

Herausgeber:

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

Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik

Henning Hanebuth

55

Hanebuth

**Laserstrahlhartlöten mit
Zweistrahls-technik**

ISSN 1431-6226
ISBN 3-87525-074-5



Henning Hanebuth

*Laserstrahlhartlöten mit
Zweistrahls-technik*

Henning Hanebuth

*Laserstrahlhartlöten mit
Zweistrahls-technik*

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: 22. Dezember 1995
Tag der Promotion: 11. April 1996
Dekan: Prof. Dr. H. Stoyan
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. M. Geiger
Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Hanebuth, Henning:

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik / Henning

Hanebuth. - Bamberg : Meisenbach, 1996

(Fertigungstechnik - Erlangen ; 55)

Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1996

ISBN 3-87525-074-5 ISSN 1431-6226

NE: GT

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 1996

Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf

Printed in Germany

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. M. Geiger, dem Ordinarius dieses Lehrstuhls, für die Möglichkeit zur Bearbeitung dieses Forschungsprojektes. Das mir entgegengebrachte große Vertrauen erlaubte die Durchführung der Arbeiten mit umfassender Eigenverantwortung. Ebenso herzlich bedanke ich mich für die wissenschaftliche Betreuung, die kritische Durchsicht des Manuskriptes und die Übernahme des Hauptreferats.

Für die Übernahme des Koreferats und die Diskussion der Arbeit bedanke ich mich sehr herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Feldmann, dem Inhaber des Lehrstuhls für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik.

Darüberhinaus bedanke ich mich bei allen Kollegen, Mitarbeitern und Studenten, die durch Anregungen und ihre Mitarbeit zur Entstehung der Arbeit beigetragen haben. Insbesondere danke ich den Mitgliedern der Abteilung "Lasertechnik", für die stete Diskussionsbereitschaft und die Dienste als Lektoren. Erwähnen möchte ich die gute Zusammenarbeit in einer freundschaftlichen Arbeitsatmosphäre mit meinen Kollegen Herrn Michael Kauf und Herrn Andreas Otto.

Im weiteren gilt mein Dank dem Bundesminister für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie sowie den Firmen: BMW AG, Mercedes Benz AG, Adam Opel AG, Firma Heinz Kleiber, Haas-Laser GmbH, Precitec GmbH und Degussa AG. Ihre Bereitstellung von Sach- und Geldmitteln ermöglichte die Durchführung der Untersuchungen im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes "Präzisionsbearbeitung mit Festkörperlasern: Fügen".

Die abschließende Danksagung gebührt meinen Eltern, die mir durch ihre Unterstützung und Förderung eine akademische Laufbahn ermöglicht haben sowie meiner Lebensgefährtin Frau Anke Bost, deren Verständnis und Ermutigung auf meinem Weg zur Promotion sehr hilfreich für mich war.

Erlangen, im Dezember 1995

Henning Hanebuth

Inhaltsverzeichnis		Seite
0	Abkürzungen und Formelzeichen	9
1	Einleitung	11
2	Stand der Kenntnisse	13
2.1	Nd:YAG-Laser	13
2.2	Strahlführung und -formung	16
2.3	Hartlöten	18
2.3.1	Grundlagen des Hartlötens	20
2.3.2	Hartlöten im Karosserierohbau	27
2.3.3	Laserstrahlhartlöten	29
2.3.4	Absorption von Laserstrahlung und resultierende Temperaturverteilung	30
2.3.5	Anwendungen des Laserstrahlhartlötens	34
3	Zielsetzung der Arbeit	35
4	Versuchseinrichtungen	37
4.1	Laseranordnung	38
4.2	Strahlführung und -formung	40
4.3	Führungsmaschine	44
4.4	Bearbeitungskopf	45
4.5	On-line Prozeßregelung	46
4.6	Lotzuführeinrichtungen	48
4.6.1	Lotdrahtzuführung	48
4.6.2	Heißdrahtzuführung	50
4.6.3	Lotpulverzuführung	51
4.7	Schutzgaszuführeinrichtung	53
4.8	Temperaturmeßeinrichtungen	
5	Versuchswerkstoffe, -durchführung und -auswertung	55
5.1	Versuchswerkstoffe	55
5.1.1	Grundwerkstoffe	55
5.1.2	Lotwerkstoffe	55
5.2	Versuchsdurchführung	56
5.3	Beurteilung der Bearbeitungsqualität	59
6	Ergebnisse zur Prozeßführung	67
6.1	Einfluß und Auswahl des Schutzgases	67
6.2	Justage von Laserstrahlen, Lotdraht- und Schutzgaszuführung	70
6.2.1	Justage der Laserstrahlen	70
6.2.2	Justage von Lotdraht- und Schutzgaszuführung	75
6.3	Prozeßfenster zum Laserstrahlhartlöten	81
6.4	On-line Prozeßregelung	85

7	Eigenschaften laserstrahlhartgelöteter Verbindungen	91
7.1	Füllgrad im Spalt	91
7.1.1	Einfluß der räumlichen Nahtorientierung	92
7.1.2	Einfluß der Spaltbreite	94
7.2	Metallurgie	96
7.2.1	Diffusionszone	97
7.2.2	Härteverläufe	101
7.2.3	Poren und Oberflächenrisse	105
7.3	Festigkeit	108
7.3.1	Zugfestigkeit und Bruchdehnung	108
7.3.2	Zugscherfestigkeit	112
7.4	Thermischer Verzug	115
7.4.1	Einflußgrößen auf den thermischen Verzug	116
7.4.2	Einordnung des Laserstrahlhartlötens gegenüber anderen Fügeverfahren	119
7.5	Bearbeitungsbeispiele	121
8	Maßnahmen zur Steigerung der Nahtqualität und Prozeßeffizienz	125
8.1	Hartlöten mit Nahtwurzelschutz	125
8.2	Hartlöten mit vorgeheiztem Lotdraht	127
8.3	Hartlöten mit Pulverlot	130
9	Zusammenfassung	133
10	Literatur	137
11	Anhang	149

0 Abkürzungen und Formelzeichen

Die Abkürzungen und Formelzeichen sind in Anlehnung an die Normen DIN 18730 [1] und DIN EN ISO 11145 [2] gewählt.

Abkürzungen

C	Lichtleitfaserkern	m	Moden
cw	kontinuierlicher Laserbetrieb	MIG	Metall-Inertgas
GW	Grundwerkstoff	NA	Numerische Apertur
LN	Lötnaht	pw	Pulsbetrieb
M	Lichtleitfasermantel	S	Lichtleitfaserschutz

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
A	--	Absorptionsgrad
A_w	mm ²	Laserstrahlwirkfläche
b_s	mm	Spaltbreite
b_u	mm	Überlappbreite
$d_0(86\%)$	mm	Strahlendurchmesser mit 86 % der gesamten Strahlenergie
d_F	mm	Fokusbereich
F_s	%	Füllgrad im Spalt
I	W/cm ²	Intensität
I_c	W/cm ²	kritische Intensität
I_0	W/cm ²	Intensität des Rohstrahls
I_F	W/cm ²	Intensität im Fokus
K	--	Strahlkennzahl
K_p	--	Gleichgewichtskonstante
$K_{P,PI}$	--	Verstärkungsfaktor für P- bzw. PI-Regler
$d_{D,X,Y,Z}$	mm	Abstand der Lotdrahtzuführung
m_{ZW}	g/min	Fördermenge des Lotes
n	--	Brechungsindex
n_0	--	Brechungsindex Luft
n_M	--	Brechungsindex Lichtleitfasermantel
n_C	--	Brechungsindex Lichtleitfaserkern
PH_2	Pa	Partialdruck Wasserstoff
PH_2O	Pa	Partialdruck Wasser
p_k	MPa	kapillarer Fülldruck (hydrostatischer Druck)
$P_{LL,R}$	W	Laserstrahlleistung vom linken bzw. rechten Laser
$P_{L1,2}$	W	Laserstrahlleistung von Laser 1 bzw. 2

$P_{R1,2}$	W	Startwert der Laserstrahlleistung am Regler für Laser 1 bzw. 2
R	--	Reflexionsgrad
R	°	Nahtdrehwinkel
r	mm	Radius
r_{Lmin}	mm	minimaler Biegeradius der Lichtleitfaser
r_0	mm	Radius Rohstrahl
r_1	mm	Radius der Faser (Strahleintrittsseite)
r_2	mm	Radius der Faser (Strahlaustrittsseite)
r_F	mm	Radius im Fokus
S	°	Nahtneigungswinkel
s	mm	Blechdicke
T_A	°C	Arbeitstemperatur
$T_{I,L,R}$	V	Isttemperatursignal für den Laser links bzw. rechts
$T_{I1,2}$	V	Isttemperatursignal für Laser 1 bzw. 2
T_S	°C	Schmelztemperatur
$T_{SL,R}$	V	Solltemperatursignal für den Laser links bzw. rechts
$T_{S1,2}$	V	Solltemperatursignal für Laser 1 bzw. 2
t_N	s	Nachstellzeit des PI-Reglers
V_{SG}	l/h	Durchflußmenge des Schutzgases
v_S	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
v_D	mm/s	Lotzuführgeschwindigkeit
X, Y, Z	mm	Koordinaten
z_F	mm	Fokuslage relativ zur Blechoberfläche
z_R	mm	Rayleighlänge
α	°	Benetzungswinkel
$\beta_{Y,Z}$	°	Zuführwinkel Lot und Schutzgas
$\Delta_{LX,Y}$	mm	Abstand Laserstrahlintensitätsmaximum
ΔG	kcal/Mol	freie Standardbildungsenthalpie
ε	--	Emissionsfaktor
Θ	mrاد	Divergenz, Öffnungswinkel
Θ_F	mrاد	Fokussierwinkel
Θ_A	mrاد	Akzeptanz- bzw. Aperturwinkel
Θ_g	mrاد	Grenzwinkel
$\vartheta_{L1,2}$	°	Lasereinstrahlwinkel bezogen auf die Vorschubrichtung von Laser 1 bzw. 2
λ	μm	Wellenlänge
ρ	g/cm^3	Dichte
σ	--	Standardabweichung
σ_A	N/mm^2	Haftspannung
σ_{GF}	N/mm^2	Oberflächenspannung zwischen Grundwerkstoff und Löt-hilfsstoffen
σ_{GL}	N/mm^2	Oberflächenspannung zwischen Grundwerkstoff und Lot
σ_{LF}	N/mm^2	Oberflächenspannung zwischen Lot und Löt-hilfsstoffen
$\Phi_{L1,2}$	°	Lasereinstrahlwinkel bezogen auf die Oberflächennormale von Laser 1 bzw. 2

1 Einleitung

Als T.H. Maiman 1960 den ersten funktionsfähigen Rubinlaser schuf, und diese Entwicklung schon bald als Bohrgerät für Uhrensteine Eingang in die industrielle Fertigung fand, leitete er damit die Ära eines vollständig neuartigen Werkzeugs ein. Durch die kontinuierliche Entwicklung und Verbesserung der bestehenden Lasertypen eroberte sich der Laser heute eine feste Position als Werkzeug zum Trennen und Fügen und wird teilweise sogar zum Ändern der Stoffeigenschaften sowie Materialumformen und Urformen eingesetzt [3-6].

Neben dem CO₂-Laser, der sich wegen seiner hohen verfügbaren Ausgangsleistungen und guten Strahlqualität industriell weitgehend durchgesetzt hat, konnte sich in jüngster Zeit auch der Nd:YAG-Laser insbesondere in der Mikro- und Dünnschleifbearbeitung etablieren. Eine höhere Absorption der Laserstrahlung bei metallischen Werkstoffen und der technische Vorteil der Strahlführung über Lichtleitkabel aus Glasfasern sowie die Entwicklung von Nd:YAG-Lasern bis zu mehreren Kilowatt sowohl im gepulsten als auch im cw-Betrieb haben den Marktvorsprung des CO₂-Lasers in vielen Anwendungsbereichen merklich verringert [7, 8]. Die absehbare Markteinführung von kostengünstigen diodengepumpten Nd:YAG-Lasern im Kilowattbereich erlaubt eine Zukunftsprognose, die eine Erweiterung des industriellen Anwendungsbereiches des Nd:YAG-Lasers erwarten läßt [3, 9, 10].

Die Hauptanwendungsgebiete des Lasers in der Materialbearbeitung liegen beim Trennen und Fügen, sowohl mit CO₂- als auch mit Nd:YAG-Lasern [11]. Bei den Fügetechniken haben im Vergleich zum Schweißen das Lötens und das laserunterstützte Kleben noch wenig Einsatz gefunden. Die Vorteile des Lasers für Lötanwendungen, lokal eng begrenzte Energieeinbringung und gute Steuer- und Regelbarkeit, wurden zuerst für das Weichlöten von elektronischen Komponenten, wie z.B. SMD-Bauteilen, entdeckt [12]. Auch das Hartlöten mittels Laserstrahl wurde schon Anfang der 80iger Jahre auf seine Eignung für das Verbinden empfindlicher elektronischer Komponenten untersucht [13]. Erst gegen Ende der 80iger Jahre gab es Bestrebungen, das Laserstrahlhartlöten auch im Bereich des Maschinenbaus einzusetzen [14].

Bislang existieren nur vereinzelte, nicht maschinenbauliche Anwendungen zum Laserstrahlhartlöten (siehe Abschnitt 2.3.5). Das Laserstrahlhartlöten wird für das Fügen von dünnwandigen Metallen empfohlen sowie bei Verbindungen mit angrenzenden temperaturempfindlichen Bauteilen [15].

Durch das Laserstrahlhartlöten ergeben sich neue konstruktive und fertigungstechnische Möglichkeiten. Im Vergleich zum konventionellen Hartlöten, bei dem das gesamte Werkstück, bzw. große Teile des Werkstücks, erwärmt werden, führt der Laserstrahl seine Energie sehr lokal auf Bereiche mit geringen Abmessungen zu. Wärmeempfindliche Werkstoffe, wie z.B. Kunststoffe, Glas oder Keramiken können sich demnach in unmittelbarer Umgebung der Lötstelle befinden. Der zu erwärmende Bereich kann über die Wirkfläche des Laserstrahls von einem Durchmesser im μm -Bereich im Fokus des Strahls bis hin in den Zentimeterbereich variiert werden. Sowohl für gepulste als auch für kontinuierlich betriebene Nd:YAG-Laser bestehen über einen akustooptischen Modulator oder über den Anregungsstrom einfache Eingriffsmöglichkeiten zur Steuerung der Laserleistung und somit zur Regelung eines Laserbearbeitungsprozesses [16, 17].

Die vorliegende Arbeit ist motiviert von einer aktuellen Problemstellung im Automobilbau. Im Karosserierohbau werden in der Großserie Reparurnähte und Nähte, die im späteren Sichtbereich der Karosserie liegen, manuell gelötet. Dies führt zu Qualitätseinbußen und erfordert zeit- und kostenintensive Nachbearbeitungsverfahren. Aus diesem Grund sollen die Lötverbindungen der Karosseriebauteile vollautomatisiert hergestellt werden. Dabei muß sich das Hartlötwerkzeug den unterschiedlichsten Stoßgeometrien anpassen. Die Lotmenge ist automatisch und den Stoßtoleranzen angepaßt, zur Verfügung zu stellen. Für die Benetzungsfähigkeit des Grundwerkstoffes durch das Lot muß Vorsorge getroffen werden.

2 Stand der Kenntnisse

Im folgenden werden der Aufbau und die Wirkungsweise von Nd:YAG-Lasern, die Laserstrahlübertragung mittels Lichtleitfasern und die Strahlformung erläutert. In den anschließenden Abschnitten wird eine Einführung in die Technologie des Hartlötens gegeben. Nach einer Abgrenzung des Fertigungsverfahrens Hartlötens gegen andere stoffschlüssige Fügeverfahren und dem Aufzeigen seiner Vor- und Nachteile folgen die Grundlagen des Hartlötens. Die spezielle Problematik des Hartlötens im Karosserierohbau ist Ansatz der durchgeführten Untersuchungen zum Laserstrahlhartlöten und wird aufgrund dessen in einem eigenen Abschnitt beschrieben. Abschließend werden kurz die Unterschiede des Laserstrahlhartlötens zum konventionellen Lötens aufgezeigt und heutige Anwendungen des Laserstrahlhartlötens vorgestellt.

2.1 Nd:YAG-Laser

Das physikalische Wirkprinzip von Nd:YAG-Lasern wird in einer Vielzahl wissenschaftlicher Arbeiten und Lehrbüchern ausführlich beschrieben [z.B. 4, 18, 19]. Es folgt eine knappe Beschreibung der Wirkungsweise und Funktion unter Berücksichtigung maschinenbaulicher Ausführungen.

Der Nd:YAG-Laser gehört zu den Festkörperlasern und ist aufgrund seiner Strahleigenschaften und verfügbaren Leistung in dieser Typenklasse der bedeutendste Laser für die Materialbearbeitung. Einsatz finden überwiegend gepulste Systeme mit Pulsspitzenleistungen bis zu 5 kW, die mittels Güteschaltung beispielsweise durch Pockelzellen sogar Leistungen bis in den MW-Bereich bereitstellen [20, 21]. Kontinuierlich betriebene Nd:YAG-Laser werden kommerziell bereits bis 4 kW vertrieben, im Labor wurden aber auch höhere Leistungen bis 5 kW realisiert, allerdings unter Einbuße der Strahlqualität [22, 23].

Das laseraktive Medium des Nd:YAG-Lasers ist ein dotierter Kristall aus Yttrium-Aluminium-Granat ($Y_3Al_5O_{12}$), bei dem im Kristallgitter Y^{3+} -Ionen durch Nd^{3+} -Ionen (Neodym) ersetzt werden. Durch breitbandige optische Anregung zwischen 0,5 und 0,9 μm werden die Nd^{3+} -Ionen, die in einer Dotierungskonzentration von zwischen 0,5 % und 1,5 % im Kristall vorliegen, angeregt. Die zugehörigen Energieniveaus liegen entsprechend dem Termschema eines sogenannten 4-Niveau-Lasers oberhalb des oberen Laserniveaus. Nach einer schnellen Relaxation auf das relativ langlebige obere Laserniveau (Lebensdauer ca. 250 μs , bei 1 % Dotierung), erfolgt der eigentli-

che Laserübergang auf das untere Laserniveau unter Emission der technisch genutzten Wellenlänge $\lambda=1,064 \mu\text{m}$ [4, 19].

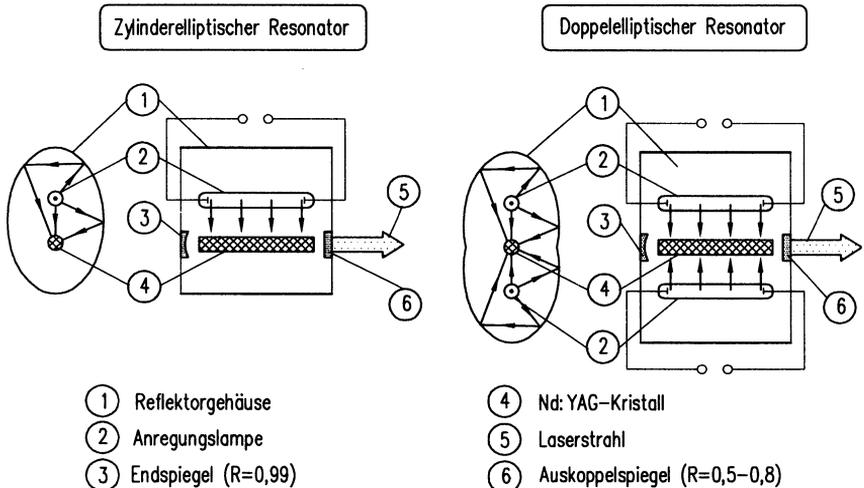


Bild 2.1: Schematische Darstellung elliptischer Nd:YAG-Laserresonatoren (nach [2, 4])

Nd:YAG-Laser können sowohl gepulst (pw-Betrieb, pw: pulsed wave) als auch kontinuierlich (cw-Betrieb, cw: continuous wave) betrieben werden. Für den Pumpvorgang werden entsprechend der Betriebsart Krypton- oder Xenon-Blitzlampen (Pulsbetrieb) oder Krypton-Bogenlampen (kontinuierlicher Betrieb) verwendet. Um einen möglichst günstigen Wirkungsgrad der Anregung zu erhalten, sind die stabförmigen Lampen in einfach- oder doppelelliptischen Reflektoren achsparallel und konfokal zu dem in der Regel zylinderförmigen Nd:YAG-Kristall angeordnet, **Bild 2.1**. Das Pumplicht gelangt dadurch teilweise direkt und teilweise durch Reflexionen an dem gold- oder silberbeschichteten Reflektor in den Nd:YAG-Stab, der sich in der Brennpunktlinie des Reflektors befindet. Reflektor, Pumplampen und Nd:YAG-Stab bilden die Kavität des Lasers. Der End- und der Auskoppelspiegel begrenzen konstruktiv den Resonator, in dessen Mitte sich die Kavität befindet. Im Resonator wird das vom Laserstab emittierte Licht entlang der Resonatorachse beim wiederholten Durchlaufen des laseraktiven Mediums verstärkt.

Obwohl eine breitbandige optische Anregung über die Pumplampen erfolgt, mit den dominierenden Absorptionsbanden im Spektralbereich bei $0,81 \mu\text{m}$ und $0,75 \mu\text{m}$, kommt es nur zu einer geringen Ausnutzung der Anregungsbanden. Ein großer Teil der absorbierten Anregungsenergie wird im Nd:YAG-Stab in Wärme umgewandelt und beschränkt u.a. den Wirkungsgrad lampengepumpter Nd:YAG-Laser auf weniger als 4 %. Die Wärmeabfuhr erfolgt über die Mantelfläche des Zylinders und verursacht so einen ungleichmäßigen Temperaturgradienten über dem Querschnitt des Stabes. Dies führt zu einer thermisch bedingten Längenänderung des Stabes und damit zu einer Änderung des Brechungsindex in Abhängigkeit der Temperatur. Zusätzlich kommt es zu induzierten Spannungen in tangentialer und radialer Richtung (photoelastischer Effekt). Diese Erscheinungen bewirken eine leistungsabhängige Strahlqualität und verursachen große optische Aberrationen. Sie werden als "thermischer Linseneffekt" bezeichnet [24].

Aufgrund des thermischen Linseneffekts begrenzt sich die pro Nd:YAG-Stab erzielbare Ausgangsleistung auf ca. 500 W. Zur Erzielung hoher Ausgangsleistungen und guter Strahlqualitäten werden deshalb mehrere Nd:YAG-Stäbe in einem Laser integriert. Diese werden als Mehrstabsysteme in einem Resonator oder in einer Oszillator-Verstärker-Konfiguration hintereinander geschaltet. Auch durch das Zusammenführen mehrerer eigenständiger, gepulst oder kontinuierlich arbeitender Laserstrahlen in einen Strahlengang, bzw. durch parallele Faserkopplung, läßt sich eine Steigerung der Ausgangsleistung erreichen [25, 26]. Andere Laserkonzepte basieren auf veränderten Formen des laseraktiven Mediums. So wurden Laserstrahlquellen mit platten- ("slab") oder rohrförmigen Nd:YAG-Kristallen realisiert [27, 28].

Die spektrale Anpassung des Pumplichts an die Absorptionsbanden des Nd:YAG-Kristalls erlaubt eine wesentliche Verbesserung des Gesamtwirkungsgrades des Nd:YAG-Lasers. Umgesetzt wurde dieses Erkenntnis in Form von diodengepumpten Nd:YAG-Lasern [29-31]. Bei diesem neuen Anregungskonzept wird vorzugsweise mit GaAlAs-Laserdioden im Spektralbereich der stärksten Absorptionsbanden des Nd^{3+} -Ions (780 nm bis 820 nm) gepumpt. Die schmale spektrale Linienbreite dieser Dioden (2 nm) und die Temperaturabhängigkeit der Emissionswellenlänge der Dioden (0,3 nm/K) erlaubt eine präzise Abstimmung der Pump Laseremission auf eine Absorptionslinie des Festkörpermateri als [32]. Die Anregung des stab- oder slabförmigen laseraktiven Kristalls kann dabei in longitudinaler oder transversaler Pumpgeometrie erfolgen. Die longitudinale Anordnung erlaubt im Gegensatz zur transversalen eine modenselektive Anregung, ist aber aufgrund der Bruchgrenze des Kristallmaterials in ihrer Ausgangsleistung limitiert auf etwa 100 W. Eine Skalierung zu wesentlich höheren Leistungen kann mit der transversalen Anordnung realisiert werden. Derzeit liegt die höchste mittlere Ausgangsleistung für diodengepumpte Laser bei ca. 1 kW,

bei Gesamtwirkungsgraden von bis zu 6,5 % [32, 33]. Durch die Verwendung von platzsparenden Dioden für die Anregung und aufgrund der geringen thermischen Belastung im Vergleich zu lampengepumpten Systemen, können in vielen Fällen auf eine Wasserkühlung des laseraktiven Materials verzichtet und eine kompaktere Bauform des Lasers ermöglicht werden [34].

2.2 Strahlführung und -formung

Die Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers transmittiert kostengünstige Quarzglasoptiken. Für Linsensysteme kommt insbesondere Borosilikatglas (z.B. BK-7) in Verbindung mit speziellen Beschichtungen zur Reduzierung der Grenzflächenreflexion zum Einsatz. Aufgrund der geringen Dämpfung dieser Gläser ist eine Transmission von bis zu 99 % (bei $\lambda=1,064 \mu\text{m}$) erzielbar [29, 30, 35].

Für die Strahlübertragung, insbesondere bei der räumlichen Bearbeitung, erlauben Nd:YAG-Laser die Verwendung von Lichtleitfasern. Der Lichtleitfaserkern für Übertragungen im Hochleistungsbereich bei Wellenlängen von $\lambda < 2 \mu\text{m}$ besteht aus Quarzglas mit typischen Durchmessern zwischen $200 \mu\text{m}$ und $1000 \mu\text{m}$ und Längen von 10 bis 20 m. Allerdings wurden auch schon Faserlängen bis 200 m [36] eingesetzt. Die Zerstörschwelle liegt bei kontinuierlicher Belastung durch einen cw-Strahl bei einer Intensität von 100 MW/cm^2 [4, 20, 25].

Die Führung von Laserstrahlung durch eine Faser beruht auf dem Prinzip der Totalreflexion beim Auftreffen auf eine Grenzfläche zwischen dem optisch dichteren Fasermantel und dem optisch dünneren Faserkern, **Bild 2.2**. Für die Materialbearbeitung mit Nd:YAG-Lasern werden 2 Fasertypen verwendet: die Stufenindex- und die Gradientenindexfaser. Sie unterscheiden sich im Verlauf des Brechungsindex über dem Faserquerschnitt [20, 25]. Die Stufenindexfaser weist einen abrupten Sprung des Brechungsindex zwischen Mantel und Kern auf. Sind n_C und n_M die Brechungsindizes der beiden Teilbereiche der Faser, so erfolgt Totalreflexion, wenn der Einfallswinkel auf die Grenzfläche größer als der durch

$$\sin\Theta_g = \frac{n_M}{n_C} \quad (2.1)$$

gegebene Grenzwinkel ist. Laserstrahlung breitet sich im Faserkern nur unter den Winkeln aus, bei denen es zu einer konstruktiven Interferenz der Lichtwellen, der

sogenannten Eigenwellen (Moden), kommt. Bedingt durch den zur Wellenlänge relativ großen Faserkerndurchmesser können sich mehrere Moden - mit unterschiedlichen Laufzeiten (im ns-Bereich) in der Faser - gleichzeitig ausbilden. Auch die Polarisation des Strahls bleibt hierbei nicht erhalten [4, 36]. Für die Materialbearbeitung bewirkt dieser Effekt einen flacheren Verlauf des Intensitätsprofils nach der Faser, verursacht durch die Überlagerung der verschiedenen Moden [20, 25, 37].

