

Herausgeber:

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

Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen

**Markus Schultz**

**58**

Schultz

**Fertigungsqualität beim  
3D-Laserstrahlschweißen  
von Blechformteilen**

ISSN 1431-6226  
ISBN 3-87525-080-X





Markus Schultz

*Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen  
von Blechformteilen*



Markus Schultz

*Fertigungsqualität beim  
3D-Laserstrahlschweißen  
von Blechformteilen*

Bericht aus dem Lehrstuhl für  
Fertigungstechnologie  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Manfred Geiger

**LFT**



Meisenbach Verlag Bamberg

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

Tag der Einreichung: 13. Mai 1996  
Tag der Promotion: 14. Oktober 1996  
Dekan: Prof. Dr. phil. Dr.-Ing. habil. H. Stoyan  
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. M. Geiger  
Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

**Schultz, Markus:**

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von  
Blechformteilen / Markus Schultz. - Bamberg : Meisenbach, 1997  
(Fertigungstechnik - Erlangen ; 58)  
Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1996  
ISBN 3-87525-080-X

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 1997  
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf  
Printed in Germany

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Universität Erlangen-Nürnberg sowie am Bayerischen Laserzentrum, Erlangen. Die Thematik erwuchs aus dem von mir für die Forschungsvereinigung Automobiltechnik bearbeiteten Projekt "Technologieuntersuchungen zum 3D-Laserstrahlschweißen von Automobilkarosserien".

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. M. Geiger, dem Ordinarius des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie, der mir die wissenschaftliche Arbeit an diesem Projekt ermöglicht und mich in dessen Verlauf nachhaltig unterstützt hat. Sein mir entgegengebrachtes Vertrauen erlaubte stets ein im hohen Maße eigenverantwortliches Arbeiten. Die wissenschaftliche Diskussion und kritische Durchsicht des Manuskripts haben das Gelingen dieser Arbeit entscheidend gefördert.

Für die Übernahme des Koreferats und das spontane Aufgreifen einiger Gedanken aus dieser Arbeit danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Meerkamm, Ordinarius am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Maschinenelemente und fertigungsgerechtes Konstruieren der Universität Erlangen-Nürnberg.

Ferner möchte ich an dieser Stelle allen Kollegen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie sowie des Bayerischen Laserzentrums für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre und die stete Bereitschaft zur Diskussion oder tatkräftigen Unterstützung danken. Den zahlreichen am Projekt mitwirkenden Studenten sei ebenfalls gedankt für die konstruktiven Anregungen und die Unterstützung im Fortgang der experimentellen Arbeiten.

Schließlich gilt mein besonderer Dank meinen Eltern, die mir durch ihre immer wohlwollende und großzügige Unterstützung und Förderung eine akademische Laufbahn ermöglicht haben.

Nürnberg, im Januar 1997

Markus Schultz





<b>1</b>	<b>Einführung</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b> .....	<b>13</b>
2.1	Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Verbindungen .....	13
2.1.1	Laserstrahlschweißen .....	14
2.1.2	Begriffsbestimmung "Fertigungsqualität" .....	15
2.1.3	Normung zur Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Verbindungen .....	17
2.1.3.1	Stahlwerkstoffe .....	18
2.1.3.2	Aluminiumwerkstoffe .....	22
2.1.4	Defizite aktueller Normung .....	23
2.2	Einflußgrößen auf die Fertigungsqualität beim Laserstrahlschweißen .....	24
2.2.1	Werkstück und Fügestellenvorbereitung .....	25
2.2.1.1	I-Naht am Stumpfstoß .....	26
2.2.1.2	I-Naht am Überlappstoß .....	28
2.2.1.3	Kehlnaht am Überlappstoß .....	30
2.2.2	Werkzeugmaschine und Steuerung .....	32
2.2.3	Spanntechnik .....	34
<b>3</b>	<b>Zielsetzung</b> .....	<b>37</b>
<b>4</b>	<b>Bewertung der Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Überlappverbindungen</b> .....	<b>39</b>
4.1	Bewertete Merkmale .....	41
4.2	Bewertungsgruppen .....	44
<b>5</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen von Blechformteilen</b> .....	<b>49</b>
5.1	Versuchseinrichtungen, -planung und -durchführung .....	49
5.1.1	Werkstoffe, Werkstücke und prozeßtechnische Randbedingungen ...	49
5.1.2	Werkzeugmaschinen .....	55
5.1.3	Spanntechnik .....	57
5.1.4	Adaptive Optik .....	58
5.2	Prozeßführungsstrategien an Blechformteilen .....	59
5.2.1	Konventionelle Prozeßführung .....	61
5.2.2	Bearbeitung mit Laserleistungsreduzierung .....	62
5.2.3	Bearbeitung mit Zusatzwerkstoff .....	63
5.2.4	Bearbeitung mit Anstellwinkeln .....	64

---

5.2.5	Bearbeitung mit adaptiver Optik . . . . .	66
5.2.6	Linearisierung . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Bewertete Bearbeitungsergebnisse zum Laserstrahlschweißen von Blechformteilen</b> . . . . .	<b>73</b>
6.1	Grundlegende Betrachtungen zum Schweißen von Formelementen mit CO <sub>2</sub> -Laserstrahlung . . . . .	74
6.1.1	Prozeßführungsstrategien . . . . .	76
6.1.1.1	Bearbeitung von Außenkonturen . . . . .	76
6.1.1.2	Bearbeitung von Innenkonturen . . . . .	82
6.1.1.3	Fertigungstechnische Umsetzung . . . . .	85
6.1.2	Fügestellengeometrien . . . . .	88
6.1.2.1	I-Naht am Stumpfstoß . . . . .	89
6.1.2.2	I-Naht am Überlappstoß . . . . .	91
6.1.2.3	Kehlnaht am Überlappstoß . . . . .	93
6.1.3	Bearbeitung verzinkter Werkstücke . . . . .	95
6.2	Bearbeitungsergebnisse zum Schweißen von Kontur- folgen mit CO <sub>2</sub> -Laserstrahlung . . . . .	100
6.3	Bearbeitungsergebnisse zum Schweißen von Real- bauteilen mit CO <sub>2</sub> -Laserstrahlung . . . . .	105
6.3.1	Innenblech A-Säule: I-Naht am Stumpfstoß . . . . .	105
6.3.2	Kopfschiene - Innenblech A-Säule - Dachrahmen . . . . .	113
6.3.2.1	I-Naht am Überlappstoß . . . . .	113
6.3.2.2	Kehlnaht am Überlappstoß . . . . .	123
6.3.3	Heckklappenverbindung: Bördelnaht . . . . .	129
6.4	Bearbeitungsergebnisse zum Schweißen von Form- elementen mit Nd:YAG-Laserstrahlung . . . . .	135
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b> . . . . .	<b>145</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	<b>149</b>
	<b>Anhang</b> . . . . .	<b>165</b>

**Abkürzungen und Formelzeichen:**

AA	Aluminium Association
Ar	chemisches Symbol: Argon
CAD	Computer Aided Design
CEN	Comité Européen de Normalisation
CO <sub>2</sub>	chemisches Symbol: Kohlendioxid
Cu	chemisches Symbol: Kupfer
cw	continous wave (Dauerstrichbetrieb)
DIS	Draft International Standard (Normentwurf)
DVS	Deutscher Verband für Schweißtechnik
He	chemisches Symbol: Helium
HF	Hochfrequenz
LB	Laser Beam (Laserstrahl)
MIG	Metall-Inertgas-Schweißen
NC	Numeric Control
Nd:YAG	mit Neodym-Ionen dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat
prEN	vorläufige europäische Norm
TCP	Tool Centre Point (Werkzeugspitze)
TEM	transversaler elektromagnetischer Mode
WPS	Widerstandspunktschweißen
Zn	chemisches Symbol: Zink

Die Verwendung der Formelzeichen orientiert sich an den Normen beziehungsweise Normvorschlägen DIN EN ISO 11145 [144], DIN 8563 Teil 11 [52], ISO DIS 13919 [53], DIN EN 26520 [80], DIN EN 25817 [75] und den DVS-Richtlinien 2902 Teil 1-4 [39-42] und 2906 [131].

<b>Zeichen:</b>	<b>Einheit:</b>	<b>Bedeutung:</b>
$\alpha$	°	Öffnungswinkel eines Konturelements
a	mm	Nahtdicke nach DIN 25817 [75]
A	mm <sup>2</sup>	Querschnittsfläche einer Schweißverbindung
b	mm	Schweißlinienbreite nach DVS-Richtlinie 2902 T3 [41]

$b_s$	mm	Spaltweite zwischen der Fügepartnern, Fügespaltweite
$d_L$	mm	Schweißlinsendurchmesser nach DVS-Richtlinie 2906 [131]
$dz$	mm	Fokusalagenshift durch adaptive Optik
$f$	mm	Brennweite der Fokussieroptik
$F$	N	angreifende Kraft
$h$	mm	allgemeine Bezeichnung der Abmessung einer Imperfektion nach DIN 8563 T11 [52]
$h_{ad}$	$\mu\text{m}$	Aktuatorhub der adaptiven Optik
$h_{min}$	mm	Schweißnahtdicke an laserstrahlgeschweißten Überlappverbindungen
$l$	mm	Schweißnahtlänge
$\Delta L$	mm	Abstand zwischen zwei Poren
$M_b$	Nm	Biegemoment
$P$	W	Dauerstrichleistung der Laserquelle
$r$	mm	programmierter TCP-Radius ohne adaptive Optik
$r_{AO}$	mm	programmierter TCP-Radius mit adaptiver Optik
$R$	mm	Bauteilradius (bezogen jeweils auf die Innenkontur)
$R_z$	$\mu\text{m}$	gemittelte Rauhtiefe
$s$	mm	Einschweißtiefe nach ISO DIS 13919 [53]
$t$	mm	Blechdicke (Verwendung analog DIN 8563 T11 [52])
$v$	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
$v_D$	m/min	Drahtvorschubgeschwindigkeit
$v_f$	m/min	Bahngeschwindigkeit des Drehpunktes der B-Achse
$v_{prog}$	m/min	programmierte Vorschubgeschwindigkeit des TCP
$v_{real}$	m/min	tatsächlich realisierte Vorschubgeschwindigkeit
$v_{soll}$	m/min	vorgesehene Soll-Vorschubgeschwindigkeit
$W_b$	$\text{m}^3$	Widerstandsmoment gegen Biegung
$z$	mm	Fokuslage (von der Blechoberfläche in Werkzeugrichtung positiv)

## 1 EINFÜHRUNG

Das Laserstrahlschweißen hat in den vergangenen Jahren im Automobilbau unterschiedliche Anwendungen [1-9] gefunden. In der Serienfertigung kam das Laserstrahlschweißen erstmals in den achtziger Jahren für die Herstellung von Motorkomponenten [10, 11] und Getriebebauteilen [12, 13] zum Einsatz. Die hierbei gefertigten und montierten Komponenten haben mittlerweile die Produktlebenszyklen der PKW erfolgreich durchlaufen.

Das Laserstrahlschweißen kommt in der Karosseriefertigung heute für zwei unterschiedliche Einsatzbereiche zur Anwendung. Durch Laserstrahlschweißen werden maßgeschneiderte, auf die spätere Funktion des Bauteils hin optimierte Platinen, sogenannte "Tailored Blanks", als Halbzeug in großen Serien hergestellt [14-19]. Nach [20] wurden seit 1985 alleine an einen Automobilhersteller bis Mitte 1994 bereits 2,5 Millionen laserstrahlgeschweißte Platinen ausgeliefert. Das Laserstrahlschweißen kommt aber auch an umgeformten Teilen im Karosserierohbau zum Einsatz [21-23]. Bereits 1991 wurde beispielsweise die Verbindung der Dachaußenhaut mit den hinteren Kotflügeln in der Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in die Großserienfertigung eingeführt [24]. Bei einem anderen Automobilhersteller wurden bis September 1994 über 1.000km Schweißnaht [25] einer Dachnahtverbindung durch Laserstrahlschweißen gefügt. Dieses Fertigungsverfahren ist somit erfolgreich in der Massenfertigung eingeführt und hat sich hier in der Herstellung einzelner Komponenten bereits hinreichend bewährt.

Das Laserstrahlschweißen als Fügeverfahren im Karosserierohbau bietet gegenüber den heute üblicherweise eingesetzten Verfahren weitreichende Vorteile, von denen im folgenden nur einige beispielhaft erwähnt seien. Gegenüber dem Widerstandspunktschweißen sind dies in erster Linie ein Steifigkeits- und Festigkeitserfolg der geschweißten Konstruktion infolge der durchgehenden Laserstrahlschweißnaht [26], eine mögliche Verkleinerung der Flanschbreiten zur Gewichtsreduzierung [27] sowie die Einsparung von Arbeitsgängen zum Versiegeln der Fügestelle, die durch ein Dichtschweißen entfallen können [28]. Zum konventionellen Schutzgasschweißen sowie zum Widerstandspunktschweißen (WPS) erschließt sich der Vorteil der Verzugsminimierung durch geringere Wärmeeinbringung in das Bauteil [29]. Das für ein Kleben erforderliche, aufwendige Reinigen der Fügestellen ist für das Laserstrahlschweißen nicht erforderlich [30]. Die laserspezifische, schlanke Nahtgeometrie und die eng begrenzte Wärmeeinflußzone erlauben neuartige Konstruktionsvarianten, die, mit minimierter Nacharbeit, auch ein Schweißen im Sichtbereich einschließen [29].

Wirtschaftlich von großem Interesse sind unter anderem die hohen Vorschubgeschwindigkeiten, die Voraussetzung für entsprechend kurze Taktzeiten sind [31].

Bei der Herstellung von geraden Nähten, wie beispielsweise beim Tailored Blanking [32-34], können die genannten Vorteile des Laserstrahlschweißens in Verbindungen mit gesicherter Qualität umgesetzt werden, sofern die erforderlichen konstruktiven Randbedingungen und eine entsprechende Fügestellenvorbereitung sichergestellt sind. Dies gilt in gleicher Weise für die weitgehend geraden Nähte aus den bereits genannten Einsatzfällen im Karosseriebau sowie für Anwendungen, bei denen das Werkstück unter einem feststehendem Laserstrahl bewegt wird, wie zum Beispiel bei Radialnähten im Getriebebau [6, 35].

Diese Umsetzung der Verfahrensvorteile in Produktqualität ist jedoch beim Laserstrahlschweißen entlang stark gekrümmter Bahnen an Formteilen im allgemeinen nicht durchführbar. Hier kommen konstruktive, prozeßtechnische und anlagenspezifische Randbedingungen zum Tragen, die die Fertigungsqualität der Schweißnaht ohne geeignete Gegenmaßnahmen beeinträchtigen [36-38].

Für konventionelle Fügeverfahren stehen für vergleichbare Sonderfälle in der Industrie im allgemeinen eine Reihe ausgebildeter Fachleute und ein umfangreicher Erfahrungsschatz aus der langjährigen Anwendung dieser Verfahren zur Verfügung. Darüber hinaus sind Hinweise zur Auslegung des Prozesses bei fertigungstechnischen Sonderfällen für konventionelle Fügeverfahren, wie beispielsweise das Widerstandspunktschweißen, durch eine Vielzahl von Regel- oder Nachschlagewerken dokumentiert [zum Beispiel 39-46]. Da das Laserstrahlschweißen erst in der jüngeren Vergangenheit in die industrielle Serienfertigung überführt wurde, stehen bei der Mehrzahl der potentiellen Laseranwender weder das langjährige Erfahrungswissen der Mitarbeiter noch die entsprechende Vielzahl von Technologieinformationen in Form von Datenbanken, Regel- oder Nachschlagewerken zur Verfügung. Bislang verabschiedete Regelwerke zum Laserstrahlschweißen [47-53] beziehen sich im wesentlichen nur auf die Verbindung I-Naht am Stumpfstoß. Es fehlt eine Vorschrift zur Erfassung der Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Überlappverbindungen ebenso wie eine differenzierte Darstellung unterschiedlicher Einflußgrößen auf die Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Verbindungen. Insbesondere besteht ein Wissensdefizit über die prozeß- und systemtechnischen Voraussetzungen für die Bearbeitung von Bearbeitungsbahnen mit kleinen Krümmungsradien an Blechformteilen und die an diesen Bahnabschnitten erzielbare Fertigungsqualität.

## 2 STAND DER TECHNIK

Der vorgestellte Stand der Technik gliedert sich in zwei thematische Schwerpunkte. Zuerst wird aus der Sicht des Qualitätsmanagements sowie anhand eingeführter schweißtechnischer Normen der Begriff der "Fertigungsqualität" laserstrahlgeschweißter Verbindungen bestimmt. Im Anschluß daran werden die Einflußgrößen auf die Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Verbindungen zusammengefaßt, die aus der Prozeßführung, der Bauteilvorbereitung sowie der Bauart und der Leistungsfähigkeit des eingesetzten Fertigungssystems resultieren. Hierbei werden in die Darstellung der einzelnen Einflußfaktoren aus der Literatur bekannte Erfahrungswerte eingebracht und zusammengefaßt, die heute als Voraussetzung für ein qualitativ hochwertiges Bearbeitungsergebnis allgemein verfügbar sind.

### 2.1 Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Verbindungen

Im Zuge eines verstärkten Qualitätswettbewerbs entscheiden unter anderem die Qualität der Erzeugnisse und die Effizienz der Qualitätsmanagementaktivitäten in ganz wesentlichem Maße über die Wettbewerbsfähigkeit und den Bestand eines Unternehmens [54]. Zentrale Elemente einer umfassenden Qualitätssicherung und -förderung sind neben anderen die Früherkennung potentieller Fehlerquellen sowie deren systematische und bewußte Verhütung [55]. Hierzu müssen bereits während der Fertigungsplanung Mindestanforderungen an die Produktqualität und geeignete Abnahmeprüfungen definiert werden, um die an das Produkt gestellten Qualitätserwartungen verifizieren zu können [56].

Auch für die schweißtechnische Fertigung sind Vorgaben für unterschiedlich gestufte Systeme zur Qualitätssicherung definiert, die unter anderem die Erfassung und Bewertung der Schweißergebnisse am Bauteil sowie die Dokumentation der prozeßtechnischen Randbedingungen beinhalten [57]. Die Definition einzelner Merkmale des Schweißergebnisses als Zielvorgabe bei der Auftragsvergabe wird im Zuge der europäischen Harmonisierung des Produkthaftungsrechts vorgesehen [57].

Um das Laserstrahlschweißen vor diesem Hintergrund als industrielles Fügeverfahren allgemein zu qualifizieren, besteht daher die Notwendigkeit, zum einen allgemeine Kriterien für die Qualitätsbewertung von Laserstrahlschweißverbindungen zu erarbeiten und zum anderen eine Überprüfung der erzielbaren Fertigungsqualität durchführen und die auf die Qualität wirkenden Einflußgrößen abschätzen zu können. Hier-

für taugliche Zielvorgaben fehlen bislang für das Laserstrahlschweißen im allgemeinen und insbesondere für die Bearbeitung von stark gekrümmten Konturen an Blechformteilen.

Es wurden zwar einsatzfallspezifische Anforderungen an eine vorgegebene Bearbeitungsaufgabe ermittelt [58] oder beispielhafte Vorschläge zur Prozeßführung an Konturelementen erarbeitet [59]. Jedoch fehlt eine allgemeine Aufbereitung der direkten Auswirkungen der hierbei eingesetzten Prozeßparameter oder der angewendeten Prozeßführungsstrategien auf einzelne Merkmale der Schweißnaht und damit auf die erzielbare Fertigungsqualität.

### 2.1.1 Laserstrahlschweißen

Das Laserstrahlschweißen gehört zum Stoffverbinden durch Schmelzschweißen [60]. Die nötige Prozeßenergie wird dabei durch die Absorption der Laserstrahlung im Bauteil zur Verfügung gestellt. Im allgemeinen ist für das Fügen mit Laserstrahlung das sogenannte Tiefschweißen technisch relevant, bei dem typische Nahttiefe zu -breite Verhältnisse von 2:1 bis 6:1 realisiert werden. Beim Tiefschweißeffekt bildet sich oberhalb einer Schwellintensität, die bei Stahlwerkstoffen eine Größenordnung von  $10^6 \text{W/cm}^2$  hat, eine Dampfkapillare aus, deren Durchmesser etwa dem des Laserstrahls entspricht. Das diesen Dampfkanal umgebende Material liegt in schmelzflüssiger Phase vor. Durch die Relativbewegung zwischen Strahl und Werkstück wird stetig neues Material aufgeschmolzen, das nach dem Umströmen der Dampfkapillare erstarrt und die Schweißnaht bildet [61].

Die Eigenschaften des Laserstrahls und andere Größen, wie zum Beispiel Schutzgasart, -menge und -zuführrichtung, beeinflussen die geometrische Form der Schweißnaht und wirken sich auch auf Eigenschaften des Schweißguts aus [35, 62]. Zu diesen dem Laserstrahl zugerechneten Einflüssen gehören die Art der Strahlung, das heißt die Wellenlänge der Laserstrahlung, und die Intensität des Laserstrahls an der Wirkstelle, die bei vorgegebener Leistung durch die Fokussierung und die Modenordnung des Strahls bestimmt ist [63]. Es gehören dazu ferner die programmierte Fokusslage der Bearbeitung und die Polarisationsform der Laserstrahlung an der Wirkstelle [64].

Aus dem Zusammenwirken des Laserstrahls der Leistung  $P$  mit der programmierten Vorschubgeschwindigkeit  $v$  ergibt sich die Streckenenergie  $P/v$ . Diese sollte für



ein gleichbleibendes Bearbeitungsergebnis beim Laserstrahlschweißen über die gesamte Schweißnahtlänge konstant gehalten werden [65].

Neben den genannten, direkt durch den Laserstrahl bestimmten Größen werden im vorliegenden Beitrag auch die Auswirkungen des eingesetzten Prozeßgases auf das Bearbeitungsergebnis als werkzeugseitige Einflußgrößen definiert. Diese Größen werden für die Bearbeitung mit den in Abschnitt 5.1.2 bezeichneten Versuchseinrichtungen als gegeben und damit als konstant vorausgesetzt. Sie werden deshalb im weiteren Verlauf mit Ausnahme der durch die Prozeßführung beeinflussten Streckenenergie in ihren Auswirkungen auf die Fertigungsqualität nicht untersucht. Die Wirkungsweise der hier als werkzeugseitig definierten Einflußgrößen auf das Bearbeitungsergebnis wird umfassend beispielsweise in [35, 47, 51, 61, 63, 66-69] erläutert.

### 2.1.2 Begriffsbestimmung "Fertigungsqualität"

Als *Qualität* wird nach ISO DIS 8402 [70] die Gesamtheit der Merkmale und Merkmalswerte (Beschaffenheit) eines Produktes oder einer Tätigkeit bezeichnet, die sich auf die geforderte Beschaffenheit, zum Beispiel zur Erfüllung gegebener Erfordernisse, bezieht. Diese gegebenen Erfordernisse beinhalten neben den vertraglich festgelegten Anforderungen, Gebrauchswünschen und -zwecken die Erwartungen der Abnehmer sowie gesetzliche Forderungen [71].

In DIN 55350 T11 Ausgabe 05.87 [72] ist der *Qualitätskreis* als in sich geschlossene Folge aller qualitätswirksamen Maßnahmen und Ergebnisse in den Phasen der Entstehung eines Produktes oder einer Tätigkeit definiert. Als *Fertigungsqualität* kann nach dieser Norm der Qualitätsanteil am Gesamtprodukt verstanden werden, der einem oder mehreren Fertigungsprozessen zugeordnet werden kann. Dieser Qualitätsanteil umfaßt jeweils die Qualität der Planung und Ausführung der entsprechenden Fertigungsschritte.

Die Neufassung der DIN 55350 Teil 11 Entwurf 11.92 [73] sieht den Begriff der *Fertigungsqualität* nicht mehr vor. In Anlehnung an die Begriffsdefinitionen in ISO DIS 8402 [70] werden die Qualitätsanteile aus dem Qualitätskreis durch sogenannte Qualitätselemente ersetzt [74]. Diese Qualitätselemente sind allgemein definiert als "Beitrag zur Qualität eines materiellen oder immateriellen Produktes aufgrund des Ergebnisses einer Tätigkeit oder eines Prozesses in einer Planungs-, Realisierungs- oder Nutzungsphase, beziehungsweise einer Tätigkeit oder eines Prozesses aufgrund

eines Elements im Ablauf dieser Tätigkeit oder dieses Prozesses."

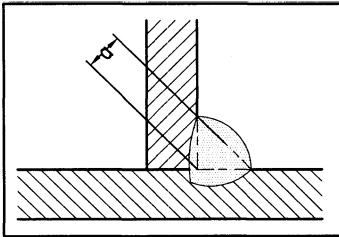
Der auch allgemeinsprachlich verwendete Begriff *Fertigungsqualität* beinhaltet in der Schweißtechnik für die Bewertung von geschweißten Verbindungen nach DIN EN 25817 [75] die Unterscheidung einerseits in die zu erwartenden Gebrauchseigenschaften der Schweißverbindung. Diese sind für die konstruktive Bauteilauslegung von größter Wichtigkeit und können durch eine Reihe von mechanischen Kennwerten charakterisiert werden, von denen hier stellvertretend Zug- oder Dauerfestigkeit als Beispiele genannt sein sollen. Andererseits wird unter dem Begriff *Fertigungsqualität* die Ausführung der Schweißverbindung aus dem Herstellungsprozeß verstanden. Diese sogenannte "Güte" der Schweißnaht kann durch eine Reihe geometrischer Merkmale bestimmt werden, die im Falle des Laserstrahlschweißens in DIN 8563 T11 [52] definiert sind und in Abschnitt 2.1.3 benannt werden. Die vorliegende Arbeit bezieht sich im weiteren Verlauf auf die letztgenannte Verwendung des Begriffes Fertigungsqualität.

Für unterschiedliche Fügeverfahren und Materialien beziehungsweise für nach diesen Verfahren hergestellte Verbindungen liegen zur Bestimmung der Fertigungsqualität jeweils eigene Bewertungsrichtlinien vor, zum Beispiel DIN EN 25817 [75], DIN 8524 T2 [76] oder DIN 65170 [77]. Diese leiten die Güte der Verbindung aus der Bewertung einzelner geometrischer Merkmale und deren Zuordnung in verschiedene Klassen ab. Ein Rückschluß dieser so definierten Schweißnahtgüte auf die Gebrauchseigenschaften eines konkreten Bauteils kann wiederum nur in einer einsatzfall-spezifischen Bauteilprüfung ermittelt werden und wird in diesen Regelwerken nicht abgedeckt.

Geforderte Bewertungsgruppen einzelner geometrischer Schweißnahtmerkmale für bestimmte Einsatzfälle wurden beispielsweise für konventionelle Schweißverbindungen im Dampfkessel-, Rohrleitungs- und Behälterbau in DIN 8558 [78] definiert. Vergleichbare Regelwerke für das Laserstrahlschweißen stehen derzeit nicht zur Verfügung.

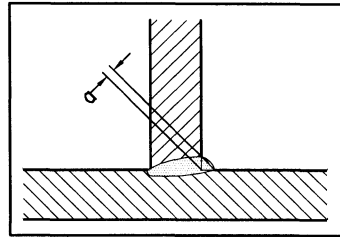
Durch die Besonderheiten einer laserstrahlgeschweißten Naht gegenüber herkömmlich geschweißten Liniennähten, zum Beispiel das große Nahttiefe zu -breite Verhältnis und die vergleichsweise hohe Vorschubgeschwindigkeit [47], können für konventionelle Schweißverfahren definierte Bewertungsgruppen in den wenigsten Fällen übernommen werden, wie das in **Bild 2.1** gezeigte Beispiel verdeutlicht.

Konventionelle MIG-Schweißnaht



- Nahtdicke "α" ist Sollwertvorgabe für die Kehlnahtdicke /DIN 25817/

Laserstrahlschweißnaht



- Merkmal "α" erlaubt keine Aussage über die tatsächliche Nahtdicke

**Bild 2.1** Typische Nahtgeometrie einer MIG- beziehungsweise einer laserstrahlgeschweißten Kehlnaht am T-Stoß

Aus den genannten Gründen wurden für die Bestimmung der Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Verbindungen einige an die Besonderheiten des Verfahrens angepasste Bewertungsrichtlinien verabschiedet.

### 2.1.3 Normung zur Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Verbindungen

Die Bewertung der Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Verbindungen ist für die Schweißnahtform I-Naht am Stumpfstoß in DIN 8563 T11 [52] "Elektronen- und Laserstrahlschweißverbindungen an Stahl - Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten" (Siehe Tabelle 2.1) erfaßt. Weitgehend deckungsgleich mit der genannten DIN-Norm ist ISO DIS 13919 "Electron- and Laser Beam Welding. Quality Levels for Imperfections" [53], die derzeit im zweiten Entwurf im Status einer Vornorm vorliegt.

Darüberhinaus sind in der DVS Richtlinie 3203 Teil 4 "Qualitätssicherung von CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschweißarbeiten" [50] Hinweise für die Gestaltung von Fugestellen und zur Prozeßführung beim Laserstrahlschweißen an unterschiedlichen Verbindungen formuliert. Die erzielbare Fertigungsqualität wird dort jedoch nur anhand einiger weniger Anwendungsbeispiele dargestellt und nicht systematisch nach definierten Qualitätsmerkmalen aufbereitet. Eine Definition der Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Verbindungen an unterschiedlichen Schweißnahtformen wird in den dargestellten Arbeitsbeispielen nicht vorgenommen.

Vorgehensweisen zur Prüfung der Fertigungsqualität gibt die DVS-Richtlinie 3210 [79] vor und spezifiziert auch einzelne Anwendungsfälle. Regeln für die Unterscheidung einzelner quantitativ erfaßbarer Qualitätsmerkmale sowie Hinweise zu deren qualitativer Einordnung abhängig von der Verbindungsart werden hier jedoch nicht vorgeschlagen.

### 2.1.3.1 Stahlwerkstoffe

DIN 8563 Teil 11 [52] "Elektronen- und laserstrahlgeschweißte Verbindungen an Stahl - Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten" ist die derzeit einzig gültig verabschiedete Norm zur Bewertung der Unregelmäßigkeiten bei laserstrahlgeschweißten Verbindungen an Stahlwerkstoffen. Hier werden Unregelmäßigkeiten (Imperfektionen) im Schweißergebnis bewertet und die Schweißverbindung jeweils der in **Tabelle 2.1** definierten Bewertungsgruppe zugeordnet. Basis dieser Bewertung sind die in DIN EN 26520 "Einteilung und Erklärungen von Unregelmäßigkeiten in Schmelzschweißungen an Metallen" [80] und DIN 8524 Teil 3 "Fehler an Schweißverbindungen aus metallischen Werkstoffen; Risse, Einteilung, Benennungen, Erklärungen" [81] beschriebenen Imperfektionen.

Die Klassifizierung der Qualitätsanforderungen an die Herstellung einer Schweißverbindung und die Bewertung der Unregelmäßigkeiten erfolgt gemäß DIN 8563 Teil 11 [52] in die fünf Bewertungsgruppen **>D, D, C, B und A**. Die Qualitätsstufen reichen dabei von der fehlerhaften Schweißverbindungen der Bewertungsgruppe **>D** bis zu Schweißverbindungen, die Sonderanforderungen erfüllen müssen. Diese werden in der Bewertungsgruppe **A** zusammengefaßt.

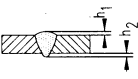
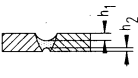
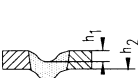
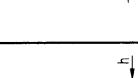
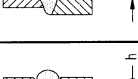
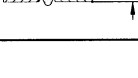
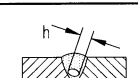
Die Grenzen der Bewertungsgruppen für die Unterscheidung der verschiedenen Qualitätsklassen **B, C und D** sind in der Norm bezogen auf die Blechdicke  $t$  spezifiziert. Die Gültigkeit der Bewertungsrichtlinie erstreckt sich für laserstrahlgeschweißte Verbindungen der Nahtform I-Naht am Stumpfstoß an Stahlwerkstoffen gleicher Dicke auf Blechdicken zwischen 0,5 und 10,0mm.

Die Merkmale und Grenzwerte zur Bestimmung der Bewertungsgruppe **A** für Sonderanforderungen sind nicht in der Norm vorgegeben und müssen vom jeweiligen Anwender entsprechend den Notwendigkeiten aus dem Betriebsfall für die Schweißverbindung gesondert festgelegt werden. Beispiele hierfür können sein: absolute Freiheit von Einbrandkerben bei dynamisch hoch beanspruchten Teilen oder eine definierte Geometrie und Aufhängung der Nahtberraupe für ein nach dem Schweißen erforder-

liches Abarbeiten der Nahtüberhöhung, beispielsweise im Sichtbereich eines Bauteils.

**Tabelle 2.1** zeigt die Bewertungskriterien und deren Einteilung in Bewertungsgruppen nach DIN 8563 T11 [52]. Für die Bewertung der Fertigungsqualität von Verbindungen mit Blechen unterschiedlicher Dicke enthält DIN 8563 T11 [52] keine Aussage.

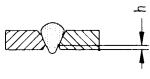
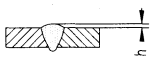
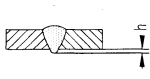
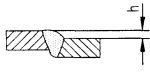
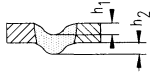
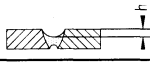

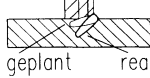
Die internationale Richtlinie ISO DIS 13919 "Welding and allied processes - Electron and laser-beam welded joints in steel - Guidance on quality levels for imperfections" [53] (siehe **Tabelle 2.2**) ist hinsichtlich der Merkmale und Bewertungsgruppen im wesentlichen deckungsgleich mit DIN 8563 T11 [52]. Als zusätzliches Bewertungskriterium wird in ISO DIS 13919 [53] das Merkmal "Abweichung von der vorgesehenen Einstrahlrichtung (deviation from specified joint axis)", Nr. 18 in **Tabelle 2.2**, aufgenommen. Es ist für die Bewertung einer Laserstrahlschweißnaht am T-Stoß heranzuziehen. Für diese Verbindungen sind auch unterschiedliche Bewertungsgruppen für die Beurteilung von Kehlnahtverbindungen am T-Stoß aus DIN ISO 5817 [82] übernommen worden.

Nr.	Unregelmäßigkeit Benennung	zeichnerische Darstellung	Grenzwerte für Unregelmäßigkeiten		
			niedrig D	mittel C	hoch B
1	Naht-, Wurzel- überhöhung		$h_1, h_2 \leq 0,1 + 0,2t$ max. 5mm	$h_1, h_2 \leq 0,1 + 0,15t$ max. 5mm	$h_1, h_2 \leq 0,1 + 0,1t$ max. 5mm
2	Nahtunter- wölbung, Wurzelrückfall		$h_1, h_2 \leq 0,3t$ max. 1mm	$h_1, h_2 \leq 0,2t$ max. 0,5mm	$h_1, h_2 \leq 0,1t$ max. 0,3mm
3	Nahtdurchhang (Nahtunter- wölbung mit Wurzelüber- höhung)		$h_1 \leq 0,3t + h_2$ max. 0,5t	$h_1 \leq 0,2t + h_2$ max. 0,3t	$h_1 \leq 0,1t + h_2$ max. 0,2t
4	Kantenversatz		$h \leq 0,2t$ max. 3mm	$h \leq 0,15t$ max. 2mm	$h \leq 0,1t$ max. 1mm
5	Randkerben		$h \leq 0,15t$ max. 1mm	$h \leq 0,1t$ max. 0,5mm	$h \leq 0,05t$ max. 0,3mm
6	Schweißspritzer angeschmolzen		zulässig, jedoch nur dem Grundwerkstoff artgleiche Spritzer		
7	Wurzel nicht durch- geschweißt		örtlich begrenzt zulässig	nicht zulässig	
8	Riß		nicht zulässig		
9	Endkraterriß		örtlich begrenzt zulässig	nicht zulässig	
10	Bindefehler		örtlich begrenzt zulässig	nicht zulässig	
11	Metaldampf- niederschlag		zulässig, jedoch nur dem Grundwerkstoff artgleicher Metaldampfniederschlag		
12	Poren Porosität Lunker		$h \leq 0,2t$	$h \leq 0,1t$ <sup>*)</sup> siehe Anhang	$h \leq 0,1t$ <sup>*)</sup> siehe Anhang

**Tabelle 2.1:** Bewertungsgruppen für Schweißverbindungen an Stahl; I-Naht am Stumpfstoß nach DIN 8563 Teil 11 [52]

Nr.	Unregelmäßigkeit, Benennung	zeichnerische Darstellung	Grenzwerte für Unregelmäßigkeiten		
			niedrig D	mittel C	hoch B
1	Risse		nicht zulässig		
2	Endkraterriß		örtliche Endkraterrisse zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig
3	Porosität und Poren		$h \leq 0,2t \leq 5\text{mm}$ $f \leq 0,02 t L$	$h \leq 0,1t \leq 3\text{mm}$ $f \leq 0,01 t L$	$h \leq 0,1t \leq 3\text{mm}$ $f \leq 0,007 t L$
			Es gilt: $h$ größte Ausdehnung einer Einzelpore $f = \pi/4 (h_1^2 + h_2^2 + \dots)$ mit Schweißnahtlänge $L \leq 150\text{mm}$		
4	Porennester		Porennester sind unter folgenden Randbedingungen zulässig: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Der befallene Bereich überschreitet <math>4h</math> auf eine Länge von 25mm nicht</li> <li>- Die maximale Porenfläche liegt innerhalb der zulässigen Werte für Porosität, Imperfektion Nr. 3</li> </ul>		
5	Porenzeilen		Porenzeilen sind unter folgenden Randbedingungen zulässig: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Die Summe der Porendurchmesser <math>h_1 + h_2 + \dots</math> überschreitet <math>t</math> auf einer Länge <math>L \leq 6t \leq 150\text{mm}</math> nicht</li> <li>- Der Abstand <math>\Delta L</math> zwischen Einzelporen <math>\leq 6h</math></li> <li>- Die maximale Porenfläche liegt innerhalb der zulässigen Werte für Porosität, Imperfektion Nr. 3</li> </ul>		
6	Endkraterlunker		Es gelten die Grenzwerte für Porosität		
7	Feste Einschlüsse		nicht relevant		
8	Bindefehler		örtlich begrenzt zulässig	nicht zulässig	
9	Ungenügende Durchschweißung		$h \leq 0,15s \leq 1\text{mm}$	$h \leq 0,1s \leq 0,5\text{mm}$	$h \leq 0,05s \leq 0,3\text{mm}$
10	Unregelmäßigkeiten von Kehlnähten	Unregelmäßigkeiten Nr. 10, 13, 14, 15 und 20 nach ISO 5817. Nur für Schweißen mit Zusatzmaterial anzuwenden. Es gelten die Grenzwerte für Bewertungsgruppen nach ISO 5817.			

**Tabelle 2.2 (Teil 1):** Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten laserstrahlgeschweißter Verbindungen an Stahl nach ISO DIS 13919 [53]

11	Randkerben		$h \leq 0,15t \leq 1\text{mm}$	$h \leq 0,1t \leq 0,5\text{mm}$	$h \leq 0,05t \leq 0,5\text{mm}$
12	Nahtüberhöhung		$h \leq 0,1 + 0,2t \leq 5\text{mm}$	$h \leq 0,1 + 0,15t \leq 5\text{mm}$	$h \leq 0,1 + 0,1t \leq 5\text{mm}$
13	Wurzelüberhöhung		$h \leq 0,1 + 0,2t \leq 5\text{mm}$	$h \leq 0,1 + 0,15t \leq 5\text{mm}$	$h \leq 0,1 + 0,1t \leq 5\text{mm}$
14	Kantenversatz		$h \leq 0,25t \leq 3\text{mm}$	$h \leq 0,15t \leq 2\text{mm}$	$h \leq 0,1t \leq 1\text{mm}$
15	Nahtunterwölbung mit Wurzelüberhöhung		$h_1 \leq 0,3t + h_2 \leq 0,5t$	$h_1 \leq 0,2t + h_2 \leq 0,3t$	$h_1 \leq 0,1t + h_2 \leq 0,2t$
Die Imperfektion ist nur für Dünnschweißungen mit $b \geq 0,5t$ und $t \leq 2\text{mm}$ zu bewerten					
16	Nahtunterwölbung		$h \leq 0,3t \leq 1\text{mm}$	$h \leq 0,2t \leq 0,5\text{mm}$	$h \leq 0,1t \leq 0,5\text{mm}$
17	Wurzelrückfall, Wurzelkerbe		$h \leq 0,3t \leq 1\text{mm}$	$h \leq 0,2t \leq 0,5\text{mm}$	$h \leq 0,1t \leq 0,5\text{mm}$
18	Abweichung vom vorgesehenen Eindringwinkel		$h \leq 0,15t \leq 1\text{mm}$	$h \leq 0,1t \leq 0,5\text{mm}$	$h \leq 0,05t \leq 0,3\text{mm}$
19	Schweißspritzer		Die Zulässigkeit hängt vom Anwendungsfall ab. Gilt für Spritzer, die identisch sind mit dem Grundwerkstoff und Schweißzusatz.		

**Tabelle 2.2 (Teil 2):**

*Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten laserstrahlgeschweißter Verbindungen an Stahl nach ISO DIS 13919 [53]*

### 2.1.3.2 Aluminiumwerkstoffe

Analog zu Stahlwerkstoffen liegt für Aluminium und seine Legierungen bislang nur für Verbindungen des Typs I-Naht am Stumpfstoß ein Regelwerk vor, das die Bestimmung der Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Verbindungen erlaubt. Anders als bei Stahl ist dieses Regelwerk jedoch bislang nicht zur gültigen Norm ange-



nommen. Es handelt sich hierbei um den Normentwurf DIN 8563 "Sicherung der Güte von Schweißarbeiten Teil 12: Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen an Aluminium und seinen schweißgeeigneten Legierungen - Richtlinie für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten" [83]. Dieser Entwurf liegt dem europäischen Normungskomitee CEN (Comité Européen de Normalisation) zur Prüfung vor. Als Gültigkeitsbereich werden hier Blechdicken zwischen 0,5 und 6mm spezifiziert. Die in diesem Normentwurf spezifizierten Unregelmäßigkeiten und deren Bewertungsgruppen für laserstrahlgeschweißte Verbindungen an Aluminiumwerkstoffen beziehen sich auf DIN EN 26520 "Classification of Imperfections in Metallic Fusion Welds, with Explanation" [80].

#### 2.1.4 Defizite aktueller Normung

Die bisher gezeigten Ansätze zur Bewertung der Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Verbindungen beziehen sich in erster Linie auf die Verbindungsart I-Naht am Stumpfstoß. Diese Nahtform hat für das Laserstrahlschweißen mit Bezug auf Automobilkarosserien insbesondere in der Halbzeugfertigung ein breites Anwendungsfeld bei der Herstellung von Tailored Blanks unterschiedlicher Werkstoffe oder Blechdicken [20].

In der Karosseriefertigung kommt das Laserstrahlschweißen neben der I-Naht am Stumpfstoß [37, 58] vornehmlich an Überlappverbindungen zum Einsatz [84]. Dies ist in erster Linie auf die historische gewachsene Auslegung einer Fahrzeugkonstruktion auf Überlappverbindungen für das Widerstandspunktschweißen (WPS) zurückzuführen. Dieses Fügeverfahren hat bis heute die weiteste Verbreitung im Karosserierohbau [30].

Überlappverbindungen bieten jedoch auch für das Laserstrahlschweißen eine Reihe von Vorteilen und werden deshalb auch in Zukunft von entscheidender Bedeutung für die industrielle Anwendung sein. Vorteile für das Laserstrahlschweißen weist die I-Naht am Überlappstoß in erster Linie durch die geringen lateralen Positionierungsanforderungen für den Laserstrahl und durch den geringen spanntechnischen Aufwand auf [85]. Die Kehlnaht am Überlappstoß eröffnet beim Laserstrahlschweißen die Möglichkeit der Dichtschweißung am Blechende. Ein Korrosionsangriff im Fügepaß kann so vermieden und die entsprechenden Maßnahmen zu dessen Verhinderung können eingespart werden [86, 87]. Die hierfür erforderlichen Genauigkeitsanforderungen an das Laserstrahlschweißen werden in Zukunft durch die Verfügbarkeit ge-

eigneter Nahtfolgesensorik mit geringeren Toleranzanforderungen an das Bauteil sowie reduziertem Programmieraufwand einzuhalten sein [88,89].

Die in Abschnitt 2.1.3 vorgestellten, derzeit gültigen Regeln zur Bestimmung der Fertigungsqualität sind ausschließlich für die Bewertung von Verbindungen des Typs I-Naht am Stumpfstoß geeignet. Damit ist ein wesentlicher Teil der technisch möglichen und heute in der Karosseriefertigung eingesetzten Laserstrahlschweißverbindungen hinsichtlich der erzielbaren Fertigungsqualität nicht nach einer vorgegebenen Auswahl an Merkmalen und Bewertungsgruppen beurteilbar.

Als einziges nicht auf die I-Naht am Stumpfstoß bezogenes Merkmal ist in ISO DIS 13919 [53] die "Abweichung vom vorgesehenen Einstrahlwinkel" ("Deviation from specified joint axis"; siehe **Tabelle 2.2.**) definiert. Es kann auch zur Bewertung der Kehlnaht am Überlappstoß genutzt werden.

Das genannte Merkmal reicht jedoch nicht aus, um für eine umfassende Bewertung einer Schweißverbindung des Typs Kehlnaht am Überlappstoß herangezogen zu werden. Die hier genannte Abweichung der Strahlachse wird nur auf einen lateralen Versatz der Einstrahlachse bezogen. Die Folgen eines solchen Strahlversatzes oder auch einer Veränderung des Einstrahlwinkels werden aus dem gezeigten Merkmal weder auf die Einschweißtiefe noch auf die Breite beziehungsweise Länge der stoffschlüssigen Verbindung der beiden Werkstücke abschätzbar. Eine Bestimmung des tragenden Querschnitts der Schweißnaht als wesentliches Maß für die Auslegung der Verbindung ist damit nicht möglich.

## **2.2 Einflußgrößen auf die Fertigungsqualität beim Laserstrahlschweißen**

Die genannten Normen und Bewertungsvorschriften sind ausschließlich für die Klassifizierung eines Schweißergebnisses definiert. Sie dienen nicht dazu, Rückschlüsse aus den Randbedingungen der Bearbeitung auf das erzielbare Bearbeitungsergebnis abzuleiten.

Im folgenden seien deshalb die heute bekannten Erfahrungswerte zusammengestellt, die für ein qualitativ hochwertiges Bearbeitungsergebnis Voraussetzung sind. Diese für den Prozeß zu berücksichtigenden Randbedingungen werden in erster Linie durch den Laserstrahl sowie durch das Handhabungsgerät, die Prozeßführung und die Bau-

teilverbereitung bestimmt. Die bereits genannten werkzeugseitigen Einflußgrößen auf das Bearbeitungsergebnis beim Laserstrahlschweißen und damit die Fertigungsqualität sind heute hinreichend untersucht [58, 90-92].

## 2.2.1 Werkstück und Fügestellenvorbereitung

Wesentliche Einflußgrößen des Werkstücks und der Fügestellenvorbereitung auf das Bearbeitungsergebnis beim Laserstrahlschweißen von Blechformteilen sind:

- ▶ Bauteilpositionierung beziehungsweise Fügspalt [93, 94]
- ▶ Bauteilbeschichtung [94-96]
- ▶ Verunreinigungen der Fügestelle [97]

Diese Parameter wirken sich je nach Verbindungsart unterschiedlich aus. Da sich die Fügspaltweite aufgrund der Wärmeeinwirkung des Schweißprozesses während der Bearbeitung verändern kann, ist durch eine geeignete Spanntechnik beziehungsweise durch vorheriges Heften der Fügepartner für gleichbleibende Bearbeitungsbedingungen während des gesamten Schweißprozesses zu sorgen.

In den Abschnitten 2.2.1.1 - 2.2.1.3 sind die genannten Einflußgrößen des Werkstücks auf die Bearbeitungsqualität für die Verbindungsarten I-Naht am Stumpfstoß sowie I-Naht und Kehlnaht am Überlappstoß aufgezeigt. Dies sind die wichtigsten Stoßarten für laserstrahlgeschweißte Liniennähte an Feinblechverbindungen im Karosseriebau [98].

Die nachfolgend nach [99-101] quantifizierten Parameter beziehen sich auf das Laserstrahlschweißen von Stahlwerkstoffen im Feinblechbereich (Blechdicke < 3mm). Hierfür sind auch die Toleranzangaben für die Fügspaltweite und andere Randbedingungen der Bearbeitung angegeben. Sie stehen beispielhaft für die Anforderungen an den Laserstrahlschweißprozeß.

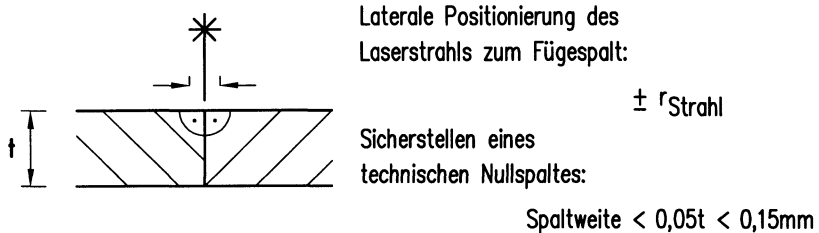
Ein "technischer Nullspalt" sei gegeben, wenn die Werkstücke bei entsprechend vorbereiteten Fügekanten im Bereich der Fügestelle direkt aneinander liegen, so daß der Fügspalt zwischen den Werkstücken nicht mehr durch Zustellbewegungen oder andere Positionierungsmaßnahmen verkleinert werden kann.

In den nachfolgenden Abschnitten 2.2.1.1 bis 2.2.1.3 sind allgemeine Einflußgrößen

auf die Fertigungsqualität verschiedener laserstrahlgeschweißter Verbindungen an Stahlwerkstoffen zusammengefaßt. Sie sollen ein Bewußtsein für die vielfältigen Einflüsse auf die an den beschriebenen Fügestellengeometrien erzielbare Fertigungsqualität schaffen.

### 2.2.1.1 I-Naht am Stumpfstoß

Für laserstrahlgeschweißte Verbindungen an Stahlwerkstoffen sind die in **Bild 2.2** genannten Fügespaltweiten einzuhalten, um ein qualitativ hochwertiges Bearbeitungsergebnis zu erzielen.



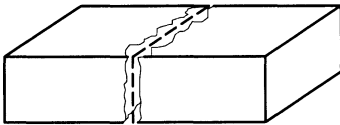
**Bild 2.2** Anforderungen an die Fügespaltweite und die laterale Positionierung des Laserstrahls für die Schweißverbindung: I-Naht am Stumpfstoß

Eine ausreichend genaue Vorbereitung der Fügestelle kann durch Laserstrahlschneiden oder Scherschneiden realisiert werden. Fräsen oder Schleifen der Fügekanten ist für Feinbleche nicht erforderlich [30, 58].

