßparameter überwacht bzw. dokumentiert und im Fehlerfall diagnostische Hilfestellung leistet.

Bei Laserstrahl-Schweißprozessen werden durch die Wechselwirkung der einzelnen direkten und indirekten Prozeßgrößen sowohl das Prozeßergebnis als auch die Signalantworten beeinflusst. So wirken sich beispielsweise gleichsam die Laserleistung und die Fokusslage auf die Leistungsdichte aus, die wiederum unmittelbar das zentral reflektierte Onaxis-Detektionssignal beeinflusst. Bedingt durch teilweise unbestimmbare Störeinflüsse weisen die einzelnen Prozeßsignale weiterhin erhebliche Streubreiten auf, die eine direkte Auswertung zusätzlich erschweren und teilweise sogar verhindern.

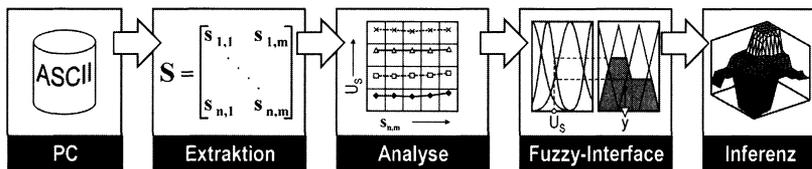
Für den Fall, daß fehlerbehaftete bzw. verrauschte Meßdaten verarbeitet werden müssen [124] oder Signalmerkmale, die dementsprechend aus verrauschten Daten extrahiert wurden, empfiehlt sich der Einsatz der Fuzzy-Technologie [125]. Durch die unscharfe (fuzzy) Verarbeitung kann die innerhalb der Signalwerte transportierte Prozeßinformation selbst bei großen Rauschpegeln noch eindeutig bestimmbar gemacht werden. Eine Verknüpfung von mehreren fuzzifizierten Signalmerkmalen über die Fuzzy-Logik (cross-validation) erlaubt zudem, daß ein redundantes, fehlertolerantes Diagnosesystem aufgebaut werden kann, wodurch eine robuste Systemidentifikation möglich ist [125].

Im Vorfeld der Untersuchungen werden grundlegende Informationen zur Fuzzy-Mathematik bzw. Fuzzy-Logik nicht vollständig wiedergegeben, an dieser Stelle sei deshalb auf die weiterführende Literatur verwiesen [126, 127, 128].

## 6.1 Konzept zur Verarbeitung der Prozeßdaten

Die folgenden Untersuchungen basieren vollständig auf der in **Kapitel 4** vorgestellten multisensoriellen Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen. Das Konzept zum Aufbau des Kontrollsystems sieht vor, daß die Diagnose der Anlagenparameter offline, d.h. nach dem Schweißprozeß erfolgen soll. In diesem Sinn wird im weiteren Verlauf der Ausführungen auch von einer adaptiven Kontrolle gesprochen.

Als relevante Schweißaufgabe wird die Einzelpunkt-Überlappschweißverbindung gewählt, so daß zur Erzeugung einer Datenbasis die aus den Untersuchungen zum Prozeßmodell bekannten Signalmerkmale verwendet werden können. Vor diesem Hintergrund werden die auf dem Leitrechner abgespeicherten Rohdatensätze gemäß des in **Kapitel 5** vorgestellten Verfahrens zur Feature-Extraktion aufbereitet und innerhalb der Merkmalmatrix strukturiert abgelegt. Die Prozeßinformationen können im Anschluß daran, entsprechend der Darstellung in **Bild 6.1**, der unscharfen Verarbeitung zugeführt werden.



*Bild 6.1 Konzept zur Verarbeitung der Prozeßsignale*

Eine detaillierte Analyse der einzelnen Merkmalwerte bzgl. der untersuchten Prozeßparameter führt zur Ermittlung signifikanter Signalcharakteristiken. Dabei werden innerhalb eines Versuchsprogramms spezifizierte Prozeßzustände eingestellt, die anhand der geeigneten Signalmerkmale zu identifizieren sind. Auf Basis der vorher vereinbarten Prozeßparameter werden separat arbeitende Einheiten, sog. Fuzzy-Interfaces implementiert, welche die ausgewählten Signal-Features in geeigneter Form sowohl fuzzifizieren als auch defuzzifizieren. Durch eine logische Verknüpfung von mehreren Fuzzy-Interface Eingängen bzw. eine Reihenschaltung unterschiedlicher Inferenzebenen, soll abschließend eine adaptive Prozeßkontrolle ermöglicht werden. Ziel ist es, durch den Aufbau der Inferenzmaschine eine redundante und somit verbesserte Identifikation der jeweils betrachteten Prozeßparameter zu erreichen.

### 6.1.1 Analyse der Signalmerkmale

Bei der Analyse der einzelnen Prozeßsignale stehen sowohl die Abhängigkeit bzgl. der untersuchten Prozeßparameter als auch die statistische Streubreite der einzel-

nen Signalmerkmale im Vordergrund. Ziel ist die Erzeugung von sog. Referenzmustern bzgl. der untersuchten Signalmerkmale. Dazu werden systematisch bekannte Prozeßzustände eingestellt, wie z.B. eine Variation der Fokusslage bei ansonsten konstant gehaltenen Parametern.

In Anlehnung an die Methoden der Regression zielen die durchgeführten Analysen auf die Art des Zusammenhangs zwischen Prozeßparameter  $p$  und Signalmerkmal  $s$ . Je enger sich die Menge der einzelnen Wertepaare  $(p_i, s_i)$  darstellt, was einer kleinen Streubreite entspricht, desto straffer ist die funktionale Verknüpfung. Ein sich über die Variationsbreite einstellender linearer Zusammenhang bzw. eine lineare Korrelation zwischen untersuchter Signalausgabe und Parametereingabe ist dabei besonders hervorzuheben, da in diesem Fall bestmögliche Aussagen über den eingestellten Parameter möglich werden. Es liegt auf der Hand, daß die Streubreite der gemessenen Zielwerte die Eindeutigkeit der Zuordnung unmittelbar beeinflusst.

Hinsichtlich der statistischen Streubreite wird angenommen, daß sich die Merkmalswerte i.S. einer Normalverteilung verhalten. In Anlehnung an [114, 129] wurde diese Hypothese mit einem Chi-Quadrat-Test anhand der Signalenergie  $E_s$  des Detektors #2 exemplarisch überprüft (siehe Bild 6.2).

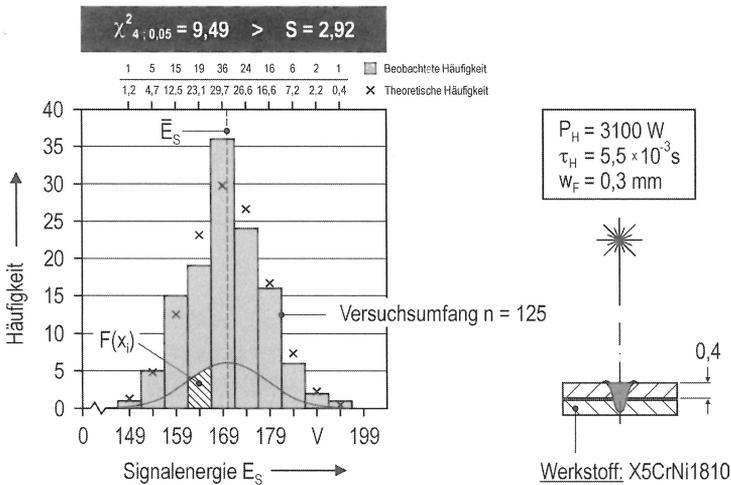


Bild 6.2 Chi-Quadrat-Test des Merkmals „Signalenergie  $E_s$ , Detektor #2“

Bezogen auf Überlappstoß-Schweißversuche mit einem Versuchsumfang von  $n = 125$  Wiederholungen wurden zehn Häufigkeitsklassen mit einer Breite von  $|E_s| = 5 \text{ V}$  gebildet. Im Anschluß erfolgte die Zusammenfassung von Grenzklassen, um die in [129] geforderten Randbedingungen zu erfüllen. Dadurch reduzierte sich die Gesamtanzahl an Klassen auf sieben. Die Berechnung der theoretisch zu erwartenden Häufigkeit pro Klassenintervall  $x_i$  erfolgte auf Basis der partiellen Dichte-

funktion  $F(x_i)$  der Normalverteilung, die sich aus dem arithmetischen Mittelwert der Merkmalwerte sowie der dazugehörigen Standardabweichung ergibt.

Durch den Vergleich von berechneter und beobachteter Häufigkeit, unter Einbeziehung einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 0,05, konnte auf Basis der tabellierten Signifikanzschranke  $S$  die Hypothese bestätigt werden, daß die Merkmaldaten einer Normalverteilung folgen. Für die weiteren Untersuchungen wird deshalb für die stochastische Verteilung der einzelnen Signalwerte angenommen, daß sie gegen eine Normalverteilung konvergiert.

### 6.1.2 Konvertierung der Signalmerkmale

Grundsätzlich besteht ein Fuzzy-Interface sowohl auf seiner Eingangsseite als auch auf der Ausgangsseite aus einer festgelegten, die jeweilige Diskretisierung repräsentierenden Anzahl an Zugehörigkeitsfunktionen. Eine formelle Verknüpfung zwischen Meßwert und Ausgabewert anhand parametrischer Standardfunktionen wird so möglich<sup>1</sup>. Für das hier verfolgte Ziel, Prozeßparameter zu identifizieren, wird eingangsseitig als auch ausgangsseitig die gleiche Diskretisierung angewendet, so daß die Aufteilung der sog. linguistischen Variablen<sup>2</sup> der Anzahl an Parameterstufen entspricht.

#### Fuzzifizierung

Innerhalb der folgenden Untersuchung wird vorausgesetzt, daß die Eingangsdaten einer Normalverteilung folgen. Demzufolge werden zur unscharfen Abbildung bzw. Transformation der Meßwerte in den jeweils entsprechenden Erfüllungsgrad bzw. Wahrheitswert  $\mu_e$  statistisch ermittelte Gauß-Zugehörigkeitsfunktionen verwendet, die in [130] gemäß (Gl. 6.1) definiert sind.

$$\mu_e(x) = \exp \left[ \frac{-(x - \bar{x})^2}{2 \cdot \sigma^2} \right] \longrightarrow \mu_e(x) \in [0, 1] \quad (\text{Gl. 6.1})$$

Die Übertragung der gemessenen und durch Extraktion ermittelten Merkmalwerte  $x$  erfolgt dabei durch abschnittsweise Zuordnung (mapping) über die Mittelwerte  $\bar{x}$ , unter Einbeziehung der jeweiligen Varianzen  $\sigma$  der einzelnen Referenzklassen<sup>3</sup>. Die

<sup>1</sup> In Anlehnung an die Regelungstechnik kann auch davon gesprochen werden, die Meßgröße am Eingang in geeigneter Form zu transformieren, um daraus die ausgegebene Stellgröße abzuleiten.

<sup>2</sup> Als linguistische Variable soll im weiteren Verlauf eine Art numerische Variable verstanden werden, die, anstatt eines einzigen festen Wertes, ein definiertes Werte-Intervall annehmen kann.

<sup>3</sup> Als Referenzklasse wird die experimentell erzeugte Menge der Signalmerkmale verstanden, die für die Datenanalyse zur Verfügung steht. Demzufolge wird der Merkmalbereich durch die Anzahl der Wiederholungsversuche „symptomatisch“ angenähert.

projizierte Bildmenge erstreckt sich dabei über das reelle Einheitsintervall<sup>1</sup>. Dementsprechend wird sowohl durch die Diskretisierung bzw. Partitionierung des Parameterfelds innerhalb der Versuchsmatrix als auch durch die Anzahl an Wiederholungsversuchen die Auslegung und Güte des Fuzzy-Interfaces bestimmt.

Bei der Auswahl der ausgangsseitigen Zugehörigkeitsfunktionen  $\mu_a(x)$  wurden durchgängig einfache Dreiecksfunktionen festgelegt, die sich bzgl. der Stützstellen bzw. Parameterstufen symmetrisch verteilen und sich im Erfüllungsgrad  $\mu_e = 0,5$  schneiden<sup>2</sup>. Die Übertragung der Erfüllungsgrade bzw. der Prämissen am Interface-Eingang in die entsprechenden Zugehörigkeitsfunktionen auf der Ausgangsseite bzw. den Konsequenten erfolgt nach der in (Gl. 6.2) dargestellten Abtrennregel (clipping), bei der jeweils die gewichtete Zugehörigkeitsfunktion  $\tilde{\mu}$  durch Konjunktion (UND) der Einzelkonsequenten anhand des sog. min-Operators<sup>3</sup> bestimmt wird.

$$\tilde{\mu}(x) = \mu_e(x) \cap \mu_a(x) = \min[\mu_e(x), \mu_a(x)] \quad (\text{Gl. 6.2})$$

Für den häufig auftretenden Fall, daß durch Überlagerung der Merkmalbereiche in- folge Signalrauschens mehrere Konsequenten und folglich mehrere Ergebnismengen  $\tilde{\mu}_1 \dots \tilde{\mu}_n$  bei der Verarbeitung einer Eingangsgröße involviert sind, bedarf es zusätzlich einer zusammenfassenden Operation, der sog. Aggregation.

$$\hat{\mu}(x) = \tilde{\mu}_1(x) \cup \dots \cup \tilde{\mu}_n(x) = \max[\tilde{\mu}_1(x), \dots, \tilde{\mu}_n(x)] \quad (\text{Gl. 6.3})$$

Gemäß (Gl. 6.3) kann die aggregierte Zugehörigkeitsfunktion  $\hat{\mu}(x)$  bzw. die Konklusion durch eine Disjunktionsoperation (ODER) an sämtlichen gültigen Ergebnismengen, über den sog. max-Operator, erzeugt werden.

## Defuzzifizierung

Der Schritt der Interpretation der unscharfen Werte beinhaltet die Aufgabenstellung, exakte Zahlen- bzw. Ausgabewerte  $y$  aus den gewichteten bzw. aggregierten Zugehörigkeitsfunktionen abzuleiten bzw. zu re-transformieren. Die derzeit dominierenden Methoden [126] zur Auflösung von speziell mehrelementigen Ergebnismengen stützen sich auf den Flächenschwerpunkt (center of area, COA) und den Mittelwert der Maximalwerte (mean of maximum, MOM). Dabei wird der Ausgabewert im Fall der COA-Methode durch die Abszisse des Flächenschwerpunktes der resultierenden

<sup>1</sup> In Analogie zur klassischen Aussagenlogik bedeutet diese Forderung, daß sich der Erfüllungsgrad einer Aussage zwischen „trifft vollständig zu“ ( $\mu_e = 1$ ) und „trifft nicht zu“ ( $\mu_e = 0$ ) befindet.

<sup>2</sup> Die Bestimmung und Aufstellung der Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Variablen besitzt innerhalb der Literatur generell einen erfahrungsbasierten bzw. subjektiven Charakter. Im vorliegenden Fall werden deshalb die häufig eingesetzten [127] Dreiecksfunktionen angewendet.

<sup>3</sup> Bei dieser Methode wird die ausgangsseitige Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_a(x)$  auf Höhe des Erfüllungsgrades „abgeschnitten“.

bzw. aggregierten Zugehörigkeitsfunktion bestimmt, während für die Berechnung bei der MOM-Methode der maximale Zugehörigkeitsgrad sämtlicher beteiligter Einzelkonsequenten ausschlaggebend ist. Der Unterschied zwischen den beiden Methoden zeigt sich bei Betrachtung des Ausgabewertebereichs: Während für COA auch Zwischenwerte erzeugt werden, erzeugt MOM sprung- bzw. stufenförmige Ausgaben auf Basis der vereinbarten diskreten Stützstellen.

### 6.1.3 Inferenzmaschine

Mit Blickrichtung auf eine zuverlässige bzw. robuste Überwachung der relevanten Prozeßparameter müssen konkrete Voraussetzungen gewährleistet sein [131]. Der Fall einer Fehldiagnose, weil ein oder mehr Signalmerkmale ausfallen und die Datenbasis demzufolge evtl. sich widersprechende Informationen beinhaltet, muß vermieden werden. Weiterhin ist die Diagnose durch das Zusammenziehen und den Vergleich mehrerer Signalmerkmale abzusichern. Zeigt sich dabei innerhalb der eingesetzten Detektoren keine mehrheitliche Übereinstimmung bei der Bewertung des Systemzustandes, so muß dieser kritische Fall entsprechend behandelt werden.

Anhand des in Bild 6.3 dargestellten Ablaufdiagramms, soll die für die folgenden Untersuchungen spezifizizierte generelle Funktionsweise der Inferenzmaschine kurz erläutert werden.

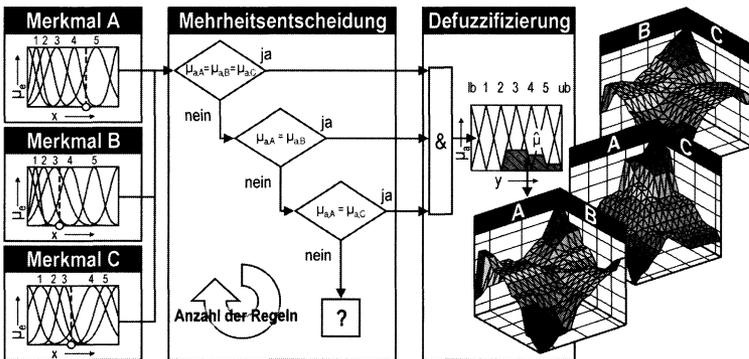


Bild 6.3 Konzept der Inferenzmaschine

Sämtliche Operationen werden auf Basis der max-min-Inferenz nach Mamdani [127] implementiert; d.h. die aktiven Konsequenten werden in einem ersten Schritt gemäß der min-Operation auf den größten gemeinsamen Erfüllungsgrad begrenzt, um im Anschluß daran, über die gesamte Anzahl der beteiligten reduzierten Konsequenten, die logische Vereinigungsmenge zu bilden, was auch als sog. Aggregation bezeichnet wird. Unter der Voraussetzung, daß beispielsweise auf der Eingangsseite die

fuzzifizierten Signalmerkmale A, B und C in Form der aktuellen Erfüllungsgrade vorliegen, werden die daraus resultierenden drei Einzel-Konsequenzen einem richtigkeitsfunktionalen „WENN – DANN“ Regelwerk bzw. einem Mehrheitsentscheid [131] zugeführt. Unter der Abarbeitung der Regeln und der Bestimmung der entsprechenden Schlußfolgerung wird dabei die eigentliche Inferenz verstanden. Nur für den Fall, daß entweder alle drei oder mindestens zwei Konsequenzen derselben Ausgangsmenge angehören, folgert das System eine eindeutige Erkennung. Das Regelwerk bildet anschließend über den min-Operator gemäß (Gl. 6.4) die Schnittmenge aus den korrespondierenden linguistischen Variablen  $\mu_{a,A-C}$ .

$$\tilde{\mu}(x) = \min[(\mu_{e,A}(x), \mu_{a,A}(x)); (\mu_{e,B}(x), \mu_{a,B}(x)); (\mu_{e,C}(x), \mu_{a,C}(x))] \quad (\text{Gl. 6.4})$$

Widersprechen sich die drei Terme, liegt ein unbekannter Parameterzustand (?) vor und den betreffenden Ausgabemengen wird entsprechend keine gewichtete Zugehörigkeitsfunktion zugewiesen, der Konsequent wird zu Null und trägt nicht zur Identifikation des Prozeßparameters bei.

Nach vollständiger Anwendung sämtlicher Regeln innerhalb des Regelwerks kann durch die abschließende Bildung der sog. Konklusion und Anwendung der Defuzzifizierungsmethode ein exakter Ausgabewert berechnet werden. Unter Berücksichtigung eines diskret abgestuften Versuchsprogramms lassen sich so experimentelle E/A-Kennflächen erzeugen, die anhand ihrer Ausprägung in anschaulicher Weise die Dynamik bzw. das Übertragungsverhalten der Inferenzmaschine bzgl. der eingesetzten Signalmerkmale widerspiegeln.