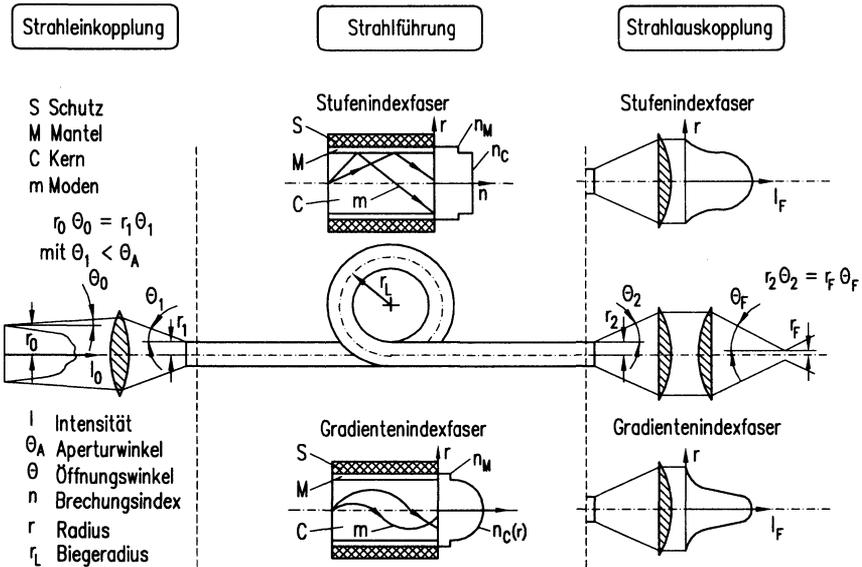


Bild 2.2: Prinzip der Laserstrahlübertragung mittels Lichtleitfaser (nach [2-4])

Bei der Gradientenindexfaser nimmt der Brechungsindex kontinuierlich vom Faserzentrum zum Mantel hin ab. Durch diesen Gradienten werden die verschiedenen Laufzeiten der einzelnen Moden teilweise ausgeglichen. Die Moden niedriger Ordnung bewegen sich überwiegend im zentralen Bereich mit hohem Brechungsindex, wodurch die Ausbreitungsgeschwindigkeit reduziert wird. Für die Materialbearbeitung ergibt sich daraus ein steileres Strahlprofil mit einer nahezu gaußförmigen Intensitätsverteilung, das für die Bearbeitung besonders feiner Konturen geeignet ist [38, 39].

Für die Einkopplung des Laserstrahls in eine Lichtleitfaser wird dieser mittels einer Linse auf die Stirnfläche des Faserendes fokussiert. Dabei darf der Öffnungswinkel

des auftreffenden Laserstrahls aus der Umgebungsatmosphäre ($n_0=1$) beim Einkoppeln in die Faser den maximal zulässigen Einstrahlwinkel Θ_A (Akzeptanz- oder Aperturwinkel) nicht überschreiten. Mit dem Sinus dieses Winkels erhält man die numerische Apertur als Kenngröße einer Lichtleitfaser, gegeben durch

$$\sin\Theta_A = \sqrt{n_C^2 - n_M^2} . \quad (2.2)$$

Die Formung des aus der Faser austretenden Laserstrahls erfolgt mittels entsprechender Optiken. Die aus der Faser austretende Laserstrahlung wird mit Hilfe eines Linsensystems auf das Werkstück fokussiert. Faserkerndurchmesser und Abbildungsverhältnis bestimmen den erzielbaren Brennfleckdurchmesser. Fokustage und Fokusbereich sind dann unabhängig von der Leistung, so daß Auswirkungen des thermischen Linseneffektes mit Hilfe einer Lichtleitfaser kompensiert werden können [4, 40, 41].

Die wichtigsten Kenndaten von Lichtleitfasern, wie Brechzahlprofil, spektrale Dämpfung, Grenzwellenlängen, etc., können mit Hilfe von meßtechnischen Verfahren bestimmt werden [42]. Die Dämpfungs- und damit Transmissionsverluste innerhalb der Lichtleitfaser sind gering und betragen beispielsweise bei einer Faser von 10 m Länge ca. 2 %. Die größten Verluste entstehen bei der Ein- und Auskopplung durch Grenzflächenreflexionen mit jeweils ca. 5 % [25]. Der Biegeradius einer Lichtleitfaser ist begrenzt. Im Bereich einer Faserkrümmung verringert sich der Einfallswinkel. Wird der zulässige Einfallswinkel (vgl. Gleichung 2.1) unterschritten, besteht die Gefahr des Strahlaustritts aus der Faser [4]. So liegt der minimale Biegeradius r_{Lmin} für eine Faser mit einem Kerndurchmesser von 600 μm bei $r_{\text{Lmin}}=200 \text{ mm}$ [36]. Schwingungen der Lichtleitfaser haben keinen Einfluß auf die Strahlübertragung.

2.3 Hartlöten

Nach DIN 8505 ist das Löten ein thermisches Verfahren zum stoffschlüssigen Verbinden und Beschichten von Werkstoffen, bei dem eine flüssige Phase durch Schmelzen eines Lotes (Schmelzlöten) oder Diffusion an den Grenzflächen (Diffusionslöten) entsteht. Die Solidustemperatur der Grundwerkstoffe wird nicht erreicht. Das Hartlöten ist dabei definiert als Löten mittels Loten, deren Liquidustemperatur oberhalb von 450°C liegt [43].

In **Bild 2.3** sind Auszüge aus Ergebnissen zum Thema "Fügetechniken im Vergleich" [44] dargestellt. Dabei wurden u.a. die stoffschlüssigen Fügeverfahren Hartlöten und

Schweißen hinsichtlich der fügbaren Werkstoffe und Bauteiformen, der fertigungs-technischen und wirtschaftlichen Merkmale sowie der Möglichkeit für die Qualitäts-sicherung verglichen. Unter dem Begriff Lichtbogenschweißen wurden die Verfahren Metalllichtbogenschweißen mit umhüllter Elektrode, Unterpulver-Schweißen, MIG-, MAG- und WIG-Schweißen zusammengefaßt.

<i>Lichtbogenschweißen</i>	○	+	+	++	++	+	++	+	+	-	-	-	○	○	○	○	-	+	○
<i>Strahlschweißen*</i>	○	+	+	++	++	++	++	++	+	+	--	-	+	-	-	○	+	+	-
<i>Hartlöten</i>	+	+	○	+	+	○	○	○	+	○	-	○	++	-	○	+	+	+	+
<i>Bewertungskriterien</i>																			
Werkstoffvielfalt																			
Werkstoffflächenbereich																			
Stoßartvielfalt																			
Belastungsvielfalt																			
Statisches Tragverhalten																			
Dynamisches Tragverhalten																			
Wärmefestigkeit																			
Korrosionsverhalten																			
Fügestellenwiderstand																			
Formgenauigkeit																			
Dämpfung																			
Lösbarkeit																			
Automatisierbarkeit																			
Vorbereitungsaufwand																			
Fügeaufwand																			
Nachbehandlungsaufwand																			
Fertigungsüberwachung																			
zerstörungsfreie Prüfung																			
Instandsetzbarkeit																			

++ sehr günstig + günstig ○ mittel - ungünstig -- ungeeignet

* Elektronen- und Laserstrahlschweißen

Bild 2.3: Vergleich stoffschlüssiger Fügeverfahren (Auszug aus [29])

Vorteile gegenüber den Schweißverfahren bietet das Hartlöten hauptsächlich durch die Automatisierbarkeit und das große Spektrum der fügbaren Werkstoffe und Werkstoffkombinationen. Die Lötbarkeit eines Bauteils ergibt sich dabei durch die Löt-eignung des Grundwerkstoffes, der Lötmöglichkeit, die konstruktiv bei der Auslegung eines Bauteils berücksichtigt werden muß, und der Lötsicherheit, die sich aus der Wahl der Werkstoffe und der Konstruktion ergibt [45]. Durch die geeignete Wahl der Zusatzwerkstoffe wie Flußmittel, Lötatmosphäre und Lot können selbst nichtschweiß-bare Metalle verbunden werden [46]. Insbesondere dünnwandige komplexe Bauteile werden bei gegebener Lötbarkeit vorzugsweise hartgelötet [47]. Das Hartlöten wird auch dann als Fügemethode gegenüber dem Schweißen bevorzugt, wenn Stahlbleche mit metallischen Überzügen zu verbinden sind. Aufgrund der prozeßtechnischen Eigenschaften konventioneller Hartlötenverfahren werden die zu verbindenden Werk-stoffe und damit auch die metallischen Überzüge nur in geringem Umfang durch die Prozeßwärme beeinflußt [48, 49]. Die Lösbarkeit der Lötverbindungen erleichtert eine Demontage für Wiederverwendung und Instandsetzung. Der Nachbehandlungsauf-wand ist durch das einfachere Entfernen der Lotraupe oder von Lotrückständen im

Vergleich zur Bearbeitung der Decklage der Schweißnaht gering. Weiterhin erlaubt eine optische Kontrolle bezüglich der Benetzung und bestimmter Fehler im Lotauftrag, wie z.B. Porenbildung, Rückschlüsse auf die Qualität einer Hartlötverbindung. [44, 50]. Das Tragverhalten und die Festigkeit von Lötverbindungen sind bei den meisten Anwendungen, insbesondere bei hohen Temperaturen, geringer als bei Schweißverbindungen. Dennoch können, je nach Wahl des Grundwerkstoffes und einer lötgerechten Konstruktion, Festigkeiten erreicht werden, die oberhalb der Festigkeit des Grundwerkstoffes liegen [51]. Allerdings erschweren das Lot und die möglichen Werkstoffkombinationen die Werkstoffreinheit und damit die Recycelbarkeit. Zusätzlich wird durch die Verbindung unterschiedlicher Werkstoffe die Kontaktkorrosion begünstigt.

2.3.1 Grundlagen des Hartlötens

Das Löten umfaßt eine Vielzahl von chemisch-physikalischen Vorgängen, die in der festen, flüssigen und gasförmigen Phase ablaufen. Dazu gehören die Reduktion, die Dissoziation, die Verdampfung und die Sublimation, die Benetzung und der Kapillarfluß, die Diffusion, die Lösung und die Plastifizierung. Diese chemisch-physikalischen Vorgänge sind Gegenstand zahlreicher Literatur [z.B. 52, 53].

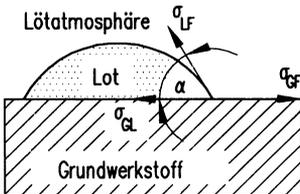
Während des Hartlötens sind drei Komponenten in einer Wechselwirkung:

- der Grundwerkstoff,
- das Lot
- und das Flußmittel bzw. Schutzgas.

Der Lötmechanismus beruht auf einer Grenzflächenreaktion im Kontaktbereich zwischen flüssiger Lot- und fester Grundwerkstoffphase. Je nach Lötzeit ist diese Grenzflächenreaktion durch die Bildung eines metallischen Kontakts, der sogenannten Benetzung, gekennzeichnet. Dabei werden atomare Kräfte wie Adhäsion und Kohäsion wirksam und es kommt zur Diffusion unter Bildung einer festen Lösung.

Bei Erreichung der Arbeitstemperatur kommt es unter Zusatz eines flüssigen oder gasförmigen Löt Hilfsmittels, dem Flußmittel oder Schutzgas, zur Ausbreitung eines flüssigen Lottropfens auf dem festen Grundwerkstoff. Bei thermodynamischem Gleichgewicht stehen in dem Dreikomponentensystem Grundwerkstoff, Lot und dem Löt Hilfsmittel, die Oberflächenspannungen zwischen dem Grundwerkstoff und dem flüssigen Lot σ_{GL} , dem Grundwerkstoff und dem Löt Hilfsmittel (Flußmittel oder Schutzgas) σ_{GF}

sowie dem flüssigen Lot und dem Löt Hilfsmittel σ_{LF} in einem Kräftegleichgewicht (vgl. **Bild 2.4**) [51, 52].



Kapillargesetz:

$$\sigma_A = \sigma_{GF} - \sigma_{GL} = \sigma_{LF} \cdot \cos \alpha$$

$$\sigma_A = \frac{h}{2} \rho_{Lot} g b_s$$

mit

α Benetzungswinkel

σ_A Haftspannung

ρ_{Lot} Dichte des Lotes

g Erdbeschleunigung

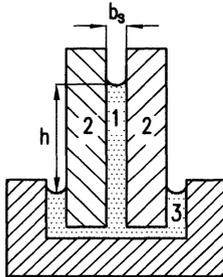
h Höhe der Lot-Säule

b_s Lötspalt

Bild 2.4: Schema des Kräftegleichgewichts bei der Benetzung [nach 50, 51, 53]

Voraussetzung für ein Fließen des geschmolzenen Lotes auf dem zu lötenden Grundwerkstoff ist, daß die Wirkung der Adhäsion gleich oder größer wird als die Kohäsionswirkung zwischen den Lotteilchen. Der sich ergebende Kontakt- oder auch Benetzungswinkel α wird zur Beurteilung der Benetzungsfähigkeit des Lotes auf dem Grundwerkstoff herangezogen. Eine vollkommene Benetzung liegt dann vor, wenn der Benetzungswinkel $\alpha=0^\circ$ ist. Mit $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ wird nur eine teilweise Benetzung erzielt und mit einem Benetzungswinkel $\alpha=180^\circ$ liegt keine Benetzung mehr vor; der Lot tropfen rollt sich aufgrund seiner Oberflächenspannung auf der Oberfläche des Grundwerkstoffes ein. Eine praktische Bedeutung für das Hartlöten haben Benetzungswinkel zwischen 0° und ca. 30° [50, 51].

Ein weiterer wichtiger Einflußfaktor beim Hartlöten ist die Lötspaltbreite b_s . Kommt es an einem zu fügenden Bauteilstoß zu einer Benetzung des Lotes auf dem Grundwerkstoff, so wird das geschmolzene Lot bei entsprechend ausgeführtem Lötspalt auch entgegen der Schwerkraft durch den kapillaren Fülldruck in den Spalt gedrückt. Dabei steigt das Lot, entsprechend seiner Viskosität, entgegen der Schwerkraft umso höher, je enger der Spalt ist. In **Bild 2.5** sind die Zusammenhänge zwischen kapillarem Fülldruck und der Spaltbreite dargestellt. Die Steighöhe ist dabei bis zu einer Spaltbreite von 0,3 mm umgekehrt proportional zur Spaltbreite. Im Spaltbreitenbereich von 0,05 bis 0,2 mm ist der kapillare Fülldruck so hoch, daß sich der Spalt von selbst füllt. Im Spaltbreitenbereich von 0,2 bis 0,5 mm kann es zu vereinzelt Fehlstellen beim Ausfüllen des Spaltes kommen, da hier der Fülldruck schon merklich geringer ist. Dieser geringe Fülldruck erfordert die Berücksichtigung der Gravitation. Lötarbeiten bei derartig großen Spaltbreiten werden deshalb meist manuell ausgeführt. Von einer Löt fuge spricht man bei Spaltbreiten oberhalb 0,5 mm [51, 53, 54].



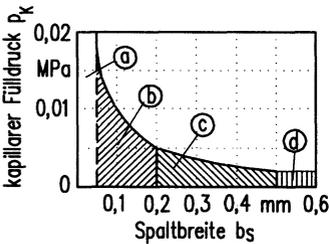
kapillarer Fülldruck:

$$p_K = \rho_{\text{Lot}} g h = \frac{2 \sigma_A}{b_s}$$

mit

- σ_A Haftspannung
- ρ_{Lot} Dichte des Lotes
- g Erdbeschleunigung
- h Höhe der Lot-Säule
- b_s Lötspalt
- p_K kapillarer Fülldruck (hydrost. Druck)

- 1 Lot
- 2 parallele feste Spaltebenen
- 3 Lotdepot



- a Spalt zu eng zum Löten mit Flußmittel
- b Spalt richtig
- c Spalt zulässig für Löten von Hand
- d Spalt zu weit

Bild 2.5: Kapillarer Fülldruck beim Löten [nach 51, 53, 54]

Das Kapillargesetz, wie es in **Bild 2.4** dargestellt ist, gilt nur für Flüssigkeiten, die in keiner Wechselwirkung mit den festen Werkstoffen stehen. Die Vorgänge während des Lötprozesses sind komplexer und können durch dieses Kapillargesetz nur annähernd beschrieben werden. Die Ausbreitung des geschmolzenen Lotes im kapillaren Füllspalt wird durch eine Reihe von Faktoren bestimmt. Während der Ausbreitung im Spalt ändern sich die Fließbedingungen des Lotes beispielsweise durch Reaktionen mit dem Grundwerkstoff. So führt das Anlösen des Grundwerkstoffes zu einer Änderung in der Konzentration der Lotbestandteile. Veränderungen der Lottemperatur und der Viskosität des Lotes sind die Folge und beeinträchtigen das Ausfüllen des Spaltes. Neben den Abmessungen und der Gleichmäßigkeit des Lötspaltes hängt das Fließen des Lotes im Lötspalt auch vom Zustand der Oberflächen und der Art und Weise der Beseitigung der Oxide ab. Beispielsweise sind bei der Beseitigung der Oxide durch reduzierende Schutzgase geringere Spaltbreiten zulässig als beim Einsatz eines Flußmittels. Für die Beurteilung der Kapillarwirkung ist zu beachten, daß kein direkter Zusammenhang zwischen der Steighöhe des flüssigen Lotes und dem auftretenden Benetzungswinkel besteht [52].

Für das Löten außerhalb eines Ofens gibt es die Verfahren des direkten und des indirekten Aufschmelzen des Lotes. Beim indirekten Aufschmelzen wird das Lot über die Bauteilerwärmung bis zur Schmelztemperatur erwärmt, ohne daß es zu einer direkten Erwärmung des Lotes durch den Energieträger, also z.B. die Flamme oder den Laser kommt. Erst die richtige Auswahl der Arbeitstemperatur gewährleistet eine gute Benetzung der Grundwerkstoffoberfläche mit dem Lot, garantiert das Ausfüllen des Lötspaltes und sichert die notwendige Reaktion des Lotes mit den zu lötenden Metallen. Beeinflusst wird die Auswahl des Arbeitstemperaturbereichs hauptsächlich durch die Schmelztemperatur des Lotes, den Reaktionscharakter der zu verlötenden Metalle, die Lotzufuhr und die verwendeten Löthilfsmittel, wie Flußmittel oder Schutzgas. Gewöhnlich ist die Arbeitstemperatur höher als die Liquidustemperatur des Lotes, kann allerdings gleich oder sogar kleiner sein (Diffusionslöten). Eine Erhöhung der Arbeitstemperatur führt zur Beschleunigung der Diffusionsprozesse und verstärkt das Anlösen des zu lötenden Grundwerkstoffes. Dies kann allerdings eine Verfestigung des zu lötenden Metalls hervorrufen und seine Erosion, Oxidation und das Ausdampfen einzelner Komponenten verursachen [51, 52, 56].

Zur Erzielung einer einwandfreien Lötung muß neben der Einstellung der geeigneten Arbeitstemperatur die zu benetzende Metalloberfläche frei von Verunreinigungen wie adsorbiertem Wasser und Gasen, aber vor allem von Oxiden sein. Adsorbierte Gase und Wasser verflüchtigen sich beim Erwärmen des Metalls. Eine Oxidschicht kann entweder mechanisch entfernt oder unter Einwirkung eines Flußmittels oder einer geeigneten Lötatmosphäre reduziert werden. Flußmittel sind, vor allem wenn sie Halogenverbindungen enthalten, sehr aggressiv und hygroskopisch. Sie wirken korrodierend, falls Feuchtigkeit an die Lötstelle gelangt. Aufgrund dessen ist eine vollständige Entfernung der Flußmittelreste nach dem Löten notwendig. Die Wirkungsweise, Auswahl und Handhabung geeigneter Flußmittel ist in DIN 8511 [55] beschrieben und soll hier für die Untersuchung eines flußmittelfreien Verfahrens nicht weiter erläutert werden. Auch die mechanische Entfernung von Oxidschichten soll in diesem Rahmen nicht weiter erläutert werden, da sich diese Techniken nicht für einen automatisierten Lötbetrieb eignen.

Der Einsatz reduzierender, inerte oder aktivierter Schutzgase ist vom Ofenlöten bekannt. Inerte und reduzierende Lötatmosphären zum Hartlöten außerhalb des Ofens werden aber auch beim Laserstrahllöten angewandt. Das Schutzgas wird dabei koaxial mit dem Laserstrahl oder über eine separate Zuführung in die Lötzone eingebracht [43].

Beim flußmittelfreien Hochtemperaturlöten im Ofen werden überwiegend die inerten Schutzgase Argon und Helium sowie der wenig reaktive Stickstoff eingesetzt. Damit

bei dieser Technik die Lote den Grundwerkstoff benetzen können, ist eine dünne Oxidhaut zulässig. Bei hoher Löttemperatur oberhalb von 1000 °C reißt diese auf und erlaubt den für eine Benetzung erforderlichen metallischen Kontakt von Lot und Grundwerkstoff. In Inertgasatmosphären kann u.a. niedriglegierter Baustahl in Verbindung mit Silber-, Kupfer- und Kupfer-Zink-Loten gelötet werden [57].

Wasserstoff und Kohlenmonoxid sind die Grundbestandteile aller reduzierenden Schutzgase. Durch ihre hohe Affinität zum Sauerstoff sind diese Gase in der Lage, metallische Oxide zu reduzieren. So weisen auch Ammoniak, Generatorgas, Kohlenwasserstoffe und andere Gasgemische, bei deren Zerfall Wasserstoff oder Kohlenmonoxid bzw. deren Gemische entstehen, reduzierende Eigenschaften auf. Allerdings eignen sich diese Gase, einschließlich des Kohlenmonoxids, nicht zum Bearbeiten außerhalb einer geschlossenen Ofenatmosphäre, da die Handhabung in der Umluftatmosphäre äußerst schwierig und den heutigen Sicherheits- und Umweltbestimmungen nicht mehr angemessen ist. Hinzu kommt, daß bei Temperaturen über 810°C die reduzierenden Eigenschaften des Wasserstoffes besser als die des Kohlenmonoxids sind. Die Reaktion des Wasserstoffes mit Metalloxiden läßt sich allgemein mit der chemischen Formel



beschreiben [50]. Für reduzierende Schutzgase auf Wasserstoffbasis wird die Reduktionsrate der Oberflächenoxide durch die Anteile an Wasserdampf, Wasserstoff und Sauerstoff beeinflußt. Der Verlauf der Reaktion nach Formel 2.3 und damit die Reduktionsrate hängen vom Verhältnis der Partialdrücke von Wasserdampf und Wasserstoff ab. Die Partialdrücke der festen Phasen Metall und Metalloxid sind annähernd konstant und von der Temperatur unabhängig. Die Gleichgewichtskonstante K_p dieser gegenläufigen chemischen Reaktion errechnet sich wie folgt [58, 59]:

$$K_p = \left[\frac{PH_2O}{PH_2} \right]^m \quad (2.4)$$

mit PH_2O Partialdruck Wasserdampf
 PH_2 Partialdruck Wasserstoff

Der Wasserdampfgehalt, also der Feuchtigkeitsgehalt eines Schutzgases, wird dabei durch seinen Taupunkt festgelegt. Dieser gibt an, bis auf welche Temperatur ein Gas abgekühlt werden kann, ohne daß Feuchtigkeit ausfällt.

Von großer Bedeutung ist weiterhin der Sauerstoffgehalt des Schutzgases. Generell sollte er so gering wie möglich sein, da sonst parallel zu den Reduktionsvorgängen eine Oxidationsreaktion an der Metalloberfläche stattfindet.

Beim Schutzgaslöten wird die Mindestlöttemperatur durch das Oxid bestimmt, das am schwersten zu reduzieren und in nicht vernachlässigbaren Mengen (> 1 Atom-% [15]) vorhanden ist. Dies bezieht sich auf die Oxide, die sich sowohl auf dem Grundwerkstoff als auch auf dem Lot bilden können. Ein Maß für die Beständigkeit von Oxiden ist die temperaturabhängige freie Standardbildungsenthalpie ΔG^0 . Sie ist die Energie, die bei der Oxidbildung frei wird. Die freie Standardbildungsenthalpie kann entweder korrespondierend zur Änderung der Standardenthalpie ΔH^0 und Standardentropie ΔS^0 , die auch temperaturabhängig sind, oder über die Gleichgewichtskonstante nach

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0 = -RT \ln K_p \quad (2.5)$$

mit R Gaskonstante
T Temperatur
K_p Gleichgewichtskonstante

berechnet werden [58]. Üblicherweise erfolgt die Berechnung der freien Standardbildungsenthalpie über die Standardenthalpie und -entropie mit über der Temperatur gemittelten Werten. Die dadurch entstehenden Unsicherheiten liegen für kleine Temperaturbereiche bei ± 5 %. Über 1200 °C und Reaktionen mit Fest-Flüssig-Phasenänderungen liegen die Schwankungen bei ± 10 % bis 15 % [58, 59].

Mit der freien Standardbildungsenthalpie kann bei gegebener Temperatur die Gleichgewichtskonstante und damit die zulässige Feuchtigkeit eines Gasgemisches ermittelt werden. Eine einfache Bestimmung der Gleichgewichtskonstante ist über Richardson-Ellingham-Diagramme möglich. Hier sind Reduktions-Oxidations-Gleichgewichte verschiedener Metalle in Abhängigkeit des Gleichgewichtsverhältnisses von H₂ zu H₂O und der Temperatur aufgetragen (**Bild 11.1** im Anhang). Die dadurch festgelegten Temperaturen sind löstechnisch als Mindesttemperaturen zu verstehen, bei denen die Reduktion der jeweils vorhandenen Oberflächenoxide zu Metall beginnt. Bezogen auf die Gleichgewichtskurven in **Bild 11.1** sind die Lötbedingungen so zu wählen, daß sie rechts von der betreffenden Kurve liegen. Während Eisenoxide (Fe \rightarrow 2FeO: $\Delta G_{800^\circ\text{C}} = -92$ kcal/Mol O₂) und Oxide mit noch geringerer freier Bildungsenthalpie bei erhöhten Temperaturen leicht reduzierbar sind, nimmt die Stabilität der Oxide in der Reihenfolge Zink (Zn \rightarrow 2ZnO: $\Delta G_{800^\circ\text{C}} = -115$ kcal/Mol O₂), Silicium (Si \rightarrow SiO₂: $\Delta G_{800^\circ\text{C}} = -161,8$ kcal/Mol O₂) und Aluminiumoxid (Al \rightarrow 2/3Al₂O₃: $\Delta G_{800^\circ\text{C}} = -212$ kcal/Mol O₂) zu [15].