Der Laserstrahl sollte für die Bearbeitung einer I-Naht am Stumpfstoß idealerweise mittig zum Fügespalt positioniert werden. Für den lateralen Versatz zwischen Laserstrahl und Fügestelle ist ein Toleranzbereich einzuhalten, der dem Strahlradius entspricht, da es andernfalls zu Bindefehlern kommen kann. Der Fügespalt darf 5% der Blechdicke, jedoch maximal 0,15mm betragen [100]. Grundvoraussetzung ist jedoch, daß der Laserstrahl beide Fügepartner erfassen muß. Die in **Bild 2.2** genannten Angaben für die zulässige Fügespaltweite beziehen sich auf Erfahrungswerte für Strahldurchmesser von ca. 0,3mm und müssen bei geringeren Strahldurchmessern an der Wirkstelle entsprechend angepaßt werden. Der Einsatz einer Nahtfolgesensorik kann die korrekte Lage des Strahls lateral zur Fügestelle auch bei aufgrund der Bauteilgeometrie abweichender Lage der Fügestelle sicherstellen.

Imperfektionen in der Schweißverbindung sind unter anderem auf eine unzureichende Fügestellenvorbereitung zurückzuführen. **Bild 2.3** zeigt die Fehlerquellen "Einbrand", "Randverformungen" und "Flankenwinkel ungleich  $90^\circ$ ". Dies können sich im Bearbeitungsergebnis beim Schweißen in Form von Nahtunterwölbung, Wurzelrückfall und Porenbildung niederschlagen. Die geregelte Zuführung von Zusatzwerkstoff kann diese Imperfektionen ohne die Gefahr einer Nahtüberhöhung verhindern. Bei Bart- oder Gratbildung kann es je nach Lage des Bartes beziehungsweise des Grats zur Strahleintrittsseite abhängig vom Volumen zu Naht- beziehungsweise Wurzelüberhöhung oder auch zu Bindefehlern kommen. Kantenversatz unterstützt die Ausbildung von Unregelmäßigkeiten nicht (siehe Bearbeitungsbeispiele Kapitel 6), kann jedoch die dynamische Festigkeit der Schweißverbindung beeinträchtigen.

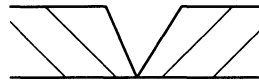
Einbrand beim Laserstrahlschneiden



Lokale Randverformungen an Biegeteilen



Bartbildung    Schnittgrat

Flankenwinkel  $\neq 90^\circ$ 

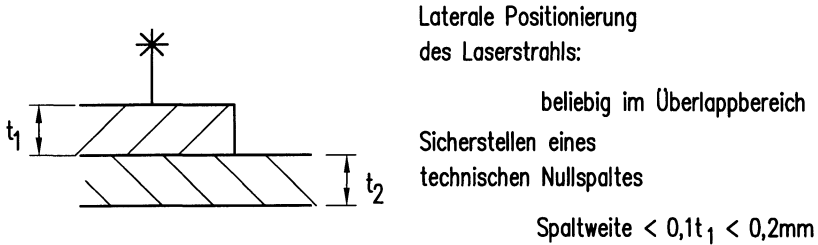
**Bild 2.3** Fehlerquellen für die Schweißverbindung I-Naht am Stumpfstoß aus der Fügestellenvorbereitung

Bei ein- oder beidseitigen Zinkschichtdicken bis zu  $20\mu\text{m}$  auf einem oder beiden Werkstücken ist unabhängig von der Art der Zinkbeschichtung (galvanisch oder feuerverzinkt) bei der I-Naht am Stumpfstoß für die Bearbeitung mit geeigneten Parametereinstellungen keine signifikante Beeinträchtigung der Qualität des Schweißergebnisses zu erwarten [102].

Eine Verschmutzung der Fügekanten mit Ölrückständen beeinflusst die Fertigungsqualität beim Laserstrahlschweißen von Feinblechen in der I-Naht am Stumpfstoß nicht signifikant. Ein Entweichen der unter Lasereinwirkung im Bereich der Fügezone verdampfenden Ölrückstände ist bei der I-Naht am Stumpfstoß ungehindert möglich. Für die Blechdicke von  $0,88\text{mm}$  wurden in [103] keine Veränderungen im Schweißergebnis zwischen entölteten und eingeölteten Blechen mit laserstrahlschnittenen

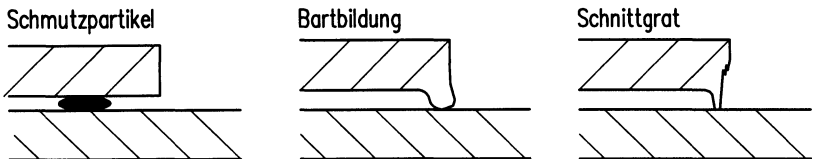
Fügekanten festgestellt.

### 2.2.1.2 I-Naht am Überlapstoß



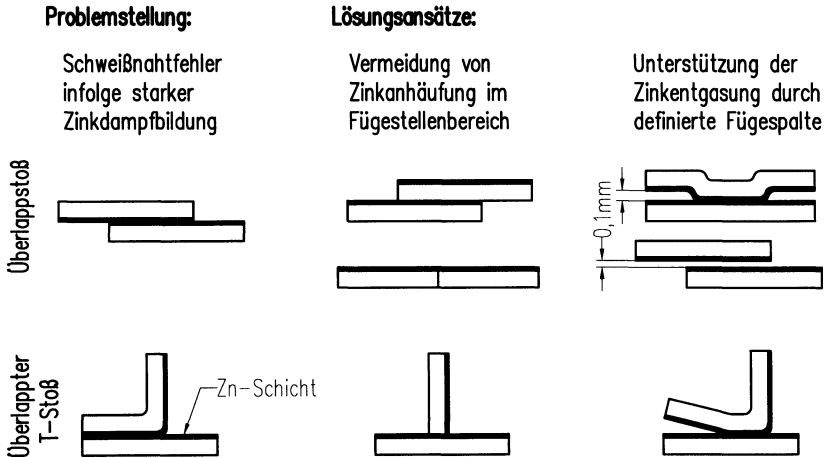
**Bild 2.4** Anforderungen an die Fügespaltweite und die laterale Positionierung des Laserstrahls für die Schweißverbindung: I-Naht am Überlapstoß

Ein Einfluß der Fügstellenvorbereitung auf das Bearbeitungsergebnis ist bei scherbeziehungsweise laserstrahlgeschnittenen Fügekanten bei spaltfreier Positionierung der Werkstücke nicht festzustellen. Für die I-Naht am Überlapstoß wird hinsichtlich der lateralen Positionierung zwischen Laserstrahl und Fügestelle die Einhaltung prozeßrelevanter Toleranzen nicht gefordert, solange eine vollständige Überlappung der Fügepartner im Bereich der Fügestelle gewährleistet ist. Zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Fertigungsqualität bei in der Blechdicke schwankenden Werkstücken ist abhängig von der Blechdickenschwankung ein Leistungsüberschuß für die Bearbeitung erforderlich. Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht sind durch die in **Bild 2.5** gezeigten Einflüsse aus der Bauteilvorbereitung hinsichtlich Bindefehlern, Nahtunterwölbung, Wurzelrückfall und der Schweißnahtdicke (Definition siehe Kapitel 4) zu erwarten.



**Bild 2.5** Fehlerquellen für die Schweißverbindung I-Naht am Überlapstoß aus der Fügestellenvorbereitung

Werkstückpaarungen, die zwischen den Blechen eine Gesamtzinkschichtdicke von  $8\mu\text{m}$  oder geringer aufweisen, können ohne Zusatzmaßnahmen mit hoher Qualität gefügt werden [5]. Von seiten der Prozeßparameter muß jedoch hierfür eine Einstellung gewählt werden, die ein Entweichen des beim Schweißvorgang entstehenden Zinkdampfs durch das Keyhole erlaubt.



**Bild 2.6** Konstruktive Maßnahmen zum Laserstrahlschweißen verzinkter Bleche in der Konfiguration I-Naht am Überlappstoß [104]

Konstruktive beziehungsweise prozeßtechnische Maßnahmen zum Verschweißen von verzinkten Blechen in der Konfiguration I-Naht am Überlappstoß mit einer Gesamtzinkschichtdicke zwischen den Blechen  $>10\mu\text{m}$  sind in **Bild 2.7** dargestellt [teilweise aus 105]. Das Einbringen definierter Fügespalte stellt ein seitliches Entweichen des entstehenden Zinkdampfs sicher [95, 106]. Hierfür werden unterschiedliche Fertigungsschritte vorgeschlagen:

- ▶ mechanische Verfahren (Rändeln, Sicken) [99, 104, 107]
- ▶ Laservorbehandlung der Fügestelle [16, 20]

Für Verbindungen in der I-Naht am Überlappstoß sind an der Werkstückoberfläche anhaftende Verunreinigungen, wie zum Beispiel Schweißspritzer, im Bereich der Fügestelle zu vermeiden, da sie einen Spalt zwischen den Fügepartnern entstehen lassen, der auch durch mechanische Spannkkräfte nicht reduziert werden kann. Daraus resultierende Fügespalte können Unregelmäßigkeiten in der Schweißverbindung wie Nahtunterwölbung, Wurzelrückfall, zu geringe Schweißnahtdicke und Binde-

fehler verursachen.

### 2.2.1.3 Kehlnaht am Überlappstoß

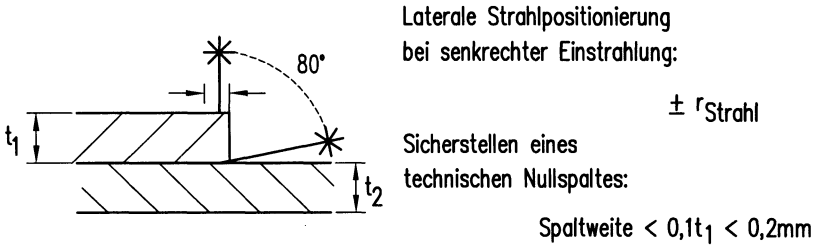
Die Kehlnaht am Überlappstoß kann mit einem seitlichen Anstellwinkel in Richtung des Fügespaltes (siehe **Bild 2.7**, gestrichelt) oder, z.B. aus Gründen der Zugänglichkeit, mit senkrecht von oben auf die Fügestelle einwirkendem Laserstrahl verschweißt werden. Die Positionierung des Strahls ist im zweitgenannten Fall so einzustellen, daß die Strahlquerschnittsfläche gerade vollständig auf dem strahlseitig positionierten Blech auftrifft. Nur so ist eine spaltfreie Dichtschweißung zu gewährleisten. Der hierbei erzielte tragende Querschnitt der Schweißnaht übersteigt in den untersuchten Fällen von Blechdicken  $t \leq 1,2 \text{ mm}$  die Blechdicke der verschweißten Werkstücke.

Wird durch Maßabweichungen des Werkstücks auf der Strahleintrittsseite oder lateralen Strahlversatz eine Schweißverbindung des Typs I-Naht am Überlappstoß erzeugt, sind mit Ausnahme einer eventuell auftretenden Spaltkorrosion keine Beeinträchtigungen der Verbindung zu erwarten. Ein Einschweißen nur in ein Blech neben der eigentlichen Fügestelle führt zu Bindefehlern im entsprechenden Bereich und gegebenenfalls zur Schädigung dieses Werkstücks durch Einbrandlöcher infolge des Leistungsüberschusses. An das an der Strahlaustrittsseite positionierte Werkstück werden keine Toleranzanforderungen gestellt, solange eine vollständige Überlappung im Bereich der Fügestelle und die Einhaltung der zulässigen Fügespaltweite sichergestellt sind.

Die für die Untersuchungen gewählte, senkrechte Einstrahlung kann in der Regel nur an Feinblechen mit  $t \leq 1,5 \text{ mm}$  Blechdicke zu Schweißnähten führen, die eine Schweißnahtdicke im Bereich der Blechdicke aufweisen. Um solche Schweißnahtdicken bei höheren Blechdicken erreichen zu können, ist ein seitliches Anstellen des Bearbeitungskopfes erforderlich, wie in **Bild 2.7** gezeigt.

Bei der Verbindung zinkbeschichteter Werkstoffe wird ein unter einem seitlichen Anstellwinkel eintreffender Strahl mehr Zink aus dem Fügespalt zwischen den Fügepartnern verdampfen als bei senkrechter Einstrahlung. Ein großer Teil dieses verdampfenden Zinks wird ohne geeignete Gegenmaßnahmen durch die Schmelze entweichen und in der Schweißnaht oder an der Nahtoberfläche zu einer signifikanten Schädigung in Form von Poren führen.

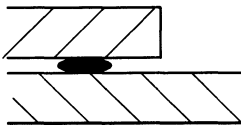




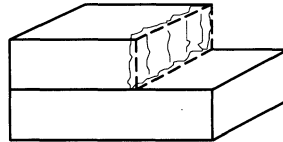
**Bild 2.7** Anforderungen an die Fügespaltweite und die laterale Positionierung des Laserstrahls für die Schweißverbindung: Kehlnaht am Überlapstoß

Eine ausreichend genaue Vorbereitung der Fügestelle kann bei der Kehlnaht am Überlapstoß durch Laserstrahlschneiden oder Scherschneiden realisiert werden. Fräsen oder Schleifen der Fügekanten ist für Feibleche nicht erforderlich.

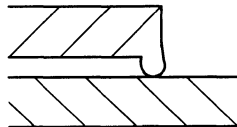
Schmutzpartikel



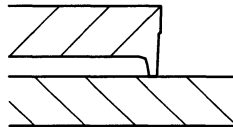
Einbrand beim Laserstrahlschneiden



Bartbildung



Schnittgrat



**Bild 2.8** Fehlerquellen für die Schweißverbindung Kehlnaht am Überlapstoß aus der Fügstellenvorbereitung

Imperfektionen in der Schweißnaht sind durch die in **Bild 2.8** gezeigten Einflüsse hinsichtlich Bindefehlern, Nahtunterwölbung, Wurzelrückfall und bezüglich der Schweißnahtdicke (Definition siehe Kapitel 4) zu erwarten. Diese Imperfektionen können einerseits resultieren aus den entstehenden Fügespalten bei Bauteilverschmutzung sowie grat- oder bartbehafteten Werkstücken, andererseits aus einem unzureichenden Aufschmelzen des strahlseitig positionierten Werkstücks an Stellen, die Einbrand aufweisen. Die geregelte Zuführung von Zusatzwerkstoff kann diese Erscheinungen ohne die Gefahr einer unkontrollierten Nahtüberhöhung verhindern [108].

Für ein- oder beidseitige Zinkschichtdicken von  $10\mu\text{m}$  oder geringer auf einem oder beiden Werkstücken werden unabhängig von der Art der Zinkbeschichtung bei der Kehlnaht am Überlapstoß bei senkrecht auftreffendem Laserstrahl unter den genannten Idealbedingungen keine negativen Auswirkungen auf das Schweißergebnis festgestellt. Aufgrund der senkrechten Einstrahlung verdampft im Vergleich zur Einstrahlung unter einem seitlichen Anstellwinkel nur eine geringe Menge Zink aus dem Überlappbereich neben der Schweißnaht. Deren Entweichen ist während des Schweißprozesses ungehindert möglich.

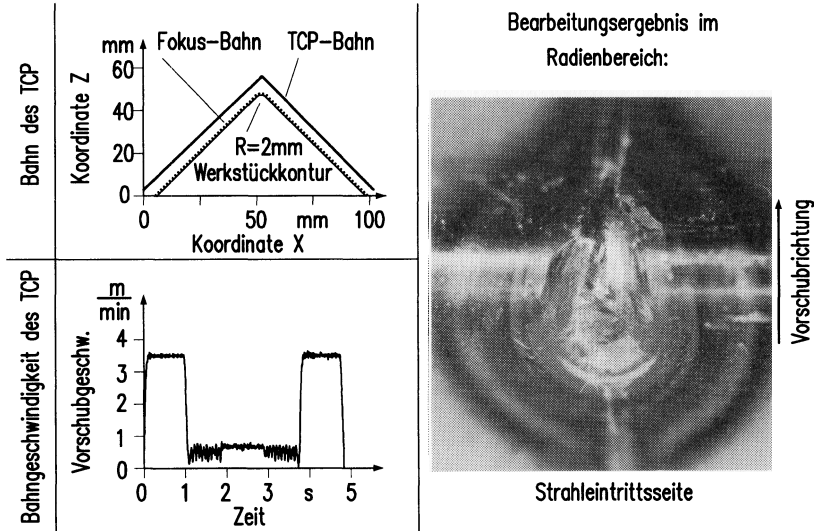
Ein analoger Zusammenhang wurde auch für eine Verschmutzung der Fügeanten mit Tiefziehöl festgestellt.

### 2.2.2 Werkzeugmaschine und Steuerung

Als wesentlicher Parameter für die Fertigungsqualität beim Laserstrahlschweißen wird bereits in Abschnitt 2.1 die Streckenenergie benannt. Bei konstanter, vorgegebener Laserleistung kommt der Werkzeugmaschine zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Streckenenergie die Aufgabe zu, den Laserstrahl mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit und Fokusslage entlang der programmierten Bearbeitungsbahn zu bewegen.

Die Antriebe der Bewegungsachsen müssen deshalb die nötige Vorschubgeschwindigkeit und das erforderliche Beschleunigungsvermögen aufweisen, diese vorgegebene Geschwindigkeit auch bei der Bearbeitung von Bauteilkonturen mit kleinen Krümmungsradien aufrechtzuerhalten. Hierfür sind je nach Bauart der Werkzeugmaschine Umorientierungen des Bearbeitungskopfes erforderlich. Die hierfür zu bewegenden Drehachsen weisen abhängig von der Bauart der Maschine einen Abstand zur Wechselwirkungsstelle auf, der typischerweise im Bereich der Brennweite der Fokussieroptik liegt. Aufgrund des durch diesen Abstand wirkenden Hebelarmes sind für Bewegungen der Drehachsen zur Umorientierung des Bearbeitungskopfes Winkelgeschwindigkeiten bis zu  $2000^\circ/\text{s}$  [109] erforderlich. Da diese Geschwindigkeiten auch mit Anlagen neuester Bauart [110] nicht erzielbar sind, werden durch die Erhöhung der Streckenenergie infolge der Absenkung der Vorschubgeschwindigkeit Imperfektionen in das Bearbeitungsergebnis eingebracht [111, 112]. Eine Problematik, die für die Bearbeitung von Bauteilkonturen mit kleinen Krümmungsradien auch aus der Roboteranwendung konventioneller Schweißverfahren bekannt ist [113].

Die Entstehung von Imperfektionen, wie sie beispielhaft in **Bild 2.9** dargestellt ist, kann durch geeignete Maßnahmen in der Prozeßführung verhindert werden [59, 85, 111, 114, 115]. Auf diese und weitere neue Strategien zur Prozeßführung an Bauteilkonturen mit kleinen Krümmungsradien wird in Abschnitt 5.2 eingegangen.



**Bild 2.9** *Bearbeitungsergebnis und zugehöriger Verlauf der Vorschubgeschwindigkeit an einer Außenkontur mit Radius 2mm bei Bearbeitung ohne Modifikation der Prozeßführung*

Neben der kinematischen Leistungsfähigkeit einzelner oder mehrerer Bewegungsachsen des Handhabungsgerätes hat auch das Maschinenkonzept einen wesentlichen Einfluß auf die Fertigungsqualität einer Laserstrahlschweißverbindung; nämlich durch die Führungsgenauigkeit der Werkzeugmaschine insbesondere bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten. Hier weisen Portalanlagen im allgemeinen wesentlich günstigere Eigenschaften auf als Standard-Industrieroboter. Zudem ist bei Standard-Industrierobotern eine Abhängigkeit der Führungsgenauigkeit und der Konstanz der Vorschubgeschwindigkeit von der Raumlage des Werkstücks sowie der Stellung der Handhabungsachsen gegeben, die für eine Bearbeitungsaufgabe entsprechend zu berücksichtigen sind [116-119].

Eine weitere Fehlerquelle für Abweichungen der Ist-Vorschubgeschwindigkeit vom programmierten Wert und damit Einflußgröße auf die Streckenenergie kann ein verzögertes Abarbeiten von Verfahrbefehlen durch die Steuerung der Werkzeugmaschine

sein. Die Maschinensteuerung schafft durch eine verzögerungsfreie Verarbeitung der NC-Programmdateien die Voraussetzung für eine fehlerfreie Bearbeitung des Werkstücks. Bearbeitungsfehler, die durch die Maschinensteuerung verursacht werden, können Stillstandszeiten in der Programmabarbeitung sein. Diese werden beispielsweise verursacht durch eine zu hohe Anzahl von Stützpunkten im NC-Programm [120], Kommunikationszeiten zwischen einzelnen Steuerungseinheiten, zum Beispiel Laser- und Maschinensteuerung (nach [121] etwa 250ms), oder durch den Umrechnungsaufwand beim Wechsel der Interpolationsart zwischen einzelnen NC-Sätzen.

### 2.2.3 Spanntechnik

Grundsätzlich übernimmt eine Spannvorrichtung für Schweißapplikationen die Aufgabe der Positionierung und Lagefixierung der Werkstücke in Schweißposition [122]. Darüberhinaus können weitere Funktionen in die Spanntechnik integriert werden, wie zum Beispiel Zustellbewegungen, Schutz- oder Formiergaszuführung, Wärmeabfuhr aus den geschweißten Bauteilen sowie Prozeßüberwachungsfunktionen [122]. Grundsätzlich kann eine Spannvorrichtung werkstückgebunden als Einzel- beziehungsweise Sondervorrichtung oder flexibel als Universalvorrichtung ausgeführt sein [123]. Werkstückgebundene Spannvorrichtungen weisen eine Reihe von Vorteilen bezüglich Reproduzierbarkeit der Einspannung, Prozeßsicherheit, Genauigkeit und Integration von Zusatzfunktionen auf. Dies ist insbesondere bei der Bearbeitung von Werkstücken mit geringer Eigensteifigkeit, wie beispielsweise Feinblechen, vorteilhaft zu nutzen. Bauartbedingt sind diese Einzelvorrichtungen jedoch unflexibel und erst ab einer gewissen Stückzahl wirtschaftlich einsetzbar. Beispiele für eine solche werkstückgebundene Spanntechnik wurden bereits erfolgreich im Karosserierohrbau, zum Beispiel zur Verbindung von Dach und hinterem Kotflügel an einem Pkw, realisiert [29, 124].

Neben einer werkstückgebundenen Spanntechnik kann auch eine flexible, nicht an die Geometrie oder Kontur des Werkstücks gebundene Spanntechnik eingesetzt werden. Diese weist Vorteile hinsichtlich der Werkstück-, Mengen- und Verfahrensflexibilität auf und ist somit bereits für kleine Stückzahlen wirtschaftlich einsetzbar. Bei geeigneten konstruktiven Lösungen können für das Schweißen von Blechteilen eine Reihe von Zusatzfunktionen, beispielsweise das Aufbringen einer geregelten Anpresskraft zum Schließen von Fügespalten oder ein Konstanthalten der Fokusslage, in eine flexible Spannvorrichtung integriert werden [125]. Die Flexibilität solcher Spanntechnik wird durch einen nur punktuell erfolgenden Kontakt der Spannmittel mit den Werkstücken realisiert. Großflächige Wärmeableitung aus dem Werkstück ist aus diesem

Grund nicht möglich. Auch die Serienintegration einer solchen flexiblen Spanntechnik für das Laserstrahlschweißen wurde bereits erfolgreich im Karosserierohbau umgesetzt, zum Beispiel an einer Dachnahtverbindung [25, 126].



### 3 ZIELSETZUNG

Aufgrund der geringen Zeitspanne, in der das Laserstrahlschweißen von Feinblechkonstruktionen aus dem Forschungsstadium in die industrielle Serienfertigung überführt wurde, fehlen bislang Richtlinien, die die Sicherung der Fertigungsqualität wesentlicher Verbindungsarten an Feinblechen im Sinne eines schweißtechnischen Qualitätssicherungssystems nach DIN ISO 9000ff. erlauben [127]. Elemente einer solchen Qualitätssicherung sind nach [57] unter anderem eine Konstruktionsprüfung, in der die konstruktive Gestaltung und deren fertigungstechnische Durchführung zu klären sind, eine Dokumentation und Prüfung der eingesetzten Betriebsmittel sowie die Durchführung einer Schweißverfahrensprüfung nach DIN 8563 T122 [128] und die Erstellung von Schweißanweisungen.

Für die Bearbeitung gerader Nähte sind die in Kapitel 2 genannten Voraussetzungen an die Füge Stelle bekannt, unter deren Berücksichtigung Laserstrahlschweißnähte hoher Qualität zu fertigen sind. Hierzu gehören konstruktive Vorgaben wie die Toleranzanforderungen an die Verbindung und an die Positionierung Strahl-Füge Stelle sowie prozeßtechnische Voraussetzungen, etwa eine gleichbleibende Streckenenergie. Hingegen fehlen insbesondere für das Laserstrahlschweißen an Blechformteilen entlang gekrümmter Bahnen, die eine starke Umorientierung des Bearbeitungskopfes erforderlich machen, grundlegende Daten, wie sich konstruktive und anlagentechnische Randbedingungen auf die Fertigungsqualität der Schweißnaht auswirken. Ebenso wenig sind die Einflüsse der Prozeßführung an Formelementen auf einzelne qualitätsrelevante Merkmale der Schweißnaht, wie zum Beispiel Nahtunterwölbung, Porenbildung oder die Schweißnahtdicke (Definition Siehe Abschnitt 4.1), bei der Bearbeitung von Konturen mit kleinen Krümmungsradien dokumentiert. Diese Daten sind jedoch, wie bereits oben ausgeführt, integrale Bestandteile eines Qualitätssicherungssystems und auch für die lasergerechte Konstruktion von Blechformteilen notwendige Informationen. Die Kenntnis über diese Zusammenhänge auch für die Bearbeitung stark gekrümmter Bearbeitungsbahnen an Blechformteilen ist deshalb für eine weitere Qualifizierung des Fertigungsverfahrens Laserstrahlschweißen unerlässlich.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit liegt in der grundlegenden Untersuchung und Dokumentation der erzielbaren Fertigungsqualität beim Laserstrahlschweißen entlang stark gekrümmter Bauteilkonturen an Blechformteilen unter unterschiedlichen prozeß- und systemtechnischen Voraussetzungen. Es werden verschiedene bekannte sowie neu entwickelte Strategien zur Prozeßführung an stark gekrümmten Bauteilkonturen untersucht und hinsichtlich der erzielbaren Schweißnahtqualität ausgewertet und dis-

kutiert. Um daraus grundlegende Bearbeitungshinweise für das Fügen von Blechformteilen möglichst umfassend erarbeiten zu können, werden die wichtigsten Verbindungsarten an Feinblechen untersucht: I-Naht am Stumpfstoß sowie I-Naht und Kehlnaht am Überlappstoß. Die Verbindungen werden an unterschiedlichen Werkstücken mit unterschiedlichen Strategien zur Prozeßführung sowohl mit CO<sub>2</sub>- als auch mit Nd:YAG-Laserstrahlung bearbeitet.

Die Bestimmung der Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Nähte ist nur für die Verbindung I-Naht am Stumpfstoß genormt [52, 53]. Geeignete Regeln und Merkmale zur Bestimmung der Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Überlappverbindungen stehen bislang nicht zur Verfügung. In einem ersten Schritt werden deshalb geeignete Schweißnahtmerkmale und Bewertungsrichtlinien definiert, die eine Bewertung der Fertigungsqualität von I-Naht- und Kehlnahtverbindungen am Überlappstoß erlauben. Die hierzu erstmals vorgeschlagenen Richtlinien (siehe Kapitel 4) wurden im Rahmen dieser Untersuchungen in Zusammenarbeit mit einem Arbeitskreis von Fachleuten aus der deutschen Automobilindustrie erarbeitet.

Aus der Literatur sind verschiedene Ansätze zur Verbesserung der Fertigungsqualität beim Laserstrahlschweißen von Bauteilkrümmungen durch geeignete Prozeßführungsstrategien bekannt [59, 111, 114, 115]. Eine systematische Analyse der jeweils mit diesen Strategien erzielbaren Fertigungsqualität liegt jedoch nicht vor. In den experimentellen Arbeiten wird deshalb erstmals die erzielbare Fertigungsqualität beim Laserstrahlschweißen von stark gekrümmten Konturen an Blechformteilen unter Anwendung dieser bekannten sowie einer im Verlauf der Untersuchungen neu erarbeiteten Strategie zur Prozeßführung grundlegend untersucht. Die Fertigungsqualität der Schweißverbindungen an gekrümmten Bauteilkonturen wird für die eingesetzte Anlagentechnik, handelsübliche CO<sub>2</sub>- und Nd:YAG-Laseranlagen, beispielhaft evaluiert. Ein wesentlicher Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der systematischen Aufbereitung dieser Bearbeitungsergebnisse hinsichtlich der unterschiedlichen Einflußgrößen auf die verschiedenen qualitätsrelevanten Schweißnahtmerkmale. Als Einflußgrößen werden unter anderem die konstruktiven Randbedingungen der Fügestelle, die eingesetzte Prozeßführungsstrategie sowie die Systemtechnik untersucht.

Aus der systematischen Aufbereitung der Auswirkungen der unterschiedlichen Einflußgrößen auf die Ausbildung einzelner Schweißnahtmerkmale und die erzielbare Fertigungsqualität werden allgemeine Hinweise zur Prozeßführung beim 3D-Laserstrahlschweißen von gekrümmten Bauteilkonturen an Blechformteilen, der hierbei erzielbaren Fertigungsqualität sowie zur lasergerechten Fertigung von Blechformteilen abgeleitet.



## 4 BEWERTUNG DER FERTIGUNGSQUALITÄT LASERSTRAHLGESCHWEISSTER ÜBERLAPPVERBINDUNGEN

Aus der Bewertung der Fertigungsqualität einer als I-Naht am Stumpfstoß ausgeführten Laserstrahlschweißverbindung nach DIN 8563 Teil 11 kann ein Teil der dort genannten Imperfektionen als direkte Minderung des tragenden Querschnitts der Schweißverbindung interpretiert werden. Es sind dies die Merkmale Nahtunterwölbung, Wurzelrückfall, nicht durchgeschweißte Wurzel, Randkerben und Poren (**Bild 4.1**). Zu einer Beeinträchtigung der dynamischen Festigkeit der Schweißnaht infolge einer ungünstigen Wirkung auf den Kraftfluß durch die Schweißnaht können neben den oben genannten weitere Imperfektionen führen, wie beispielsweise Nahtüberhöhung, Kantensversatz oder Nahtdurchhang [129]. Die Imperfektionen bewirken Spannungskonzentrationen im Bereich der Schweißverbindung [130] und beeinträchtigen dadurch deren Gestaltfestigkeit.



**Bild 4.1** Imperfektionen, die den tragenden Schweißnahtquerschnitt mindern, an einer I-Naht-Verbindung am Stumpfstoß nach DIN 8563 T11

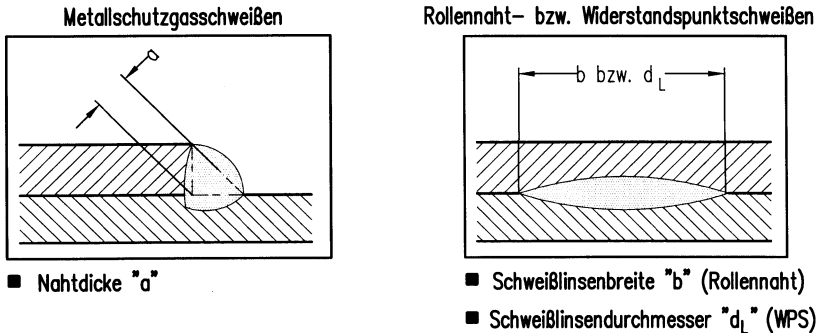
Während bei einer I-Naht am Stumpfstoß die genannten Imperfektionen direkt in den tragenden Querschnitt der Verbindung eingehen sind, ist diese Umrechnung bei Überlappverbindungen aufgrund der veränderten geometrischen Verhältnisse nicht direkt möglich. Es müssen hier erst geeignete geometrische Schweißnahtmerkmale definiert werden, die entweder einen Rückschluß auf den tragenden Querschnitt der Verbindung zulassen oder dessen direkte Bewertung ermöglichen. Dies gilt in gleicher Weise für die zu bewertenden Imperfektionen mit Einfluß auf die Gestaltfestigkeit von Überlappverbindungen.

Die Festlegung von Merkmalen und Bewertungsgruppen zur Bestimmung der Fertigungsqualität an laserstrahlgewweißten Überlappverbindungen erfordert aufgrund der unterschiedlichen geometrischen Verhältnisse eine Unterscheidung zwischen den beiden Nahtformen I-Naht und Kehlnaht am Überlappstoß. Die Erarbeitung geeigneter geometrischer Schweißnahtmerkmale für die Qualitätsbewertung dieser beiden Nahtformen baut jeweils auf der Analyse geometrisch vergleichbarer Schweißverbindungen

gen und hierfür geeigneter Schweißverfahren auf. Dort angewendete Merkmale und Methoden zur Qualitätsbestimmung werden zur Bestimmung der Fertigungsqualität der laserstrahlgeschweißten Verbindung aufgegriffen. Die Vergleichsverfahren sind für beide Nahtformen, Kehlnaht und I-Naht am Überlappstoß, unterschiedlich.

Für die I-Naht am Überlappstoß stellen das Widerstandspunkt- und das Rollennahtschweißen aufgrund der gleichen geometrischen Verhältnisse der Schweißnaht geeignete Vergleichsverfahren dar. Hier werden der Durchmesser der Schweißlinse " $d_L$ " beim Widerstandspunkt- beziehungsweise die Schweißlinsebreite " $b$ " beim Rollennahtschweißen als Berechnungsgröße bei der Auslegung von geschweißten Baugruppen verwendet [41, 131].

Für die Kehlnaht am Überlappstoß werden die Qualitätsmerkmale des konventionellen Metallschutzgasschweißens aufgrund der ähnlichen Fügestellengeometrie als Vergleichsmaßstab herangezogen, auch wenn die Ausbildung der Schweißnaht (Siehe **Bild 2.1**) mit einer laserstrahlgeschweißten Naht nur für Bleche geringer Dicke vergleichbar ist. Als Berechnungsgröße für die Auslegung einer Kehlnaht am Überlappstoß dient die Schweißnahtdicke " $a$ " [132].



**Bild 4.2** Schweißnahtmerkmale zur Berechnung von Überlappverbindungen für das Metallschutzgas-, das Widerstandspunkt-, und das Rollennahtschweißen nach [41, 131, 132]

Die Erarbeitung geeigneter geometrischer Schweißnahtmerkmale für die Qualitätsbestimmung beim Laserstrahlschweißen von Überlappverbindungen wird im folgenden erstmals durchgeführt.

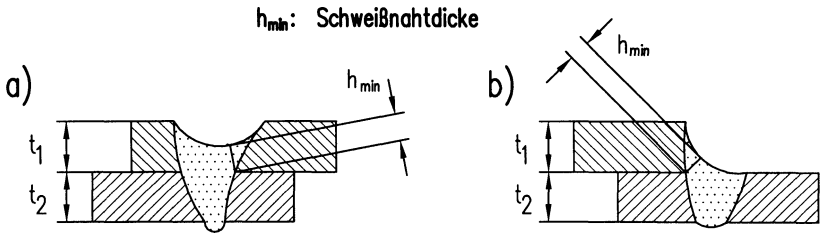
## 4.1 Bewertete Merkmale

Einige der bereits in DIN 8563 Teil 11 [52] beziehungsweise in ISO DIS 13919 [53] zur Bewertung von Stumpfstoßverbindungen definierten geometrischen Schweißnahtmerkmale können aufgrund ihrer Vergleichbarkeit für die Fertigungsqualität der Schweißverbindung zur Bewertung von I-Nähten und Kehlnähten an Überlappverbindungen ohne Modifikation übernommen werden. Hierzu zählen die Imperfektionen Nahtüberhöhung, Nahtunterwölbung, Nahtdurchhang, Rand- bzw. Einbrandkerben, Spritzer, ungenügende Durchschweißung, Risse, Bindefehler und Poren.

Anders als bei der Bewertung von Stumpfstoßverbindungen ist durch die Kenntnis und Auswertung eines Teiles der genannten äußerlich zu erfassenden Schweißnahtmerkmale ein Rückschluß auf den tragenden Querschnitt der Schweißnaht bei Überlappverbindungen nicht möglich [84, 133]. Es sind also geeignete geometrische Kenngrößen zu definieren, die die zuverlässige Bewertung der Fertigungsqualität einer laserstrahlgeschweißten I-Naht am Überlappstoß ermöglichen.

Die Bewertung einer laserstrahlgeschweißten Kehlnaht am Überlappstoß kann aufgrund der unterschiedlichen Ausbildung der Schweißnaht weder durch eine Übertragung der in DIN 8563 T11 [52] definierten Merkmale noch durch Übernahme des in DIN EN 25817 [75] definierten und von außen abzuschätzenden Merkmals der Nahtdicke "a" erfolgen. Das für das Laserstrahlschweißen charakteristische Verhältnis von Nahtbreite zu -tiefe macht eine solche rein äußerliche Abschätzung des tragenden Querschnittes auch an der Kehlnaht am Überlappstoß unmöglich (Siehe **Bild 2.1**).

Aus diesen Gründen muß analog zum Linsendurchmesser beim Widerstandspunkt- oder Rollennahtschweißen ein eigenes Merkmal zur Definition des tragenden Querschnittes für laserstrahlgeschweißte Überlappnähte definiert werden. Das in **Bild 4.3** dargestellte Merkmal wird als "**Schweißnahtdicke**" definiert und läßt sich gleichermaßen für die Qualitätsbewertung laserstrahlgeschweißter I-Nähte und Kehlnähte am Überlappstoß anwenden. Die Schweißnahtdicke charakterisiert die Dicke der Schweißnaht an der Stelle im Kraftfluß durch die Schweißverbindung, die für die Berechnung des minimalen tragenden Querschnittes der Schweißnaht herangezogen werden würde.



**Bild 4.3** Merkmal "Schweißnahtdicke" an a) I-Naht und b) Kehlnaht am Überlappstoß

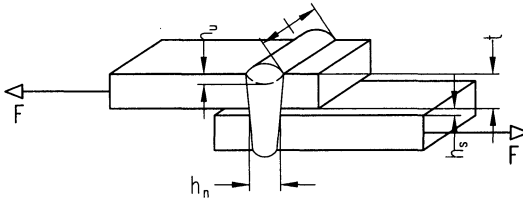
Da eine Abschätzung der Schweißnahtdicke von außen aus den genannten Gründen nicht möglich ist, muß eine exakte Überprüfung des Merkmals über die Auswertung eines Querschliffs erfolgen.

Da bei der Bewertung der Schweißnahtdicke eine direkte Auswertung eines Merkmals erfolgt, das in die Berechnung des tragenden Querschnittes der Schweißverbindung eingeht, wird auf die Aufnahme der in ISO DIS 13919 [53] definierten Abweichung der vorgesehenen Einstrahlrichtung (Merkmal Nr. 18: Deviation from specified joint axis) bei Kehlnahtverbindungen verzichtet. Zum einen, weil die Abweichung der Schweißnahtachse als nur eine mögliche Ursache für eine ungenügende Schweißnahtdicke bereits abgedeckt ist, zum anderen, weil zur vollständigen Bewertung der Querschnittsbeeinflussung durch die Schweißnahtachse auch die Angabe des Einstrahlwinkels und der lateralen Positionierung des Laserstrahls zum Fügeseit erforderlich ist (Siehe Abschnitt 2.2.1.3).

Eine wesentliche Einflußgröße auf die Dauerfestigkeit einer Verbindung ist neben dem durch das Merkmal Schweißnahtdicke definierten tragenden Querschnitt der Verbindung die Gestaltfestigkeit der Schweißnahtgeometrie. Die Gestaltfestigkeit ist bestimmt durch die geometrischen Verhältnisse beim Kraftfluß durch die Schweißverbindung [129, 132]. In diesem Zusammenhang wurde die Fügeseitweite an Überlappverbindungen als ein grundlegender Faktor für die Dauerfestigkeit ermittelt [26, 129]. Neben dem Einfluß auf die Dauerfestigkeit einer Schweißverbindung hat die Fügeseitweite zwischen den Bauteilen auch einen maßgeblichen Einfluß auf die Ausbildung der geometrischen Schweißnahtmerkmale, wie beispielsweise Nahtunterwölbung, Wurzelrückfall oder die Schweißnahtdicke [38] und damit auf den Querschnitt der Schweißnaht und der Anbindungsfläche Schweißgut-Werkstück. Die Fügeseitweite wurde deshalb als eine weitere zu erfassende geometrische Größe in die Bewertung der Fertigungsqualität an laserstrahlgeschweißten Überlappverbindungen

aufgenommen.

Den komplexen Zusammenhang zwischen den direkt und mittelbar durch die Fügespaltweite beeinflussten Festigkeitseigenschaften der Schweißverbindung zeigt das in **Bild 4.4** dargestellte Beispiel und die Analyse der auftretenden Spannungen in der Naht beziehungsweise im oberen Blech nach [129].



F:	Angreifende Kraft	$h_1$ :	Nahtunterwölbung, Wurzelrückfall
t:	Blechedicke	$h_2$ :	Schweißnahtbreite im Fügespalt
l:	Schweißnahtlänge	$b_s$ :	Fügespaltweite

**Bild 4.4** Beispiel für einen Kraftangriff an einer I-Naht am Überlapstoß

Die Belastung der Schweißverbindung infolge des Kraftangriffs erfolgt durch einen Zuganteil  $\sigma_z$ , einen Biegeanteil  $\sigma_b$  und einen Scheranteil  $\tau$ :

$$\sigma_z = \frac{F}{A_{\text{Blech}}}; \quad \sigma_b = \frac{M_b}{W_b}; \quad \tau = \frac{F}{A_{\text{Naht}}} \quad (4.1)$$

mit den Einzelgrößen:

$$A_{\text{Blech}} = l \cdot (t - h_1); \quad A_{\text{Naht}} = l \cdot h_2 \quad (4.2)$$

$$M_b = F \cdot \frac{t + b_s}{2}; \quad W_b = \frac{l \cdot (t - h_1)^2}{6}$$

Die Strukturvergleichsspannung  $\sigma_{vs}$  an der Überlappverbindung nach der Gestaltänderungsenergiehypothese berechnet sich zu:

$$\sigma_{vs} = \sqrt{\sigma_{\text{max}}^2 + 3\tau^2} \quad \text{mit} \quad \sigma_{\text{max}} = \sigma_z + \sigma_b \quad (4.3)$$

Eine Erhöhung der Vergleichsspannung aufgrund einer steigenden Fügespaltweite kann auf die nachfolgenden Gründe zurückgeführt werden:

- Zunehmendes  $\tau$  durch verringerte Schweißnahtbreite  $h_2$  im Bereich des Füge-

- spaltes
- ▶ Steigendes  $\sigma_z$  und  $\sigma_b$  durch verringerte Anbindungsfläche  $A_{\text{Blech}}$  im oberen Blech zwischen Schweißgut und Grundwerkstoff infolge Nahtunterwölbung
  - ▶ Steigendes  $\sigma_b$  durch mit der Fügospaltweite  $b_s$  zunehmendem Hebelarm

Als neue geometrische Bewertungsmerkmale zur Bestimmung der Fertigungsqualität an laserstrahlgeschweißten Überlappverbindungen werden aus den oben genannten Gründen die **Schweißnahtdicke** und die **Fügospaltweite** definiert. Da eine Ermittlung dieser Größen ohne aufwendige Hilfsmittel zerstörungsfrei nicht möglich ist, wird eine zerstörende Bauteilprüfung, zum Beispiel durch Schlifffproben, zur Ermittlung der Fertigungsqualität vorgeschlagen, wie sie heute beispielsweise auch in der industriellen Rohrfertigung zur Qualitätssicherung vorgenommen wird [134].

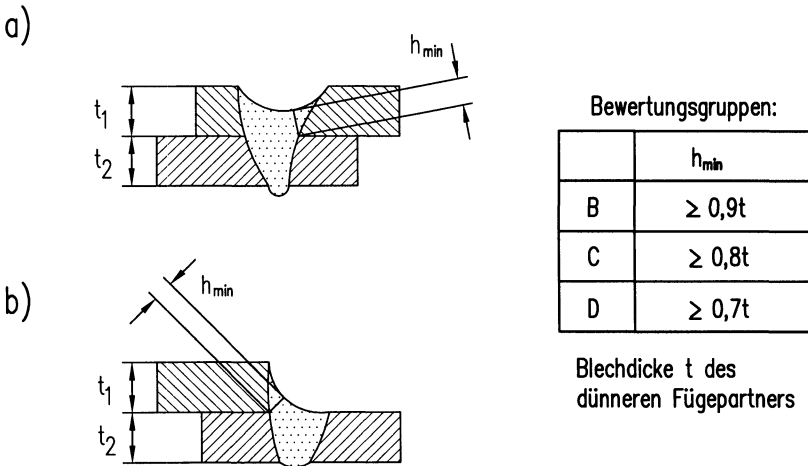
Zur Bewertung der Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Überlappverbindungen wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Ausbildung der genannten geometrischen Merkmale grundlegend untersucht. Die hierfür erforderlichen Bewertungsgruppen sind im folgenden Abschnitt 4.2 vorgestellt.

## 4.2 Bewertungsgruppen

Angelehnt an die Definition der Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten nach DIN 8563 T11 [52] wurden die in den **Tabellen 4.1 und 4.2** folgenden Bewertungsrichtlinien für die Bestimmung der Fertigungsqualität von laserstrahlgeschweißten Überlappverbindungen definiert. Diese Bewertungsgruppen dienen als Grundlage für die in Kapitel 6 folgenden Untersuchungen an einfach und mehrfach gekrümmten Blechformteilen. Analog zu DIN 8563 T11 [52] kommen die Bewertungsgruppen unabhängig von den jeweils verschweißten Stahlwerkstoffen zur Anwendung. Analog zu den Vorgaben aus ISO DIS 13919 [53] und DIN 8563 T11 [52] sind auch aus diesen Bewertungsrichtlinien keine Festigkeits- oder Gebrauchseigenschaften der Verbindungen zu entnehmen. Die Bewertung der Fertigungsqualität beschränkt sich ausschließlich auf die Auswertung der definierten geometrischen Schweißnahtmerkmale. Die aus der Erfüllung dieser Merkmale resultierenden Gebrauchseigenschaften der Schweißnähte sind bauteilspezifisch zu ermitteln.

Die Grenzwerte der Bewertungsgruppen für das Merkmal *Schweißnahtdicke* werden bezogen auf die Blechdicke  $t$  des dünneren der beiden Fügepartner ermittelt. Denn nach [135] ist die Mindestanforderung an den tragenden Querschnitt einer Schweiß-

naht, daß er die Dicke der zu verbindenden Fügepartner aufweist. Die Grenzwerte zur Bewertung der Schweißnahtdicke werden hierbei so definiert, daß eine Subtraktion des zulässigen Grenzwertes für Nahtunterwölbung oder Wurzelrückfall aus DIN 8563 T11 [52] von der Blechdicke  $t$  den Grenzwert für die entsprechende Bewertungsgruppe des Merkmals Schweißnahtdicke ergibt. Daraus resultieren für die Bewertung der Schweißnahtdicke die in **Bild 4.5** angegebenen, auf die Blechdicke  $t$  des dünneren Werkstückes bezogenen Grenzwerte.

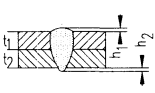
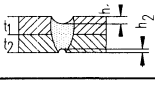
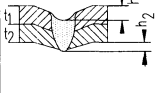
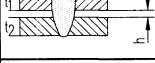
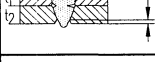
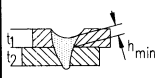
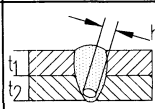


**Bild 4.5** Bewertungsmerkmal Schweißnahtdicke  $h_{min}$  für a) I-Naht und b) Kehlnaht am Überlappstoß mit zugehörigen Bewertungsgruppen

Wie in den Untersuchungsergebnissen in Kapitel 6 noch zu sehen sein wird, ist für unterschiedliche Bearbeitungsaufgaben eine Abhängigkeit zum Beispiel der Schweißnahtdicke oder anderer Schweißnahtmerkmale von der Fügespaltweite zu erkennen. Aus diesen Zusammenhängen können aber aufgrund der unterschiedlichen Merkmalsausbildung bei wechselnden Einflußgrößen keine allgemein übertragbaren Grenzwerte für die zulässige Fügespaltweite abgeleitet werden. Solche Einflußgrößen sind - neben den bereits anschließend an **Bild 4.4** beispielhaft geschilderten, komplexen Zusammenhängen mehrerer geometrischer Schweißnahtmerkmale mit der auftretenden Fügespaltweite - zum Beispiel eine Oberflächenbeschichtung oder die Dickenverhältnisse der Werkstücke und deren Lage zur Strahleintrittsseite. Für die Festlegung eines aus Gründen der Fertigungsqualität erforderlichen Grenzwertes für die zulässige Fügespaltweite wird deshalb eine bauteilspezifische Ermittlung in Form einer Bauteilprüfung vorgeschlagen.

Die nachfolgenden Tabellen fassen alle genannten Bewertungsmerkmale zur Bestimmung der Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter I-Nähte und Kehlnähte am Überlappstoß und die zugehörigen Bewertungsgruppen zusammen. Zur Bewertung von Schweißverbindungen sind die anzuwendenden Merkmale und die hierfür erforderlichen Grenzwerte für die jeweilige Fügeverbindung geeignet auszuwählen. Analog zu DIN 8563 T11 [52] bietet sich auch für die Bestimmung von besonderen Anforderungen die Definition einer Bewertungsgruppe **A** mit eigenen Grenzwerten an.