## 6.2 Experimentelle Grundlagen

Den Versuchsträger für die Untersuchung der Prozeßkontrolle stellen Standard Einzelpunkt-Überlappschweißverbindungen zwischen zwei X5CrNi1810 Edelstahlblechen der Blechstärke  $s = 0,4$  mm dar. Als Versuchsmethodik wird eine praxisgerechte, vollfaktorielle Parameterkombination [3] gewählt, bei der alle möglichen Kombinationen der Prozeßgrößen auftreten. Effekte innerhalb der Prozeßsignale, die durch Wechselwirkung der Parameter untereinander entstehen, können dadurch bei der Analyse der Signale berücksichtigt werden.

Hinsichtlich der zu überwachenden Laserparameter konzentrieren sich die einleitenden Betrachtungen auf die Pulsleistung und die Fokusslage. Dabei wird bei der Betrachtung der Pulsleistung speziell auf die tatsächlich auf dem Werkstück nutzbare Laserleistung abgestellt.

Als Entscheidungskriterium für die Auswahl der Parametergrenzen, innerhalb derer das Kontrollsystem spezifiziert werden sollte, wurde das Qualitätskriterium der statischen Zugfestigkeit entsprechend [132] durch Scherzugprüfung<sup>1</sup> herangezogen. Einerseits besitzt diese Maßzahl, insbesondere für Anwendungen in der Feinwerktechnik, wo über die Schweißnaht häufig mechanische Kräfte übertragen werden müssen, eine hohe praktische Relevanz, andererseits stellen die festgestellten Festigkeitswerte eine objektive und leicht übertragbare Bewertungsbasis für den Anwender dar.

Die Kontrolle der vorherrschenden Prozeßatmosphäre ist ebenfalls Gegenstand der Untersuchungen, so daß die Erkennung von bei der Schweißbearbeitung typischerweise verwendeten Inert- bzw. Prozeßgasen ermöglicht werden soll.

### 6.2.1 Festlegung der Parametergrenzen

Die Bestimmung der Parametergrenzen, bzgl. derer das Fuzzy-Kontrollsystem zu spezifizieren ist, orientiert sich an zu erwartenden Toleranzbreiten. Für die Pulsleistung wird von einer zu erwartenden Schwankungsbreite von  $\Delta P_H = \pm 5\%$  [23] um den optimierten Betriebspunkt ausgegangen. Bei der Fokusslage zeigte sich, daß mit der im Bearbeitungskopf eingesetzten Onaxis-CCD-Kamera (siehe Bild 4.3) eine Positioniergenauigkeit in Laserstrahlachse von  $\Delta z_F \approx \pm 0.4$  mm erzielt werden kann. Für die Festlegung der Bereichsgrenzen wird diese Streubreite auf den zweifachen Wert ausgedehnt.

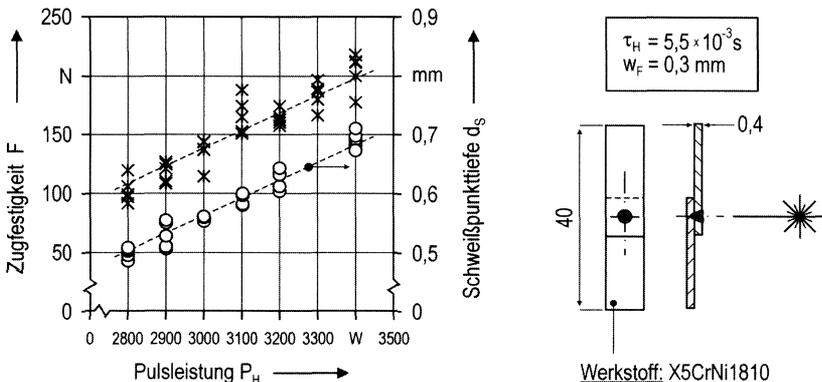
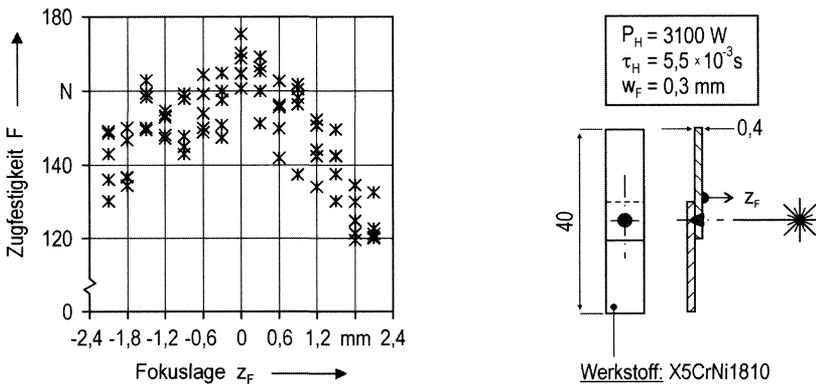


Bild 6.4 Abhängigkeit der Scherzugfestigkeit und der Einschweißtiefe von der Pulsleistung

<sup>1</sup> Einachs-Zugprüfmaschine (Fa. UTS), Kraftmeßdose  $F_{\max} = 500$  N,  $v = 0,4$  mm/min.

Der Einfluß der Pulsleistung auf die Verbindungsfestigkeit von geschweißten Proben im Einzelpunkt-Überlappstoß ist in **Bild 6.4** dargestellt. Deutlich erkennbar ist, daß die ertragbare Scherzugbelastung proportional zur eingestrahlten Pulsleistung ansteigt. Speziell in dem hier gezeigten Leistungsbereich besteht zudem ein linearer Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Einschweißtiefe, was in [6] zugleich als Nachweis für einen vorherrschenden Tiefschweißprozeß in Betracht gezogen wird. Bei einer Pulsleistung von  $P_H = 2900$  W erreicht die mittlere Zugfestigkeit  $F$  einen Wert von ca. 140 N, was einer Einbuße von ca. 20% entspricht, bezogen auf den Ausgangswert von  $F = 170$  N bei  $P_H = 3100$  W Pulsleistung. Selbst unter der Voraussetzung eines optimal arbeitenden Lasersystems können, z.B. verschmutzte oder beschädigte Optiken die abgegebene Leistung deutlich reduzieren. Der gegenläufige Fall eines Anstiegs der Pulsleistung führte im Versuchsfeld zwar zu einer größeren Verbindungsfestigkeit, doch wiesen die Schweißnähte bereits bei geringer Leistungsüberhöhung verstärkten Nahtaufwurf bzw. Nahteneinfall auf. Eine Steigerung der Pulsleistung über 3200 W ( $\approx +5\%$ ) führte bereits zur teilweisen Bildung von Schweißspritzern, bei Pulsleistungen oberhalb von 3300 W konnten im Gegenblech starke thermische Verfärbungen erkannt werden.

Bei Betrachtung der Auswirkung einer veränderten Fokuslage auf die Scherzugfestigkeit in **Bild 6.5** zeigt sich erwartungsgemäß, daß die Festigkeit mit anwachsender Defokussierung symmetrisch zur Nulllage ( $z_F = 0$ ) abnimmt.



**Bild 6.5** Abhängigkeit der Scherzugfestigkeit von der Fokuslage

Bei direktem Vergleich zur Pulsleistung sind die Veränderungen in der Verbindungsfestigkeit jedoch von geringerem Ausmaß. Generell läßt sich innerhalb der betrachteten Spannweite von  $\Delta z_F \approx \pm 0.8$  mm bzgl. der untersuchten Pulsleistung  $P_H = 3100$  W eine Abweichung in der Festigkeit von ca. 20 N ausmachen, was vom Ergebnis her betrachtet in etwa der 5%-Eingriffsgrenze für die Pulsleistung entspricht.

In Anlehnung an die Untersuchungen aus [6] wird die standardmäßige Prozeßatmosphäre Umgebungsluft (L) durch die Prozeßgase Stickstoff (N<sub>2</sub>) und Argon (Ar) beeinflusst. Eine explizite Untersuchung der Auswirkung der einzelnen Prozeßgase auf das jeweilige Schweißergebnis wurde nicht durchgeführt.

**6.2.2 Versuchsmethodik**

Die innerhalb des Bearbeitungskopfes für die Schweißversuche ausgewählte Konfiguration der Sensortechnik basierte auf den in **Tabelle 5.3** markierten Detektoren. Vorversuche ergaben, daß sowohl die offaxis Detektion als auch der Luftschall einer verhältnismäßig großen Streuung der Meßergebnisse unterliegen. Eine bzgl. des geplanten Versuchsprogramms differenzierte Parameteridentifikation wurde durch die große Varianz der Signalwerte verhindert, so daß deshalb auf eine Aktivierung der Detektoren für die folgenden Untersuchungen verzichtet wurde.

Nummer d. Detektors	#1	#2	#3	#4	#5(Ge)	#5(Si)	#6
Aktiviert / Deaktiviert	●	●	-	●	●	●	-

Tabelle 6.1 Eingesetzte Detektoren

Der in **Bild 6.6** skizzierte Versuchsaufbau zeigt die zusätzliche, angewinkelt installierte offaxis Schutzgaszuführung, die in unmittelbarer Nähe zur Bearbeitungszone die eingesetzten Arbeitsgase Argon und Stickstoff mit einer konstanten Durchflußmenge von 500 l/h einbringt.

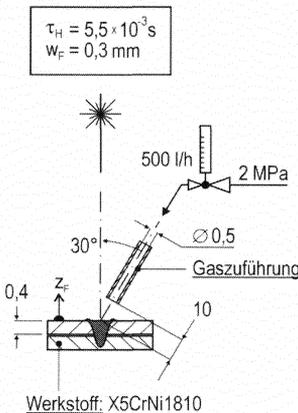


Bild 6.6 Versuchsaufbau

Prozeßgas	Pulsleistung	Fokusslage
Luft (L)	P <sub>H</sub> = 2900 W	z <sub>F</sub> = - 0,8 mm
Argon (Ar)	P <sub>H</sub> = 3000 W	z <sub>F</sub> = - 0,4 mm
Stickstoff (N <sub>2</sub> )	P <sub>H</sub> = 3100 W	z <sub>F</sub> = 0,0 mm
	P <sub>H</sub> = 3200 W	z <sub>F</sub> = +0,4 mm
	P <sub>H</sub> = 3300 W	z <sub>F</sub> = +0,8 mm
a		
Prozeßgas	Pulsleistung	Fokusslage
Luft (L)	P <sub>H</sub> = 2800 W	z <sub>F</sub> = - 1,0 mm
Argon (Ar)	P <sub>H</sub> = 2950 W	z <sub>F</sub> = - 0,6 mm
Stickstoff (N <sub>2</sub> )	P <sub>H</sub> = 3000 W	z <sub>F</sub> = - 0,3 mm
	P <sub>H</sub> = 3250 W	z <sub>F</sub> = 0,0 mm
	P <sub>H</sub> = 3400 W	z <sub>F</sub> = +0,3 mm
		z <sub>F</sub> = +0,6 mm
		z <sub>F</sub> = +1,0 mm
b		

Tabelle 6.2 Versuchsmatrix für a) Training und b) Test

Auf Basis der experimentellen Konstellation wurden mit der in **Tabelle 6.2a** vorgestellten Versuchsmatrix vollfaktorielle Versuchspläne mit jeweils  $n = 5$  Wiederholungsmessungen durchgeführt. Dementsprechend ergibt sich ein gesamter Versuchsumfang von  $m = 375$  Schweißproben. Anhand der aufgezeigten Parameterstufung erfolgte gleichfalls die Diskretisierung der eingesetzten Fuzzy-Interfaces bzw. die Festlegung der Anzahl an Fuzzy-Variablen. Die individuelle Auslegung der eingeangsseitigen Gauß-Zugehörigkeitsfunktionen basierte auf der meßbaren Versuchstatistik, die sich aus den jeweiligen Parameterkombinationen und der Wiederholungsanzahl ergab. Die in **Tabelle 6.2b** gelisteten Prozeßparameter dienten dazu, eine objektiv-quantitative Bewertung der einzelnen Kontrollinstanzen zu ermöglichen. Da die zweite Versuchsmatrix auch Zwischen- bzw. Randwerte enthält, für welche die Verarbeitungseinheiten nicht explizit ausgelegt werden, soll die Fähigkeit der einzelnen Verarbeitungseinheiten bzgl. Interpolation zwischen bzw. Extrapolation außerhalb der trainierten Werte aufgezeigt werden.

$$|\text{Err}_x| = \text{abs} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - x_i^* \right) \quad (\text{Gl. 6.5})$$

Für die quantitative Bewertung der Kontrollgüte der einzelnen Fuzzy-Module wird nach **(Gl. 6.5)** der absolute mittlere Fehler  $|\text{Err}|$  zwischen den tatsächlichen und den berechneten Parameterwerten berechnet.

### 6.3 Fuzzy-Verarbeitung der Prozeßdaten

Die Beschreibung der unscharfen Verarbeitung der Prozeßsignale konzentriert sich innerhalb der folgenden Ausführungen auf jeweils exemplarische Signalmerkmale, die bzgl. der betrachteten Prozeßparameter den Informationsfluß vollständig repräsentieren. Für die Bewertung der Verarbeitungseinheiten, bzw. Verarbeitungsstrategien werden jeweils sämtliche Versuchsdaten von der betrachteten Kontrollinstanz ausgewertet, um im Anschluß auf Basis der kompletten Datenbasis einen übergreifenden Ausgabefehler zu erhalten.

Als Plattform kommt die Fuzzy-Logic Toolbox von MATLAB<sup>®</sup> Version 2.0 zum Einsatz, die als PC basierte Systemsoftware schnell in das bestehende Konzept zur Datenverarbeitung integriert werden konnte.

### 6.3.1 Kontrolle der Prozeßatmosphäre

Wie bereits geschildert wird bei Einsatz von Inert- bzw. Edelgasen, im Vergleich zum Schweißprozeß unter Umgebungsluft, der Schweißpunktdurchmesser durch die unterdrückte Oberflächenoxidation um ca. 50% vergrößert [6]. Der dadurch erwartete Verzögerungseffekt bei der Abnahme des langwelligen Temperatur-Signals nach Pulsende läßt sich durch die Auswertung des Germanium-Signals (Detektor #5) ermessen. Betrachtet man den Zeitpunkt des Absinkens ( $t = t_g$ , (**Bild 4.17**)), so wird deutlich, daß sich, im Vergleich zur Umgebungsluftatmosphäre, bei der Prozeßführung sowohl unter Stickstoff als auch Argon eine erkennbare Verzögerung einstellt.

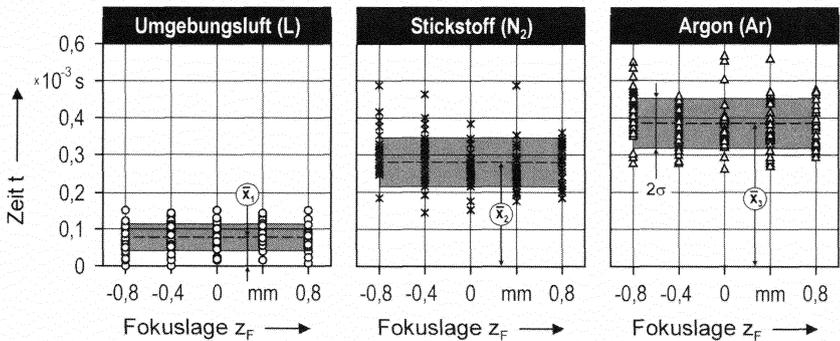


Bild 6.7 Merkmal  $t_g$  Detektor #5 (Ge) für Pulsleistungen  $P_{st} = [2900 \dots 3300 \text{ W}]$

Die in **Bild 6.7** entsprechend ausgewerteten Zeitpunkte markieren bzgl. der arithmetischen Mittelwerte  $\bar{x}$  eine Differenz zur Umgebungsluft, die sich bei ca. 0,2 - 0,3 ms bewegt. Auffallend ist, daß sich dieser zeitliche Unterschied relativ unabhängig, sowohl von der betrachteten Pulsleistung als auch der eingestellten Fokusbilanzage, im Signalverhalten manifestiert. Folglich kann mit dieser Eigenschaft des Ge-Signals über die gesamte Versuchsmatrix hinweg eine Identifikation der vorherrschenden Prozeßatmosphäre erfolgen.

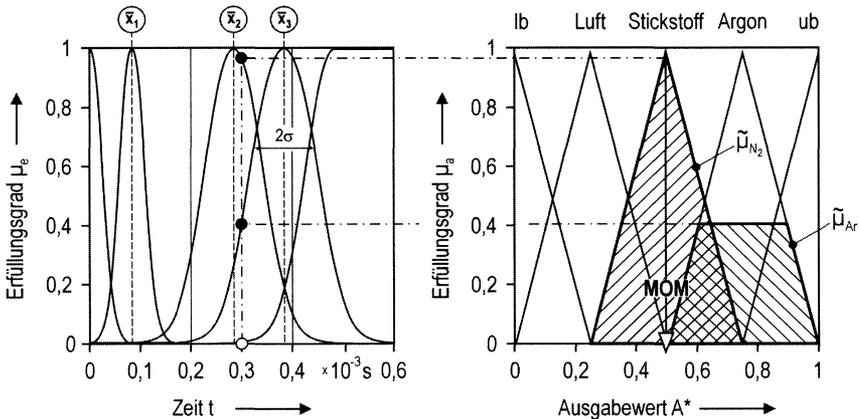
		Prozeßatmosphäre		
		Luft	N <sub>2</sub>	Ar
$t_g$ Detektor #5 (Ge) →	Mittelwert [ $\times 10^{-3} \text{ s}$ ]	0,08	0,28	0,38
	Varianz [ $\pm 3 \cdot \sigma$ ]	0,12	0,19	0,20
$E_s$ Detektor #4 →	Mittelwert [V]	265,45	392,06	482,59
	Varianz [ $\pm 3 \cdot \sigma$ ]	64,80	92,82	79,18

Tabelle 6.3 Merkmalanalyse

Als weiteres Signalmerkmal zur Diagnose der Prozeßatmosphäre wurde die Signalenergie  $E_s$  des Metaldampf-Detektors (#4) erkannt. Aufgrund des geringen Ionisie-

nungspotentials von Argon und Stickstoff [2, 13] resultiert die Einströmung der beiden schweren Arbeitsgase in einer Erhöhung der Elektronendichte innerhalb der direkten Prozeßumgebung. Bei der Wechselwirkung mit dem Nd:YAG-Strahl kommt es dadurch zu einer verstärkten Energieübertragung, was bei Entstehung der Metall-dampf-atmosphäre im Moment der Einschweißphase zu einer meßbaren Erhöhung der abgestrahlten Leuchtintensität führt.

Entsprechend der Versuchsmatrix für die Trainingsdaten basieren die in **Tabelle 6.3** gezeigten Ergebnisse für beide untersuchte Signalmerkmale auf jeweils 125 Meßwerten pro untersuchter Prozeßumgebung. Die auf den Trainingsdaten aufbauende Spezifikation der beiden Fuzzy-Verarbeitungseinheiten ist in **Bild 6.8** für das Signalmerkmal des Detektors #5 (Ge) beispielhaft dargestellt.