Beim Schutzgaslöten, insbesondere beim Löten außerhalb einer geschlossenen Lötatmosphäre, ist eine kontinuierliche Zuführung des reduzierenden Schutzgases sicherzustellen. So werden permanent neuer Wasserstoff für die Reduktion der Oxide zur Verfügung gestellt und entstandene Feuchtigkeit und freiwerdende Verunreinigungen von der Lötzone abtransportiert [15, 60].

Die Auswahl der Lote beeinflusst neben der Löttemperatur und -zeit entscheidend den Bindemechanismus. Für das Hartlöten von un- und niedriglegierten Baustählen werden in der konventionellen Löttechnik (Handflamm-, Ofen- und Induktionslöten) Lote auf Kupfer- und Silberbasis empfohlen [52, 61].

Das Kupferbasislot L-CuZn40, ein Standardlot in der Automobiltechnik, wird für das Spalt-, Fugen- und Auftragslöten von Stahl (insbesondere Kohlenstoffstahl), Temperguß und Kupfer- bzw. Kupferlegierungen eingesetzt [15, 52, 61, 62]. Von besonderem Interesse ist hier die Zweistofflegierung von Kupfer und Zink bei einer einphasigen Struktur (α -Mischkristall). Sie tritt bei einem Zinkgehalt unterhalb von 39 % auf. Zink ist Legierungselement der meisten Lotwerkstoffe für niedriglegierte Baustähle. Mit steigendem Zinkgehalt verringert sich die Plastizität des Lotes beträchtlich, andererseits steigen Festigkeit und Härte. Die Steigerung der Festigkeit des Lotes gegenüber Reinkupferloten beruht auf Mischkristallbildung [62].

Ein wesentlicher Nachteil aller Kupfer-Zink-Lote ist das starke Verdampfen von Zink aus dem schmelzflüssigen Lot während des Lötprozesses. Die extrem niedrige Verdampfungstemperatur des Zinks von 906 °C und der hohe Dampfdruck führen dabei zur erhöhten Porenbildung in der Lotraupe, zur Spritzerbildung auf der Blechoberfläche sowie zur Bildung von Zinkoxid (ZnO). Zur Verringerung der Schmelztemperaturen und zur Verbesserung der technologischen Eigenschaften werden den Kupfer-Zink-Loten geringe Mengen Zinn und Silicium bis zu einem Legierungsanteil von 1 % zugegeben. Zinnzusätze führen zu einer Verringerung der Schmelztemperatur sowie einer geringeren Viskosität des Lotes. Silicium hingegen vermindert in hohem Maße die Zinkverdampfung [52].

Ein typisches Silberbasislot ist L-Ag55Sn. Es hat ein breiteres Anwendungsspektrum als das Kupferbasislot L-CuZn40 und wird eingesetzt beim Spaltlöten sowohl bei Stählen und Temperguß als auch bei Kupfer und Kupferlegierungen, Nickel und Hartmetallen. Auch für Verbindungen der beschriebenen Metalle untereinander wird dieses Lot empfohlen [62].

Hochsilberhaltige Hartlote wie L-Ag55Sn haben eine niedrige Schmelztemperatur, ein gutes Fließverhalten und eine geringe Überhitzungsneigung. Die gute Korrosions-

beständigkeit läßt auch den Einsatz im Seewasser zu [50, 62]. Silberhartlote mit Kupferanteil sind löstechnisch besonders günstig, da sie in dem eutektischen Zweistoffsystem bei jeder Zusammensetzung gut verformbare Mischkristalle bilden [60]. Aufgrund ihrer hohen Plastizität und Festigkeit werden sie für Verbindungen eingesetzt, die hoch statisch und dynamisch belastet werden. Sie enthalten keine Elemente mit hohem Dampfdruck und ihre Oxide weisen nur geringe Beständigkeit auf. Die Zusätze von Kupfer und Zink in Silberhartloten verringern die Schmelztemperatur und verändern die Eigenschaften und die Phasenzusammensetzung der Legierung. Ein großer Zinnanteil führt gleichfalls zu einer Verringerung der Schmelztemperatur und vergrößert das Kristallisationsintervall. Dadurch wird ein Löten von Werkstoffen mit unterschiedlichen linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten ermöglicht, ohne daß es zu einer Reißbildung kommt [15, 52]. Größter Nachteil der Silberbasislote sind die Kosten, die teilweise um mehr als das Zehnfache über denen eines vergleichbaren Kupferbasislotes liegen.

2.3.2 Hartlöten im Karosserierohbau

Fügestellen an der Karosserie können aufgrund der Toleranzen in der Blechteilfertigung große Spalte aufweisen. Liegen diese Fügestellen im späteren Sichtbereich oder sind sie als Reparaturaht ausgelegt, so werden sie heute manuell hartgelötet und damit stoffschlüssig verbunden, **Bild 2.6**. Moderne und automatisierbare Löttechnologien wie das Laserstrahlhartlöten werden in der Karosseriefertigung noch nicht eingesetzt.

Konventionelle, von Hand ausgeführte Hartlöttechniken sind das Flammlöten mit einem Acetylen-Sauerstoffbrenner und das MIG-Löten. Beim Handflammlöten wird ein leichtflüchtiges Flußmittel auf Basis von Trimethylborat mit den Brennergasen zugeführt. Das Lot wird in Stabform manuell an die Lötstelle angesetzt. Als Lote werden sowohl beim Handflammlöten als auch beim MIG-Löten kostengünstige Kupferbasislote wie z.B. L-CuZn40 nach DIN 8513 [63] oder der Schweißzusatz SG-CuSi3 nach DIN 1733 [64] verwendet. Beim MIG-Löten dient wie beim Schutzgasschweißen reines Argon als Schutzgas. Das Erwärmen des zu verbindenden Grundwerkstoffes sowie das Verflüssigen des Lotes erfolgen beim MIG-Hartlöten durch einen zwischen abschmelzender Drahtelektrode und Werkstück brennenden Lichtbogen. Der Zusatzwerkstoff in Form eines Lotdrahtes wird über den Brenner kontinuierlich zugeführt [48].

Die Nahtformen der Blechfügestellen, die in der Karosseriefertigung Verwendung finden, sind neben der I-Naht und der Bördelnaht vor allem die Flächennaht am Überlappstoß bzw. am abgesetzten Überlappstoß. Die Überlappverbindungen weisen standardmäßig Überlappbreiten von $b_u=10$ mm auf. Gelötet wird in der Wannelage oder steigend. Die Toleranzen am Überlappstoß liegen bei der Überlappung im Millimeterbereich, beim Spalt im Bereich der halben Blechdicke. Die Qualitätsanforderungen sind neben der Festigkeit vor allem die Dichtigkeit zur Vermeidung von Spaltkorrosion und die Lackierfähigkeit der Oberfläche. Auch Gefügeveränderungen dürfen keine Festigkeitseinbußen oder Korrosionserscheinungen wie eine interkristalline Korrosion (Lötbrüchigkeit) verursachen. Hartlötverbindungen gibt es an der Karosserie, z.B. an den Übergängen vom Dach zu den Kotflügeln, im Bereich der A- und C-Säule, an den Schwellern der hinteren Türen und im Heckbereich.

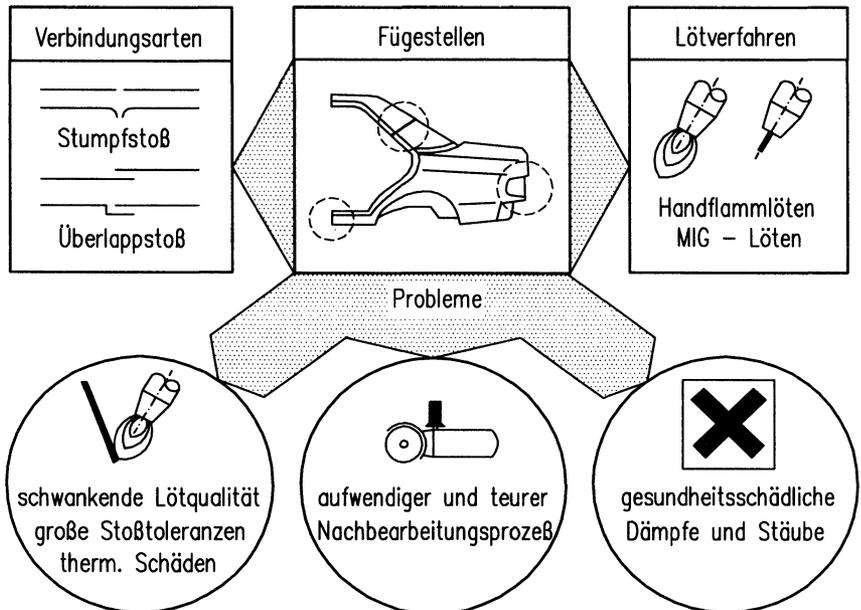


Bild 2.6: Konventionelles Hartlöten im Karosserierohbau

Das Hartlöten bietet über die Füllmenge des Lotes eine Modelliermasse, die leichter nachbearbeitet werden kann als vergleichbare Schweißnahtverbindungen. Durch einfaches Auslöten der Blechteile sind auch Reparaturarbeiten leichter durchzuführen

als bei Schweißverbindungen. Dennoch birgt das manuelle Hartlöten, insbesondere das Handflammlöten, Probleme in bezug auf eine schwankende Lötqualität und hohe Wärmeeinbringung und den damit verbundenen thermischen Schädigungen des Grundwerkstoffes und des Lotes. Daraus resultiert eine aufwendige und kostenintensive Nachbearbeitung [65].

Die Hartlötung und die Nachbearbeitung werden in der Fertigungslinie durchgeführt. Die Arbeitsbedingungen des Lötlers sind durch die Brennerhitze und durch Dämpfe, die beim Löten frei werden, erschwert. Ein Werker übernimmt die Nachbearbeitung, beginnend beim Grobschliff über den Feinschliff bis hin zum Richten. Die Arbeitsbedingungen sind gekennzeichnet durch Staub und Lärm. Beispielhaft seien die Vorgabezeiten eines deutschen Automobilherstellers genannt: 2 min. für das Löten, 11 min für die Nacharbeit. Auf eine Lötnahtvorbereitung wird verzichtet, Verunreinigungen in der Fuge, wie z.B. Ziehöl, werden nicht entfernt. Daraus ergibt sich eine schwankende Lötnahtqualität, es treten thermische Schäden des Grundwerkstoffes und des Lotes, Verzug und Lötbrüchigkeit bzw. Überhitzung, auf.

Das größte Potential zur Kosteneinsparung beim Hartlöten liegt nicht beim eigentlichen Lötprozeß, sondern bei der Nachbearbeitung und beim Richten der durch thermische Einflüsse verzogenen Bereiche in der Nähe der Lötfläche. Eine bei sehr vielen Automobilen der gehobenen Klasse hartgelötete Naht ist die Verbindung von Dachpartie und Heckseitenwand im Bereich der C-Säule. Hier treten große Fügespalttoleranzen auf, bei gleichzeitig höchsten Ansprüchen an die Oberflächengüte der endbearbeiteten Naht. Könnte an dieser Stelle die Nacharbeitszeit um 50 % reduziert werden, entspräche dies der Einsparung eines Betrages in zweistelliger Millionenhöhe für die Laufzeit eines Fahrzeugtyps.

2.3.3 Laserstrahlhartlöten

Die Unterteilung der Lötverfahren erfolgt gemäß DIN 8505 Teil 1 [43] nach verschiedensten Gesichtspunkten, wie der Liquidustemperatur des Lotes, der Art der Lötstelle, dem Energieträger, nach der Art der Oxidschichtbeseitigung und der Lotzuführung sowie auch nach der Art der Fertigung. So ordnet sich der Energieträger Laserstrahl zum Fügen durch Löten neben dem Elektronenstrahl- und dem Lichtstrahllöten ein.

Der Laserstrahl besitzt gegenüber konventionellen Lötwerkzeugen Vorteile. Insbesondere der Nd:YAG-Laser bietet sich als Hartlötwerkzeug an. Durch die spezi-

fischen Eigenschaften des Laserstrahls, wie die zeitliche und räumliche Kohärenz, eignet er sich für eine lokal begrenzte Wärmeinbringung und damit zum definierten Einstellen von Temperaturfeldern [20, 15, 66, 67]. Die gute Steuerbarkeit des Lasers, vor allem des cw-Nd:YAG-Lasers über den Strom seiner Bogenlampen, ist eine ideale Voraussetzung für einen geregelten Prozeß [66, 68]. Die Möglichkeit der Strahlführung über Lichtleitfasern erlaubt eine hohe Integrationsfähigkeit in verschiedenste Fertigungssysteme [68, 69, 70].

Beim Laserstrahlhärten wird die Wärme in den zu lötenden Teilen durch die Absorption von Laserstrahlung erzeugt. Typischerweise sind dazu ein einzelner Laserstrahl, aber auch zwei Laserstrahlen mit einer definierten Wirkfläche (nicht im Fokus) auf die Lötzone gerichtet [66, 72, 73]. Der Laserstrahl ist dabei überwiegend senkrecht zur Blechoberfläche justiert, wird aber auch teilweise mit Einstrahlwinkeln von 45° und 60° geführt [73-75]. Die eingesetzten Laserleistungen liegen zwischen 400 W bis 600 W [73-79], teilweise aber auch bis 2000 W [74]. Das Aufschmelzen des Lotes erfolgt durch direktes Bestrahlen mit dem Laserstrahl. Das Lot wird dabei automatisiert als Lotdraht angesetzt oder als Lotpulver mit einer geeigneten Lotfördereinrichtung der Lötzone am Stoß zugeführt. Die Zuführung kann für Lotdraht und -pulver sowohl stehend als auch schleppend erfolgen [66, 80, 81, 82]. Die Lotzuführungswinkel sind mit Blick auf eine räumliche Bearbeitung <30° zur Oberflächennormalen zu wählen [80]. Besonders an komplexen Bauteilen werden für das Laserstrahlhärten auch Einlegelote und Lotformteile verwendet [72]. Flußmittel werden beim angesetzten Lot und beim Einlegelot manuell aufgetragen [15, 74, 80], es kann aber auch unter Schutzgas und im Vakuum gelötet werden [43, 83]. Das Schutzgas wird überwiegend koaxial zum Laserstrahl zugeführt, teilweise aber auch separat in die Lötzone eingebracht [66, 74, 80,]. Die Kombination von Flußmittel und reduzierendem Schutzgas wird zur Verringerung des Flußmittelanteils eingesetzt [84]. Laserstrahlhärten ist an un- und niedriglegierten Baustählen und hochlegierten Stählen sowie Leichtbauwerkstoffen wie Aluminium- und Titanlegierungen möglich [71, 80]. Blechdicken von bis zu 6 mm können mit dem Laserstrahl hartgelötet werden. I-Nähte an Baustählen werden bei Blechdicken von 1 mm mit maximalen Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 3,2 m/min gelötet [74].

2.3.4 Absorption von Laserstrahlung und resultierende Temperaturverteilung

Das Laserstrahlhärten ist ein Verfahren, dessen Grundlagen größtenteils aus der konventionellen Löttechnik bekannt sind (vgl. auch Abschnitt 2.3.1). Entscheidender

Unterschied ist die Einkopplung der Laserstrahlenergie in die zu lötenden Werkstoffe zur Erzielung der notwendigen Löttemperatur. Der Wechselwirkungsmechanismus zwischen Laserstrahl und Grundwerkstoff wird bestimmt durch die sogenannte Absorption. Trifft Laserstrahlung der Intensität I auf eine glatte metallische Oberfläche auf, so dringt ein Anteil in Abhängigkeit vom Absorptionsgrad A , der nicht transmittiert oder reflektiert wird, in den Werkstoff ein. Man spricht hier von normaler Absorption (Fresnelabsorption), wenn die Intensität I unterhalb einer kritischen Schwellintensität I_c liegt. Oberhalb der kritischen Intensität kommt es zur sogenannten anomalen Absorption, bei der es zum Zünden eines Plasmas durch den Laserstrahl kommt [85].

Betrachtet man den Absorptionsvorgang unter Zuhilfenahme der Beziehungen zur Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle, ergibt sich die Vorstellung, daß die Elektronen des Metalls im elektrischen Feld der eindringenden Welle Energie aufnehmen und diese durch Stöße an das Gitter übertragen. Aus der Literatur [4] ist bekannt, daß die elektromagnetische Strahlung in Metallen innerhalb von 10^7 bis 10^6 nm Eindringtiefe absorbiert wird. Das sind Strecken, die sehr viel kleiner sind als die Wellenlängen von CO_2 - oder Nd:YAG-Lasern.

So kann der Wechselwirkungsmechanismus beim Laserstrahlhartlöten ähnlich dem bei Oberflächenbearbeitungsverfahren mit dem Laserstrahl betrachtet werden, bei denen es zu keinem An- oder Umschmelzen der Werkstoffoberfläche, wie z.B. beim Umwandlungshärten, kommt. Die gängigen Theorien über den Einkoppelmechanismus beim Härten sind z.B. von [86-88] beschrieben. [86] weist ferner darauf hin, daß der Absorptionsgrad einer technischen Oberfläche und damit die Einkopplung in den Werkstoff weniger von den optischen Eigenschaften des Metalls, als viel mehr von dem Zustand der Oberflächenschicht, wie Rauigkeit, Verunreinigungen und Oxiden, abhängt. Hinzu kommen Änderungen des Absorptionsgrades in Abhängigkeit der Werkstofftemperatur und durch eine Veränderung des Einstrahlwinkels des Laserstrahls [4, 20].

Ein weiterer Unterschied zum konventionellen Löten besteht in der lokal eng begrenzten Energieeinbringung des Laserstrahls in Verbindung mit hohen Vorschubgeschwindigkeiten. Dies führt zu sehr kurzen charakteristischen Lötzeiten, die die Verbindungsmechanismen entscheidend beeinflussen. Aufheiz- und Abkühlphase sind durch einen hohen Wärmegradienten gekennzeichnet. Somit kommt es bei einem kontinuierlichen Laserstrahlvorschub und einem gaußförmigem Mode zu keiner Haltezeit. Grobkörnige Gefügestrukturen und spröde Phasen bilden sich nur geringfügig aus und die Diffusionszonen sind kleiner als 2 μm [66].

In **Bild 2.7** ist der Einfluß von Verfahrensparametern auf die Energieeinkopplung und die den Laserstrahlhartlötprozeß bestimmende Temperaturverteilung in der Laserstrahlwirkfläche dargestellt. Das Aufheizen der bestrahlten Fläche und die Wärmeleitung im Material führt zur Erwärmung der Flächen des Spaltes auf Arbeitstemperatur und schafft so die Voraussetzung für die Benetzung durch das Lot.

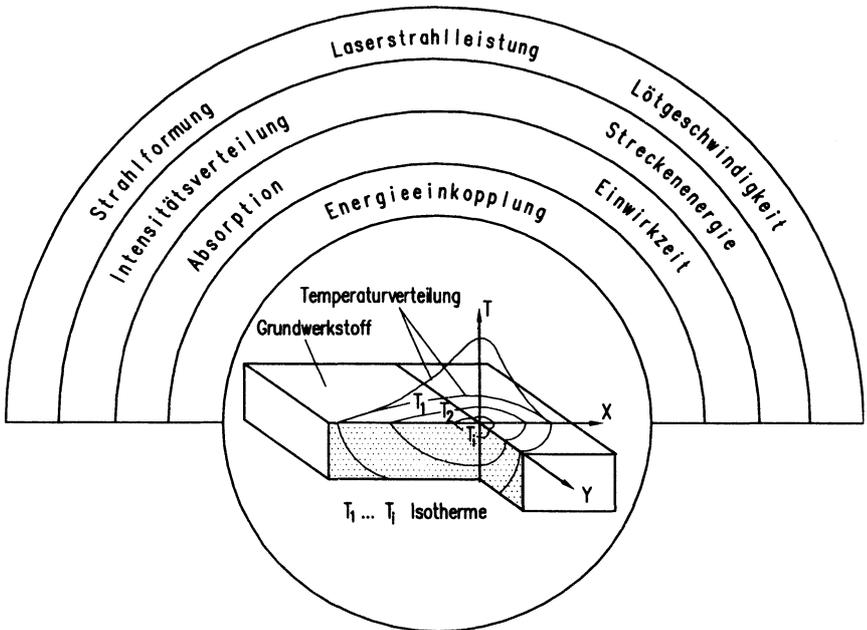


Bild 2.7: Schematische Darstellung des Einflusses verfahrensseitiger Größen auf die Energieeinkopplung beim Laserstrahlhartlöten

Aus der Vielzahl aller rechnerischen Lösungsansätze für die Bestimmung der Temperaturverteilung, die durch eine bewegte Wärmequelle verursacht werden, soll stellvertretend ein Ansatz beschrieben werden. Dieser findet Verwendung für die Bestimmung der Bestrahlungszeit zum Erreichen einer bestimmten Oberflächentemperatur und der sich einstellenden Temperaturverteilung [4]. Ausgehend von einer Lösung der Wärmeleitungsgleichung existiert eine geschlossene Lösung für den zeitlichen Temperaturverlauf an der Oberfläche ($Z=0$). Unter vereinfachten Annahmen und Randbedin-

gungen gilt für einen halbumendlichen Körper bei Bestrahlung mit einer gleichförmigen Intensität I:

$$\tau(0,t) = \frac{A I}{\lambda} \left[\frac{\delta}{\sqrt{\pi}} - \frac{1}{\mu} \left(1 - e^{-\left(\frac{\mu \delta}{2}\right)^2} \operatorname{erfc} \left(\frac{\mu \delta}{2} \right) \right) \right] \quad (2.6)$$

mit μ Absorptionskoeffizient
 λ Wellenlänge
 I gleichförmige Intensität
 A Absorptionsgrad
 δ Diffusionslänge

Die Diffusionslänge δ ist der Weg, den eine Isotherme in der Zeit t zurücklegt:

$$\delta = 2 \sqrt{\frac{\lambda t}{\rho c}} \quad (2.7)$$

mit ρ Dichte
 c spezifische Wärme

Da die Eindringtiefe der Laserstrahlung in metallische Werkstoffe wesentlich geringer ist als die Diffusionslänge δ , kann der zweite Ausdruck in der Klammer der Gleichung 2.6 vernachlässigt werden, so daß die Oberflächentemperatur nur noch mit Hilfe der absorbierten Intensität und den Stoffkenngrößen wie folgt ermittelt werden kann:

$$\tau(0,t) = \frac{A \delta}{\lambda \sqrt{\pi}} \quad (2.8)$$

Mit der Beziehung für die Oberflächentemperatur läßt sich der Einfluß der Stoffeigenschaften auf die Bearbeitbarkeit ableiten. Aus Gleichung 2.7 ergibt sich der Zusammenhang:

$$t = \frac{T^2 \lambda \rho c}{A^2 I^2} \quad (2.9)$$

Hierbei ist t die Zeit, die benötigt wird, um bei Bestrahlung mit der Intensität I eine vorgegebene Oberflächentemperatur T zu erzielen. Kurze Bestrahlungszeiten t sind in einem Bearbeitungsprozeß durch hohe Vorschubgeschwindigkeiten zu erzielen.

2.3.5 Anwendungen des Laserstrahlhartlötens

Das Laserstrahlhartlöten spielt in der heutigen industriellen Anwendung, verglichen mit dem Flamm-, Induktions- und Ofenlöten, eine untergeordnete Rolle. Es kommt nur bei speziellen Anwendungen zum Einsatz, bei denen die Vorteile des Lasers, wie gute Steuer- und Regelbarkeit, ein hoher Temperaturgradient sowie die Fokussierbarkeit auf Bearbeitungsflächen im Mikrometerbereich genutzt werden [15].

Ein erstes Einsatzgebiet des Lasers für das Hartlöten war das flußmittelfreie Hartlöten von Brillengestellen. Damit wurde bereichsweise das Induktionslöten substituiert. Unter Verwendung eines reduzierenden Schutzgases (5 % bis 10 % H₂, 90 % bis 95 % N₂) wurden Hartlötverbindungen zwischen Mittelsteg und Brillenfassung erzeugt. Pulver- und drahtförmige Lote auf Edelmetall- und Nickelbasis sind dabei einsetzbar [20].

In der Elektronik-Industrie wurde bereits Mitte der 80iger Jahre in den USA ein Verfahren zum Verbinden von feinen Drähten mittels eines Doppellaserstrahls patentiert. Für die Fabrikation von "Heißdraht-Winkelraten-Sensoren" (ARS) müssen temperaturempfindliche Widerstandsdrähte in Sensorsteckern befestigt werden. Dabei werden feine Wolframdrähte mit Durchmessern von 50 µm auf vergleichsweise große Stäbe aus einer Eisen-Nickel-Kobald-Legierung (Kovar) aufgelötet. Zwei Laserstrahlen (fokussiert) sind beidseitig vom Draht parallel zueinander in definierter Entfernung angeordnet. Durch das Anschmelzen des Kovars der Drahtauflage wird dann eine stoffschlüssige Verbindung mit dem Draht hergestellt. Der Vorteil dieses Laserstrahlverfahrens liegt im kontaktlosen Fügen der auf mechanische Belastung empfindlich reagierenden Wolframdrähte [89].

3 Zielsetzung der Arbeit

Wie im vorhergehenden Kapitel vorgestellt, ist das Laserstrahlhartlöten nur bei wenigen speziellen Anwendungen industriell eingeführt. Das Potential des Verfahrens zum Hartlöten ist aber dennoch nicht ausgeschöpft. Die in der Literatur beschriebenen Verfahren greifen dabei auf eine Einstrahltechnik zurück, die insbesondere die erforderlichen hohen Füllgrade an Flächennähten mit großer Überlappbreite nicht erfüllen. Zusätzlich behindert ein großes Wissensdefizit hinsichtlich der Wechselwirkung zwischen Laserstrahl, Grundwerkstoff und Lot die Qualifizierung des Verfahrens für die Bearbeitung großflächiger Blechteile.