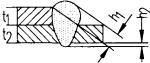
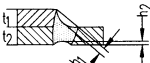
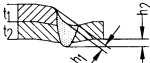
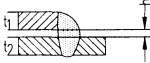
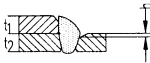
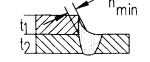



Nr.	Unregelmäßigkeit, Benennung	zeichnerische Darstellung	Grenzwerte für Unregelmäßigkeiten		
			niedrig D	mittel C	hoch B
1	Naht-, Wurzelüberhöhung		$h_1$ bzw. $h_2 \leq 0,1 + 0,2t$ max. 5mm	$h_1$ bzw. $h_2 \leq 0,1 + 0,15t$ max. 5mm	$h_1$ bzw. $h_2 \leq 0,1 + 0,1t$ max. 5mm
2	Nahtunterwölbung, Wurzelrückfall		$h_1$ bzw. $h_2 \leq 0,3t$ max. 1mm	$h_1$ bzw. $h_2 \leq 0,2t$ max. 0,5mm	$h_1$ bzw. $h_2 \leq 0,1t$ max. 0,3mm
3	Nahtdurchhang (Nahtunterwölbung mit Wurzelüberhöhung)		$h_1 \leq 0,3t + h_2$ max. 0,5t	$h_1 \leq 0,2t + h_2$ max. 0,3t	$h_1 \leq 0,1t + h_2$ max. 0,2t
4	Fügespaltweite		zulässig, Grenzwerte sind aufgrund des blechdickenabhängigen Einflusses auf die Fertigungsqualität gesondert festzulegen		
5	Randkerben		$h \leq 0,15t$ max. 1mm	$h \leq 0,1t$ max. 0,5mm	$h \leq 0,05t$ max. 0,3mm
6	Schweißspritzer angeschmolzen		zulässig, jedoch nur dem Grundwerkstoff artgleiche Spritzer		
7	Schweißnahtdicke		$h_{min} \geq 0,7t$	$h_{min} \geq 0,8t$	$h_{min} \geq 0,9t$
8	Riß		nicht zulässig		
9	Endkraterriß		örtlich begrenzt zulässig	nicht zulässig	
10	Bindefehler		örtlich begrenzt zulässig	nicht zulässig	
11	Metaldampfniederschlag		zulässig, jedoch nur dem Grundwerkstoff artgleicher Metaldampfniederschlag		
12	Poren Porosität Lunker		$h \leq 0,2t$	$h \leq 0,1t$ *)	$h \leq 0,1t$ *)

**Tabelle 4.1:** Bewertungsgruppen für Schweißverbindungen an Stahl  
I-Naht am Überlapstoß

\*) Siehe Anhang

\*) Siehe Anhang

Nr.	Unregelmäßigkeit Benennung	zeichnerische Darstellung	Grenzwerte für Unregelmäßigkeiten		
			niedrig D	mittel C	hoch B
1	Naht-, Wurzel- überhöhung		$h_1$ bzw. $h_2 \leq 0,1 + 0,2t$ max. 5mm	$h_1$ bzw. $h_2 \leq 0,1 + 0,15t$ max. 5mm	$h_1$ bzw. $h_2 \leq 0,1 + 0,1t$ max. 5mm
2	Nahtunter- wölbung, Wurzelrückfall		$h_1$ bzw. $h_2 \leq 0,3t$ max. 1mm	$h_1$ bzw. $h_2 \leq 0,2t$ max. 0,5mm	$h_1$ bzw. $h_2 \leq 0,1t$ max. 0,3mm
3	Nahtdurchhang (Nahtunter- wölbung mit Wurzelüber- höhung)		$h_1 \leq 0,3t + h_2$ max. 0,5t	$h_1 \leq 0,2t + h_2$ max. 0,3t	$h_1 \leq 0,1t + h_2$ max. 0,2t
4	Fügespaltweite		zulässig, Grenzwerte sind aufgrund des blechdicken- abhängigen Einflusses auf die Fertigungsqualität gesondert festzulegen		
5	Randkerben		$h \leq 0,15t$ max. 1mm	$h \leq 0,1t$ max. 0,5mm	$h \leq 0,05t$ max. 0,3mm
6	Schweißspritzer angeschmolzen		zulässig, jedoch nur dem Grundwerkstoff artgleiche Spritzer		
7	Schweißnaht- dicke		$h_{min} \geq 0,7t$	$h_{min} \geq 0,8t$	$h_{min} \geq 0,9t$
8	Riß		nicht zulässig		
9	Endkraterriß		örtlich begrenzt zulässig	nicht zulässig	
10	Bindfehler		örtlich begrenzt zulässig	nicht zulässig	
11	Metaldampf- niederschlag		zulässig, jedoch nur dem Grundwerkstoff artgleicher Metaldampfniederschlag		
12	Poren Porosität Lunker		$h \leq 0,2t$	$h \leq 0,1t$ *)	$h \leq 0,1t$ *)
				*) Siehe Anhang	*) Siehe Anhang

**Tabelle 4.2:** Bewertungsgruppen für Schweißverbindungen an Stahl  
Kehlnaht am Überlappstoß

## 5 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN ZUM LASER-STRAHLSCHWEISSEN VON BLECHFORMTEILEN

Es werden erstmals die Auswirkungen verschiedener Strategien zur Prozeßführung auf die Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Verbindungen an Blechformteilen aus Stahlwerkstoffen grundlegend untersucht. Die Untersuchungen sollen am Beispiel der eingesetzten Systemtechnik, der angewendeten Prozeßführungsstrategien und der untersuchten konstruktiven Randbedingungen eine übertragbare Aussage für die Abschätzung allgemeiner Einflußgrößen auf die erzielbare Fertigungsqualität an stark gekrümmten Bearbeitungskonturen an Blechformteilen ermöglichen. Hieraus werden allgemeine Hinweise für die konstruktive Gestaltung solcher Fügestellen sowie für die Prozeßführung bei räumlichen Bearbeitungsaufgaben für das Laserstrahlschweißen abgeleitet.

### 5.1 Versuchseinrichtungen, -planung und -durchführung

Es werden Untersuchungen zum Verschweißen unterschiedlicher, stark gekrümmter Bearbeitungskonturen mit variierenden Bauteilradien an verschiedenen Blechformteilen in unterschiedlichen Stoßformen und Nahtarten durchgeführt. Als wesentliche Einflußgröße auf die erzielbare Fertigungsqualität wird die Prozeßführungsstrategie variiert. Die Analyse der Verbindungen hinsichtlich der erzielten Fertigungsqualität erfolgt anhand der bereits in Kapitel 2 genannten DIN 8563 Teil 11 [52] beziehungsweise der in Kapitel 4 definierten Bewertungsrichtlinien.

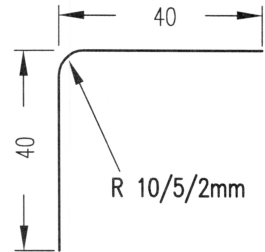
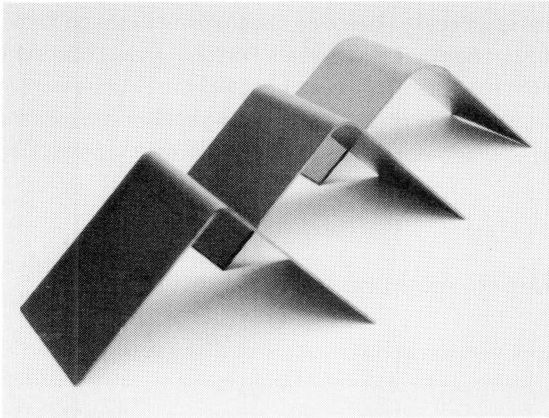
#### 5.1.1 Werkstoffe, Werkstücke und prozeßtechnische Randbedingungen

Die experimentellen Untersuchungen werden sowohl an mittels Gesenkbiegen hergestellten Konturelementen als auch an gezogenen Karosserieteilen durchgeführt.

Die Blechdicke der für die Grundlagenuntersuchungen verwendeten Strukturelemente wird zu  $t=0,88\text{mm}$  gewählt, eine Dicke, die typischerweise für Karosserieteile eingesetzt wird [136]. Die Konturelemente sind aus konventionellem, unbeschichtetem Tiefziehstahl DC04 [137] beziehungsweise aus DC06+Z140 [138] hergestellt.

Als Versuchswerkstücke für die Grundlagenuntersuchungen kommen die in **Bild 5.1**

dargestellten einfach gekrümmten Biegeteile zur Anwendung, die sowohl entlang der Außen- als auch der Innenkontur verschweißt werden. Die Aufspannung erfolgt für die Außenkontur jeweils in der in **Bild 5.1 (links)** gezeigten Raumlage, für die Innenkontur umgekehrt. Ein Einfluß der hierbei wirkenden Arbeitspositionen auf das Bearbeitungsergebnis ist nach [58, 59] beim Laserstrahlschweißen von Stahlfeinblech nicht zu erwarten und wurde auch im Verlauf von Voruntersuchungen nicht festgestellt.



Werkstoffe: DC04

DC06+Z140

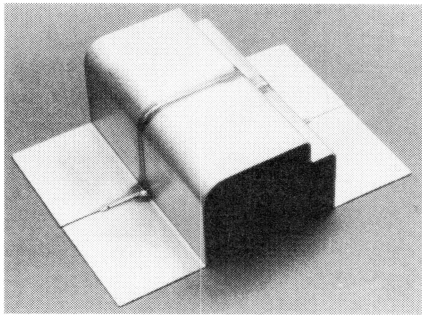
Blechdicke: 0,88mm

**Bild 5.1** Versuchswerkstücke für die Grundlagenversuche

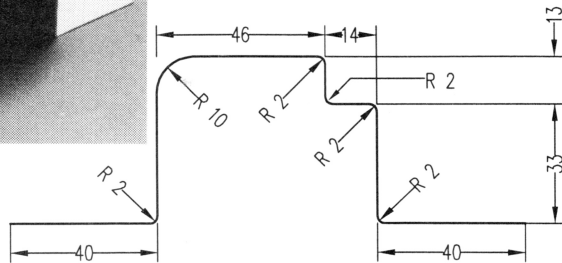
Die Übertragbarkeit der an den oben gezeigten, einfach gekrümmten Formelementen erzielten Ergebnisse auf Konturfolgen wird an biegetechnisch hergestellten, mehrfach gekrümmten Strukturelementen untersucht. Diese Versuchswerkstücke zeigen die **Bilder 5.2** und **5.3**. Die mehrfach gebogenen Werkstücke sind ebenfalls aus DC04 in der Blechdicke  $t=0,88\text{mm}$  gefertigt.

Im Zuge der Bestrebungen nach Gewichtsreduzierung werden in Zukunft verstärkt höherfeste Stahlwerkstoffe in Automobilkarosserien Verwendung finden [136, 139, 140]. Aus diesem Grund erfolgen die Untersuchungen an realen Karosserieteilen an Werkstücken aus unbeschichtetem ZStE 180 BH [141]. Die Untersuchungen zu den unterschiedlichen Stoßformen werden dabei an verschiedenen Werkstücken durchgeführt.

Die Verbindung I-Naht am Stumpfstoß wird in der Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen am Beispiel des in **Bild 5.4** dargestellten Innenblech A-Säule gefügt.

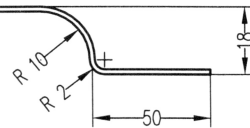
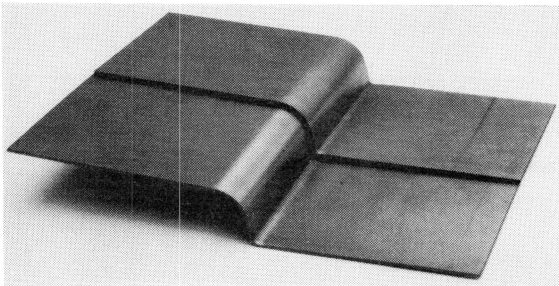


Werkstoff: DC04  
 Blechdicke: 0,88mm

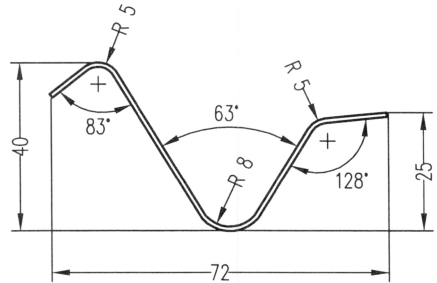
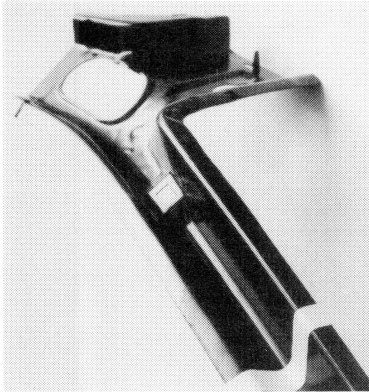


**Bild 5.2** Versuchswerkstücke für komplexe Konturfolgen der Verbindung I-Naht am Stumpfstoß

Werkstoff: DC 04      Blechdicke: 0,88mm



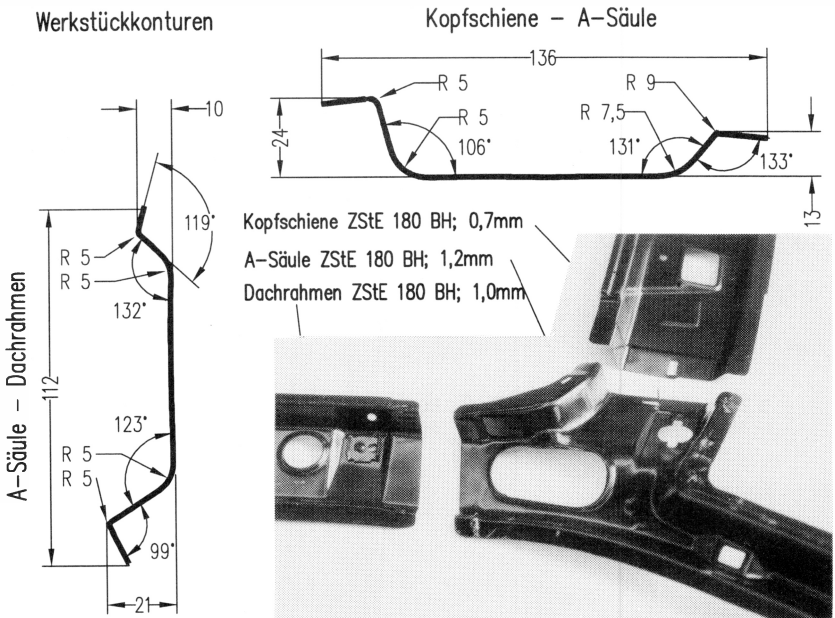
**Bild 5.3** Versuchswerkstücke für komplexe Konturfolgen der Verbindung I-Naht am Überlappstoß



Werkstoff: ZStE 180 BH

Blechdicke: 1,2mm

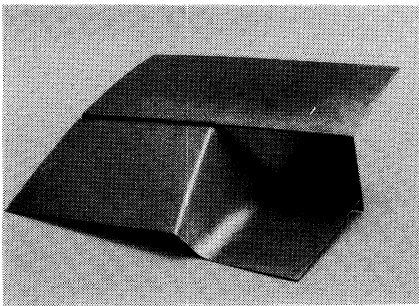
**Bild 5.4** Versuchswerkstück Innenblech A-Säule



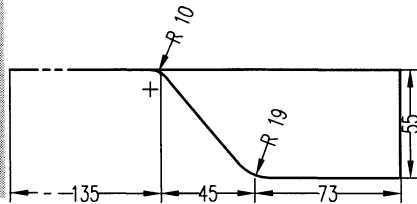
**Bild 5.5** Verbindung Kopfschiene - Innenblech A-Säule - Dachrahmen

I-Naht und Kehlnaht am Überlappstoß werden an den in **Bild 5.5** gezeigten Werkstücken Dachrahmen, Kopfschiene und Innenblech A-Säule realisiert. Die Fügestelle zur Verbindung von Kopfschiene und Dachrahmen mit dem Innenblech A-Säule ist jeweils als abgesetzter Überlappstoß mit einer Überlappung von 19mm Breite ausgeführt.

Die Bearbeitung einer Schweißverbindungen mit Sonderanforderungen an das optische Erscheinungsbild der Schweißnaht wird an den in **Bild 5.6** vorgestellten Werkstücken aus DC04 überprüft. Die zu von dieser Verbindung zu erfüllenden Sonderanforderungen resultieren aus der Bauteilgeometrie und aus dem vorgesehenen Einsatzbereich der gefügten Teile.



Werkstoff: DC04  
Blechedicke: 0,7mm



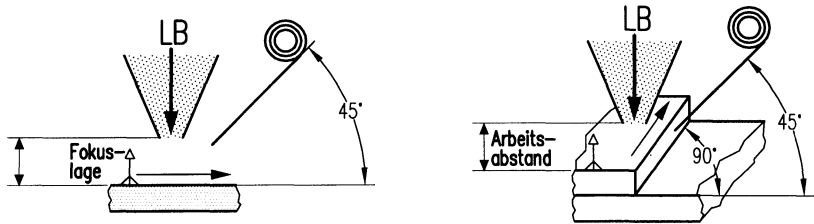
**Bild 5.6** Heckklappenverbindung - Bördelnaht

Da dieses Bauteil im Sichtbereich der Karosserie angeordnet ist, muß die Schweißnaht über die gesamte Länge eine gleichmäßig ausgebildete Hohlkehle bilden, die keine Oberflächenporen aufweist. Die Verbindung muß mit Zusatzwerkstoff gefügt werden, um einen konstanten Füllgrad der Schweißfuge unabhängig von der Bauteilkontur zu erreichen. Eine Füllung des Fugengrundes durch Zusatzwerkstoff in Form einer Hohlkehle ist Voraussetzung für eine vollständige Lackierung im Bereich der Fügestelle, da dort andernfalls infolge von Abstoßungsreaktionen der elektrisch geladenen Lackpartikel ein gleichmäßiger Lackauftrag nicht sichergestellt ist.

Mit Ausnahme der Realbauteile zur Untersuchung der Verbindungen I-Naht und Kehlnaht am Überlappstoß, deren Fügekannten schergeschnitten vorliegen, sind alle Fügekannten durch Laserstrahlbrennschneiden vorbereitet. Die Werkstücke werden, soweit nicht anders angegeben, vor der Bearbeitung oberflächlich mit einem Tuch gereinigt.

Als Schweißzusatzwerkstoff wird für alle Untersuchungen konventioneller Schweiß-

draht SG2 nach DIN 8559 T1 [142] mit einem Durchmesser von 0,6mm eingesetzt. Die Eignung dieses Zusatzwerkstoffs für das Laserstrahlschweißen von un- oder niedriglegierten Stahlfeinblechen und die hierfür erforderlichen prozeßtechnischen Randbedingungen sind bereits aus [58, 143] hinreichend bekannt. Der Zusatzdraht wird mit Ausnahme der nachfolgend genannten Bearbeitungsfälle für alle Untersuchungen in einem Winkel von  $45^\circ$  in schleppender Anordnung zugeführt.



**Bild 5.7** Drahtzuführung für die Bearbeitung von Außenkonturen an Formelementen (links) und den Verbindungen A-Säule - Kopfschiene und A-Säule - Dachrahmen (rechts)

Für die Bearbeitung der Verbindungen im Bereich Kopfschiene - A-Säule - Dachrahmen in der Anordnung Kehlnaht am Überlappstoß muß der Zusatzwerkstoff aus Gründen der Zugänglichkeit im rechten Winkel zur Schweißrichtung von der Seite zugeführt werden (**Bild 5.7**, rechts). Auch hier erfolgt die Drahtzufuhr in einem Anstellwinkel von  $45^\circ$  zum Laserstrahl.

Für alle untersuchten Verbindungen wurden in Vorversuchen abhängig von der Blechdickenkombination, der Verbindungsform oder der Bauteilbeschichtung jeweils geeignete Parametereinstellungen ermittelt, die bei Einhaltung der verbindungs-spezifischen Randbedingungen aus Abschnitt 2.2.1 bei der Bearbeitung gerader Schweißnähte ein fehlerfreies, gleichbleibendes Bearbeitungsergebnis sicherstellen. Diese Parameter bleiben für alle in Kapitel 6 beschriebenen Untersuchungen konstant.

Die Untersuchungen an den Formelementen werden mit eben jenen Parametereinstellungen unter Variation des Faktors Prozeßführungsstrategie für die Bearbeitung der Bauteilkrümmung durchgeführt. Als Zielgröße wird abhängig von der gewählten Prozeßführungsstrategie untersucht, ob sich die Fertigungsqualität im Bereich der Bauteilkrümmung verändert.

An den mehrfach gekrümmten Biegeteilen sowie an den Realbauteilen wird bei Vorgabe einer geeigneten Prozeßführungsstrategie die Übertragbarkeit dieser gewählten Strategie auf die Verhältnisse an diesen Bauteilen grundlegend untersucht. Für alle

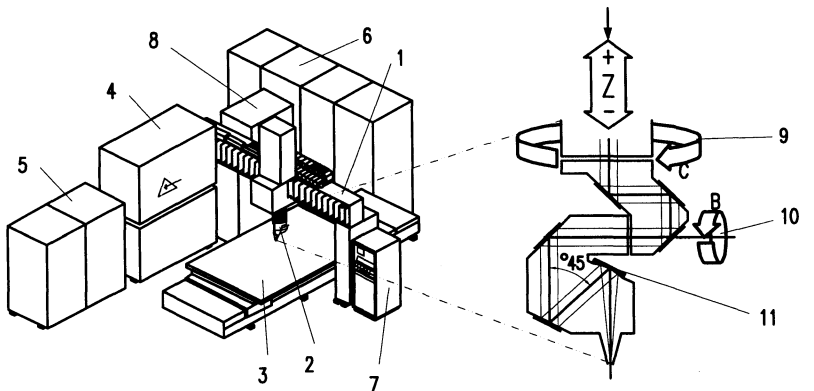


Ergebnisse erfolgt nach dem Schweißen eine Sichtprüfung. Es werden jeweils für die entsprechenden Randbedingungen typische, repräsentative Schweißverbindungen beispielhaft für eine weitere Auswertung ausgewählt. Aufgrund der begrenzten Anzahl der zur Verfügung stehenden Realbauteile kann eine umfassende statistische Überprüfung der hierzu in Kapitel 6 dargestellten Ergebnisse nicht erfolgen.

Die Bearbeitungsergebnisse werden in Querschliffen untersucht und hinsichtlich der erzielten Fertigungsqualität anhand der bereits in den Abschnitten 2.1.3.1 und 4.2 beschriebenen geometrischen Merkmale und Bewertungsvorschriften ausgewertet. Die jeweiligen Probenentnahmestellen für die ausgewerteten Querschliffe sind in Kapitel 6 der Ergebnisbewertung beigefügt. Die Bewertung der Schweißnahtmerkmale bezieht sich an den Verbindungen von Blechteilen mit unterschiedlichen Blechdicken, wie bereits in Abschnitt 4.2 beschrieben, auf die Blechdicke des dünneren der beiden Teile.

### 5.1.2 Werkzeugmaschinen

Die experimentellen Untersuchungen für die in Kapitel 6 vorgestellten Bearbeitungsergebnisse wurden mit dem in **Tabelle 5.1** beschriebenen 2,2kW CO<sub>2</sub>-Laser durchgeführt. Die Bearbeitung erfolgte mit einem 5-Achsen Portal, wobei vier Achsen dieser Anlage der fliegenden Optik zugeordnet sind und eine Achse der Bewegung des Werkstücks dient (**Bild 5.8**).



- |                    |                         |                      |                                     |
|--------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| 1 Portal           | 4 Laserstrahlquelle     | 7 Bedienpult         | 10 Schwenkachse ( $\pm 120^\circ$ ) |
| 2 Bearbeitungskopf | 5 Hochfrequenzgenerator | 8 Kühlaggregat       | 11 Fokussierspiegel                 |
| 3 Werkstücktisch   | 6 Steuerung             | 9 Drehachse (endlos) | Brennweite $f = 150\text{mm}$       |

**Bild 5.8** Eingesetzte CO<sub>2</sub>-Lasieranlage

Bauart:	Schnell längsgeströmter, HF-angeregter CO <sub>2</sub> -Laser
Betriebsart:	Dauerstrichbetrieb (cw)
Dauerstrichleistung:	2,2kW
Wellenlänge:	10,6µm
Leistungsverteilung:	TEM <sub>01</sub> *
Strahlpropagationsfaktor:	0,28
Fokussierkennzahl:	9,62
Strahlradius im Fokus:	0,18mm
Strahlführung:	Wassergekühlte Kupferspiegel
Handhabungssystem	5-Achsen-Portal, fliegende Optik
Fokussieroptik:	Cu-Parabolspiegel, f=150mm

**Tabelle 5.1** Kenngrößen der eingesetzten CO<sub>2</sub>-Laseranlage nach DIN EN ISO 11145 [144]

Die Maschinenkennwerte des für die Untersuchungen eingesetzten Handhabungsgerätes wurden bereits in [58] ermittelt und sind in **Tabelle 5.2** zusammengefasst. Die technischen Daten der für die Schweißversuche mit Zusatzwerkstoff verwendeten Drahtfördereinrichtung sind ebenfalls in **Tabelle 5.2** beschrieben.

Bauart:	5 Achsen Portal in 4 - 1 Bauweise
Arbeitsraum:	3m x 2m x 0,75m
Max. Achsgeschwindigkeiten:	30m/min (X-Achse) 30m/min (Y-Achse) 30m/min (Z-Achse) 180°/s (B-Achse) 180°/s (C-Achse)
Max. Achsbeschleunigungen:	1,31m/s <sup>2</sup> (X-Achse) 1,33m/s <sup>2</sup> (Y-Achse) 1,32m/s <sup>2</sup> (Z-Achse) 491°/s <sup>2</sup> (B-Achse) 476°/s <sup>2</sup> (C-Achse)
Max. Drahtfördergeschw.:	12,8m/min

**Tabelle 5.2** Kenngrößen der eingesetzten Portalanlage und der zugehörigen Drahtfördereinrichtung nach [58]

Neben den Untersuchungen zum Schweißen mit der genannten CO<sub>2</sub>-Laseranlage werden in Kapitel 6 Ergebnisse aus vergleichenden Untersuchungen mit einem Fertigungssystem Festkörperlaser-Industrieroboter beschrieben. Die Strahlführung erfolgt bei dieser Anlage über eine Lichtleitfaser, die Handhabung des Bearbeitungskopfes über einen Knickarmroboter mit sechs rotatorischen Achsen. Hierbei kommt der in

**Tabelle 5.3** spezifizierte 1kW-cw-Nd:YAG-Laser in Verbindung mit dem in **Tabelle 5.4** beschriebenen 6-Achsen-Standard-Industrieroboter zum Einsatz.

Bauart:	Bogenlampenangeregter Nd:YAG-Laser
Betriebsart:	Dauerstrichbetrieb (cw)
Dauerstrichleistung:	960W (ungeregelt) 750W (geregelt)
Wellenlänge:	1,06 $\mu$ m
Leistungsverteilung:	Multimode
Polarisation:	random
Strahlführungssystem:	Stufenindexfaser, $\varnothing$ 600 $\mu$ m, Länge 15m
Fokussieroptik:	f=83mm
Strahlradius im Fokus:	0,29mm
Strahlpropagationsfaktor:	0,024 (in die Faser)
Handhabungseinrichtung:	6-Achsen Industrieroboter

**Tabelle 5.3** Kenngrößen der eingesetzten Nd:YAG-Laseranlage

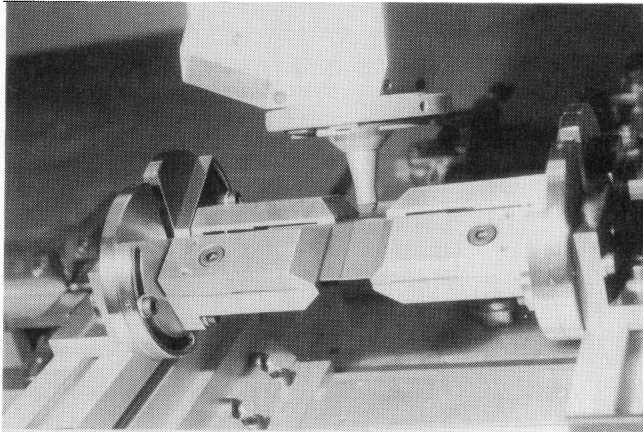
Bauart:	6-Achsen Standard Industrieroboter
Max. Bahngeschwindigkeit:	90m/min
Wiederholgenauigkeit:	$\pm$ 0,2mm (Herstellerangabe)
Arbeitsraum:	1816mm (horizontaler Arbeitsradius)
Max. Traglast:	30kg

**Tabelle 5.4** Technische Daten des eingesetzten Industrieroboters [nach 91]

Die eingesetzten Laseranlagen werden in den weiteren Ausführungen zur besseren Übersichtlichkeit der Ergebnisdarstellungen nur noch in CO<sub>2</sub>- und Nd:YAG-Laser unterschieden.

### 5.1.3 Spanntechnik

Die Funktionen der eingesetzten Spannmittel beschränken sich auf die Positionierung und Lagefixierung der Bauteile. Auf eine Wärmeabfuhr an den Blechformteilen beispielsweise durch formschlüssige Kupferspannbacken entlang der gesamten Schweißnaht wird sowohl an den Biegeteilen als auch an den Realbauteilen verzichtet.



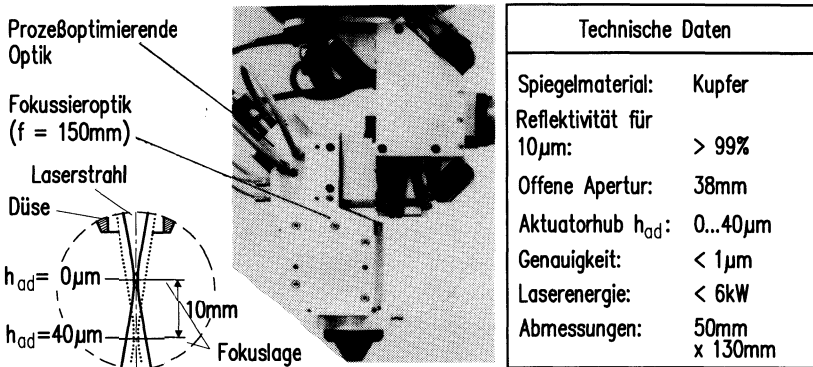
**Bild 5.9** Spannvorrichtung für die Untersuchungen an einfach gebogenen Strukturelementen (Siehe **Bild 5.1**)

Ein Heften der Werkstücke findet für für die Untersuchungen, sofern nicht anders angegeben, vor dem Schweißen nicht statt. Für die Verbindungen in der Anordnung I-Naht am Stumpfstoß werden die Werkstücke mit einer gegen den Fügespalt wirkenden Anpreßkraft beaufschlagt, um einen technischen Nullspalt über die gesamte Länge der Schweißnaht sicherzustellen.

#### 5.1.4 Adaptive Optik

Mit der sogenannten adaptiven Optik steht eine Systemkomponente zur gezielten Beeinflussung des Laserstrahls zur Verfügung. Die Integration dieser Optik in den Strahlengang einer Laseranlage erlaubt neuartige Programmierstrategien für die Bearbeitung von Blechformteilen mit kleinen Krümmungsradien, die zu einer Verbesserung des Bearbeitungsergebnisses führen [145, 146] (Siehe hierzu Abschnitt 5.2.5). Die erzielbare Fertigungsqualität an stark gekrümmten Konturen unter Einsatz dieser Komponente wird in der vorliegenden Arbeit erstmals grundlegend untersucht und mit den Bearbeitungsergebnissen anderer Strategien zum Laserstrahlschweißen an gekrümmten Bauteilkonturen verglichen.

Im Rahmen der Untersuchungen wird die im folgenden beschriebene adaptive Optik eingesetzt. Den Einbauort dieser Optik in den Bearbeitungskopf der eingesetzten CO<sub>2</sub>-Lasieranlage sowie die erzielbare Fokusalagenverschiebung zeigt **Bild 5.10**.



**Bild 5.10** Bearbeitungskopf mit adaptiver Optik zur Realisierung eines Fokusalagenshift

Das Wirkprinzip der eingesetzten adaptiven Optik beruht auf einer (nahezu) sphärischen Deformation der Spiegeloberfläche durch einen rückseitig zentrisch angreifenden Piezoaktuator [147]. Die Grundlagen der Strahlausbreitung beim Einsatz adaptiver Optiken im Strahlengang von CO<sub>2</sub>-Lasieranlagen sind unter anderem durch [148, 149] beschrieben.

Im Falle des in **Bild 5.10** gezeigten Einbaus in den Arbeitskopf der Lasieranlage ist bei einer Brennweite des Fokussier spiegels von  $f=150\text{mm}$  durch einen maximalen Aktuatorhub der adaptiven Optik eine Fokusalagenverschiebung bis zu 10mm möglich. Die Strahlqualität des fokussierten Laserstrahls bleibt dabei weitgehend konstant [146].

## 5.2 Prozeßführungsstrategien an Blechformteilen

Die in die Führungsmaschine integrierte Schwenkachse zur Orientierung des Laserstrahls zur Werkstückoberfläche liegt in einem Abstand zum Bearbeitungspunkt am Werkstück, der die Größenordnung der Brennweite des Fokussier spiegels aufweist. Beim herkömmlichen Ansatz zur Programmierung von Bearbeitungsbahnen entlang

stark gekrümmter Konturen mit kleinen Krümmungsradien an Blechformteilen wird der Laserstrahl senkrecht zur Blechoberfläche geführt. Aufgrund des oben genannten Abstandes wären für eine gleichbleibende Vorschubgeschwindigkeit an der Wirkstelle des Laserstrahls, bei stets senkrecht zur Werkstückoberfläche stehendem Laserstrahl, je nach Bauart der Werkzeugmaschine Achsgeschwindigkeiten von bis zu 2000°/s [59, 150] erforderlich. Da selbst Laseranlagen modernster Bauart [110] diese Werte nicht annähernd erreichen, ist die Bahngeschwindigkeit für das Laserstrahlschweißen an solchen Konturabschnitten entsprechend der kinematischen Leistungsfähigkeit des Handhabungsgerätes begrenzt (Siehe **Bild 2.9**). Ohne entsprechende Modifikation der konventionellen Prozeßführung erhöht sich deshalb, wie bereits in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, an den betreffenden Konturen die Streckenenergie. Dies kann sich in Form von breiten, aufgeschmolzenen Bereichen oder Einbrandlöchern im Bearbeitungsergebnis niederschlagen.

Zur Vermeidung der Imperfektionen, die sich beim Laserstrahlschweißen an stark gekrümmten Konturabschnitten infolge der begrenzten kinematischen Leistungsfähigkeit der Werkzeugmaschinen einstellen, wurden bereits eine Reihe von Lösungsansätzen zur Modifikation der *konventionellen Prozeßführung* vorgeschlagen

- ▶ Bearbeitung mit Laserleistungsreduzierung [107]
- ▶ Bearbeitung mit Zusatzwerkstoff [114]
- ▶ Bearbeitung mit Anstellwinkeln [59, 151]
- ▶ Bearbeitung mit Adaptiver Optik [145, 146]

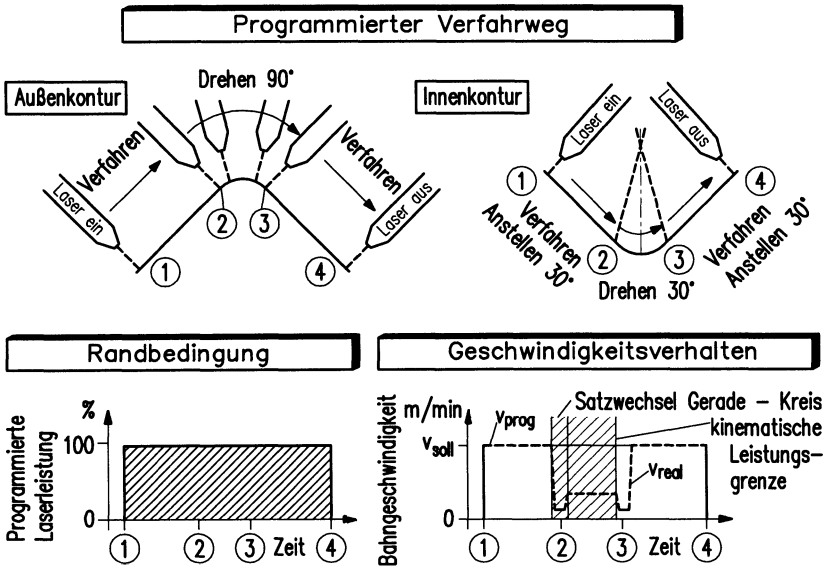
beziehungsweise im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt:

- ▶ Linearisierung

Die direkte Rückkopplung dieser Prozeßführungsstrategien auf die dann erzielbare Fertigungsqualität an Konturelementen mit kleinen Krümmungsradien wurde bislang jedoch noch nicht systematisch vorgenommen. Im folgenden sind die verschiedenen genannten Strategien zur Prozeßführung an komplexen Konturelementen vorgestellt. In Kapitel 6 werden die untersuchten Prozeßführungsstrategien anhand beispielhaft ausgewählter Bearbeitungsergebnisse grundlegend analysiert und praxisorientiert aufbereitet dargestellt.

### 5.2.1 Konventionelle Prozeßführung

Die einzelnen Bahnpunkte werden bei dieser Prozeßführungsstrategie unter der Randbedingung programmiert, daß der Laserstrahl in allen Punkten der Bahn senkrecht zur Werkstückoberfläche orientiert ist. Die entstehende Bahn zeigt **Bild 5.11** am Beispiel der Außen- und Innenbearbeitung eines 90° Winkels. Aus Gründen der Zugänglichkeit ist für die kollisionsfreie Bearbeitung einer Innenkontur ein Anstellwinkel erforderlich. Die Forderung nach senkrechter Einstrahlung wird deshalb in diesem Fall aus Zugänglichkeitsgründen im allgemeinen nicht zu erfüllen sein.



**Bild 5.11** Schematische Darstellung der konventionellen Prozeßführung

Oben bereits angesprochen wurde die diese Prozeßführungsstrategie kennzeichnende Gefahr von Fehlererscheinungen im Bearbeitungsergebnis an stark gekrümmten Konturen mit kleinen Krümmungsradien, die sich aufgrund der Erhöhung der Streckenenergie infolge der begrenzten kinematischen Leistungsfähigkeit des Handhabungsgerätes einstellen [38, 111].

Im Rahmen der Untersuchungen bilden die Versuchsergebnisse, die unter Anwen-

derung der "Konventionellen Prozeßführung" erzielt wurden, die Vergleichsbasis zu den mit anderen Prozeßführungsstrategien erreichten Bearbeitungsergebnissen. Die *konventionelle Prozeßführung* wird im folgenden auch als *Bearbeitung ohne Modifikation der Prozeßführung* bezeichnet werden.

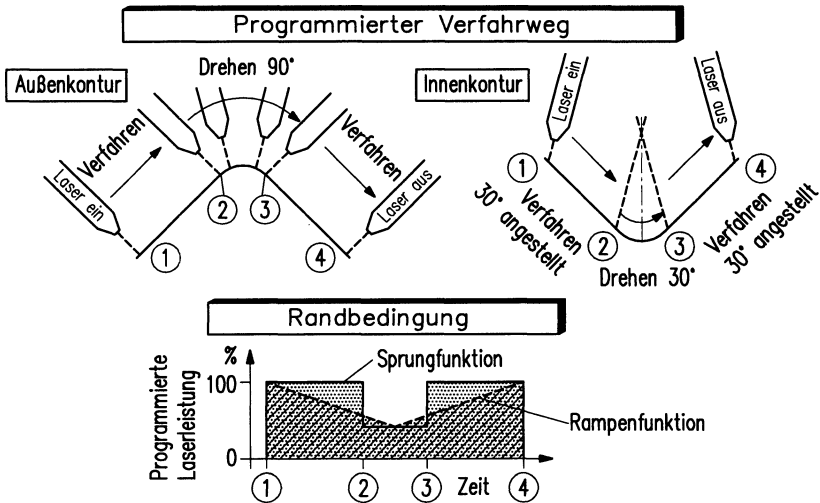
### 5.2.2 Bearbeitung mit Laserleistungsreduzierung

Die bei Anwendung der *konventionellen Prozeßführung* auftretenden Imperfektionen sind unter anderem auf die unkontrollierte Erhöhung der Streckenenergie an stark gekrümmten Konturelementen zurückzuführen, die sich infolge der Reduzierung der Bahngeschwindigkeit einstellt. Eine Möglichkeit diesen Fehlererscheinungen entgegenzuwirken ist eine unter anderem in [85, 107] beschriebene Konstanthaltung der Streckenenergie bei der Bearbeitung von Konturelementen mit kleinen Krümmungsradien. Dies kann durch eine Reduzierung der Laserleistung näherungsweise proportional zur Verringerung der Bahngeschwindigkeit erreicht werden.

Hierbei besteht jedoch die Gefahr, daß die dem Werkstück für den Schweißprozeß zugeführte Laserenergie so stark reduziert werden muß, daß die für den Tiefschweißeffekt erforderliche Schwellintensität unterschritten wird und ein Tiefschweißprozeß nicht mehr aufrecht erhalten werden kann. Hierdurch hervorgerufene Imperfektionen sind in Form von Bindefehlern oder ungenügender Durchschweißung zu erwarten. Die Gefahr solcher Imperfektionen besteht insbesondere bei hochreflektiven Materialien sowie Werkstoffen mit hoher Schwellintensität, wie zum Beispiel Aluminiumlegierungen [152, 153].

Eine gleichbleibende Streckenenergie kann mit Hilfe einer geschwindigkeitsabhängigen Laserleistungssteuerung über die online-Erfassung der tatsächlichen Bahngeschwindigkeit und einer entsprechenden Anpassung der Laserleistung erfolgen. Hierzu ist neben einer online-Diagnostik zur Erfassung der realen Bahngeschwindigkeit eine entsprechend schnelle Ansteuerung der Laserleistung in die Werkzeugmaschine zu integrieren, um eine Anpassung der Laserleistung an die aktuelle Bearbeitungsgeschwindigkeit in Echtzeit umzusetzen [154, 155].





**Bild 5.12** Prozessführungsstrategie Laserleistungsreduzierung: Schematische Darstellung der Bahnplanung und der programmierten Laserleistung

Die genannten Regeleinrichtungen standen für die Untersuchungen nicht zur Verfügung. Die in Kapitel 6 für die Prozessführungsstrategie "Laserleistungsreduzierung" beschriebenen Bearbeitungsergebnisse wurden mit einer geschwindigkeitsabhängig programmierten Reduzierung der Laserleistung erzielt. Die Laserleistung wird in den Abschnitten der Bahn, die entlang einer stark gekrümmten Kontur eine Verringerung der tatsächlichen Bahngeschwindigkeit zeigen, auf einen festen Leistungswert begrenzt. Etwaige Geschwindigkeitsrampen im Verlauf dieser Bahnabschnitte bleiben bei dieser Vorgehensweise unberücksichtigt. Bild 5.12 zeigt schematisch die über die Bearbeitungsbahn programmierte Laserleistung für die Laserleistungsreduzierung.

### 5.2.3 Bearbeitung mit Zusatzwerkstoff

Neben den oben genannten Maßnahmen, die erhöhte Streckenenergie im Bereich von gekrümmten Konturabschnitten durch eine geschwindigkeitsabhängige Verringerung der Laserleistung in den betreffenden Bahnsegmenten zu vermeiden, besteht die Möglichkeit, die überschüssige Laserenergie in diesen Bereichen durch die kontrollierte Zugabe von Zusatzwerkstoff zu binden [114]. Der Einsatz von Zusatzwerkstoff erschließt darüber hinaus gegenüber dem Laserstrahlschweißen ohne Zusatz-

werkstoff ein Überbrücken größerer Fügespaltweiten und kann auch in Kombination mit der *Bearbeitung mit Anstellwinkeln* oder der *Laserleistungsreduzierung* eingesetzt werden.

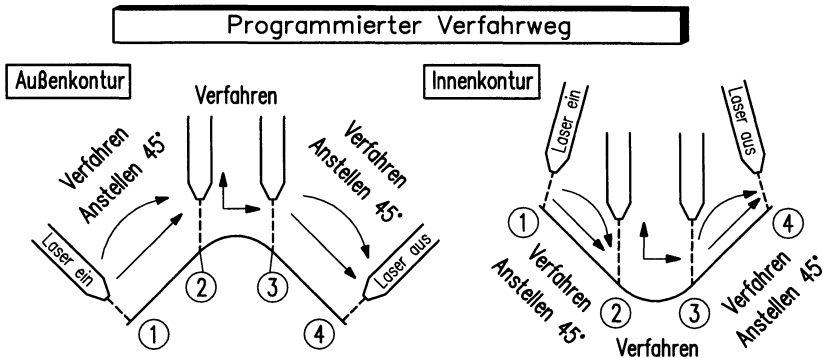
Die Zugabe von Zusatzdraht muß jedoch abhängig von der tatsächlichen Bahngeschwindigkeit gesteuert erfolgen. Dies macht eine online-Erfassung der Bahngeschwindigkeit und eine entsprechende Regelung für die Drahtförderung erforderlich [156]. Im Falle einer Zugabe von Zusatzwerkstoff zur Kompensation einer erhöhten Streckenenergie ist insbesondere zu berücksichtigen, daß die geometrischen Eigenschaften der Schweißnaht und deren Gefügezusammensetzung sich verändern [38, 58]. Für die Zugabe von Zusatzwerkstoff sind, wie bereits in Abschnitt 2.2 beschrieben, erweiterte Genauigkeitsanforderungen zu erfüllen und es wird eine zusätzliche potentielle Fehlerquelle in den Bearbeitungsprozeß aufgenommen.

In Kapitel 6 werden Untersuchungsergebnisse zum CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff an Formelementen und Realbauteilen vorgestellt. Untersuchungen zum Nd:YAG-Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff wurden nicht durchgeführt.

#### 5.2.4 Bearbeitung mit Anstellwinkeln

Die Fehlererscheinungen bei der Bearbeitung stark gekrümmter Konturen sind wie bereits ausgeführt auf die begrenzte Beschleunigung der Achsen des Handhabungsgerätes bei Umorientierungsbewegungen an diesen Konturabschnitten zurückzuführen. Durch die Programmierung der Werkzeugbahn entlang gekrümmter Konturen mit geeigneten Anstellwinkeln vor und nach der Bauteilkrümmung, wie in **Bild 5.13** dargestellt, kann ein Bearbeitungsvorgang am Konturelement realisiert werden, bei dem die kinematischen Grenzen des Handhabungsgerätes nicht erreicht werden [59, 85, 107]. Als Anstellweglänge sei dabei im folgenden die Strecke bezeichnet, entlang derer die Stellung des Bearbeitungskopfes von der senkrechten Einstrahlung bis zum endgültigen Anstellwinkel beziehungsweise umgekehrt (jew. 45° in **Bild 5.13**) verändert wird.

Die *"Bearbeitung mit Anstellwinkeln"* kann nach [59] Abweichungen von der senkrechten Einstrahlung bis zu einem Winkel von 45°, gemessen von der Werkstückorthogonalen, erforderlich machen. Nach [85] steigt für Anstellwinkel größer 30° bei der Bearbeitung ohne Zusatzwerkstoff die Porenhäufigkeit deutlich an. Diese Beobachtung wird für Anstellwinkel von 45° auch in [59] angesprochen.



**Bild 5.13** Prozessführungsstrategie Bearbeitung mit Anstellwinkeln [nach 59]

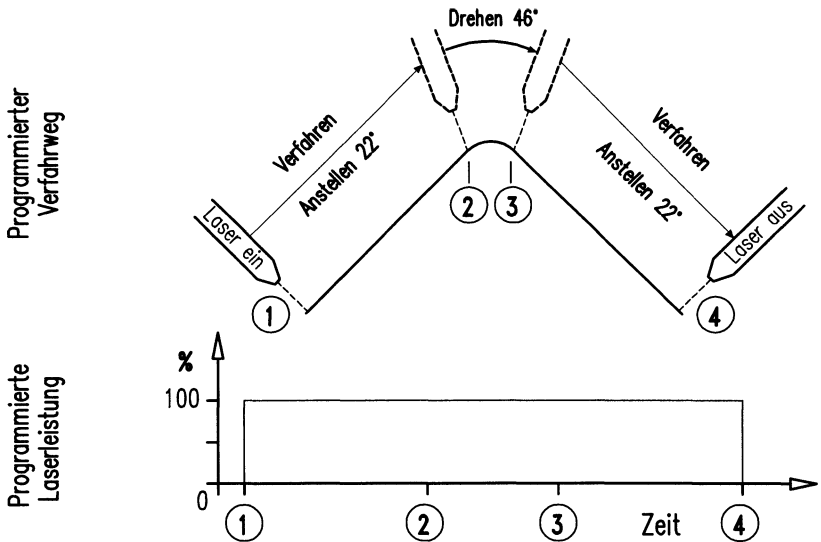
Da Voruntersuchungen gezeigt haben, daß sich diese Prozessführungsstrategie mit Anstellwinkeln größer  $30^\circ$  mit der eingesetzten  $\text{CO}_2$ -Laseranlage nur unter einer erhöhten Porenbildung in der Schweißnaht realisieren läßt, wird diese Strategie für die Untersuchungen zum Schweißen mit  $\text{CO}_2$ -Laserstrahlung ohne Zusatzwerkstoff nicht weiterverfolgt.

Im Gegensatz zur Bearbeitung mit dem  $\text{CO}_2$ -Laser erfolgt die Bearbeitung mit dem eingesetzten Nd:YAG-Laser aufgrund der geringeren verfügbaren Laserleistung von etwa 940W und dem deutlich größeren Fokussdurchmesser nur bei Vorschubgeschwindigkeiten im Bereich von 1,2m/min oder geringer. Zur Vermeidung der sich bei der Umorientierung an stark gekrümmten Konturen ergebenden Problematik der reduzierten TCP-Geschwindigkeit wurden Voruntersuchungen durchgeführt. Hierbei hat sich gezeigt, daß in der eingesetzten Anlagenkonfiguration ein Anstellwinkel von  $22^\circ$  vor beziehungsweise nach dem Krümmungsradius ausreicht, um ein gleichbleibendes Bearbeitungsergebnis an Außenkonturen mit  $90^\circ$  Öffnungswinkel und einem Krümmungsradius bis 2mm sicherzustellen. Für derartige Anstellwinkel ist nach [59, 85] nicht mit Porenbildung in der Schweißnaht zu rechnen und sie wurde auch an untersuchten Bauteilen nicht festgestellt.

Diese in den Vorversuchen als anlagenspezifisch geeignet ermittelte Prozessführung mit Anstellwinkeln von  $22^\circ$  für das Schweißen von Konturelementen mit dem Nd:YAG-Laser zeigt **Bild 5.14**. Sie liegt den in Kapitel 6 vorgestellten Ergebnissen zum Schweißen mit Nd:YAG-Laserstrahlung zugrunde. Die *Bearbeitung mit Anstellwinkeln* erfordert jedoch für die Übertragung auf andere anlagentechnische Voraussetzungen die Erarbeitung entsprechend geeigneter Anstellwinkel, die ein gleichblei-

bedendes Bearbeitungsergebnis im Bereich der Bauteilkrümmung sicherstellen.

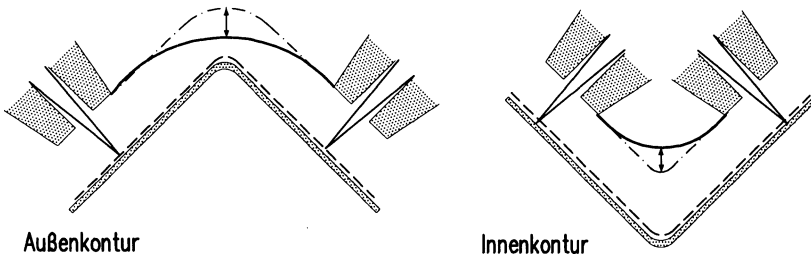
Die Bearbeitung von Innenkonturen konnte mit Ausnahme an der später in **Bild 6.54** beschriebenen Konturfolge aus Gründen der Zugänglichkeit für den Bearbeitungskopf mit einer Brennweite der Fokussieroptik von  $f=83\text{mm}$  nicht umgesetzt werden.