*Bild 6.8 Fuzzy-Interface für Merkmal  $t_g$ , Detektor #5 (Ge)*

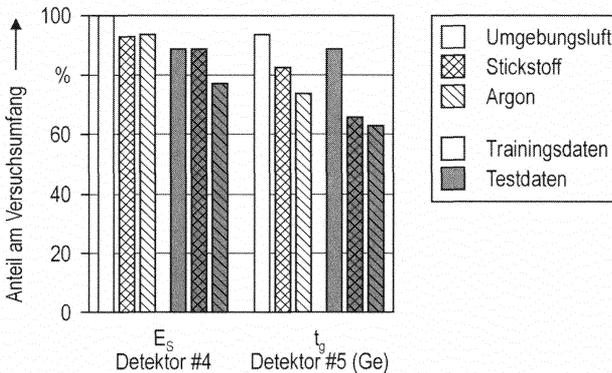
Als Eingabebereich für die merkmalseitige Zugehörigkeitsfunktion wird, in Anlehnung an die Meßergebnisse, ein festes Zeitintervall von  $t = [0 \dots 0,6 \text{ ms}]$  gewählt. Während sich bei Umgebungsluft eine geringe Varianz in einer entsprechend schmalen Gauß-Kurve niederschlägt weisen Stickstoff und Argon eine erkennbar breitere Streuung der Meßergebnisse auf. Gleichzeitig zeigt sich hier eine deutliche Überlappung der beiden Merkmalbereiche durch die geringere Distanz beider Erwartungswerte zueinander. Die Festlegung der Rand-Zugehörigkeitsfunktionen, in Form von „halben“ Gauß-Funktionen, erfolgt derart, daß bei Eintreffen der Erwartungswerte für Luft bzw. Argon der Erfüllungsgrad  $\mu = 1$  ausgegeben wird. Die Stützstellen der Dreiecksfunktionen am Interface-Ausgang wurden auf die Werte 0,2 für Umgebungsluft, 0,5 für Stickstoff und 0,75 für Argon gelegt bzw. auf 0 und 1 für die Rand-Zugehörigkeitsfunktionen lb (lower bound) und ub (upper bound).

Der Ausgabewert  $A^*$  wird gemäß **(Gl. 6.6)** über die MOM-Methode aus den aktiven gewichteten Zugehörigkeitsfunktionen gewonnen, so daß z.B. für einen Merkmalwert

von  $t_g = 0,3$  ms das Prozeßgas Stickstoff ( $A^* = 0,5$ ) identifiziert wird. Die sich durch die MOM-Konstellation ergebende stufenförmige E/A-Kennlinie entspricht der gewünschten Auflösung, da für die Diagnose des Prozeßgases eine Interpolation von Zwischenwerten nicht sinnvoll ist.

$$A^*(t_g) = \text{MOM}(\tilde{\mu}_L(t_g), \tilde{\mu}_{N_2}(t_g), \tilde{\mu}_{Ar}(t_g)) \quad (\text{Gl. 6.6})$$

Die vollständige Verarbeitung der 125 Trainingsdaten und die daran angeschlossene Diagnose der 35 Testdaten pro Prozeßumgebung führt zu den in **Bild 6.9** gezeigten Erkennungsgüten.



*Bild 6.9 Identifikation der Prozeßatmosphäre*

Generell weist hier die Auswertung der Metaldampf-Signalenergie, insbesondere für Umgebungsluft, an den Trainings- und Testdatensätzen eine höhere Diagnosezuverlässigkeit auf als das Germanium-Merkmal. Bei Betrachtung der expliziten Meßwerte in **Tabelle 6.3** findet sich ein offensichtlich entscheidender Grund innerhalb der für Detektor #4 ausgeprägteren Trennung der einzelnen Merkmalbereiche. Setzt man weiterhin die  $3\sigma$ -Streuweiten zu ihren jeweiligen Erwartungswerten in Relation, so wird deutlich, daß während die einzelnen Signalenergien des Detektors #4 um ca. 25% schwanken, sich der Abstiegszeitpunkt des Detektors #5 (Ge) generell nur mit einer wesentlich größeren Meßunsicherheit von über 50% bestimmen läßt. Da jedoch für beide Signalmerkmale bei Umgebungsluft die besseren Resultate erreicht werden als bei Stickstoff und Argon stellt sich dementsprechend auch die gleiche quantitative Reihung bzgl. der Erkennungshäufigkeit ein. Das gleiche Verhalten, wenn auch auf niedrigerem Niveau, tritt bei Verwendung des Testdatensatzes auf, wobei hier insbesondere für Stickstoff und Argon die Qualität des Ge-Merkmals deutlich abnimmt.

### 6.3.2 Kontrolle der Pulsleistung

Die Kontrolle der Pulsleistung kann prinzipiell an drei Stellen innerhalb des Lasersystems geschehen. Ein Meßsignal, das idealerweise über einen Laserleistungsdetektor direkt am Auskoppelfenster des Resonators aufgezeichnet wird, gibt Aufschluß über den aktuellen Zustand der Strahlerzeugung. In modernen Lasersystemen wird der Rohstrahl in der Regel dadurch bereits über werkseitig in die Lasersteuerung installierte Systeme überwacht. Die über den Laserpuls-Monitor (Detektor #1) spezifizierte Kontrolle der am Ende des LWL ankommenden Strahlleistung ermöglicht Rückschlüsse auf evtl. Leistungsverluste innerhalb der flexiblen Strahlführung bei fasergekoppelten Lasersystemen. Eine zusätzlich realisierte Auswertung der am Werkstück tatsächlich nutzbaren Leistungsanteile anhand von primären bzw. sekundären Prozeßemissionen repräsentiert den aktuellen Zustand der jeweiligen Optiken zur Strahlformung und der häufig eingesetzten Schutzgläser.

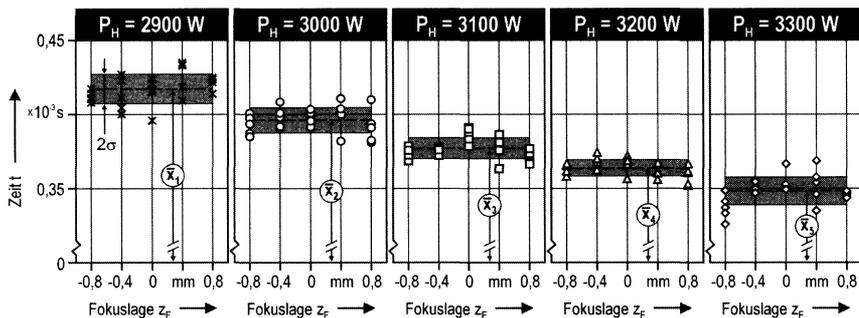


Bild 6.10 Merkmal  $t_0$  Detektor #4 (Prozeßatmosphäre = Umgebungsluft)

Für die Spezifikation der Fuzzy-Kontrollinstanzen werden innerhalb der folgenden Untersuchungen zur Erfassung der Pulsleistung die Signalenergie  $E_S$  des Laserpuls-Detektors (#1) und der Startzeitpunkt  $t_0$  des Metalldampf-Detektors (#4) (siehe Bild 4.8) ausgewertet. Weiterhin zeigen die Ergebnisse bzgl. der Temperaturmessung (Abschnitt 4.3.2) das Potential zur Erfassung der Pulsleistung auf, wobei der Gradient  $dU/dt$  innerhalb der Anstiegsflanke des Silizium-Signals (Detektor #5) ausgewertet wird.

Die Signalenergie des Laserpuls-Detektors verhält sich proportional zur Pulsleistung und weist bzgl. des Versuchsprogramms eine ca. 5%ige  $|3\sigma|$ -Schwankungsbreite innerhalb der Ergebnisse auf (siehe Tabelle 6.4). Diese relativ große Streuung kann entsprechend der Beschreibung auch auf die über das Versuchsprogramm mitlaufende Veränderung der Fokusslage zurückgeführt werden. Der Startzeitpunkt des Metalldampfleuchtens besitzt, gemäß der Darstellung in Bild 6.10, innerhalb der für die Versuche eingestellten Pulsleistungen ebenfalls ein annähernd lineares Verhal-

ten, was sich bzgl. der untersuchten Fokuslagen als relativ unempfindlich erweist. Jedoch reagiert das Metaldampf-Signal bei aktivierter Gasströmung unabhängig von der Wahl des Prozeßgases durch einen konstanten ca. 0,1 ms verzögerten Startzeitpunkt.

		Pulsleistung $P_H$ [W]				
		2900	3000	3100	3200	3300
$E_s$ Detektor #1	Mittelwert [V]	679,84	709,74	745,21	782,54	831,17
	Varianz [ $\pm 3 \cdot \sigma$ ]	33,62	34,64	33,41	37,63	32,04
$t_e$ Detektor #4	Mittelwert [ $\times 10^{-3}$ s]	0,42	0,39	0,37	0,36	0,34
	Varianz [ $\pm 3 \cdot \sigma$ ]	0,03	0,02	0,02	0,01	0,03
$dU/dt$ Detektor #5 (Si)	Mittelwert [b.E.]	11,83	12,49	13,59	14,32	15,38
	Varianz [ $\pm 3 \cdot \sigma$ ]	1,48	1,20	1,17	1,33	1,49

Tabelle 6.4 Merkmalanalyse (Prozeßatmosphäre = Umgebungsluft)

Da sich der Einsatz der beiden Arbeitsgase auch anhand eines durchgängig ca. 20% flacheren Anstiegsgradienten innerhalb des abschließend ausgewerteten Si-Signals nachweisen läßt, kann von einer konvektiven Kühlwirkung der Prozeßgase auf die Schmelzbadoberfläche ausgegangen werden, wodurch sich die Erwärmungsphase zeitlich ausdehnt. Beim Entwurf der entsprechenden Fuzzy-Schnittstellen werden deshalb für die einzelnen Prozeßgase voneinander getrennte Eingabeschichten implementiert.

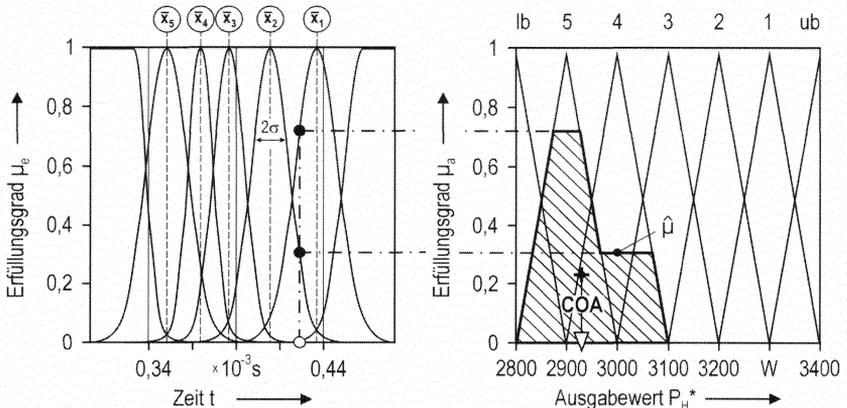


Bild 6.11 Fuzzy-Interface für Merkmal  $t_e$  Detektor #4 (Prozeßatmosphäre = Umgebungsluft)

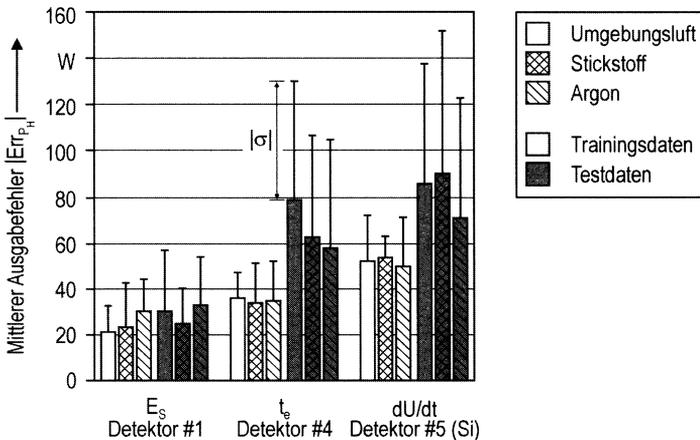
In Bild 6.11 ist das Fuzzy-Interface zur Verarbeitung des Metaldampf-Startzeitpunkts  $t = t_e$  für die Prozeßführung an Umgebungsluft dargestellt. Die Rand-Zugehörigkeitsfunktionen sind hierbei, in Anlehnung an die Konstellation des Fuzzy-Inter-

faces für die Prozeßatmosphäre, so gewählt, daß für die Erwartungswerte  $\bar{x}_1$  und  $\bar{x}_5$  der Erfüllungsgrad  $\mu = 1$  ausgegeben wird.

Die innerhalb der Trainingsdaten untersuchten fünf Leistungsbereiche werden durch die aus **Tabelle 6.4** bekannten Erwartungswerte bzgl. der Merkmalachse positioniert. Der Anzahl entsprechend werden den Stützstellen fünf Dreiecksfunktionen der Ausgabeebene zugewiesen, zzgl. der zwei Randmengen. Durch die Anwendung der COA-Methode zur Defuzzifizierung gemäß (**Gl. 6.7**) wird eine stetige E/A-Kennlinie für den Ausgabewert  $P_H^*$  erzielt, der innerhalb des spezifizierten Leistungsbereichs von  $P_H = 2800 \dots 3400$  W auch Zwischenwerte für die Ausgabe einnehmen kann. Bei einem Vergleich der Ausgabefehler  $|\text{Err}_{P_H}|$  in **Bild 6.12** und den dazugehörigen statistischen Streubreiten, in Form der Standardabweichung  $\sigma$ , zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den drei ausgewählten Signalmerkmalen.

$$P_H^*(t_e) = \text{COA}(\hat{\mu}(t_e)) \tag{Gl. 6.7}$$

Die Signalenergie des Laserpuls-Monitors weist erwartungsgemäß sowohl bzgl. der Trainings- als auch der Testdaten den geringsten Fehler bei der Identifikation auf. Im Mittel bewegt sich die Differenz zwischen Ausgabe und tatsächlicher Pulsleistung zwischen 20 und 30 W, was einer ca. 1% Abweichung entspricht.



*Bild 6.12 Identifikation der Pulsleistung*

Unter Einbeziehung der  $3\sigma$  - Streuungen können angenähert ca. 50 bis 100 W bzw. 1,5 bis 3% an Varianz beobachtet werden. Sowohl bei den Trainingsdaten als auch den Testdaten kann demzufolge die innerhalb der Signalenergie transportierte Unschärfe (siehe **Tabelle 6.4**) deutlich reduziert werden. Speziell bei Berücksichtigung der Testdaten zeigt sich weiterhin, daß die Ergebnisstreuung für den Laser-

puls-Detektor hinsichtlich der nicht trainierten Daten in nur geringem Maße zunimmt, was für die beiden anderen Detektoren generell nicht zutrifft. Allein auf Basis der Trainingsdaten besitzt der Metalldampf-Start eine zur Laserpuls-Signalenergie vergleichbar gute Erkennungsgüte von ca. 35 W, wohingegen der durchschnittliche Trainingsfehler des Si-Merkmals mit über 50 W bzw. 1,5% deutlich höher liegt. Allerdings steigen sowohl die Fehlerwerte für den Metalldampf-Detektor #4 und den Anfangsgradienten des Si-Detektors #5 als auch die Ergebnisstreuung beider Merkmale bei Verarbeitung der Testdaten um annähernd den doppelten Betrag an. Als Erklärung für die deutlich schlechtere Erkennung der Testdaten können zwei Begründungen genannt werden: Erstens konnte auf Basis der statistischen Versuchswiederholung innerhalb der Trainingsdaten offensichtlich noch keine ausreichende Abbildung bzw. Abgrenzung der Merkmaldaten untereinander erreicht werden, so daß die Einzelverarbeitung der nicht trainierten Daten entsprechende Fehlerraten bzw. Schwankungsbreiten erzeugt. Zweitens wirkt sich die zu Beginn der Untersuchung vereinbarte Architektur der Fuzzy-Interfaces nachteilig auf die Erkennung von extremen Randwerten aus. Durch die Installation von „halben“ Dreiecksfunktionen an den Bereichsgrenzen der ausgangsseitigen Fuzzy-Interfaces, in Kombination mit der COA-Defuzzifizierung werden Merkmalwerte, die sehr nah an den Begrenzungen der Intervallbereiche liegen, nur maximal bis zum Flächenschwerpunkt der jeweiligen halben Dreiecksfläche projiziert ( $\Delta P_H^* = \pm 33,3 \text{ W}$ ) [133]. Diese nicht nutzbaren Intervallgrenzen stellen dementsprechend eine systemimmanente Fehlerquelle dar.

### 6.3.3 Kontrolle der Fokusslage

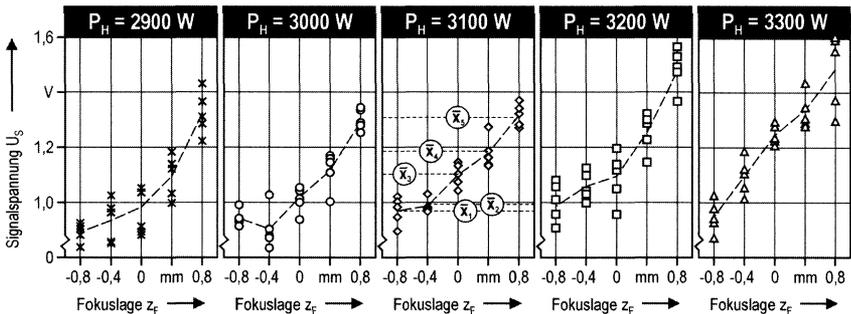


Bild 6.13 Merkmal  $U_s(t_b)$  Detektor #2 (Prozeßatmosphäre = Umgebungsluft)

Vor dem Hintergrund der aus **Abschnitt 4.2.2** bekannten Korrelationen zwischen der Fokusslage und der Signalamplitude des Onaxis-Detektors (#2) werden zur diesbezüglichen Prozeßidentifikation die Signalmerkmale der Onaxis-Signalenergie  $E_S$ , der Onaxis-Maximalamplitude  $U_{S,max}$  und der Onaxis-Spannung im Aufschmelzeitpunkt  $U_S(t_b)$  herangezogen. Im Verlauf der vorangestellten Signalanalyse zeigte

sich jedoch, daß als Vorbedingung, um die Fokuslage anhand der Onaxis-Signalamplituden eindeutig zu identifizieren, die Prozeßatmosphäre und die Pulsleistung bereits bekannt sein müssen. Beide Prozeßparameter wirken sich direkt auf die zentral reflektierte Strahlleistung aus und erlauben dadurch keine nachträgliche Differenzierung der Einflußgrößen.

		Fokuslage $z_f$ [ mm ]					
		-0,8	-0,4	0	0,4	0,8	
$U_S(t_b)$ Detektor #2	⇒	Mittelwert [ V ]	0,96	0,98	1,09	1,17	1,31
		Varianz [ $\pm 3 \cdot \sigma$ ]	0,14	0,07	0,12	0,16	0,12
$U_{S,max}$ Detektor #2	⇒	Mittelwert [ V ]	2,82	2,96	3,44	3,76	3,93
		Varianz [ $\pm 3 \cdot \sigma$ ]	0,36	0,31	0,55	0,36	0,64
$E_S$ Detektor #2	⇒	Mittelwert [ V ]	88,91	93,58	102,14	109,31	116,83
		Varianz [ $\pm 3 \cdot \sigma$ ]	6,57	12,39	12,33	16,07	14,92

Tabelle 6.5 Merkmalanalyse (Pulsleistung  $P_H = 3100$  W, Prozeßatmosphäre = Umgebungsluft)

Die in Bild 6.13 vorgestellten Merkmalwerte repräsentieren die Onaxis-Signalamplituden zum Prozeßzeitpunkt  $t = t_b$  unter Umgebungsluft und sind für die fünf untersuchten Leistungsbereiche getrennt voneinander dargestellt.