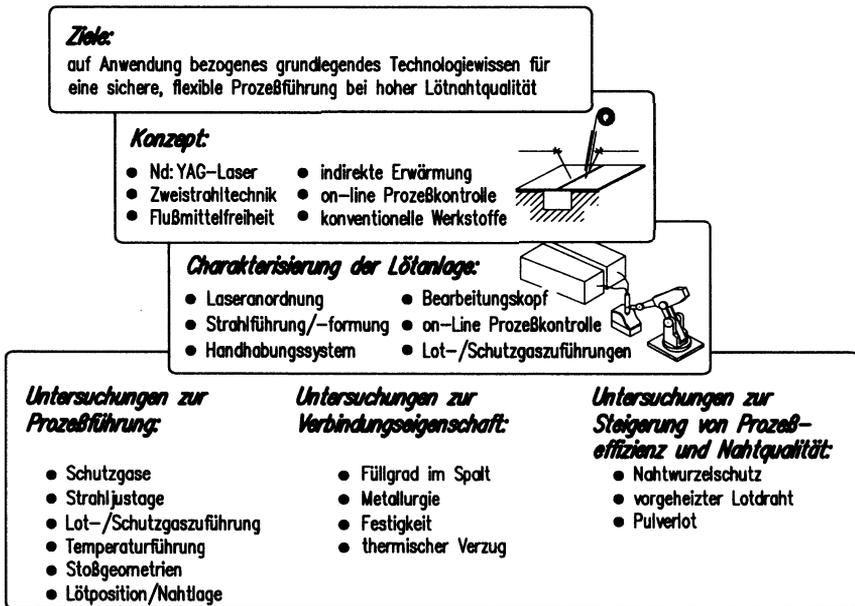


Bild 3.1: Zielsetzung der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, grundlegendes Wissen über das Laserstrahlhartlöten von Blechformteilen mit Zweistrahltechnik für einen automatisierten Hartlötenprozeß zu erarbeiten, **Bild 3.1**. Damit soll eine Basis geschaffen werden, die eine industrielle Umsetzung der räumlichen Hartlötbearbeitung von Blechformteilen,

beispielsweise in der Karosseriefertigung, ermöglicht. Die systematische Erarbeitung dieser Ziele erfolgt durch eine Aufteilung der Problematik in einzelne thematisch getrennte Abschnitte. Zunächst werden die wesentlichen Systemkomponenten der Versuchsanlage im einzelnen charakterisiert. Die anschließenden Untersuchungen zur Prozeßführung sollen einen systematischen Zugang zum Prozeßverständnis schaffen und bilden mit der eingehenden Betrachtung der Verbindungseigenschaften die Voraussetzung, um Korrelationen zwischen Bearbeitungsqualität und Prozeßparametern aufzuzeigen. Die quantitative Bestimmung der Bearbeitungsqualität erlaubt dabei den Vergleich zu herkömmlichen Lötverfahren. Abschließend werden in Anlehnung an Erkenntnisse aus der konventionellen Schweiß- und Löttechnik verschiedene Maßnahmen, wie z.B. Hartlöten mit Nahtwurzelschutz, zur Steigerung der Prozeßeffizienz und Nahtqualität des Laserstrahlhartlötens untersucht.

4 Versuchseinrichtungen

Im folgenden sind die Versuchseinrichtungen beschrieben. Mit Blick auf die Erfordernisse des Laserstrahlhartlötprozesses wurde ein neuartiges, auf eine Zweistrahltechnik ausgerichtetes Systemkonzept aufgebaut.

Die Laseranlage besteht aus kommerziell erhältlichen Komponenten und wurde durch Eigenentwicklungen, wie z.B. den Bearbeitungskopf und eine Prozeßregelung, ergänzt. Die wesentlichen Komponenten der Laseranlage sind zwei Strahlquellen (Fa. Haas-Laser GmbH, Typ LAY 1000 D) und ein sechsachsiger Industrieroboter (Fa. GMF, Typ S-700, Steuerung GMF-Karel) als Führungsmaschine, **Bild 4.1**. Die Strahlführung erfolgt über zwei Lichtleitkabel. Desweiteren sind in einem neu entwickelten Bearbeitungskopf die Lot- und Schutzgaszuführung sowie Optiken für eine pyrometrische Erfassung der Blechoberflächentemperatur integriert.

- 1 6-Achsen-Knickarmroboter
- 2 3D-Werkstückhalterung
- 3 1 kW Nd:YAG-Laserstrahlquelle
- 4 Blechformteil
- 5 Strahlführung/-formung
- 6 Lotzuführung
- 7 Schutzgaszuführung
- 8 Temperaturmessung

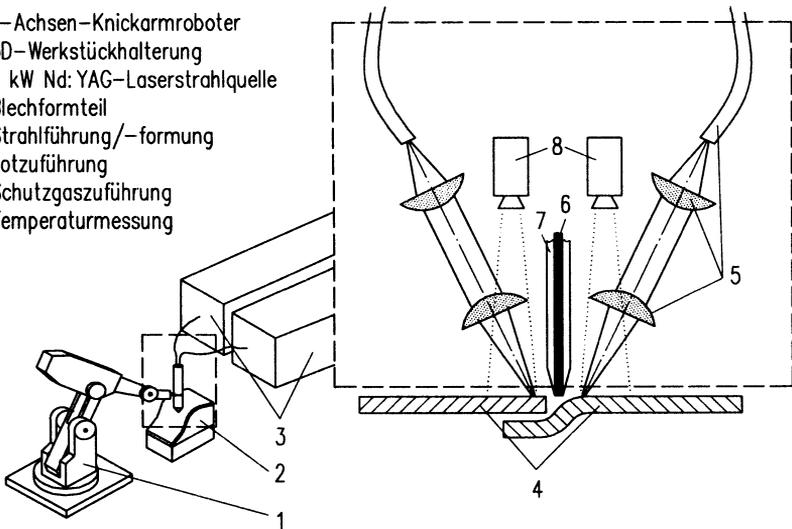


Bild 4.1: Konzeptdarstellung der Laseranlage für das Laserstrahlhartlöten mit der Zweistrahltechnik

Eine wesentliche Fragestellung beim Aufbau der Versuchseinrichtung war die steuerungstechnische Anbindung der Komponenten an die Robotersteuerung, **Bild 4.2**.

Hierzu wurden digitale Eingangs- und Ausgangsmodule verwendet, die über das NC-Programm gesetzt bzw. abgefragt werden können. Beispielweise werden die Laserleistung und die Lotzuführgeschwindigkeit über die analogen Ausgangsmodule variiert. Dafür wird die erforderliche Ausgangsspannung von 0 bis 10 V direkt an die Komponenten ausgegeben. Die Abfrage und der Wechsel der Werte führen nicht zu Unstetigkeiten bei der Ausführung des NC-Programms und bei der Umsetzung in den Komponenten.

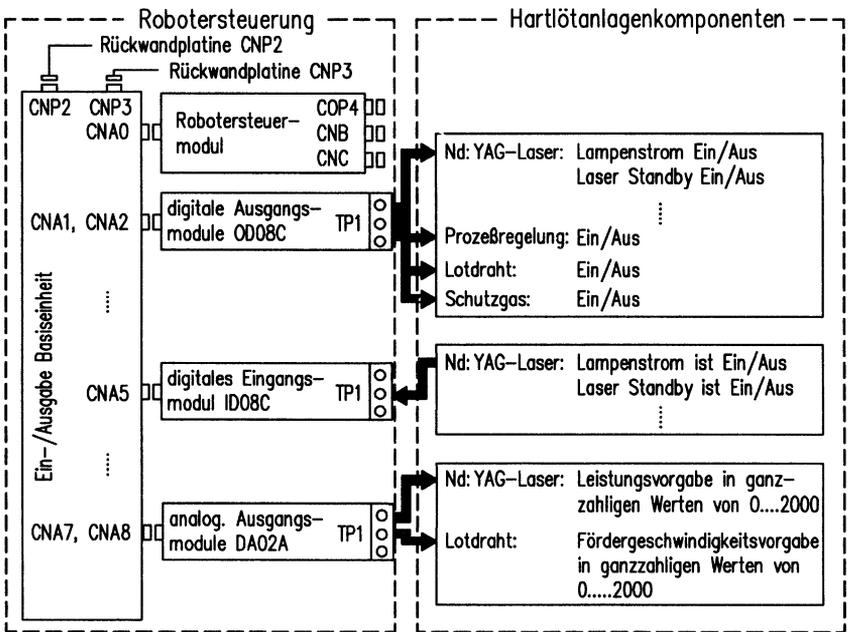


Bild 4.2: Steuerungstechnische Verknüpfung der einzelnen Anlagenkomponenten

4.1 Laseranordnung

Die Laseranordnung besteht aus den Versorgungseinrichtungen und den Lasern sowie den Strahlführungen und -formungen für die Strahlübertragung zum Bearbeitungsort. Ausgelegt als Multikavitätenkonzept besitzen die Laserstrahlquellen je zwei

doppelelliptische Pumpkammern mit je 2 Kryptonbogenlampen zur Erzeugung einer Laserleistung von je ca. 500 W. Pro Laser wird somit eine maximale Ausgangsleistung von etwa 1 kW kontinuierlicher Strahlung erzeugt [90], **Bild 4.3**.

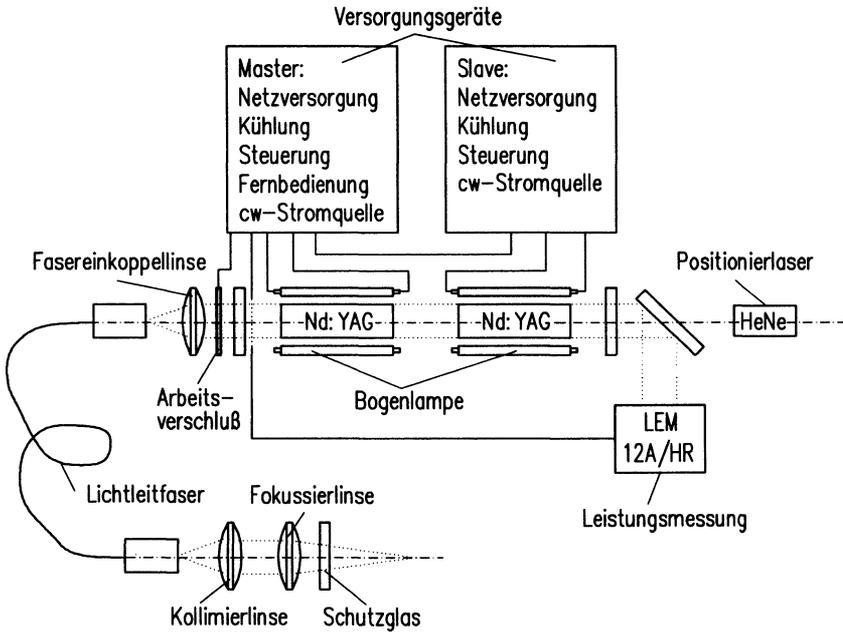


Bild 4.3: Komponenten der Laseranordnung

Durch die Anordnung von zwei Pumpkammern im Resonator sind folglich auch zwei Versorgungseinrichtungen je Laser erforderlich. Sie sind als "Master" und "Slave" gekoppelt, um einen synchronen Betrieb des Lasers zu gewährleisten. Aufgrund einer hohen Schaltfrequenz der Gleichstromsteller in den Versorgungseinrichtungen können die Lampenströme innerhalb 1 ms über den gesamten Stellbereich variiert werden [90].

Etwa 1% der Laserstrahlung im Resonator wird am rückwärtigen Spiegel des Resonators ausgekoppelt und in einen Leistungsmeßbaustein umgelenkt (Typ LEM 12 A/HR). Mit diesem wird on-line die Laserleistung im Resonator erfaßt. Die gemessenen Werte dienen dem Soll-Ist-Vergleich einer systeminternen Laserleistungsregelung und der

Leistungsanzeige am Bedienboard des Lasergeräts. Der LEM 12A/HR arbeitet nach dem Prinzip der Ulbrichtkugel [91], wobei die einfallende Laserleistung über eine Photodiode gemessen wird. Das Signal der Photodiode wird zur on-line-Regelung des Lampenstroms herangezogen. Maximal belastbar mit einer Leistung von 5 W beträgt die Genauigkeit des Leistungsmeßbausteins $\pm 5\%$. Bei einer Anstiegszeit des analogen Ausgangssignals von $15\ \mu\text{s}$ wird die Laserleistung mit hoher zeitlicher Auflösung erfaßt. Durch die Leistungsregelung stellt sich eine lineare Leistungskennlinie ein; Leistungsschwankungen im Resonator werden innerhalb von 2 ms gemessen und ausgeregelt, so daß z.B. Alterungseffekte der Bogenlampen kompensiert werden können. Für die notwendige Regelreserve ist der Lampenstrom auf ca. 75 % (entspricht einer Leistung von ca. 760 W) des Maximalwertes begrenzt. Folglich sind hohe Leistungen (bis ca. 1 kW) nur im ungeregelten Betrieb möglich (vgl. auch Abschnitt 4.2). Koaxial zum Strahlengang ist als Positionierhilfe ein HeNe-Pilotlaser angeordnet [90].

Die im Resonator erzeugte Laserstrahlung gelangt über den Arbeitsverschluß (Schaltzeit 35 ms) zur Fasereinkoppellinse mit einer Brennweite von $f=50\ \text{mm}$. Das Lichtleitkabel ist als Stufenindexfaser mit einem Kerndurchmesser von $600\ \mu\text{m}$ ausgeführt und auf 20 m Länge konfektioniert. Durch eine Kunststoffummantelung ist die Faser gegen Unterschreitung des zulässigen Biegeradius von $r_{\text{min}}=250\ \text{mm}$ geschützt. Die numerische Apertur NA beträgt 0,17. Für ein Linsensystem im Bearbeitungskopf, bestehend aus Kollimier- und Fokussierlinse (Brennweiten $f=100\ \text{mm}$) mit einer 1:1-Abbildung, resultieren Strahlkennwerte wie sie in **Tabelle 11.1** im Anhang zusammengefaßt sind.

4.2 Strahlführung und -formung

Die Strahleigenschaften der cw-Nd:YAG-Laserstrahlquellen werden bestimmt durch die Wellenlänge, die Polarisierung, die Ausgangsleistung, den Strahldurchmesser und die Intensität im Fokus sowie die Schärfentiefe (Rayleighlänge) im Bereich der Strahltaile [18]. Die optischen Bedingungen im Resonator, die elektrische und thermische Stabilität bei der Strahlerzeugung und die optischen Bedingungen bei der Strahlführung und -formung des Laserstrahls beeinflussen diese Eigenschaften. Einstellparameter der cw-Lasergeräte ist allein die Laserleistung. In **Tabelle 11.1** im Anhang sind die Strahlkennwerte sowohl für den Rohstrahl als auch für den fokussierten Strahl aufgelistet. Zwei wesentliche Strahlkennwerte sollen im folgenden unter Berücksichtigung der Strahlführung und -formung beschrieben werden: die Laserleistung und deren Stabilität sowie die Intensitätsverteilung.

Wie im Abschnitt 4.1 erwähnt, bieten die Laser die Möglichkeit der geregelten und unregulierten Betriebsart. Die für die beiden Betriebsarten jeweils in Abhängigkeit von der Einstellung resultierenden Laserleistungen sind in **Bild 4.4** wiedergegeben. Deutlich ist der lineare Kennlinienverlauf bei eingeschalteter Regelung erkennbar. Ohne Regelung der Ausgangsleistung über den Bogenlampenstrom würden sich thermische Effekte im Resonator und Alterungseffekte der Bogenlampen bemerkbar machen. Bei deaktivierter Regelung können die Bogenlampen mit maximalem Lampenstrom beaufschlagt und damit die höchste Ausgangsleistung erreicht werden. Die Folge der Lampenalterung mit steigender Betriebsstundenzahl ist allerdings eine flachere Leistungskennlinie und das Absinken der maximal erreichbaren Ausgangsleistung. Über die prozentuale Leistungseinstellung reproduzierbare Leistungsvorgaben sind dadurch im unregulierten Betrieb über einen längeren Zeitraum nicht möglich.

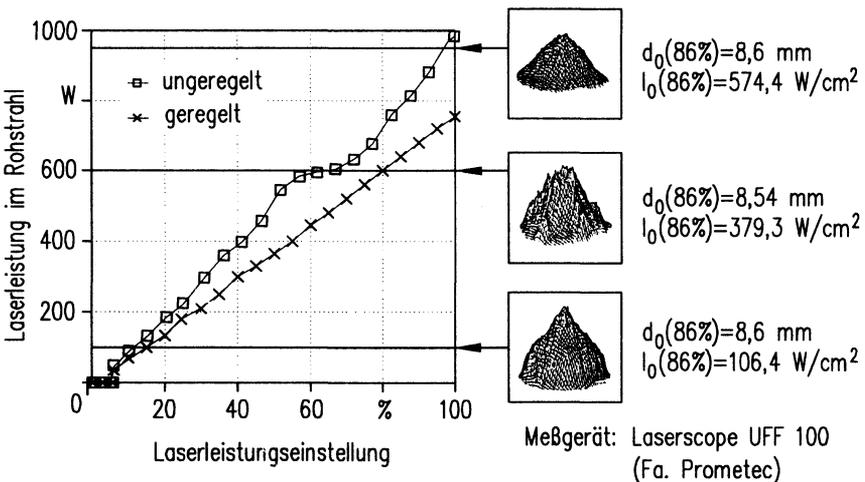


Bild 4.4: Leistungskennlinien für den geregelten und unregulierten Betrieb sowie die Strahlprofile im Rohstrahl

Die Nichtlinearität der Kennlinie im unregulierten Betrieb im Bereich von 550 W bis 750 W ist nach [18, 26] auf leistungsabhängige Instabilitäten des Resonators zurückzuführen.

Optische Elemente, die der Laserstrahl ausgehend vom Resonator durchläuft, verursachen Leistungsverluste. Zum einen absorbieren die Optiken Laserenergie, was unter Umständen sogar zu einer thermischen Schädigung derselben führen kann. Zum anderen kommt es zu einer Streuung des Laserstrahls durch mikroskopisch kleine Brechzahlswankungen und der Laserstrahl wird statistisch in andere Ausbreitungsrichtungen abgelenkt. Die Leistungsverluste durch Linsen und die Lichtleitfaser sind überwiegend in Reflexionen an den Grenzflächen begründet und betragen im Mittel für das hier vorliegende System 15 %, **Bild 4.5**. Dies stimmt größenordnungsmäßig mit Angaben aus der Literatur überein [z.B. 92]. Die hohen Leistungsverluste bei einem Laserbetrieb mit niedriger Leistung unter 15 % sind einerseits auf die geringe Genauigkeit der Thermosäule in diesem Bereich (ausgelegt für 1000 W Ausgangsleistung, Genauigkeit: $\pm 7\%$) und andererseits auf die Darstellungsweise in Prozent zurückzuführen. Leistungsschwankungen des Lasers in dieser Größenordnung können ausgeschlossen werden, da die Messung im geregelten Betrieb durchgeführt wurde. Für die Berechnung der mittleren Verlustleistung von 15,3 % bzw. 11,5 % (**Bild 4.5**) wurde der Bereich ab 100 W (Leistungseinstellung ca. 13 %) berücksichtigt.

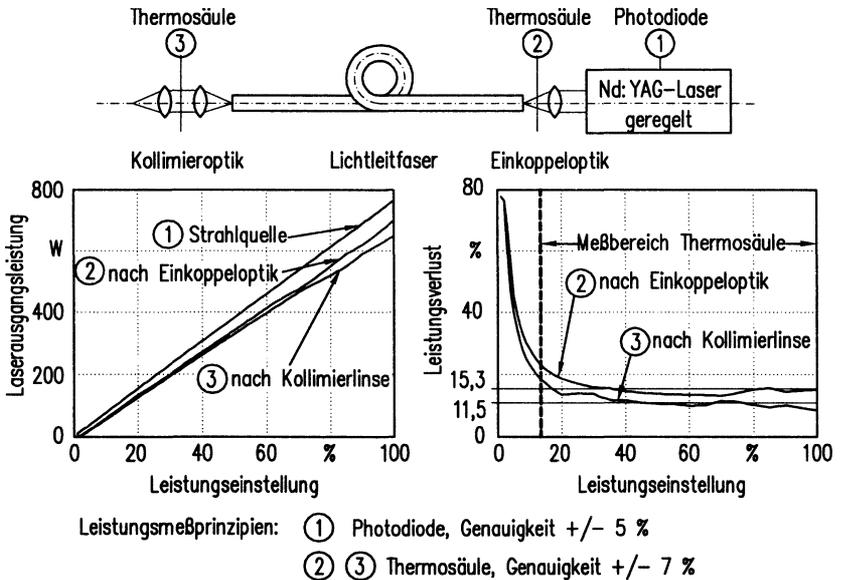


Bild 4.5: Leistungsverluste durch optische Elemente

Die Kenntnis von Strahlkaustik und Intensitätsverteilung im Laserstrahl sind für die Beurteilung von Bearbeitungsergebnissen von wesentlicher Bedeutung. Die Messungen zur Bestimmung der Strahlkaustik und Intensitätsverteilung wurden nach dem Meßprinzip der rotierenden Hohlzylinder in Verbindung mit einer Photodiode durchgeführt (Meßgerät: Fa. Prometec, Laserscope UFF 100).

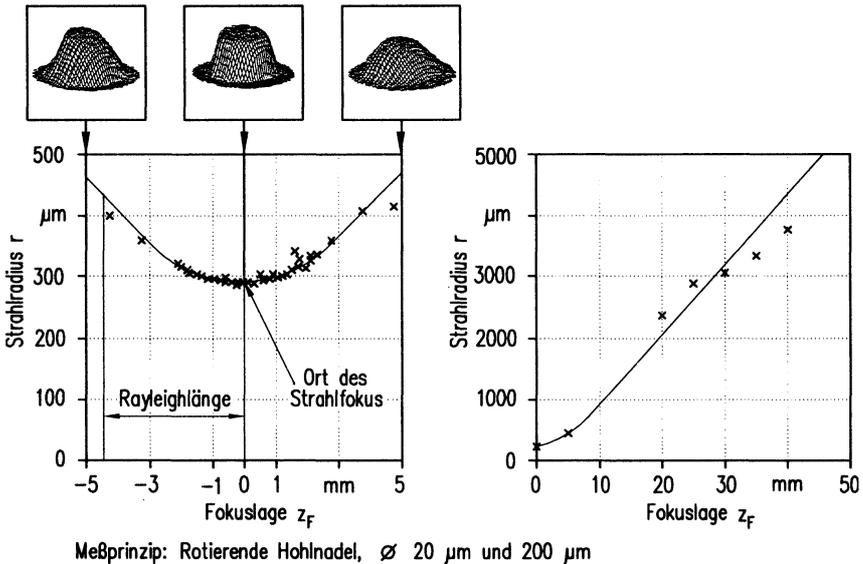


Bild 4.6: Strahlkaustik und Intensitätsverteilung im Fokusbereich

Das Intensitätsprofil, das sich bei der Fokussierung des durch die Lichtleitfaser transformierten Strahls ausbildet (vgl. dazu Abschnitt 2.2), zeigt im Fokus eine Abbildung des Lichtleitfaserendes mit steilen Flanken und einer gleichmäßigen Höhe der Intensität im Bereich des Strahlzentrums, **Bild 4.6**. Diese typische Verteilung tritt bei allen Laserleistungen im Fokus auf. Mit zunehmender Defokussierung bildet sich eine nahezu gaußförmige Intensitätsverteilung aus. Durch die Transformation in der Faser werden eventuell auftretende lokale Leistungsspitzen ausgeglichen [90, 93]. Mit einem Fokussierwinkel von $\Theta_F = 113$ mrad ergibt sich das Strahlparameterprodukt rechnerisch zu $32 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ (siehe **Tabelle 11.1** im Anhang). Verglichen mit der Strahlqualität des Resonators mit $25 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ [90] ist eine deutliche Verschlechterung der Strahleigenschaften bei Durchgang des Strahls durch die Lichtleitfaser und

die optischen Elemente zu erkennen. Die ermittelten Strahlkennwerte stimmen mit Werten aus der Literatur überein [z.B. 26, 94].

4.3 Führungsmaschine

Das verwendete Handhabungssystem war ein 6-Achsen-Gelenkarmroboter, **Bild 4.7**. Die maximal programmierbare Bahngeschwindigkeit war vom Hersteller mit 90 m/min angegeben, die Tragkraft an der Roboterhand mit 30 kg. Die Wiederholgenauigkeit des Gelenkarmroboters wurde für den horizontalen Arbeitsradius von 1816 mm mit besser $\pm 0,2$ mm ausgewiesen [95].

In [96] wurden Ergebnisse zum Führungsverhalten des Gelenkarmroboters dargestellt. Die Bahngenauigkeit wurde in Form von Abweichungen in horizontaler und vertikaler Richtung von der jeweiligen Sollgeraden erfaßt. Während die Bahnabweichungen in einer Größenordnung von $\pm 0,1$ mm auf die Mechanik zurückgeführt wurden, traten dynamische Abweichungen mit zunehmender Bahngeschwindigkeit und der damit verbundenen größeren Wegstrecke innerhalb eines Lageregelaktaktes auf. Sie wurden in einer Größenordnung von etwa $\pm 0,05$ mm nachgewiesen.

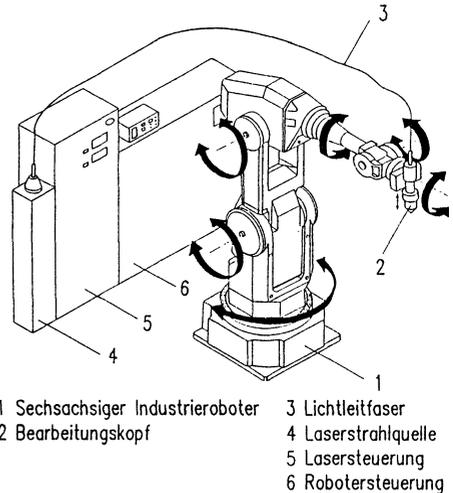


Bild 4.7: 6-Achsen-Gelenkarmroboter für das Laserstrahlhartlöten

Messungen zur Wiederholgenauigkeit in allen Richtungen ergaben einen Wert von etwa $\pm 0,05$ mm, wobei das Umkehrspiel der Hin- und Rückbewegungen $\pm 0,1$ mm nicht überschreitet.

Ein Industrieroboter kann üblicherweise in unterschiedlichen Bewegungstypen programmiert werden, die die Genauigkeit und tatsächliche Bahngeschwindigkeit beeinflussen. Die Konturgenauigkeit nimmt dabei mit zunehmender Bahngeschwindigkeit und bei Einsatz von geschwindigkeitserhaltenden Bewegungstypen ab, d.h. eine hohe Genauigkeit läßt sich nur auf Kosten der tatsächlichen Geschwindigkeit erreichen. Die

Robotersteuerung berechnet mittels eines internen absoluten Wegmeßsystems in diskreten Zeitabständen die tatsächliche Bahngeschwindigkeit.

4.4 Bearbeitungskopf

Im Bearbeitungskopf sind die Laserstrahlfokussieroptiken, die Lot- und die Schutzgaszuführungen sowie die Sensorik für die Prozeßregelung integriert. Für die Experimente zum Laserstrahlhartlöten wurden zwei Bearbeitungsköpfe konstruiert und gebaut.

In der ersten Untersuchungsphase wurde ein Bearbeitungskopf verwendet, mit dem flexibel die Orientierung der Laserstrahlen zur Blechoberfläche variiert werden konnte. Über eine pneumatische Schnellspannvorrichtung wird der Bearbeitungskopf am Handflansch nach der 6. Achse des Gelenkarmroboters befestigt. Die beiden Laserstrahlfokussierungen werden in zwei Klemmvorrichtungen gehalten, mit denen sie unabhängig voneinander hinsichtlich Fokusslage und Einstrahlwinkel entlang einer Stoßkante und dem Lot justierbar sind. Die Lotdrahtzuführung erfolgt dabei stechend. Der Wechselwirkungspunkt und damit der Tool Center Point (TCP) des Roboters fluchten bei diesem Bearbeitungskopf nicht mit 6. Roboterachse.