**Bild 5.14** Prozeßführung "Bearbeitung mit Anstellwinkeln" beim Laserstrahlschweißen mit dem eingesetzten Nd:YAG-Laser

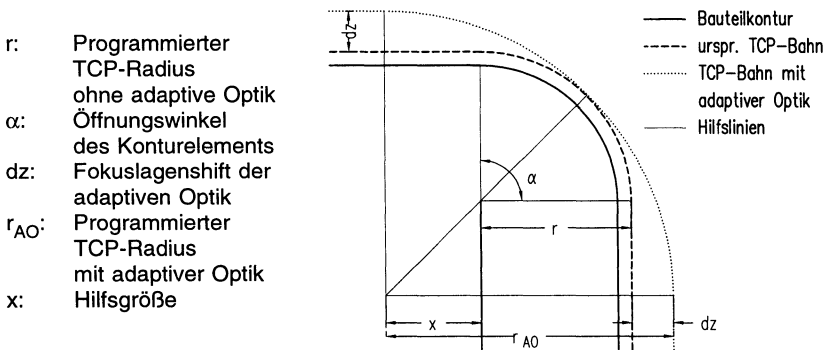
### 5.2.5 Bearbeitung mit adaptiver Optik

Durch den Einbau der in Abschnitt 5.1.2 beschriebenen adaptiven Optik in den Bearbeitungskopf der  $\text{CO}_2$ -Lasereinrichtung nach der in **Bild 5.10** geschilderten Weise werden neuartige Strategien zur Prozeßführung an Konturelementen mit kleinen Krümmungsradien ermöglicht [145, 146]. Die prinzipielle Vorgehensweise der Programmierung der Bearbeitungsbahn an einer einfachen Außen- oder Innenkontur unter Einsatz einer adaptiven Optik zeigt **Bild 5.15**.



**Bild 5.15** Prozeßführungsstrategien an Außen- und Innenkonturen unter Einsatz einer adaptiven Optik [157]

Bearbeitungsfehler infolge des begrenzten Beschleunigungsvermögens der Achsen der Laseranlage können dadurch verhindert werden, daß durch den Einsatz adaptiver Optiken für die Bearbeitung von Formteilen nicht die Krümmungsradien der Werkstücke programmiert werden müssen. Eine Nachführung des Fokuspunkts mittels adaptiver Optik über eine Strecke von bis zu 10mm an der Werkstückoberfläche erlaubt die Programmierung weitaus größerer Radien für die Werkzeugbahn. Durch die Vergrößerung der programmierten Bahnradien werden Grenzen der kinematischen Leistungsfähigkeit der Werkzeugmaschine nicht beziehungsweise erst bei sehr viel kleineren Bauteilradien erreicht.



**Bild 5.16** Programmierte TCP-Bahnen an einer Außenkontur mit und ohne Einsatz einer adaptiven Optik

Die Vergrößerung der zu programmierenden Radien an Außen- beziehungsweise Innenkonturen wird am Beispiel eines Strukturelements mit Außenkontur (**Bild 5.16**) hergeleitet. Als Randbedingung dieses Berechnungsbeispiels wird ein tangentialer Übergang des programmierten Werkzeugbahnradius in die dem Konturelement vor-

sowie nachgelagerten Geradenstücke vorgegeben.

Die geometrischen Zusammenhänge zwischen den programmierten Bahnradien bei der Bearbeitung einer gekrümmten Kontur mit und ohne Einsatz einer adaptiven Optik ist durch die nachfolgenden Gleichungen beschrieben:

$$\begin{aligned}
 a) \quad r_{AO} &= x + r + dz \quad \Rightarrow \quad x = r_{AO} - r - dz \\
 b) \quad r_{AO} &= \frac{x}{\cos \frac{\alpha}{2}} + r
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

daraus folgt für  $r_{AO}$ :

$$r_{AO} = \frac{r_{AO} - r - dz}{\cos \frac{\alpha}{2}} + r \tag{5.2}$$

und schließlich:

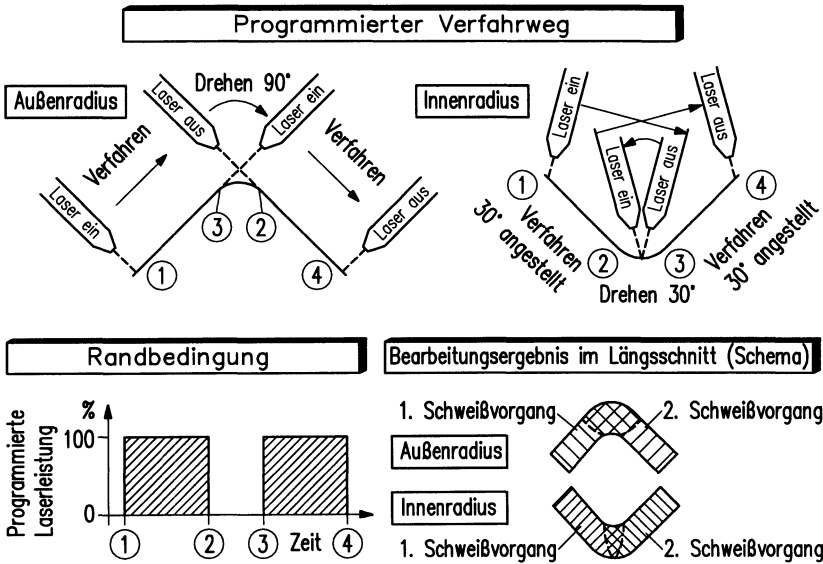
$$r_{AO} = r + \frac{dz}{1 - \cos \frac{\alpha}{2}} \tag{5.3}$$

Nach diesem anhand **Bild 5.16** errechneten Zusammenhang ermöglicht der Einsatz einer adaptiven Optik mit einem Aktuatorhub von 10mm für eine Außenkontur mit Krümmungsradius  $R=5\text{mm}$  bei einem Öffnungswinkel von  $90^\circ$  bei einer Fokusslage  $z=0\text{mm}$  eine Vergrößerung des programmierten TCP-Radius von  $r=6,0\text{mm}$  auf  $r_{AO}=40,1\text{mm}$ .

Durch die Variation des Arbeitsabstands zwischen Bearbeitungskopf und Werkstück infolge der Verschiebung des Fokuspunkts ist unter Einsatz einer adaptiven Optik die Bearbeitung nur ohne Zusatzwerkstoff möglich, da für die Bearbeitung mit Zusatzwerkstoff ein Zusammentreffen von Draht und Laserstrahl auf der Werkstückoberfläche sichergestellt werden muß. Eine entsprechend schnelle Nachführung des Drahtaufreffpunktes parallel zur Fokuslagenverschiebung mit der adaptiven Optik ist derzeit nicht möglich. Die beschriebene adaptive Optik wurde an der  $\text{CO}_2$ -Lasereinrichtung für Grundlagenuntersuchungen an den in **Bild 5.1** dargestellten Biegeteilen eingesetzt.

5.2.6 Linearisierung

Im Rahmen von Voruntersuchungen wurde in dieser Arbeit eine neuartige Prozeßführungsstrategie entwickelt, die eine Bearbeitung von stark gekrümmten Konturen mit kleinen Krümmungsradien ohne Fehlererscheinungen ermöglicht. **Bild 5.17** zeigt die hierbei programmierte Verfahrensbewegung für den Bearbeitungskopf am Beispiel einer Außen- und Innenkontur mit einem Öffnungswinkel von jeweils 90°.



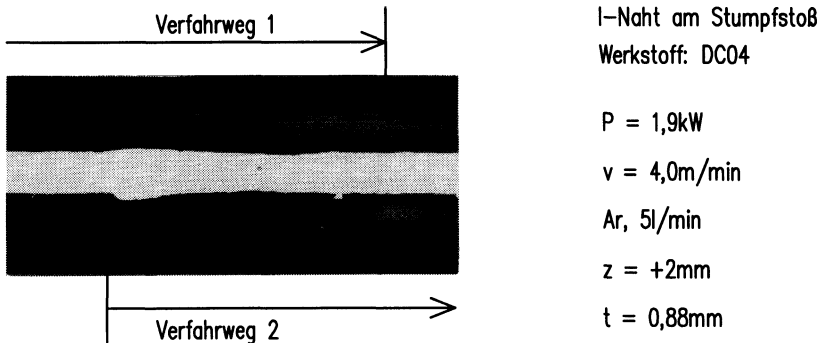
**Bild 5.17** Prozeßführung Linearisierung: Bahnplanung an stark gekrümmten Bauteilkonturen

Da die kinematischen Grenzen bei der Bearbeitung kleiner Krümmungsradien im allgemeinen während der Umlagerung des Bearbeitungskopfes erreicht werden und durch die Lasereinwirkung während dieser Phase des Prozesses die genannten Imperfektionen entstehen, findet bei der Strategie "Linearisierung" eine Entkopplung dieser Umlagerungsbewegung vom eigentlichen Schweißprozeß statt. Dies wird durch eine Reduzierung der Laserleistung auf 0% während der Umlagerungsbewegung des Bearbeitungskopfes realisiert.

Um dennoch auch im Bereich des Radius eine sichere Durchschweißung zu erhalten, wird die Kontur durch zwei getrennte Schweißbahnen bearbeitet und im Bereich der

Bauteilkrümmung eine Überlappung des Endes der ersten Schweißung mit dem Anfang der zweiten Schweißung sichergestellt (**Bild 5.17**, rechts unten). Die Tauglichkeit dieser Prozeßführungsstrategie wird in Kapitel 6 für die Bearbeitung von Außen- und Innenkonturen mit unterschiedlichen Öffnungswinkeln und mit Krümmungsradien von  $R=10\text{mm}$  und kleiner nachgewiesen. Die Anwendung dieser Prozeßführungsstrategie ist nicht an einen bestimmten Öffnungswinkel des Konturelementes, einen Werkstoff oder eine bestimmte Blechdicke gebunden.

Da die Bearbeitung von kleinen Radien in der geschilderten Weise durch die Überlappung zweier nur gering gekrümmter oder gerader Bahnen realisiert wird, wird diese Prozeßführungsstrategie im weiteren Verlauf als "Linearisierung" bezeichnet.



**Bild 5.18** Überlappung von Schweißnahtende und -anfang an einer geraden I-Naht am Stumpfstoß im Längsschliff (Strahleintritt: senkrecht von oben)

In Vorversuchen wurde nachgewiesen, daß eine Überlappung von Schweißnahtende und -anfang, die im Bereich des Konturelementes zur Realisierung der Prozeßführungsstrategie Linearisierung erforderlich ist, bei geeigneter Prozeßführung ohne eine signifikante Beeinträchtigung der Fertigungsqualität möglich ist. **Bild 5.18** zeigt dies am Beispiel einer Überlappung von Schweißnahtende und -anfang für eine gerade Schweißnaht im Längsschliff.

Voraussetzung für die störungsfreie Realisierung der Überlappung von Schweißnahtende und -anfang ist die geeignete Gestaltung der hierbei jeweils wirkenden transienten Prozesse [158]. Dies macht erforderlich, insbesondere die Entstehung von End- bzw. Anfangskratern zu unterbinden, da deren Überlagerung eine Verbindung ohne Imperfektionen in der Schweißnaht verhindern würde. Hierzu ist die Zündung sowie das Abschalten des Laserstrahls ohne eine maschinenbedingte Totzeit [121] zu



realisieren, die ursächlich für die Bildung von Einbrandkratern am Nahtanfang beziehungsweise -ende ist.

Die Verhinderung von Anfangs- bzw. Endkratern ist nach [158] durch ein "fliegendes" Zünden bzw. Abschalten des Laserstrahls möglich. Das Zu- bzw. Abschalten des Laserstrahls erfolgt dabei nicht gleichzeitig mit dem Start oder dem Ende der Vorschubbewegung sondern zeitversetzt, so daß der Strahl während der Bewegung beziehungsweise abgeschaltet wird. So können Anfangs- oder Endkratern auch für die Bearbeitung an Konturelementen mit kleinen Krümmungsradien verhindert werden (Siehe beispielsweise **Bild 6.3**).

Die Analyse der mit *Linearisierung* erreichten Bearbeitungsergebnisse an Konturelementen und Realbauteilen bildet einen wesentlichen Teil von Kapitel 6. Diese Strategie wird sowohl für die Untersuchungen mit dem CO<sub>2</sub>- als auch mit dem Nd:YAG-Laser angewendet.



## **6 BEWERTETE BEARBEITUNGSERGEBNISSE ZUM LASER-STRAHLSCHWEISSEN VON BLECHFORMTEILEN**

Im folgenden werden die Bearbeitungsergebnisse beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen nach den bereits in den Kapiteln 2 und 4 genannten Vorschriften bewertet, systematisch aufbereitet und unter fertigungstechnischen Gesichtspunkten diskutiert. Hierzu erfolgt eine Analyse der jeweils erzielbaren Fertigungsqualität an einfachen Konturelementen, Konturfolgen und Realbauteilen im Zusammenhang mit der Prozeßführungsstrategie und werkstück- oder fügstellenspezifischen Randbedingungen für das Schweißen mit CO<sub>2</sub>- und Nd:YAG-Laserstrahlung. Diese Zusammenstellung der erzielten Fertigungsqualität bei der räumlichen Bearbeitung von Blechformteilen aus Stahlwerkstoffen in Abhängigkeit von der Prozeßführung und den jeweils spezifizierten Einflußgrößen wurde am Beispiel der eingesetzten Systemtechnik erarbeitet.

Die Darstellung der Ergebnisse ist so allgemein gewählt, daß eine Übertragung der herausgearbeiteten, grundsätzlichen Einflußgrößen auf das Bearbeitungsergebnis auch für unterschiedliche anlagentechnische Voraussetzungen möglich ist. Dadurch ist eine Nutzung der so aufbereiteten Ergebnisse als Planungs- und Konstruktionshilfe für die Umsetzung vergleichbarer Laseranwendungen gewährleistet. Im Interesse der Übersichtlichkeit sind die im folgenden vorgestellten Ergebnisse beispielhaft ausgewählt, um entscheidende Einflußgrößen und prozeßtechnische Randbedingungen und ihre grundsätzlichen Auswirkungen auf die Fertigungsqualität der Schweißverbindung herauszuarbeiten und zu diskutieren. Die exakten Verfahrensgrenzen sind jeweils abhängig von der tatsächlichen, konkreten Bearbeitungsaufgabe und der eingesetzten Anlagentechnik zu ermitteln.

In der Chronologie der Ergebnisdarstellungen werden erst die Einflüsse der Prozeßführungsstrategie an kleinen Krümmungsradien, getrennt nach Außen- und Innenkonturen, am Beispiel einfach gebogener Strukturelemente (siehe Abschnitt 5.1.1) aufbereitet. Anschließend werden ebenfalls an diesen Strukturelementen sowohl nahtformspezifische Randbedingungen als auch der Einsatz von Zusatzwerkstoff sowie die Bearbeitung zinkbeschichteter Werkstücke und deren Einflüsse auf die Fertigungsqualität laserstrahlschweißter Verbindungen an Blechformteilen vorgestellt.

Erst erfolgt die isolierte Betrachtung der Prozeßführungsstrategien und einzelner Einflußgrößen auf die Fertigungsqualität beim Laserstrahlschweißen an stark gekrümmten Bauteilkonturen mit kleinen Krümmungsradien am Beispiel einfacher Struktur-

elemente; danach die grundlegende Betrachtung und Diskussion von exemplarischen Bearbeitungsergebnissen, die unter durch die Werkstücke vorgegebenen prozeßtechnischen Randbedingungen an Radienkombinationen und an Realbauteilen erzielt wurden. Abschließend werden Bearbeitungsergebnisse zum Laserstrahlschweißen von Blechformteilen mit einem Nd:YAG-Laser vorgestellt und diskutiert.

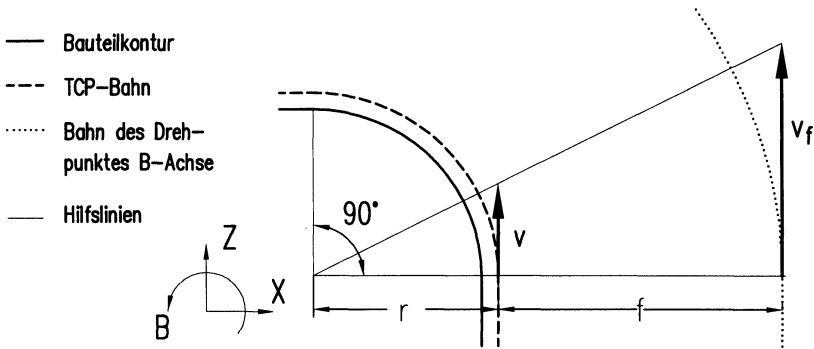
## 6.1 Grundlegende Betrachtungen zum Schweißen von Formelementen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung

Es ist bekannt, daß sich bei der Bearbeitung von Blechformteilen an stark gekrümmten Bauteilkonturen mit kleinen Krümmungsradien ohne eine geeignete Prozeßführung Imperfektionen im Bearbeitungsergebnis einstellen. Mit der zur Verfügung stehenden Anlagentechnik wird ein Auftreten dieser Imperfektionen bereits bei der Bearbeitung von Außenkonturen mit Biegeradien von 10mm festgestellt. Die in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Fehlererscheinungen Einbrandlöcher, Bindefehler, breite aufgeschmolzene Bereiche oder Nahtdurchhang treten für die untersuchten Innen- und Außenkonturen unabhängig von der Stoß- bzw. Nahtform der Verbindung auf. Da das Ausmaß der Imperfektionen aufgrund der kinematischen Gegebenheiten mit kleiner werdenden Krümmungsradien zunimmt, ist die Anwendung der in Abschnitt 5.2 erläuterten Prozeßführungsstrategien bei der Bearbeitung dieser Radien an Blechformteilen zwingend erforderlich.

Die eingesetzten Laseranlagen wurden für die Untersuchungen bei Laserleistungen von 2,2kW (CO<sub>2</sub>-Laser) beziehungsweise 900W (Nd:YAG-Laser) betrieben. Unter diesen Bedingungen wurden Vorschubgeschwindigkeiten von 2,0 bis 3,5m/min beziehungsweise 0,6 bis 1,2m/min erreicht.

Das in **Bild 6.1** dargestellte Berechnungsbeispiel mit den Randbedingungen einer modernen Standard-Laseranlage [110] verdeutlicht, daß die geschilderten, allgemeinen Problemstellungen bei der Bearbeitung kleiner Krümmungsradien an Blechformteilen auch bei deutlich höheren, erzielbaren Bahngeschwindigkeiten, wenn auch mit einer Verschiebung der Verfahrensgrenzen, relevant sind.

Berechnungsgrundlagen dieses Beispiels sind eine Vorschubgeschwindigkeit von  $v=8,0\text{m/min}$  für die Bahn des TCP, ein TCP-Radius von  $r=2\text{mm}$  sowie ein Abstand des TCP zum Drehpunkt der B-Achse von  $f=200\text{mm}$  (entspricht der Brennweite des Fokussierspiegels).



**Bild 6.1** Berechnungsbeispiel für die erforderliche Drehgeschwindigkeit der B-Achse an einer Außenkontur mit Radius 2mm

Die erforderliche Bahngeschwindigkeit  $v_f$  des Drehpunktes der B-Achse ergibt sich mit der Forderung nach einer gleichbleibenden TCP-Bahngeschwindigkeit aus den obigen Angaben nach Anwendung des Strahlensatzes zu:

$$\frac{v_f}{v} = \frac{f+r}{r} \quad ; \quad v_f = 800,8 \text{ m/min} \quad (6.1)$$

Hierfür wäre eine Drehgeschwindigkeit  $v_{Berf}$  der B-Achse erforderlich von:

$$v_{Berf} = \frac{v_f}{2\pi (f+r)} = 636,62 \frac{1}{min} \quad (6.2)$$

Als maximale Drehgeschwindigkeit  $v_B$  der B-Achse wird nach [110] jedoch angegeben:

$$v_B = 60 \frac{1}{min} < v_{Berf} = 636,62 \frac{1}{min} \quad (6.3)$$

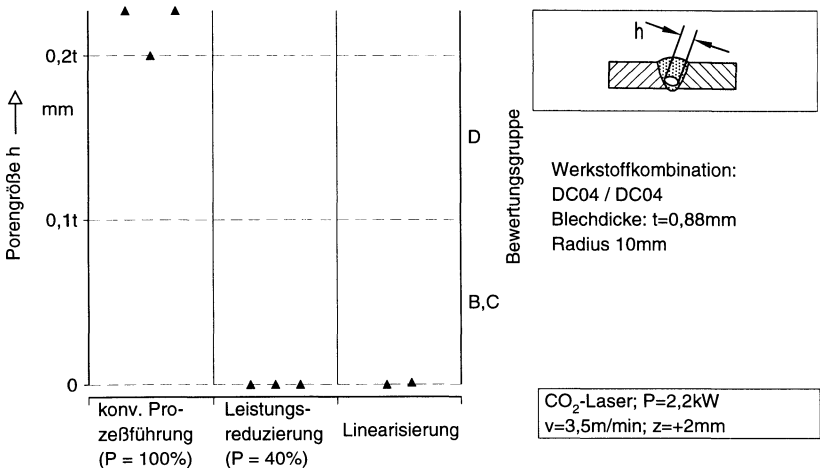
Bezugnehmend auf dieses Beispiel wird festgestellt, daß die kinematische Leistungsfähigkeit auch moderner Anlagen nach wie vor nicht ausreicht, um eine konstante Bahngeschwindigkeit an Konturen mit kleinen Krümmungsradien sicherzustellen. Die daraus resultierenden Fehlererscheinungen sind bekannt. Die allgemeine Notwendigkeit der Anwendung von Prozeßführungsstrategien zur Bearbeitung von stark gekrümmten Konturen mit kleinen Krümmungsradien ist nach wie vor gegeben.

Im folgenden werden typische Ergebnisse vorgestellt, bei denen auf der Basis eines jeweils in Vorversuchen ermittelten, geeigneten Prozeßfensters der Faktor Prozeßführungsstrategie (siehe Abschnitt 5.2) variiert wurde. Untersuchte Zielgröße war

abhängig von der gewählten Prozeßführungsstrategie die Fertigungsqualität im Bereich der Bauteilkrümmung an Außen- und Innenkonturen.

## 6.1.1 Prozeßführungsstrategien

### 6.1.1.1 Bearbeitung von Außenkonturen



**Bild 6.2** Reduzierung der Fehlererscheinungen an einer I-Naht am Stumpfstoß durch die Anwendung der Prozeßführungsstrategien Laserleistungsreduzierung und Linearisierung am Beispiel der Porenbildung

**Bild 6.2** zeigt, daß für die eingesetzten Formteile bei *konventioneller Prozeßführung* bereits bei einem Krümmungsradius von 10mm neben einer bereits in einer Sichtprüfung evidenten Verbreiterung der Schweißnaht auch signifikante Porenbildung in der Schweißnaht infolge eines Überschusses an Streckenenergie festgestellt wird. Für Krümmungsradien von 5mm und 2mm werden eine weitere deutliche Verbreiterung des Schmelzbades (siehe **Bild 2.9**) beziehungsweise Bindefehler infolge von Einbrandlöchern im Bereich des Radius beobachtet.

Durch eine an die tatsächliche Bahngeschwindigkeit angepaßte, reduzierte Laserleistung kann, wie bereits in Abschnitt 5.2 gezeigt, eine gleichbleibende Streckenenergie

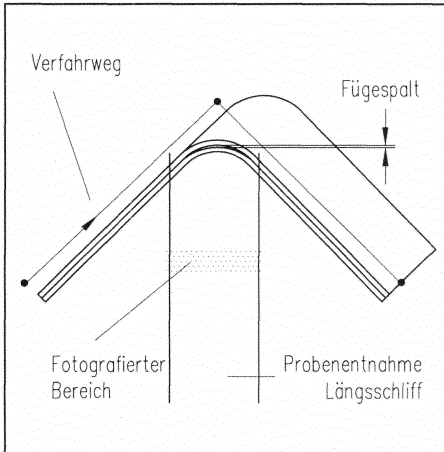
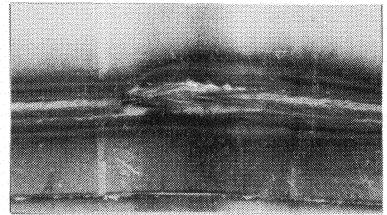
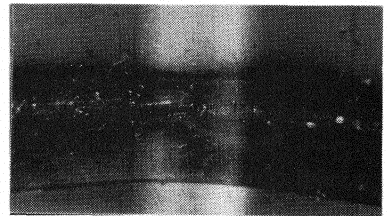
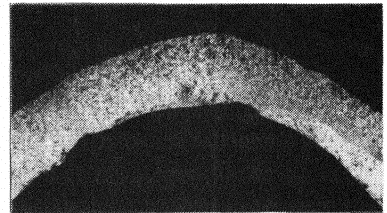
gie für die Bearbeitung kleiner Krümmungsradien eingestellt und damit neben der Verbreiterung der Schweißnaht und der Wärmeeinflußzone auch Porenbildung im Schweißgut verhindert werden. Ein Beispiel für die erzielbare Fertigungsqualität hinsichtlich des Merkmals Porenbildung mit *Laserleistungsreduzierung* an einem Außenradius  $R=10\text{mm}$  zeigt ebenfalls **Bild 6.2**.

Eine entsprechend der tatsächlichen Bahngeschwindigkeit reduzierte Laserleistung führt nur so lange zu einem zufriedenstellenden Bearbeitungsergebnis, wie die für den Tiefschweißprozeß erforderliche Schwellintensität und insbesondere bei dickeren Blechen die zur vollständigen Durchschweißung nötige Energie zur Verfügung stehen. Unterhalb dieser Grenzen findet ein Wärmeleitungsschweißprozeß beziehungsweise ein Einschweißen statt. Bindefehler sowie eine ungenügend durchgeschweißte Nahtwurzel sind mögliche Folgen.

Im untersuchten Fall wird bei einer geschwindigkeitsproportionalen Reduzierung der Laserleistung bei der Bearbeitung von Krümmungsradien von  $R=2\text{mm}$  ein Unterschreiten der Schwellintensität festgestellt, so daß hier ein Tiefschweißprozeß nicht aufrechterhalten werden kann. Das für die Ausbildung des Tiefschweißens charakteristische Plasmaleuchten während des Schweißens kann in diesem Fall nicht mehr beobachtet werden. Bei einer Laserleistung oberhalb der Schwellintensität treten die bereits genannten Fehlererscheinung im Bereich der Bauteilkrümmung auf.

Eine allgemeine Grenze, oberhalb der eine geschwindigkeitsproportionale Laserleistungsreduzierung zu zufriedenstellenden Ergebnissen führt, kann hier nicht angegeben werden. Sie ist anlagen- und werkstückspezifisch zu ermitteln. Als Einflußgrößen gehen hier insbesondere der Werkstoff, die Strahlqualität des Laserstrahls, die Dynamik der Werkzeugmaschine und die Blechdicke ein.

Eine andere Maßnahme zur Verbesserung der Bearbeitungsqualität an Konturen mit kleinen Krümmungsradien ist die in Abschnitt 5.2.6 beschriebene *Linearisierung*. Die Auswertung der Porenbildung bei Anwendung dieser Prozeßführungsstrategie an der Verbindung I-Naht am Stumpfstoß an einer Außenkontur mit Krümmungsradius  $R=10\text{mm}$  zeigt **Bild 6.2**. Ein weiteres typisches Bearbeitungsergebnis für diese Prozeßführungsstrategie zeigt **Bild 6.3** am Beispiel eines Außenradius  $R=5\text{mm}$  für eine I-Naht am Überlappstoß. Der beispielhaft ausgewählte Längsschliff über den Bereich der Überlappung von Schweißnahtende und -anfang im Bereich des Bauteilradius dokumentiert, daß hier keine Beeinträchtigung der Fertigungsqualität entsteht. Ein Bearbeitungsergebnis zur *Linearisierung* an einer Außenkontur mit Krümmungsradius  $R=2\text{mm}$  ist in **Bild 6.24** abgebildet.

**Bearbeitungsbeispiel:****Strahleintritt:****Strahlaustritt:**Werkstoffpaarung (je 0,88mm):**DC04 / DC04**Fügestellenvorbereitung:**Reinigung mit Tuch**Prozeßführungsstrategie:**Linearisierung****Längsschliff:**

Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
 Leistung: 2,2kW  
 Vorschub: 2,5m/min  
 Fokusslage: +2mm  
 Arbeitsabstand: 10,0mm  
 Arbeitsgas: Ar; 4,2l/min

**Bewertung nach Tabelle 4.1:**

Poren: - B -  
 (Fügespaltweite: 0,32mm)

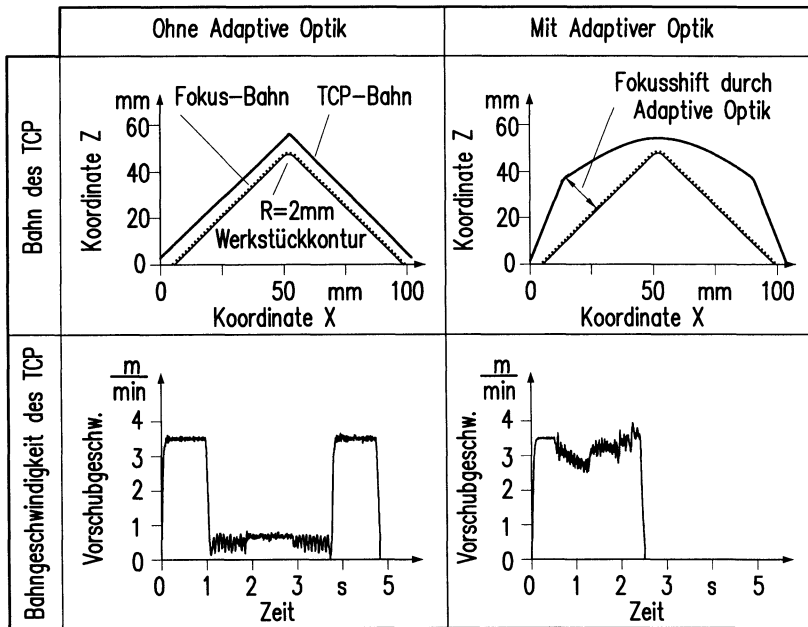
**Bemerkungen:**

- ▶ Überlappung von Schweißnahtende und -anfang im Radienbereich
- ▶ Grenzradius für die Bearbeitung von Außenkonturen mit konventioneller Prozeßführung für die eingesetzte Anlage: R=10mm

**Bild 6.3** Außenkontur Radius 5mm; I-Naht am Überlappstoß; Bearbeitung mit Linearisierung; Überlappung Schweißnahtende und -anfang



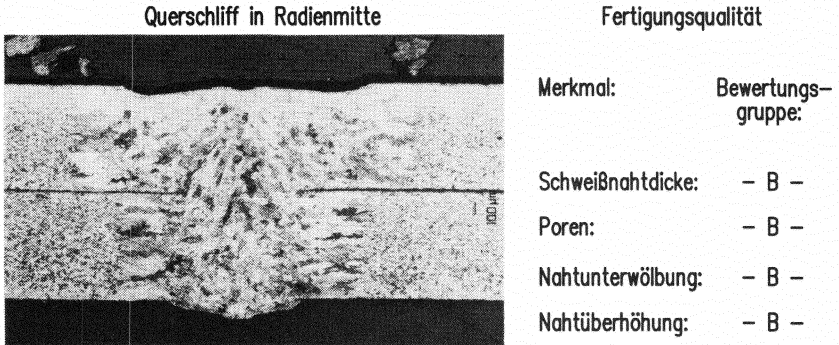
Als weitere Prozeßführungsstrategie zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Fertigungsqualität an Konturen mit kleinen Krümmungsradien wurde in Abschnitt 5.1.4 die Bearbeitung mit adaptiver Optik vorgestellt. Die beim Einsatz einer adaptiven Optik programmierte Bearbeitungsbahn sowie die hierbei erzielte, weitgehende Konstanz der Vorschubgeschwindigkeit entlang der Werkstückkontur gegenüber der Bearbeitung ohne Modifikation der Prozeßführung zeigt **Bild 6.4** [145]. Ein Krümmungsradius von  $R=2\text{mm}$  für die untersuchten Werkstücke stellt den negativen Extremfall für die maschinenbedingte Abnahme der Vorschubgeschwindigkeit dar. Die hier erzielten Ergebnisse unter Einsatz einer adaptiven Optik können so auch auf größere Krümmungsradien übertragen werden.



**Bild 6.4** Darstellung der TCP-Geschwindigkeit an einer Außenkontur mit Radius 2mm mit und ohne Einsatz einer adaptiven Optik

Die Prozeßführungsstrategie unter Einsatz einer adaptiven Optik wirkt sich auf die erzielbare Fertigungsqualität im oben gezeigten Bearbeitungsbeispiel eines Außenradius  $R=2\text{mm}$  so aus, daß in der Sichtprüfung kein Unterschied zwischen einer geraden Naht und der Schweißnaht im Bereich der Bauteilkrümmung festgestellt werden kann. Eine Bewertung der unter Einsatz der adaptiven Optik erzielten Fertigungsqualität an einer Außenkontur mit Krümmungsradius  $R=2\text{mm}$  zeigt **Bild 6.5** am Bei-

spiel eines repräsentativen Querschliffs aus der Radienmitte. Ein Erreichen der jeweils höchsten Bewertungsgruppe für die untersuchten Qualitätsmerkmale zeigt, daß unter Anwendung dieser Systemkomponente eine hohe Fertigungsqualität auch an Konturen mit kleinen Krümmungsradien sichergestellt werden kann. Die *Bearbeitung mit adaptiver Optik* ist allgemein anwendbar und nicht auf die untersuchte Blechdicke oder den Öffnungswinkel von  $90^\circ$  beschränkt.

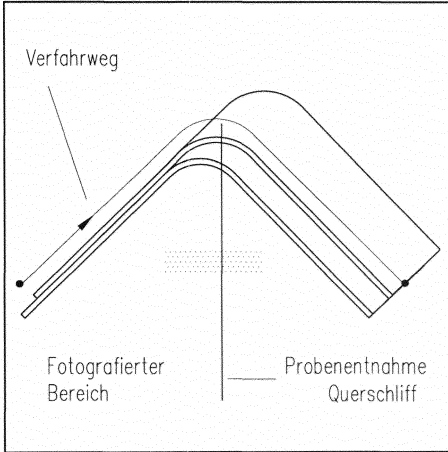


**Bild 6.5** I-Naht am Überlappstoß; Außenkontur Radius 2mm; Bearbeitungsergebnis mit adaptiver Optik

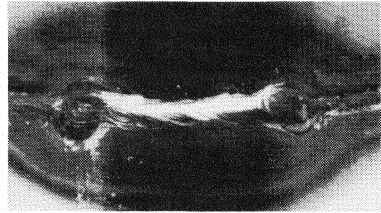
Eine Stabilisierung der Bearbeitungsqualität an Konturelementen kann analog zu den Beobachtungen nach [114] bei der Bearbeitung von Konturelementen durch den Einsatz von Zusatzwerkstoff erreicht werden. Das in **Bild 6.6** nachfolgende Bearbeitungsbeispiel zeigt dies in Verbindung mit der Strategie *Leistungsreduzierung* an einer Außenkontur mit einem Krümmungsradius von  $R=10\text{mm}$ .

Die in Abschnitt 5.2.3 beschriebene Vergrößerung des Prozeßfensters und die Stabilisierung des Schweißprozesses bei der *Bearbeitung mit Zusatzwerkstoff* sind zum einen auf die Vergrößerung des Toleranzfeldes für die Positionierung des Laserstrahls und der Werkstücke [58, 159] und zum anderen durch die Aufnahme von Leistungsüberschüssen, die durch das Aufschmelzen des Zusatzwerkstoffes gebunden werden, zurückzuführen. Zur Bindung der überschüssigen Laserleistung wird eine zusätzliche Menge an Zusatzwerkstoff eingebracht. Dies kann eine Verbreiterung der Schweißnaht und der wärmebeeinflussten Zone sowie eine Nahtüberhöhung und bei senkrechter Lasereinwirkung auch eine Überhöhung der Schweißnahtwurzel zur Folge haben. Die typisch schlanke Form einer Laserstrahlschweißnaht kann in diesen Bereichen, wie in **Bild 6.42** zu sehen, infolge des durch das Zusatzmaterial vergrößerten Schweißnahtvolumens nicht immer erzielt werden.

**Bearbeitungsbeispiel:**



**Strahleintritt:**



**Strahlaustritt:**



Werkstoffpaarung (je 0,88mm):

**DC04 / DC04**

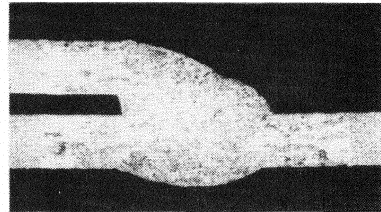
Zusatzdraht:

**SG 2, Ø 0,6mm**

Prozeßführungsstrategie:

**Leistungsreduzierung**

**Querschliff:**



Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
 Leistung: 2,2kW  
 Vorschub: 3,0m/min  
 Drahtvorschub: 2,0m/min  
 Fokusslage: +2mm  
 Arbeitsgas: Ar; 4,2l/min

**Bewertung nach Tabelle 4.2:**

**Nahtdicke:** - B -  
**Poren:** - B -  
**(Fügespaltweite: 0,31mm)**

**Bemerkungen:**

- ▶ Leistungsreduzierung im Radius auf P = 1,33kW
- ▶ Bearbeitung ohne Einsatz einer Nahtfolgesensork

**Bild 6.6** Außenkontur Radius 10mm; Kehlnaht am Überlappstoß; Bearbeitung mit Laserleistungsreduzierung und Zusatzwerkstoff

Die erzielbare Fertigungsqualität beim Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff wird in den Abschnitten 6.3.2.2 und 6.3.3 durch weitere Anwendungsbeispiele an Karosserieteilen belegt.

### 6.1.1.2 Bearbeitung von Innenkonturen

Vergleichbare Ergebnisse wie die oben für Außenkonturen gezeigten wurden auch für die Bearbeitung von Innenkonturen mit Krümmungsradien  $R \leq 10\text{mm}$  erarbeitet. Auch Innenkonturen sind, analog zu den Beobachtungen an Außenkonturen, ohne eine geeignete Modifikation der Prozeßführung nicht ohne Imperfektionen in der Schweißnaht bearbeitbar. Im Bereich der Umorientierung des Bearbeitungskopfes setzt ebenfalls ein starker Rückgang der Vorschubgeschwindigkeit mit den bekannten Fehlererscheinungen im Schweißergebnis ein.

Die Bearbeitung und die erzielbare Fertigungsqualität an Innenkonturen wird darüber hinaus durch weitere aus der Werkstückgeometrie abzuleitende Randbedingungen beeinflusst. Im allgemeinen ist aus Gründen der Zugänglichkeit ein Anstellen des Bearbeitungskopfes erforderlich. Oberhalb eines Anstellwinkels von  $30^\circ$  wird jedoch eine Zunahme der Porenbildung festgestellt (siehe Abschnitt 5.2.4). Diese Imperfektionen sind deshalb unter den genannten Bedingungen an Innenkonturen nicht vollständig zu vermeiden. Für die Untersuchungen an Formelementen konnte mit einem Anstellwinkel von  $30^\circ$  eine ausreichende Zugänglichkeit für den Bearbeitungskopf an den untersuchten Innenkonturen mit einem Öffnungswinkel von  $90^\circ$  sichergestellt werden.

Ebenfalls auf den erforderlichen Anstellwinkel ist auch eine erhöhte Wärmeeinbringung in das Bauteil an Innenkonturen zurückzuführen, da die nicht senkrechte Einstrahlung eine vergrößerte Strahlauftrefffläche und damit einen gegenüber der senkrechten Einstrahlung verschlechterten Prozeßwirkungsgrad bedingt [61]. Ein anderer Effekt, der an Innenkonturen das Bearbeitungsergebnis beeinflusst, ist der gegenüber Außenkonturen kleinere zu programmierende Bahnradius. Dadurch wird unter gleichen anlagentechnischen Randbedingungen bei der Bearbeitung von Innen- gegenüber Außenkonturen dem Werkstück vergleichsweise höhere Energie zugeführt. Dies schlägt sich in entsprechend stärker ausgebildeten Imperfektionen, wie zum Beispiel breiteren aufgeschmolzenen Zonen, nieder.

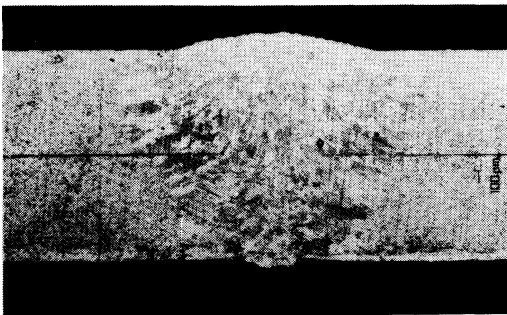
Die Anwendung der in Abschnitt 5.2 beschriebenen Strategien zur Prozeßführung ist unter Berücksichtigung der eingeschränkten Zugänglichkeit an Innenkonturen be-

grenzt möglich. Für die Anwendung der *Laserleistungsreduzierung* an Innenkonturen besteht analog zu Außenkonturen die Gefahr von Bindefehlern oder einer nicht durchgeschweißten Nahtwurzel bei Unterschreiten der Schwellintensität infolge zu starker Reduzierung der Laserleistung. Aufgrund der oben bereits geschilderten, erhöhten Energieeinbringung im Bereich der Innenkontur konnte an den untersuchten Werkstücken eine erfolgreiche Bearbeitung mit *Laserleistungsreduzierung* nur innerhalb eines sehr engen Prozeßfensters von etwa  $\pm 100W$  realisiert werden, für die untersuchten Konturen mit Krümmungsradien 5 und 2mm nur durch Wärmeleitungsschweißen.

Die Bearbeitung mit der Prozeßführungsstrategie *Linearisierung* konnte unter den in Abschnitt 5.2 genannten Bedingungen erfolgreich an Innenkonturen mit Krümmungsradien von 10, 5 und 2mm durchgeführt werden (siehe hierfür als Beispiel **Bild 6.8** für  $R=5mm$ ).

Die Bearbeitung von Innenkonturen unter Anwendung einer adaptiven Optik wurde durch Untersuchungen an einem Krümmungsradius  $R=2mm$  nachgewiesen. Analog zu Außenkonturen stellt auch an Innenkonturen der kleinste untersuchte Krümmungsradius  $R=2mm$  hinsichtlich der erzielbaren TCP-Geschwindigkeit den negativen Extremfall. Die Übertragbarkeit der hier erzielten Ergebnisse auf größere Krümmungsradien ist demnach zulässig. Die Anwendbarkeit dieser Prozeßführungsstrategie auf andere Öffnungswinkel oder Blechdicken ist ebenfalls möglich. Ein typisches Bearbeitungsergebnis, das bei *Bearbeitung mit adaptiver Optik* an einer Innenkontur mit Krümmungsradius  $R=2mm$  erzielt wurde, ist in **Bild 6.7** gezeigt.

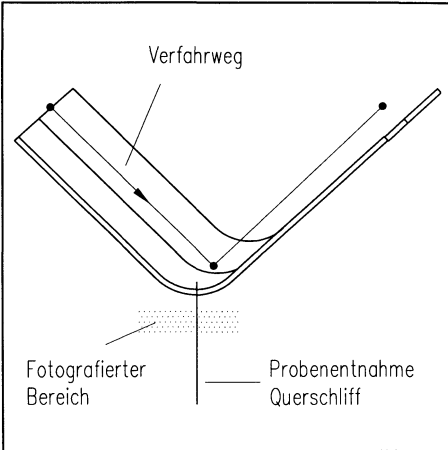
Querschliff in Radienmitte



Fertigungsqualität

Merkmal:	Bewertungsgruppe:
Schweißnahtdicke:	- B -
Poren:	- B -
Nahtunterwölbung:	- B -
Nahtüberhöhung:	- B -

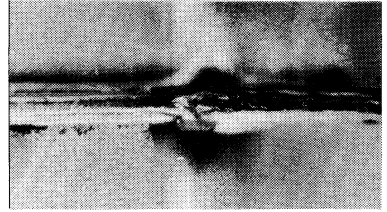
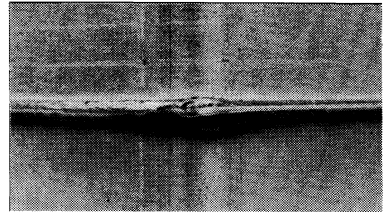
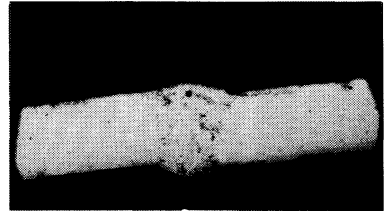
**Bild 6.7** I-Naht am Überlappstoß; Innenkontur Radius 2mm; Bearbeitungsergebnis mit adaptiver Optik

**Bearbeitungsbeispiel:**

Werkstoffpaarung (je 0,88mm):  
**DC06+Z140 / DC04**

Fügestellenvorbereitung:  
**Laserstrahlbrennschneiden**

Prozeßführungsstrategie:  
**Linearisierung**

**Strahleintritt:****Strahlaustritt:****Querschliff:**

Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
 Leistung: 2,2kW  
 Vorschub: 3,5m/min  
 Fokusslage: +2mm  
 Arbeitsabstand: 11,5mm  
 Arbeitsgas: Ar; 5,0l/min

**Bewertung nach DIN 8563 T11:**

**Nahtunterwölbung:** - B -  
**Nahtüberhöhung:** - B -  
**Poren:** - B -  
**(Kantenversatz):** - C -)

**Bemerkungen:**

- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet
- ▶ Bearbeitung der geraden Flanken aus Zugänglichkeitsgründen unter 30° Anstellwinkel
- ▶ Grenzzradius für die Bearbeitung von Innenkonturen ohne Modifikation der Prozeßführung für die eingesetzte Anlage: > 10mm

**Bild 6.8** Innenkontur Radius 5mm; I-Naht am Stumpfstoß; Prozeßführungsstrategie Linearisierung

### 6.1.1.3 **Fertigungstechnische Umsetzung**

In den Abschnitten 6.1.1.1 und 6.1.1.2 wurden allgemeine Hinweise über die mit verschiedenen Prozeßführungsstrategien erzielbare Fertigungsqualität zusammengefaßt dargestellt. Wesentliche allgemeingültige Tendenzen hinsichtlich der Anwendung von Prozeßführungsstrategien wurden herausgearbeitet, die mit einer Verschiebung der jeweiligen Grenzwerte auch unter veränderten anlagentechnischen Voraussetzungen oder an anderen Werkstücken wirksam sind. Hierbei hat sich gezeigt, daß auch an Blechformteilen mit kleinen Krümmungsradien unter gewissen prozeßtechnischen Voraussetzungen qualitativ hochwertige Bearbeitungsergebnisse erzielt werden können. Die in Kapitel 5 vorgestellten Prozeßführungsstrategien können also im Sinne des Qualitätsmanagements als wirkungsvolle Maßnahmen zur Sicherstellung gleichbleibender Fertigungsqualität an Blechformteilen herangezogen werden und, eingebunden in die Bauteilkonstruktion, die Gestaltungsfreiheit durch Laserstrahlschweißen zu bearbeitender Blechformteile erweitern. Für Konstruktionssysteme, die den Konstrukteur bei der fertigungsgerechten Auslegung von Bauteilen unterstützen [zum Beispiel 160], können diese Prozeßführungsstrategien in die Konstruktionsprüfung einbezogen werden.

Die industrielle Anwendung dieser Prozeßführungsstrategien im Sinne einer lasergerechten Fertigung von Blechformteilen muß jedoch vor dem Hintergrund betrachtet werden, welche systemtechnischen Voraussetzungen und welcher Aufwand an Bahnplanung und Programmierung für deren effiziente Anwendung erforderlich sind. Hierbei ist auch zu klären, wie dieser Aufwand durch geeignete Hilfsmittel verringert werden kann.

Die wesentlichen Voraussetzungen zum Einsatz der in den Abschnitten 5.2.1 bis 5.2.6 genannten Prozeßführungsstrategien sind anlagentechnische Komponenten. Sie bestimmen die zu wählende Strategie beziehungsweise müssen zu deren Anwendung in die Werkzeugmaschine integriert werden.

Die *konventionelle Bearbeitung* sowie die *Bearbeitung mit Anstellwinkeln* erfordern neben der Fähigkeit der Werkzeugmaschine zur 3D-Bearbeitung keine systemtechnischen Komponenten. Dies gilt auch für die Strategie *Linearisierung*.

Hinsichtlich der Anwendbarkeit der Strategie *Bearbeitung mit Anstellwinkeln* ist aus den Untersuchungen zu konstatieren, daß es bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten und kurzen Anstellwegen durch die begrenzte Leistungsfähigkeit der beteiligten Drehachsen während des Anstellens ebenso zu einer Reduzierung der TCP-Ge-

schwindigkeit und den damit verbundenen Fehlererscheinungen, zum Beispiel Porenbildung, kommen kann wie bei der Bearbeitung kleiner Krümmungsradien. Bei kleinen Anstellwinkeln und langsamen Vorschubgeschwindigkeiten, wie bei der Bearbeitung mit dem Nd:YAG-Laser (siehe Abschnitt 5.2.4 und 6.4) konnte eine Beeinträchtigung des Bearbeitungsergebnisses durch diese Prozeßführungsstrategie bei Anstellwinkeln unter 30° nicht festgestellt werden.

Für die Strategie *Linearisierung* wurden aus den Untersuchungen an Stahlwerkstoffen bei innerhalb der in Kapitel 2 angegebenen Toleranzanforderungen liegenden Fügespaltweiten keine Einschränkung in der Anwendung festgestellt.

Für die Bearbeitung mit *Laserleistungsreduzierung* ist eine Maschinensteuerung erforderlich, die eine variierende Programmierung der Laserleistung erlaubt. Eine derartige Steuerung der Laserleistung ist in heute üblichen Laserwerkzeugmaschinen beispielsweise weg-, zeit-, oder geschwindigkeitsabhängig möglich [110, 120].

Voraussetzung für eine geregelte Reduzierung der Laserleistung - die Regelung stellt die hinsichtlich der Qualitätssicherheit anzustrebende Lösung dar - ist die bereits in Abschnitt 5.2.2 angesprochene online-Erfassung der realen TCP-Geschwindigkeit und deren Berücksichtigung in der zur Verfügung gestellten Laserleistung. Die für die Strategie *Laserleistungsreduzierung* latente Gefahr des Unterschreitens der Schwellintensität und damit des Abreißen des Tiefschweißprozesses kann durch eine geeignete Diagnose des Plasmasignals und einer geeigneten Verarbeitung begegnet werden. Bei einem drohenden Abreißen des Tiefschweißprozesses kann die Laserleistung durch die Regelung eingestellt werden, daß ein stabiler Schweißprozeß aufrechterhalten wird.