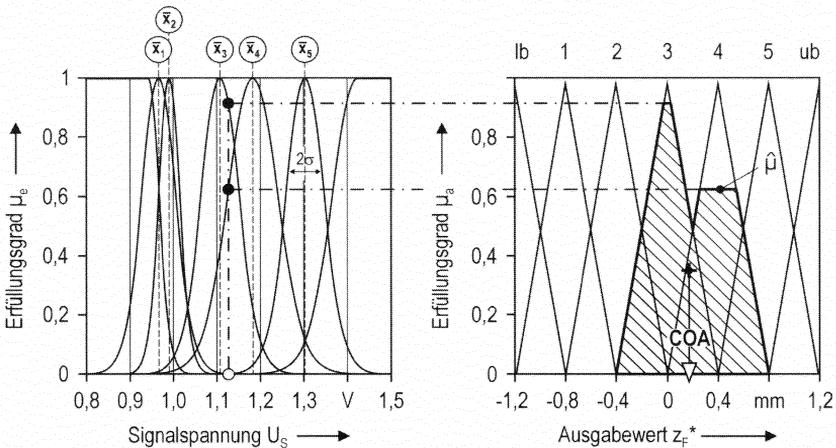
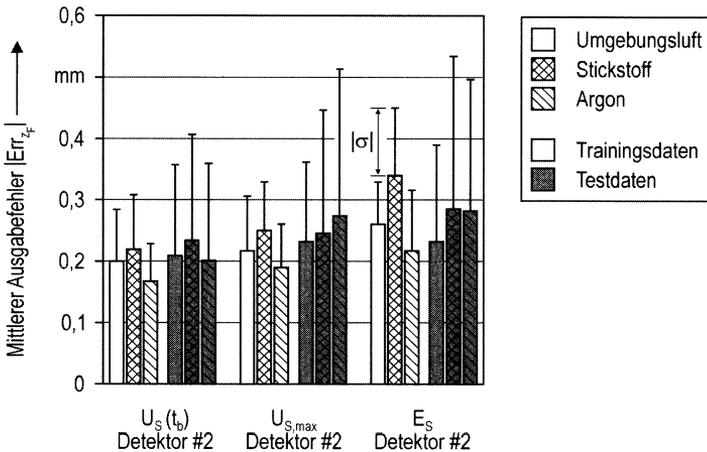


Bild 6.14 Fuzzy-Interface für Merkmal  $U_S(t_b)$  Detektor #2 (Prozeßatmosphäre = Umgebungsluft)

Mit ansteigender Pulsleistung nimmt die mittlere Spannungsamplitude erkennbar zu, wobei jedoch die bekannte charakteristische Ausprägung des Signalverhaltens bzgl. einer sich verändernden Fokuslage (siehe Bild 4.10) durchgehend erhalten bleibt. Bei Betrachtung der zwei anderen analysierten Signalmerkmale des Onaxis-Detektors wird deutlich, daß sämtliche Amplitudenwerte bei Defokussierung durch die opti-

sche Konstellation innerhalb des Bearbeitungskopfes geprägt werden und demzufolge das gleiche Verhalten bzgl. des untersuchten Arbeitsraums aufweisen. Die konkreten Werte der einzelnen Signalmerkmale sind in **Tabelle 6.5** für  $P_H = 3100$  W unter Umgebungsluft repräsentativ dargestellt. Für alle trainierten Leistungsbereiche wird jeweils ein separates Fuzzy-Interface implementiert, die zusammengenommen entsprechend **Bild 6.14** aufgebaut sind. Die interne Struktur wurde in Anlehnung an die Moduln zur Kontrolle der Pulsleistung bestimmt, so daß hier die gleichen Voraussetzungen sowohl bei der Fuzzifizierung als auch Defuzzifizierung gelten.

Die Bewertung der Identifikationsleistung anhand der in **Bild 6.15** dargestellten mittleren Ausgabefehler  $|\text{Err}_{z_f}|$  zeigt auf, daß die einzelnen Fehlerwerte der jeweiligen Signalmerkmale bei den Trainings- und Testdaten nur unwesentlich voneinander abweichen, was unterstreicht, daß von einer repräsentativen Abbildung der drei spezifizierten Merkmalräume ausgegangen werden kann.



**Bild 6.15** Identifikation der Fokuslage

Bei direktem Vergleich der Ergebnisse wird jedoch offensichtlich, daß der Zeitpunkt der Extraktion, d.h. der Ort des Merkmals entlang der Zeitachse, einen spürbaren Einfluß auf die mittlere Identifikationsgüte ausübt. Speziell die Signalenergie, die erst bei Abschluß des Schweißprozesses extrahiert werden kann, zeigt mit einer durchschnittlichen Abweichung von 0,25 mm die größte Fehlerrate auf. Als Begründung für dieses Ergebnis läßt sich primär anführen, daß mit zunehmendem Prozeßfortschritt auch die Störeinflüsse durch hydrodynamische Effekte innerhalb des Schmelzbades anwachsen. Besonders innerhalb der Tiefschweißphase überlagern die dadurch auftretenden Signalfluktuierungen solche Phänomene innerhalb des Prozeßsignals, die von einem defokussierten Arbeitsstrahl herrühren und diesen dadurch zu erkennen geben.

Die in **Tabelle 6.5** gezeigten gleichbleibenden Varianzen innerhalb der Ergebnisse weisen zudem darauf hin, daß die Fluktuationen entsprechend konstant auftreten. Weiterhin läßt sich diesbezüglich bei der Auswertung der Trainingsdaten der Einfluß der Oberflächenspannung auf die Schmelzbaddynamik ausmachen. Durch den Einsatz von Argon als Prozeßgas verringert sich die Oberflächenspannung im Vergleich zu Umgebungsluft und Stickstoff, so daß die Onaxis-Reflexion bzw. die Onaxis-Signalamplitude eine dementsprechend geringere Fluktuation aufweist. Eine Betrachtung der entsprechenden Ausgabefehler für Argon bestätigt diese Theorie.

### 6.4 Adaptive Prozeßkontrolle durch Fuzzy-Inferenz

Die Spezifikation der adaptiven Prozeßkontrolle wird analog der vorangegangenen Ergebnisse ausgelegt. Der Prozeß wird hierarchisch sequentiell analysiert, wobei an erster Stelle die Identifikation der Prozeßatmosphäre erfolgt. Im Anschluß wird die Pulsleistung bestimmt, abschließend erfolgt die Identifikation der Fokuslage. Durch die Verknüpfung der einzelnen Ebenen wird eine automatisierte Verarbeitungsprozedur erreicht, die im Anschluß über die Berechnung des mittleren Ausgabefehlers eine quantitative Bewertung der Erkennungsleistung erlaubt.

#### 6.4.1 Verarbeitung der redundanten Prozeßdaten

Die Verknüpfung der resultierenden Einzel-Konsequenten durch Konjunktion erfolgt entsprechend des Beispiels in **Tabelle 6.6** über einen 2:1 Mehrheitsentscheid, was im konkreten Fall bedeutet, daß nur dann eine gewichtete Zugehörigkeitsfunktion ermittelt bzw. aktiviert wird, wenn mindestens zwei Einzel-Konsequenten auf den selben linguistischen Variablenwert zeigen.

L - Variable	$\mu_{a,A}$	$\mu_{a,B}$	$\mu_{a,C}$	$\tilde{\mu}$
$P_H = 2900 \text{ W}$	-	-	-	-
$P_H = 3000 \text{ W}$	x	-	-	-
$P_H = 3100 \text{ W}$	x	x	-	x
$P_H = 3200 \text{ W}$	-	x	x	x
$P_H = 3300 \text{ W}$	-	-	x	-



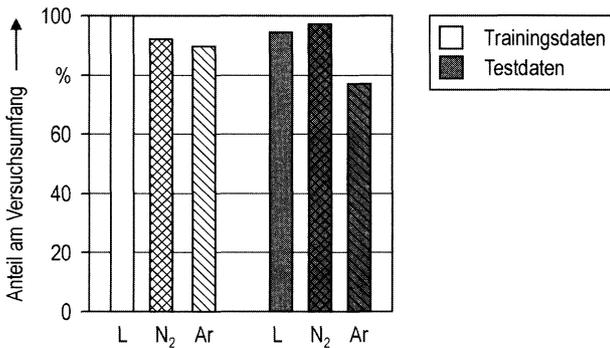
Tabelle 6.6 Verknüpfung von Fuzzy-Interfaces über 2:1 Mehrheitsentscheid

Die resultierende aggregierte Zugehörigkeitsfunktion wird, wie im betrachteten Beispiel ersichtlich, über die disjunkte Zusammenfassung der aktiven gewichteten Zugehörigkeitsfunktionen errechnet. Durch dieses Verfahren wird einerseits die Gefahr

reduziert, daß offensichtlich stark verrauschte Signalmerkmale in die Berechnungen einfließen können, andererseits findet durch die Inferenz-Regeln eine, entsprechend den Eingangsdaten, gewichtete Interpolation des Ausgabewerts statt.

#### 6.4.2 Adaptive Kontrolle der Prozeßatmosphäre

Vergleicht man die in **Bild 6.16** gezeigten Ergebnisse der adaptiven Kontrollinstanz mit denen der beiden getrennt operierenden Fuzzy-Interfaces aus **Abschnitt 6.3.1** so wird deutlich, daß durch die Verknüpfung der beiden Verarbeitungseinheiten eine Verbesserung speziell bei der Erkennung der unbekanntesten Testdaten erreicht werden kann. Mit Ausnahme der Testdaten für Argon werden in beiden Versuchsdatensätzen mindestens 90% der Prozeßatmosphären richtig identifiziert.



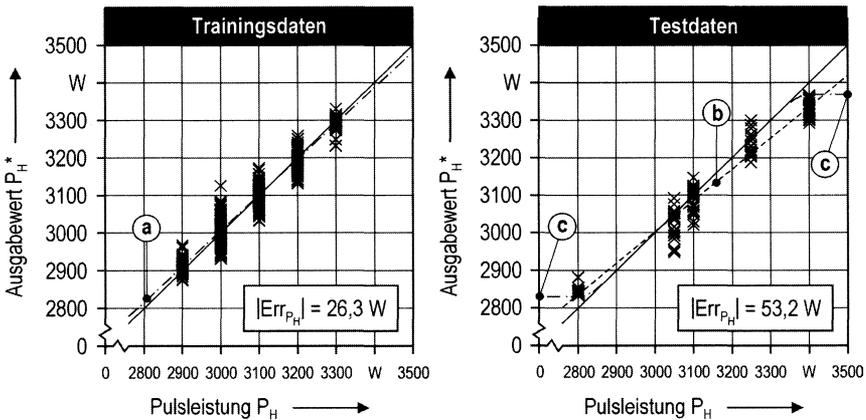
*Bild 6.16 Adaptive Prozeßkontrolle der Prozeßatmosphäre*

Speziell mit Hilfe der Ergebnisse auf Basis der Testdaten kann demnach gezeigt werden, daß durch die fuzzy-logische Überlagerung der beiden, ursprünglich für die individuelle Operation spezifizierten Verarbeitungseinheiten eine verbesserte Identifikationsgüte erzielbar ist. Offensichtlich scheinen sich die einzelnen Operationseinheiten zweckmäßig zu ergänzen, so daß eine breitere Basis an Signaldaten richtig zugeordnet werden kann. Diese Vermutung wird auch dadurch bestätigt, daß die Erkennungsgüte der Testdaten durchschnittlich oberhalb von 80% liegt und sich damit vor dem gemittelten Einzelergebnis des Detektors #4 positioniert.

#### 6.4.3 Adaptive Kontrolle der Pulsleistung

Die Verknüpfung der in **Abschnitt 6.3.2** vorgestellten Fuzzy-Interfaces für die Kontrolle der Pulsleistung ergibt über die gesamten Trainings- bzw. Test-Versuchsdaten

mittlere Ausgabefehler, wie sie in **Bild 6.17** dargestellt sind. Mit einem durchschnittlichen Fehler von  $\pm 26,3$  W, bei annähernd proportionalem Verhalten bzgl. der Soll-Vorgabe (Gerade (a):  $P_H^* = 0,9507 \cdot P_H + 28,65$ ;  $R^2 = 0,96$ ) und einer konstanten Schwankungsbreite von ca.  $\pm 100$  W, wird deutlich, daß die Inferenzmaschine im wesentlichen durch die Erkennungsgüte des Laserpuls-Monitors geprägt zu sein scheint. Bei Verwendung der Testdaten steigt der mittlere Erkennungsfehler jedoch auf den zweifachen Wert an, zusammen mit einer sichtbaren Abweichung der Proportionalität (Gerade (b):  $P_H^* = 0,833 \cdot P_H + 95,4$ ;  $R^2 = 0,96$ ). Beachtet man die Einzelergebnisse der beteiligten Interfaces der Detektoren #4 und #5 in **Abschnitt 6.3.2** so kann, bei Verarbeitung der Testdaten, ein sprunghafter Anstieg der Fehlerwerte erkannt werden. Die Werte außerhalb des spezifizierten Trainingsbereichs ( $P_H > 2800, 3400$  W) weichen sichtbar deutlich von den Soll-Vorgaben ab, da aufgrund der Spezifikation der Rand-Zugehörigkeitsfunktionen (halbe Dreiecksflächen), in Verbindung mit der COA-Methode, die Ausgabe gegen die Grenzwerte  $2833,33$  W bzw.  $3366,33$  W konvergiert (siehe Punkt (c)).



*Bild 6.17 Adaptive Prozeßkontrolle der Pulsleistung*

### 6.4.4 Adaptive Kontrolle der Fokusslage

Die adaptive Auswertung der Fokusslage, auf Basis der in **Abschnitt 6.3.3** spezifizierten Fuzzy-Einzelmodule ergibt sowohl für die Verarbeitung der Trainingsdaten als auch für die Testdaten die in **Bild 6.18** wiedergegebenen Werte.

Grundsätzlich zeigt sich bei der Beurteilung erneut eine sichtbare Differenz zwischen beiden Datengruppen. Während die Ausgabewerte für die Trainingsdaten mit einem mittleren Fehler von  $0,14$  mm annähernd proportional zur tatsächlichen Fokusslage

verlaufen (Gerade (a):  $z_F^* = 0,88 \cdot z_F + 0,01$ ;  $R^2 = 0,9$ ), besitzen die Ausgabewerte auf Basis der Testdaten einen um ca. 35% höheren Fehler, bei einer gleichzeitig schlechteren Korrelation (Gerade (b):  $z_F^* = 0,05 \cdot z_F + 95,4$ ;  $R^2 = 0,88$ ).

Durch die Inferenzmaschine kann der bei der Begutachtung der Einzelergebnisse festgestellte mittlere Ausgabefehler über beide Datengruppen hinweg um ca. 0,1 mm reduziert werden. Allerdings liegen die erkennbaren maximalen Streubreiten mit ca.  $\pm 0,4$  mm im Rahmen dessen, was bereits in den jeweiligen Ausgabewerten der separaten Fuzzy-Interfaces präsentiert wurde. Sowohl die Inter- als auch Extrapolationsfähigkeit des kombinierten Fuzzy-Moduls zeigen eine erkennbar schlechtere Erkennungsgüte als im Fall der Ergebnisse für die Erkennung der Pulsleistung. Vergleicht man dabei die Randwerte, so läßt sich nachweisen, daß die Ausgabewerte bereits vor den eigentlichen Interface-Grenzen von  $\pm 1,2$  mm deutlich divergieren (siehe Punkt (c)). Dieser Effekt läßt sich bereits bei den Trainingsdaten im Ansatz ausmachen, so daß sich die Auslegung der Inferenz-Maschine auf Basis nur eines einzigen Detektors anscheinend als nachteilig auswirkt.

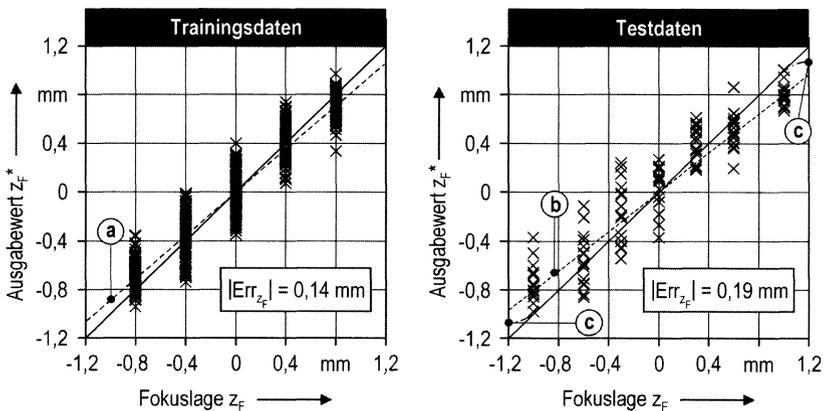


Bild 6.18 Adaptive Prozeßkontrolle der Fokusslage

Bereits in **Bild 4.10** kann die Randkonvergenz der Onaxis-Signalamplitude, d.h. den flacher werdenden Gradienten im Bereich von Fokusverschiebungen, die größer als  $\pm 1,0$  mm sind erkannt werden. Es scheint, daß sämtliche in der Fokusslagen-Inferenzmaschine verknüpften Signalmerkmale des Onaxis-Detektors dieses charakteristische Verhalten besitzen, was durch die beobachtbaren stochastischen Streuungen noch weiter verstärkt wird. An dieser Stelle wäre es deshalb sinnvoll, für eine Verbesserung der Erkennungsgüte nicht nur die zentrale Strahlreflexion zu berücksichtigen.

## 7 Prozeßkontrolle durch Online-Steuerung

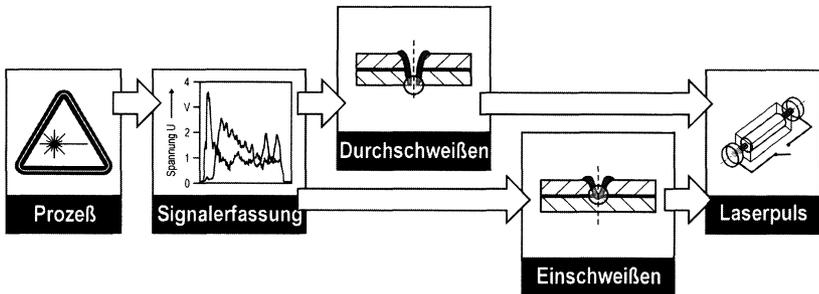
Innerhalb der vorangegangenen Untersuchungen wurden bislang Methoden zur Überwachung des Einzelpunkt-Mikroschweißprozesses dargestellt, die keine Echtzeit-Fähigkeiten besitzen. Durch die vereinbarte Strategie, den Signaldatensatz erst nach Ende des Laserpulses bzw. offline zu analysieren, wurde die Möglichkeit verhindert, eine auf Basis der gewonnenen Prozeßinformation gestaltete Rückführung von Stellsignalen in den laufenden Schweißvorgang zu erreichen. Weiterhin erlaubt die für die vorgestellten Schweißversuche genutzte Systemtechnik keine Online-Ansteuerung der einzelnen Prozeßparameter.

Aus wirtschaftlicher Sicht ist eine online operierende Prozeßkontrolle grundsätzlich wünschenswert, da diese Systemerweiterung im idealen Fall eine unbemannte Serienfertigung realisiert, durch die Verbindungsgüten gleichbleibender Qualität erreicht werden können. Allerdings ist eine tatsächliche Online-Verarbeitung der Prozeßsignale erst durch den Einsatz eines sog. „stand-alone“ Systems möglich, das im wesentlichen durch die hohe Rechenleistung eines hardwarenah programmierbaren digitalen Signalprozessors (DSP) bzw. Mikro-Controllers gestützt wird. Gleichzeitig muß beispielsweise das Strahlwerkzeug durch seine optische bzw. elektrische Spezifikation in der Lage sein, die Stellsignale entsprechend schnell zu verarbeiten, so daß die antizipierten Schweißfehler effektiv vermieden werden können.

Nach [4] existieren prinzipiell drei Möglichkeiten, den Mikro-Schweißprozeß sinnvoll zu überwachen: Erstens kann durch eine direkte Ansteuerung der Pulslänge unmittelbar auf bestimmte Ereignisse im Prozeßverlauf, wie z.B. das Entstehen eines Metaldampfleuchtens [9] reagiert werden. Zweitens stellt die Manipulation der Pulsenergie über festprogrammierte Pulsformen, die bzgl. der Prozeßgeschehnisse abgerufen werden können, eine zusätzliche Erweiterung dar. Die direkte Regelung der Pulsleistung während des gesamten Prozeßverlaufs, z.B. über die Versorgungseinheit der Pumpquelle, stellt als dritte Alternative gleichzeitig die höchsten Ansprüche an das Lasersystem.