Beim Aufbau eines 3D-tauglichen Bearbeitungskopfes für das Löten von Blechformteilen wurden die Untersuchungsergebnisse der Laserstrahlhartlöten in der Wannelage hinsichtlich der Orientierung und der Anordnung der Laserstrahlen zur Blechoberfläche und zum Fügestoß sowie Erkenntnisse zur Lotdrahtzuführung berücksichtigt, **Bild 4.8**. Zunächst ausgelegt für das Löten von Flächennähten am Überlappstoß, erlaubt dieser Bearbeitungskopf die Führung des Wechselwirkungspunktes in der 6. Achse des Industrieroboters. Dadurch liegen die Brennflecke im Bereich der Drehachse der Roboterhand, und das Nachführen von Laserstrahlung und Lot entlang einer Stoßkante im Raum wird wesentlich erleichtert. Zusätzlich führt dies zu einer verbesserten Bahngenauigkeit des Roboters, insbesondere beim Umorientieren an kritischen Bahnkonturen, da sich das durch das Gewicht des Bearbeitungskopfes verursachte Moment verringert. Die starre Befestigung der Fokussieroptiken am Bearbeitungskopf erlaubt eine sichere und einfache Justierung der Pyrometroptiken bezüglich der Laserstrahlwirkflächen.

- 1 Werkstückaufnahme
- 2 Werkstück
- 3 Lotdrahtzuführung
- 4 Schutzgaszuführung
- 5 Temperaturerfassung
- 6 Strahlführung/-formung

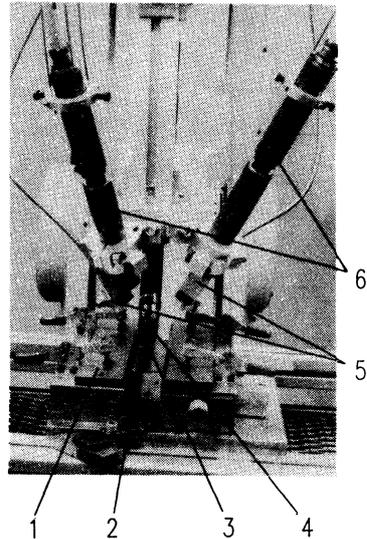


Bild 4.8: 3D-Bearbeitungskopf für das Laserstrahlhartlöten mit der Zweistrahl-technik

4.5 On-line Prozeßregelung

Wird die Arbeitstemperatur im Lötspalt durch eine konstant vorgegebene Laserleistung erzeugt, so kann dies insbesondere zu Prozeßbeginn und Prozeßende sowie bei Umorientierungen der Roboterachsen zur Überhitzung des Lotes und teilweise zum Anschmelzen des Grundwerkstoffes führen.

Zur Minimierung der thermischen Schädigungen und zur Automatisierung des Lötprozesses wurde eine on-line Laserleistungsregelung basierend auf der Erfassung der Blechoberflächentemperatur mittels Einfarbenpyrometer realisiert.

Während des Lötprozesses wird das Lot indirekt, d.h. über die Wärmeleitung aus dem Grundwerkstoff, aufgeschmolzen. Auf die Arbeitstemperatur im Lötspalt kann bei diesem Prozeß nur über die Temperatur auf der Blechteiloberfläche zurückgeschlos-

sen werden. Daher werden mit Hilfe zweier Einfarben-Infrarot-Pyrometer (Fa. Heinz Kleiber, Meßkopf Typ 270) die zu den Oberflächentemperaturen proportionalen Signale in den Wirkflächen der Laserstrahlen auf den beiden Stoßpartnern aufgenommen.

Das Regelkonzept mit Strecke, Regler und den dazugehörigen Größen ist in **Bild 4.9** dargestellt. Für jeden der Fügepartner wird aufgrund des Verfahrensprinzips mit Zweistrahltechnik ein Regelkreis benötigt; eine Kopplung untereinander besteht nicht. Der Regler ist softwaremäßig auf einem PC installiert und bietet die Option zwischen einem Proportional- und einem Proportional-Integral-Regler. Die Regelgrößen sind die Isttemperaturen T_{IL} und T_{IR} . Sie werden dem Prozeßrechner über Analog/Digital-Wandler zugeführt und mit Hilfe eines geeigneten Regelalgorithmus weiterverarbeitet. Dieser Regelalgorithmus basiert auf der mathematischen Beschreibung des Übertragungsverhaltens der wesentlichen Systemglieder der Regelstrecke: den Lasern, den Pyrometern sowie den Blechteilen. Das Übertragungsverhalten wird dabei durch die Aufzeichnung der Sprungantworten auf definierte Eingangssignale, wie z.B. Änderungen der Laserleistung oder der Temperatur, während des quasi-stationären Lötprozesses ermittelt. Aus der Analyse dieses Übertragungsverhaltens werden die sogenannten Übertragungsfunktionen für die gesamte Regelstrecke aufgestellt. Damit läßt sich der Regler mit Blick auf ein beispielsweise proportionales oder proportional-integrales Reglerverhalten auswählen und die Reglerparameter wie Nachstellzeit und Reglerverstärkung sich besser abschätzen.

Als Stellgrößen werden die beiden Laserleistungswerte über Digital/Analog-Wandler an die beiden Laser ausgegeben. Um den Stelleingriff bei der Laserleistung zu minimieren, wird vor dem Lötprozeß für jeden Laser eine Leistung P_R als Ausgangswert vorgegeben. Eine exakte Anpassung an die erforderliche Laserleistung erhöht, insbesondere bei PI-Reglern, die Regelgeschwindigkeit. Die Führungsgrößen in Form der Temperatursollwerte müssen vom Bediener eingestellt werden und bleiben während des Lötvorgangs konstant. Sie wurden experimentell für verschiedene Lote und Stoßgeometrien ermittelt. Der Prozeßrechner als Regler übernimmt die Aufgabe, die Regelgrößen (T_{IL} , T_{IR}) der beiden Regelkreise an die Sollwerte (T_{SL} , T_{SR}) durch Variation der Stellgrößen (P_{LL} , P_{LR}) heranzuführen und an den gewünschten Arbeitspunkten mit möglichst geringer Regelabweichung zu halten.

Da Störprozesse, z.B. Lotmengenschwankungen oder Veränderungen der Fokussierbedingungen, beim Löten ein qualitätsbestimmender Faktor sind und die Führungsgrößen (Solltemperaturen) während des Lötvorgangs nicht verändert werden, ist für den Hartlötprozeß ein günstiges Störverhalten des Regelkreises wesentlich wichtiger als ein gutes Führungsverhalten. Die prozeßrelevanten Parameter des Reglers sind

neben den Solltemperaturen die Nachstellzeit t_N (nur beim PI-Regler) und der Proportionalitätsverstärkungsfaktor K_P bzw. K_{PI} . Für eine gute Reglerdynamik und ein stabiles Reglerverhalten, beispielsweise zum geregelten Hartlöten einer I-Naht mit einem PI-Regler, liegen die typischen Nachstellzeiten bei $t_N=0,075$ s und die Verstärkung bei $K_{PI}=0,05$ (vgl. auch Abschnitt 6.4).

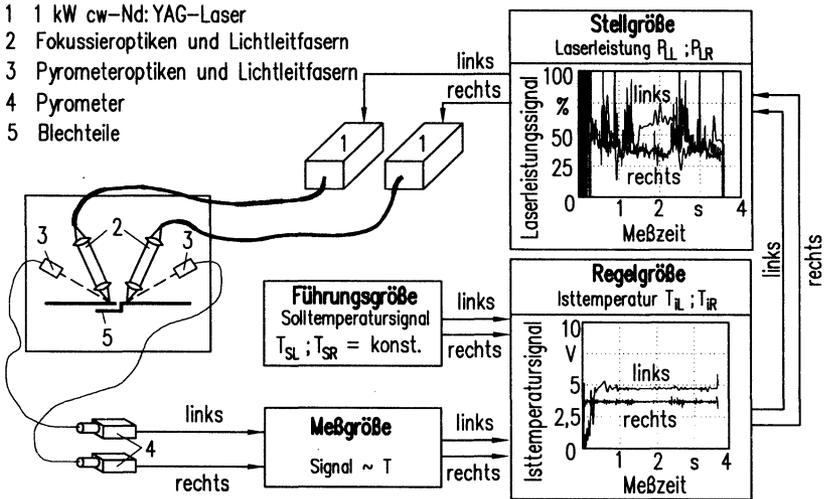


Bild 4.9: On-line Prozeßregelung für das Laserstrahlhartlöten mit der Zweistrahl-technik

4.6 Lotzuführeinrichtungen

Die Bereitstellung des Lotes für den Hartlötprozeß erfolgte für den automatisierten Laserstrahlhartlötprozeß in Form von Lotdrähten und Lotpulvern, die automatisch angesetzt bzw. automatisch zugeführt wurden.

4.6.1 Lotdrahtzuführung

Bei der Lotdrahtzuführung wurden konventionell erhältliche Komponenten miteinander kombiniert. Ein automatischer Kaltdrahtvorschub (Fa. Messer Lincoln, Typ DV 1) in

Verbindung mit einer Drahtzuführungseinheit (Fa. Messer Lincoln, Typ MGW M 60) führt das Lot automatisch während des Lötvorgangs wahlweise kontinuierlich oder gepulst zu. Eine Drahtspindel (D-300) stellt ein großes Lotdrahtreservoir (bis ca. 5 kg) im Kaltdrahtvorschub bereit. Die 4-Reibrolleeneinheit leitet über das 4 m lange Schlauchpaket der Drahtzuführung den Lotdraht direkt der Bearbeitungsstelle zu. Wahlweise können Drahtdicken von 0,8 mm und 1,0 mm zugeführt werden. Der Düsenhalter an der Drahtzuführungseinheit ist um 45° gebogen und erlaubt eine koaxiale Schutzgaszuführung (vgl. auch Abschnitt 4.7) sowie die Wasserkühlung der Zuführungsdüse über ein geschlossenes indirektes Kaskaden-Kühlsystem [97].

Die Einstellung der Drahtfördergeschwindigkeit v_D erfolgt wahlweise mittels 10-Wendelpotentiometer direkt am Kaltdrahtvorschub oder angepaßt an die Bahngeschwindigkeit über die Robotersteuerung. Die Kopplung der Drahtfördergeschwindigkeit mit der momentanen Bahngeschwindigkeit ist insbesondere bei der räumlichen Bearbeitung kritischer Konturen unerläßlich. Die begrenzte Achsdynamik der Handhabungsmaschine kann zu konturbedingten Änderungen der Bahngeschwindigkeit führen und infolge zu niedriger oder zu hoher Drahtfördergeschwindigkeit Lotfehlstellen oder Lotüberschuß verursachen. Die Anpassung an die Bahngeschwindigkeit erfolgt frei programmierbar im NC-Programm. In diesem "Automatikbetrieb" wird die Drahtvorschubgeschwindigkeit kontinuierlich über das analoge Ausgangsmodul in der Robotersteuerung (vgl. Abschnitt 4.1) an die momentane Bahngeschwindigkeit angepaßt. In einem Unterprogramm des NC-Programms wird in Zeitintervallen von 24 ms die momentane Bahngeschwindigkeit $v_{S,IST}(t)$, gegeben durch eine Systemvariable, abgefragt und mit der Soll-Bahngeschwindigkeit $v_{S,SOLL}$ verglichen:

$$x_v(t) = \frac{v_{S,IST}(t)}{v_{S,SOLL}} \quad (4.1)$$

Der sich daraus ergebende geschwindigkeitsproportionale Faktor $x_v(t)$ zwischen 0 und 1 wird als Multiplikator für die Sollwertvorgabe der Lotzuführgeschwindigkeit v_D herangezogen. Die Abfrage und der Wechsel der Fördergeschwindigkeiten führen zu keinem Anhalten in der Vorschubbewegung des Roboters. Die Drahtfördergeschwindigkeit kann so zwischen 0 und 120 mm/s variiert werden.

Die in einer festen Raumposition gemessenen Vorschubschwankungen liegen bei $\sigma=0,13$ mm/s (Standardabweichung) und sind durch den 40 W Servomotor bedingt. Während des Lötvorgangs führen die Reibungsverhältnisse in der aus Teflon gefertigten Drahtführungsseele des Schlauchpakets zusätzlich zu Schwankungen des Drahtvorschubs.

4.6.2 Heißdrahtzuführung

Heißdrahtzuführungen werden überwiegend beim Heißdrahtbeschichten sowohl beim Auftragsschweißen als auch beim Auftragslöten, beispielsweise von Verschleißschichtschichten, eingesetzt [z.B. 98]. Dabei kommen unterschiedlichste Erwärmungsprinzipien wie direkte und indirekte Widerstandserwärmung oder induktive Erwärmungsmethoden zum Einsatz.

Für das Verbindungslöten mit vorgeheiztem Lotdraht wurde auf das Prinzip der indirekten Widerstandserwärmung durch Wärmestrahlung zurückgegriffen, **Bild 4.10**. Als Drahtfördereinrichtung wird auch hier die automatische Kaltdrahtvorschubeinheit verwendet. Eine einfache Drahtzuführseele mit Schutzummantelung dient der Übertragung des Lotdrahtes zur Drahterwärmungseinheit direkt am Bearbeitungskopf.

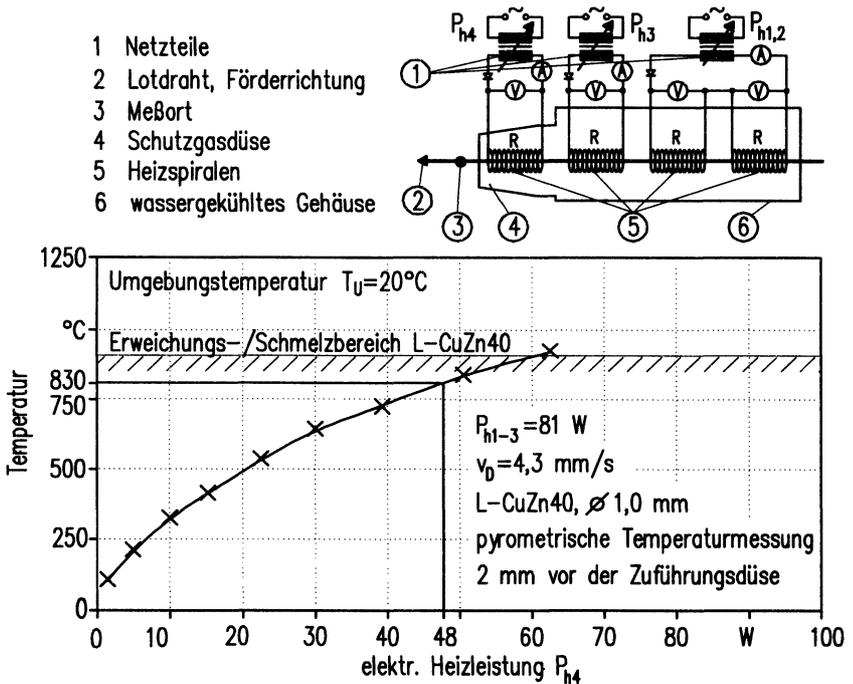


Bild 4.10: Heißdrahtzuführung für das Laserstrahlhartlöten

Die speziell konstruierte Drahterwärmungseinheit besteht aus 4 Widerstands-Heizelementen (Heizspiralen), der Drahtführung durch die Heizspiralen, der Schutzgasdüse und einem wassergekühlten Aluminiumgehäuse. Für die Energieversorgung werden die Heizspiralen von flexibel verstellbaren Netzgeräten ($U = 0 \dots 40 \text{ V}$, $I = 0 \dots 30 \text{ A}$) mit Gleichstrom versorgt. Während die Heizelemente im Gehäuse der Drahterwärmungseinheit zum Vorheizen des Lotdrahtes konzipiert sind, wobei selbst ein Stillstand des Lotdrahtes kein Anschmelzen des Lotes verursachen darf, dient die Heizspirale in der Schutzgasdüse, die mit der elektrischen Heizleistung P_{h4} gespeist wird, zum Aufheizen auf Solltemperatur. Mittels experimentell ermittelten Kennlinien kann die gewünschte Temperatur über die elektrischen Stellgrößen Spannung und Strom vorgegeben werden. Die typischen Heizleistungen pro Widerstands-Heizelement liegen zwischen 40 W und 50 W.

Der Lotdraht wird beim Führen durch die Widerstands-Heizelemente erwärmt. Die elektrische Isolation des Drahtes gegenüber den Heizwendeln übernehmen Röhrrchen aus technischer Keramik (Al_2O_3). Koaxial mit der Führung des Lotdrahtes durch die Heizelemente wird Schutzgas zugeführt, um eine Oxidation des Lotes während der Erwärmung zu verhindern. Die Aufnahme des Heizsegmentes vor Austritt des Drahtes aus der Vorrichtung dient gleichzeitig als Schutzgaszuführung für den Lötprozeß und zur Erwärmung des Schutzgases.

Mit der Heißdrahtzuführung sind Temperaturen von über 1000°C im Inneren der Drahterwärmungseinheit erzielbar. Dies führt jedoch zu einem schnellen Verschleiß der Heizspiralen. Voruntersuchungen haben ergeben, daß die Erweichungstemperatur des verwendeten Lotdrahtes L-CuZn40 etwa 40°C bis 50°C ($\approx 850^\circ\text{C}$) unterhalb der Schmelztemperatur T_s liegt. Diese Erweichungstemperatur ist als Maximaltemperatur aufzufassen, um ein prozeßsicheres Zuführen des Heißdrahtes zu gewährleisten. Bei einer Temperatur des Lotdrahtes von 850°C im Inneren der Drahterwärmung wird nach Austritt aus der Zuführungsdüse eine Lottemperatur von 830°C erreicht. Die notwendige gesamte elektrische Heizleistung beträgt $P_h = 129 \text{ W}$.

4.6.3 Lotpulverzuführung

Für die Untersuchungen zum Laserstrahlhartlöten mit Pulverlot kam eine speziell für die Laserstrahlbearbeitung konzipierte Pulverzuführung zum Einsatz (Fa. Krupp, Typ LASPU), die insbesondere für die Zuführung von Pulver in kleine Fügespalte ausgelegt war [99]. Über einen Vorratsbehälter mit einem Fassungsvermögen von ca. 1 kg bis 1,5 kg gelangt das Lotpulver in die Förder- und Dosiervorrichtung und wird hier

über eine Transportrolle einem flexiblen Metallrohr ($\varnothing_{\text{innen}}=1,0$ mm) zugeführt. Dabei wird das Lotpulver mit einem Druck von ca. 0,02 MPa durch das flexible Zuführungsrohr zur Düse transportiert und dort unter koaxialer Schutzgaszuführung in den Lötbereich eingebracht. Das Lotpulver verläßt die wassergekühlte Zuführungsdüse durch ein innenpoliertes Keramikrohr (Al_2O_3) mit koaxialer Schutzgaszuführung. Die Lotmenge wird über die Geschwindigkeit der Transportrolle sowie den Abstand zwischen dem Zuführungsrohr aus dem Vorratsbehälter und der Transportrolle bestimmt. Die Pulveraustrittsgeschwindigkeit ist dabei abhängig von dem Innendruck der Dosiereinrichtung.

Über ein digitales Ausgangsmodul in der Robotersteuerung erfolgt die steuerungstechnische Anbindung der Zuführung an das Gesamtsystem (vgl. Einführung in Kapitel 4). Die Umdrehungsgeschwindigkeit der Transportrolle wird über die Potentiometereinstellung am Netz- und Steuerteil zwischen 0 und 10 Skalenteilen vorgegeben.

Das Pulver wird in einem Pulverstrahl mit einer Divergenz von $\Theta/2=5^\circ$ dem Lötbereich zugeführt. Die Lotmengen werden typischerweise zwischen $m_{\text{zw}}=1,5$ g/min (0,5 Skt.) und 10,2 g/min (2 Skt.) variiert. Die Pulververluste durch den sogenannten Offspray, d.h. die durch die Pulverstreuung nicht in die Löt Nähte eingebrachten Lotmengen, betragen etwa 10 %.

4.7 Schutzgaszuföhreinrichtungen

Die Systemkette der Schutzgaszuführung besteht aus der Standardschutzgasflasche, zwei Druckminderern, einem Drosselventil mit Durchflußmesser und der Gasaustrittsdüse. Als Durchflußmesser wurde ein auf Luft geeichtes Normröhrchen mit Schwebekörper gewählt. Der Meßbereich dieses Durchflußmessers liegt zwischen 300 und 1100 l/h, bei einem Druck von 0,12 MPa. Die Dichtekorrektur, d.h. die Umrechnung der Dichte ρ von Luft auf das verwendete Schutzgas, erfolgt über die Partialdrücke. Bei dem verwendeten reduzierenden Schutzgas 95 % N_2 mit 5 % H_2 (vgl. Abschnitt 6.1) ermittelt sich die Dichte nach:

$$\rho_{\text{Form}} = \rho_{\text{H}_2} \cdot \frac{PH_2}{PN_2} + \rho_{\text{N}_2} \cdot \frac{PN_2}{PN_2} \quad (4.2)$$

mit	PH_2	Partialdruck des Wasserstoffes
	PN_2	Partialdruck des Stickstoffes
	ρ_{H_2}	Dichte Wasserstoff (20 °C, 0,1 MPa): 0,089 kg/Nm ³
	ρ_{N_2}	Dichte Stickstoff (20 °C, 0,1 MPa): 1,251 kg/Nm ³

Daraus resultiert eine Dichte $\rho_{\text{Form}} = 1,193 \text{ kg/Nm}^3$. Der Umrechnungsfaktor ergibt sich nach [100] aus:

$$\text{Umrechnungsfaktor}_{\text{Luft-Formiergas}} = \sqrt{\frac{\rho_{\text{Luft}}}{\rho_{\text{Form}}}} \quad (4.3)$$

Nach Gleichung (4.4) wird ein Umrechnungsfaktor von 1,040 gegenüber Luft bestimmt. Die Abweichungen durch diesen Umrechnungsfaktor liegen allerdings weit unterhalb der Meßunsicherheit des Durchflußmessers von 2,5 % des Absolutwertes [100].

Für die Untersuchung der Wirkungsweise der Schutzgaszuführung wurde sowohl eine Zuführung gewählt, bei der das Schutzgas koaxial zum Lotdraht austritt, als auch eine Zuführung, die unabhängig von der Drahtzuführung ist.

Die Drahtzuführungseinheit erlaubt die Schutzgaszuführung koaxial zum Lotdraht (vgl. Abschnitt 4.6.1). Über 12 radial zum Lotdrahtaustritt angebrachte Gasaustrittsöffnungen ($\varnothing=0,5 \text{ mm}$) strömt das Schutzgas in die Zuführungsdüse (Gasaustrittsöffnung $\varnothing=13 \text{ mm}$) und damit koaxial zum Lotdraht aus. Bei der eigens für die lotdraht-unabhängige Schutzgaszuführung konstruierten Düsenhalterung strömt das Schutzgas durch eine Zentralbohrung in die Düse (Gasaustrittsöffnung $\varnothing=13 \text{ mm}$). Dieses Führungselement ermöglicht die Variation von Zuführungsrichtung, -winkel und -abstand zur Lötzone und zum Lotdraht. Die Schutzgaszuführungen für die Heißdraht- und Pulverzuführungen erfolgen ebenfalls koaxial zum Lot. Mittels 8 radial um die Lotaustrittsöffnung angebrachten Bohrungen wird das Schutzgas durch Gasaustrittsöffnungen mit Durchmessern von $\varnothing=15 \text{ mm}$ (Heißdraht) und $\varnothing=11 \text{ mm}$ (Pulver) dem Lötbereich zugeführt.

4.8 Temperaturmeßeinrichtungen

Zur Ermittlung des zeitlichen Verlaufs und der lokalen Verteilung der Blechoberflächentemperaturen während des Laserstrahlhartlötens wurden on-line zum Lötvorgang Temperaturmeßeinrichtungen in den Versuchsaufbau integriert.

Die Zeitauflösung der Blechoberflächentemperatur wird mittels Einfarbenpyrometer detektiert. Für jeden Stoßpartner wird dabei ein Pyrometer eingesetzt. Das Meßsystem besteht dabei jeweils aus der Pyrometeroptik, der Lichtleitfaser und dem Pyrometer. Die Pyrometeroptik hat einen Meßfleckdurchmesser von 1,2 mm bei einer Meßentfernung von 80 mm. Über eine 5 m lange Lichtleitfaser mit einem Kerndurch-

messer von 400 μm wird das Temperatursignal dem Pyrometer zugeführt. Im Meßbereich von 300°C bis 1400°C detektiert das Infrarot-Pyrometer mit einer Anstiegszeit von 0,3 ms das einfallende Temperatursignal. Der empfindliche Wellenlängenbereich liegt zwischen 1,5 μm und 1,8 μm . Der von 0,1 bis 1 wählbare Emissionsfaktor ϵ wird mit $\epsilon=0,45$ (Stahl mit leicht oxidierte Oberfläche) eingestellt und bleibt über den gesamten Meßbereich konstant. Die Meßgenauigkeit bei $\epsilon=1$ beträgt 1 % vom Meßwert. Die Streuung liegt unter 0,3 %. Als Ausgangssignal des Pyrometers wird ein linearer Strom von 0 mA bis 20 mA ausgegeben [101]. Die beiden hier beschriebenen Pyrometer werden in der unter Abschnitt 4.5 vorgestellten on-line Prozeßregelung eingesetzt.

Die orts aufgelöste Temperaturverteilung wird mittels einer CCD-Kamera (CCD: **Charged-Coupled-Device**) erfaßt (Fabrikat: Hörotron GmbH, Typ CF 6/1). Die Kameraausstattung besteht aus einem 90 mm-Objektiv, einem Infrarot-Filter und zwei Graufiltern. Der detektierbare Temperaturbereich ist auf 900°C bis 1300°C begrenzt, bei einer Arbeitswellenlänge von 0,9 μm bis 1,2 μm . Vor der Ausgabe der orts aufgelösten Temperaturverteilung in 256-Falschfarben-Darstellung ist eine Umrechnung der Helligkeits- in Temperaturwerte über Kalibrationstabellen der Kamera erforderlich. Die Temporauflösung der Kamera wird mit 2K bei 1000°C angegeben [102].

Zeitaufgelöste Temperatur- oder Laserleistungssignale werden mit einem Transientenrekorder (Fa. Krenz Qualitätssicherungssysteme, Transient-Recorder TRC 6070) aufgezeichnet. Über vier Eingänge werden die Signale in einer Taktzeit von 0,1 μs eingelesen. Die Ausgabe erfolgt in Dezimalwerten zwischen 0 und 256. Über eine geeignete Software werden die Korrelationen zwischen Laserleistung und Temperatursignal dargestellt und ausgewertet.

5 Versuchswerkstoffe, -durchführung und -auswertung

Nachfolgend werden die Versuchswerkstoffe, die Versuchsdurchführung und die -auswertung beschrieben. Für die Auswertung werden die Güteanforderungen der Automobilindustrie und die gültigen Normen zugrundegelegt.

5.1 Versuchswerkstoffe

Die Versuchswerkstoffe gliedern sich in die Grundwerkstoffe und die Lotwerkstoffe. Die Auswahl der Versuchswerkstoffe orientiert sich an den konventionellen Werkstoffen der Automobil- und Löttechnik.