Für die Kompensation erhöhter Streckenenergie an Konturelementen mit kleinen Krümmungsradien durch die geschwindigkeitsabhängige *Bearbeitung mit Zusatzwerkstoff* ist eine entsprechende Zusatzwerkstoffzuführung erforderlich. Für den geregelten Betrieb ist auch hier eine online-Erfassung der tatsächlichen Bahngeschwindigkeit und deren Korrelation zur Drahtfördergeschwindigkeit notwendig. Die geschilderten Ergebnisse zur Kompensation der erhöhten Streckenenergie durch die Zugabe von Zusatzwerkstoff haben jedoch gezeigt, daß sich die geometrischen Eigenschaften der Laserstrahlschweißnaht durch die Zuführung von Zusatzwerkstoff zur Kompensation von überschüssiger Laserleistung wie in der in **Bild 6.42** gezeigten Weise verändern können.

Ein wesentlicher fertigungstechnischer Vorteil der Anwendung von Zusatzwerkstoff ist



die deutliche Absenkung der Toleranzanforderungen an die Fügespaltweite [159, 108]. Dem stehen jedoch ein erhöhter Aufwand an Positionierung sowie eine eingeschränkte Zugänglichkeit für den um die Drahtzuführung erweiterten Bearbeitungskopf entgegen. Voraussetzung für die uneingeschränkte 3D-Fähigkeit der Bearbeitung mit Zusatzwerkstoff ist eine Zusatzachse an der Laseranlage, die eine beliebige Drehwinkelposition der Zusatzdrahtzuführung um die Strahlachse erlaubt [108]. Nur dann ist die volle räumliche Flexibilität der Bearbeitung gewährleistet.

Die erforderliche Systemtechnik für die *Bearbeitung mit adaptiver Optik* ist in Abschnitt 5.1.2 beschrieben. Da die Fokusslage bei dieser Strategie entlang der Strahlachse verschoben wird, kann die Bearbeitung mit adaptiver Optik nur dann in Verbindung mit Zusatzwerkstoff durchgeführt werden, wenn eine zusätzliche Systemtechnik zur Verfügung steht [159], die die Drahtzuführeinheit so positioniert, daß ein Auftreffen des Zusatzwerkstoffes und des Laserstrahls im gleichen Ort auf der Werkstückoberfläche sichergestellt ist.

Neben der Prozeßführungsstrategie zur Bearbeitung von Blechformteilen ermöglicht eine adaptive Optik in Verbindung mit einer geeigneten Sensorik die Sicherstellung einer gleichbleibenden Fertigungsqualität nicht nur an kleinen Krümmungsradien. Durch Auswertung der Emissionen des laserinduzierten Plasmas beim Schweißvorgang und der Umsetzung dieser Daten in eine Lageverschiebung des Fokuspunktes können Abweichungen der Form und Lage eines Bauteils durch eine geeignete Fokuslageregelung kompensiert und gleichbleibende Fertigungsqualität sichergestellt werden [161].

Neben den genannten systemtechnischen Voraussetzungen ist zur Anwendung der angesprochenen Bearbeitungsstrategien die Generierung einer bauteil- und strategie-spezifischen Bearbeitungsbahn erforderlich sowie eine entsprechende Ansteuerung der beteiligten Steuerfunktionen oder Systemkomponenten sicherzustellen. Diese Bahnplanung ist für jeden einzelnen, zu bearbeitenden Abschnitt einer Bauteilkontur zu leisten und muß in entsprechende NC-Programmsequenzen für die Werkzeugmaschine umgesetzt werden.

Zu einer lasergerechten Fertigung wird deshalb ein Hilfsmittel benötigt, das diese konturspezifische Bahnplanung und Programmerstellung bei Angabe einer Prozeßführungsstrategie und unter Berücksichtigung der systemtechnischen Randbedingungen unterstützt beziehungsweise automatisiert vornimmt. Ansätze für eine solchermaßen automatisierte Programmerstellung zur Berücksichtigung der in diesen Untersuchungen vorgestellten Bearbeitungsstrategien sind auf Basis eines kommerziell ver-

fügbaren Simulationssystemes bekannt [162]. Der Einsatz eines geeigneten Simulationssystems ermöglichte neben der Offline-Bahnplanung und -Programmerstellung auch die Kontrolle der Durchführbarkeit der ausgewählten Prozeßführung ohne Inanspruchnahme von Maschinenzeit an der Fertigungseinrichtung und damit kostengünstig.

In einem weiteren Schritt könnte durch ein mit entsprechenden Entscheidungskriterien ausgestattetes Bahnplanungs- und Programmiersystem eine zielkriterienabhängige Entscheidung für die eine oder andere Bearbeitungsstrategie erfolgen. Als Eingangsdaten könnten hierfür beispielsweise die in dieser Arbeit diskutierten Ausprägungen bestimmter Schweißnahtmerkmale als einzuhaltende Qualitätskriterien herangezogen werden.

Zur lasergerechten Fertigung von Blechformteilen muß natürlich auch an erster Stelle dem Konstrukteur das notwendige Wissen über die erzielbare Fertigungsqualität an Konturen mit kleinen Krümmungsradien zur Verfügung stehen, um das Bauteil entsprechend den für den fehlerfreien Betrieb geforderten Qualitätskriterien auslegen zu können. Im Kontext des Simultaneous Engineering stehen heute hierzu geeignete rechnergestützte Konstruktionssysteme beispielsweise auf Basis kommerzieller 3D-CAD Systeme zur Verfügung [163], die den Konstrukteur bei der Erfüllung dieser Aufgabe unterstützen. Die Einbindung unterschiedlicher Strategien zur Bahnplanung beziehungsweise zur Prozeßführung sowie der zugehörigen Grenzwerte für die erzielbare Fertigungsqualität in ein solches Konstruktionssystem würde auch mit der Technologie wenig vertrauten Konstrukteuren die lasergerechte Konstruktion von Blechformteilen ermöglichen.

### 6.1.2 Fügstellengeometrien

Die bisher vorgestellten Bearbeitungsergebnisse an Formelementen mit kleinen Krümmungsradien zeigen, daß unterschiedliche Strategien der Prozeßführung geeignet sind, eine gleichbleibende Fertigungsqualität der Schweißverbindung auch an diesen Konturelementen sicherzustellen. Die erzielbare Fertigungsqualität von Laserstrahlschweißverbindungen an Konturelementen hängt jedoch neben der Strategie der Prozeßführung von einer Vielzahl weiterer Einflußgrößen ab. Die grundsätzlichen Einflüsse der Fügstellengeometrie auf die Fertigungsqualität an Konturen mit kleinen Krümmungsradien werden im folgenden anhand von typischen Bearbeitungsergebnissen vorgestellt.

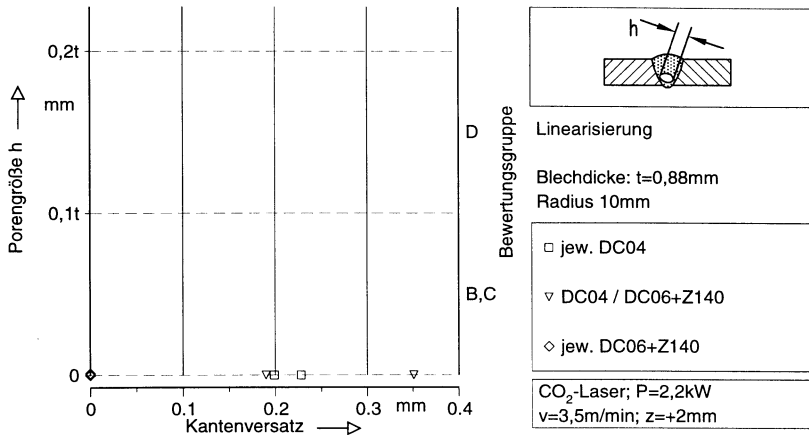
Die Fehlererscheinungen an Konturelementen werden bei gleicher zu fügender Blechdicke an der I-Naht am Stumpfstoß in stärkerer Ausprägung festgestellt als an der Kehlnaht oder I-Naht am Überlappstoß. Dies wird auf eine größere aufzuschmelzende Materialdicke und die für Überlappverbindungen höhere Wärmeabfuhr durch ein größeres an die Schweißzone angrenzendes Materialvolumen zurückgeführt. Die Grenzen, innerhalb derer Konturelemente ohne Ausbildung von Imperfektionen bearbeitet werden können, unterscheiden sich je nach Stoß- und Nahtart, Fügestellenvorbereitung und zu bewertenden Fehlermerkmalen. Die Einzelbeispiele werden hinsichtlich einzelner Qualitätsmerkmale aufbereitet. Aus der Gegenüberstellung dieser Auswertungen können allgemeine Hinweise zur Prozeßführung und Fügestellengestaltung abgeleitet werden.

Die Ergebnisse werden schwerpunktmäßig an Beispielen vorgestellt, die mit der Prozeßführungsstrategie *Linearisierung* (siehe Abschnitt 5.2.6) erzielt wurden. Vergleichende Beispiele zu anderen Prozeßführungsstrategien sind entsprechend gekennzeichnet. Die Durchführbarkeit der Strategie *Linearisierung* ist nicht an anlagen- oder systemtechnische Voraussetzungen gebunden, und die Programmierung der erforderlichen Verfahrenwege ist einfach möglich.

### 6.1.2.1 I-Naht am Stumpfstoß

Für in der I-Naht am Stumpfstoß gefügte Laserstrahlschweißnähte wurde in den Versuchen an Außen- und Innenkonturen festgestellt, daß ein Einfluß des Kantenversatzes der Fügepartner auf die erzielbare Fertigungsqualität anderer in DIN 8563 T11 spezifizierter Schweißnahtmerkmale, wie zum Beispiel Poren (siehe **Bild 6.9**), nicht vorliegt. Der Bereich, in dem die Stoßflächen der beiden Werkstücke aneinanderliegen, wird über die gesamte Dicke ohne Imperfektionen verschweißt.

Das Merkmal Kantenversatz wird nicht als direkt durch den Schweißprozeß selbst beeinflusstes Qualitätsmerkmal der Verbindung betrachtet werden, sondern es hat seine Ursache in der Bauteilvorbereitung beziehungsweise in der Positionierung der zu fügenden Werkstücke. Aus diesem Grund sind die Merkmalswerte für Kantenversatz in den Ergebnisdarstellungen in Klammern gesetzt. Kantenversatz als solcher ist jedoch als Imperfektion definiert und muß entsprechend untersucht und bewertet werden. Einflüsse eines Kantenversatzes auf die Schweißnaht sind insbesondere Spannungskonzentrationen infolge des unter Umständen geringeren Schweißnahtquerschnitts sowie der Umlenkung des Kraftflusses.



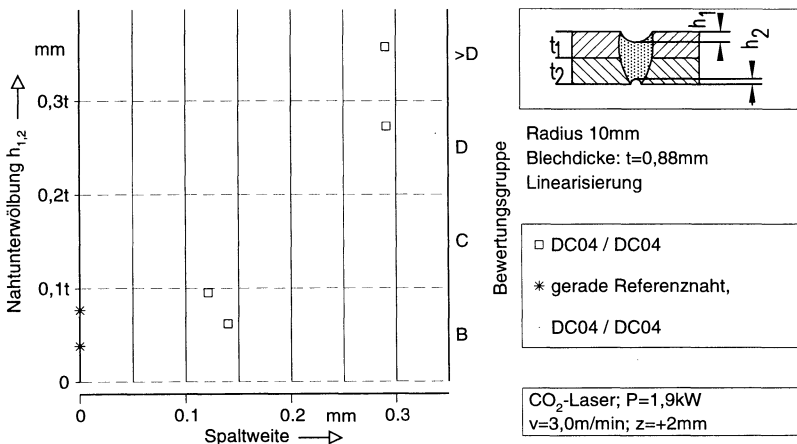
**Bild 6.9** Einfluss des Kantenversatzes auf die Porengröße an der Verbindung I-Naht am Stumpfstoß

Als wesentliche werkstückseitige Einflußgröße auf die Fertigungsqualität an der Verbindung I-Naht am Stumpfstoß wurde die Fügespaltweite bestätigt (siehe Kapitel 2). Dies gilt unabhängig davon, ob ein Fügespalt aus der Fügekantenvorbereitung oder aus der Positionierung der Bauteile resultiert. Wesentliche Imperfektionen, die auf einen Fügespalt zurückgeführt werden können sind Bindefehler, Poren in der Naht und an der Oberfläche sowie Nahtunterwölbung und Wurzelrückfall [103]. Dies gilt gleichermaßen für Außen- und Innenkonturen, wie später in Abschnitt 6.3.1 anhand eines Arbeitsbeispiels an einem Realbauteil gezeigt wird.

Im Gegensatz zu den Verbindungen I-Naht und Kehlnaht am Überlappstoß wird bei der I-Naht am Stumpfstoß nur die einfache Blechdicke verschweißt. Hier steht demnach weniger Material zur Verfügung, durch das die Schweißwärme aus der Fügezone in das Bauteil abfließen kann. Imperfektionen, die aus einem Überschuss an Streckenenergie resultieren treten deshalb an der I-Naht am Stumpfstoß früher beziehungsweise ausgeprägter auf als an Überlappverbindungen. Der gleiche Zusammenhang gilt analog auch für dünne Bleche gegenüber dicken Blechen.

### 6.1.2.2 I-Naht am Überlappstoß

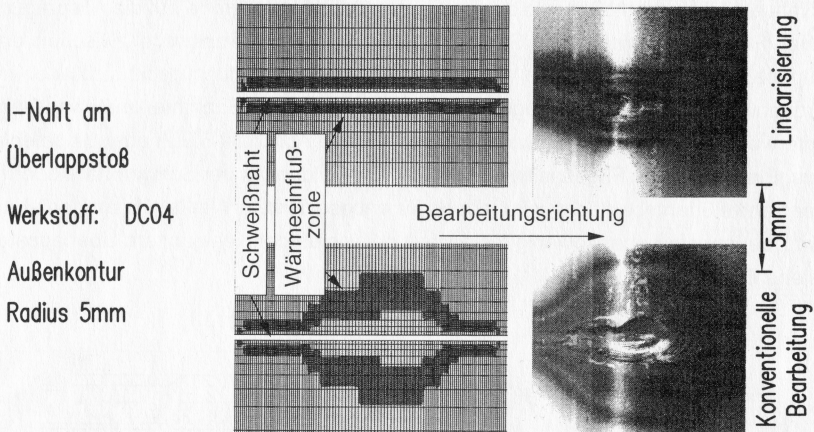
In den Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen von Verbindungen des Typs I-Naht am Überlappstoß wurde als eine wesentliche Einflußgröße auf die Ausprägung einer Reihe zu bewertender Schweißnahtmerkmale die Spaltweite zwischen den Fügepartnern (Fügespaltweite) festgestellt. Diese Beobachtung deckt sich auch mit Ergebnissen aus [164]. Der Fügespalt wirkt sich auf Schweißnahtmerkmale wie Nahtunterwölbung (**Bild 6.10**), Schweißnahtdicke (siehe Abschnitt 6.3.2) oder Bindefehler aus. Ein Einfluß der Fügespaltweite auf die Porenbildung in der Schweißnaht oder an der Schweißnahtoberfläche wird jedoch für unbeschichtete Werkstoffe an der I-Naht am Überlappstoß ebensowenig festgestellt bei wie an der Kehlnaht am Überlappstoß (siehe **Bild 6.14**).



**Bild 6.10** Einfluß der Spaltweite zwischen den Fügepartnern auf die Nahtunterwölbung an einer Außenkontur mit  $R=5\text{mm}$  an einer I-Naht am Überlappstoß

Bei Verbindungen in der I-Naht am Überlappstoß kann ein Einfluß der Prozeßführungsstrategie auf die Ausprägung einzelner Schweißnahtmerkmale beobachtet werden. Die *konventionelle Prozeßführung* sowie die Strategie *Laserleistungsreduzierung* führen infolge der erhöhten Energieeinbringung im Bereich der Bauteilkrümmung zu einer Verbreiterung der Schweißnaht, da der Grundwerkstoff durch den erhöhten Energieeintrag im Bereich der Krümmung auf größerer Breite aufschmilzt. In **Bild 6.11** [165] ist ein Vergleich der Breite der aufgeschmolzenen Zone anhand eines

Bearbeitungsbeispiels sowie als Ergebnis einer Simulationsrechnung für die *konventionelle Prozeßführung* sowie für *Linearisierung* dargestellt. Den Untersuchungen liegt eine Außenkontur mit einem Krümmungsradius von  $R=5\text{mm}$  zugrunde.

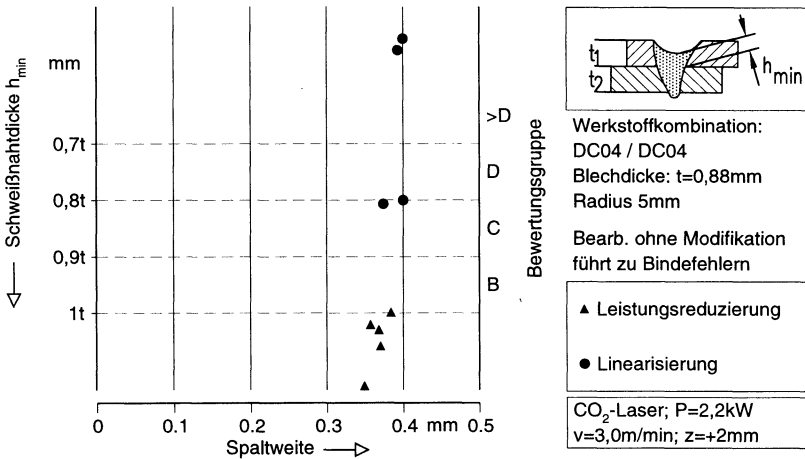


**Bild 6.11** Vergleich der Breite der Schweißnaht im Radienbereich an einer I-Naht am Überlappstoß bei konventioneller Prozeßführung und Linearisierung [165]

Die im Bereich der Bauteilkrümmung verbreiterte Schweißnaht bei *konventioneller Prozeßführung* und *Laserleistungsreduzierung* zeigt einen gleichmäßigen Übergang zwischen Grundwerkstoff und Schweißnaht in Form eines Nahtdurchgangs. Im Gegensatz dazu entsteht durch die kurzzeitige Energieeinbringung bei *Linearisierung* eine Schweißnaht mit gleichbleibender Breite auch im Bereich der Bauteilkrümmung.

Für Spaltweiten innerhalb der in Kapitel 2 genannten zulässigen Grenzen werden hinsichtlich der Schweißnahtdicke keine Unterschiede in der erzielbaren Fertigungsqualität zwischen den oben genannten Prozeßführungsstrategien festgestellt. **Bild 6.12** zeigt am Beispiel einer Außenkontur mit Krümmungsradius  $R=5\text{mm}$ , daß bei großen Fügespaltweiten im Bereich von  $0,3\text{-}0,4\text{mm}$  durch den gleichmäßigen Übergang zwischen Schweißnaht und Grundwerkstoff bei *Laserleistungsreduzierung* im Bereich der Bauteilkrümmung eine deutlich höhere Fertigungsqualität hinsichtlich der Schweißnahtdicke erreicht werden kann als für *Linearisierung*, da bei *Linearisierung* durch nach unten in den Fügespalt nachfließendes Schweißgut kein gleichmäßiger Übergang zwischen Schweißnaht und Grundwerkstoff erzielt werden kann. Für höhere Fügespaltweiten kann eine Überbrückung des Fügespalt ohne Zusatzwerkstoff nicht mehr gewährleistet werden. Dieses Verhalten tritt unabhängig vom bearbeiteten Krümmungsradius auf. Die Anfälligkeit des Bearbeitungsergebnisses für Imperfek-

tionen infolge der geschilderten Zusammenhänge nimmt mit geringer werdender Blechdicke zu.



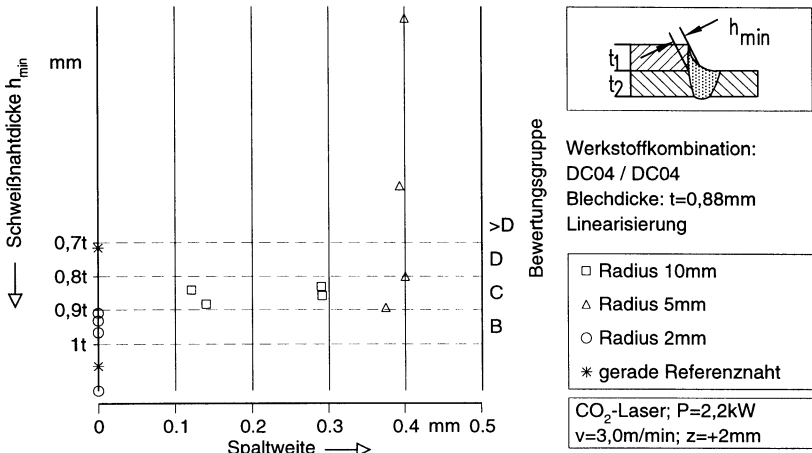
**Bild 6.12** I-Naht am Überlappstoß; Einfluß der Prozeßführungsstrategie auf die Schweißnahtdicke bei großen Fügespaltweiten

### 6.1.2.3 Kehlnaht am Überlappstoß

Im Falle der Verbindung Kehlnaht am Überlappstoß wird eine starke Streuung der ermittelten Schweißnahtmerkmale bereits an geraden Schweißnähten beobachtet. Diese ist auf eine fügstellenspezifische, systembedingte Unsicherheit in der lateralen Positionierung zwischen Laserstrahl und Fügestelle zurückzuführen. Bei der Programmierung der Position Strahl-Werkstück wurden die in Abschnitt 2.2.1.3 beschriebenen Toleranzanforderungen eingehalten, eine Nahtfolgesensorik zur Sicherstellung der exakten lateralen Positionierung des Strahls zur Fügestelle auch während der Bearbeitung stand jedoch für die Untersuchungen nicht zur Verfügung. Laterale Positionsabweichungen zwischen Strahl und Werkstück während der Bearbeitung und die dadurch bedingten Schwankungen in der Fertigungsqualität konnten deshalb nicht verhindert werden.

Analog zur I-Naht am Überlappstoß wurde auch für die Kehlnaht am Überlappstoß

eine Verschlechterung der Fertigungsqualität bezüglich der Merkmale Schweißnahtdicke (siehe **Bild 6.13**), Nahtunterwölbung und Bindefehler bei zunehmender Spaltweite zwischen den Fügepartnern festgestellt.

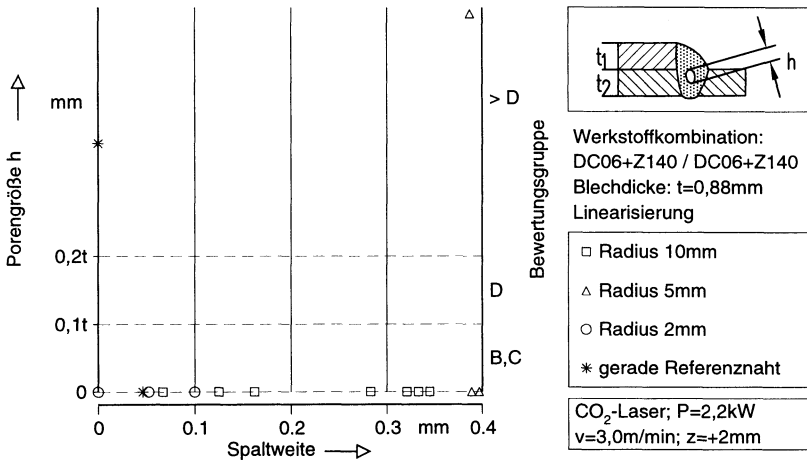


**Bild 6.13** Außenkontur; Einfluß der Spaltweite zwischen den Fügepartnern auf die Schweißnahtdicke an der Verbindung Kehlnaht am Überlappstoß bei Linearisierung

Für die Anwendung der Strategie *Linearisierung* wird kein Einfluß der Spaltweite auf die Porenhäufigkeit in der Schweißnaht beobachtet. Dies zeigt stellvertretend **Bild 6.14** für unterschiedliche Krümmungsradien. Die geschilderten Zusammenhänge wurden bei Kehlnahtverbindungen an Innen- und Außenkonturen gleichermaßen festgestellt.

Ein Einfluß der Prozeßführungsstrategie auf die erzielbare Fertigungsqualität wurde auch für die Kehlnaht am Überlappstoß ermittelt. So wird, analog zu den Beobachtungen an der I-Naht am Überlappstoß, eine erhöhte Schweißnahtdicke für die Bearbeitung mit *Leistungsreduzierung* erzielt. Bei *konventioneller Prozeßführung* wurden für die untersuchten Krümmungsradien aufgrund einer zu hohen Wärmebringung im Radienbereich Bindefehler infolge von Einbrandlöchern festgestellt.





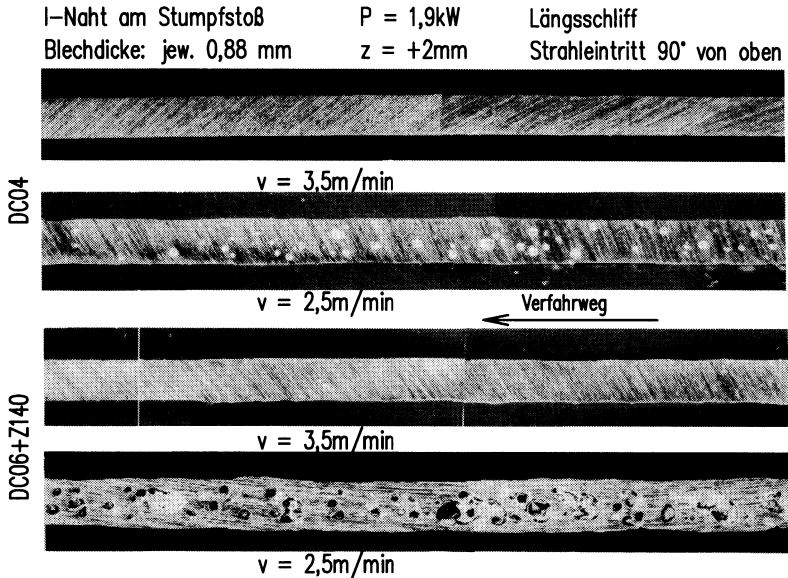
**Bild 6.14** Kehlernaht am Überlappstoß; Prozeßführungsstrategie Linearisierung; Einfluß der Spaltweite zwischen den Fügepartnern auf die Porenbildung an Außenkonturen mit unterschiedlichen Krümmungsradien

### 6.1.3 Bearbeitung verzinkter Werkstücke

Im Verlauf der Untersuchungen wurden neben der Bearbeitung unbeschichteter Werkstücke auch Versuche an den in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen zinkbeschichteten Werkstücken durchgeführt.

Hier wurde festgestellt, daß der Schweißprozeß für zinkbeschichtete Werkstücke auf eine Abweichung von den idealen Bearbeitungsbedingungen empfindlicher reagiert als für unbeschichtete Werkstoffe. Dies zeigt der Vergleich der Bearbeitungsergebnisse für die in diesem Fall als geeignet ermittelte Vorschubgeschwindigkeit von  $3,5\text{m/min}$  in **Bild 6.15** [38]. Bei Abweichungen von den idealen Arbeitsbedingungen zum Beispiel für den Strahleintrittswinkel oder für die Vorschubgeschwindigkeit kann ein Auftreten von Imperfektionen bei Schweißverbindungen an verzinkten Werkstücken in weitaus stärkerer Ausprägung festgestellt werden als ohne Zinkbeschichtung. Diese grundlegende Tendenz zeigt beispielhaft ein Vergleich der Porenbildung

in der Schweißnaht für die Geschwindigkeit 2,5m/min in **Bild 6.15**.

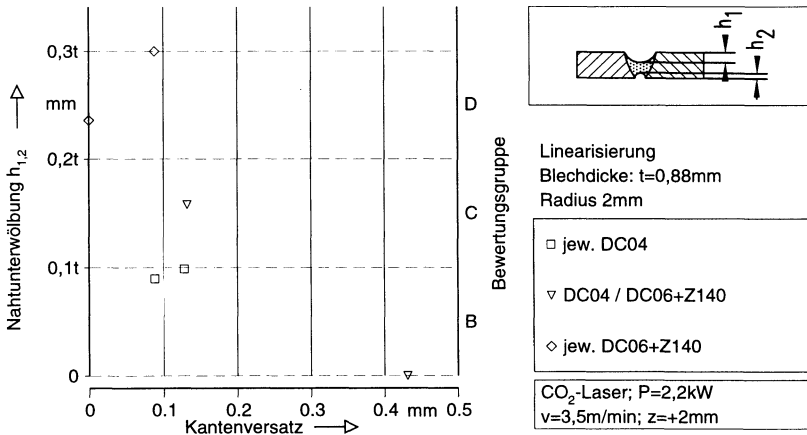


**Bild 6.15** Auswirkungen von Abweichungen aus dem idealen Parameterfenster bei beschichteten und unbeschichteten Werkstoffen am Beispiel der Vorschubgeschwindigkeit [38]

Bei den Untersuchungen an Blechformteilen wurde sowohl an Außen- als auch an Innenkonturen festgestellt, daß unabhängig von der gewählten Prozeßführungsstrategie ein negativer Einfluß der Zinkbeschichtung auf die erzielbare Fertigungsqualität an Bauteilkonturen mit kleinen Krümmungsradien vorliegt. Am Beispiel der untersuchten Krümmungsradien von R=10, R=5 und R=2mm wurde mit kleiner werdendem Radius eine Zunahme der Maximalwerte der Imperfektionen wie Nahtunterwölbung und Porenbildung sowie eine Zunahme der Streuung der Merkmalsausprägungen festgestellt. Diese Tendenz wurde unabhängig von der gewählten Verbindungsart beobachtet.

**Bild 6.16** verdeutlicht am Beispiel der Nahtunterwölbung über dem Kantenversatz an einer I-Naht am Stumpfstoß an einer Außenkontur exemplarisch die allgemein zu erwartende Beeinträchtigung der Fertigungsqualität sowie die auftretende Streuung der Merkmalsausprägung im Bereich der Bauteilkrümmung infolge einer Zinkbe-

schichtung. Die jeweils zwei mit unterschiedlicher Beschichtungskombination für diese Darstellung vermessenen Querschliffe aus der Radienmitte der Bauteilkrümmung wurden aus einer Versuchsreihe mit fünf Schweißverbindungen repräsentativ ausgewählt.

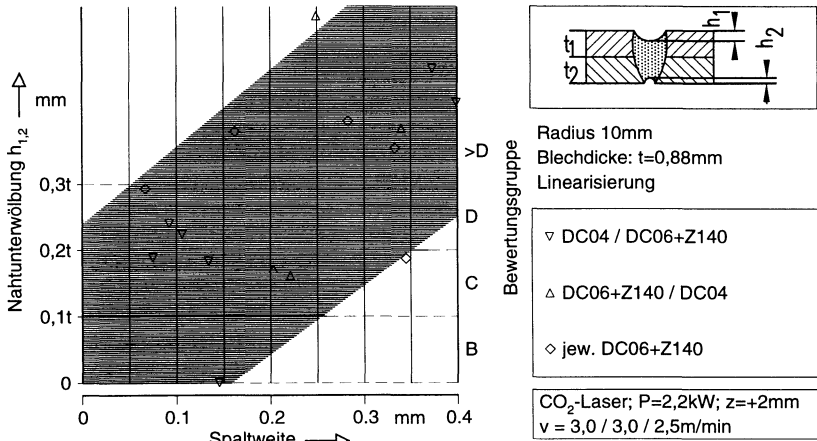


**Bild 6.16** I-Naht am Stumpfstoß; Außenkontur mit  $R=2\text{mm}$ ; Einfluß der Verzinkung auf die Nahtunterwölbung

Die Tendenz einer größeren Streuung sowie erhöhter Maximalwerte für die Imperfektionen Nahtunterwölbung und Porenbildung an verzinkten Werkstücken mit kleiner werdendem Krümmungsradius wurde auch an der I-Naht und Kehlnaht am Überlappstoß beobachtet. Hieraus kann eine verringerte Prozeßsicherheit für die Bearbeitung kleiner Krümmungsradien an verzinkten Blechformteilen abgeleitet werden.

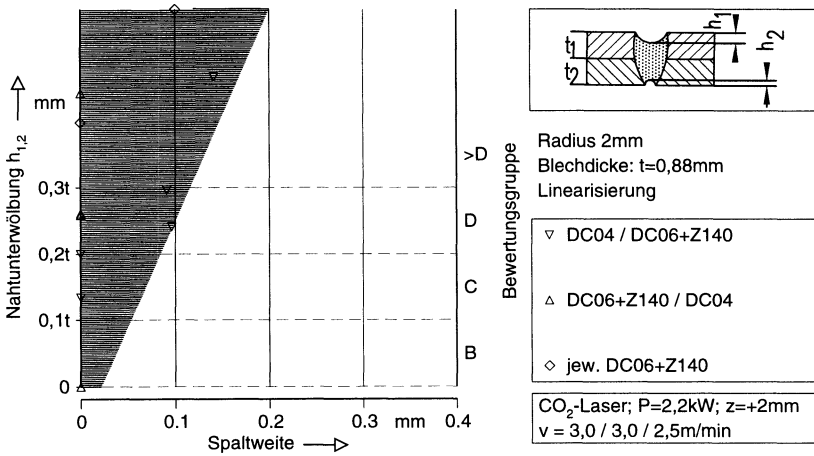
Die beobachtete Streuung in der Merkmalsausprägung an verzinkten gegenüber unverzinkten Werkstücken ist ebenso wie die erhöhten Maximalwerte der Imperfektionen Nahtunterwölbung und Porenbildung auf die Verdampfung der Zinkschicht im Bereich der Wechselwirkungszone zurückzuführen. Zinkdampf entsteht oberhalb einer Temperatur von  $906^\circ\text{C}$  [166]. Die Zinkverdampfung ist durch einen hohen Verdampfungsdruck gekennzeichnet [167]. Infolge dessen wird Material aus der Schmelze herausgeschleudert, was sich in Form einer verstärkten Spritzerbildung entlang der Schweißnaht auswirkt [105] und aufgrund eines diskontinuierlichen Ablaufes zu einer gegenüber unverzinkten Werkstücken verstärkten Streuung der Ausbildung der Schweißnahtmerkmale über die Schweißnaht führt.

Die **Bilder 6.17** und **6.18** zeigen exemplarisch am Vergleich der Ausprägung der Nahtunterwölbung an den Außenradien 10 und 2mm, daß die Prozeßsicherheit beim Fügen verzinkter Werkstücke an der I-Naht am Überlappstoß mit kleiner werdendem Krümmungsradius abnimmt. Ein vergleichbare Tendenz wurde auch für das Merkmal Porenbildung beobachtet.



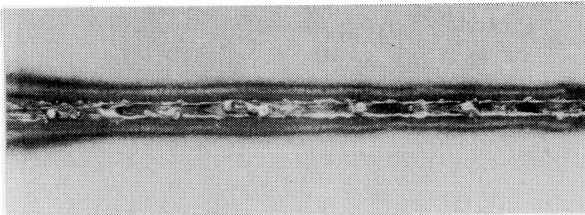
**Bild 6.17** I-Naht am Überlappstoß; Nahtunterwölbung an einer Außenkontur mit  $R=10\text{mm}$  bei Linearisierung

Vergleichbare Imperfektionen wie bei einer Zinkbeschichtung der Werkstücke werden an Verbindungen des Typs I-Naht am Überlappstoß durch starke Verschmutzung der Fügestelle mit Ölrückständen verursacht, die zum Beispiel aus einem dem Schweißen vorgelagerten Umformprozeß auf der Werkstückoberfläche anhaften können. Diese Ölrückstände können zu Oberflächenporen über die gesamte Schweißnahtlänge führen (siehe **Bild 6.19**). Bei entsprechender Tiefe der Oberflächenporen können Bindefehler in der Schweißnaht entstehen. Diese Fehlerstellen entstehen durch die infolge der Schweißwärme verdampfende Ölschicht zwischen den Fügepartnern, die ohne geeignete Maßnahmen nur durch die flüssige Schweißnaht entweichen kann. Die bereits in Zusammenhang mit verdampfenden Zinkschichten in **Bild 2.6** geschilderten konstruktiven Lösungen können auch ein seitliches Entweichen des verdampfenden Öls ermöglichen und die erzielbare Fertigungsqualität verbessern.



**Bild 6.18** I-Naht am Überlapstoß; Nahtunterwölbung an einer Außenkontur mit  $R=2$ mm bei Linearisierung

I-Naht am Überlapstoß, DC04 jew. 0,88mm  
Draufsicht Strahleintrittsseite



Verfahrweg →

10mm

P = 1,9kW  
v = 3,0m/min  
Ar, 350l/h  
z = +2mm

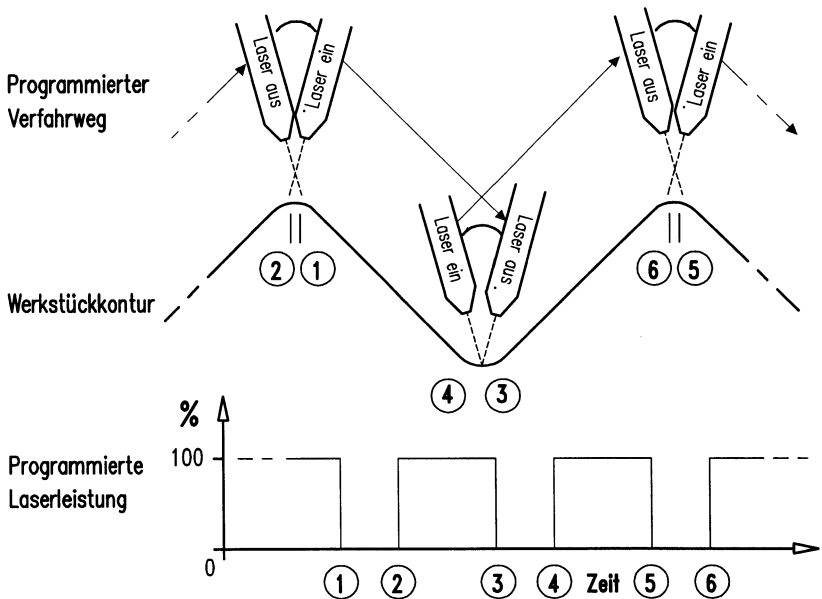
Ölbeschichtung:  
Raziol-CLF 2405

**Bild 6.19** Oberflächenschädigung einer I-Naht am Überlapstoß durch explosionsartig aus der Fügezone verdampfende Ölrückstände

## 6.2 Bearbeitungsergebnisse zum Schweißen von Konturfolgen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung

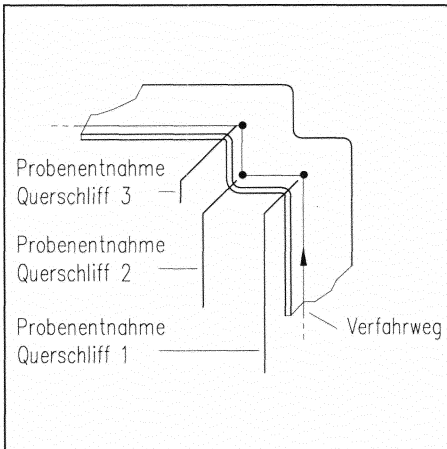
Neben der Untersuchung der erzielbaren Fertigungsqualität laserstrahlgeschweißter Verbindungen an Außen- und Innenkonturen wurden Versuche zur Bearbeitung von Konturfolgen mit unterschiedlichen Krümmungsradien an den in Abschnitt 5.2 beschriebenen Versuchswerkstätten durchgeführt.

Die im folgenden vorgestellten Bearbeitungsergebnisse wurden mit der Prozeßführungsstrategie *Linearisierung* erzielt. Die Prozeßführung über die Konturfolge an der Verbindung I-Naht am Stumpfstoß zeigt **Bild 6.20**. Der Anstellwinkel während des Schweißens beträgt jeweils 30°.



**Bild 6.20** Prozeßführungsstrategie *Linearisierung* über eine Konturfolge Außen-Innen-Außen mit Krümmungsradius jeweils 2mm

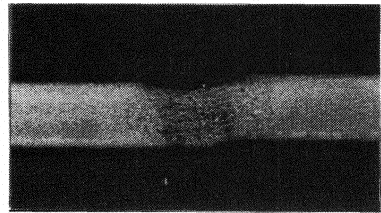
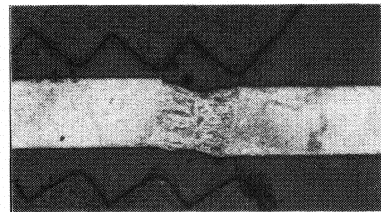
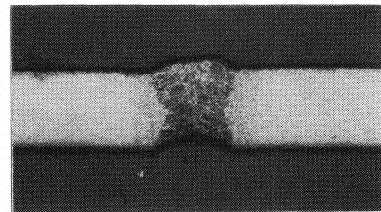
Es konnte gezeigt werden, daß bei Anwendung der in **Bild 6.20** gezeigten Prozeßführungsstrategie eine prozeßsichere Verbindung der I-Naht am Stumpfstoß an der Konturfolge erzielt werden kann. In **Bild 6.21** sind typische hierbei realisierte Bearbeitungsergebnisse dargestellt.

**Bearbeitungsbeispiel:**

Werkstoffpaarung (je t=0,88mm):  
**DC04 / DC04**

Fügestellenvorbereitung:  
**Randverformung plan  
abgeschliffen, ölfrei**

Prozßführungsstrategie:  
**Linearisierung**

**Querschliff 1:****Querschliff 2:****Querschliff 3:**

Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
Leistung: 2,2kW  
Vorschub: 3,5m/min  
Fokuslage: +2mm  
Arbeitsabstand: 10,0mm  
Arbeitsgas: Ar; 4,2l/min

**Bewertung Querschliff 2  
nach DIN 8563 T11:**  
**Nahtunterwölbung:** - C -  
**Nahtüberhöhung:** - B -  
**Poren:** - B -  
**(Kantenversatz:** - D -)

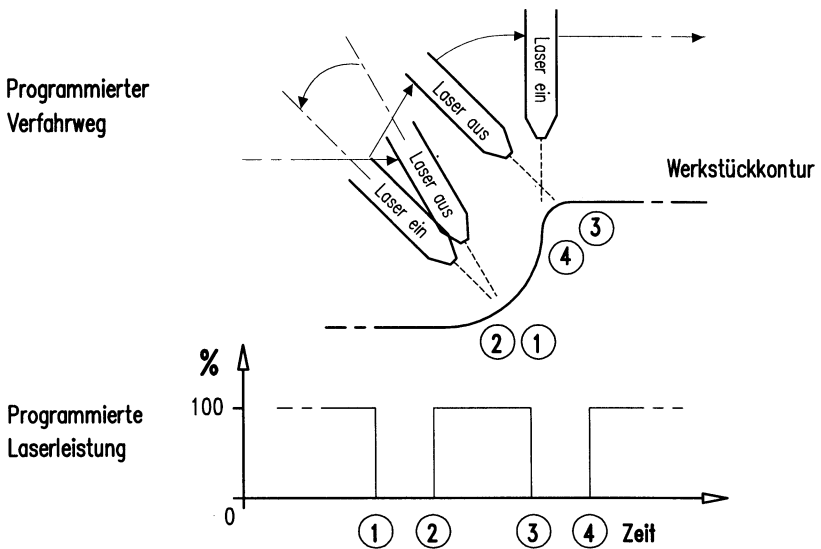
**Bemerkungen:**

- ▶ Konstanter Anstellwinkel von jew. 30° auf den Geradenstücken zwischen den Krümmungen
- ▶ Die Fügepartner wurden zur Sicherstellung eines technischen Nullspaltes mit einer zusätzlichen seitlichen Anpreßkraft beaufschlagt
- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet

**Bild 6.21** Konturfolge Außen-Innen-Außen mit Radius jeweils 2mm; I-Naht am Stumpfstoß; Prozeßführungsstrategie Linearisierung

Mit Ausnahme einer geringfügigen Nahtunterwölbung im Bereich der Krümmungsradien  $R=2\text{mm}$  wurde keine Beeinträchtigung der Fertigungsqualität der Schweißverbindung durch die Komplexität der Kontur festgestellt. Im Falle der *konventionellen Prozeßführung* wurden an den Radien Bindefehler infolge von Einbrandlöchern festgestellt.

Die Umsetzung der Prozeßführungsstrategie *Linearisierung* an einer Konturfolge für die Verbindung I-Naht am Überlappstoß zeigt **Bild 6.22**. Bei konventioneller Prozeßführung wurden an diesen Werkstücken im Bereich der Bauteilkrümmung die typischen, auf die erhöhte Streckenenergie zurückzuführenden Fehlererscheinungen festgestellt.

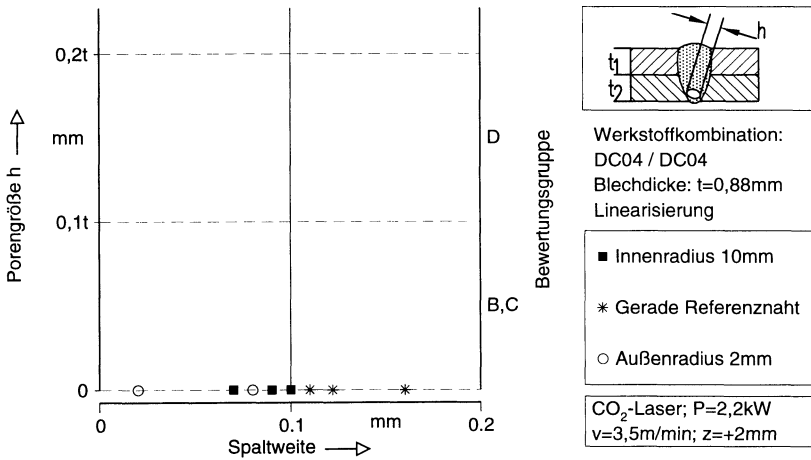


**Bild 6.22** Konturfolge Innen  $R=10\text{mm}$  - Außen  $R=2\text{mm}$ ; I-Naht am Überlappstoß; Prozeßführungsstrategie *Linearisierung*

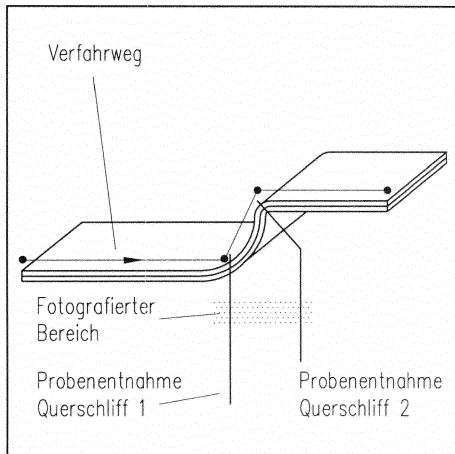
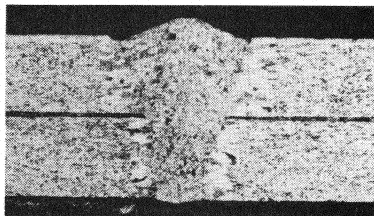
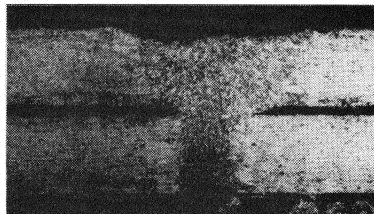
Repräsentativ ausgewählte Stichproben aus unterschiedlichen Bereichen der Kontur lassen, wie in **Bild 6.23** dargestellt, keine Beeinträchtigung der Fertigungsqualität des Bearbeitungsergebnisses erkennen. **Bild 6.23** zeigt, daß bei Anwendung der Prozeßführungsstrategie *Linearisierung* weder im Bereich der Außen- noch der Innenkontur Porenbildung in der Schweißnaht festgestellt wurde. Dies gilt analog auch für die Schweißnahtdicke, die im Bereich der Konturfolge, unabhängig ob Außen- oder Innenkontur, stets innerhalb der Bewertungsgruppe **-B-** ermittelt wurde. Typische Bei-



spiele für die Schweißverbindung I-Naht am Überlapstoß an der genannten Konturfolge und die hierbei erzielbaren Fertigungsqualitäten zeigt **Bild 6.24**.



**Bild 6.23** Porenbildung über der Fügespaltweite an unterschiedlichen Probenentnahmestellen an einer Konturfolge in der I-Naht am Überlapstoß

**Bearbeitungsbeispiel:****Strahleintritt:****Querschliff 1 (QS 1):****Querschliff 2 (QS 2):**Werkstoffpaarung (je t=0,88mm):**DC04 / DC04**Fügestellenvorbereitung:**Reinigung mit Tuch**Prozeßführungsstrategie:**Linearisierung**

Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
 Leistung: 2,2kW  
 Vorschub: 3,0m/min  
 Fokusbildung: +2mm  
 Arbeitsabstand: 11,5mm  
 Arbeitsgas: Ar; 4,2l/min

**Bewertung nach Tabelle 4.1:**

	QS 1	QS 2
<b>Nahtunterwölbung:</b>	- B -	- B -
<b>Nahtdicke:</b>	- B -	- B -
<b>Poren:</b>	- B -	- B -
<b>(Fügespaltweite in mm: 0,12</b>	<b>0,12</b>	<b>0,04)</b>

**Bemerkungen:**

- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet

**Bild 6.24** Konturfolge Innen R=10mm - Außen R=2mm; I-Naht am Überlappstoß; Bearbeitungsergebnisse für die Prozeßführungsstrategie Linearisierung

### 6.3 Bearbeitungsergebnisse zum Schweißen von Realbauteilen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung

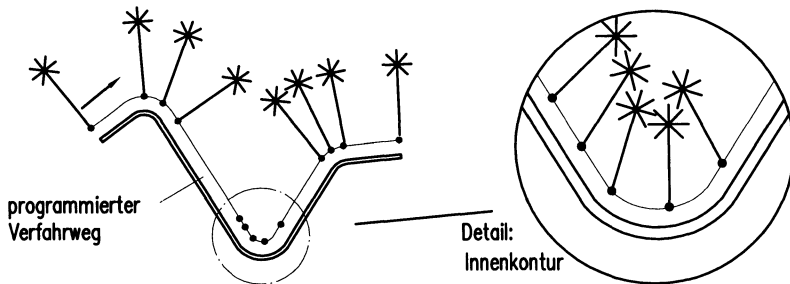
Die Verifikation der an Konturelementen gewonnenen, grundlegenden Erkenntnisse erfolgt durch Untersuchungen an komplexen Karosserieteilen. Bei den Untersuchungen an Formelementen wurden grundsätzliche Auswirkungen einzelner Einflußgrößen und unterschiedlicher Prozeßführungsstrategien auf das Bearbeitungsergebnis ermittelt. Die Bearbeitung von Realbauteilen hat im Gegensatz dazu das Ziel, die Übertragung der dort gewonnenen, grundlegenden Tendenzen zur Abhängigkeit der Fertigungsqualität von der Prozeßführungsstrategie auf die vorgegebenen Werkstücke und deren ganz spezifische, konstante Randbedingungen zu leisten.