## 7.1 Konzept zur Steuerung des Prozeßverlaufs

Die bei den folgenden Untersuchungen vorgestellten Strategien zur Online-Kontrolle zielen auf die Schaffung von zwei alternativen bzw. sich ergänzenden Systemlösungen, die über die Begrenzung der Pulslänge den Schweißprozeß überwachen können. Bedingt durch die systemtechnischen Randbedingungen des verwendeten Laseraggregats kann innerhalb der folgenden Untersuchungen keine praktische Umsetzung des Steuerungskonzepts erfolgen. Für eine Realisierung müsste der Laser entweder über eine Leistungsabschaltung verfügen, z.B. durch elektrooptische Aktoren [4], oder aber die Lasersteuerung sollte eine schnelle extern ansteuerbare Modulation der Pulsform erlauben. Moderne pw-Lasersysteme weisen teilweise bereits standardmäßig die dazu erforderlichen Komponenten auf bzw. können einfach nachgerüstet werden, so daß die vorgestellten Ergebnisse für zukünftige Anwendungen durchaus nutzbar sind.



*Bild 7.1 Konzept zum Aufbau einer Online-Pulssteuerung*

Prinzipiell zielen die in **Bild 7.1** skizzierten Konzepte durch eine Online-Ansteuerung des Laserpulses auf die Beherrschung der Einschweißtiefe bzw. die Vermeidung des Durchschweißens beider Fügepartner beim Einzelpunkt-Überlappstoß. Aufgrund der hierbei notwendigen Forderung nach Echtzeitfähigkeit müssen die verwendeten Features entsprechend schnell zu ermitteln sein, um noch innerhalb des fortlaufenden Laserpulses aktiv von außen in den Prozeß einwirken zu können. Vor diesem Hintergrund basieren beide vorgestellten Verarbeitungskonzepte auf einer Schwellwertanalyse der verwendeten Prozeßsignale.

Während im ersten Fall der vorübergehende Einsatz eines sog. Durchschweiß-Detektors zu einer indirekten Prozeßüberwachung führt, basiert der zweite Lösungsansatz auf der Berechnung der bereits in **Abschnitt 4.2.2** vorgestellten ZL-Komplexität und ermöglicht dadurch eine direkte Prozeßkontrolle.

## 7.2 Indirekte Prozeßkontrolle

Für die indirekte Überwachung des Prozeßverlaufs, auf Basis des Durchschweiß-Detektors, werden anhand experimenteller Vorversuche Referenzkurven erzeugt, die für den spezifizierten Einsatzfall gültige Prozeß- bzw. Reaktionszeiten bereitstellen. Konkret bedeutet dieser Ansatz, daß der Prozeßverlauf anhand von charakteristischen Merkmalen abgeschätzt wird. Es findet nur zu Beginn des Schweißprozesses eine eindeutige Identifikation des Prozeßzustands i.S. des Prozeßmodells statt. Darauf aufbauend wird mit einem fixen Zeitintervall gearbeitet, das den Moment des Prozeßeingriffs markiert.

### 7.2.1 Signalverarbeitung

Die in **Bild 7.2** dargestellte Konstellation zeigt die vorübergehende Erweiterung des Diagnosesystems durch einen sog. Durchschweiß-Detektor (#7) auf Basis eines Si-Sensors<sup>1</sup>, der direkt unterhalb der beiden zu fügenden Bleche angebracht wird [4, 134] und mit einem Nd:YAG-Spektralfilter ausgerüstet ist. Der prozeß- bzw. qualitätskritische Fall, daß beide Fügepartner vom Laserstrahl durchdrungen werden bzw. sich der Schweißkanal an der Unterseite des Gegenblechs öffnet, kann somit in einfacher Weise erfaßt werden. Da sich wegen der Positionierung des Detektors ein praxisrelevanter Einsatz nahezu ausschließen läßt, wird die Strategie verfolgt, relativ zum Durchschweiß-Signal geeignete Prozeßsignale zu identifizieren.

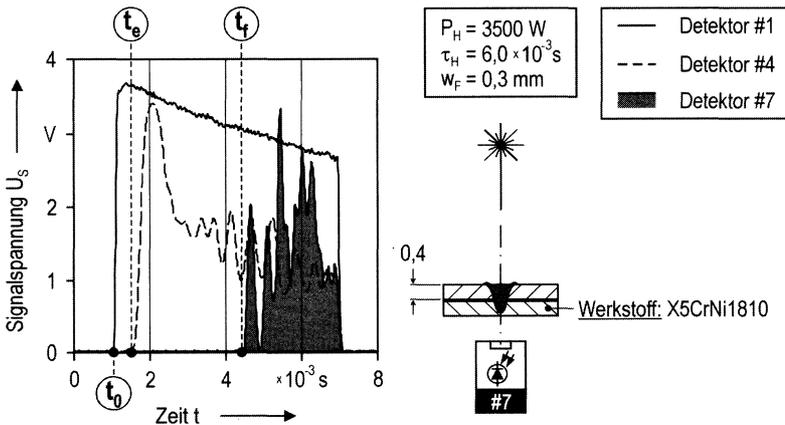


Bild 7.2 Signalverarbeitung für die indirekte Prozeßkontrolle

<sup>1</sup> SIEMENS, Typ BPX 61

Im betrachteten Anwendungsfall wird auf die Erzeugung einer Referenzkurve für den Metaldampf-Detektor abgestellt, die in Relation zum zeitlichen Auftreten der Metaldampffackel eine verlässliche Aussage bzgl. des daraufhin erwarteten Durchschweißzeitpunkts ermöglicht. So wird bei der in **Bild 7.2** betrachteten Pulsleistung von  $P_H = 3500$  W, bezogen auf den Pulsbeginn ( $t = t_0$ ), die Entstehung der Metaldampffackel durch Detektor #4 nach ca. 0,23 ms registriert ( $\Delta t_e = t_e - t_0$ ). Nach einer darauffolgenden Zeitspanne von annähernd 3,8 ms ( $\Delta t_r = t_r - t_e$ ) zeichnet Detektor #7 die vollständige Durchdringung beider Bleche auf. Eine Kontrolleinrichtung könnte diese Zeitdauer in zwei Stufen nutzen: In einem ersten Schritt erfolgt die Beaufschlagung des Zeitpunkts  $t_e$  mit einer vorher experimentell ermittelten Haltezeit  $\Delta t^* < \Delta t_r$ , wodurch eine ausreichende Einschweißtiefe in den Werkstoff gewährleistet wird. Mit Ablauf der Haltezeit  $t = t_e + \Delta t^*$  leitet die Kontrolleinrichtung im zweiten Schritt einen Stellimpuls an den Laser, der zu einem unverzüglichen Pulsabbruch vor dem Erreichen des erwarteten Durchschweißzeitpunkts führt. Durch dieses Vorgehen wird eine eng tolerierte indirekte Überwachung der Einschweißtiefe beim Einzelpulsschweißen ermöglicht.

Führt man die oben geschilderte Messung für unterschiedliche Pulsleistungen durch, so kann eine Relation zwischen dem Start des Metaldampf-Signals und der anschließend aufgezeichneten Durchschweißung der Fügeverbindung hergestellt werden, wie sie innerhalb des nächsten Abschnitts vorgestellt werden soll.

### 7.2.2 Bestimmung des Durchschweißzeitpunkts

Die experimentelle Ermittlung der Durchschweißzeitpunkte bzw. der Startzeitpunkte der Metaldampffackel für linear ansteigende Pulsleistungen führt, bei Betrachtung von Blind- bzw. Überlappschweißverbindungen, zu den in **Bild 7.3** dargestellten Meßergebnissen. Während sich bei den Versuchen an Blindschweißpunkten für das betrachtete Versuchsfeld ein erkennbar linearer Zusammenhang zwischen dem Metaldampf-Start und dem Durchschweißzeitpunkt einstellt zeigen die Experimente am Überlappstoß, daß, speziell für Pulsleistungen kleiner 3500 W, eine zunehmende zeitliche Verzerrung der beiden Phänomene auftritt. Während sich die Schmelzbadtemperatur an der Werkstückoberfläche weiterhin linear zur eingestrahelten Pulsleistung verhält, nimmt die Propagationsgeschwindigkeit gleichzeitig überproportional ab. Einerseits kann daraus gefolgert werden, daß die Propagationsgeschwindigkeit der Schmelz- bzw. Keyholefront in Strahl- bzw. z-Richtung ab einer kritischen Leistungsdichte überproportional zur Pulsleistung abnimmt; andererseits kann bei geringeren Pulsleistungen ebenfalls beobachtet werden, daß die Varianz innerhalb der detektierten Durchschweißzeiten sichtbar ansteigt. Letztgenannter Effekt kann teilweise durch thermische Instabilitäten zwischen den beiden Blechen erklärt werden, die hauptsächlich durch den inhomogenen Wärmeübergang entlang des Füge­spalts auftreten und sich bei geringeren Leistungen deutlicher auf den Aufheizvorgang auswirken.

Korreliert man die Zeitpunkte des Metalldampf-Starts und des Durchschweißens direkt miteinander, so lassen sich in Anlehnung an **Bild 7.4** bereits gebrauchsfertige Referenzkurven erstellen, die beispielsweise als Basis für eine Komperatorschaltung [9] fungieren können.

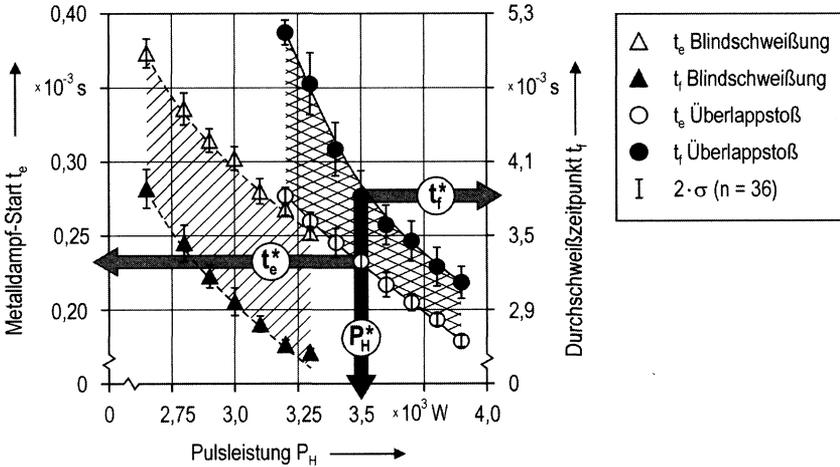


Bild 7.3 Metalldampf-Start vs. Durchschweißzeitpunkt für Einzelpuls-Schweißprozess

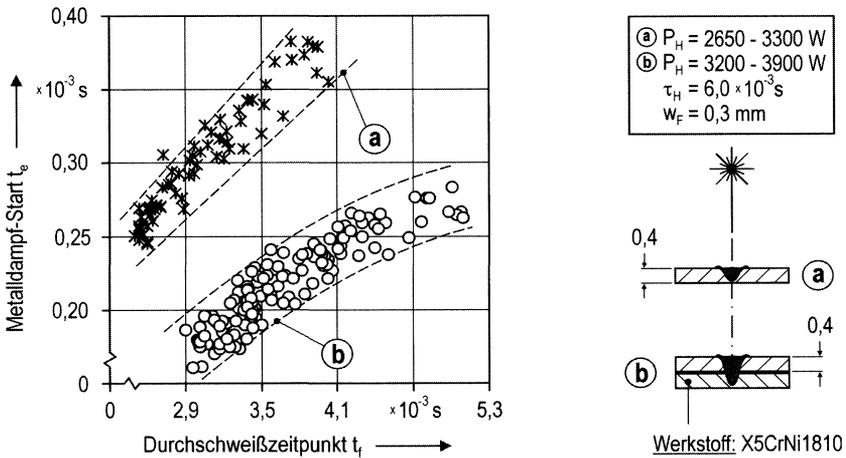


Bild 7.4 Referenzkurven für eine indirekte Prozesskontrolle

Dabei ist anzumerken, daß durch die gewählte Darstellung die stochastische Variation der Pulsleistung aus der Betrachtung eliminiert wird, wodurch sich also eine tatsächliche Wiedergabe der Zusammenhänge einstellt.

Bei Betrachtung der für die beiden Nahtformen untersuchten Leistungsbereiche, die jeweils  $\pm 10\%$  bzgl. der optimierten Leistungswerte überdecken, zeigt sich die bereits oben erkannte annähernd lineare Abhängigkeit zwischen dem Metaldampf-Start und dem Durchschweißzeitpunkt bei den Blindschweißversuchen ( $R^2 = 0,9$ ). Für detektierte Zeitpunkte  $t_e$  ergibt sich auf Basis des Durchschweißzeitpunkts  $t_f$  dadurch eine zeitliche Unschärfe von ca.  $0,4 - 0,7$  ms, die allerdings wegen des deutlichen Abstands zum Durchschweißzeitpunkt vernachlässigt werden kann. Für die Überlappschweißversuche besteht nur im Bereich höherer Pulsleistungen bzw. kürzerer Durchschweißzeiten ein linearer Zusammenhang zwischen den Prozeßzeitpunkten. Eine entsprechende Analyse über den gesamten Leistungsbereich ergibt für den Überlappstoß einen Korrelationskoeffizienten von  $R^2 = 0,76$ . Speziell für einen Metaldampf-Start oberhalb von  $0,25$  ms schwankt der Durchschweißzeitpunkt um bis zu  $1,5$  ms. Bezogen auf den verbleibenden technisch nutzbaren Reaktionszeitraum von ca.  $2,5$  ms stellt diese Unschärfe bei geringen Pulsleistungen jedoch kein Hindernis dar.

## 7.3 Direkte Prozeßkontrolle

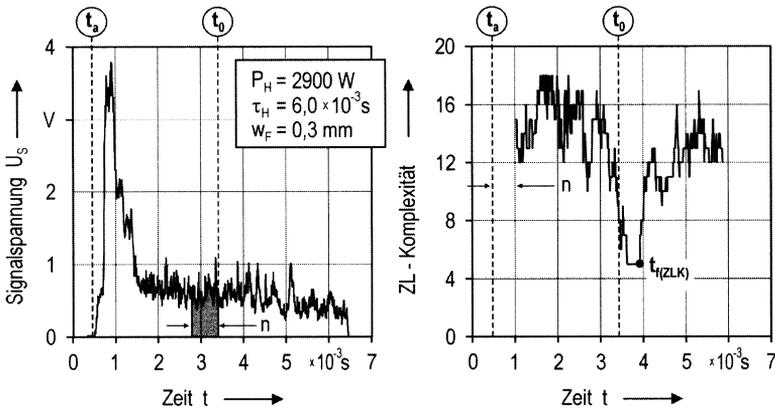
Im Gegensatz zur indirekten Überwachung des Überlapp-Schweißprozesses wird bei der direkten Kontrollstrategie der Moment des Durchschweißens des oberen Blechs bzw. das Einschweißen in der dem Laserstrahl zugewandten Seite des Gegenblechs detektiert. Die Kontrollinstanz registriert also den Moment, in dem die eigentliche Fügeverbindung zwischen den beiden Blechhälften entsteht und kann daraufhin, ebenfalls unter Berücksichtigung einer vorbestimmten Haltezeit, den Laserpuls abbrechen.

### 7.3.1 Die ZLK-Analyse

Die Erfassung des Einschweißzeitpunkts erfolgt unter Verwendung des bereits in **Abschnitt 4.2.2** vorgestellten ZL-Komplexitätsmaßes, das ein Maß für die Dynamik innerhalb eines betrachteten Zeitsignals darstellt. Die ZLK wird dabei als einfach zu applizierendes Analysewerkzeug nichtlinearer, bzw. chaotischer Systeme verstanden, wie sie auch bei der Schmelzbaddynamik des Wärmeleitungs- und Tiefschweißens auftreten [102]. Im Wesentlichen besteht der mathematische Hintergrund bei der Berechnung der eingesetzten ZLK aus einem iterativen Algorithmus, der auf ei-

nem gleitenden Zeitfenster basiert<sup>1</sup>. Im ersten Schritt wird die betrachtete Zeitreihe, bestehend aus einer festen Anzahl  $n$  an Datenpunkten, bzgl. eines definierten Schwellwerts in eine binäre (0;1) - Symbolsequenz transformiert. Der zweite Schritt ist durch die Bestimmung der in der binären Symbolsequenz enthaltenen unvereinbaren Untersequenzen bzw. Wörter geprägt. Je größer die Anzahl an unvereinbaren Wörtern, desto höher ist die Komplexität des analysierten Signalabschnitts.

Wie in **Bild 7.5** gezeigt, wird bei der Berechnung der ZL-Komplexität zum Zeitpunkt  $t_0$  das vorangegangene Datenfenster der Größe  $n = 100$  Datenpunkte analysiert. Als Schwellwert ist der arithmetische Mittelwert über die Fensterbreite gewählt. Entsprechend der eingestellten Abtastrate von  $f_a = 166$  kHz steht der erste ZLK-Wert ca. 0,6 ms nach Beginn des Laserpulses  $t = t_a$  zur Verfügung. Es gilt folglich zu prüfen, ob, mit Blick das anvisierte Leistungsspektrum, der Durchschweißzeitpunkt des Deckblechs früher erreicht wird.



*Bild 7.5 ZLK-Analyse für Einzelpunkt-Überlappschweißverbindung*

In der Darstellung ist der Einschweiß- bzw. Durchschweißzeitpunkt  $t_{f(ZLK)}$  deutlich an dem globalen Minimum innerhalb des zeitlichen Verlaufs der ZL-Komplexität zu erkennen. Wie bereits erwähnt, repräsentiert die abrupte Abnahme der Komplexität ein nach unten offenes Keyhole, wodurch die Schwingungsdynamik der Schmelzbadoberfläche einen annähernd stationären Zustand erreicht. Im betrachteten Beispiel wird demnach das Deckblech nach einer Zeitdauer von ca. 3,5 ms durchgeschweißt.

<sup>1</sup> Das der Implementierung zugrunde gelegte Flußdiagramm aus [108] ist in Anhand E wiedergegeben.

### 7.3.2 Bestimmung des Einschweißzeitpunkts

Die oben dargestellte Meßmethode wird im folgenden auf eine Versuchsreihe übertragen, bei der im ersten Schritt Onaxis-Signale an Einzelpunkt-Überlappschweißverbindungen mit Edelstahlblechen X5CrNi1810 der Stärke  $s = 0,4 \text{ mm}$  über die ZLK-Analyse untersucht werden. Im weiteren Verlauf werden mit den selben Prozeßparametern Blindschweißungen an Einzelblechen gleicher Stärke durchgeführt. Dabei wird über den Einsatz des Durchschweiß-Detektors #7 der jeweilige Durchschweißzeitpunkt gemessen. Als Ergebnis läßt sich dann ein zahlenmäßiger Vergleich zwischen dem erwarteten Einschweißzeitpunkt  $t_{f(ZLK)}$  bei der Überlappschweißverbindung und dem für die Blechstärke tatsächlich gemessenen Durchschweißzeitpunkten  $t_f$  herstellen.