5.1.1 Grundwerkstoffe

Die im folgenden beschriebenen Ergebnisse werden an den unlegierten kaltgewalzten Baustahlblechen der Qualität DC04 (Werkstoffnummer: 1.0338) nach DIN EN 10130 [103] erarbeitet. Soweit die Bleche elektrolytisch verzinkt sind (DIN EN 10152: DC04+ZE [104]), handelte es sich um einseitig aufgebrauchte Zinkschichten mit Nennschichtdicken von 7,5 μm oder 10 μm [105]. Aufgrund ihrer guten Kaltumformbarkeit finden diese Stähle ihre Verwendung im heutigen Automobilbau und werden in Blechdicken von $s=0,88$ mm und 1,0 mm verarbeitet [106]. Die wichtigsten mechanisch-technologischen sowie einige thermo-physikalische Kennwerte von DC04 sind in **Tabelle 11.2** im Anhang zusammengefaßt.

5.1.2 Lotwerkstoffe

Für das Hartlöten von un- und niedriglegierten Baustählen werden in der konventionellen Löttechnik (Handflamm-, Ofen- und Induktionslöten) Lote auf Kupfer- und Silberbasis empfohlen (vgl. Abschnitt 2.3.1). Hinsichtlich ihrer Eignung für das Laserstrahlhartlöten mit automatisch angesetztem Lotdraht werden die in **Tabelle 5.1** aufgeführten Lotwerkstoffe L-CuZn40 und L-Ag55Sn untersucht. Die verwendete Drahtdicke beträgt 1,0 mm. Das Kupferbasislot L-CuZn40 ist ein Standardhartlot für die Automobilkarosseriefertigung (vgl. Abschnitt 2.3.2). Es wird daher für die grundlegenden Versuche zur Prozeßführung herangezogen. Das Silberbasislot L-Ag55Sn wird zusätzlich als Pulverlot eingesetzt. Dieses Pulverlot wird über ein Luftverdü-

sungsverfahren hergestellt und weist eine ungleichmäßige und kantige Kornform auf (Korngröße: $\varnothing < 120 \mu\text{m}$).

Kurzzeichen nach DIN 8513 und Werkstoff-Nr.	chemische Zusammensetzung in Gew.-%					Schmelz- T_S und Arbeitstemperatur T_A [°C]
	Cu	Ag	Sn	Si	Zn	
L-CuZn40 Werkst.-Nr.: 2.0367	58 bis 62	----	<0,5	0,1 bis 0,5	Rest	T_S : 890-900 T_A : 900
L-Ag55Sn Werkst.-Nr.: 2.5159	22	56	5	----	17	T_S : 630-660 T_A : 660

Table 5.1: Chemische Zusammensetzung und löstechnisch wichtige Temperaturen der eingesetzten Lotwerkstoffe (Herstellangaben)

Weitere mechanisch-technologische sowie thermo-physikalische Eigenschaften der Lote sind im Anhang in **Table 11.2** beschrieben.

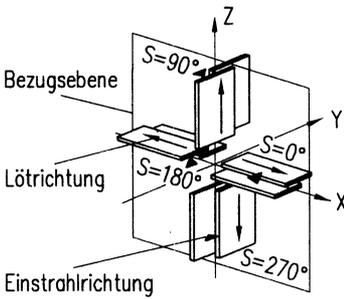
5.2 Versuchsdurchführung

Kenngößen, die die räumliche Orientierung der Naht beschreiben, sind nach DIN ISO 6947 [107] der Nahtneigungswinkel S und der Nahtdrehwinkel R , **Bild 5.1**. Die Nahtarten und die Spaltkenngößen sind in **Bild 5.2** beschrieben.

Die Untersuchungen werden an ebenen Blechproben (Abmessungen: $120 \cdot 100 \text{ mm}^2$) in der Wannenlage und unterschiedlichen räumlichen Arbeitspositionen durchgeführt. Mit verschiedenen räumlichen Nahtorientierungen erfolgen zusätzlich Lötungen an 90° -Winkelblechen mit Biegeradien von $r=2 \text{ mm}$, 5 mm und 10 mm .

Die Untersuchungen konzentrieren sich auf die im Karosserierohbau üblichen Standardverbindungen. Dies sind Überlappverbindungen, die als Flächennähte am Überlapp- bzw. abgesetzten Überlappstoß ausgeführt werden; aber auch Stumpfstoßver-

Nahtneigung S (für Nahtdrehung $R=90^\circ$)



Nahtdrehung R (für Nahtneigung $S=0^\circ$)

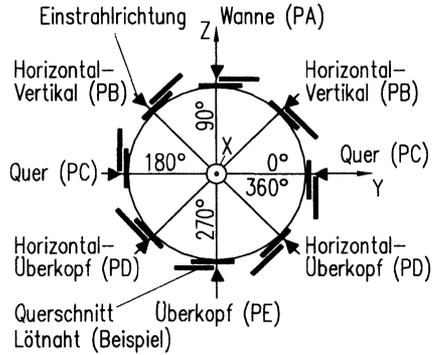


Bild 5.1: Schematische Darstellung des Nahtneigungs- und Nahtdrehwinkels für räumliche Arbeitspositionen (Hauptpositionen) nach DIN ISO 6947 [107]

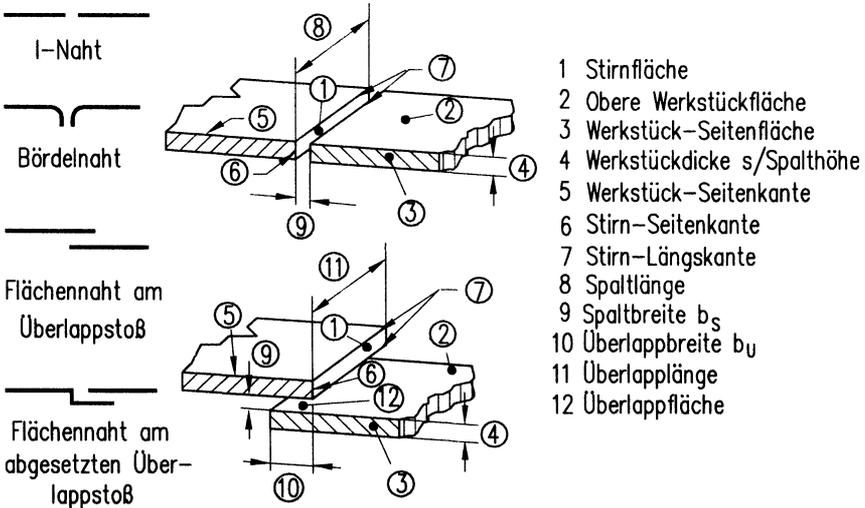


Bild 5.2: Lötnahtarten und die Definition der Spaltkenngrößen nach DIN 1912 [108]

bindungen wie die I-Naht und die Bördelnaht. Die Bördelnähte werden dabei von der dem Flansch abgewandten Seite gelötet.

Die Lotnähte werden grundsätzlich als Liniennähte in einer Lotlage oder, wie teilweise beim abgesetzten Überlappstoß zur Erzielung einer Nahtüberhöhung, in mehreren Lotlagen aufgebaut. Die Einbringung des Lotes in die Lötzone während des Prozesses erfolgt kontinuierlich über die Lotzuführung. Es wird nur unter Schutzgas gelötet und kein Flußmittelzusatz verwendet.

Für das Laserstrahlhartlöten mit der Zweistrahltechnik existiert eine Vielzahl von Prozeßparametern bezüglich der Laserstrahlen (Laserstrahlleistung, Fokusslage, Einstrahlwinkel, etc.) sowie der Löt Hilfsstoffe (Zuführungswinkel Lot/Schutzgas, Fördergeschwindigkeit, Durchflußmenge, etc.). In **Bild 5.3** sind die für die Versuchsdurchführung wesentlichen Parameter zusammengefaßt. Aus den Laserparametern Fokusslage und Einstrahlwinkel resultiert die Laserstrahlwirkfläche. Die Berechnung erfolgt wie im Anhang Abschnitt 11.4 beschrieben.

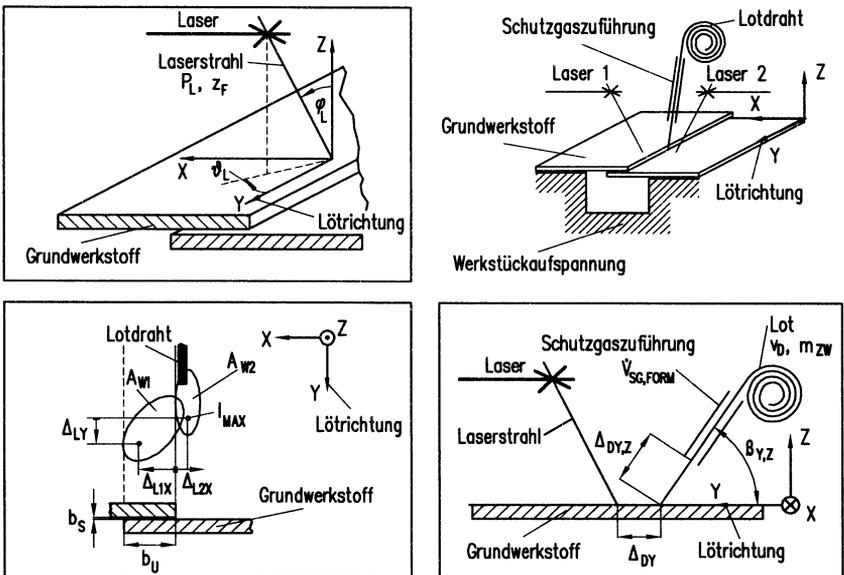


Bild 5.3: Prozeßparameter für das Laserstrahlhartlöten mit der Zweistrahltechnik

5.3 Beurteilung der Bearbeitungsqualität

Korrosionsbeständigkeit, hohe Festigkeit, geringer Verzug und Lackierfähigkeit des nachbearbeiteten Nahtbereiches sind die grundsätzlichen Anforderungen an das Bearbeitungsergebnis (vgl. Abschnitt 2.3.2). Diese geforderte Bearbeitungsqualität kann durch eine Vielzahl möglicher Fehler beeinträchtigt werden. Zur Ermittlung des ursächlichen Zusammenhangs zwischen den Bearbeitungsparametern und dem Bearbeitungsergebnis, wird das Lötresultat in Anlehnung an DIN 8515 [109] hinsichtlich aufgetretener Fehler untersucht. Unter Fehlern werden dabei Unregelmäßigkeiten in der Hartlötverbindung sowie Abweichungen von der vorgesehenen Lage der durch Löten verbundenen Teile zueinander und von der vorgesehenen Form des gesamten Bauteils verstanden.

Die Zulässigkeit von Fehlern an Lötverbindungen ist abhängig von den Güteanforderungen. Dafür sind Grenzwerte für die Häufigkeit oder Ausprägung von Unregelmäßigkeiten festzulegen, die basierend auf der Funktion eines Bauteils, in den Konstruktions- oder Arbeitsunterlagen beschrieben werden [110]. Im Rahmen dieser Arbeit wurde nicht die Einhaltung spezifisch festgelegter Güteanforderungen beurteilt, sondern nur die Häufigkeit und Ausprägung der aufgetretenen Unregelmäßigkeiten untersucht. Die **Tabelle 5.2** gibt eine Übersicht und eine kurze Erklärung der untersuchten Fehler.

Fehlergruppe (Ordnungsnr.)	Benennung	Erklärung
Risse (4.100)	Riß	begrenzte Werkstofftrennung mit überwiegend zweidimensionaler Ausdehnung im Lot, im Grundwerkstoff und in der Übergangszone
Hohlräume (4.200)	Gaseinschluß	gasgefüllter Hohlraum
	Pore, Schlauchpore	kugelartiger oder schlauchartiger Gaseinschluß, örtlich gehäuft als Porennebst oder Porenzeile
Feste Einschlüsse (4.300)	Feststoffeinschluß	
Bindefehler (4.400)	Bindefehler	keine oder unzureichende Bindung zwischen Lot und Grundwerkstoff
	Füllfehler*	unvollständige Fugen- oder Spaltfüllung
Formfehler (4.500)	Verzug	unerwünschte Formänderung des gelöteten Werkstücks
	Anschmelzungen	angeschmolzene Werkstückoberfläche im Bereich des Lotes
	Anlösen	Schädigung der Werkstückoberfläche durch erosive Wirkung des Lotes
	rauhe Lotoberfläche	
sonstige Fehler (4.600)	Spritzer	auf der Werkstückoberfläche haftende Lotperltropfen
	Lotausbreitungsfehler	unerwünschte Benetzung von Grundwerkstoff durch das Lot

* Anstelle der Füllfehler wird der Füllgrad im Spalt ermittelt. Der Füllgrad ist eine in der Löttechnik übliche und in der DIN 8505 definierte Kenngröße, die den prozentualen Anteil des mit erstarrtem Lot gefüllten Spaltes angibt und somit auch Füllfehler berücksichtigt.

Tabelle 5.2: Auswahl von Fehlern an Löt Nähten in Anlehnung an DIN 8515 [109]

Für die Erfassung von Merkmalen an einer Lötnaht sowie der zulässigen Beanspruchung werden die in **Tabelle 5.3** angeführten Prüfmethoden angewandt. Deren Wirkprinzip und die Prüfvorschriften sind den jeweiligen Literaturangaben zu entnehmen. Im folgenden werden die Einsatzbedingungen dieser Prüfmethoden und die Auswertung der von ihnen gelieferten Daten vorgestellt.

Sichtprüfung	Konturerfassung	Festigkeitsprüfung	weitere Prüfungen
Röntgendurchstrahlung	2D-Tastschnittverfahren	Härteprüfung	Elementanalyse
Lichtmikroskopie	3D-Tastschnittverfahren	Zug- und Zug-scherprüfung	
Rasterelektronenmikroskopie			
Farbeindringversuch			

Tabelle 5.3: Prüfmethoden zur Erfassung von Merkmalen sowie der zulässigen Beanspruchung von Lötnahten

Unter dem Überbegriff Sichtprüfung sind die Verfahren zusammengefaßt, die eine optische Überprüfung der Lötnaht ermöglichen oder unterstützen. Hauptsächlich ein geringer Füllgrad, aber auch Poren und teilweise auch Makrorisse werden durch eine Sichtprüfung mittels Röntgendurchstrahlung in Anlehnung an DIN 54111 Teil 1 [111] erfaßt.

Der Lotverlauf im Spalt hebt sich in der Lötnahtaufnahme durch einen dunkleren Kontrast gegenüber der Umgebung (Blechwerkstoff) hervor. Poren und andere Lotfehlstellen setzen sich gegenüber dem Lot heller ab. Die zu erreichende Aufnahmequalität wird für die Röntgendurchstrahlprüfung durch Bildgüteprüfkörper nach DIN 54109 festgelegt. Für die Prüfung von Stahlwerkstoffen wird ein Drahtsteg nach DIN FE 10/16, bestehend aus 7 Stahldrähten, eingesetzt. Der Durchmesser der Drähte nimmt nach einer geometrischen Reihe von 0,4 mm bis 0,1 mm ab. Mit dem kleinsten, in der Röntgenaufnahme noch erkennbaren Drahtdurchmesser von 0,1 mm, ergibt sich nach [112] eine Bildgütezahl von 16. Dies bedeutet aber nicht, daß Fehler und Merkmale in der Größenordnung von 0,1 mm sichtbar sind, sondern nur, daß die geforderte Bildgüte für die Röntgendurchstrahlungsprüfung erreicht wurde. Aus der

Bildgütezahl und der durchstrahlten Blechdicke ergibt sich die Dickennachweisempfindlichkeit. Sie ist das Verhältnis des dünnsten erkennbaren Drahtdurchmessers zur durchstrahlten Blechdicke. Bei Standardblechdicken von 0,88 mm und 1,0 mm im Überlapp und vernachlässigtem Lotspalt ergeben sich bei einem erkennbaren Drahtdurchmesser von 0,1 mm Dickennachweisempfindlichkeiten von 5,7 % bzw. 5 %.

Die auf der Röntgendurchstrahlung beruhende Auswertung des Lotverlaufs bzw. Füllgrades im Lötspalt über die gesamte Lötnaht, erfolgt für die Flächennaht am Überlappstoß wie in **Bild 5.4** beschrieben. In definierten Abständen wird der Füllgrad als prozentualer Anteil des mit Lot gefüllten Spaltes bestimmt und über die Naht gemittelt. An I-Nähten werden mehrere Schnitte durch das Blech gelegt, Querschliffe angefertigt und der Füllgrad nach dem in **Bild 5.4** angegebenen Meßprinzip bestimmt.

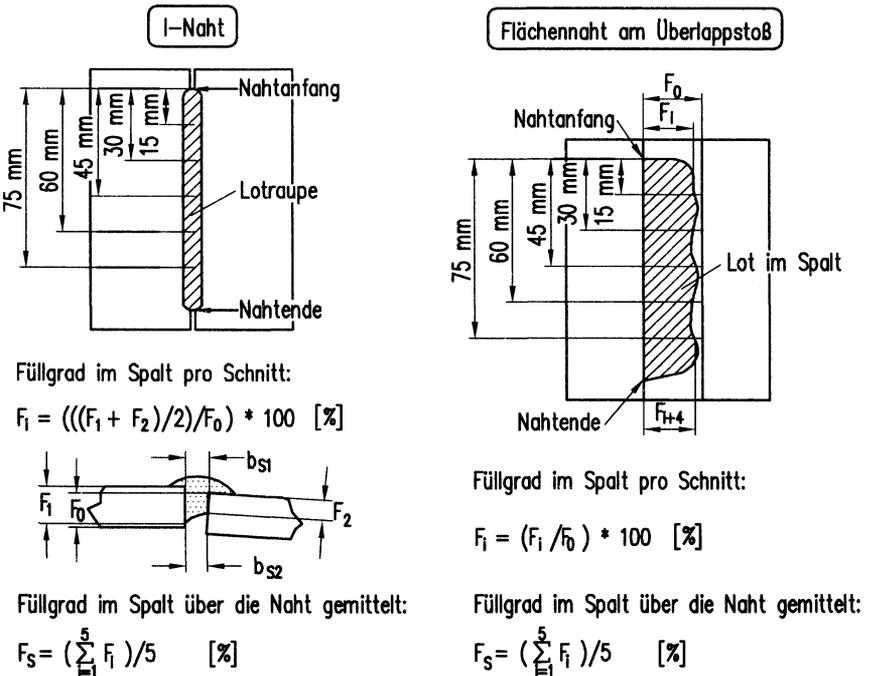


Bild 5.4: Auswertung des Füllgrades im Spalt über die gesamte Lötnaht

Mikroporen und -risse, d.h. Fehler, die von der Oberfläche ausgehen, werden mit Hilfe des Farbeindringverfahrens nach DIN 54152 BAB/BCB [113] nachgewiesen.

Die Auswertung der Verbindungsmikrostruktur des Grundwerkstoffes und des Lotes im Bereich der Lötnaht, wie z.B. Grob- oder Feinkornbildung, erfolgt über eine Sichtprüfung unter dem Licht- oder Rasterelektronenmikroskop (REM).

Durch die Elektronenstrahl-Mikroanalyse (ESMA) wird eine Elementbestimmung hinsichtlich der nachweisbaren Elemente und ihrer Verteilung in der Lötnaht sowie der Diffusionszone vorgenommen. Das Meßprinzip basiert auf einer Kombination von Röntgenmikroanalyse und Rasterelektronen-Mikroskopie. Bei diesem Verfahren trifft ein feinfokussierter Elektronenstrahl auf die Probe. Es kommt zu einer Wechselwirkung zwischen den Elektronen und der Probe. Entsprechend der dadurch emittierten charakteristischen Wellenlänge eines im Elektronenstrahl befindlichen Materials wird ein Signal wellenlängendispersiv über die pro Zeiteinheit einfallenden Impulse aufgezeichnet. Massengehalte bis zu 0,01 % bei einer Relativgenauigkeit von ± 5 % sind möglich. Die Auflösung mit dem fokussierten Elektronenstrahl liegt bei 1-2 μm [114].

Die Erfassung von Formfehlern erfolgt durch Konturmessungen an ebenen und konturierten Blechteilen mittels mechanischer Tastschnittverfahren, **Table 5.3**. An ebenen Blechproben werden die Profilmessungen mit dem Tastschnittgerät T20-DC der Firma Hommelwerke durchgeführt [115], **Bild 5.5**.

Während der Messungen wird das Werkstück senkrecht zum Tastweg auf einem verstellbaren Lineartisch fixiert. Die Lötnaht liegt mittig zur 48 mm langen Taststrecke. In Abständen von 15 mm erfolgten pro Blech 5 Messungen, beginnend 15 mm von der Außenkante der Blechprobe. Eine am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie entwickelte Auswertungs-Software [116] ermittelt nach Übertragung der Meßdaten an den Meßrechner die Kenngrößen Winkelverzug und Längskrümmung [117]. Die Genauigkeit des Systems liegt bei Profilmessungen unter den gewählten Parametern unterhalb von $0,1^\circ$ für den Winkelverzug, bzw. unterhalb von $0,1 \text{ m}^{-1}$, für die Längskrümmung. Der Winkelverzug beschreibt in Anlehnung an DIN 8515 Teil 1 näherungsweise den Winkel zwischen den Oberflächen der beiden gelöteten Bleche. Mittels linearer Regression werden dafür bei jedem übertragenen Profil Ausgleichsgeraden über die Taststrecke von 18 mm errechnet. Aus dem Kehrwert des Radius des Kreisbogens, der durch die Schwerpunkte von jeweils 3 benachbarten Einzelprofilen gelegt wird, errechnet sich die Längskrümmung. Sie ist ein Maß für die Biegeschrumpfung der ebenen Blechprobe.

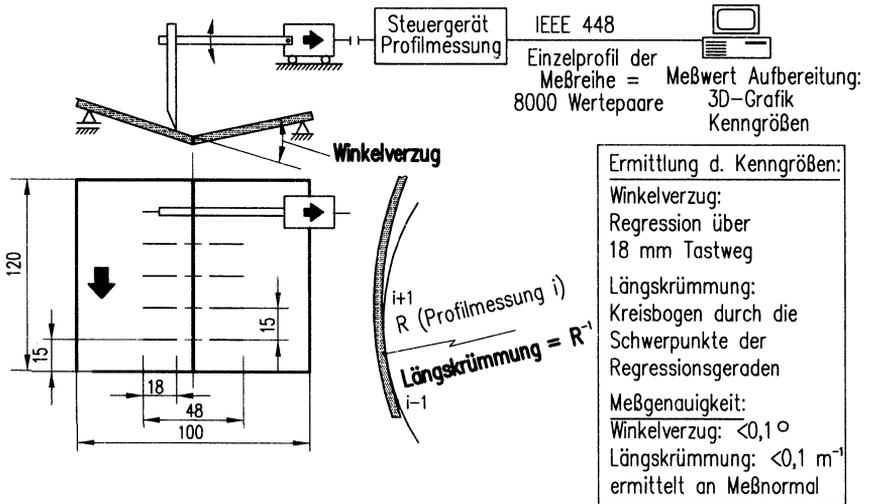


Bild 5.5: Erfassung des thermischen Verzugs von laserstrahlhartgelöteten ebenen Blechproben [81]

Räumliche Bauteile werden mit einer 3D-Meßmaschine (Firma Leitz, Typ PMM 654) vermessen. Nach interner Korrektur des Tasterumfangs und der Temperaturkompensation ist mit diesem Gerät eine Genauigkeit in der Raumdiagonalen von $0,6 \mu\text{m}$ erreichbar [118]. Für den Erhalt einer Aussage über den Verzug an einem räumlich geformten Blechteil erfolgt die Konturbestimmung vor und nach der Lötbearbeitung. Beispielhaft soll hier das Vermessen von Kofferraumdeckeln einer Mittelklasselimousine beschrieben werden. Sie werden, wie in Abschnitt 7.4.2 beschrieben, für einen Vergleich stoffschlüssiger Fügeverfahren hinsichtlich des thermischen Verzugs herangezogen. Die Geometrieerfassung des gesamten Kofferraumdeckels ist aufgrund des begrenzten Meßbereichs der Meßmaschine nicht möglich. Für die Messungen werden die Kofferraumdeckel auf einem Lineartisch fixiert und mit einem Kugeltaster ($\varnothing=5 \text{ mm}$) 5 Konturverläufe im Abstand von 200 mm vermessen, **Bild 5.6**. Der Vergleich der Konturlinien vor und nach dem Fügen gibt Aufschluß über den thermischen Verzug. Die daraus ermittelte mittlere Konturabweichung wird als Maß für den Verzug herangezogen.

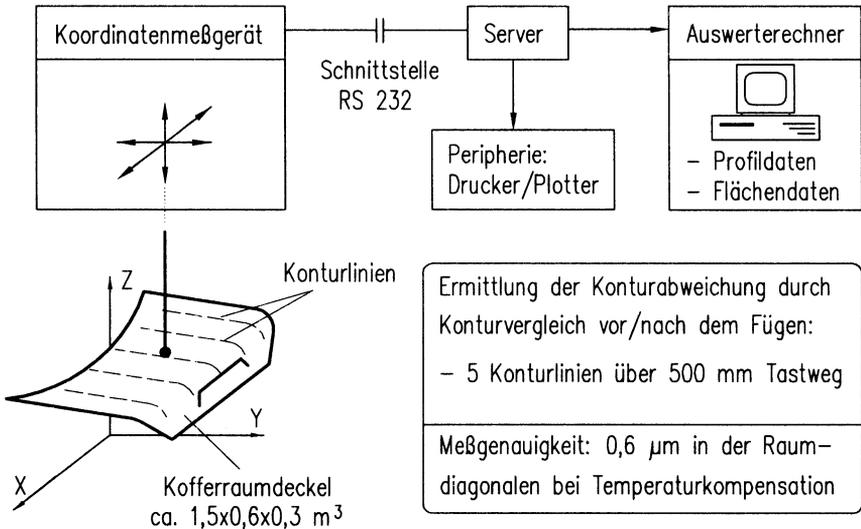


Bild 5.6: Verzugsmessungen an Blechformteilen

Die Verbindungsfestigkeit der Lötverbindungen wird anhand der Härte und der Zug- bzw. Zugscherfestigkeit überprüft. Zur Bestimmung der Härte des Werkstoffes in der Lötzone wird die Vickers-Härteprüfung nach DIN 50133 eingesetzt [119]. Geprüft wird mit einem Härtemeßgerät für Mikro- und Kleinlasthärte mit einer Prüflast von 0,2 kp in Meßabständen von 0,2 mm und 0,3 mm. Bei der Mikro- und Kleinlasthärteprüfung haben zwar kleine Prüfkkräfte den Nachteil, daß die Streuung einzelner Meßergebnisse bis zu 10 % betragen kann, doch reduziert sich der erforderliche Abstand der Eindruckmitten zueinander. Dadurch lassen sich lokal eng begrenzte Härteänderungen erfassen und ein enges Raster an Prüfpunkten über einen Querschnitt legen.