#### 6.3.1 Innenblech A-Säule: I-Naht am Stumpfstoß

Die zu fügenden Werkstücke wurden in der Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen bearbeitet. Der Schneidvorgang wurde als Laserstrahlbrennschneiden, die Schweißverbindung als I-Naht am Stumpfstoß ausgeführt. Die Bearbeitungsbahn entlang der Bauteilkontur für das Laserstrahlschneiden wurde über eine Splinesplinterpolation mit den in **Bild 6.25** dargestellten Stützpunkten programmiert.

##### Werkstück: Innenblech A-Säule

- Stützpunkte des Schneidprogramms  
Abstand zur Werkstückkontur 1mm



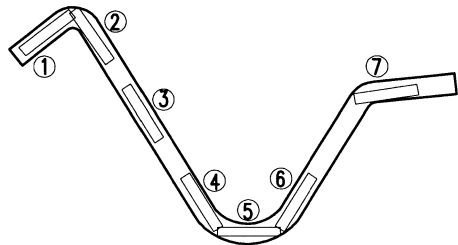
Vorschub (m/min):	1,5	2,2kW – CO <sub>2</sub> -Laser	
Fokusslage (mm)	0	mittl. Leistung (kW):	0,38
Arbeitsabstand (mm):	0,5 .. 1,3	Puls-Pause-Verh. (ms):	0,5 / 2
		Schneidgasdruck (bar):	O <sub>2</sub> ; 2,25

**Bild 6.25** Bauteilkontur und Stützpunkte für das Laserstrahlschneiden am Werkstück Innenblech A-Säule

Während der Bearbeitung wurden konturabhängige Unstetigkeiten in der TCP-Geschwindigkeit beobachtet. Diese führen zu Unregelmäßigkeiten in der Schnittflächenqualität. Einflüsse auf die Schnittflächenqualität haben zum einen die beobachteten Haltezeiten im Bewegungsablauf der Werkzeugmaschine. Diese sind auf den geringen Abstand der Stützpunkte auf der Werkstückkontur zurückzuführen [120], der zur Beschreibung der kleinen Krümmungsradien erforderlich ist. An diesen Stellen entstehen durch die Einwirkung der Laserstrahlung unregelmäßige Schnittfugenerweiterungen (nach DVS 3206 T1 [168]), die durch das Schneidgas Sauerstoff noch verstärkt werden. Zum anderen führen im Verlauf der Bearbeitung beobachtete Auslenkungen des Bearbeitungskopfes seitlich zur Vorschubrichtung, ausgelöst durch Schwingungen des Bearbeitungskopfes infolge einer Überlastung der Bewegungsachsen, zur Ausbildung von stark ungleichmäßiger Rillentiefe [nach 168] in den Schnittflächen. Diese Einbußen in der Schnittflächenqualität sind über Messung der gemittelten Rauhtiefe  $R_z$  [169, 170] an der jeweiligen Schnittfläche der zu fügenden Kanten nachgewiesen (**Bild 6.26**). Die Bestimmung der gemittelten Rauhtiefe an den Schnittflächen erfolgte mit einem Oberflächenmeßgerät (Typ: Rodenstock RM600) mittels Oberflächenabtastung durch dynamische Fokussierung.

**Werkstück: Innenblech A-Säule**

Rauheitsmessung mit einem optischen Oberflächenmeßgerät "Rodenstock RM 600"

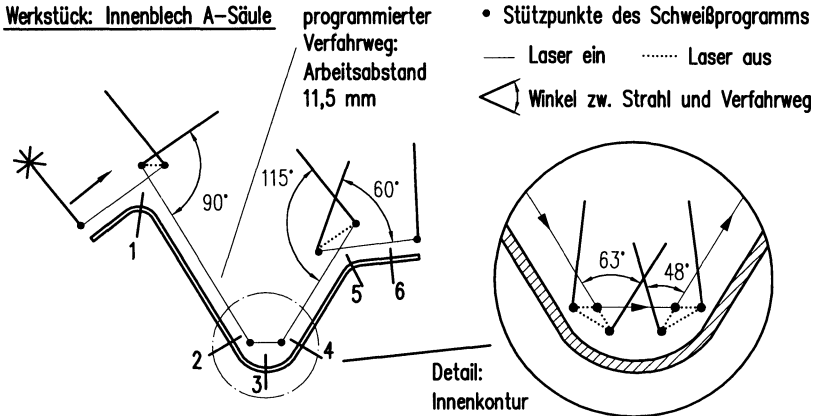


Meßbereich	Gemittelte Rauhtiefe $R_z$ in $\mu\text{m}$ (DIN 4768):						
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
Flanke 1	78,1	109,2	12,5	78,8	40,5	55,2	33,1
Flanke 2	84,6	69,7	11,9	20,8	38,5	30,7	25,6

**Bild 6.26** Gemittelte Rauhtiefe  $R_z$  an den Schnittflächen der Kontur Innenblech A-Säule nach dem Laserstrahlschneiden

Im Bereich der ersten Außenkontur mit einem Krümmungsradius von  $R=5\text{mm}$  und einem Öffnungswinkel von  $83^\circ$  ergibt die Betrachtung der gegenüberliegenden Maximalwerte zwischen Rauigkeitsspitzen und -tälern Abstände zwischen den zu fügenden Werkstücken von bis zu  $0,18\text{mm}$ . Bei Annahme einer unregelmäßigen Verteilung dieser Rauigkeitsspitzen entlang der Kontur im betreffenden Abschnitt muß von

einer Ausbildung punktueller Fügespalte an den Stellen ausgegangen werden, wo eben diese Maximalwerte sich gegenüberliegend addieren. Derartige Fügespaltweiten lassen nach [85, 100, 101, 103] eine Beeinträchtigung der Fertigungsqualität erwarten.



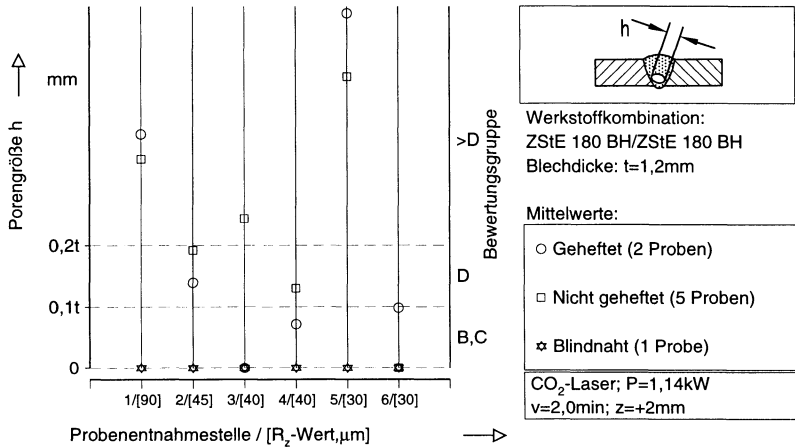
### 1.6 Probenentnahmestellen zur Bestimmung der Fertigungsqualität der Schweißverbindungen

**Bild 6.27** Strategie Linearisierung entlang der Kontur Innenblech A-Säule; Probenentnahmestellen zur Untersuchung der Fertigungsqualität

Die Schweißbearbeitung an der Verbindung Innenblech A-Säule erfolgte mit der Strategie *Linearisierung*, wie in **Bild 6.27** dargestellt. Die aus den oben geschilderten Imperfektionen im Schneidergebnis resultierende Beeinträchtigung der Fertigungsqualität der Schweißnaht wurde an den betreffenden Stelle durch die Auswertung von Querschliffen in Form einer erhöhten Porenbildung und Nahtunterwölbung nachgewiesen. **Bild 6.28** zeigt hierfür Ergebnisse zur Porenbildung über der gemittelten Rauhtiefe entlang der bearbeiteten Kontur. Der Vergleich der Bearbeitungsergebnisse aus der Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen, die mehrheitlich in die Bewertungsgruppe **D** oder schlechter fallen, mit der Blindnaht der Bewertungsgruppe **B** aus demselben Konturabschnitt macht deutlich, daß die Ausbildung der festgestellten Poren im wesentlichen auf die Fügestellenvorbereitung zurückzuführen ist und nicht ursächlich aus der Prozeßführungsstrategie beim Laserstrahlschweißen herrührt.

Die Schnittflächenqualität aus der Fügestellenvorbereitung wird im untersuchten Fall nicht nur durch die kinematischen Grenzen des Handhabungsgerätes und dessen zu beobachtenden dynamischen Reaktionen beeinträchtigt. Die Qualitätsschwankungen

im Schneidergebnis sind auch darauf zurückzuführen, daß an der Versuchseinrichtung der Schneidvorgang ohne Anwendung einer Abstandsregelung durchgeführt werden mußte. Optimale Bearbeitungsbedingungen konnten deshalb für den Abstand Schneidgasdüse - Werkstückoberfläche zwar an den programmierten Stützpunkten sichergestellt werden. Zwischen den Stützpunkten treten aber infolge der Splineinterpolation entlang der Kontur die in **Bild 6.25** genannten Abweichungen im Abstand Werkstück-Schneidgasdüse auf. Diese können Einbußen in der Schnittflächenqualität sowie gegebenenfalls Bartbildung verursachen. Die Anwendung einer Abstandsregelung läßt hier durch einen gleichbleibenden Abstand Werkstück - Schneidgasdüse eine entscheidende Verbesserung der Schnittflächenqualität und in deren Folge auch der Fertigungsqualität beim Laserstrahlschweißen erwarten.

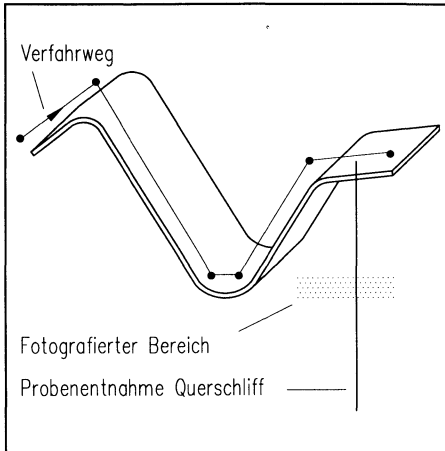


**Bild 6.28** Innenblech A-Säule; I-Naht am Stumpfstoß; Porenbildung in der Schweißverbindung über die gemessene Rauhtiefe aus der Fügstellenvorbereitung

Aus der Analyse der Daten aus **Bild 6.28** wird darüberhinaus ersichtlich, daß für die beschriebene Bearbeitung bei ausreichender Lagefixierung der Werkstücke ein Hefen der Bauteile zur Lagefixierung nicht erforderlich ist. Dies zeigt der Vergleich der Fertigungsqualität von Bauteilen, die jeweils über eine geeignete Einspannvorrichtung in ihrer Lage fixiert verschweißt wurden, mit zusätzlich gehefteten Werkstücken. Beide Versuchsreihen wurden ohne eine mittels Spanntechnik realisierte Wärmeabfuhr aus dem Bauteil durchgeführt.

Die erhöhte Porenbildung an der Probenentnahmestelle 5 aus **Bild 6.28** beziehungsweise **Bild 6.27** wird auf das Zusammenwirken der schlechten Schnittflächenqualität mit dem Laserstrahlschweißen unter einem Anstellwinkel an dieser Stelle zurückgeführt. Die Blindnaht in diesem Konturabschnitt zeigt keine Poren. Porenbildung wurde unter vergleichbaren Bearbeitungsbedingungen auch nicht für die Verbindungen I-Naht am Überlappstoß festgestellt (Siehe Abschnitt 6.3.2.1).

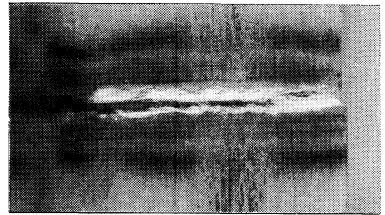
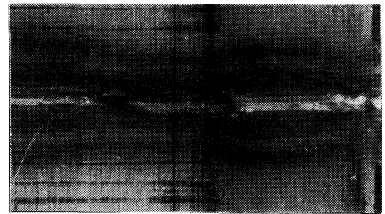
Typische Bearbeitungsbeispiele an der untersuchten Konturfolge am Werkstück Innenblech A-Säule zeigen die folgenden **Bilder 6.29, 6.30** und **6.31** für die Konturabschnitte Gerade, Innenkontur und Außenkontur.

**Bearbeitungsbeispiel:**

Werkstoffpaarung (je t=1,2mm):  
**ZStE 180 BH / ZStE 180 BH**

Fügestellenvorbereitung:  
**Laserstrahlbrennschneiden**

Prozeßführungsstrategie:  
**entfällt, gerade Naht**

**Strahleintritt:****Strahlaustritt:****Querschliff:**

Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
 Leistung: 1,14kW  
 Vorschub: 2,0m/min  
 Fokusbildung: +2mm  
 Arbeitsabstand: 11,5mm  
 Arbeitsgas: Ar; 5,0l/min

**Bewertung nach DIN 8563 T11:**

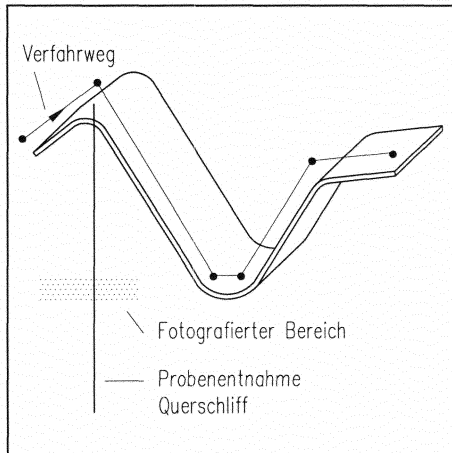
**Nahtunterwölbung:** - B -  
**Nahtüberhöhung:** - B -  
**Poren:** - B -  
**(Kantenversatz:** - B -)

**Bemerkungen:**

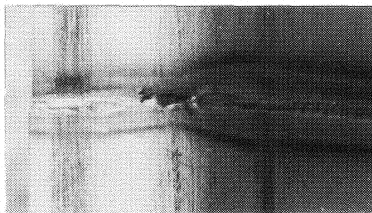
- ▶ Anwendung der Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in einer Aufspannung
- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet



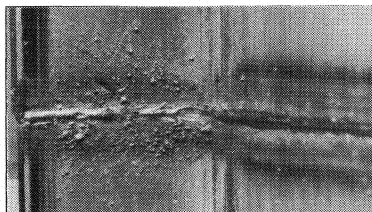
**Bearbeitungsbeispiel:**



**Strahleintritt:**



**Strahlaustritt:**

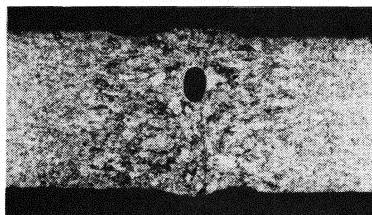


Werkstoffpaarung (je t=1,2mm):  
**ZStE 180 BH / ZStE 180 BH**

Fügestellenvorbereitung:  
**Laserstrahlbrennschneiden**

Prozeßführungsstrategie:  
**Linearisierung**

**Querschliff:**



Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
 Leistung: 1,14kW  
 Vorschub: 2,0m/min  
 Fokusbildung: +2mm  
 Arbeitsabstand: 11,5mm  
 Arbeitsgas: Ar; 5,0l/min

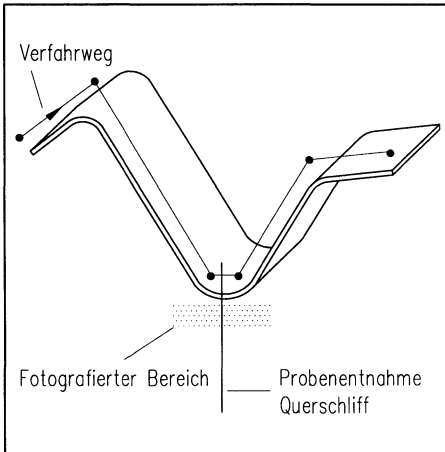
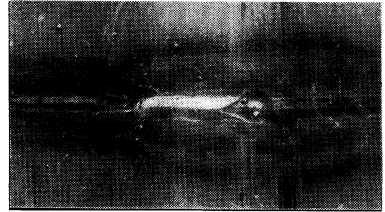
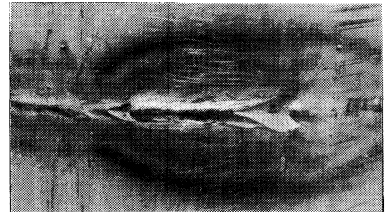
**Bewertung nach DIN 8563 T11:**

**Nahtunterwölbung:** - C -  
**Nahtüberhöhung:** - B -  
**Poren:** - D -  
**(Kantenversatz:** - B -)

**Bemerkungen:**

- ▶ Anwendung der Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in einer Aufspannung (kein Heften)
- ▶ Porenbildung aufgrund der maschinenbedingten Unstetigkeiten im Bearbeitungsergebnis aus dem Schneidprozeß
- ▶ Schlackerrückstände an der Strahlaustrittsseite aus dem Schneidprozeß

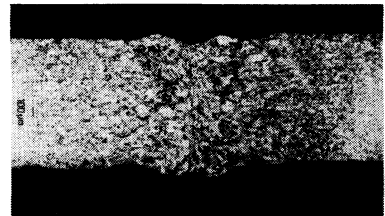
**Bild 6.30** Innenblech A-Säule; Außenkontur Radius 5mm; I-Naht am Stumpfstoß; Prozeßführungsstrategie Linearisierung

**Bearbeitungsbeispiel:****Strahleintritt:****Strahlaustritt:**

Werkstoffpaarung (je t=1.2mm):  
**ZStE 180 BH / ZStE 180 BH**

Fügestellenvorbereitung:  
**Laserstrahlbrennschneiden**

Prozeßführungsstrategie:  
**Linearisierung**

**Querschliff:**

Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
 Leistung: 1,14kW  
 Vorschub: 2,0m/min  
 Fokusslage: +2mm  
 Arbeitsabstand: 11,5mm  
 Arbeitsgas: Ar; 5l/min

**Bewertung nach DIN 8563 T11:**

**Nahtunterwölbung:** - B -  
**Nahtüberhöhung:** - B -  
**Poren:** - B -  
**(Kantenversatz:** - B -)

**Bemerkungen:**

- ▶ Anwendung der Verfahrensfolge Laserstrahl-schneiden und -schweißen in einer Aufspannung
- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet

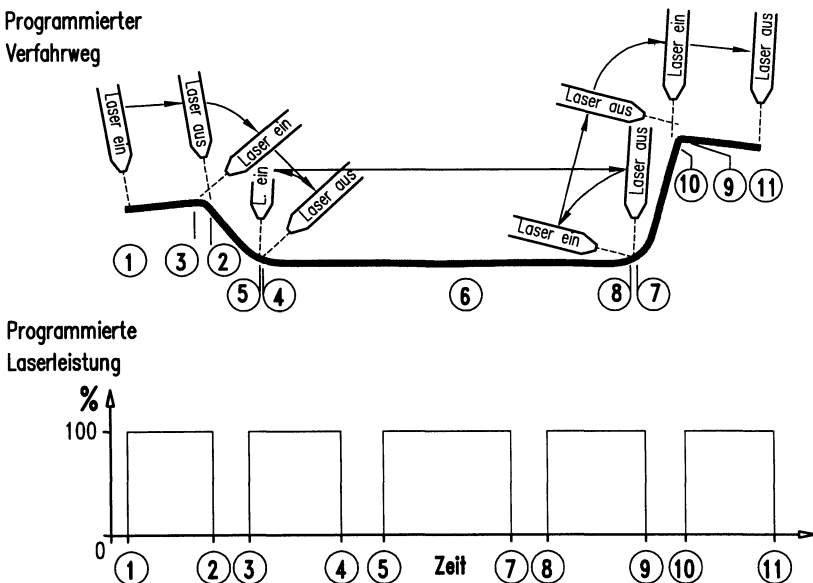
**Bild 6.31** Innenblech A-Säule; Innenkontur Radius 8mm; I-Naht am Stumpfstoß; Prozeßführungsstrategie Linearisierung

### 6.3.2 Kopfschiene - Innenblech A-Säule - Dachrahmen

Die Verbindungen der Werkstücke Kopfschiene - Innenblech A-Säule - Dachrahmen sind, wie in **Bild 5.5** dargestellt, jeweils als abgesetzter Überlappstoß ausgeführt. Die Untersuchungen wurden an diesen Verbindungen jeweils sowohl für die Nahtformen I-Naht als auch Kehlnaht am Überlappstoß durchgeführt. Die Schweißverbindungen des Typs I-Naht am Überlappstoß wurden ohne den Einsatz von Zusatzwerkstoff gefügt. Im weiteren Verlauf des Textes sowie in den graphischen Darstellungen sei das Werkstück Innenblech A-Säule nur noch als A-Säule bezeichnet.

#### 6.3.2.1 I-Naht am Überlappstoß

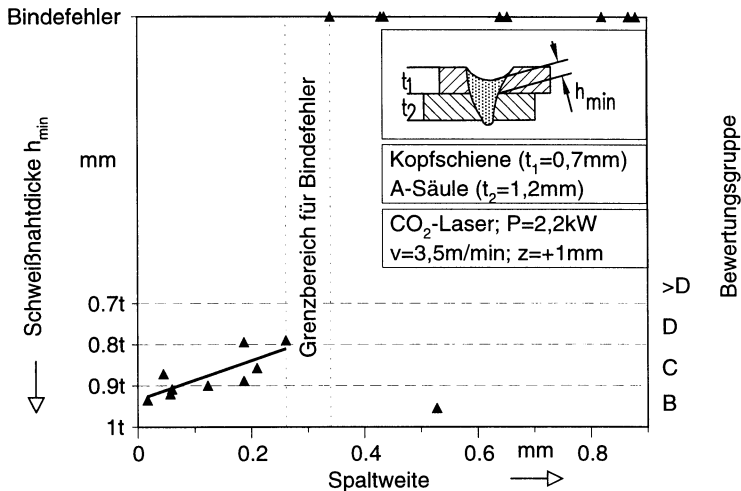
Die Bearbeitung der Werkstücke erfolgte nach der Prozeßführungsstrategie *Linearisierung*. Die programmierten Verfahrenwege und Laserleistungen zeigt **Bild 6.32**.



**Bild 6.32** Prozeßführungsstrategie *Linearisierung* an der Verbindung Kopfschiene - A-Säule - Dachrahmen

Die Auswertung der Bearbeitungsergebnisse an den Verbindungen Kopfschiene - A-Säule und A-Säule - Dachrahmen lieferte als Ergebnis jeweils Porenfreiheit der Schweißnaht unabhängig von der Bauteilkontur an der Probenentnahmestelle.

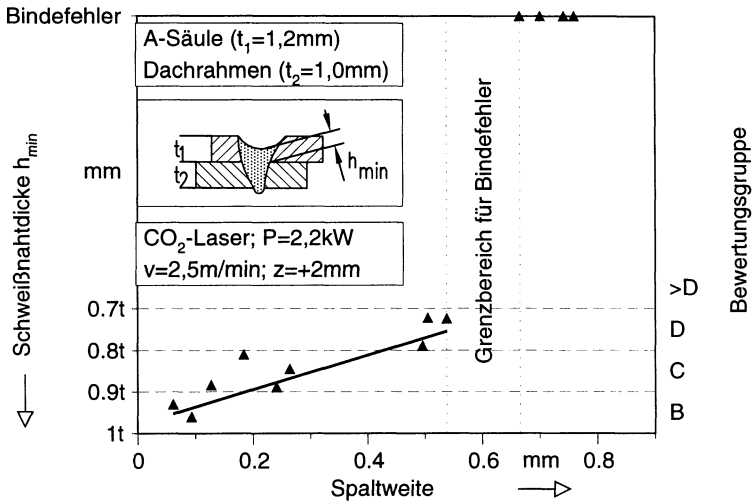
Neben der Porenbildung wurde in Querschliffen die Schweißnahtdicke ausgewertet. An der Verbindung I-Naht am Überlappstoß wurde hierbei ein Einfluß der Blechdicke des auf der Strahleintrittsseite positionierten Werkstückes auf die erzielbare Schweißnahtdicke festgestellt.



**Bild 6.33** I-Naht am Überlappstoß; Schweißnahtdicke an der Verbindung Kopfschiene - A-Säule (Strahleintritt über Kopfschiene)

**Bild 6.33** zeigt die Auswertung der Schweißnahtdicke für ein strahlseitig positioniertes Blech der Dicke  $t=0,7$ mm. Unterhalb einer Fügespaltweite von etwa  $b_s=0,27$ mm kann ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen der Fügespaltweite und der erzielbaren Schweißnahtdicke innerhalb der Bewertungsgruppen **B** und **C** festgestellt werden. Oberhalb einer Fügespaltweite von etwa  $b_s=0,34$ mm treten abgesehen von einer Ausnahme ausschließlich Bindefehler (das heißt  $h_{\min}=0$ mm) auf.

Die Auswertung der Bearbeitungsergebnisse für einen Strahleintritt über eine Blechdicke von  $t=1,2$ mm zeigt, wie in **Bild 6.34** dargestellt, ebenso einen linearen Zusammenhang zwischen Fügespaltweite und Schweißnahtdicke. Jedoch bei einer gegenüber **Bild 6.33** signifikanten Verschiebung der Grenzwerte und Qualitätsstufen.



**Bild 6.34** I-Naht am Überlappstoß; Schweißnahtdicke über der Fügespaltweite an der Verbindung A-Säule - Dachrahmen (Strahleintritt über A-Säule)

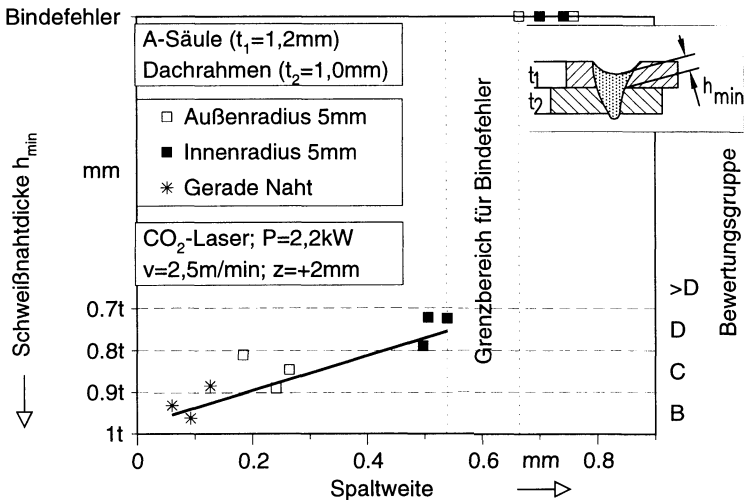
**Tabelle 6.1** faßt die unterschiedlichen, erzielbaren Qualitätsklassen der Schweißnahtdicke und deren Grenzwerte bezogen auf die Spaltweite zwischen den Fügepartnern bei den untersuchten Blechdicken auf der Strahleintrittsseite in einer Gegenüberstellung zusammen.

Blechdicke Strahleintritt	Qualitätsklassen der Schweißnahtdicke und zugehörige Fügespaltweiten			
	B	C	D	Bindefehler
0,7mm	< 0,08mm	< 0,27mm	entfällt	> 0,34mm
1,2mm	< 0,2mm	< 0,42mm	< 0,54mm	> 0,65mm

**Tabelle 6.1** Gegenüberstellung der Fügespaltweiten und der erzielbaren Qualitätsbewertungsgruppen bei Strahleintritt über unterschiedliche Blechdicken

Die ausgewerteten Bearbeitungsergebnisse für die Verbindung A-Säule - Dachrahmen sind in **Bild 6.35** unter Berücksichtigung der Bauteilkontur an der Probenentnahmestelle dargestellt. Hier zeigt sich, daß ein Einfluß der Bauteilkrümmung an der

Probenentnahmestelle auf die Fertigungsqualität nicht festgestellt werden kann. Die Fertigungsqualität der Schweißverbindung hängt ausschließlich von der Fügespaltweite und nicht von der Kontur des Bauteils an der Probenentnahmestelle ab. Dies wurde analog auch für die Verbindung Kopfschiene - A-Säule festgestellt. Ein Zusammenhang zwischen Bauteilkrümmung und Fertigungsqualität kann nur dahingehend nachgewiesen werden, daß der sich zwischen den Werkstücken einstellende Fügespalt durch die Abstimmung der Bauteilkonturen zueinander sowie deren Fertigungstoleranzen als Randbedingung für die Bearbeitung vorgegeben ist.

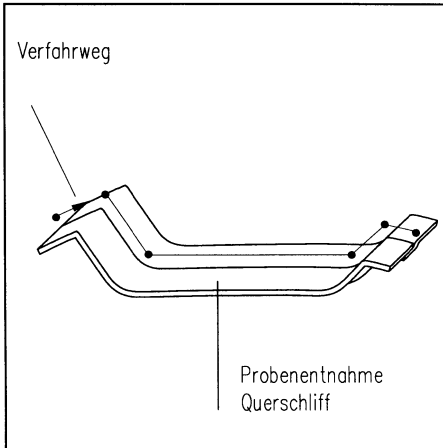
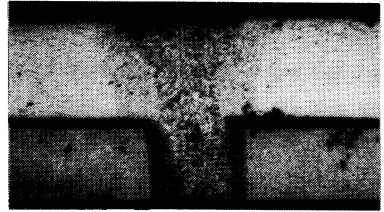
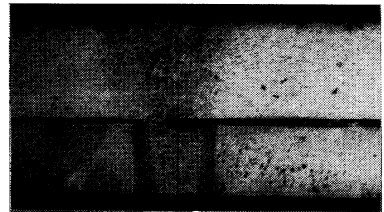
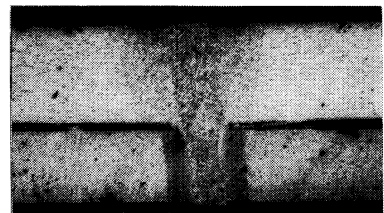


**Bild 6.35** I-Naht am Überlapstoß; Schweißnahtdicke für unterschiedliche Werkstückkonturen an der Probenentnahmestelle

Aus den geschilderten Ergebnissen an den Werkstücken Kopfschiene - A-Säule und A-Säule - Dachrahmen kann allgemein gefolgert werden, daß die eingesetzte Prozeßführungsstrategie *Linearisierung* geeignet ist, um diese und vergleichbare Blechformteile prozeßsicher zu fügen. Die Krümmungsradien der Werkstücke treten hierbei nicht als Einflußgröße für die erzielbare Fertigungsqualität in Erscheinung, wie **Bild 6.35** zeigt. Als wesentliche Einflußgröße auf die Fertigungsqualität dieser Verbindung wird die Fügespaltweite ermittelt. Hierbei kann ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen der erzielbaren Schweißnahtdicke und der Fügespaltweite festgestellt werden. Die Toleranzbereiche, innerhalb derer bestimmte Bewertungsgruppen prozeßsicher eingehalten werden können, sind insbesondere von der Blechdicke der Fügepartner auf der Strahleintrittsseite abhängig. Dies zeigt der Vergleich

der Grenzwerte für die einzelnen Bewertungsgruppen für Blechdicken auf der Strahleintrittsseite zwischen  $t=0,7\text{mm}$  beziehungsweise  $t=1,2\text{mm}$  in **Tabelle 6.1**. Im Falle der Blechdicke  $t=1,2\text{mm}$  verschieben sich die Grenzwerte für die einzelnen Bewertungsgruppen auf etwa die doppelten Werte wie für die Blechdicke  $t=0,7\text{mm}$ . Im Interesse einer hohen Prozeßsicherheit und einer ausreichenden Nahtdicke ist für die konstruktive Auslegung einer I-Naht am Überlappstoß demnach generell eine hohe Blechdicke auf der Strahleintrittsseite vorzusehen sowie der Fügespalt möglichst gering zu halten.

Die **Bilder 6.36** bis einschließlich **6.40** zeigen Bearbeitungsbeispiele für die beiden untersuchten Blechdicken auf der Strahleintrittsseite bei unterschiedlichen Fügespaltweiten. Aus den jeweils dargestellten drei Querschliffen ist einer repräsentativ ausgewählt und bewertet. Diese Ergebnisse verdeutlichen nochmals den bereits in der Auswertung der **Tabelle 6.1** gezogenen, allgemeinen Schluß, daß für gleiche Fügespaltweiten bei Einsatz eines dickeren Bleches auf der Strahleintrittsseite ein Bearbeitungsergebnis mit höherer Fertigungsqualität erzielt werden kann (Vergleiche hierzu **Bild 6.37** mit **Bild 6.40** sowie **Bild 6.38** mit **Bild 6.39** ).

**Bearbeitungsbeispiel:****Querschliff 1:****Querschliff 2:****Querschliff 3:****Werkstoffpaarung:**

**ZStE 180 BH (t=1,2mm)  
/ ZStE 180 BH (t=1,0mm)**

**Fügestellenvorbereitung:**

**Reinigung mit Tuch**

**Prozeßführungsstrategie:**

**entfällt, gerade Naht**

Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
Leistung: 2,2kW  
Vorschub: 2,5m/min  
Fokusbildung: +2mm  
Arbeitsabstand: 11,5mm  
Arbeitsgas: Ar; 5,0l/min

**Bewertung Querschliff 3  
nach Tabelle 4.1:**

**Nahtunterwölbung:** - B -  
**Nahtdicke:** - B -  
**Poren:** - B -  
**(Fügespaltweite: 0,09mm)**

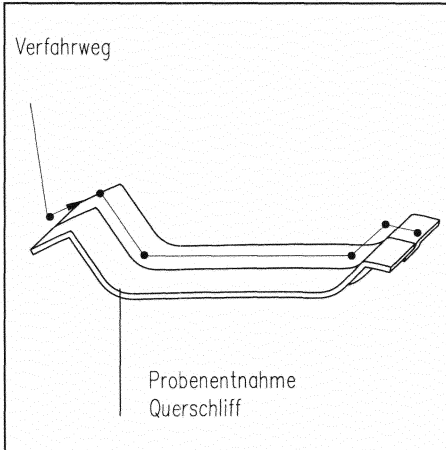
**Bemerkungen:**

- ▶ Drei Schweißnähte im Querschliff bei gleicher Probenentnahmestelle
- ▶ Strahleintritt über A-Säule
- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet
- ▶ Die Fügepartner sind unbeschichtet

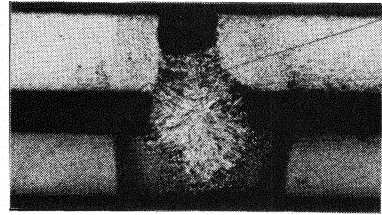
**Bild 6.36** Verbindung A-Säule - Dachrahmen; I-Naht am Überlappstoß; Gerade Referenznaht



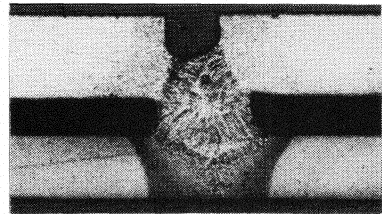
**Bearbeitungsbeispiel:**



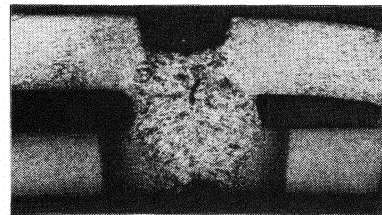
**Querschliff 1:**



**Querschliff 2:**



**Querschliff 3:**



Werkstoffpaarung:  
**ZStE 180 BH (t=1,2mm)**  
**/ ZStE 180 BH (t=1,0mm)**

Fügestellenvorbereitung:  
**Reinigung mit Tuch**

Prozeßführungsstrategie:  
**Linearisierung**

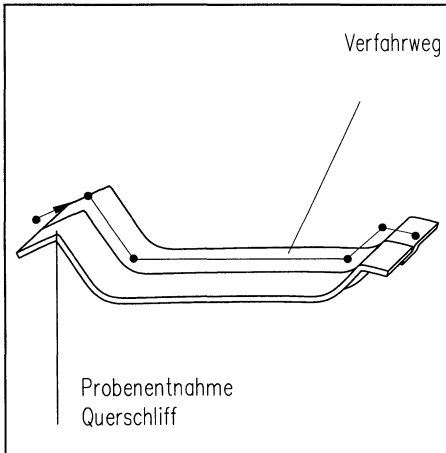
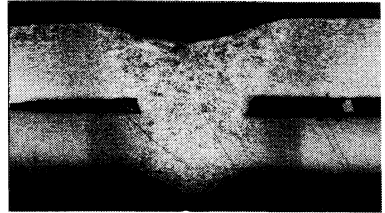
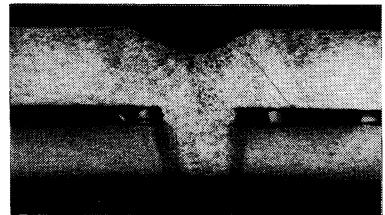
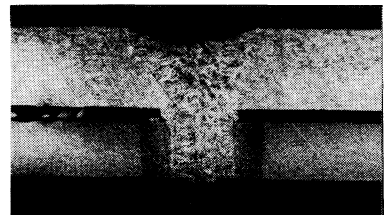
Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
 Leistung: 2,2kW  
 Vorschub: 2,0m/min  
 Fokusbildung: +2mm  
 Arbeitsabstand: 11,5mm  
 Arbeitsgas: Ar; 5,0l/min

**Bewertung Querschliff 3**  
**nach Tabelle 4.1:**  
**Nahtunterwölbung:** - >D -  
**Nahtdicke:** - D -  
**Poren:** - D -  
**(Fügespaltweite: 0,5mm)**

**Bemerkungen:**

- ▶ Drei Schweißnähte im Querschliffe bei gleicher Probenentnahmestelle
- ▶ Strahleintritt über A-Säule
- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet
- ▶ Die Fügepartner sind unbeschichtet

**Bild 6.37** Verbindung A-Säule - Dachrahmen; I-Naht am Überlappstoß; Innenkontur R=5mm

**Bearbeitungsbeispiel:****Querschliff 1:****Querschliff 2:****Querschliff 3:****Werkstoffpaarung:**

ZStE 180 BH (t=1,2mm)  
/ ZStE 180 BH (t=1,0mm)

**Fügestellenvorbereitung:**

Reinigung mit Tuch

**Prozeßführungsstrategie:**

Linearisierung

Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
Leistung: 2,2kW  
Vorschub: 2,0m/min  
Fokusbildung: +2mm  
Arbeitsabstand: 11,5mm  
Arbeitsgas: Ar; 5,0l/min

**Bewertung Querschliff 3**

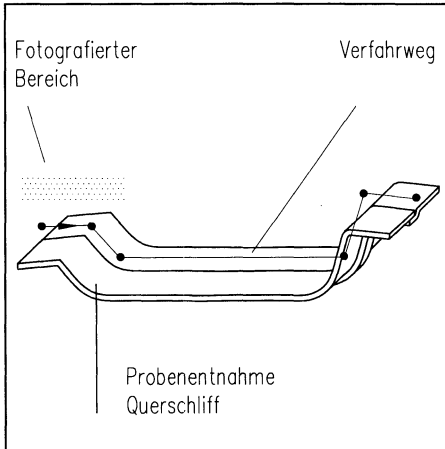
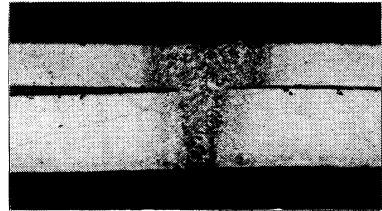
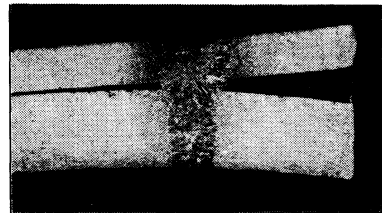
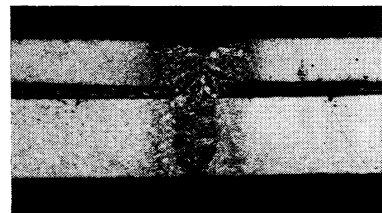
nach Tabelle 4.1:

Nahtunterwölbung: - C -  
Nahtdicke: - B -  
Poren: - B -  
(Fügespaltweite: 0,18mm)

**Bemerkungen:**

- ▶ Drei Schweißnähte im Querschliff bei gleicher Probenentnahmestelle
- ▶ Strahleintritt über A-Säule
- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet
- ▶ Die Fügepartner sind unbeschichtet

**Bild 6.38** Verbindung A-Säule - Dachrahmen; I-Naht am Überlappstoß; Außenkontur R=5mm

**Bearbeitungsbeispiel:****Querschliff 1:****Querschliff 2:****Querschliff 3:**Werkstoffpaarung:

**ZStE 180 BH (t=0,7mm)  
/ ZStE 180 BH (t=1,2mm)**

Fügestellenvorbereitung:

**Reinigung mit Tuch**

Prozeßführungsstrategie:

**Linearisierung**

Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
Leistung: 2,2kW  
Vorschub: 3,5m/min  
Fokusbildung: +2mm  
Arbeitsabstand: 11,5mm  
Arbeitsgas: Ar; 5,0l/min

**Bewertung Querschliff 3**

**nach Tabelle 4.1:**

**Nahtunterwölbung:** - C -

**Nahtdicke:** - C -

**Poren:** - B -

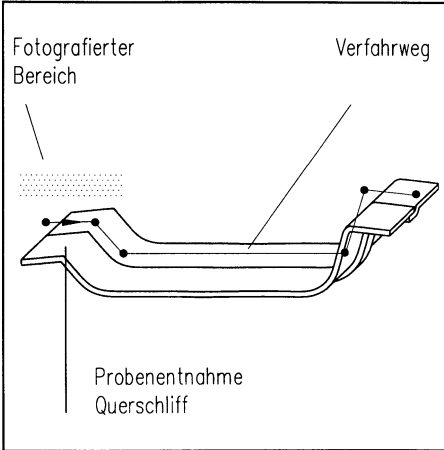
**(Fügespaltweite: 0,19mm)**

**Bemerkungen:**

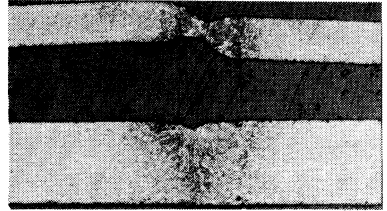
- ▶ Drei Schweißnähte im Querschliff bei gleicher Probenentnahmestelle
- ▶ Strahleintritt über Kopfschiene
- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet
- ▶ Die Fügepartner sind unbeschichtet

**Bild 6.39** Verbindung Kopfschiene - A-Säule; I-Naht am Überlappstoß; Innenkontur R=7,5mm

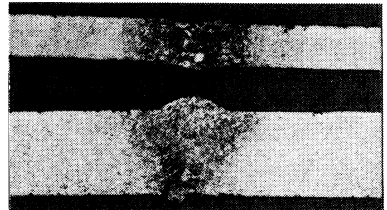
**Bearbeitungsbeispiel:**



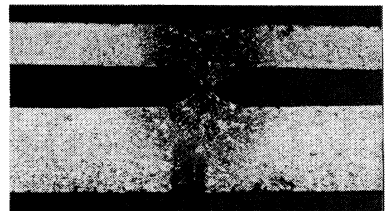
**Querschliff 1:**



**Querschliff 2:**



**Querschliff 3:**



Werkstoffpaarung:  
**ZStE 180 BH (t=0,7mm)**  
 / **ZStE 180 BH (t=1,2mm)**  
Fügestellenvorbereitung:  
**Reinigung mit Tuch**  
Prozeßführungsstrategie:  
**Linearisierung**

Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
 Leistung: 2,2kW  
 Vorschub: 3,5m/min  
 Fokusbildung: +2mm  
 Arbeitsabstand: 11,5mm  
 Arbeitsgas: Ar; 5,0l/min

**Bewertung Querschliff 3**  
 nach Tabelle 4.1:  
**Nahtunterwölbung:** - C -  
**Nahtdicke:** - >D -  
**Poren:** - B -  
**(Fügespaltweite:** **0,53mm)**

**Bemerkungen:**

- ▶ Drei Schweißnähte im Querschliff bei gleicher Probenentnahmestelle
- ▶ Strahleintritt über Kopfschiene
- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet
- ▶ Die Fügepartner sind unbeschichtet

**Bild 6.40** Verbindung Kopfschiene - A-Säule; I-Naht am Überlappstoß; Außenkontur R=9mm

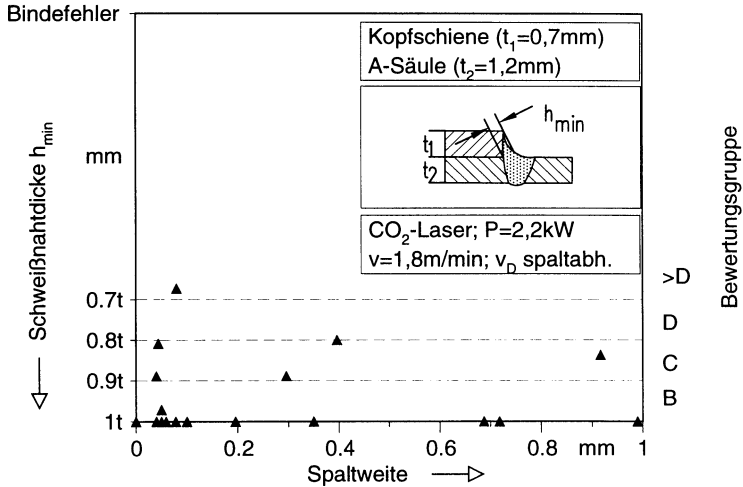
### 6.3.2.2 Kehlnaht am Überlappstoß

Die Untersuchungen zur Verbindung der Werkstücke Kopfschiene - A-Säule - Dachrahmen in der Kehlnaht am Überlappstoß wurden mit sowie ohne Einsatz von Zusatzwerkstoff durchgeführt. Für die Bearbeitung ohne Zusatzwerkstoff wurde die Prozeßführungsstrategie *Linearisierung* entsprechend **Bild 6.32** eingesetzt. Die Prozeßführung für das Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff wurde durch Laserleistungsreduzierung an den komplexen Konturabschnitten und eine spaltweitenabhängig programmierte Zugabe von Zusatzwerkstoff realisiert.

An keinem der Bearbeitungsbeispiele unabhängig davon, ob mit oder ohne Zusatzwerkstoff gearbeitet gefügt, wurden Poren in der Schweißnaht festgestellt. Als wesentliches Qualitätsmerkmal der Verbindung wird im folgenden die Schweißnahtdicke diskutiert.

Für die Ausführung der Schweißverbindung Kopfschiene ( $t=0,7\text{mm}$ ) - A-Säule ( $t=1,2\text{mm}$ ) in der Kehlnaht am Überlappstoß stand eine Nahtfolgesensorik zur Sicherstellung der korrekten lateralen Strahlposition zur Fügestelle nicht zur Verfügung. Ohne Einsatz von Zusatzwerkstoff konnten an dieser Verbindung nur Ergebnisse erzielt werden, die bereits bei Spaltweiten unter  $0,1\text{mm}$  Bindefehler aufwiesen. Dies wird auf die ungenügende Genauigkeit der lateralen Positionierung des Laserstrahls zur Fügestelle und die geringe Blechdicke des oben liegenden, dünneren Bleches zurückgeführt. Die Ungenauigkeit in der Positionierung, die einerseits durch die variierenden Bauteilabmessungen andererseits durch die eingesetzte flexible, nicht formgebundene Spanntechnik verursacht wurde, könnte durch den Einsatz einer Nahtfolgesensorik kompensiert und damit die erzielbare Fertigungsqualität dieser Verbindung verbessert werden [88, 171]

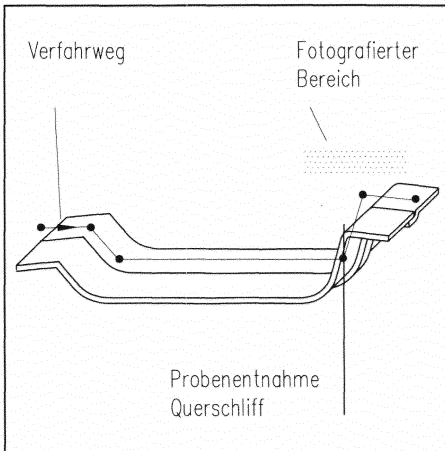
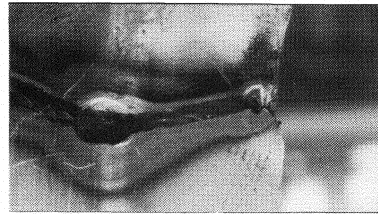
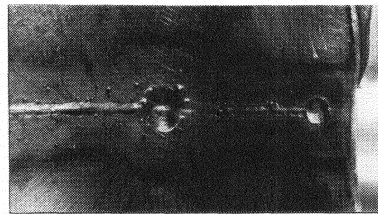
Der Schwerpunkt der Untersuchungen wurde aus den oben genannten Gründen bei der Verbindung Kopfschiene - A-Säule auf das Laserstrahlschweißen mit Zusatzwerkstoff gelegt. Die aufgrund der Fertigungstoleranzen der Bauteile über die Schweißnahtlänge unterschiedlich auftretenden Spaltweiten zwischen den Werkstücken wurden für jede Schweißverbindung in der programmierten Drahtfördergeschwindigkeit berücksichtigt, um ein Überbrücken des Fügespalt durch den Zusatzwerkstoff sicherzustellen. Eine Übersicht über die hierbei erzielte Fertigungsqualität an der Verbindung Kopfschiene - A-Säule für das Merkmal Schweißnahtdicke zeigt **Bild 6.41**.



**Bild 6.41** Kehlnaht am Überlappstoß; Schweißnahtdicke in Abhängigkeit von der Fügespaltweite für die Verbindung Kopfschiene - A-Säule

Wie oben gezeigt, ist durch eine spaltweitenabhängige Zuführung von Zusatzwerkstoff entlang der gesamten Bauteilkontur eine sichere Schweißverbindung zwischen Kopfschiene und A-Säule erzielbar. Bis hin zu einer Fügespaltweite von 1,0mm sind Schweißnahtdicken hoher Qualität zu realisieren, die innerhalb der Bewertungsgruppe **B** liegen. Die unregelmäßig auftretenden, außerhalb der Bewertungsgruppe **B** liegenden Bearbeitungsergebnisse sind auf die bereits beschriebene, mangelnde Sicherheit der lateralen Positionierung zwischen Laserstrahl und Fügestelle zurückzuführen. Diese können für eine Fertigung durch Einsatz einer geeigneten Nahtfolgesensorik verhindert werden.

Die Zugabe von Zusatzdraht in großen Mengen, wie sie für das Schließen von Fügespaltweiten im Bereich bis zu  $b_s=1\text{mm}$  erforderlich ist, hat jedoch wesentlich verbreiterte Schweißnähte zur Folge. Ein Beispiel hierfür zeigt **Bild 6.42**.