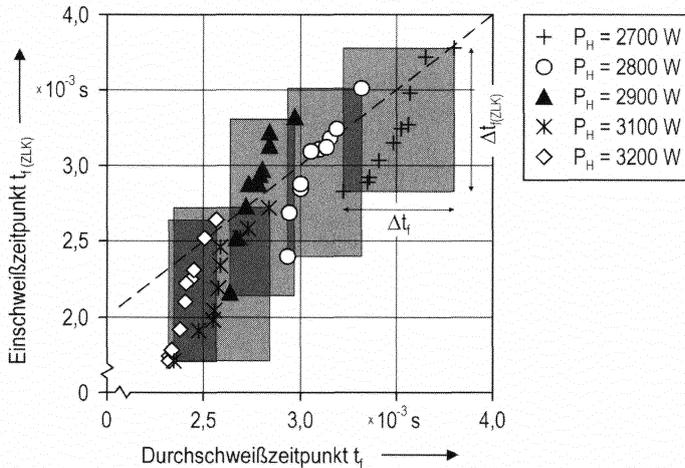


Bild 7.6 Direkte Prozeßkontrolle durch Detektion des Einschweißzeitpunkts

Die in **Bild 7.6** dargestellten fünf Meßwerte-Cluster, die an jeweils zehn Wiederholungsversuchen entnommen wurden, zeigen erkennbar auf, daß sich die über die ZL-Komplexität bestimmten Einschweißzeitpunkte im Rahmen von in der Praxis tolerierbaren Schwankungsbreiten ( $\Delta t_f \cdot \Delta t_{f(ZLK)}$ ) von ca. 1 ms mit den Werten des Durchschweißzeitpunkts vergleichen lassen. Es gilt dabei zu beachten, daß der Einfluß durch statistische Schwankungen innerhalb der durch die Strahlquelle bereitgestellten Pulsenergie, wie ebenfalls in [4] bestätigt wurde, keinen signifikanten Einfluß sowohl auf die Durchschweißzeit als auch den ermittelten Einschweißzeitpunkt zeigt. Somit geben die detektierten Zeitpunkte tatsächlich zu erwartende stochastische Prozesse während der Strahl-Stoff Wechselwirkung wieder und können dadurch für die Auslegung eines Kontrollsystems unmittelbar berücksichtigt werden.

Gegenüber der indirekten Alternative, auf Basis des Metaldampf-Signals den Prozeß zu überwachen, läßt sich für eine direkte Kontrolle über den Einschweißzeitpunkt die Wahl des spezifizierten Leistungsbereichs als Vorteil anführen. Bei der indirekten Methode, speziell für Werkstoffpaarungen mit größeren Blechstärken, muß die Pulsleistung für die Systemauslegung deutlich oberhalb des optimalen Bereichs gewählt werden, um auf jeden Fall den Zustand des Durchschweißens zu erreichen. Als Konsequenz der sich daraus in Abhängigkeit vom Anwendungsfall einstellenden Überhitzung können Nahtfehler, wie z.B. Schweißspritzer und starke Anlauffarben, resultieren. Alternativ kann bei der direkten Kontrollstrategie im optimierten Betriebspunkt gearbeitet werden, wodurch der Prozeßverlauf nicht beeinträchtigt wird.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit und den damit gestellten Aufgaben wurden Lösungskonzepte zur Realisierung von automatisierbaren Diagnosewerkzeugen bei der Mikroschweißbearbeitung mit gepulsten Nd:YAG-Lasern entwickelt, an relevanten Anwendungsfällen praktisch umgesetzt und anhand von großflächig durchgeführten Schweißversuchen validiert. Die einzelnen experimentellen Untersuchungen konzentrierten sich dabei hauptsächlich auf Blechpaarungen in Überlappanordnung. Das methodische Vorgehen im Verlauf der vorgestellten Untersuchung entsprach dabei einer schrittweisen Qualifizierung des Gesamtsystems.

Anhand einleitender Technologieuntersuchungen wurde eine speziell entwickelte Multi-Sensor-Systemtechnik als diagnostische Einrichtung für den Einsatz an Einzelpunkt-Überlappschweißverbindungen charakterisiert, die im wesentlichen auf optischen Sensoren zur Erfassung der primären und sekundären Reflexions- bzw. Prozeßstrahlung der Bearbeitungszone basierte. Dadurch konnten einerseits modell-theoretische Ansätze zum chronologischen Prozeßverlauf experimentell verifiziert werden, andererseits wurde so die grundlegende Auswahl der verfügbaren Prozeßsensoren sowie der entsprechenden Auswertemethoden ermöglicht. Dazu wurden die einzelnen Detektorsignale, auf Basis bekannter Prozeßphänomene am Einzelpunkt-Überlappstoß, einer eingehenden Signal-Prozeß-Analyse unterzogen und diesbezüglich nach signifikanten Merkmalen extrahiert. Nur ein deutlich erkennbarer bzw. signifikanter Zusammenhang zwischen dem Prozeßzustand, dessen Ausprägung durch die methodische Konfiguration der wesentlichen Laserparameter beeinflusst wurde, und der daraus resultierenden Signalantwort rechtfertigte den Einsatz des jeweiligen Detektors für die diagnostischen Aufgaben im weiteren Verlauf der Arbeit.

Das durch die Vorversuche spezifizierte grundlegende Prozeß-Kontrollmodell inklusive der ausgewählten Sensortechnik stellte die Plattform für einen im Anschluß konfigurierten Klassifikator zur automatischen Bestimmung bzw. Überwachung der Schweißnahtqualität dar. Unter Einbeziehung eines Neuronalen-Netz-Simulators als Herzstück des Online-Überwachungssystems wurden anlagenspezifische Parameterschwankungen innerhalb der extrahierten Signalmerkmale erkannt und direkt in

die jeweilig produzierten Nahtgüten interpretiert. Vor dem Hintergrund repräsentativer Bauteile der Elektronikindustrie als Versuchsträger erscheinen die in der Großversuchsreihe erreichten Klassifikationsgüten am Einzelpunkt-Überlappstoß von 97% als vielversprechendes Ergebnis zumal die Erkennung von fehlerhaften Schweißnähten zu 100% erfolgen konnte. In diesem Zusammenhang sei auf die weiterführende Anwendung des Klassifikators an einer Kehlnaht-Schweißverbindung, die ohne aufwendige Modifikation der Datenvorverarbeitung erfolgte, hingewiesen. Eine Klassifikationsgüte von 94% kann in diesem Fall bereits als gutes Resultat angesehen werden.

Die Voraussetzungen des Klassifikators bzgl. der Signalvorverarbeitung nutzend, konnten im weiteren Fortschritt der Arbeit mit Werkzeugen der Fuzzy-Technologie separat eingesetzte Verarbeitungseinheiten (fuzzy-interfaces) zur automatischen offline Überwachung und Kontrolle vorher vereinbarter Prozeßparameter implementiert werden. Durch eine Parallelschaltung mehrerer solcher Einzeleinheiten innerhalb einer entsprechenden Inferenzmaschine konnte die Präzision der bis dahin separaten Erkennungsgüten weiter gesteigert werden. Mit dieser sog. adaptiven Kontrollinstanz war es dadurch möglich, eine innerhalb der vereinbarten Systemgrenzen beliebig durchgeführte Parametrisierung des Prozeßumfelds mit relativ hoher Genauigkeit zu analysieren. So wurde die alternative Konstellation der Prozeßatmosphäre, in Form von Umgebungsluft, Argon oder Stickstoff, in ca. 85% der Fälle richtig erkannt und bei der Identifikation der Pulsleistung und der Fokuslage konnte ein mittlerer Erkennungsfehler von  $\Delta P_H = \pm 53,2 \text{ W}$  bzw.  $\Delta z_F = \pm 0,19 \text{ mm}$  dokumentiert werden.

Abschließend wurden zwei alternative Kontrollstrategien zur Online-Steuerung des Mikro-Schweißprozesses vorgestellt, die eine kontinuierliche Sicherstellung einer ausreichenden Schweißnahttiefe gewährleisten. Auf Basis zweier echtzeitfähiger Schwellwertmethoden zur Signalanalyse wurden diesbezüglich jeweils ein direktes sowie ein indirektes Überwachungskonzept zur Beherrschung der Nahttiefe bei Überlapp-Schweißverbindungen erarbeitet. Dabei konnte mit der eingesetzten Versuchstechnik keine unmittelbare Verifikation der beiden spezifizierten Strategien durchgeführt werden, da beide Konzepte die Pulsdauer als Stellglied ansteuern, was mit dem für die Schweißversuche verfügbaren Lasersystem nicht möglich war. Aufgrund der nachweisbar geringen Meßunsicherheit der beiden Lösungskonzepte, die durchschnittlich bei 1,0 bis 1,5 ms liegt, kann jedoch eine praxistaugliche Umsetzung der Ergebnisse in aktuelle Systemkonfigurationen zum Einzelpunkt-Überlappschweißen antizipiert werden.

Die innerhalb dieser Arbeit vorgelegten Untersuchungsergebnisse basierten - wenngleich auf einer umfassenden - so doch auf jeweils einer abgeschlossenen Menge an Schweißversuchen. Über den gesamten Verlauf der einzelnen Arbeitsschritte lässt sich dabei erkennen, daß die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der vorgestellten Kontrollinstanzen direkt mit der Anzahl der zur Verfügung stehenden Datensätze bzw. der Schweißversuche gekoppelt ist. Innerhalb der laborhaften Entwicklung der vorgestellten Überwachungskonzepte sind der verwendeten Datenmenge sinnvoller-

weise Grenzen gesetzt worden. Zukünftige Arbeiten sollten sich allerdings auf die Verwendung von Prozeßdaten konzentrieren, die direkt aus einer laufenden Serienfertigung entnommen werden, was eine entsprechend große Anzahl an Datenmaterial erlaubt; die systemtechnische Plattform zur Erfassung und Verarbeitung der Rohdaten ist mit dieser Arbeit geschaffen worden. Die robuste Funktionalität der nachgeschalteten Verarbeitungsprozeduren setzt dabei eine weitergeführte, gezielte Optimierung der verwendeten Extraktions-Verfahren voraus, z.B. durch die Implementierung eines „selbstlernenden“ Feature-Extraktors, auf Basis von beispielsweise KNN- oder Fuzzy-Konzepten. Vor diesem Hintergrund sei ebenfalls die tiefergehende Untersuchung der spezifischen Signal-Prozeß Korrelationen bei der Kehlnaht-Anordnung empfohlen. Die innerhalb der vorliegenden Arbeit praktizierte Übertragung der von der Überlapstoßverbindung bekannten Signalcharakteristiken kann dabei bereits als Fundament für weiterführende Betrachtungen herangezogen werden. In diesem Zusammenhang sollte ebenfalls die Erweiterung der Systemfähigkeiten auf eine erfolgreiche Überwachung von gepulsten Mikro-Schweißnähten im Blickpunkt stehen.

Generell kann eine praktische Umsetzung, insbesondere mit Blick auf die Implementierung der in dieser Arbeit spezifizierten Online-Konzepte, nur stattfinden, wenn die laserseitigen Randbedingungen entsprechende Systemeingriffe erlauben. Vor diesem Hintergrund stellen die jetzt bzw. in Zukunft verfügbaren pw-Lasersysteme, die eine Online-Manipulation des Laserpulsels (puls-shaping) erlauben, eine einsatzfertige Basis für weiterführende Untersuchungen dar. Um von diesen Voraussetzungen optimal profitieren zu können, sollten die Möglichkeiten ausgeschöpft werden, die vorgestellten Systemkonzepte durchgängig hardwarenah zu implementieren, z.B. auf DSP-Basis. Erst durch die Verwendung von annähernd in Echtzeit arbeitenden Systemkonfigurationen können auch zukünftige Mikro-Schweißaufgaben, die durch den verstärkten Einsatz von Kupferwerkstoffen geprägt sind, erfolgreich überwacht werden.



## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Dickmann, K.; Bünting, G.; Gröninger, J.: Feinbearbeitung mit Nd:YAG-Lasern. In: Laser Magazin 2/95, S.4-8.
- [2] Dorn, L.; Grutzeck, H.; Jafari, S.: Schweißen und Löten mit Festkörperlasern. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1992.
- [3] Pfeiffer, T.: Qualitäts Management – Strategien, Methoden, Techniken. München, Wien: Carl Hanser, 1993.
- [4] Glasmacher, M.: Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen – Reihe Fertigungstechnik Erlangen, Band 76. Bamberg: Meisenbach, 1998.
- [5] Schneider, R.: Untersuchungen der Einflußgrößen beim Schweißen von Kupferlegierungen mit dem Nd:YAG-Laser. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig: Dissertation, Fakultät für Maschinenbau und Elektrotechnik, 1994.
- [6] Herziger, G.; Loosen, P. [Hrsg.]: Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung. München, Wien: Carl Hanser, 1993.
- [7] EN ISO 11145:1994: Laser- und Laseranlagen – Begriffe und Formelzeichen. Brüssel: Europäisches Komitee für Normung, 1994.
- [8] Hügel, H.: Strahlwerkzeug Laser. Stuttgart: Teubner, 1992.
- [9] Kußmaul, K.: Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten des Laserstrahlschweißens in der Mikroverbindungstechnik durch Verbesserung der Prozeßsicherheit. Stuttgart: Staatliche Materialprüfungsanstalt, Abschlußbericht, MPA-Auftrags-Nr. 8967 01 001, 1993.
- [10] Beck, T.; Reng, N.; Richter, K.: Fiber type and quality dictate beam delivery characteristics. In: Laser Focus World 10(1993), S.111-115.
- [11] Hunter, B. V.; Leong, K. H.: Selecting a High-Power Fiber-Optic Laser Beam Delivery System. In: Proceedings ICALEO (1996), S.173-182.
- [12] Iffländer, R.: Festkörperlaser zur Materialbearbeitung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1990.

- [13] Nonhof, C. J.: Material Processing with Nd-Lasers. Ayr: Electrochemical Publications Ltd., 1988.
- [14] Pursche, L.; Roth, S.: Prozeßtechnik und Offline-Programmierung für die Laserstrahldirektstrukturierung von 3-D MIDs. In: Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik LEF'99 (1999), S.107-118.
- [15] Klotzbach, A.; Morgenthal, L.; Beyer, E.: Laserstrahlschweißen durch High-Speed-Strahlbewegung. In: LaserOpto, 31(2), 1999, S. 64-65.
- [16] Rodenstock Präzisionsoptik GmbH, Firmenschrift.
- [17] Falldorf, H.; Jüptner, W.; Sepold, G: Sensor equipment of a remote controlled Nd:YAG Prodesing Head. In: Mechanik und Optik (1995), S.179-183.
- [18] Blom, A. H. M.; Brassel, J.-O.; v. Brocke, M.; Mittler, M.: Quality Classification and Process Control of Micro-Spot Laser Welding. In Proceedings FAIM (1999), S.929-941.
- [19] Tönshoff, H. K.; Schumacher, J.: Festkörperlaser in der Fertigungstechnik. In: Laser – Von der Wissenschaft zur Anwendung. Bremen: BIAS, 1997. S.37-47.
- [20] Fürschbach, P. W.; Hinkley, D. A.: Pulsed Nd:YAG Welding of Cardiac Pacemaker Batteries with Reduced Heat Input. In: Welding Journal 3 (1997), S.103-109.
- [21] Knoff, M.: Laser in der Feinwerktechnik – gepulst oder cw?. In: VDI Berichte Nr. 031(1993), S.63-79.
- [22] Mann, K.: Nd:YAG-Laser in der Blechbearbeitung. In: Blech Rohre Profile 40(1993)4, S.331-333.
- [23] Marley, C.: Low Power YAG Laser Welding. In: Proceedings ICALEO (1996), S.104-112.
- [24] Rapp, J.: Fügetechniken an Automobilkomponenten. In: Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik LEF'99 (1999), S.37-46.
- [25] Geiger, M; Glasmacher, M.; Hutfless, J.; Pucher, H.-J.: Laser Beam Micro Welding as a new Interconnection Technique. In: 10<sup>th</sup> European Microelectronics Conference (1995), S.86-97.
- [26] Seiler, P.: Erfahrungen mit Laser beim automatisierten Punktschweißen. In: Feinwerktechnik&Messtechnik 92(1984) 5, S.226-228.
- [27] Meertens, J. A.: Laser Spot Welding of Metal Parts in Mass Production within Philips Components Sittard. In: Proceedings SheMet'98 (1998), S.25-34.
- [28] Westphäling, T.; Schmidt, M.: Laserstrahl-Mikroschweißen in der Cu-Lead-frame-Montage: Möglichkeiten und Restriktionen. In: Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik LEF'00 (2000), S.41-52.
- [29] Dürr, U.: Mikrobearbeitung von Werkstoffen mit dem Nd:YAG-Laserstrahl. In: Schweizer Präzisions-Fertigungstechnik (1993), S.14-20.

- [30] Leidinger, D.: Anwendung von gepulsten Nd:YAG Lasern in der Feinwerk- und Elektrotechnik. In: Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik LEF'99 (1999), S.183-191.
- [31] Pfeufer, V.: Kompakte Laserschweißer – Auf dem Vormarsch. In: Schweizer-Maschinen-Markt Nr. 19/1996, S.52-54.
- [32] Dausinger, F.: Strahlwerkzeug Laser – Energieeinkopplung und Prozesseffektivität. Stuttgart: Teubner, 1995.
- [33] v. Allmen, M.: Laser-Beam Interactions with Materials. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1987.
- [34] Beck, M.; Dausinger, F.; Hügel, H.: Studie zur Energieeinkopplung beim Tief-schweißen mit Laserstrahlung. In: Laser und Optoelektronik 21(3)/1989, S.80-84.
- [35] Stern, G.: Absorptivity of cw CO<sub>2</sub>, CO and YAG-laser beams by different metallic alloys. In: Proceedings ECLAT (1990), S.25-35.
- [36] Stern, G.: Absorption of CO<sub>2</sub>- and Nd:YAG-Laser beams. In: Mechanik und Optik (1995), S.393-405.
- [37] Kane, M.; Engel, T.; Fontaine, J.: Optical characterisation of laser-matter interaction: the welding application. In: Mechanik und Optik (1995), S.249-258.
- [38] Peebles, H. C.; Williamson, R. L.: The Role of the Metal Vapor Plume in Pulsed Nd:YAG Laser Welding on Aluminium 1100. In: Proceedings LAMP (1987), S.19-24.
- [39] Matsunawa, A.; Katayama, S.: Fusion and solidification processes of pulsed YAG laser spot welds. In: Proceedings ICALEO (1986), S.81-87.
- [40] Kaieler, S.; Dahmen, M.; Diekmann, A.; Kreutz, E. W.; Poprawe, R.: Failure Analysis for Laser Beam Welding. In: Proceedings ICALEO (1997), S.63-72.
- [41] Treiber, H.: Der Laser in der industriellen Fertigung. Darmstadt: Hoppenstedt, 1990.
- [42] Schumacher, J.: Untersuchungen zum Schweißen mit gepulsten Hochleistungs-Nd:YAG-Lasern – Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 456. Düsseldorf: VDI, 1997.
- [43] Seidel, B.; Beersiek, J.; Sokolowski, W.; Beyer, E.: Prozeßregelung beim Laserstrahlschweißen. In: Materialbearbeitung mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlen höchster Leistung. Düsseldorf: VDI, 1994, S.49-52.
- [44] Beyer, E.; Abels, P.: Process monitoring in laser materials processing. In: Industrial Laser Review, 12 (1993), S.9-13
- [45] Geiger, M.; Breitenbach, F.; Govekar, E.; Brassel, J.-O.: Fully Automated Nd:YAG-Welding-System for Assembly of Electronic Components. In: Proceedings ICARCV (1998), S.25-29.