Die Zug- und Zugscherfestigkeit wird im Zugversuch nach DIN 50145 ermittelt [120]. Die nach AWS-Standard C3.1-63 (AWS: American Welding Society) ausgeführten Zugproben werden mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min beansprucht. Bei den Flächennähten am Überlappstoß beeinflußt die gelötete Überlappbreite die Zugscherfestigkeit der Verbindung. Es werden Überlappbreiten von 1, 2 und 4 mm getestet.

6 Ergebnisse zur Prozeßführung

Bei der Prozeßführung für das flußmittelfreie Laserstrahlhartlöten sind zwei wesentliche Einflußfaktoren zu berücksichtigen. Für eine gute Benetzung durch das Lot ist die Reduktion der Oxidschichten auf Grundwerkstoff und Lot sicherzustellen. Zusätzlich muß im gesamten Spaltbereich die lotabhängige Arbeitstemperatur (siehe Tabelle 5.1) vorherrschen. Die Prozeßführung ist dafür auf unterschiedliche Stoßgeometrien abzustimmen.

Nachfolgend wird die Prozeßführung mit Blick auf die oben genannten Einflußfaktoren diskutiert und optimierte bzw. prozeßsichere Bearbeitungsparameter zusammengefaßt. Als Indikator für eine gute Benetzung und eine angepaßte Löttemperatur wird hauptsächlich der Füllgrad im Spalt herangezogen (vgl. dazu auch Abschnitt 7.1).

Grundsätzlich sind die hier mit dem Nd:YAG-Laser erzielten Ergebnisse auch auf den CO₂-Laser übertragbar, wobei insbesondere die geringere Absorption der längeren Wellenlänge des CO₂-Lasers an metallischen Werkstoffen berücksichtigt werden muß.

6.1 Einfluß und Auswahl des Schutzgases

Der Einsatz von Flußmitteln zum Hartlöten ist zum einen mit der Entstehung von gesundheitsschädlichen Dämpfen verbunden, zum anderen kommt es zu Korrosionserscheinungen durch das teilweise hygroskopische Verhalten der Flußmittel. Soll beim Laserstrahlhartlöten aufgrund dieser Begleiteigenschaften auf ein Flußmittel verzichtet werden, muß dessen Funktion durch das Schutzgas übernommen werden. Das Schutzgas hat die Aufgabe, eine Oxidation des Lotes und des Grundwerkstoffes zu verhindern sowie ggf. die Benetzungsfähigkeit des Grundwerkstoffes zu erhöhen.

Die für konventionelle Lötverfahren eingesetzten Inertgase Argon oder Stickstoff führen beim Laserstrahlhartlöten nicht zu den gewünschten Ergebnissen; die Benetzung ist unzureichend und die Lotraupe bildet sich ungleichmäßig aus. Oxidationen auf der Blechoberfläche während des Lötvorgangs können nicht verhindert werden. Beispielhaft zeigt **Bild 6.1, links** das Ergebnis einer Auftragslötung unter Verwendung von Argon als Schutzgas.

Der Einsatz eines Stickstoff-Wasserstoff-Gemisches als reduzierendes Schutzgas ist vom Ofenlöten bekannt. Die Entstehung eines Knallgasgemisches aus Wasserstoff

und Sauerstoff der Atmosphäre wird durch geringe Wasserstoffmengen vermieden. Ebenfalls denkbar, aber mit Blick auf eine Vergiftungsgefahr nicht zu empfehlen, ist die Zugabe radikalen Kohlenmonoxids [15, 52].

Beim Löten mit reduzierendem Schutzgas wird die Mindestlöttemperatur durch das in der Werkstoffkombination Grundwerkstoff-Lot am schwersten zu reduzierende Oxid bestimmt. Die freien Standardbildungsenthalpien (siehe Abschnitt 2.3.1) als Maß für die Beständigkeit der Metalloxide sind für die Hauptbestandteile der bei den Untersuchungen verwendeten Grund- und Zusatzwerkstoffe gering (ZnO , AgO , FeO , Fe_2O_3 , Cu_2O , SiO_2). Mit Ausnahme von Si und Zn sind die Oxide dieser Metalle selbst in Schutzgasatmosphären mit relativ hohem Wasserdampfgehalt bei Löttemperatur leicht zu reduzieren. Unlegierte Baustähle, die an der Oberfläche nur Eisenoxide bilden, können deshalb problemlos mit kostengünstigen reduzierenden Schutzgasen, in Verbindung mit Kupfer- und Silberbasisloten, gelötet werden (vgl. auch Abschnitt 2.3.1) [57].

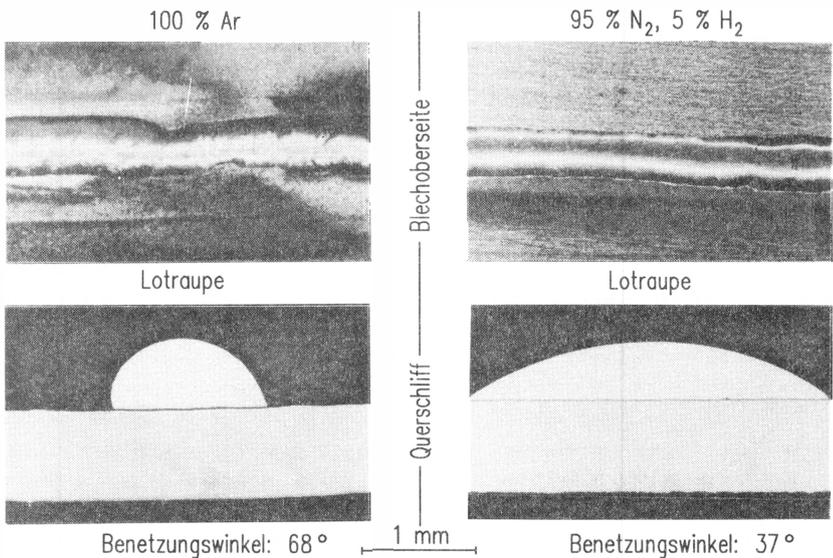


Bild 6.1: Einfluß der Schutzgasart auf die Benetzung (links: inertes Schutzgas, rechts: reduzierendes Schutzgas) (Durchflußmenge $\dot{V}_{\text{SG}}=800$ l/h, koaxial zum Lotdraht)

Für die Auswahl des Schutzgases wird die Oxidations-Reduktions-Kurve des Zinkoxids herangezogen. Dies ist zulässig, da der Siliziumgehalt gering ist (vgl. **Tabelle 5.1** in Abschnitt 5.1). Legt man die Arbeitstemperatur der verwendeten Hartlote als Mindestlöttemperatur zugrunde, so erhält man aus dem Richardson-Ellingham-Diagramm (**Bild 11.1** im Anhang) die notwendige Gleichgewichtskonstante K_p des Schutzgases (vgl. auch Abschnitt 2.3.1). Für das bei niedrigster Arbeitstemperatur von 650 °C ausgelegte Silberbasislot L-Ag55Sn ergibt sich eine Gleichgewichtskonstante von $K_p=3,5 \cdot 10^3$. Dieser Wert stimmt überein mit Angaben in der Literatur [z.B. 121].

Bei den kommerziell erhältlichen Schutzgasen mit Wasserstoffanteilen von 5 % und 10 % werden Feuchtigkeiten von weniger als 20 vpm garantiert [122]. Damit ergeben sich nach Gleichung 2.4 die Gleichgewichtskonstanten zu $K_{p5\%}=2,5 \cdot 10^3$ und $K_{p10\%}=5 \cdot 10^3$. Für das Laserstrahlhartlöten unter Schutzgas wurden aufgrund obiger Abschätzung Gasgemische auf Stickstoffbasis (90 % bis 95 %) unter Zugabe von technischem Wasserstoff (5 % bis 10 %) eingesetzt. Nach DIN EN 439-F2 werden diese leicht reduzierend wirkenden Schutzgase insbesondere zum Wurzelschutz (Formiergas) für alle Stähle eingesetzt. Mit Wasserstoffanteilen < 10 % sind sie nicht brennbar und müssen nicht abgefackelt werden.

Die Reaktionsgeschwindigkeiten sind allerdings bei der Bestimmung der Oxidations-Reduktions-Diagramme und -Berechnungen nicht berücksichtigt. In [121] wird berichtet, daß höhere Reduktionsgeschwindigkeiten von ZnO bei entsprechend gewählten Gleichgewichtsverhältnissen H_2/H_2O erst bei über 900°C ablaufen. Im weiteren ist zu berücksichtigen, daß sich die Feuchtigkeit eines Schutzgases beim Durchströmen der Zuführungselemente (Schlauch, Druckreduzier- und Durchflußmeßelemente etc.) erhöht. Inwieweit die reduzierende Wirkung des Schutzgases an der Wirkstelle beeinträchtigt wird, kann insbesondere beim Löten in einem nicht geschlossenen System nur experimentell ermittelt werden. Die Eignung der gewählten Schutzgase für die Reduzierung der Oxide unter den Lötbedingungen mit dem Laserstrahl wurde deshalb in Vorversuchen ermittelt.

Durch die reduzierenden Schutzgase werden gute Benetzungswinkel auf der Blechoberfläche und ein gleichmäßiger Lotauftrag erzielt, **Bild 6.1, rechts**. Der Wasserstoffanteil mit seiner hohen Affinität zu Sauerstoff reduziert die Oxide auf Grundwerkstoff und Lot. Der Stickstoff als Trägergas verhindert eine zusätzliche Oxidation in der Lötzone durch atmosphärischen Sauerstoff. Die Lötungen an Stumpf- und Überlappverbindungen zeigen vergleichbare Ergebnisse. Für die weiteren Untersuchungen wird das Schutzgas mit 5 % Wasserstoffanteil verwendet. Als normgerechte

Kurzbezeichnung wird im folgenden die Durchflußmenge für das gewählte reduzierende Schutzgas mit $\dot{V}_{\text{SG,FORM}}$ (FORM: Formiergas) angegeben.

Eine Wasserstoffversprödung, wie sie bei einer Wärmebehandlung unter Einfluß von Wasserstoff bei Silber [14] und bei sauerstoffhaltigem Kupfer [62] auftritt, konnte nicht nachgewiesen werden. Dies ist zum einen in den geringen Wasserstoffmengen begründet, zum anderen in dem langsamen Lötvorgang, der genügend Zeit zum Ausgasen des Wasserdampfes zuläßt.

6.2 Justage von Laserstrahlen, Lotdraht- und Schutzgaszuführung

Im folgenden wird die Prozeßführung mit Nd:YAG-Lasern diskutiert. Wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Bearbeitung ist die Justage der Laserstrahlung zur Blechoberfläche und zur Naht. Hinsichtlich der Zuführung des Lotes und des Schutzgases werden die Einflüsse der Parameter Zuführwinkel $\beta_{\text{v,z}}$, Gasdurchflußmenge \dot{V}_{SG} und Lotzuführgeschwindigkeit aufgezeigt. Mit Kenntnis der Prozeßfenster für das Laserstrahlhartlöten lassen sich Strategien für eine geregelte Bearbeitung ableiten und an Blechformteilen einsetzen. Dies wird in den letzten beiden Abschnitten des Kapitels beschrieben.

6.2.1 Justage der Laserstrahlen

Mit der Zweistrahltechnik werden zur Erzielung der notwendigen Arbeitstemperatur sowohl im Lot als auch im Grundwerkstoff die beiden Stoßpartner direkt mit jeweils einem Laserstrahl erwärmt. Das Aufschmelzen des Lotes kann dabei zur Vermeidung der Lotüberhitzung überwiegend indirekt über die Wärmeleitung aus dem Grundwerkstoff erfolgen.

Die wesentlichen Parameter sind neben der Laserstrahlleistung die Größe der Laserstrahlwirkflächen und deren Anordnung zur Lötnaht. Im folgenden sind die Erkenntnisse hinsichtlich der Ausrichtung der Laserstrahlen zur Blechoberfläche und der Geometrie der Laserstrahlwirkflächen zusammengefaßt.

Die optischen Eigenschaften von Metallen werden wesentlich durch deren elektrische Leitfähigkeit bestimmt (vgl. dazu Abschnitt 2.3.4). Mit steigender Leitfähigkeit nimmt auch die Reflexion einfallender Infrarotstrahlung zu. Soweit keine absorptionssteigern-

den Maßnahmen wie das Aufbringen von Beschichtungen getroffen werden oder anormale Absorption durch hohe Intensitäten und Ausbildung einer Dampfkapillare erreicht wird, reflektieren Eisen- bzw. Stahlwerkstoffe die Wellenlänge des Nd:YAG-Lasers ($\lambda=1064$ nm) zu 60 % bis 70 % [20]. Bei zur Blechoberfläche nahezu orthogonal einfallender Laserstrahlung besteht die Gefahr der Rückkopplung der Strahlung in die optischen Elemente der Laser. Im Extremfall kann es zur Zerstörung des empfindlichen Lichtleitfaserendes an der Auskoppelseite kommen.

Der Einfallswinkel des Laserstrahls auf die Blechoberfläche, im folgenden kurz als Lasereinstrahlwinkel bezeichnet, beeinflusst die Größe der Wechselwirkungsfläche und damit die Toleranzen für eine prozeßsichere Lotzuführen. Bei orthogonalem Einfall des Laserstrahls auf die Werkstückoberfläche bildet sich, gemäß der nahezu gaußförmigen Intensitätsverteilung (bei TEM₀₀) im defokussierten Strahl, ein Temperaturprofil auf der Blechoberfläche aus, mit einem hohen Temperaturgradienten. Der zeitliche Temperaturverlauf an einem ortsfesten Meßpunkt auf der Werkstückoberfläche beim Überfahren mit dem Laserstrahl zeigt eine Abhängigkeit vom Strahlradius. Bei großen Strahlradien erfolgt die Aufheizung und Abkühlung des Ortspunktes langsamer als bei kleinen Radien [20]. Dies bedeutet für das Ansetzen des Lotdrahtes auf der Werkstückoberfläche, daß bei kleinen Strahlradien nur ein kleiner Bereich mit entsprechender Temperatur auf der Blechoberfläche zum Aufschmelzen des Lotes zur Verfügung steht. Die Kaltverformungen im Lotdraht, die durch das Aufwickeln auf der Lotdrahtspule und beim Durchführen des Drahtes durch die Zuführungsseele entstehen, verursachen eine Lotdrahtdressur. Aufgrund dessen trifft der Lotdraht beim Verlassen der Zuführungsdüse nicht immer im vorgesehenen Temperaturbereich auf. Ein zeitweises unvollständiges Abschmelzen des Lotdrahtes kann die Folge sein.

Mit zunehmendem Strahlradius, beispielsweise durch Defokussierung des Strahls oder durch Veränderung des Lasereinstrahlwinkels in Vorschubrichtung, definiert durch die Winkel ϑ_L und φ_L (siehe **Bild 5.3**), erhöht sich die Prozeßsicherheit, da der Lotdraht zuverlässig aufgeschmolzen wird. Durch den veränderten Einstrahlwinkel bilden sich die Laserstrahlquerschnittsfläche und die Temperaturverteilung in der Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahl und Blechwerkstück nahezu elliptisch aus. Während die kleine Halbachse der Ellipse dem Radius des orthogonalen Strahls bei gleicher Fokusslage entspricht, vergrößert sich die große Halbachse in der durch φ_L gegebenen Richtung mit dem Einstrahlwinkel ϑ_L . Der Temperaturgradient ist im Bereich der großen Halbachse im Vergleich zur kleinen Halbachse wesentlich geringer, d.h. der Schmelz- und der Überhitzungstemperaturbereich des Lotes liegen auf der Blechoberfläche entlang der großen Halbachse weiter auseinander. Für eine stechende Lotdrahtzuführen wird daher der Drahtzuführensbereich durch die Veränderung des Lasereinstrahlwinkels ϑ_L in Vorschubrichtung wesentlich erweitert und

die Toleranzen für die Zuführung des Lotdrahtes vergrößert. Allerdings muß zur Erzielung vergleichbarer Maximaltemperaturen die mit dem Strahlradius veränderte Intensität über die Laserleistung wieder ausgeglichen werden. Rückreflexion des Laserstrahls in die Laseroptiken können dann nur noch aufgrund einer geringen diffusen Streustrahlung von der Blechoberfläche auftreten.

Für eine prozeßsichere Lotdrahtzuführung ergaben sich experimentell Einstrahlwinkel, beispielsweise beim Hartlöten von I-Nähten, mit φ_{L1} und $\varphi_{L2}=35^\circ$. Als günstige Einstrahlrichtungen bezogen auf die Vorschubrichtung wurde für die beiden Laser $\vartheta_{L1}=10^\circ$, $\vartheta_{L2}=-10^\circ$ ermittelt. Für die Flächennaht am Überlappstoß zeigten sich gute Ergebnisse bei einer Justage des auf den Kehlbereich der Naht ausgerichteten Laserstrahls analog zum Stumpfstoß sowie mit den Winkeln $\vartheta_{L1}=45^\circ$ und $\varphi_{L1}=35^\circ$ des auf das obere Blech gerichteten Strahls. Sofern keine anderen Angaben gemacht werden, sind dies die Standardeinstellungen der durchgeführten Untersuchungen.

Die Untersuchungen zur Justage der Laserstrahlen waren unter anderem Grundlage für die konstruktive Auslegung des 3D-Bearbeitungskopfes (siehe Abschnitt 4.4). Die erforderliche Neigung der Laserstrahlen zur Blechoberfläche führt dabei zwangsläufig zu einem Bearbeitungskopf mit großem Öffnungswinkel und damit zu Einschränkungen bei der räumlichen Bearbeitung. An komplexen Geometrien, wie z.B. Sicken mit geringem Breite-Tiefe-Verhältnis, besteht Kollisionsgefahr für den Bearbeitungskopf und es kann zur Abschattung der Laserstrahlen kommen.

Für das Laserstrahlhartlöten von Überlappverbindungen ist die Größe der Laserstrahlwirkfläche auf der Blechoberfläche entsprechend der Überlappbreite b_U und des geforderten Füllgrades zu wählen. Überdimensionierte Laserstrahlwirkflächen, deren Strahldurchmesser erheblich größer als die Überlappbreite ist, erfordern unnötig hohe Laserleistungen, um die Arbeitstemperatur im Lötbereich bereitzustellen. Ein erhöhter Energieeintrag pro Fläche und ein größerer thermischer Verzug sind die Folge.

Wird durch die geeignete Wahl der Bearbeitungsparameter das Aufschmelzen des Lotes sichergestellt, so erfolgt beim Laserstrahlhartlöten von I-Nähten in der Wannelage eine Spaltfüllung aufgrund des Zusammenwirkens von Gravitation und Kapillarkräften. Die Laserstrahlwirkflächen werden für die symmetrischen Verhältnisse, wie man sie beim Stumpfstoß vorfindet, auch symmetrisch angeordnet, **Bild 6.2, links**.

Die zulässigen Abstände der Intensitätsmaxima sind je nach Wirkflächengröße unterschiedlich und weisen einen weiten Toleranzbereich auf. Für die typischen Wirkflächen von $A_{W1,2}=15 \text{ mm}^2$ ($z_{F1,2}=+17 \text{ mm}$) pro Laser werden Abstände der Intensitätsmaxima zwischen 1,5 mm bis 2,5 mm gewählt.

Beim Zweistrahllöten von Flächennähten am Überlapp- bzw. abgesetzten Überlappstoß hat der Laserstrahl im Kehlbereich der Naht im wesentlichen die Aufgabe, das Lot aufzuschmelzen. Der Laserstrahl im Überlappbereich stellt die Arbeitstemperatur im Spalt sicher, **Bild 6.2, rechts**.

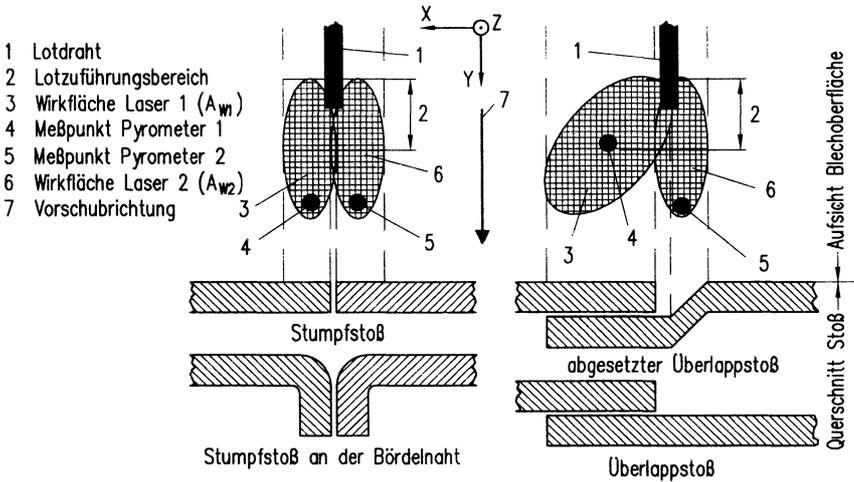


Bild 6.2: Schematische Laserstrahlanordnung mit der Zweistrahltechnik

Bei den überwiegend verwendeten Wirkflächen mit $A_{W1}=113 \text{ mm}^2$ und $A_{W2}=19 \text{ mm}^2$ ($z_{F1}=+50 \text{ mm}$, $z_{F2}=+19 \text{ mm}$) kann im Kehlbereich der Naht in Analogie zu den Bedingungen an der I-Naht bei genügend hoher Laserleistung und korrekt justiertem Lotdraht das Lot sicher aufgeschmolzen werden. Die Benetzung und die Ausbreitung des Lotes im Spalt sind abhängig vom Abstandsmaß Δ_{LX1} des auf das obere Blech gerichteten Laserstrahls zur Blechkante. Zusätzlich beeinflusst der Versatz Δ_{LY} der beiden Wirkflächen parallel zum Stoßverlauf den Fließweg des Lotes im Spalt, **Bild 6.3**. Die Laserstrahlwirklächen können näherungsweise, wie in Abschnitt 11.4 im Anhang beschrieben, berechnet werden.

Ein maximaler Füllgrad im Spalt wird für $\Delta_{LY}=1,5 \text{ mm}$ bis $2,5 \text{ mm}$ erreicht. Als Ursache hierfür wird angenommen, daß die Wirkfläche des auf das obere Blech gerichteten Laserstrahls teilweise auch den Kehlbereich der Lötnaht überdeckt und es zum direkten Erwärmen des Lotes durch den Laserstrahl kommt. Möglicherweise führen

auch Reflexionen des Laserstrahls in Richtung der Lotdrahtzuführung zu einer zusätzlichen Erwärmung des Lotdrahtes.

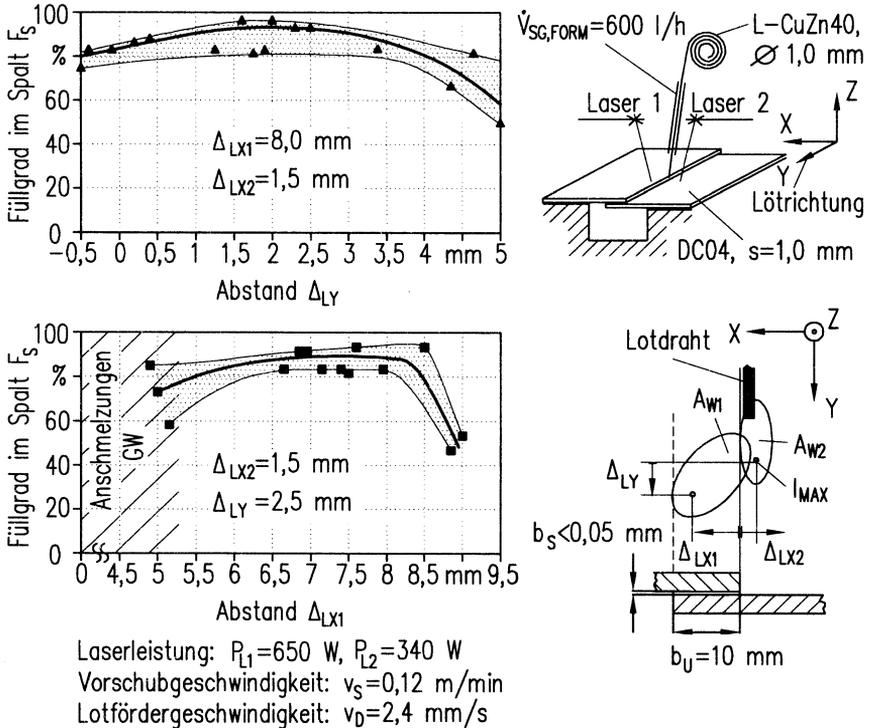


Bild 6.3: Einfluß der Anordnung der Laserstrahlwirklflächen auf den Füllgrad im Spalt (Flächennahe am Überlapstoß)

Bild 6.3 zeigt, daß unter den gewählten Bedingungen die Variation von Δ_{LX} und Δ_{LY} über einen weiten Bereich nur eine geringe Veränderung der hohen erreichbaren Füllgrade im Spalt verursacht. Für $6 \text{ mm} < \Delta_{LX1} < 8,5$ mm liegen die Füllgrade im Mittel über 80 %. Eine Verringerung des Abstandes Δ_{LX1} führt allerdings zur Überhitzung des Lotes. Eine erhöhte Zinkverdampfung in Verbindung mit erhöhter Lotspritzerbildung ist die Folge. Bei Einstellungen von $\Delta_{LX1} < 5$ mm kommt es zu massiven Anschmelzungen des Grundwerkstoffes an der Blechkante des oberen Bleches. Die Einstellung $\Delta_{LX1} > 8,5$ mm führt zum Absinken des Füllgrades. Damit das Lot vom Kehlbereich in

den Spalt fließen kann, muß für den gesamten Fließweg des Lotes im Spalt die Arbeitstemperatur vorherrschen. Das Absinken des Füllgrades ist vermutlich auf die zu geringe Intensität direkt hinter der Nahtkehle im Bereich der Wirkfläche auf dem oberen Blech zurückzuführen. Dadurch entsteht ein Temperaturminimum am Übergang vom Kehlbereich zum Spalt. Untersuchungen zur Temperaturverteilung auf der Blechoberfläche im Bereich der Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahl und Blech bestätigen diese Annahme (vgl. dazu auch Abschnitt 6.3).

Die in **Bild 6.3** dargestellten Ergebnisse sind sicherlich exemplarisch für die gewählten Leistungs- und Geschwindigkeitseinstellungen. Stichversuche haben allerdings gezeigt, daß für die in **Tabelle 6.3** in Abschnitt 6.3 aufgelisteten Parameter die gleichen Abstände Δ_{LX} und Δ_{LY} für die Erzielung hoher Füllgrade gewählt werden können. Für die weiteren Untersuchungen wurden die Einstellungen $\Delta_{LX1}=7,5$ mm, $\Delta_{LX2}=1,5$ mm und $\Delta_{LY}=2,5$ mm verwendet.