**Bearbeitungsbeispiel:****Strahleintritt:****Strahlaustritt:****Werkstoffpaarung:**

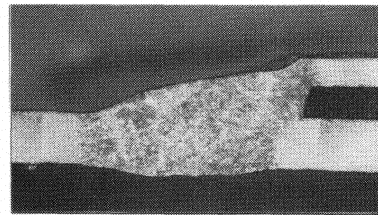
ZStE 180 BH (t=0,7mm)  
/ ZStE 180 BH (t=1,2mm)

**Zusatzwerkstoff:**

SG 2, Ø 0,6mm

**Fügestellenvorbereitung:**

Scherschneiden

**Querschliff:**

Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
Leistung: 2,2kW  
Vorschub: 1,8m/min  
Drahtvorschub: 2,5m/min  
Fokusslage: +2mm  
Arbeitsgas: Ar; 5,0l/min

**Bewertung nach Tabelle 4.2:**

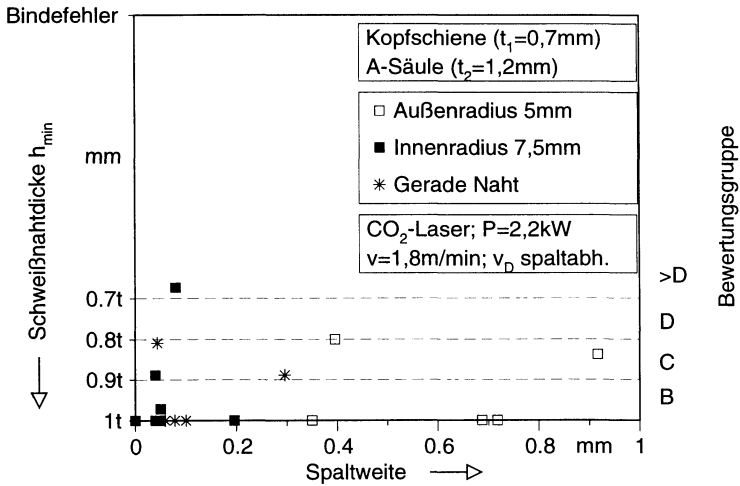
Nahtdicke: - B -  
Poren: - B -  
(Fügespaltweite: 0,8mm)

**Bemerkungen:**

- ▶ Zuführung des Zusatzwerkstoffes aus Zugänglichkeitsgründen unter 45° im 90°-Winkel seitlich zur Vorschubrichtung
- ▶ Strahleintritt über Kopfschiene senkrecht zur Werkstückoberfläche
- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet
- ▶ Die Fügepartner sind unbeschichtet

**Bild 6.42** Kopfschiene - A-Säule; Kehlnaht am Überlappstoß mit Zusatzwerkstoff; Außenkontur R=5mm

**Bild 6.43** zeigt die erzielte Fertigungsqualität abhängig von der Bauteilkontur an der Probenentnahmestelle. Die Unterschiede der Fertigungsqualität treten unabhängig von der Bauteilkontur an der Probenentnahmestelle auf. Dies wird als ein weiterer Hinweis darauf gesehen, daß die Unterschiede in der Fertigungsqualität auf äußere Einflüsse, wie die lateralen Positionsabweichungen zwischen Laserstrahl und Fügestelle am Bearbeitungsort, zurückzuführen sind und durch den Einsatz einer geeigneten Nahtfolgesensorik verhindert werden können.

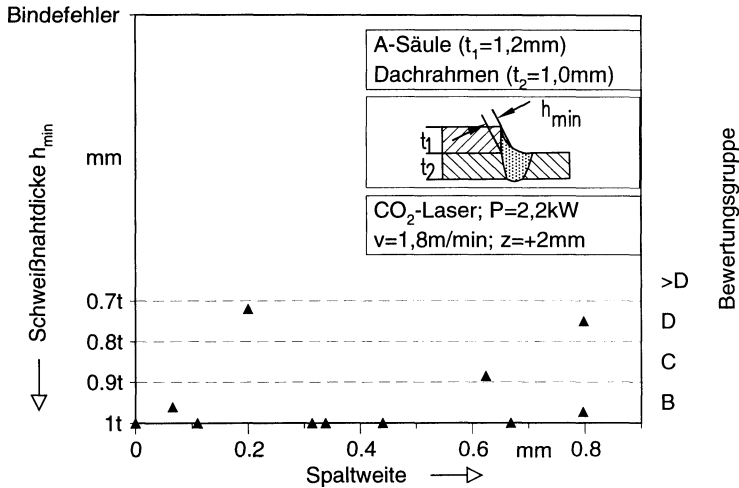


**Bild 6.43** A-Säule - Kopfschiene; Kehlnaht am Überlappstoß mit Zusatzwerkstoff; Schweißnahtdicke und Fügespaltweite in Abhängigkeit von der Werkstückkontur

Die Verbindung Dachrahmen ( $t=1,2\text{mm}$ ) - A-Säule ( $t=1,0\text{mm}$ ) in der Kehlnaht am Überlappstoß wurde mit und ohne Zugabe von Zusatzwerkstoff gefügt. Bereits ohne die Zugabe von Zusatzwerkstoff konnten infolge der Blechdicke von  $t=1,2\text{mm}$  auf der Strahleintrittsseite bis zu einer Fügespaltweite von  $b_s=0,6\text{mm}$  im allgemeinen Schweißverbindungen mit einer Schweißnahtdicke innerhalb der Bewertungsgruppe **B** erzielt werden, wie **Bild 6.44** zeigt. Auch an diesen Ergebnissen wird eine Streuung der ermittelten Werte für die Schweißnahtdicke festgestellt, die sich unabhängig von der Spaltweite zwischen den Fügepartnern einstellt.

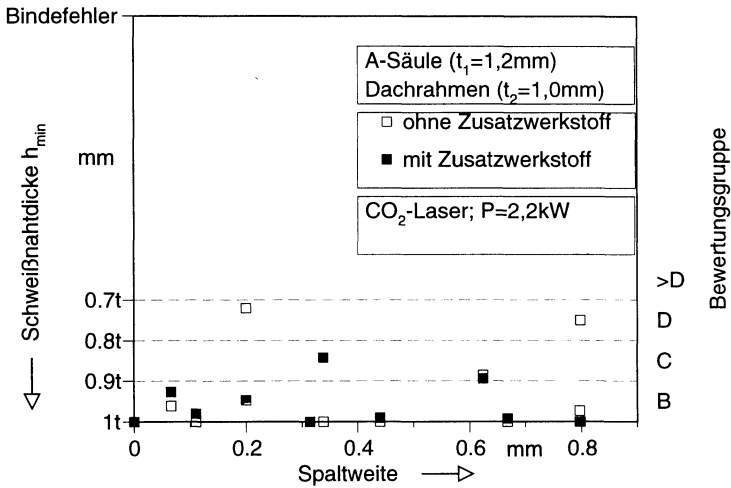
Analog zu den Ergebnissen an der Verbindung Kopfschiene - A-Säule wird auch an der Verbindung A-Säule - Dachrahmen keine Abhängigkeit der Bearbeitungsqualität von der Bauteilkrümmung am Werkstück festgestellt.





**Bild 6.44** A-Säule - Dachrahmen; Kehlnaht am Überlapstoß; Schweißnahtdicke in Abhängigkeit von der Spaltweite zwischen den Fügepartnern

An der Verbindung A-Säule - Dachrahmen wurde ebenfalls eine Bearbeitung mit fügespaltweitenabhängiger Zugabe von Zusatzwerkstoff durchgeführt. Anders als an der Verbindung Kopfschiene - A-Säule, die infolge der geringen Blechdicke der Kopfschiene von  $t=0,7\text{mm}$  erst durch die Zugabe von Zusatzwerkstoff prozeßsicher bearbeitet werden kann, verändern sich weder die erzielbare Fertigungsqualität noch die Prozeßsicherheit an der Verbindung A-Säule - Dachrahmen durch die Bearbeitung mit Zusatzwerkstoff signifikant (vergleiche **Bild 6.43**). Es wird durch die Verwendung von Zusatzwerkstoff lediglich eine leicht verringerte Streuung der erzielbaren Schweißnahtdicke festgestellt. Mit Ausnahme weniger Ausreißer liegt das Gros der erzielten Werte für die Schweißnahtdicke bis zu der untersuchten Spaltweite von  $b_s=0,8\text{mm}$  stabil innerhalb der Bewertungsgruppe **B** (Siehe **Bild 6.45**). Diese Qualitätsstufe wurde an allen untersuchten Stellen der Schweißverbindung erreicht, unabhängig ob Außen- oder Innenkontur oder gerader Konturabschnitt. Die Streuung der Werte selbst wird auch hier auf die Unsicherheit in der lateralen Positionierung infolge der fehlenden Nahtfolgesensoren zurückgeführt.



**Bild 6.45** A-Säule - Dachrahmen; Kehlnaht am Überlappstoß ohne beziehungsweise mit Zusatzwerkstoff; Schweißnahtdicke in Abhängigkeit von der Spaltweite zwischen den Fügepartnern

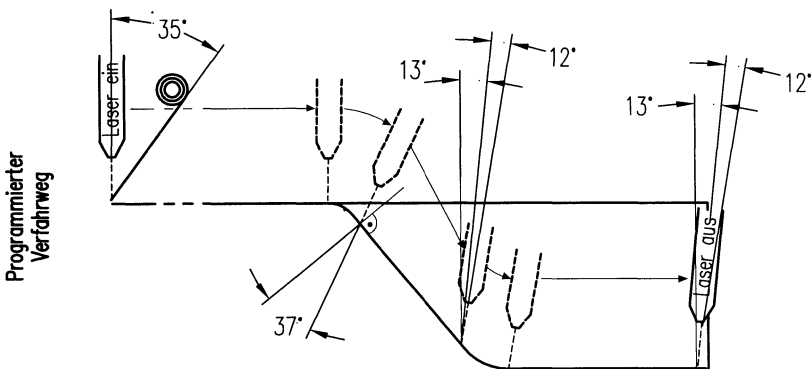
Anhand der geschilderten Ergebnisse kann analog zur I-Naht am Überlappstoß auch für die Kehlnaht am Überlappstoß die allgemeine Feststellung abgeleitet werden, daß die Sicherheit des Schweißprozesses mit steigender Dicke des auf der Strahleintrittsseite positionierten Bleches zunimmt. Es wurde festgestellt, daß bei einer Blechdicke von  $t=0,7\text{mm}$  in der Kehlnaht am Überlappstoß nur durch die Zugabe von Zusatzwerkstoff prozeßsicher geschweißt werden kann. Dies wird auf das Zusammenwirken von Fügespalten und unsicherer lateraler Positionierung zurückgeführt. Um eine korrekte laterale Positionierung in der Fertigung sicherzustellen wird deshalb der Einsatz einer Nahtfolgesensorik empfohlen.

Für die untersuchte Blechdicke von  $t=1,2\text{mm}$  auf der Strahleintrittsseite wurden unterhalb einer Fügespaltweite von  $b_s=0,5\text{mm}$  mehrheitlich Schweißnähte erzielt, die hinsichtlich der Schweißnahtdicke der Qualitätsstufe **B** zuzuordnen sind. Einzelne Ausreißer schlechterer Bearbeitungsqualität werden auf Fehler in der lateralen Positionierung zurückgeführt. Oberhalb einer Fügespaltweite von  $b_s=0,5\text{mm}$  werden zwar noch Ergebnisse der Qualitätsstufe **B** erreicht, die Sicherheit dieser Bearbeitungsqualität für Fügespaltweiten dieser Größenordnung kann jedoch auch im Einklang mit der Literatur [84, 111, 133] nicht als unter Fertigungsbedingungen reproduzierbar bewertet werden.

Der Einsatz von Zusatzwerkstoff führte für die Blechdicke  $t=1,2\text{mm}$  auf der Strahltrittsseite nicht zu einer wesentlichen Verbesserung der Schweißnahtqualität und ebensowenig zu einer signifikanten Reduzierung der Streuung der ermittelten Qualitätsmerkmale. Zur Überbrückung der aufgetretenen Fügepalte ohne wesentliche Qualitätseinbußen scheint mit dieser Blechdicke ausreichend Material zur Verfügung zu stehen. Die Bauteilkontur an der Probenentnahmestelle, das heißt Außen- oder Innenkontur oder Gerade, wurde nicht als Einflußgröße auf die erzielbare Fertigungsqualität ermittelt.

### 6.3.3 Heckklappenverbindung: Bördelnaht

Wie bereits in Abschnitt 5.1.1 erläutert, wurde an der Bearbeitungsaufgabe Heckklappenverbindung die erzielbare Fertigungsqualität einer Schweißnaht mit besonderen Anforderungen an die Schweißnahtoberfläche und die Oberflächengestalt der Fügestelle untersucht.



**Bild 6.46** Anstellwinkel des Bearbeitungskopfes für die Bearbeitung der Heckklappenverbindung

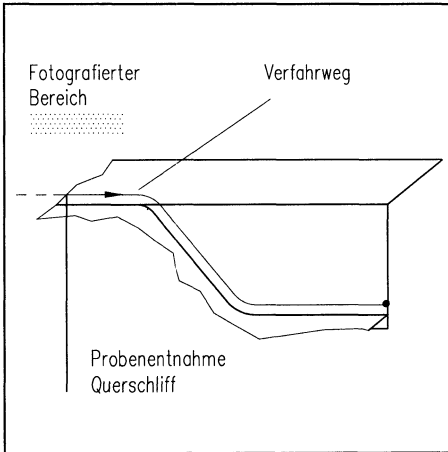
Die Bearbeitung ist durch die eingeschränkte Zugänglichkeit für den Laserstrahl infolge der in **Bild 5.6** erkennbaren Stufe zwischen den beiden Werkstücken gekennzeichnet. Um die Verbindung trotzdem realisieren zu können muß eine Bearbeitungsbahn mit den in **Bild 6.46** dargestellten Anstellwinkeln programmiert werden. Die Bearbeitbarkeit von Bördelnähten mit Zugabe von Zusatzwerkstoff und mit einem Anstellwinkel von  $37^\circ$  gegen die Schweißrichtung wurde in Vorversuchen nachgewiesen.

Das Schweißen der Heckklappenverbindung erfolgte unter Anwendung der Strategie *Leistungsreduzierung*. Die Bearbeitung erfolgt aus Gründen der Zugänglichkeit mit frei aus dem Bearbeitungskopf tretendem Laserstrahl und auf dem Drahtzuführrohrchen applizierter Schutzgaszuführung.

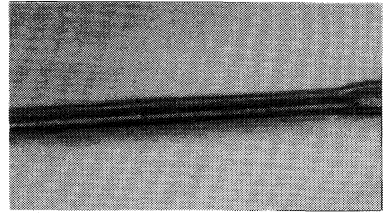
Die Bewertung der Fertigungsqualität dieser Heckklappenverbindung wird anhand des Auftretens von Oberflächenporen und eines gleichmäßigen, kerbenfreien Überganges zwischen Schweißnaht und Grundwerkstoff auf der Strahleintrittsseite vorgenommen.

Typische Bearbeitungsergebnisse entlang der Kontur zeigen beispielhaft die **Bilder 6.47 bis einschließlich 6.49**.

**Bearbeitungsbeispiel:**



**Strahleintritt:**



**Querschliff:**



Werkstoffpaarung (je t=0,7mm):

**DC04 / DC04**

Zusatzwerkstoff:

**SG 2, Ø 0,6mm**

Prozeßführungsstrategie:

**entfällt, gerade Naht**

Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
 Leistung: 1,52kW  
 Vorschub: 2,5m/min  
 Drahtvorschub: 2,0m/min  
 Fokusslage: +1mm  
 Arbeitsgas: Ar; 12,5l/min

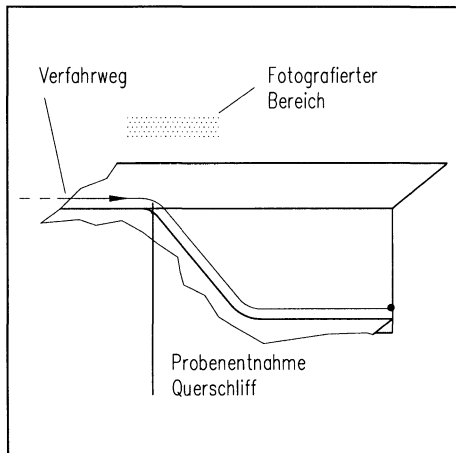
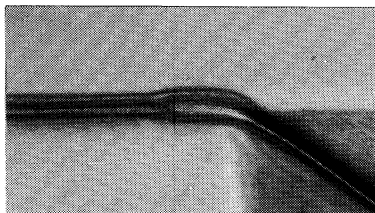
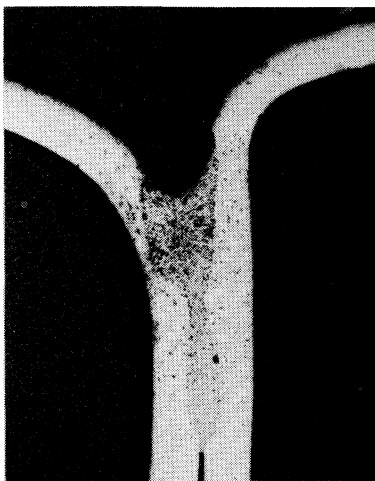
**Auftreten von Einzelmerkmalen:**

**Oberflächenporen:** -keine-  
**Poren:** -keine-  
**Einbrandkerben:** -keine-

**Bemerkungen:**

- ▶ Zuführung des Zusatzwerkstoffes schleppend unter 55°
- ▶ Strahlpositionierung in Fugenmitte
- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet
- ▶ Die Fügepartner sind unbeschichtet

**Bild 6.47** Heckklappenverbindung; Bördelnaht mit Zusatzwerkstoff; Gerade Referenznaht

**Bearbeitungsbeispiel:****Strahleintritt:****Querschliff:**Werkstoffpaarung (je t=0,7mm):**DC04 / DC04**Zusatzdraht:**SG 2, Ø 0,6mm**Prozeßführungsstrategie:**Leistungsreduzierung**

Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
 Leistung: 1,14kW  
 Vorschub: 2,5m/min  
 Drahtvorschub: 2,0m/min  
 Fokusslage: +1mm  
 Arbeitsgas: Ar; 12,5l/min

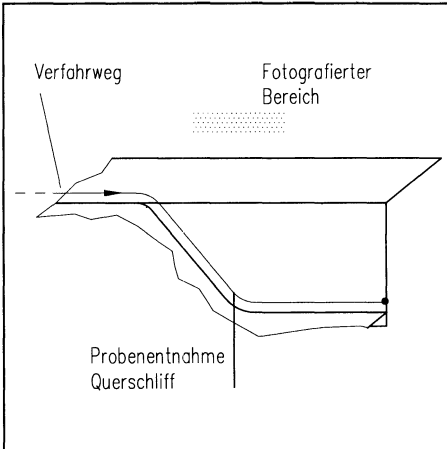
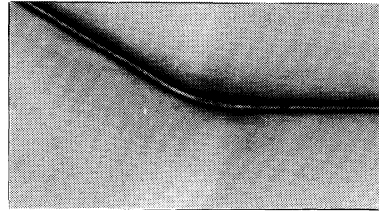
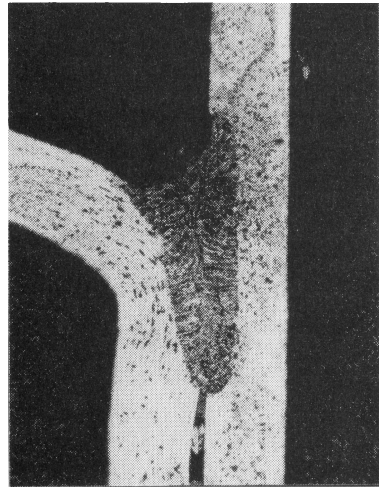
**Auftreten von Einzelmarkmalen:**

**Oberflächenporen:** -keine-  
**Poren:** -keine-  
**Einbrandkerben:** -keine-

**Bemerkungen:**

- ▶ Zuführung des Zusatzwerkstoffes schleppend unter 55°
- ▶ Strahlpositionierung in der Fugenmitte
- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet
- ▶ Die Fügepartner sind unbeschichtet

**Bild 6.48** Heckklappenverbindung; Bördelnaht mit Zusatzwerkstoff; Außenkontur R=10mm

**Bearbeitungsbeispiel:****Strahleintritt:****Querschliff:****Werkstoffpaarung (je t=0,7mm):****DC04 / DC04****Zusatzwerkstoff:****SG 2, Ø 0,6mm****Prozßführungsstrategie:****konventionell**

Lasertyp: CO<sub>2</sub>-Laser  
 Leistung: 1,52kW  
 Vorschub: 2,5m/min  
 Drahtvorschub: 2,0m/min  
 Fokusslage: +2mm  
 Arbeitsgas: Ar; 12,5l/min

**Auftreten von Einzelmerkmalen:**

**Oberflächenporen:** -keine-  
**Poren:** -keine-  
**Einbrandkerben:** -keine-

**Bemerkungen:**

- ▶ Zuführung des Zusatzwerkstoffes unter 55°
- ▶ Veränderung des Anstellwinkels über den Radius von stechend 37° nach schleppend 13°; seitlicher Anstellwinkel 12°
- ▶ Strahlpositionierung in Fugenmitte
- ▶ Die Fügepartner sind unbeschichtet und wurden nicht geheftet

**Bild 6.49** Heckklappenverbindung; Bördelnaht mit Zusatzwerkstoff; Innenkontur R=19mm

Die Bearbeitungsaufgabe, die Bördelnaht an einer Heckklappenverbindung mit einer gleichmäßigen Füllung des Kerbgrundes, einem Übergang Schweißnaht - Grundwerkstoff ohne Einbrandkerben sowie einer Schweißnaht ohne Oberflächenporen zu verschweißen, konnte an den zur Verfügung stehenden Bauteilen mit Erfolg realisiert werden. Die Anforderungen an die Fügestelle wurden auch in den Bereichen der Schweißnaht erfüllt, die durch kleine Krümmungsradien und infolge der Bauteilgestalt mit eingeschränkter Zugänglichkeit unter nicht idealen Randbedingungen (Siehe **Bild 6.46**) bearbeitet werden mußten.

Die Auswertung der an fünf zur Verfügung stehenden Werkstücken hergestellten Schweißnähte wurde an einem exemplarischen Bauteil an unterschiedlichen Probenentnahmestellen durchgeführt. Hierbei wurden insbesondere die Stellen der Bauteilkontur auf die Einhaltung der geforderten Qualitätskriterien untersucht, die kleine Krümmungsradien aufweisen. Das erzielbare Ergebnis an der Außenkontur mit einem Krümmungsradius  $R=10\text{mm}$  zeigt **Bild 6.48**. In **Bild 6.49** ist das Ergebnis an der Innenkontur mit einem Krümmungsradius  $R=19\text{mm}$  dargestellt. Hierzu im Vergleich zeigt **Bild 6.47** das Bearbeitungsergebnis einer geraden Referenznaht am gleichen Bauteil.

Ein Vergleich der Bearbeitungsergebnisse bestätigt die gleichbleibende Erfüllung der bereits genannten Qualitätsanforderungen an die Schweißnahtoberfläche und die Schweißnahtausbildung über die gesamte Bauteilkontur. Dagegen wird für die unterschiedlichen Bauteilabschnitte in den Querschliffen eine variierende Einschweißtiefe festgestellt. Diese übersteigt jedoch immer deutlich die Blechdicke. Die unterschiedliche Einschweißtiefe kann auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden.

Für Bereiche mit senkrecht zur Schweißrichtung einfallendem Laserstrahl sind aufgrund der veränderten geometrischen Verhältnisse höhere Einschweißtiefen festzustellen als im Bereich eines Anstellwinkels von  $37^\circ$  zur Schweißrichtung (nicht dargestellt). Die extreme Einschweißtiefe an der Außenkontur zu Beginn der Stufe im Bauteil (Siehe **Bild 6.48**) ist nicht repräsentativ für diese Bauteilkontur und muß auf Unregelmäßigkeiten in der Ausbildung des Fügespaltes zurückgeführt werden. Diese wiederum können aus der Bauteilherstellung erklärt werden. Die Formgebung dieser Prototypen-Werkstücke erfolgte durch Treiben mit dem Handhammer und hinterließ im Bereich der Außenkontur bei jeweils beiden Werkstücken an der Flanschinnenfläche eine sehr unregelmäßige Oberfläche. Hierdurch resultieren trotz gleichmäßig über die gesamte Bauteilkontur wirkenden Spannkkräfte punktuelle Fügespalte im Flansch, die zu einem unterschiedlich tiefen Eindringen des Strahls in den Flansch führen. Im untersuchten Bauteilabschnitt hat ein solcher Spalt im Bereich des

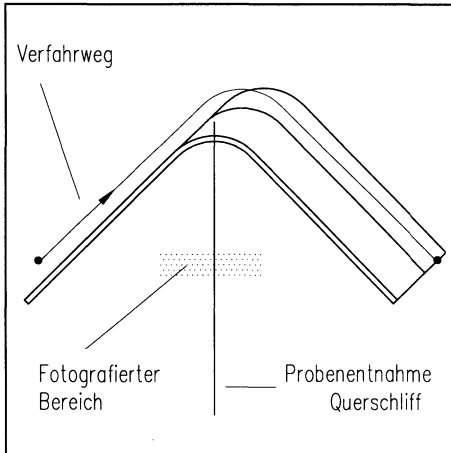
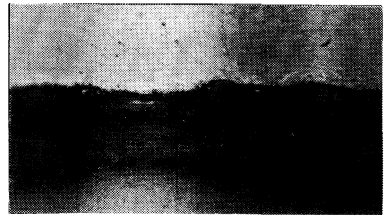
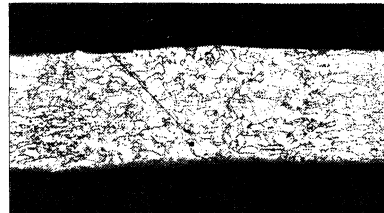


Flansches zu einer entsprechend hohen Einschweißtiefe geführt.

Die Analyse der erzielten Ergebnisse unter den für dieses Werkstück spezifischen Randbedingungen erlaubt den allgemeinen Schluß, daß hohe Qualitätsanforderungen an das Laserstrahlschweißen bei entsprechend geeigneter Prozeßführung auch unter nicht idealen konstruktiven Bedingungen erzielbar sind. Hierzu dürfen jedoch grundsätzliche Forderungen für die Verfahrensdurchführung nicht verletzt werden, wie beispielsweise die Zugänglichkeit des Strahls an die Fügestelle [50]. Im gezeigten Fall konnte die Bearbeitung ohne konstruktive Änderungen am Werkstück durchgeführt werden. Ideale Fertigungsbedingungen für das Laserstrahlschweißen, wie freie Zugänglichkeit des Laserstrahls und des Zusatzwerkstoffes an die Fügestelle, müßten jedoch erst durch ein lasergerechtes Redesign hergestellt werden.

#### **6.4 Bearbeitungsergebnisse zum Schweißen von Formelementen mit Nd:YAG-Laserstrahlung**

Die Untersuchungen an den Konturelementen zum Schweißen mit dem in Abschnitt 5.1 beschriebenen Fertigungssystem 1kW-cw-Nd:YAG-Laser und Industrieroboter wurden mit den in Abschnitt 5.2 erläuterten Prozeßführungsstrategien *Bearbeitung mit Anstellwinkeln* und *Linearisierung* durchgeführt. Beispielhafte Bearbeitungsergebnisse für die *Bearbeitung mit Anstellwinkeln* zeigen die **Bilder 6.50, 6.51** und **6.52**. Diese Prozeßführungsstrategie kann hier eingesetzt werden, da in Vorversuchen gezeigt wurde, daß, anders als bei der CO<sub>2</sub>-Laseranlage, aufgrund der geringen Verfahrensgeschwindigkeit an der eingesetzten Nd:YAG-Laseranlage ein Anstellwinkel von 22° vor beziehungsweise nach dem Konturelement ausreicht, um ein gleichbleibendes Bearbeitungsergebnis auch im Bereich der Bauteilkrümmung sicherzustellen. Porenbildung in der Schweißnaht ist bei diesem Anstellwinkel nicht zu erwarten [38].

**Bearbeitungsbeispiel:****Strahleintritt:****Strahlaustritt:****Werkstoffpaarung (je  $t=0,88\text{mm}$ ):****DC06+Z140 / DC04****Fügestellenvorbereitung:****Laserstrahlbrennschneiden****Prozeßführungsstrategie:****Anstellen Bearbeitungskopf****Querschliff:**

Lasertyp: Nd:YAG-Laser  
 Leistung: cw; 0,9kW  
 Vorschub: 1,2m/min  
 Fokusbildung: 0mm  
 Arbeitsabstand: 4mm  
 Arbeitsgas: Ar; 1,0bar

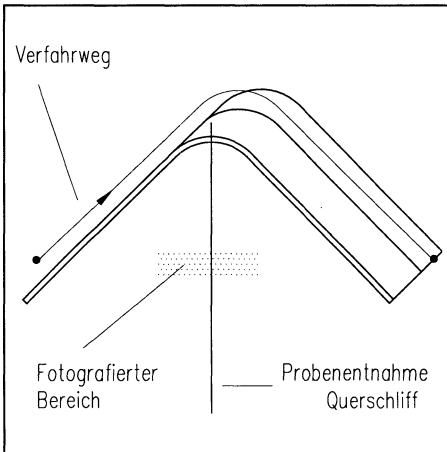
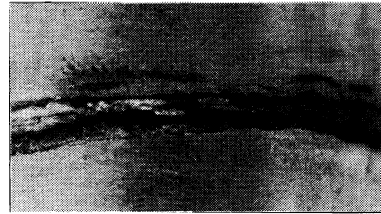
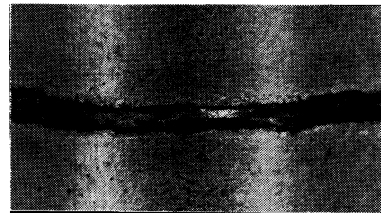
**Bewertung nach DIN 8563 T11:**

**Nahtunterwölbung:** - B -  
**Nahtunterwölbung:** - B -  
**Poren:** - B -  
**(Kantenversatz:** - B -)

**Bemerkungen:**

- ▶ Keine Auswirkungen des Anstellwinkels infolge geringer Vorschubgeschwindigkeit
- ▶ Bruchgefahr für die Lichtleitfaser bzw. der Anschlußelemente durch Kraftangriff infolge hoher Beschleunigung bei der Umorientierung
- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet

**Bild 6.50** Außenkontur  $R=10\text{mm}$ ; I-Naht am Stumpfstoß; Anstellen des Bearbeitungskopfes

**Bearbeitungsbeispiel:****Strahleintritt:****Strahlaustritt:**

Werkstoffpaarung (je  $t=0,88\text{mm}$ ):  
**DC06+Z140 / DC06+Z140**

Fügestellenvorbereitung:  
**Laserstrahlbrennschneiden**

Prozßführungsstrategie:  
**Anstellen Bearbeitungskopf**

**Querschliff:**

Lasertyp: Nd:YAG-Laser  
 Leistung: cw; 0,9kW  
 Vorschub: 1,2m/min  
 Fokusslage: 0mm  
 Arbeitsabstand: 4,0mm  
 Arbeitsgas: Ar; 1,0bar

**Bewertung nach DIN 8563 T11:**

**Nahtunterwölbung:** - B -  
**Nahtüberhöhung:** - B -  
**Poren:** - B -  
**(Kantenversatz:** - D -)

**Bemerkungen:**

- ▶ Keine Auswirkungen des Anstellwinkels infolge geringer Vorschubgeschwindigkeit
- ▶ Bruchgefahr für die Lichtleitfaser bzw. der Anschlußelemente durch Kraftangriff infolge hoher Beschleunigung bei der Umorientierung
- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet

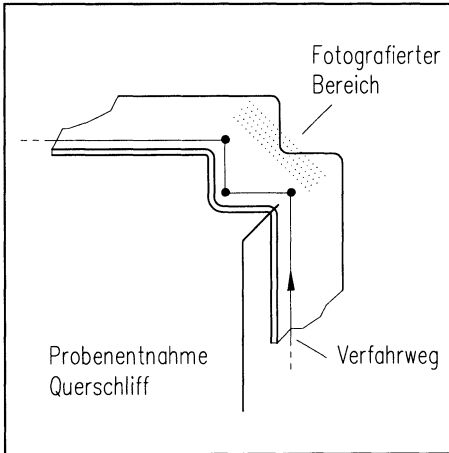
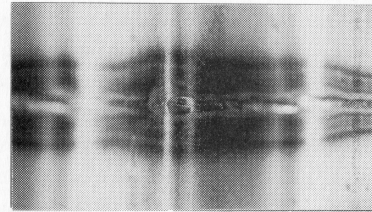
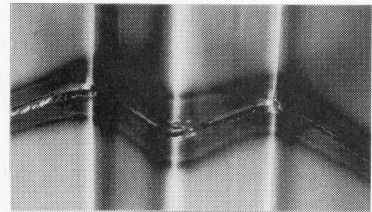
**Bild 6.51** Außenkontur  $R=10\text{mm}$ ; I-Naht am Stumpfstoß; Anstellen des Bearbeitungskopfes

Die Querschliffe in den **Bildern 6.50** und **6.51** weisen, wie auch alle weiteren dargestellten Bearbeitungsergebnisse zum Schweißen mit dem Nd:YAG-Laser, gegenüber den mit dem CO<sub>2</sub>-Laser gefügten Verbindungen jeweils eine deutlich breitere Schweißnaht auf. Diese veränderte Schweißnahtbreite ist zum einen auf den höheren Durchmesser des fokussierten Nd:YAG-Laserstrahls und zum anderen auf eine infolge der geringeren Laserleistung deutlich niedrigere Vorschubgeschwindigkeit von maximal  $v=1,2\text{m/min}$  zurückzuführen.

Die Arbeitsbeispiele in den **Bildern 6.50** und **6.51** zeigen am Beispiel eines Krümmungsradius von  $R=10\text{mm}$ , daß die *Bearbeitung mit Anstellwinkeln* dann zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Fertigungsqualität an Bauteilkonturen mit kleinen Krümmungsradien eingesetzt werden kann, wenn bereits ausgeführten Voraussetzungen für ein Bearbeitungsergebnis hoher Qualität nicht verletzt werden. Die gleichbleibende Fertigungsqualität kann in den beschriebenen Fällen erzielt werden, weil der Grenzanstellwinkel für Porenbildung von  $30^\circ$  (Siehe Abschnitt 5.2.4) nicht überschritten wird. Ein Anstellen des Bearbeitungskopfes vor beziehungsweise nach der Bauteilkrümmung von  $22^\circ$  stellt sicher, daß eine gleichbleibende TCP-Geschwindigkeit im Bereich der Bauteilkrümmung aufrechterhalten werden kann und sich die bekannten Fehlererscheinungen infolge einer erhöhten Streckenenergie nicht einstellen.

Die erzielten Ergebnisse wurden für die *Bearbeitung mit Anstellwinkeln* auch an Krümmungsradien von  $R=2\text{mm}$  sowie an Konturfolgen umgesetzt. Die Bearbeitungsbeispiele in **Bild 6.52** zeigen die Fertigungsqualität an einer Folge von Außen- / Innen- / und Außenkontur mit einem Krümmungsradius von jeweils  $R=2\text{mm}$ . Auch für diese Konturfolge kann durch die *Bearbeitung mit Anstellwinkeln* ein Bearbeitungsergebnis hoher Fertigungsqualität erzielt werden.

Der eingestellte Anstellwinkel von  $22^\circ$  wurde als anlagenspezifische Größe ermittelt, die ein gleichmäßiges Bearbeitungsergebnis auch an den untersuchten Krümmungsradien  $R=10$ ,  $R=5$  und  $R=2\text{mm}$  sicherstellt. Aus den vorgestellten Ergebnissen kann auch für das eingesetzte Nd:YAG-Lasersystem der allgemeine Schluß gezogen werden, daß die Prozeßführungsstrategie *Bearbeitung mit Anstellwinkeln* dann zu einem Bearbeitungsergebnis hoher Fertigungsqualität führt, wenn die genannten Voraussetzungen für ein qualitativ hochwertiges Schweißergebnis berücksichtigt werden. Hierzu gehört beispielsweise das Einhalten eines maximalen Anstellwinkels von  $30^\circ$ , um Porenbildung in der Schweißnaht zu verhindern.

**Bearbeitungsbeispiel:****Strahleintritt:****Strahlaustritt:**

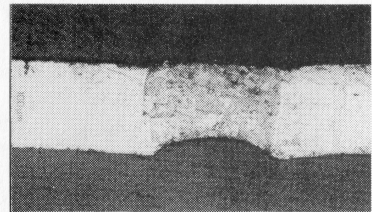
Werkstoffpaarung (je  $t=0,88\text{mm}$ ):  
**DC04 / DC04**

Fügestellenvorbereitung:

**Randverformung plan  
geschliffen, ölfrei**

Prozßführungsstrategie:

**Anstellen Bearbeitungskopf**

**Querschliff:**

Lasertyp: Nd:YAG-Laser  
Leistung: cw; 0,9kW  
Vorschub: 1,2m/min  
Fokuslage: 0mm  
Arbeitsabstand: 4,0mm  
Arbeitsgas: Ar; 1bar

**Bewertung nach DIN 8563 T11:**

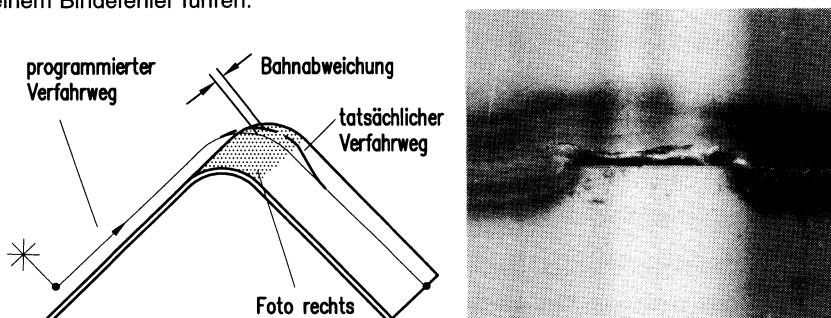
**Nahtunterwölbung:** - D -  
**Poren:** - B -  
**Kantenversatz:** - B -

**Bemerkungen:**

- ▶ Die Fügepartner wurden mit einer zusätzlichen seitlichen Anpreßkraft zur Sicherstellung eines technischen Nullspaltes beaufschlagt
- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet
- ▶ Maximaler Anstellwinkel zur Bearbeitung der Radienkombination jew.  $40^\circ$  (stechend bzw. schleppend)

**Bild 6.52** Außen- und Innenkonturen mit jeweils  $R=2\text{mm}$ ; I-Naht am Stumpfstoß; Anstellen des Bearbeitungskopfes

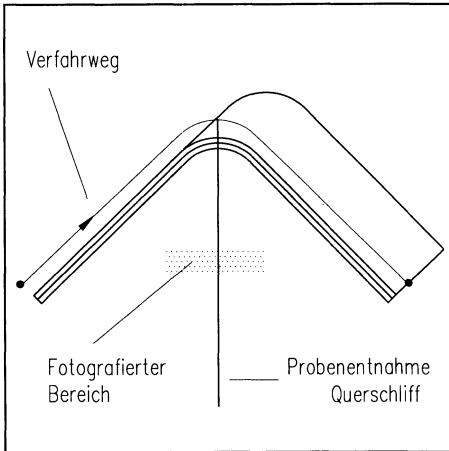
Für die Prozeßführungsstrategie *Bearbeitung mit Anstellwinkeln* wurde beim eingesetzten Nd:YAG-Lasersystem jedoch ein wesentlicher Einflußfaktor bestimmt, der die allgemeine Bearbeitbarkeit von Konturen mit kleinen Krümmungsradien einschränkt und sich auf die erzielbare Fertigungsqualität auswirkt: Die Führungsgenauigkeit des eingesetzten Handhabungsgerätes. Diesbezüglich wurde bei dem Industrieroboter, anders als bei der für die Untersuchungen mit dem CO<sub>2</sub>-Laser eingesetzten Portalanlage, eine Abhängigkeit von der Raumlage und der Stellung der einzelnen Handhabungsachsen festgestellt. Während bei den in den **Bilder 6.50, 6.51 und 6.52** gezeigten Bearbeitungsergebnissen die Umorientierung des Bearbeitungskopfes im wesentlichen durch eine Drehung der sogenannten "Handachse" des Industrieroboters realisiert wurde, zeigt **Bild 6.53** ebenfalls die Bearbeitung einer Außenkontur mit  $R=10\text{mm}$ , die jedoch unter Einbeziehung aller Handhabungsachsen zur Umorientierung des Bearbeitungskopfes realisiert wurde. Durch die für den Bewegungsablauf des Industrieroboters erforderlichen Ausgleichsbewegungen beim Umfahren der dargestellten Außenkontur kommt es zu Abweichungen der tatsächlichen Istbahn von der programmierten Sollbahn, die im gezeigten Fall einer Außenkontur mit  $R=10\text{mm}$  im Bereich mehrerer Zehntel Millimeter liegen und an einer I-Naht am Stumpfstoß zu einem Bindefehler führen.



**Bild 6.53** Bahngenauigkeit an kleinen Krümmungsradien bei der Bearbeitung mit Industrierobotern ohne Modifikation der Prozeßführung

Neben der Raumlage des Bauteils und der Roboterachsenstellung zur Bauteilkontur wirken sich bei der Bearbeitung mit Industrierobotern auch die Komplexität der Kontur auf die erzielbare Bahngenauigkeit und damit auf das Bearbeitungsergebnis aus. **Bild 6.54** zeigt dies für *konventionelle Prozeßführung* bei Drehung um die Handachse an einer Außenkontur mit Krümmungsradius  $R=2\text{mm}$ . Aufgrund der Ausgleichsbewegungen und der hohen Achsgeschwindigkeit im Bereich der Bauteilkrümmung wurde ein lateraler Versatz von  $1,6\text{mm}$  festgestellt. Infolge einer erhöhten Streckenenergie treten am Radius durch Überhitzung der Schmelze Poren in der Schweißnaht auf.

**Bearbeitungsbeispiel:**



**Strahleintritt:**



Werkstoffpaarung (je t=0,88mm):

**DC04 / DC04**

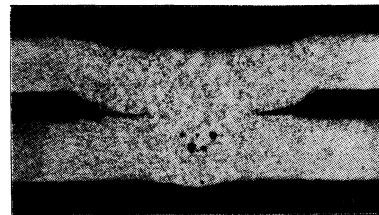
Fügestellenvorbereitung:

**Reinigung mit Tuch**

Prozeßführungsstrategie:

**konventionell**

**Querschliff:**



Lasertyp: Nd:YAG-Laser  
 Leistung: cw; 0,9kW  
 Vorschub: 0,6m/min  
 Fokusbildung: +0mm  
 Arbeitsabstand: 4,0mm  
 Arbeitsgas: Ar; 1,0bar

**Bewertung nach Tabelle 4.1:**

**Nahtunterwölbung:** - C -  
**Nahtdicke:** - B -  
**Poren:** - >D -  
**(Fügespaltweite:** 0,37mm)

**Bemerkungen:**

- ▶ Bruchgefahr für die Lichtleitfaser sowie die Anschlußelemente durch Kraftangriff infolge hoher Beschleunigung bei der Umorientierung
- ▶ Lateraler Strahlversatz um 1,6mm durch Ausgleichsbewegungen des Roboters im Radienbereich
- ▶ Die Fügepartner wurden nicht geheftet

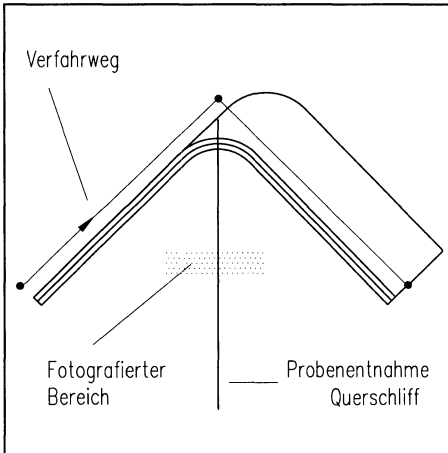
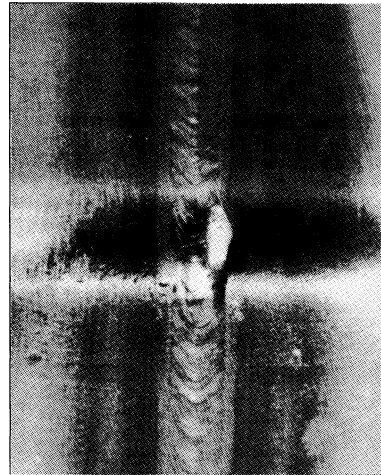
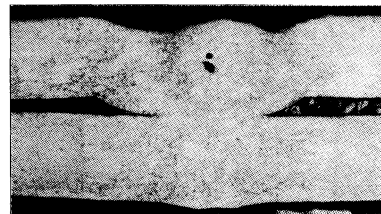
**Bild 6.54** Außenkontur R=2mm; I-Naht am Überlappstoß; Bearbeitung ohne Modifikation der Prozeßführung

Durch Anwendung der Strategie *Linearisierung* wird die Drehbewegung des Bearbeitungskopfes um das Konturelement vom Schweißvorgang entkoppelt. Dadurch wird verhindert, daß sich die während der Umorientierungsbewegung des Bearbeitungskopfes erforderlichen Ausgleichsbewegungen der Roboterachsen nicht als Störquellen für die Bahngenaugigkeit während des Schweißens auswirken. Ein Bearbeitungsbeispiel analog zu **Bild 6.54** unter Anwendung der Prozeßführungsstrategie *Linearisierung* zeigt **Bild 6.55**. Ein seitlicher Versatz im Bereich der Bauteilkrümmung kann nicht festgestellt werden. Versuche in unterschiedlichen Raumlagen und mit Beteiligung wechselnder Handhabungsachsen haben darüberhinaus gezeigt, daß die Prozeßführungsstrategie *Linearisierung* weitgehend unabhängig von der Raumlage des Bauteils gleichbleibend genau eingesetzt werden kann.

Die Prozeßführungsstrategie *Linearisierung* erlaubt darüberhinaus eine Drehbewegung mit geringerer Bahngeschwindigkeit. Dadurch kann die Belastung für die Lichtleitfaser und die entsprechenden Anschlußelemente reduziert und ein möglicher Ausfall dieser Systemkomponenten vermieden werden.

Bei der Bearbeitung von Konturen mit kleinen Krümmungsradien ist auch mit dem Fertigungssystem Nd:YAG-Laser und 6-Achsen Industrieroboter die Problematik einer gleichbleibenden Streckenenergie im Bereich der Bauteilkrümmung zu lösen, um in diesem Konturabschnitt ein Bearbeitungsergebnis mit gleichbleibender Fertigungsqualität zu erzielen. Wie die beispielhaft geschilderten Ergebnisse gezeigt haben, ist die Sicherstellung einer gleichbleibenden Fertigungsqualität durch die Anwendung von Strategien zur Prozeßführung auch an gekrümmten Bauteilen möglich. Die Auswahl der entsprechenden Prozeßführungsstrategie hängt hierbei von den anlagentechnischen Gegebenheiten und den konstruktiven Randbedingungen der zu fügenden Werkstücke ab. Bei der Bearbeitung mit dem Nd:YAG-Laser in Verbindung mit einem Industrieroboter ist neben der Einhaltung einer gleichbleibenden Streckenenergie jedoch zusätzlich die Problematik zu beachten, daß die Führungsgenauigkeit des Handhabungsgerätes bei der Bearbeitung von kleinen Krümmungsradien von der Stellung des Industrieroboters zur Kontur sowie von der Stellung der Roboterachsen im Raum abhängt [91, 102]. Diese Randbedingungen sind für die Auswahl einer geeigneten Prozeßführungsstrategie sowie bei deren Umsetzung in ein NC-Programm zu beachten. Als weitgehend unabhängig von der Stellung des Roboters zum Werkstück wurde die Strategie *Linearisierung* ermittelt. Eine *Bearbeitung mit adaptiver Optik* mit Nd:YAG-Lasern wurde nicht untersucht, da eine entsprechende Optik für diesen Lasertyp nicht zur Verfügung stand.



**Bearbeitungsbeispiel:****Strahleintritt:****Werkstoffpaarung (je t=0,88mm):****DC04 / DC04****Fügestellenvorbereitung:****Reinigung mit Tuch****Prozeßführungsstrategie:****Linearisierung****Querschliff:**

Lasertyp: Nd:YAG-Laser  
 Leistung: cw; 0,9kW  
 Vorschub: 0,6m/min  
 Fokusbildung: 0mm  
 Arbeitsabstand: 4,0mm  
 Arbeitsgas: Ar; 1bar

**Bewertung nach Tabelle 4.1:**

**Nahtunterwölbung:** - D -  
**Nahtdicke:** - B -  
**Poren:** - D -  
**(Fügespaltweite:** 0,2mm)

**Bemerkungen:**

- ▶ Minimierung der Bruchgefahr für Lichtleitfaser und Anschlußelemente durch langsame Umrückführung ohne Laserleistung
- ▶ Kein lateraler Strahlversatz im Bereich der komplexen Kontur
- ▶ Linearisierung unabhängig von der Raumlage anwendbar

**Bild 6.55** Außenkontur  $R=2\text{mm}$ ; I-Naht am Überlappstoß; Prozeßführungsstrategie Linearisierung



## 7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die vorliegende Arbeit untersucht die erzielbare Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von kleinen Krümmungsradien an Blechformteilen, dokumentiert diese in ausgewählten Beispielen und stellt Hinweise für die lasergerechte Fertigung von Blechformteilen vor. Hierzu werden die heute bekannten Voraussetzungen für qualitativ hochwertige Bearbeitungsergebnisse beim Laserstrahlschweißen von Feinblechen zusammengefaßt und den prozeßtechnischen Randbedingungen der Bearbeitung kleiner Krümmungsradien an Blechformteilen gegenübergestellt. Geeignete bestehende Richtlinien zur Qualitätsbestimmung an laserstrahlgeschweißten Verbindungen des Typs I-Naht am Stumpfstoß werden vorgestellt und notwendige Bewertungsvorgaben zur Beurteilung der Schweißnahtgüte an I-Naht- und Kehlnahtverbindungen am Überlappstoß erarbeitet. Damit stehen Bewertungsrichtlinien für die Bestimmung der Fertigungsqualität der drei häufigsten Verbindungsarten für Blechteile an Automobilkarosserien zur Verfügung.

Die Untersuchungen wurden sowohl an einfachen, durch Gesenkbiegen hergestellten Konturelementen als auch an unterschiedlichen Realbauteilen aus Automobilkarosserien durchgeführt. Zum Einstz kamen einfache sowie höherfeste Tiefziehstähle. Die Bearbeitung wurde jeweils mit typischen, heute in der industriellen Fertigung eingesetzten Laseranlagenkonzepten durchgeführt; einem 2,2kW CO<sub>2</sub>-Laser mit einer 5-Achsen Portalanlage und einer Kombination aus einem cw-betriebenen 1kW-Nd:YAG-Laser mit einem 6-Achsen Standard-Industrieroboter.