- [46] Brassel, J.-O.; Schmidt, M.: Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen. In: Laser in der Elektronikproduktion & Feinwerktechnik LEF'99 (1999), S.47-64.
- [47] Farson, D.; Afsar, A.; Sang, Y.: Overview of Emission-based Laser Process Sensing. In: Proceedings ICALEO (1996)-Auto, S.72-79.
- [48] Alavi, M.; Lorenz, M.; Büttgenbach, S.: Lichtemission während des Laserschweißprozesses. In: Laser und Optoelektronik 21(3)/1989, S.69-72.
- [49] Tönshoff, H. K.; Beske, E. U.; Schumacher, J.: Energieeinkopplung beim Laserstrahlschweißen mit gepulstem kw-Festkörperlaser. In: Geiger, M.; Hollmann, F. [Hrsg.]: Strahl-Stoff-Wechselwirkung bei der Laserstrahlbearbeitung. Bamberg: Meisenbach, 1993.
- [50] VDI/VDE-Richtlinie 3511, Blatt 4: Technische Temperaturmessungen Strahlungsthermometrie (1993).
- [51] Brassel, J.-O.; Glasmacher, M.; Schmidt, M.: Observation of Laser Micro Welding Process by Two-Colour-Pyrometry and Measurement of Backreflection. In: Proceedings LANE (1997), S.345-350.
- [52] Chen, H. B.; Li, L.; Brookfield, D. J.; Williams, K.; Steen, W. M.: Laser Process Monitoring with Dual Wavelength Optical Sensor. In: Proceedings ICALEO (1991), S.113-122.
- [53] Maldague, X.; Dufour, M.: A dual-imager and its applications for active vision robot welding, surface inspection and two colour pyrometry. In: SPIE Vol.954 Optical Testing and Metrology II (1988), S.579-592.
- [54] Hamann, C.: Schallemissionsanalyse in Abhängigkeit von Leistungsdichte und Fügegeometrie beim Schweißen mit gepulstem Laserstrahl. Technische Universität München: Lehrstuhl für Fügetechnik, 1993.
- [55] Gu, H.; Duley, W. W.: Analysis of Acoustic Signals Detected from Different Locations during Laser Beam Welding of Steel Sheet. In: Proceedings ICALEO (1996), S.40-48.
- [56] Watnabe, M.; Okado, H.; Inoue, T.; Nakamura, S.; Matunawa, A.: Features of various in-process monitoring methods and their applications to laser welding. In: Proceedings ICALEO (1995), S.553-562.
- [57] Pritzkow, C.: Dauerüberwachung mittels vibroakustischer Diagnose für Instandhaltung und Produktion – Klassifikationsmöglichkeiten mittels Neuronalen Netzen. In: Tagungsband Anwendungen von Fuzzy Technologien und Neuronalen Netzen (1996).
- [58] Li, L.; Steen, W. M.: Non-contact Acoustic Emission Monitoring during Laser Processing. In: Proceedings ICALEO (1992), S.719-728.
- [59] Steen, W. M., Brookfield, D. J.; Chen, H. B.: Some Novel In-Process Sensors for Laser Material Processing. In: Conference on Laser and Electron Beam in Welding Cutting and Surface Treatment (1991), S.25-38.

- [60] Shi, K. R.; Li, L.; Steen, W. M.; Brookfield, D. J.: Real time Expert System for Laser Can Weld Diagnosis. In: Proceedings LAMP (1992), S.451-456.
- [61] Haran, F. M.; Hand, D. P.; Peters, C.; Jones, J. D. C.: Real-time focus control in laser welding. In: Measurement Science Technology 7 (1996), S.1095-1098.
- [62] Pöldmaa, V.; Rahula, A.; Sowada, U.: Vergleich des eingestrahnten und des gerichtet reflektierten Pulses bei Metallbearbeitung mit einem gepulsten Festkörperlaser. In: Laser und Optoelektronik 26(3)/1994, S.71-75.
- [63] Griebisch, J.; Hügel, H.; Dausinger, F.; Jurca, M.: Quality Assurance in Pulsed Laser Welding. In: Proceedings ICALEO (1995), S.603-612.
- [64] Kim, C.-J.; Baik, S.-H.; Kim, M.-S.; Chung, C.-M.: Remote optical power and focus monitoring in pulsed Nd:YAG laser welding. In: Proceedings SPIE, Vol.3092, S.538-541.
- [65] Kim, C.-J.; Kim, M.-S.; Chung, C.-M.: Auto-focus Control with Optical Monitoring using Chromatic Abberation of Focusing Optics in Laser Welding. In: Proceedings ICALEO (1997), S.75-84.
- [66] Kußmaul, K.; Schäfer, P. M.: Energiedosierung – eine neue Perspektive für den Einsatz des Lasers in der Mikroverbindungstechnik. In: VTE 2/94, S.81-87.
- [67] Wisselink, F. W. A.; v. Kessel, R. R.; Beckmann, L. H. J. F.; Heuvelman, C. J.; Meijer, J.: Using a PLIM for focal point determination. In: Laser und Optoelektronik 27(4)/1995, S.61-64.
- [68] Olsen, F. O.; Jørgensen, H.; Bagger, C.: Recent Investigations in Sensorics for Adaptive Control of Laser Cutting and Welding. In: Proceedings LAMP (1992), S.405-414.
- [69] Stark, W.; Deimann, R.; Habenicht, G.: Untersuchungen zum Einsatz der Schallemissionsanalyse (SEA) bei der Überwachung des Laserpunktschweißprozesses. In: Opto Elektronik Magazin, Vol.5, Nr.3, 1989, S.314-318.
- [70] Orlick, H.; Morgenstern, H.; Meyendorf, N.: Prozeßüberwachung beim Schweißen mit Festkörperlasern durch Schallemissionsanalyse. In: Schweißen und Schneiden 43 (1991) Heft 12, S.737-740.
- [71] Habenicht, G.; Hamann, C.; Rosen, H.-G.: Schallemission beim Schweißen mit gepulstem Laserstrahl. Tagungsband 10. Kolloquium Schallemission. Jena: 1994, S.117-127.
- [72] Duley, W. W.; Mao, Y. L.: The effect of surface condition on acoustic emission during welding of aluminium with CO<sub>2</sub> laser radiation. In: J. Phys. D: Appl. Phys. 27 (1994), S.1379-1383.
- [73] Steen, W. M.: Adaptive Control of Laser Material Processing. In: Proceedings LAMP (1992), S.439-444.

- [74] Cook, G.; Andersen, K.; Barrett, R. J.: Keynote Address Feedback and Adaptive Control in Welding. In: Recent trends in welding science and technology (1990), S.891-903.
- [75] Beersiek, J.; Poprawe, R.; Schulz, W.; Gu, H.; Müller, R. E.; Duley, W. W.: On-line monitoring of penetration depth in laser beam welding. In: Proceedings ICALEO (1997), S.30-39.
- [76] Morgan, S. A.; Hand, D. P.; Haran, F. M.; Peters, C.; Steen, W. M.; Jones, J. D. C.: Origin of Oscillations in Optical Signals for Nd:YAG Laser Welding. In Proceedings ICALEO (1996), S.28-35.
- [77] Haran, F. M.; Hand, D. P.; Peters, C.; Jones, J. D. C.: Process Control in Laser Welding Utilising Optical Signal Oscillations. In: Proceedings ICALEO (1996), S.49-57.
- [78] Nava-Rüdiger, E.; Houlot, M.: Integration of real time quality control systems in a welding process. In: Journal of Laser Applications 9(2) (1997), S.95-102.
- [79] Schnars, U.; Sepold, G.; Jüptner, W. P. O.: Quality Assurance of Laser Beam Welding by Evaluation of Plasma-Density-Fluctuations. In: Proceedings Symposium on Automotive Technology and Automation (1992), S.10-109.
- [80] Hand, D. P.; Peters, C.; Jones, J. D. C.: Nd:YAG laser welding process monitoring by non-intrusive optical detection in the fibre optic delivery system. In: Measurement Science Technology 6 (1995), S.1389-1394.
- [81] Jurca, M; Wiesemann, W.: Selbstlernende Prozeßüberwachung. In: Laser-Praxis, Oktober 1995, S.94-95.
- [82] Leong, K. H.: Low Cost Laser Weld Monitoring system. In: Proceedings Automotive Laser Applications Workshop (1997).
- [83] Tönshoff, H. K.; Overmeyer, L.; Schumacher, J.: Process and Quality Control for Automotive Laser Welding Applications. In: Proceedings ICALEO (1996)-Auto, S.45-54.
- [84] Sanders, P. G.; Keske, J. S.; Kornecki, G.; Leong, K. H.: Capabilities of Infrared Weld Monitor. In: Proceedings ICALEO (1997), S.1-10.
- [85] Griebisch, J.; Schlichtermann, L.; Jurca, M.; Heißler, S.; Funk, D.: Sichere Qualität – Laserschweißen von Automobilkarosserien. In: Laser, Oktober 1996.
- [86] Zimmermann, K.; Klein, R.; Poprawe, R.: Aspects for Quality Assurance with a Plasma-Monitoring System during Laser Beam Welding. Thyssen Laser-Technik GmbH: Technical Report, 1993.
- [87] Wiesemann, W.: Selbstlernende Online-Prozeßüberwachung für das Laserstrahlschweißen. In: Maschinenmarkt, Würzburg 101 (1995) 48, S.32-34.
- [88] Griebisch, J.; Schlichtermann, L.; Jurca, M.; Hoving, W.; Nillesen, C.: Quality Assurance of Industrial Spot Welding with a Pulsed Nd:YAG-Laser. In: Proceedings ICALEO (1996), S.164-173.

- [89] Farson, D.; Hillsley, K.; Sames, J.; Young, R.: Frequency-time Characteristics of Air-Borne Signals from Laser Welds. In: Proceedings ICALEO (1994), S.86-94.
- [90] Farson, D. F.; Fang, K. S.; Kern, J.: Intelligent Laser Welding Control. In: Proceedings ICALEO (1991), S.104-112.
- [91] Beyer, E.; Maischner, D.; Krazsch, Ch.: A Neural Network to Analyse Plasma Fluctuations with the Aim to Determine the Degree of Full Penetration in Laser Welding. In: Proceedings ICALEO (1994), S51-57.
- [92] Gong, H.; Olsen, F. O.: Automatic Optimization of Focal Point Position in CO<sub>2</sub>-Laser Welding. In: Proceedings ICALEO (1997), S. 67-74.
- [93] Morgan, S. A.; Fox, M. D. T.; McLean, M. A.; Hand, D. P.; Haran, F. M.; Su, D.; Steen, W. M.; Jones, J. D. C.: Real-Time Process Control in CO<sub>2</sub> Laser Welding and Direct Casting: Focus and Temperature. In: Proceedings ICALEO (1997), S.290-299.
- [94] Hoffmann, P.; Schuberth, S.; Zuber, M.: Quality Control Loops for Precision Laser Beam Welding. In: Proceedings ECLAT (1996), S.159-168.
- [95] Kinsmann G.: Fuzzy Logic Control of CO<sub>2</sub> Laser Welding. In: Proceedings of the ICALEO (1993), S.160-167.
- [96] Lunze, J.: Künstliche Intelligenz für Ingenieure. München: Oldenbourg, 1995.
- [97] Steen, W. M.: Laser Material Processing. London, Berlin, Heidelberg: Springer, 1991.
- [98] Touloukian, Y. S.; Powell, R. W.; Ho, C. Y.; Klemens, P. G.: Thermophysical Properties of Matter – Volume 1, Thermal Conductivity. New York, Washington:IFI/ Plenum, 1970.
- [99] Beyer, E.: Schweißen mit Laser – Grundlagen. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1995.
- [100] Mills, K. C.; Keene, B. J.: Factors affecting variable weld penetration. In: International Materials Reviews, Vol. 35 (1990) Nr. 4, S.185-216.
- [101] Bäuerle, D.: Laser Processing and Chemistry. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2000.
- [102] Otto, A.: Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen – Reihe Fertigungstechnik Erlangen, Band 65. Bamberg: Meisenbach, 1997.
- [103] ISO/DIS 11146:1995: Optik und optische Instrumente, Laser und Laseranlagen, Prüfverfahren für Laserstrahlparameter. Brüssel: Europäisches Komitee für Normung, 1995.
- [104] Kammeyer, K. D.: Digitale Signalverarbeitung – Filterung und Spektralanalyse. Stuttgart: Teubner, 1992
- [105] Tönshoff, H. K.; v. Alvensleben, F.; Ostendorf, A.; Güttler, R.: Process monitoring of pulsed laser welding processes. In: Proceedings SheMet (1998), S.111-117.

- [106] Griebisch, J.: Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen. Stuttgart: Teubner, 1996.
- [107] Hutfless, J.: Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage – Reihe Fertigungstechnik Erlangen, Band 33. Bamberg: Meisenbach, 1997.
- [108] Kaspar, F.; Schuster, H. G.: Easily calculable measure for complexity of spatiotemporal patterns. In: Physical Review A, Vol. 36, No. 2, 1987.
- [109] Treusch, H.-G. [Bearb.]: Schweißen mit Festkörperlasern. Düsseldorf: VDI, 1995.
- [110] Zell, A.: Simulation Neuronale Netze. Bonn, Paris: Addison-Wesley, 1994.
- [111] Patterson, D.: Künstliche neuronale Netze – Das Lehrbuch. München: Prentice Hall, 1996.
- [112] Okafor, A. C.; Adetona, O.: Predicting quality characteristics of end-milled parts based on multi-sensor integration using neural networks: individual effects of learning parameters and rules. In: Journal of Intelligent Manufacturing (1995) 6, S.389-400.
- [113] Niemann, H.: Methoden der Mustererkennung. Frankfurt a.M.: Akademische Verlagsgesellschaft, 1974.
- [114] Schrüfer, E.: Signalverarbeitung – Numerische Verarbeitung digitaler Signale. München, Wien: Carl Hanser, 1992.
- [115] Sjöberg, J.: Non-Linear System Identification with Neural Networks. Universität Linköping (S): Dissertation, 1995.
- [116] Eberhardt, R.,C.; Dobbins, R.; W.: Neural Network PC Tools – A Practical Guide. San Diego, London: Academic Press, 1993.
- [117] Jervis, T. T.; Fitzgerald, W. J.: Optimization Schemes for Neural Networks. Cambridge University Engineering Department, Technical Report, F-INFENG/TR 144 (1993).
- [118] Nauck, D.; Klawonn, F.; Kruse, R.: Neuronale Netze und Fuzzy-Systeme. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1994.
- [119] Strackeljan, J.; Behr, D.: Verfahren zur Merkmalsextraktion. In: Tagungsband Anwendungen von Fuzzy Technologien und Neuronalen Netzen (1996).
- [120] Curamik electronics GmbH, Firmenschrift.
- [121] MIL-STD-883D, Method 2004.5: Lead Integrity (1985).
- [122] Arras, M. K.; Mohraz, K.: FORWISS Artificial Neural Network Simulation Toolbox – Handbuch FAST v.2.2.0. Erlangen, 1996.
- [123] Govekar, E.; Grabec, I.: Self-Organizing Neural Network Application to Drill Wear Classification. In: Journal of Engineering for Industry 5.1994, Vol. 116, S.233-238.
- [124] Eisermann, J.; Müller, J.; Wittig, T.: Validierung von Sensordaten mittels Fuzzy Logic. In: DFMRS Jahrestagung (1994), Bd 94-1, S.137-147.

- 
- [125] Bocklisch: Fuzzy-Verarbeitung multisensorieller Signale. In: Tagungsband SENSOR (1993), S.141-148.
- [126] Biewer, B.: Fuzzy-Methoden. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997.
- [127] Schulte, U.: Einführung in Fuzzy-Logik – Fortschritt durch Unschärfe. München: Franzis, 1993.
- [128] Aliev, R.; Bonfig, K. W.; Aliev, F.: Messen, Steuern und Regeln mit Fuzzy-Logik. München: Franzis, 1994.
- [129] Weckenmann, A.: Grundlagen der Statistik – Skript zur Vorlesung. Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg: Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik, 1996.
- [130] Fuzzy-Logic Toolbox Version 2 – User's Guide. Natick, MA (USA): The Math Works, 1998.
- [131] Kranz, H.-G.; Lapp, A.: Neuro-Fuzzy-Diagnosesystem mit bewerteter Diagnosezuverlässigkeit und hoher Rauschtoleranz. In: Tagungsband Anwendungen von Fuzzy Technologien und Neuronalen Netzen (1996).
- [132] Öhlschläger, E.: Untersuchungen zum Laserpunktschweißvorgang und zur Tragfähigkeit lasergeschweißter Metallverbindungen. Technische Universität Berlin: Dissertation, 1986.
- [133] Frank, H.: Fuzzy zum anfassen – Regeln und Steuern mit Fuzzy-Logik. In: EIRAD 1993, Heft 5, S.30-36.
- [134] Chung, D. U.: Monitoring laser weld quality in real time. In: Industrial Laser Review 11(1994), S.15-16.



## **10 Anhang**

**A: Abkürzungen und Formelzeichen**

**B: Materialkennwerte**

**C: Transformationsmatrizen**

**D: Scheibenmodell**

**E: Berechnung der ZL-Komplexität**

## Anhang A: Abkürzungen und Formelzeichen

<u>Zeichen</u>	<u>Einheit</u>	<u>Beschreibung</u>
A*		Ausgabewert für Fuzzy-Interface „Prozeßatmosphäre“
act		Aktivierungsfunktion eines Neurons
c	[mm/s]	Lichtgeschwindigkeit
C <sub>p</sub>	[J/kg·K]	Spezifische Wärme
cw		Continous Wave, Dauerstrichbetrieb
d <sub>c</sub>	[mm]	Faserkerndurchmesser
DFT		Signalmerkmale der Diskreten-Fourier-Transformation
Err		Fehlermaß
E <sub>s</sub>	[V]	Signalenergie
f	[mm]	Brennweite
F	[N]	Kraft
f <sub>a,q,r</sub>	[Hz]	Meßfrequenzen
FFT		Fast-Fourier-Transformation
FP	[mm]	Laterale Fokusposition auf der Blechoberfläche
h	[J·s]	Planck'sche Konstante
ΔH	[J/kg]	Enthalpie
l	[W/cm <sup>2</sup> ]	Leistungsdichte
k	[J/K]	Boltzmann Konstante
K		Korrekturwert, Verstärkungsfaktor
k <sub>i</sub>		Klassifikationswert für das i-te Muster
KNN		Künstliches Neuronales Netz
L	[W/mm·K]	Wärmeleitfähigkeit
l	[m], [mm]	Länge
lb		lower bound (untere Grenze des Fuzzy-Interfaces)
LWL		Lichtwellenleiter
M	[kg/mol]	Molare Masse
m	[kg]	Masse
M <sub>i</sub>		Transformationsmatrix der Position i
N.A.		Numerische Apertur
NW	[mm]	Nahtweite beim Überlapstoß
OPA		Operationsverstärker
P	[W]	Leistung
P <sub>H</sub> *	[W]	Ausgabewert für Fuzzy-Interface „Pulsleistung“
P <sub>rec</sub>	[MPa]	Rückstoßdruck

pw		Pulsed Wave, Pulsbetrieb
$\vec{p}$		Parametervektor
Q	[Joule]	Energie
q		Komplexer Strahlparameter
r	[mm]	Radius
R	[mm]	Krümmungsradius der Strahlungsfront
$R^2$		Regressionskoeffizient
$R_G$	[J/mol·K]	Molare Gaskonstante
RMS		Root-Mean-Square
s	[mm]	Blechstärke
$\vec{s}$		Merkmalvektor zur Eingabe in das Neuronale Netz
SPC		Statistische Prozeßkontrolle
t	[s]	Zeit
T	[°]	Temperatur
TF		Signalmerkmale im Ortsraum (Time-Features)
ub		upper bound (obere Grenze des Fuzzy-Interfaces)
$U_s$	[V]	Signalspannung
V		Verborgene Schicht des KNN-Klassifikators
v	[m/s]	Geschwindigkeit
$w_F$	[mm]	Fokusradius
X		Eingabeschicht des KNN-Klassifikators
Y		Ausgabeschicht des KNN-Klassifikators
$y_i$		Ausgabewert des KNN-Klassifikators f. das i-te Muster
$z_F$	[mm]	Fokuslage
$z_F^*$	[mm]	Ausgabewert für Fuzzy-Interface „Fokuslage“
ZLK		Zif-Lempel-Komplexität
$z_R$	[mm]	Rayleighlänge
$\alpha$	[%]	Absorptionsgrad
$\delta$	[mm]	Optische Eindringtiefe
$\eta$		Lernrate des KNN-Klassifikators
K		Strahlpropagationsfaktor
$\kappa$	[m <sup>2</sup> /s]	Temperaturleitfähigkeit
$\lambda$	[mm]	Wellenlänge
$\mu_a$		Wert der ausgangsseitigen Zugehörigkeitsfunktion
$\mu_e$		Wert der eingangsseitigen Zugehörigkeitsfunktion
$\mu_s$	[kg/mm·s]	Dynamische Viskosität
$\vec{\mu}$		Gewichtete Zugehörigkeitsfunktion der Fuzzy-Menge

---

$\hat{\mu}$		Aggregierte Zugehörigkeitsfunktion der Fuzzy-Menge
$\Theta$	[rad]	Strahl-Divergenzwinkel
$\rho$	[kg/mm <sup>3</sup> ]	Dichte
$\sigma$		Standardabweichung
$\sigma_s$	[N/mm]	Oberflächenspannung
$\tau_H$	[ms]	Pulsdauer

## Anhang B: Materialkennwerte

<u>Kennwert</u>	<u>Einheit</u>	<u>X5CrNi1810</u>	<u>Fe</u>
Absorptionsgrad $\alpha$	[%]	30	30
spez. Wärmekapazität $C_P$	[J/kg·K]	500	754
Temperaturleitfähigkeit $\kappa$	[m <sup>2</sup> /s]	$7,1 \times 10^{-6}$	$8,47 \times 10^{-6}$
Schmelzenthalpie $\Delta H_S$	[J/kg]	$2,47 \times 10^5$	$2,7 \times 10^5$
Verdampfungsenthalpie $\Delta H_V$	[J/kg]	$6,23 \times 10^6$	$6,37 \times 10^6$
Schmelztemperatur $T_m$	[°C]	1455	1535
Verdampfungstemperatur $T_V$	[°C]	3000	2750
Wärmeleitfähigkeit L	[W/m·K]	0,15 - 0,34 <sup>1</sup>	0,84 - 0,43 <sup>1</sup>
Dichte $\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	-	$7,86 \times 10^3$
Elektronenmasse m	[kg]	-	$9,273 \times 10^{-26}$

<sup>1</sup> Interpolation der Werte von Raum- bis Schmelztemperatur (20°C -  $T_m$ ) aus [98] und [101].

## Anhang C: Transformationsmatrizen

Entsprechend der sog. optischen Matrix bzw. Propagationsmatrix  $M_{\text{ges}}$  (**Gl. C.1**) kann die Abbildung des Reflexionsstrahls entlang der Strahlachse durch die lineare Verkettung der beteiligten i-optischen Elemente bzw. deren Transfermatrizen  $M_i$  beschrieben werden.

$$M_{\text{ges}} = \begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} \quad (\text{Gl. C.1})$$

Für die in **Abschnitt 4.2.2, Phase 1: Aufheizen** dargestellte Rechnung wird das optische System mit den drei verwendeten Linsenköpern  $\ell_{1,2,3}$  aufgespannt und entsprechend der folgenden Propagationsmatrizen  $M_{1..7}$  formalisiert:

$$M_1 = \begin{vmatrix} 1 & f_1 + z_F \\ 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad M_2 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_1 & 1 \end{vmatrix}; \quad M_3 = \begin{vmatrix} 1 & f_1 + f_2 \\ 0 & 1 \end{vmatrix};$$

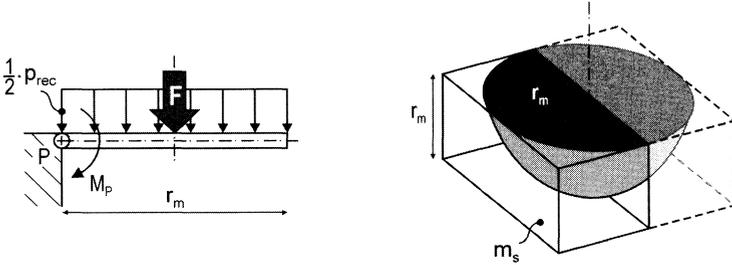
$$M_4 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_2 & 1 \end{vmatrix}; \quad M_5 = \begin{vmatrix} 1 & f_2 + f_3 \\ 0 & 1 \end{vmatrix}; \quad M_6 = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ -1/f_3 & 1 \end{vmatrix};$$

$$M_7 = \begin{vmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{vmatrix};$$

Als Wert  $d$ , wird dabei der Abstand der Detektorfläche des Onaxis-Sensors zur Abbildungslinse  $\ell_3$  bezeichnet, der für die betrachtete Rechnung  $d = 100 \text{ mm}$  beträgt.

## Anhang D: Scheibenmodell

Das Scheibenmodell vereinfacht entsprechend der Darstellung in **Bild D.1** die Schmelzbadgeometrie auf eine ebene Scheibe, die sich bzgl. der Kantenlängen am Schmelzbadradius  $r_m$  orientiert.



*Bild D.1 Scheibenmodell*

Das betrachtete dynamische System wird durch das Rotationsmoment  $M_p$  der Scheibe um den Drehpunkt P (**Gl. D1**) und den Auslenkwinkel  $\psi$  (**Gl. D2**) beschrieben.

$$M_p = J_p \cdot \ddot{\psi} \quad (\text{Gl. D.1})$$

$$\psi = \frac{1}{2} \cdot \ddot{\psi} \cdot t^2 \quad (\text{Gl. D.2})$$

Das Rotationsmoment kann gemäß (**Gl. D.1.1**) aus dem Drehmoment, das sich durch den halben Rückstoßdruck bzw. der daraus resultierenden Flächenlast  $F$  bildet sowie der Scheibenbreite bzw. dem Schmelzbadradius  $r_m$  berechnet werden.

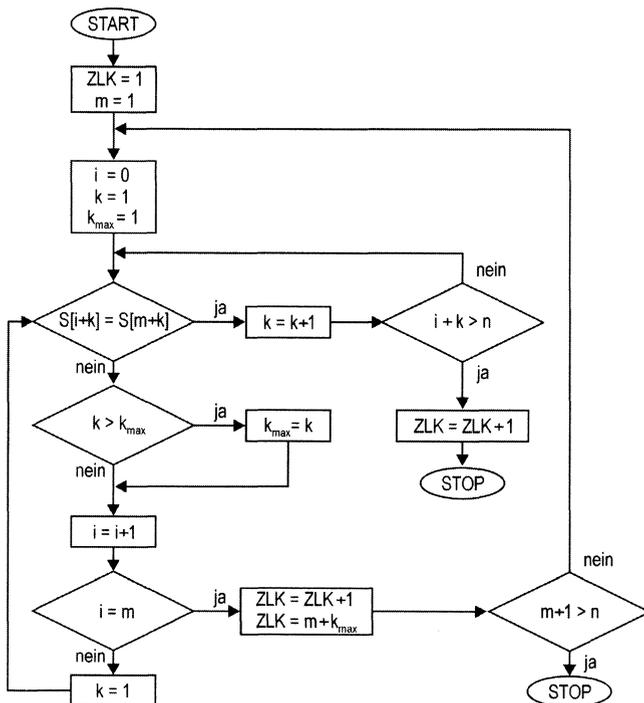
$$M_p = \frac{1}{2} \cdot F \cdot r_m ; \quad \text{mit: } F = \frac{1}{2} \cdot p_{\text{rec}}^* \cdot r_m^2 \quad (\text{Gl. D.1.1})$$

Das Massenträgheitsmoment bzgl. des Drehpunkts P kann dabei gemäß **Gl. D.1.2** ermittelt werden.

$$J_p = \frac{1}{3} \cdot m_s \cdot r_m^2 ; \quad \text{mit: } m_s = r_m^3 \cdot \rho_{\text{Fe}} \quad (\text{Gl. D.1.2})$$

## Anhang E: Berechnung der ZL-Komplexität

Den numerischen Berechnungen der ZL-Komplexität liegt das in **Bild E.1** gezeigte Flußdiagramm aus [108] zugrunde.



*Bild E.1 Flußdiagramm für die numerische Berechnung der Zif-Lempel-Komplexität*

## Summary

Flash-lamp pumped Nd:YAG solid-state lasersystems have been the technological basis for several years now within industrially employed production systems for mechanical or electrical joints of high precision.

To accomplish ready-to-use tools enhancing the Nd:YAG laser micro-welding process is objective of the entire investigation, in order to significantly increase the technical capacity of the welding device along with quality controlling the welding results meanwhile the ongoing production.

The specification of a newly designed multi-sensor welding head for the purpose of online process diagnosis is therefore set to be the first step towards the desired control-system.

Subsequently, basic research on micro-welded overlap-joints represent the starting point of a successful correlation between certain input-parameters and specifically selected sensor signals.

By sensor-fusion and with help of signal-processing-modules, based on neural networks and fuzzy-sets, robust tools for monitoring and controlling the micro-welding process are achieved.

Finally, online operating methods for signal-processing are presented, which offer the capability to minimize the weld defect-rate or permanently assure a sufficient weld penetration-depth at overlap-joints.



## **Lebenslauf**

Der Lebenslauf wird nicht veröffentlicht.



# Reihe

## Fertigungstechnik - Erlangen

[www.mb.uni-erlangen.de/diss](http://www.mb.uni-erlangen.de/diss)

**Band 1 - 52**  
**Carl Hanser Verlag, München**

**ab Band 53**  
**Meisenbach Verlag, Bamberg**  
**45,-- Euro**

Band 1: Andreas Hemberger  
**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme**  
208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Detlef Classe  
**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**  
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting  
**Projektiertung von Montagesystemen**  
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter  
**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik**  
177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

Band 5: Shir-Kuan Lin  
**Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern**  
168 Seiten, 46 Bilder. 1989.

Band 6: Rudolf Nuss  
**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden**  
206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz  
**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen**  
194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier  
**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen**  
179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele  
**Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion**  
183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

Band 10: Rolf Pfeiffer  
**Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik**  
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990.

Band 11: Herbert Fischer  
**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung**  
201 Seiten, 82 Bilder. 1990.

- Band 12: Gerhard Kleineidam  
**CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung**  
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
- Band 13: Frank Vollertsen  
**Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**  
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.
- Band 14: Stephan Biermann  
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern**  
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.
- Band 15: Uwe Geißler  
**Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**  
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.
- Band 16: Frank Oswald Hake  
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen**  
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
- Band 17: Herbert Reichel  
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**  
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.
- Band 18: Josef Scheller  
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen**  
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
- Band 19: Arnold vom Ende  
**Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize**  
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.
- Band 20: Joachim Schmid  
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern**  
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.
- Band 21: Egon Sommer  
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen**  
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
- Band 22: Georg Geyer  
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage**  
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
- Band 23: Rainer Flohr  
**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)**  
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
- Band 24: Alfons Rief  
**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**  
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.
- Band 25: Christoph Thim  
**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation**  
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
- Band 26: Roland Müller  
**CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**  
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.
- Band 27: Günther Schäfer  
**Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung**  
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

- Band 28: Martin Hoffmann  
**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechblegteilen**  
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
- Band 29: Peter Hoffmann  
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :  
Prozessführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung  
von Blechformteilen**  
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.
- Band 30: Olaf Schrödel  
**Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen**  
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
- Band 31: Hubert Reinisch  
**Planungs- und Steuerungswerkzeuge  
zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**  
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
- Band 32: Brigitte Bärmreuther  
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens  
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**  
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
- Band 33: Joachim Hutfless  
**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik  
in der Strahlführung einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.
- Band 34: Uwe Günzel  
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative  
und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung**  
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.
- Band 35: Bertram Ehmman  
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung  
auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**  
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
- Band 36: Harald Kolléra  
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems  
für das Laserstrahlschneiden**  
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.
- Band 37: Stephanie Abels  
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen  
in einem integrierten Simulationssystem**  
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
- Band 38: Robert Schmidt–Hebbel  
**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher**  
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.
- Band 39: Norbert Lutz  
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe  
mit XeCl–Excimerlaserstrahlung**  
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.
- Band 40: Konrad Grapp  
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung  
an Steuerungssoftware von SMD–Bestücklinien**  
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
- Band 41: Martin Koch  
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung  
in der Investitionsgüterindustrie**  
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
- Band 42: Armin Gropp  
**Anlagen- und Prozessdiagnostik  
beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG–Laser**  
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

- Band 43: Werner Heckel  
**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren**  
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.
- Band 44: Armin Rothhaupt  
**Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung**  
180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
- Band 45: Bernd Zöllner  
**Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion**  
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.
- Band 46: Bodo Vormann  
**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile**  
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.
- Band 47: Peter Schnepf  
**Zielkostenorientierte Montageplanung**  
144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
- Band 48: Rainer Klotzbücher  
**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen**  
156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
- Band 49: Wolfgang Greska  
**Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen**  
144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
- Band 50: Jörg Franke  
**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)**  
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.
- Band 51: Franz-Josef Zeller  
**Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter**  
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.
- Band 52: Michael Solvie  
**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen**  
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.
- Band 53: Robert Hopperdietzel  
**Reengeneering in der Elektro- und Elektronikindustrie**  
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.  
ISBN 3-87525-070-2
- Band 54: Thomas Rebhan  
**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern – Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**  
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.  
ISBN 3-87525-075-3
- Band 55: Henning Hanebuth  
**Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik**  
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996.  
ISBN 3-87525-074-5
- Band 56: Uwe Schönherr  
**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern**  
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.  
ISBN 3-87525-076-1
- Band 57: Stefan Holzer  
**Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung**  
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996.  
ISBN 3-87525-079-6

- Band 58: Markus Schultz  
**Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen**  
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-080-X
- Band 59: Thomas Krebs  
**Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell**  
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-081-8
- Band 60: Jürgen Sturm  
**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**  
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-082-6
- Band 61: Andreas Brand  
**Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)**  
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-087-7
- Band 62: Michael Kauf  
**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-083-4
- Band 63: Peter Steinwasser  
**Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung**  
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-084-2
- Band 64: Georg Liedl  
**Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion**  
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-086-9
- Band 65: Andreas Otto  
**Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen**  
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.  
ISBN 3-87525-089-3
- Band 66: Wolfgang Blöchl  
**Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programptimierung**  
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-091-5
- Band 67: Klaus-Uwe Wolf  
**Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln**  
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-092-3
- Band 68: Frank Backes  
**Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung**  
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-093-1
- Band 69: Jürgen Kraus  
**Laserstrahlumformen von Profilen**  
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-094-X
- Band 70: Norbert Neubauer  
**Adaptive Strahlführungen für CO<sub>2</sub>-Laseranlagen**  
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-095-8

- Band 71: Michael Steber  
**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen  
in der automatisierten Montage**  
168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-096-6
- Band 72: Markus Pfestorf  
**Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik**  
162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.  
ISBN 3-87525-097-4
- Band 73: Volker Franke  
**Integrierte Planung und Konstruktion  
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**  
143 Seiten, 81 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-098-2
- Band 74: Herbert Scheller  
**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte  
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**  
184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-099-0
- Band 75: Arthur Meißner  
**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile  
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**  
164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-100-8
- Band 76: Mathias Glasmacher  
**Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen**  
184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-101-6
- Band 77: Michael Schwind  
**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften  
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**  
124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-102-4
- Band 78: Manfred Gerhard  
**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung  
der Prozeßführung beim Lötten komplexer Baugruppen**  
179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-103-2
- Band 79: Elke Rauh  
**Methodische Einbindung der Simulation  
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**  
192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-104-0
- Band 80: Sorin Niederkorn  
**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung  
bei umformtechnischen Prozessen**  
99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-105-9
- Band 81: Stefan Schubert  
**Regelung der Fokusbildung beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern  
unter Einsatz von adaptiven Optiken**  
140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-106-7
- Band 82: Armando Walter Colombo  
**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures  
of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets**  
216 Seiten, 86 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-109-1
- Band 83: Otto Meedt  
**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling  
durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung**  
186 Seiten, 103 Bilder. 1998.  
ISBN 3-87525-108-3

- Band 84: Knuth Götz  
**Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**  
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-112-1
- Band 85: Ralf Luchs  
**Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT**  
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.  
ISBN 3-87525-113-7
- Band 86: Frank Pöhlau  
**Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)**  
144 Seiten, 99 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-114-8
- Band 87: Roland T. A. Kals  
**Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes**  
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-115-6
- Band 88: Gerhard Luhn  
**Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion.**  
252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.  
ISBN 3-87525-116-4
- Band 89: Axel Sprenger  
**Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen**  
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-117-2
- Band 90: Hans-Jörg Pucher  
**Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten**  
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-119-9
- Band 91: Horst Arnet  
**Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung**  
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-120-2
- Band 92: Doris Schubart  
**Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung**  
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-122-9
- Band 93: Adrianus L. P. Coremans  
**Laserstrahlintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlesinterter Metallkörper**  
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-124-5
- Band 94: Hans-Martin Biehler  
**Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung**  
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.  
ISBN 3-87525-126-1
- Band 95: Wolfgang Becker  
**Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken**  
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-127-x
- Band 96: Philipp Hein  
**Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung**  
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.  
ISBN 3-87525-128-8

Band 97: Gunter Beitinger  
**Herstellungs- und Prüfverfahren  
für thermoplastische Schaltungsträger**  
169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen, 1999.  
ISBN 3-87525-129-6

Band 98: Jürgen Knoblach  
**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von  
Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**  
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen, 1999.  
ISBN 3-87525-130-X

Band 99: Frank Breitenbach  
**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie  
elektronischer SMT-Bauelemente**  
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen, 2000.  
ISBN 3-87525-131-8

Band 100: Bernd Falk  
**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage  
für Werkzeuge der Kaltmassivumformung**  
134 Seiten, 101 Bilder, 15 Tabellen, 2000.  
ISBN 3-87525-136-9

Band 101: Wolfgang Schlögl  
**Integriertes Simulationsdaten-Management  
für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung**  
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen, 2000.  
ISBN 3-87525-137-7

Band 102: Christian Hinsel  
**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter  
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**  
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen, 2000.  
ISBN 3-87525-138-5

Band 103: Stefan Bobbert  
**Simulationsgestützte Prozessauslegung  
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**  
123 Seiten, 77 Bilder, 2000.  
ISBN 3-87525-145-8

Band 104: Harald Rottbauer  
**Modulares Planungswerkzeug  
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**  
166 Seiten, 106 Bilder, 2001.  
ISBN 3-87525-139-3

Band 105: Thomas Hennige  
**Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen**  
119 Seiten, 50 Bilder, 2001.  
ISBN 3-87525-140-7

Band 106: Thomas Menzel  
**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung  
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**  
152 Seiten, 71 Bilder, 2001.  
ISBN 3-87525-142-3

Band 107: Thomas Stöckel  
**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene  
in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**  
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen, 2001.  
ISBN 3-87525-143-1

Band 108: Frank Pitter  
**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen  
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**  
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen, 2001.  
ISBN 3-87525-144-X

Band 109: Markus Korneli  
**Integration lokaler CAP-Systeme  
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**  
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen, 2001.  
ISBN 3-87525-146-6

Band 110: Burkhard Müller  
**Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion**  
128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tabellen. 2001  
ISBN 3-87525-159-8

Band 111: Jürgen Göhringer  
**Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen**  
178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-147-4

Band 112: Robert Feuerstein  
**Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung**  
161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-151-2

Band 113: Marcus Reichenberger  
**Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)**  
165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-152-0

Band 114: Alexander Huber  
**Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren**  
122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-153-9

Band 115: Sami Krimi  
**Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion**  
155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-157-1

Band 116: Marion Merklein  
**Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften**  
122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tabellen. 2001.  
ISBN 3-87525-156-3

Band 117: Thomas Collisi  
**Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten**  
181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-164-4

Band 118: Markus Koch  
**Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik**  
176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-165-2

Band 119: Michael Schmidt  
**Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion**  
152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-166-0

Band 120: Nicolas Tiesler  
**Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinsteile**  
126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-175-X

Band 121: Lars Pursche  
**Methoden zur rechnergestützten Programmierung für die 3D- Lasermikrobearbeitung**  
in Druck

Band 122: Jan-Oliver Brassel  
**Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen**  
148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen. 2002.  
ISBN 3-87525-181-4