Es werden eine Reihe bekannter sowie im Rahmen der Arbeit entwickelter Strategien zur Prozeßführung beim 3D-Laserstrahlschweißen von Konturen mit kleinen Krümmungsradien vorgestellt und die hierfür erforderlichen systemtechnischen Voraussetzungen beschrieben. Diese Prozeßführungsstrategien kommen unter unterschiedlichen Randbedingungen für die Bearbeitung der Verbindungen I-Naht am Stumpfstoß sowie I-Naht und Kehlnaht am Überlappstoß an den genannten Werkstücken zum Einsatz. Die Fertigungsqualität der hierbei erzielten Schweißverbindungen wird nach den erarbeiteten Bewertungsrichtlinien beurteilt.

Die Betrachtung der erzielbaren Fertigungsqualität der Schweißverbindungen erfolgt unter unterschiedlichen Gesichtspunkten. Beginnend mit der Bearbeitung einfacher Formelemente werden grundsätzliche Aussagen über die Einflüsse der Prozeßführung auf das Bearbeitungsergebnis beim Schweißen mit dem CO<sub>2</sub>-Laser abgeleitet. Hierbei wurde festgestellt, daß die Anwendung geeigneter Prozeßführungsstrategien

eine wesentliche Verbesserung der erzielbaren Fertigungsqualität an Konturen mit kleinen Krümmungsradien zur Folge hat. Gleichbleibende Fertigungsqualität an Außen- sowie Innenkonturen konnte ungeachtet der Verbindungsart und mit hoher Prozeßsicherheit unter anderem durch die Strategien *Linearisierung* und *Bearbeitung mit adaptiver Optik* erzielt werden.

Der Einfluß der bauteilspezifischen Randbedingungen auf die Fertigungsqualität von CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschweißverbindungen wurde an Überlappverbindungen an Karosserieteilen erarbeitet. Für diese Untersuchungen kamen die Prozeßführungsstrategien *Linearisierung* sowie die *Bearbeitung mit Zusatzwerkstoff* in Verbindung mit *Laserleistungsreduzierung* zur Anwendung. Auch hier konnten durch den Einsatz der genannten Prozeßführungsstrategien unabhängig vom Krümmungsradius der Bauteilkonturen Verbindungen hoher Fertigungsqualität erzielt werden.

An den untersuchten Überlappverbindungen an Karosserieteilen konnten die entstehenden Imperfektionen in erster Linie auf Fügespalte zurückgeführt werden, die aus der mangelnden Paßgenauigkeit der Bauteile zueinander resultieren. Insbesondere an der Verbindung Kehlnaht am Überlappstoß tritt zudem eine unsichere laterale Positionierung zwischen Strahl und Fügestelle als Ursache von Imperfektionen in Erscheinung, die jedoch durch den Einsatz einer geeigneten Nahtfolgesensorik zu kompensieren ist. Negativ auf die Fertigungsqualität der Verbindung I-Naht am Stumpfstoß in der Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen wirken sich die Imperfektionen in der Schnittfläche an Konturen mit kleinen Krümmungsradien aus, die aus dem Laserstrahlschneiden ohne Abstandssensorik resultieren. Die Anwendung dieser systemtechnischen Einrichtung läßt eine entscheidende Verbesserung der Fertigungsqualität erwarten, sie stand jedoch für die Untersuchungen nicht zur Verfügung.

Mit dem System Nd:YAG-Laser - Industrieroboter wurden mit den Prozeßführungsstrategien *Linearisierung* und *Bearbeitung mit Anstellwinkeln* jeweils Verbindungen mit hoher Fertigungsqualität hergestellt. Problematisch für diese Anlagenkonfiguration sind Ausgleichsbewegungen des Roboters bei der Bearbeitung von Konturen mit kleinen Krümmungsradien, die zu einer unkontrollierten Positionsabweichung führen. Durch *Linearisierung* wird die Umorientierung des Bearbeitungskopfes vom Schweißprozeß am Konturelement entkoppelt, mit dieser Strategie können also unabhängig von der Achsstellung des Roboters zum Werkstück Verbindungen hoher Fertigungsqualität erzielt werden.

Die geschilderten Ergebnisse zur Auswirkung der Prozeßführung auf die Fertigungs-

qualität an Blechformteilen mit kleinen Krümmungsradien wurden unter den speziellen, geschilderten anlagentechnischen Randbedingungen erzielt. Diese hieraus entwickelten, grundsätzlichen Erkenntnisse behalten jedoch Gültigkeit, auch wenn für veränderte anlagentechnische Voraussetzungen eine jeweils systemtechnikspezifische Verschiebung der Verfahrensgrenzen eintreten wird.

Die vorgestellten Ergebnisse können deshalb zum einen als Eingangsgrößen für ein Qualitätsmanagementsystem zur Sicherstellung und Überwachung einer gleichbleibenden Fertigungsqualität dienen und zum anderen als Richtlinien und Hinweise für die fertigungsgerechte Konstruktion genutzt werden. Entsprechend modelliert und in ein Rechnersystem integriert sind die hier erarbeiteten Ergebnisse geeignet, sowohl in Konstruktionssystemen den Konstrukteur bei der lasergerechten Bauteilgestaltung [172] als auch in Prozeßsimulationssystemen den Arbeitsplaner bei der lasergerechten Fertigung [162] von Blechformteilen mit kleinen Krümmungsradien zu unterstützen.

Da als Leichtbau-Konstruktionswerkstoffe zukünftig verstärkt Aluminiumlegierungen zum Einsatz kommen werden [173], muß die Anwendung der gezeigten Prozeßführungsstrategien auch auf diese Werkstoffgruppe erweitert werden. Aufgrund der veränderten Randbedingungen der technischen Aluminiumlegierungen für das Laserstrahlschweißen [152, 153] ist die Übertragbarkeit der geschilderten Ergebnisse auf diese Werkstoffgruppe Gegenstand weiterer Untersuchungen.



**LITERATURVERZEICHNIS**

- [1] Kühne, L.; Hornig, J.: Lasergedanken bei BMW. In: Laser (1992) Februar, S. 16-19
- [2] Anonym: Laserschweißen ohne Netz und doppelten Boden. In: wt-Produktion und Management 82 (1992) 4, S. 30-34
- [3] Gaul, H.: Laser auch für die Großserie. In: Laser Praxis (1993) September, S. 61-62
- [4] Anonym: Laser in der Automobilindustrie. In: Automobil-Produktion (1992) Oktober, S. 142-146
- [5] Hanicke, L.; Strandberg, Ö.: Roof Laser Welding in Series Production. SAE International Congress and Exhibition (Detroit, Michigan (USA), March 1-5, 1993) - Originalbeiträge. - SAE Technical Paper Series Nr. 930028
- [6] Dorstewitz, H.-J.: Laser- und Elektronenstrahlschweißen von Kfz-Getriebebauteilen. Schweißen und Schneiden '91 (Frankfurt 1991). DVS-Berichte Band 136. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1991
- [7] Mikame, K.: Applications of Laser Material Processing in Toyota Motor Corporation. In: Proceedings of the International Conference on Laser Advanced Materials Processing (LAMP) 1992. S. 947-952
- [8] Anonym: Die Huckepack-Lösung - Ford schweißt PKW-Dachnähte mit Nd:YAG-Laserstrahl. In: EuroLaser (1994) 2, S. 20-22
- [9] Anonym: Knapp zwei Meter am Stück - Die längste Nd:YAG-Laserschweißnaht im Automobilbau. In: EuroLaser (1994) 2, S. 38-39
- [10] Linden, P.: Laserstrahlschweißen - Mehr als eine Substitution. In: VDI-Z 132 (1990) 1, S. 46-48
- [11] Lüttke, H.: Laser-Bearbeitung von Motor- und Getriebebauteilen. 2. Internationales Anwenderforum Lasermaterialbearbeitung für den Automobilbau (Bremen 1990). - Originalbeiträge
- [12] Belforte, D.: Laserschweißen. In: Laser (1992) Februar, S. 26-28
- [13] Linden, P.: Laser material processing of engine and gear parts. Vortrag im Rahmen des 25th ISATA International Symposium on Automotive Technology and Automation (Florenz 1992) - Originalbeiträge
- [14] Geiger, M.: Synergy of Laser Material Processing and Metal Forming. Annals

- of the CIRP. Volume 43 (1994) 3. Bern: Hallwag Publishers 1994
- [15] Vollertsen, F.: Tailored Blanks. In: Blech Rohre Profile 42 (1995) 3, S. 172-178
- [16] Poprawe, R.; Fischer, R.: Neue Werkstoffe und Verfahren für lasergeschweißte Leichtbaukomponenten in der Kfz-Karosserie. In: Geiger, M. (Hrsg.): Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000. Vorträge des 12. Internationalen Kongresses Laser 95. Bamberg: Meisenbach 1995
- [17] Prange, W.; Schneider, C.: "Tailored Blanks" - Werkstoffe für neue Formen der Konstruktionen. In: Werkstofftag '93 (München 1993), VDI-Berichte Nr. 1021. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993
- [18] Azuma, K.; Ikemoto, K.; Arima, K.; Suiura, H.; Takasago, T.: Press Formability of Laser Welded Tailored Blanks. Toyota European Office 1992 - Firmenschrift
- [19] Iwai, T.; Sadamura, K.; Natsumi, F.: Integrated Automotive Panel Production System Laser Welding Sheets. In: Geiger, M.; Vollertsen, F. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering (Lane '94, Erlangen). Bamberg: Meisenbach 1994 - Originalbeiträge
- [20] Klein, R.; Fischer, R.; Poprawe, H.; Zimmermann, K.: Aspekte des Laserstrahlschweißens von Komponenten für den Automobilbau. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.): Entwicklungen im Karosseriebau. VDI-Berichte Nr. 1134. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994
- [21] Shibata, K.: Recent Trends in Laser Material Processing in the Japanese Automotive Industry. In: Mordike, B.L. (Hrsg.): Laser Treatment of Materials (ECLAT '92). Oberursel: DGM-Informationsgesellschaft Verlag 1992
- [22] Breun, F.; Reinhart, G.: Laserstrahlschweißen in der Karosseriefertigung. 2. Internationales Anwenderforum Lasermaterialbearbeitung für den Automobilbau (Bremen 1990). - Originalbeiträge
- [23] Rippl, R.: Laser Beam Welding with Robots in the Automotive Industry. In: 5th European Conference on Laser Treatment of Materials ECLAT '94 (Bremen, 1994). DVS-Berichte Band 163. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1994
- [24] Leibinger, B.; Wollermann-Windgasse, R.; Richter, W.: Laser - The New Tool in Manufacturing. In: Geiger, M.; Vollertsen, F. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering (Lane '94, Erlangen). Bamberg: Meisenbach 1994 - Originalbeiträge
- [25] Hanicke, L.: Utilisation of Laser Welding in Series Produktion. European Laser Marketplace '94 (Hannover 17./18.10.1994) - Originalbeiträge



- [26] Behler, K.; Imhoff, R.; Hamkens, J.; Henke, B.; Singh, S.: Laserstrahlschweißen von Karosserieblechen - Ermittlung der mechanisch-technologischen Eigenschaften. In: Schweißen und Schneiden '92. DVS-Berichte Band 146. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1992
- [27] Hoffmann, P.; Deinzer, G.; Geiger, M.: Qualitätssicherung in der Laserstrahlschweißtechnik. In: Blech Rohre Profile 39 (1992) 12, S. 1013-1018
- [28] Koller, R.; Welsch, F.: Neue Gestaltungsmöglichkeiten von Laserschweißverbindungen dünner Bleche. In: Konstruktion 45 (1993), S. 191-195
- [29] Rief, A.; Geiger, M.; Pollmann, W.: Verfahrensentwicklung zum kombinierten Laserstrahlschneiden und -schweißen. In: Strahltechnik '91 (Karlsruhe 1991). DVS-Berichte Band 135. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1991
- [30] Schmitz, B.; Defourny, J.: Laser Welding, Resistance Spot Welding, Adhesive Bonding, Competing or Concurring Processes for Sheet Metal. In: Proceedings of the International Conference on Trends in Welding Research (3, 1993) - Originalbeiträge. ASM International 1993
- [31] Rapp, H.; Rief, A.: Laserstrahlschweißen im Karosserierohrbau. In: Schweißen und Schneiden '92. DVS-Berichte Band 146. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1992
- [32] Nagel, M.; Prange, W.: Laserstrahltechnik im Produktionsprozeß für Tailored Blanks - Vorteile im Karosseriebau. In: Geiger, M. (Hrsg.): Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000. Vorträge des 12. Internationalen Kongresses Laser 95. Bamberg: Meisenbach 1995
- [33] Frings, A.: Methoden zur Qualitätsbestimmung von Laserstrahlschweißungen an Stahlfeinblechen. In: Thyssen Technische Berichte (1993) Heft 1
- [34] Prange, W.; Schneider, C.; Jaroni, U.: Tailored Blanks - Contributions to an Optimized Body Shell. In: Geiger, M.; Vollertsen, F. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering (Lane '94, Erlangen). Bamberg: Meisenbach 1994 - Originalbeiträge
- [35] Dawes, C.: Laser Welding. New York: McGraw-Hill 1992
- [36] Geiger, M.: Ermittlung der technischen und konstruktiven Möglichkeiten bei Einsatz der Lasertechnologie. In: Eversheim, W. (Hrsg.): Lasergerechte Konstruktion und Fertigung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992
- [37] Pollmann, W.: Entwicklungsaspekte zum Laserstrahlschweißen im Karosseriebau. In: Blech Rohre Profile 39 (1992) 12, S. 1012

- [38] Geiger, M.; Hoffmann, P.; Schultz, M.: Laserschweißgerechte Konstruktion und Fertigung räumlicher Karosseriebauteile. FAT-Schriftenreihe Band Nr. 118. Frankfurt: Forschungsvereinigung Automobiltechnik 1995
- [39] Deutscher Verband für Schweißtechnik: Merkblatt DVS 2902 Teil 1 11.87. Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3mm Einzeldicke, Übersicht. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1987
- [40] Deutscher Verband für Schweißtechnik: Merkblatt DVS 2902 Teil 2 03.90. Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3mm Einzeldicke, Punktschweiß-eignung von legierten und unlegierten Stählen (Legierungsgehalt  $\leq 5\%$ ). Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1990
- [41] Deutscher Verband für Schweißtechnik: Merkblatt DVS 2902 Teil 3 02.91. Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3mm Einzeldicke, Konstruktion und Berechnung. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1991
- [42] Deutscher Verband für Schweißtechnik: Merkblatt DVS 2902 Teil 4 08.78. Widerstandspunktschweißen von Stählen bis 3mm Einzeldicke, Vorbereitung und Durchführung. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1978
- [43] Deutscher Verband für Schweißtechnik: Merkblatt DVS 2907 03.91. Empfehlungen für die Auswahl und das Vergleichen von Punkt-, Buckel- und Nahtschweißmaschinen (Einphasenwechselstrom). Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1988
- [44] Deutscher Verband für Schweißtechnik: Merkblatt DVS 2910 07.93. Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen von feuerverzinktem Stahlblech. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1993
- [45] Deutscher Verband für Schweißtechnik: Merkblatt DVS 2923 07.86. Widerstandspunktschweißen von Stählen und Aluminiumwerkstoffen im Schienenfahrzeugbau. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1993
- [46] Deutscher Verband für Schweißtechnik: Merkblatt DVS 2926 06.93. Widerstandspunkt-, Buckel- und Rollennahtschweißen von elektrolytisch verzinktem Stahlblech. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1993
- [47] Deutscher Verband für Schweißtechnik: Merkblatt DVS 3203 Teil 1 Dezember 1988. Qualitätssicherung von Laserstrahlschweißarbeiten; Verfahren und Laserstrahlschweißanlagen. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1988
- [48] Deutscher Verband für Schweißtechnik: Merkblatt DVS 3203 Teil 2 Dezember 1988. Qualitätssicherung von Laserstrahlschweißarbeiten. Prüfen von

- Schweißparametern. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1988
- [49] Deutscher Verband für Schweißtechnik: Merkblatt DVS 3203 Teil 3 Dezember 1988. Qualitätssicherung von Laserstrahlschweißarbeiten. Laserstrahlschweiß-eignung metallischer Werkstoffe. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweiß-technik 1988
- [50] Deutscher Verband für Schweißtechnik: Merkblatt DVS 3203 Teil 4 Dezember 1988. Qualitätssicherung von Laserstrahlschweißarbeiten. Nahtvorbereitung und konstruktive Hinweise. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1988
- [51] Deutscher Verband für Schweißtechnik Merkblatt DVS 3207 (Entwurf 1995). Qualitätssicherung von Nd:YAG-Laserstrahlschweißarbeiten - Verfahren und Laserstrahlschweißanlagen. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1995
- [52] Norm DIN 8563 T11 März 1992. Sicherung der Güte von Schweißarbeiten: Elektronenstrahl- und Laserstrahlschweißverbindungen an Stahl - Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten
- [53] Norm ISO DIS 13919 Draft 07.07.1994. Welding and allied processes - Elec-tron- and laser-beam welded joints in steel - Guidance on quality levels for imperfections
- [54] Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement: Strategien, Methoden, Techniken. München: Hanser 1992
- [55] Vocht, R.: Qualitätsförderung. In: Masing, W. (Hrsg.): Handbuch der Qualitäts-sicherung. München: Hanser 1980
- [56] Uebing, D.; Hofmann, H.-P.: Abnahmeprüfung. In: Masing, W. (Hrsg.): Hand-buch der Qualitätssicherung. München: Hanser 1980
- [57] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.; DVS Deutscher Verband für Schweißtechnik e.V. (Hrsg.): Schweißtechnik: Normen, Technische Regeln. 1. Auflage, Köln: Beuth 1992
- [58] Hoffmann, P.: Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen - Prozeß-führung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechform-teilen. Reihe Fertigungstechnik - Erlangen; Bd. 29. München: Hanser, 1991. Univ. Erlangen-Nürnberg, Diss. 1991
- [59] Benecke, R.: Beitrag zum räumlichen Laserstrahlschweißen von Stahlwerkstof-fen im Feinblechbereich mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 5 Nr. 301. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993. Univ. Hannover, Diss. 1992

- [60] Norm DIN 1910 Teil 2 August 1977: Schweißen von Metallen; Verfahren.
- [61] Hügel, H.: Strahlwerkzeug Laser: Eine Einführung. Stuttgart: Teubner 1992
- [62] VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien (Hrsg.): Schweißen mit Festkörperlaser. Handbuchreihe Laser in der Materialbearbeitung; Band 2. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995
- [63] Beyer, E.: Schweißen mit Laser: Grundlagen. Berlin: Springer 1995
- [64] Herziger, G.; Loosen, P. (Hrsg.): Werkstoffbearbeitung mit Laserstrahlung - Grundlagen, Systeme, Verfahren. München: Hanser 1993
- [65] Chen, G.; Roth, G.: Streckenenergie und Leistungsintensität - Schlüsselfaktoren beim Laserstrahlschweißen von Aluminium und Stahl im Dauerbetrieb. In: Schweißen und Schneiden 44 (1992) 10, S. 553-559
- [66] Dorn, L.; Grutzeck, H.; Jafari, S.: Schweißen und Löten mit Festkörperlaser. Berlin: Springer 1992
- [67] Cleemann, L. (Hrsg.): Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern. Reihe Technologie Aktuell Band 4. Düsseldorf: VDI-Verlag 1987
- [68] Bimberg, D.: Materialbearbeitung mit Lasern - Grundlagen und Anwendungen. Ehningen bei Böblingen: expert-Verlag 1991
- [69] Sepold, G.; Heider, P.; Binroth, Chr.: Quo vadis Laserstrahlschweißen? In: Schneiden und Schweißen 44 (1992) 6, S. 316-319
- [70] Norm ISO DIS 8402 Entwurf März 1992: Qualitätsmanagement und Qualitätssicherung; Begriffe.
- [71] Cramer, K.: Qualitätssicherung in der Schweißtechnik. Ehningen bei Böblingen: expert-Verlag 1993
- [72] Norm DIN 55350 Teil 11 Mai 1987: Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik: Grundbegriffe der Qualitätssicherung.
- [73] Norm DIN 55350 Teil 11 November 1992: Begriffe zu Qualitätsmanagement und Statistik: Grundbegriffe des Qualitätsmanagements.
- [74] Geiger, W.: Qualitätslehre; Einführung, Systematik, Terminologie. Zweite, völlig neu bearbeitete und erweiterte Auflage 1994. Braunschweig: Vieweg 1994
- [75] Norm DIN EN 25817 September 1992: Lichtbogenschweißverbindungen an Stahl; Richtlinie für die Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten.
- [76] Norm DIN 8524 T2: Fehler an Schweißverbindungen aus metallischen Werk-

- stoffen; Preßschweißverbindungen, Einteilung, Benennungen, Erklärungen.
- [77] Norm DIN 65170 Oktober 1983: Hart- und hochtemperaturgelötete metallische Bauteile; Technische Lieferbedingungen.
- [78] Norm DIN 8558 T1 Dezember 1987 - Entwurf: Gestaltung und Ausführung von Schweißverbindungen; Dampfkessel, Behälter und Rohrleitungen.
- [79] Deutscher Verband für Schweißtechnik Merblatt 3210 (Entwurf November 1994): Qualitätssichernde Maßnahmen beim Elektronen- und Laserstrahlschweißen; Prüfen von Elektronen- und Laserstrahlschweißnähten. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1993
- [80] Norm DIN EN 26520 November 1991: Einteilung und Erklärung von Unregelmäßigkeiten in Schmelzschweißverbindungen an Metallen.
- [81] Norm DIN 8524 T3 August 1978: Fehler an Schweißverbindungen aus metallischen Werkstoffen; Risse, Einteilung, Benennungen, Erklärungen
- [82] Norm ISO 5817 identisch mit DIN EN 25817 [75]
- [83] Normentwurf DIN 8563 T12 November 1995: Sicherung der Güte von Schweißarbeiten; Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen an Aluminium und seinen schweißgeeigneten Legierungen; Richtlinie für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten.
- [84] Habenicht, G.; Wanke, R.; Eckl, F.: Spaltgrößen von Überlappnähten beim Laserschweißen überwachen. In: Bänder Bleche Rohre (1994) 7/8, S. 34-41
- [85] Fuest, D.: Laserschweißbarkeit von Dünoblechen. In: Radaj, D.; Koller, R.; Dilthey, U.; Buxbaum, O. (Hrsg.): Laserschweißgerechtes Konstruieren. DVS-Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 116. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1994
- [86] Barthel, K.; Trunzer, W.: Sensor verfolgt Schweißbahn. In: Laser Praxis (1994) Mai, S. 18-21
- [87] Milberg, J.: Matching the Needs of Product and Process: Lasers in Development and Production: In: Geiger, M.; Vollertsen, F. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering (Lane '94, Erlangen). Bamberg: Meisenbach 1994 - Originalbeiträge
- [88] Trunzer, W.; Lindl, H.; Schwarz, H.: Sensor Application in 3D-Laser Welding. 26th ISATA International Symposium on Automotive Technology and Automation (Aachen 1993). - Originalbeiträge
- [89] Reinhart, G.; Lindl, H.; Trunzer, W.: Planning and Integration of Laser Systems

- into Flexible Production Structures. In: Geiger, M.; Vollertsen, F. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering (Lane '94, Erlangen). Bamberg: Meisenbach 1994 - Originalbeiträge
- [90] Rief, A.: Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen. Reihe Fertigungstechnik - Erlangen Band 21. München: Hanser 1990. Univ. Erlangen - Nürnberg, Diss. 1990
- [91] Gropp, A.: Anlagen und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser. Reihe Fertigungstechnik - Erlangen Band 42. München: Hanser 1995. Univ. Erlangen - Nürnberg, Diss. 1994
- [92] Beske, E.U.: Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen mit kW Nd:YAG-Laserstrahlung. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 257. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. Univ. Hannover, Diss. 1992
- [93] Tönshoff, H.K.; Breuer, P.; von Alvensleben, F.; Overmeyer, L.; Schumacher, J.: Qualitätssicherung beim Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Karosseriebauteilen. In: Geiger, M. (Hrsg.): Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000. Vorträge des 12. Internationalen Kongresses Laser 95. Bamberg: Meisenbach 1995
- [94] Cantello, M.; Gobbi, S.L.; Flavenot, J.F.; Dibione, A.: Laser Welding Thin Sheets for Car Body Structures. In: Proceedings of the 25th International Symposium on Automotive Technology and Automation (ISATA '92, Florenz) - Originalbeiträge
- [95] Akhter, R.; Steen, W.M.; Cruciani, D.: Laser Welding of Zinc Coated Steel. In: Proceedings of the 5th International Conference on Lasers in Manufacturing (LIM 5). Berlin: Springer 1988
- [96] Karube, N.; Nakata, Y.; Mori, A.: Laser Lap Welding of Zn-Coated Steel. In: Proceedings of the 25th International Symposium on Automotive Technology and Automation (ISATA '92, Florenz) - Originalbeiträge
- [97] Schnars, U.; Sepold, G.; Jüptner, W.P.O.: Quality Assurance of Laser Beam Welding by Evaluation of Plasma-Density-Fluctuations. In: Proceedings of the 25th International Symposium on Automotive Technology and Automation (ISATA '92, Florenz) - Originalbeiträge
- [98] Behler, K.; Beyer, E.: Entwicklungsstand des Laserstrahlschweißens von Blechwerkstoffen für den Automobilbau. In: Blech Rohre Profile 39 (1992) 12, S. 1008 - 1011
- [99] Welsch, F.: Richtlinien zum Laserschweißgerechten Gestalten. In: Radaj, D.;

- Koller, R.; Dilthey, U.; Buxbaum, O. (Hrsg.): Laserschweißgerechtes Konstruieren. DVS-Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 116. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1994
- [100] Trotha, L. von: Technologie nicht nur für die Zukunft - Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Lasern: Ausgewählte Anwendungsbeispiele aus der Fertigung. In: Laser-Praxis (1992) September, S. 86-90
- [101] Bendig, K.: Einführung in das Laserstrahlschweißen unter Berücksichtigung der Verfahrenstoleranzen verschiedener Schweißnahtformen. In: Konstruktion 43 (1991) 12, S. 133-137
- [102] Ayres, K.R.; Hilton, P.A.: CO<sub>2</sub>-Laser Butt Welding of Coated Steels for the Automotive Industry. In: Proceedings of the 26th International Symposium on Automotive Technology and Automation (ISATA '93, Aachen) - Originalbeiträge
- [103] Schultz, M.: Laserschweißgerechtes Konstruieren und Fertigen. Daimler Benz (Hrsg.): Daimler Benz Forschungsbericht - Beiträge zu innovativen Fertigungsverfahren. Stuttgart 1996
- [104] Schultz, M.: Lasergerechte Konstruktion. In: Deutsche Gesellschaft für Materialkunde, Bayerisches Laserzentrum (Hrsg.): Laser in der Materialbearbeitung - Industrielle Anwendungen (Erlangen 1995) - Seminarunterlagen
- [105] Haferkamp, H.; Bach, F.-W.; Marquering, M.; Kreuzburg, K.; Höfemann, M.: Fügen verzinkter Feinbleche mit Nd:YAG-Laserstrahlung. In: Stahl (1995) 6, S. 26-29
- [106] Bagger, C.; Miyamoto, I.; Olsen, F.; Maruo, H.: On-line control of the CO<sub>2</sub> laser welding process. In: Strahltechnik '91 (Karlsruhe 1991). DVS-Berichte Band 135. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1991
- [107] Festkörper-Laser-Institut Berlin (Hrsg.): Materialbearbeitung durch Laserstrahl. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Band 119. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1993
- [108] Dilthey, U.; Fuest, D.; Kropla, O.: Sensorgesteuertes Laserstrahlschweißen mit Zusatzdraht. In: Laser und Optoelektronik 26 (1994) 1, S. 44-48
- [109] Haferkamp, H.; Benecke, R.: Qualitätskontrolle beim dreidimensionalen Laserstrahlschweißen für die Automobilindustrie. In: Strahltechnik '91 (Karlsruhe 1991). DVS-Berichte Band 135. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1991
- [110] TRUMPF GmbH&Co: Betriebsanleitung TRUMPF LASERCELL TLC105. Vorläufige Ausgabe 06/94

- [111] VDI-Technologiezentrum Physikalische Technologien (Hrsg.): 3D-Bearbeiten mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern. Handbuchreihe Laser in der Materialbearbeitung Band 3. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995
- [112] Borgström, R.N.: Tool Center Point Speed of Industrial Robots Cutting Machines for Adaptive Control of Laser Power. In: Bruck, G. (Ed.): Laser Materials Processing. Proc. of the 7th International Congress on Applications of Lasers and Electrooptics ICALEO '88 (Santa Clara, CA, USA). Berlin: Springer 1988
- [113] Dilthey, U.; Matthes, K.-J.; Lübeck, K.-H.; Frenzel, M.: Technologische Untersuchungen zur Qualitätssicherung beim Roboterschweißen unterschiedlicher Schweißaufgaben. In: Schweißen und Schneiden '94 (Große Schweißtechnische Tagung Bremen 1994). DVS-Berichte Band 162. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1991
- [114] Dilthey, U.; Schneegans, J.; Jacobskötter, L.: Laserstrahlschweißen von Achskomponenten. In: Stahl (1994) 6, S. 17-19
- [115] Spur, G.; Kallies, B.: Aspects of Three-Dimensional Laser Beam Cutting. In: Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik (Hrsg.): Production Engineering Vol I/1 (1993). München: Hanser 1993
- [116] Huang, Q.; Kullberg, G.; Guan, Z.; Skoog, H.: Pulsed Nd:YAG Laser Robot in Sheet Metal Welding. In: Proceedings of the 26th International Symposium on Automotive Technology and Automation (ISATA '93, Aachen) - Originalbeiträge
- [117] Geiger, M.; Gropp, A.: Laserstrahlschneiden mit dem System Industrieroboter - Festkörperlaser. In: Laser und Optoelektronik 25 (1993) 2, S. 69-76
- [118] Garnich, F.: Laserbearbeitung mit Robotern. Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften Band 50. Berlin: Springer 1992. TU München, Diss. 1991
- [119] Schwarz, H.: Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik. Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften Band 68. Berlin: Springer 1994. TU München, Diss. 1994
- [120] Trumpf GmbH&Co: Programmieranleitung Trumpf TC L5000. Ausgabe 6/88
- [121] Trumpf GmbH&Co: Bedienungsanleitung Trumpf Laser TLF2500. Ditzingen, 07.03.1988
- [122] Mauri, H.: Vorrichtungen, Band 1 - Einteilung, Aufgaben und Elemente der Vorrichtungen. Berlin: Springer 1976



- [123] Ruge, J.: Handbuch der Schweißtechnik. Band II: Verfahren und Fertigung (2. neubearbeitete Aufl.). Berlin: Springer 1980
- [124] Trbola, J.F.: Die Integration des CO<sub>2</sub>-Lasers in Bearbeitungssysteme zum Schweißen und Schneiden. In: Strahltechnik (Karlsruhe 1991). DVS-Berichte Band 135. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1991
- [125] Rippl, P.: Industrieroboter zum Laserstrahlschweißen und -schneiden in der Fahrzeugindustrie. European Laser Marketplace'94 (Hannover 17./18.10.1994) - Originalbeiträge
- [126] Larsson, J.K.: The Introduction of Roof Laser Welding in Car Production and the Development of a New Fixation Technique. In: Geiger, M.; Vollertsen, F. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering (Lane '94, Erlangen). Bamberg: Meisenbach 1994 - Originalbeiträge
- [127] Sepold, G.; Kohn, H.: Normen und Abnahmebedingungen für das Laserstrahlschweißen - Fluch oder Segen für die Laserstrahlschweißtechnik?. In: Fraunhofer Institut für Lasertechnik (Hrsg.): Aachener Kolloquium für Lasertechnik (AKL'95) - Originalbeiträge
- [128] Norm DIN 8563 Teil 122 Entwurf April 1994: Sicherung der Güte von Schweißarbeiten - Anforderungen und Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe; Schweißanweisung für das Laserstrahlschweißen.
- [129] Sonsino, C.M.; Müller, F.: Schwingfestigkeit lasergeschweißter Verbindungen. In: Radaj, D.; Koller, R.; Diltthey, U.; Buxbaum, O. (Hrsg.): Laserschweißgerechtes Konstruieren. DVS-Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 116. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1994
- [130] Christoph, H.; Scheermann, H.; Zentner, F.: Verbindungselement Schweißnaht. Berlin: Beuth; Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1988
- [131] Deutscher Verband für Schweißtechnik: Merkblatt DVS 2906 11.75. Widerstands-Rollennahtschweißen überlappter Teile. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1975
- [132] Steinhilper, W.; Röper, R.: Maschinen- und Konstruktionselemente. Band 2 Verbindungselemente, elastische Elemente, Achsen und Wellen, Dichtungstechnik. Berlin: Springer 1986
- [133] Wanke, R.: Der Einfluß der Stegbreite auf die Festigkeit beim Laserstrahlschweißen. European Laser Marketplace'92 (Hannover 26./27.10.1992) - Originalbeiträge
- [134] Tolkemit, H.-J.; Peters, M.: Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen von

- Rohren. In: Blech Rohre Profile 39 (1992) 3, S. 200-203
- [135] Rieberer, A.: Schweißgerechtes Konstruieren im Maschinenbau: Berechnungs- und Gestaltungsbeispiele. Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 95. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1989
- [136] Schwethelm, K.J.; Fang, X.F.: Verstärkter Einsatz höherfester Stähle zur Reduzierung des Fahrzeuggewichts. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug und Verkehrstechnik (Hrsg.): Entwicklungen im Karosseriebau. VDI-Berichte Nr. 1134. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994
- [137] Norm DIN EN 10130, Ausgabe Juli 1992: Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen; Technische Lieferbedingungen
- [138] Norm DIN EN 10142, Ausgabe Dezember 1990: Kontinuierlich feuerverzinktes Blech und Band aus weichen Stählen zum Kaltumformen; Technische Lieferbedingungen.
- [139] Kallina, I.; Bartesch, H.-G.; Colmsee, H.: Intelligente Leichtbauweise - Das Leichtbaukonzept für die Karosserie-Rohbauentwicklung bei der Mercedes Benz AG. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug und Verkehrstechnik (Hrsg.): Entwicklungen im Karosseriebau. VDI-Berichte Nr. 1134. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994
- [140] Daimler Benz AG: Aus der Taufe gehoben. In: HighTechReport - Berichte aus Forschung, Technik und Umwelt. (1995) 3, S. 40-49
- [141] Verein Deutscher Eisenhüttenleute: Stahl-Eisen-Werkstoffblatt (SEW) 094; 1. Ausgabe; Juli 1987: Kaltgewalztes Band und Blech mit höherer Streckgrenze zum Kaltumformen aus phosphorlegierten Stählen sowie aus Stählen mit zusätzlicher Verfestigung nach Wärmeeinwirkung (Bake-hardening); Technische Lieferbedingungen.
- [142] Norm DIN 8559 T1, Entwurf, Januar 1990: Schweißzusätze für das Schutzgasschweißen; Drahtelektroden und Schweißgut zum Metall-Schutzgasschweißen von Kohlenstoff-, Kohlenstoff-Mangan- und mikrolegierten Stählen; Einteilung, Bezeichnungen.
- [143] Hendricks, M.: Qualitätsuntersuchungen an Laserstrahlschweißverbindungen un-, niedrig- und hochlegierter Stähle. Schweißtechnische Forschungsberichte Band 41. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1991. RWTH Aachen, Diss. 1991
- [144] Norm DIN EN ISO 11145, Februar 1995: Optik und optische Instrumente; Laser und Laseranlagen; Begriffe und Formelzeichen.
- [145] Hoffmann, P.; Geiger, M.: Recent Developments in Laser System Technology

- for Welding Applications. In: Annals of the CIRP Volume 43 (1994) 4, Bern: Hallwag Publishers 1994
- [146] Hoffmann, P.; Schuberth, S.; Geiger, M.; Kozlik, C.: Process Optimizing Adaptive Optics for the Beam Delivery of High Power CO<sub>2</sub>-Lasers. SPIE-Conference OE/Technology '92 (Boston, Massachusetts (USA) 15.-20.11.1992) - Originalbeiträge
- [147] Geiger, M.; Hutfless, J.; Schuberth, S.: CO<sub>2</sub>-Laser Beam Sawing of Thick Sheet Metal with Adaptive Optics. In: Welding in the World. Zur Veröffentlichung angenommen
- [148] Geiger, M.; Neubauer, N.; Hoffmann, P.; Hutfless, J.: Adaptive Beam Delivery for CO<sub>2</sub>-Laser Material Processing. In: Mazumder, J. (Hrsg.): Laser Processing: Surface Treatment and Film Deposition. Proceedings of the NATO ASI 1994 (Sesimbra, Portugal). - Originalbeiträge (in Druck)
- [149] Geiger, M.; Hoffmann, P.; Schuberth, S.: Verfahrensgrundlagen zur Laserstrahlbearbeitung mit prozeßoptimierenden Optiken. In: Geiger, M.; Hollmann, F. (Hrsg.): Strahl-Stoff-Wechselwirkung bei der Laserstrahlbearbeitung. Bamberg: Meisenbach 1993
- [150] Haferkamp, H.; Benecke, R.: Laserschweißen "um die Ecke". In: Blech Rohre Profile 38 (1991) 4, S. 304-307
- [151] Kallies, B.: Laserstrahlschneiden von Blechformteilen. Reihe Produktionstechnik - Berlin, Band 174. München: Hanser 1995. Technische Univ. Berlin - Diss. 1995
- [152] Klassen, M.; Schubert, E.; Sepold, G.; Binroth, Chr.: Probleme beim Schweißen von Aluminium-Legierungen. In: Blech Rohre Profile 42 (1995) 9, S. 539-543
- [153] Dausinger, F.: Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozeßeffektivität. Stuttgart: Teubner 1995. Univ. Stuttgart, Habilitationsschrift 1994
- [154] Geiger, M.; Deinzer, G.: Closed Loop Power Control System for CO<sub>2</sub>-Laser. In: Hügel, H.; Bohn, W.L. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers (Boston 1994). - Originalbeiträge. Bellingham: SPIE 1994
- [155] Deinzer, G.; Otto, A.; Hoffmann, P.; Geiger, M.: Optimizing Systems for Laser Beam Welding. In: Geiger, M.; Hollmann, F. (Hrsg.): Strahl-Stoff-Wechselwirkung bei der Laserstrahlbearbeitung. Bamberg: Meisenbach 1993
- [156] Dilthey, U.; Fuest, D.; Kropla, O.: A Sensor System for Quality Assurance of

- Laser Beam Welding with Filler Wire. In: 5th European Conference on Laser Treatment of Materials ECLAT '94 (Bremen, 1994). DVS-Berichte Band 163. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1994
- [157] Geiger, M.; Schuberth, S.; Hutfless, J.: Process Optimizing CO<sub>2</sub>-Laser Beam Welding using Adaptive Optics. In: 5th European Conference on Laser Treatment of Materials ECLAT '94 (Bremen, 1994). DVS-Berichte Band 163. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1994
- [158] Geiger, M.; Otto, A.: Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen. In: Geiger, M.; Hollmann, F. (Hrsg.): Strahl-Stoff-Wechselwirkung bei der Laserstrahlbearbeitung. Bamberg: Meisenbach 1993
- [159] Dilthey, U.: Laserstrahlschweißen in der Fertigung - Einsatz und Entwicklungen. In: Fraunhofer Institut für Lasertechnik (Hrsg.): Aachener Kolloquium für Lasertechnik (AKL'95) - Originalbeiträge
- [160] Meerkamm, H.; Weber, A.: Konstruktionssystem mfk - Integration von Bauteilsynthese und -analyse. In: Erfolgreiche Anwendung wissensbasierter Systeme in Entwicklung und Konstruktion (Tagungsband, Heidelberg '91). VDI-Berichte Nr. 903. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991
- [161] Schuberth, S.; Hutfless, J.; Geiger, M.: Focal Position Control Circuit for Laser Beam Welding using Adaptive Optics. In: Geiger, M. (Hrsg.): Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000. Vorträge des 12. Internationalen Kongresses Laser 95. Bamberg: Meisenbach 1995
- [162] Backes, F.; Geiger, M.; Franke, V.: Technology Oriented Off-Line Programming for 3D-Laser Material Processing. Proceedings of the NAMRC XXIV (AnnArbor, Michigan, May 21-23, 1996) - Originalbeiträge. - SME Technical Paper MS96-145
- [163] Meerkamm, H.: Design for X - A Core Area of Design Methodology. In: Journal of Engineering Design, 5 (1994) 2, S. 145-163
- [164] Zopf, P.: Bauteilgestaltung für das Schweißen mit Festkörperlaser. Reihe Produktionstechnik - Berlin, Band 172. München: Hanser 1995. Technische Univ. Berlin - Diss. 1995
- [165] Otto, A.; Geiger, M.: FEM Simulation of the Laser Beam Welding Process. In: Kaplan, A.F.H.; Schuöcker, D. (Hrsg.): Proceedings of the 11th Meeting on Mathematical Modelling of Material Processing with Lasers (Marseille 1995). - Originalbeiträge
- [166] Deutscher Verzinkerei Verband (Hrsg.): Schweißen - Fügeverfahren für ober-

flächenveredeltes Band und Blech. Düsseldorf 1992

- [167] Heyden, J.; Nilsson, K.; Magnusson, C.: Laser Welding of Zinc Coated Steel. In: Proceedings of the 6th International Conference Lasers in Manufacturing. (München 1989) - Originalbeiträge
- [168] Deutscher Verband für Schweißtechnik: Merkblatt DVS 3206 Teil 1 Dezember 1994: Unregelmäßigkeiten und deren Ursachen beim Laserstrahlbrennschneiden von metallischen Werkstoffen. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1994
- [169] Norm DIN 4768 August 1974: Ermittlung der Rauheitsmeßgrößen  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$  mit elektrischen Tastschnittgeräten - Grundlagen.
- [170] Norm DIN 2310 Teil 2 November 1987: Thermisches Schneiden - Ermitteln der Güte von Schnittflächen.
- [171] Reinhart, G.; Lindl, H.; Trunzer, W.: Lasertechnologie als Baustein wettbewerbsfähiger Produktionsstrukturen. In: Geiger, M. (Hrsg.): Schlüsseltechnologie Laser: Herausforderung an die Fabrik 2000. Vorträge des 12. Internationalen Kongresses Laser 95. Bamberg: Meisenbach 1995
- [172] Meerkamm, H.; Rösch, S.; Storath, E.: Wissensmodellierung und -verarbeitung für das fertigungsgerechte Konstruieren. In: Gausenmeier, J. (Hrsg.): Produktdatenmodellierung und Prozeßmodellierung als Grundlage neuer CAD-Systeme (Tagungsband, Fachtagung CAD '94). München: Hanser 1994
- [173] Janssen, B.: Leichtbau mit Varianten in Stahl, Kunststoff und Aluminium. In: VDI-Nachrichten (1995) Nr. 6, S. 16
- [174] Thyssen Schulte GmbH (Hrsg.): Normenvergleich DIN EN; Deutsche Normen und Europäische Normen EN in der Gegenüberstellung (2. Auflage, Mai 1994). Firmenschrift der Thyssen Schulte GmbH, Essen 1994
- [175] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (Hrsg.): Stahl und Eisen; Gütenormen 2. Bauwesen, Metallverarbeitung. DIN Taschenbuch 402, 1. Auflage. Berlin: Beuth 1993
- [176] Drehsen, H.: Werkstoffschlüssel der Schweißtechnik: Stahlnormung DIN - DIN EN. Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 126. Düsseldorf: Deutscher Verlag für Schweißtechnik 1995
- [177] Norm DIN 1623 Teil 1; 02.83: Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen; Technische Lieferbedingungen.
- [178] Verein Deutscher Eisenhüttenleute: Stahl-Eisen-Werkstoffblatt (SEW) 095;

1. Ausgabe; Juli 1987: Kaltgewalztes Band und Blech mit höherer Streckgrenze zum Kaltumformen aus mikrolegierten Stählen; Technische Lieferbedingungen.
- [179] Norm EURONORM EU139, 1977: Kaltband ohne Überzug in Walzbreiten unter 600mm aus weichen unlegierten Stählen für Kaltumformung.



## Eingesetzte Blechwerkstoffe

Die im Rahmen der Untersuchungen eingesetzten Blechwerkstoffe werden im Text nach den in der nachfolgenden Tabelle erstgenannten Bezeichnungen bezeichnet. Aufgrund der derzeitigen Umbruchssituation in der Normung für Stahlwerkstoffe werden den im Text verwendeten Werkstoffbezeichnungen zeilenweise alternative Bezeichnungen beige stellt [174-179]. Die Angaben zur Beschreibung der Verzinkung beruhen auf DIN EN 10142 [138].

<b>DC04</b> [DIN EN 10130]	<b>St1403</b> [DIN1623 T1]	<b>1.0338</b> [Wst.-Nr.]	<b>FeP04G</b> [EU130/139]
<b>DC06</b> [DIN EN 10139]	<b>IF18</b> [SEW 095]	<b>1.0873</b> [Wst.-Nr.]	<b>FeP06G</b> [EU130/139]
<b>ZStE 180 BH</b> [SEW 094]		<b>1.0395</b> [Wst.-Nr.]	



## **Lebenslauf**

Der Lebenslauf wird nicht veröffentlicht.



# Reihe Fertigungstechnik Erlangen

Band 1

Andreas Hemberger

**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch  
wissensbasierte Systeme**

208 Seiten, 107 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 2

Detlef Classe

**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montage-  
systeme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**

194 Seiten, 70 Bilder. 1988. Kartoniert.

Band 3

Friedrich-Wilhelm Nolting

**Projektiertung von Montagesystemen**

201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Kartoniert.

Band 4

Karsten Schlüter

**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz  
der Simulationstechnik**

177 Seiten, 97 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 5

Shir-Kuan Lin

**Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern**

168 Seiten, 46 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 6

Rudolf Nuss

**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem  
Laserstrahlschneiden**

206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 7

Wolfgang Scholz

**Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter  
Montageanlagen**

194 Seiten, 89 Bilder. 1989. Kartoniert.

Band 8

Hans-Jürgen Wißmeier

**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-  
Fließpreßmatrizen**

179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989. Kartoniert.

Band 9

Rainer Eisele

**Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der  
Produktion**

183 Seiten, 86 Bilder. 1990. Kartoniert.

Band 10

Rolf Pfeiffer

**Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der  
Schraubtechnik**

216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990. Kartoniert.

- Band 11  
Herbert Fischer  
**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung**  
201 Seiten, 82 Bilder. 1990. Kartoniert.
- Band 12  
Gerhard Kleineidam  
**CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung**  
203 Seiten, 107 Bilder. 1990. Kartoniert.
- Band 13  
Frank Vollertsen  
**Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**  
XIII + 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990. Kartoniert.
- Band 14  
Stephan Biermann  
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern**  
VIII + 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 15  
Uwe Geißler  
**Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**  
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 16  
Frank Oswald Hake  
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen**  
XIV + 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 17  
Herbert Reichel  
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**  
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 18  
Josef Scheller  
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen**  
198 Seiten, 65 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 19  
Arnold vom Ende  
**Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize**  
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 20  
Joachim Schmid  
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern**  
XIV + 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991. Kartoniert.
- Band 21  
Egon Sommer  
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen**  
188 Seiten, 102 Bilder. 1991. Kartoniert.
- Band 22  
Georg Geyer  
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage**  
192 Seiten, 112 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 23

Rainer Flohr

**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)**

186 Seiten, 79 Bilder. 1991. Kartoniert.

Band 24

Alfons Rief

**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**

VI + 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991. Kartoniert.

Band 25

Christoph Thim

**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation**

188 Seiten, 74 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 26

Roland Müller

**CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**

141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 27

Günther Schäfer

**Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung**

195 Seiten, 76 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 28

Martin Hoffmann

**Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen**

149 Seiten, 89 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 29

Peter Hoffmann

**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen :  
Prozeführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen**

186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992. Kartoniert.

Band 30

Olaf Schrödel

**Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen**

180 Seiten, 84 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 31

Hubert Reinisch

**Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten**

**Geräteprogrammierung in Roboterzellen**

XI + 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 32

Brigitte Bärnreuther

**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**

XI + 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. Kartoniert.

Band 33

Joachim Hutfless

**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**

175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 34

Uwe Günzel

**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung**

XIV + 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 35  
Bertram Ehmann  
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener  
Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**  
XV + 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 36  
Harald Kolléra  
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems  
für das Laserstrahlschneiden**  
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993. Kartoniert.

Band 37  
Stephanie Abels  
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen  
in einem integrierten Simulationssystem**  
188 Seiten, 88 Bilder. 1993. Kartoniert.

Band 38  
Robert Schmidt-Hebbel  
**Laserstrahlbohren durchflußbestimmender  
Durchgangslöcher**  
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993. Kartoniert.

Band 39  
Norbert Lutz  
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit  
XeCl-Excimerlaserstrahlung**  
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994. Kartoniert.

Band 40  
Konrad Grampp  
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an  
Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**  
178 Seiten, 88 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 41  
Martin Koch  
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung  
in der Investitionsgüterindustrie**  
169 Seiten, 68 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 42  
Armin Gropp  
**Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem  
gepulsten Nd:YAG-Laser**  
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 43  
Werner Heckel  
**Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biege winkelmessung  
mit dem Lichtschnittverfahren**  
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 44  
Armin Rothhaupt  
**Modulares Planungssystem zur Optimierung  
der Elektronikfertigung**  
180 Seiten, 101 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 45  
Bernd Zöllner  
**Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion**  
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 46  
Bodo Vormann  
**Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung  
komplexer Blechblegteile**  
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 47  
Peter Schnepf  
**Zielkostenorientierte Montageplanung**  
144 Seiten, 75 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 48  
Rainer Klotzbücher  
**Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung  
in flexiblen Fertigungssystemen**  
156 Seiten, 62 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 49  
Wolfgang Greska  
**Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen**  
144 Seiten, 96 Bilder. 1995. Kartoniert.

Band 50  
Jörg Franke  
**Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien  
für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)**  
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 51  
Franz-Josef Zeller  
**Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter**  
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995. Kartoniert.

Band 52  
Michael Solvie  
**Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen**  
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 53  
Robert Hopperdietzel  
**Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie**  
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996. Kartoniert.

Band 54  
Thomas Rebhahn  
**Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern –  
Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen**  
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 55  
Henning Hanebuth  
**Laserstrahlhärten mit Zweistrahltechnik**  
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 56  
Uwe Schönherr  
**Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen  
mit kooperierenden Robotern**  
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 57  
Stefan Holzer  
**Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung**  
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 58  
Markus Schultz  
**Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen**  
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 59  
Thomas Krebs  
**Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell**  
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1996. Kartoniert.

Band 60  
Jürgen Sturm  
**Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion**  
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert.

Band 61  
Andreas Brand  
**Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)**  
182 Seiten, 100 Bilder. 1997. Kartoniert

Band 62  
Michael Kauf  
**Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokussparameter einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage**  
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997. Kartoniert

Band 63  
Peter Steinwässer  
**Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung**  
190 Seiten, 87 Bilder. 1997. Kartoniert.

Band 64  
Georg Liedl  
**Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion**  
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997. Kartoniert.