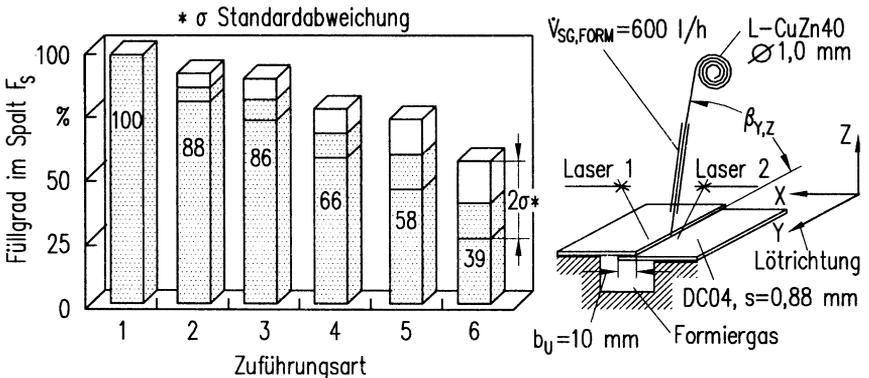
6.2.2 Justage von Lotdraht- und Schutzgaszuführung

Die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse beschreiben den Einfluß der Justage von Lotdraht- und Schutzgaszuführung zueinander, zur Blechoberfläche und zu den Laserstrahlen. Für die Untersuchungen wurden Schutzgaszuführungen eingesetzt, die sowohl eine freiwählbare Zuführung als auch eine Zuführung koaxial zum Lotdraht ermöglichen (vgl. Abschnitt 4.6).

Aus Vorversuchen ergab sich, daß die freie Drahtlänge, d.h. die Länge des Drahtes vom Verlassen der Lotzuführungsdüse bis zum Auftreffen auf dem Blech, so kurz wie möglich zu halten ist. Mit zunehmender Länge kommt es aufgrund der Lotdrahtdressur (vgl. dazu Abschnitt 6.2.1) zu erheblichen Veränderungen hinsichtlich des Drahtauftreffpunktes und damit zu Prozeßinstabilitäten. Um die Kollision von Laserstrahl und Schutzgasdüse bzw. Schutzgasdüse und Blech zu vermeiden, wird eine freie Lotdrahtlänge von $\Delta_{DY,Z}=10$ mm eingestellt. Dadurch ist allerdings aus konstruktiven Gründen die Veränderung des Zuführungswinkels $\beta_{V,Z}$ bei koaxialer Zuführung von Lot und Schutzgas auf 30° bis maximal 65° beschränkt.

Bild 6.4 zeigt die Abhängigkeit des erreichbaren Füllgrades im Spalt von der Anordnung von Lot und Schutzgaszuführung für das Löten von Flächennähten am Überlappstoß. Die stechende, koaxiale Zuführung von Lot und Schutzgas unter einem Winkel $\beta_{V,Z}=50^\circ$ führt zu einem hohen Füllgrad im Spalt, insbesondere beim Schutz der Nahtwurzel mit einem Formiergas. Hohe Füllgrade können aber auch mit senk-

rechter Lot- und schleppender Gaszuführung erzielt werden. Diese Anordnungen ermöglichen eine direkte Erwärmung des Spaltbereiches auf Arbeitstemperatur ohne, daß es zu einer Abschattung des Kehlbereiches der Naht kommt, wie bei einer schleppenden Drahtzuführung. Dennoch weist die stechende gegenüber der senkrechten Zuführungsvariante einige Vorteile auf. Es entfällt ein zusätzliches Justieren der Gaszuführung. Desweiteren kommt es bei der senkrechten Zuführung zu einer erheblichen Überhitzung des Lotes. Dies macht sich in Form von Lotspritzern und erhöhtem Auftreten von Zinkdampf bemerkbar. Eine Untersuchung an I-Nähten ergab vergleichbare Ergebnisse.

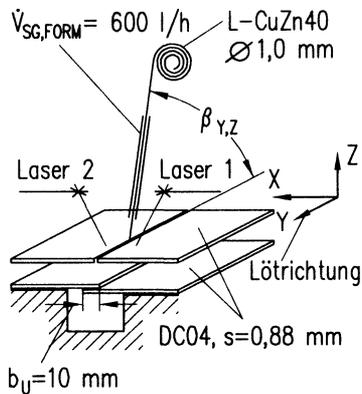
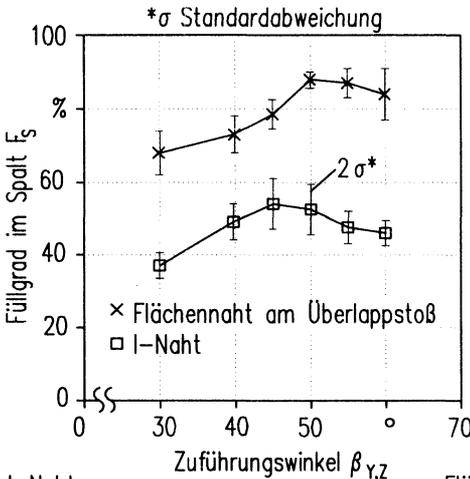


- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Lot und Gas koaxial stechend ($\beta_{Y,Z} = 50^\circ$) und Formiergas 2. Gas und Lot koaxial stechend ($\beta_{Y,Z} = 50^\circ$) 3. Lot senkrecht ($\beta_{Y,Z} = 90^\circ$), Gas schleppend ($\beta_{Y,Z} = 110^\circ$) 4. Gas sowohl schleppend zum Lötbereich ($\beta_{Y,Z} = 110^\circ$) als auch koaxial zum Lotdraht ($\beta_{Y,Z} = 50^\circ$) 5. Gas und Lot senkrecht zum Lötbereich ($\beta_{Y,Z} = 90^\circ$) 6. Lot stechend ($\beta_{Y,Z} = 50^\circ$), Gas schleppend ($\beta_{Y,Z} = 110^\circ$) | Laserleistung:
$P_{L1} = 570 \text{ W} - 650 \text{ W}$
$P_{L2} = 380 \text{ W} - 530 \text{ W}$
Geschwindigkeiten:
$v_s = 0,15 - 0,21 \text{ m/min}$
$v_D = 3,7 - 5,2 \text{ mm/s}$
Spaltbreite: $b_s < 0,05 \text{ mm}$ |
|---|---|

Bild 6.4: Einfluß der Anordnung von Lot- und Schutzgaszuführung auf den Füllgrad im Spalt (Flächennaht am Überlappstoß)

Für das Laserstrahlhartlöten erfolgt die Lotdrahtzuführung sowohl für I-Nähte als auch für Flächennahte in stechender Form, d.h. der Lotdraht wird in Vorschubrichtung gefördert. Dieser setzt hinter dem Intensitätsmaximum in der hinteren Hälfte der Laserstrahlwirkfläche auf (vgl. **Bild 6.2**).

Die Lotfördergeschwindigkeit ist der Nahtart, der Stoßmaßtoleranz und der jeweiligen Vorschubgeschwindigkeit anzupassen. Werden bei einer Nahtart vergleichbare Blechdicken und Spaltbreiten bzw. Überlappbreiten verwendet, ist die Lotfördergeschwindigkeit v_D nur noch linear von der Vorschubgeschwindigkeit v_S abhängig. Aufgrund dessen ergeben sich konstante Verhältnisse der Geschwindigkeiten zueinander. Für I-Nähte beträgt das Verhältnis v_D/v_S etwa 1,4, für Flächennähte am Überlappstoß etwa 1,5 und für Flächennähte am abgesetzten Überlappstoß liegt der Wert im Mittel bei 2,5.



I-Naht:
 Laserleistung: $P_{L1}=300\text{ W}$, $P_{L2}=300\text{ W}$
 Vorschubgeschwindigkeit:
 $v_S=0,18\text{ m/min} - 0,27\text{ m/min}$
 Lotfördergeschwindigkeit:
 $v_D=4,2\text{ mm/s} - 6,3\text{ mm/s}$
 Spaltbreite: $b_S=0,3\text{ mm}$

Flächennahrt am Überlappstoß:
 Laserleistung: $P_{L1}=1000\text{ W}$, $P_{L2}=650\text{ W}$
 Vorschubgeschwindigkeit:
 $v_S=0,18\text{ m/min} - 0,21\text{ m/min}$
 Lotfördergeschwindigkeit:
 $v_D=4,5\text{ mm/s} - 5,2\text{ mm/s}$
 Spaltbreite: $b_S<0,05\text{ mm}$

Bild 6.5: Einfluß des Lotdrahtzuführungswinkels $\beta_{y,z}$ auf den Füllgrad im Spalt F_s

In **Bild 6.5** sind für den Fall der coaxialen Schutzgaszuführung die erreichbaren Füllgrade über den eingestellten Drahtzuführungswinkel $\beta_{y,z}$ dargestellt. Die Laserleistungen P_{L1} und P_{L2} wurden für die Versuche möglichst hoch gewählt. Dies erlaubte zum einen die Veränderung der Vorschubgeschwindigkeit über einen weiten Bereich. Zum anderen erhöhte sich dadurch die Empfindlichkeit gegenüber dem Auftreten von

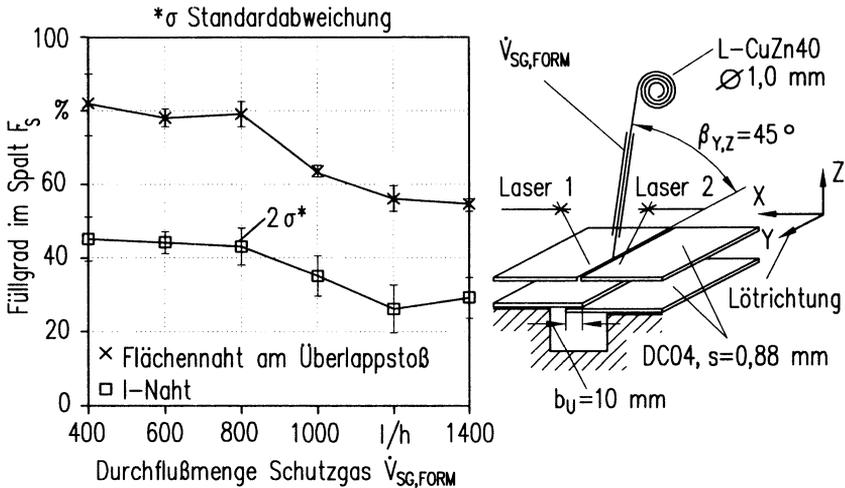
Lotüberhitzungen bei ungünstigen Drahtzuführungswinkeln. Für Flächennähte am Überlappstoß erreicht man höchste Füllgrade $F_s=88\%$ mit der geringsten Standardabweichung von nur 4 % bei einem Zuführwinkel von $\beta_{y,z}=50^\circ$. Für die Lot- und Schutzgaszuführung an der I-Naht wurde als günstigster Zuführwinkel $\beta_{y,z}=45^\circ$ ermittelt, **Bild 6.5**. Die im Vergleich zu Flächennähten wesentlich geringeren Füllgrade im Spalt an I-Nähten sind auf einen fehlenden Nahtwurzelschutz zurückzuführen (vgl. dazu Abschnitt 8.1). Über Stichversuche wurde die Gültigkeit der Versuchsergebnisse hinsichtlich der optimalen Lotzuführungswinkel auch für die in Tabelle 6.3 aufgelisteten Parameter überprüft und bestätigt.

Merkmal Ordnungsnr. nach DIN 8515 T1	Zuführwinkel $\beta_{y,z}$ [°]			
	30	45	50	60
Lotausbreitung (4.615)	□□	■	■	□
Lotspritzer (4.602)	□	□	■	□
Bewertung: □□ kaum bzw. gar nicht, □ gering bzw. niedrig, ■ mittel, ■■ häufig bzw. hoch				

Tabelle 6.1: Bewertung der Merkmale Lotausbreitung und Lotspritzer auf der Blechoberfläche bei Variation des Zuführwinkels $\beta_{y,z}$ der Lot- und Schutzgaszuführung (Flächennaht am Überlappstoß)

In **Tabelle 6.1** zeigt beispielhaft die qualitativen Bewertungen von Überlappplötungen hinsichtlich der Lotausbreitung und dem Auftreten von Lotspritzern auf der Blechoberseite. Die Untersuchungsergebnisse beziehen sich auf Lötungen mit Vorschubgeschwindigkeiten von 0,21 m/min. Eine Erhöhung des Zuführwinkels führt demnach zu vermehrter Lotausbreitung außerhalb des Lotspaltes. Auch die Lotspritzerbildung auf dem Blech nimmt mit steigendem Zuführwinkel zu. Eine Erklärung für das Auftreten dieser Merkmale ergibt sich aus der Geometrie des Lotdrahtes zum Laserstrahl. Bei großen Zuführwinkeln nimmt der Anteil an Drahtlänge, der direkt durch den Laserstrahl erhitzt wird, zu. Dies verursacht eine Überhitzung und ein Abschmelzen des Lotdrahtes vor dem Auftreffen auf dem Blech. Unterstützt wird dieser Vorgang durch die dressurbedingten Schwankungen des Lotauftreffpunktes in den Laserstrahlwirkflächen. Im überhitzten Lot verdampft das Zink unter hohem Dampfdruck und verursacht Eruptionen in der Lotschmelze, die zu den nachweisbaren Lotspritzern auf der Blechoberfläche führen.

Für die Reduktion der Oberflächenoxide auf Lot und Grundwerkstoff und zur Abführung entstandener Feuchtigkeit und freiwerdender Verunreinigungen aus der Lötzone ist eine kontinuierliche Schutzgaszuführung sicherzustellen.



I-Naht:
 Laserleistung: $P_{L1}=300\text{ W}$, $P_{L2}=300\text{ W}$
 Vorschubgeschwindigkeit:
 $v_s=0,18\text{ m/min} - 0,27\text{ m/min}$
 Lotfördergeschwindigkeit:
 $v_D=4,2\text{ mm/s} - 6,3\text{ mm/s}$
 Spaltbreite: $b_s=0,3\text{ mm}$

Flächennaht am Überlappstoß:
 Laserleistung: $P_{L1}=1000\text{ W}$, $P_{L2}=650\text{ W}$
 Vorschubgeschwindigkeit:
 $v_s=0,18\text{ m/min} - 0,21\text{ m/min}$
 Lotfördergeschwindigkeit:
 $v_D=4,5\text{ mm/s} - 5,2\text{ mm/s}$
 Spaltbreite: $b_s < 0,05\text{ mm}$

Bild 6.6: Einfluß der Schutzgasdurchflußmenge $\dot{V}_{SG,FORM}$ auf den Füllgrad im Spalt F_s

In **Bild 6.6** sind die erreichten Füllgrade im Spalt sowie die dazugehörigen Standardabweichungen unter Variation der Schutzgasdurchflußmenge von $\dot{V}_{SG,FORM}=400\text{ l/h}$ bis 1400 l/h aufgeführt. Hohe Füllgrade werden sowohl bei der I-Naht als auch bei der Flächennaht am Überlappstoß bei geringen Durchflußmengen von $\dot{V}_{SG,FORM}=400\text{ l/h}$ bis 800 l/h erzielt. Insbesondere bei kleinen Durchflußmengen von $\dot{V}_{SG,FORM}=400\text{ l/h}$ macht sich allerdings der Einfluß der Absaugungsvorrichtung nachteilig bemerkbar. Ort und Abstand zur Lötzone verändern die Strömung des Schutzgases über der Lötzone und erhöhen die Streuung der Ergebnisse hinsichtlich des Füllgrades im Spalt.

Die geringen Füllgrade bei hohen Durchflußmengen werden auf zwei Ursachen zurückgeführt. Zum einen haben hohe Durchflußmengen eine größere Kühlwirkung durch Konvektion. Zum anderen treten möglicherweise turbulenterer Strömungsverhältnisse auf, so daß atmosphärischer Sauerstoff in die Schutzgasströmung gelangt. Eine Beeinträchtigung der Benetzung und des Lotflusses durch Oxidationen ist die Folge.

In **Tabelle 6.2** sind beispielhaft die qualitativen Bewertungen von Überlapplötlungen hinsichtlich der Lotausbreitung und dem Auftreten von Lotspritzern auf der Blechoberseite aufgeführt. Die Ausbildung der Merkmale Lotausbreitung und Lotspritzer werden nur geringfügig oder gar nicht durch die Variation der Durchflußmenge beeinflusst. Die hohe Lotausbreitung bei niedrigem Schutzgasdurchfluß ist mit der geringeren Kühlwirkung zu erklären, die zu einer geringeren Viskosität des Lotes und dadurch zu einem verbesserten Fließverhalten führt.

Merkmal (Ordnungsnr. nach DIN 8515 T1)	Schutzgasdurchflußmenge $\dot{V}_{SG,FORM}$ [l/h]			
	400	600	800	1000
Lotausbreitung (4.615)	■ ■	■ ■	■	■
Lotspritzer (4.602)	□	□	□	□
Bewertung: □□ kaum bzw. gar nicht, □ gering bzw. niedrig, ■ mittel, ■ ■ häufig bzw. hoch				

Tabelle 6.2: Bewertung der Merkmale Lotausbreitung und Lotspritzer auf der Blechoberfläche bei Variation der Schutzgasdurchflußmenge $\dot{V}_{SG,FORM}$ (Flächennahe am Überlapstoß)

Mit Blick auf die ermittelten Füllgrade im Spalt und die Standardabweichungen wurde für die weiteren Experimente die Durchflußmenge $\dot{V}_{SG,FORM}=600$ l/h sowohl für das Hartlöten von I-Nähten als auch von Flächennähten am Überlapstoß verwendet. Lötungen mit den in **Tabelle 6.3** aufgelisteten Parametern zeigten für die Durchflußmenge von $\dot{V}_{SG,FORM}=600$ l/h vergleichbar hohe Füllgrade im Spalt, wie unter den Bedingungen in **Bild 6.6**.

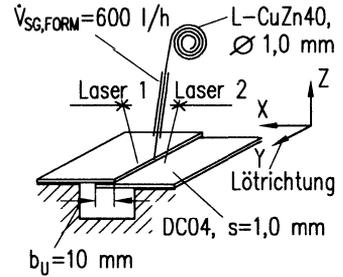
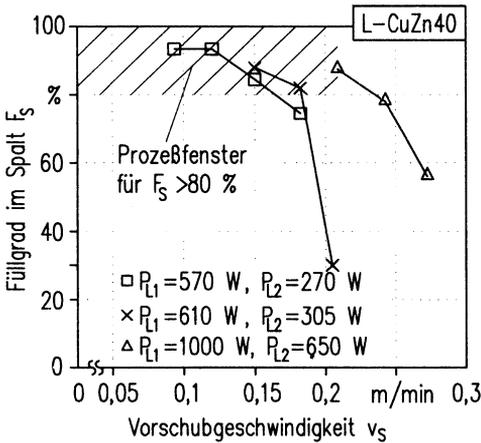
6.3 Prozeßfenster zum Laserstrahlhartlöten

Die Erwärmung der Fügezone am Stoß auf Arbeitstemperatur wird über die in den Grundwerkstoff eingebrachte Laserstrahlenergie erreicht. Die Temperaturverteilung auf der Blechoberfläche steht in direktem Zusammenhang mit der Intensitätsverteilung des Laserstrahls. In Abhängigkeit der Laserleistung sind unter Berücksichtigung des Füllgrades leistungsbezogene maximale Vorschubgeschwindigkeiten zu erzielen.

Bild 6.7 zeigt den Zusammenhang zwischen der Vorschubgeschwindigkeit und der eingestellten Laserleistung für Flächennähte am Überlappstoß mit den Hartloten L-CuZn40 und L-Ag55Sn. Bei maximaler Laserleistung und unter Berücksichtigung von Füllgraden im Spalt über 80 % liegen die erreichbaren Vorschubgeschwindigkeiten für beide Lote bei $v_s=0,21$ m/min. Geringere Vorschubgeschwindigkeiten führen bei der gleichen Laserleistung teilweise zu höherem Füllgrad, können aber gleichzeitig auch eine erheblicher Überhitzung von Lot und Grundwerkstoff verursachen. Beim Kupferbasislot wiesen insbesondere die mit höchster Laserleistung gelöteten Proben eine auf Lotüberhitzung hindeutende Spritzerbildung auf.

Die erzielbaren Vorschubgeschwindigkeiten an Stumpfstoßverbindungen liegen im Vergleich zum Überlappstoß grundsätzlich höher, und es macht sich ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Lotwerkstoffen bemerkbar. Werden mit dem Hartlot L-CuZn40 Geschwindigkeiten von $v_s=0,36$ m/min erreicht (siehe dazu **Bild 7.9**), so erlaubt das Hartlot L-Ag55Sn Maximalgeschwindigkeiten von $v_s=0,48$ m/min, in Pulverform sogar bis $v_s=0,6$ m/min (vgl. auch **Bild 7.8**). Das Kupferbasislot läßt dabei am Stumpfstoß aufgrund seiner Überhitzungsneigung nur geringe Laserleistungen bis $P_L=310$ W zu.

Mit Blick auf die erzielten Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 3,2 m/min beim Laserstrahlhartlöten unter Einsatz von Flußmittel (vgl. Abschnitt 2.3.3), sind die geringen Geschwindigkeiten beim flußmittelfreien Hartlöten auf die langsam ablaufende Reduktion der Oberflächenoxide durch den Wasserstoff im Schutzgas zurückzuführen. Dies macht sich insbesondere bei dem aufgrund geringer Spaltbreite und großer Überlappbreite strömungstechnisch schwer zugänglichen Spaltbereich am Überlappstoß bemerkbar. Hier steht eine vollständig benetzungsfähige Blechoberfläche im Spalt erst zur Verfügung, wenn schon hohe Temperaturen im Spalt erreicht sind. Während des Lötvorgangs kann das Lot bereits frühzeitig in schmelzflüssiger Form im Kehlbereich der Naht vorliegen. Ein Fließen des Lotes in den Spalt und damit hohe Füllgrade werden erst erreicht, wenn der Reduktionsvorgang im Spalt



Spaltbreite: $b_s < 0,05\text{ mm}$
 Lotfördergeschwindigkeit:
 $v_D = 1,8\text{ mm/s} - 7\text{ mm/s}$

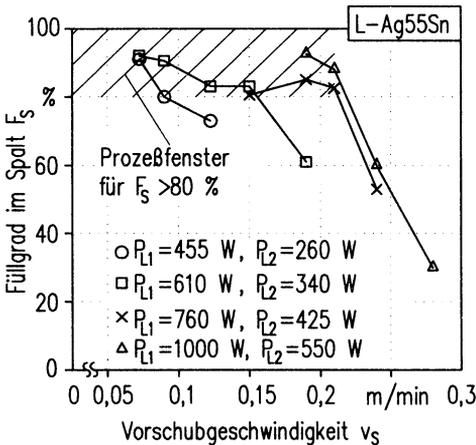


Bild 6.7: Einfluß von Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit auf den Füllgrad im Spalt an Flächennähten am Überlappstoß

beendet ist. Somit fließt auch das im Vergleich zum Kupferbasislot niedrigschmelzende Silberbasislot erst bei hohen Blechtemperaturen in den Spalt und ermöglicht keine höheren Vorschubgeschwindigkeiten am Überlappstoß. Demgegenüber erlaubt die gute Zugänglichkeit am Stumpstoß höhere Geschwindigkeiten. Der Reduktionsvorgang ist frühzeitig abgeschlossen, so daß schon bei Erreichen des niedrigen

Schmelzbereiches des Silberbasislotes eine Benetzung erfolgen kann und Vorschubgeschwindigkeiten ermöglicht werden, die über denen des Kupferbasislotes liegen.

Hartlot, \varnothing 1 mm	I-Naht	Flächennaht ($b_U=10$ mm)
L-Ag55Sn	$P_{L1}=350$ W, $P_{L2}=350$ W $v_S=0,3$ bis $0,48$ m/min	$P_{L1}^*=610$ W, $P_{L2}^{**}=340$ W $v_S=0,09$ bis $0,15$ m/min $P_{L1}^*=760$ W, $P_{L2}^{**}=425$ W $v_S=0,15$ bis $0,18$ m/min $P_{L1}^*=1000$ W, $P_{L2}^{**}=550$ W $v_S=$ bis $0,21$ m/min
L-CuZn40	$P_{L1}=310$ W, $P_{L2}=310$ W $v_S=0,18$ bis $0,36$ m/min	$P_{L1}^*=570$ W, $P_{L2}^{**}=270$ W $v_S=0,09$ bis $0,15$ m/min $P_{L1}^*=610$ W, $P_{L2}^{**}=305$ W $v_S=0,15$ bis $0,18$ m/min $P_{L1}^*=1000$ W, $P_{L2}^{**}=650$ W $v_S=$ bis $0,21$ m/min

*Laser 1: ausgerichtet auf den Überlappungsbereich

**Laser 2: ausgerichtet auf den Kehlbereich der Naht

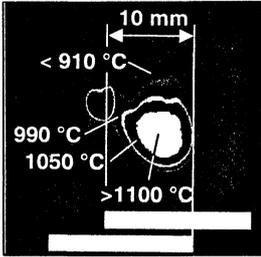
Tabelle 6.3: Laserleistungen und Vorschubgeschwindigkeiten für das Laserstrahlhartlöten an I-Nähten und Flächennähten am Überlappstoß

In **Tabelle 6.3** ist eine Auswahl prozeßsicherer Parameter hinsichtlich Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit für das Laserstrahlhartlöten mit Silber- und Kupferbasislotes an I- und Flächennähten zusammengefaßt. Diese Angaben beziehen sich auf die Einstellungen von Fokuslage und Einstrahlwinkel wie sie in Abschnitt 6.2 ermittelt wurden. In den Prozeßfenstern wurden Füllgrade von mindestens 80 % (Flächennähte) bzw. 60 % (I-Nähte) erzielt. Überhitzungserscheinungen an Lot und Grundwerkstoff wurden beim Hartlöten mit diesen Einstellungen nicht festgestellt. Eine Nahtüberhöhung am abgesetzten Überlappstoß erfordert eine große Lotmenge, die über eine höhere Lotfördergeschwindigkeit erreicht wird (vgl. dazu Abschnitt 6.2.2). Für ein sicheres Aufschmelzen des Lotes ist die Laserleistung im Kehlbereich der Naht um 15 % bis 20 % im Vergleich zum Löten am einfachen Überlappstoß zu erhöhen.

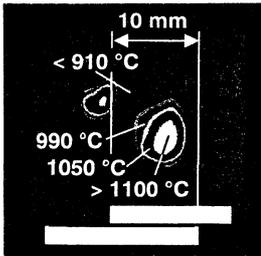
Eindeutige Korrelationen zwischen erzielbarem Füllgrad im Spalt und der Streckenenergie als Quotient aus Laserleistung P_L und Vorschubgeschwindigkeit v_s sind nur innerhalb einer Leistungseinstellung feststellbar. Mit zunehmender Streckenenergie nimmt dabei der Füllgrad zu. Allgemeingültige Schwellwerte für die Streckenenergie bezogen auf hohe Füllgrade im Spalt können unter Berücksichtigung aller Leistungseinstellungen nicht ausgemacht werden.

Bild 6.8 zeigt in Graustufendarstellung die Temperaturverteilung über Flächennähten am Überlappstoß bei unterschiedlichen Laserleistungen und Vorschubgeschwindigkeiten. Die Bilder wurden mittels Thermokamera, wie in Abschnitt 4.8 beschrieben, aufgenommen. Die angegebenen Temperaturen sind als Isothermenbereiche zu verstehen. Je nach dem Verhältnis von Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit verändern sich die Temperatur und deren Verteilung auf der Blechoberfläche.

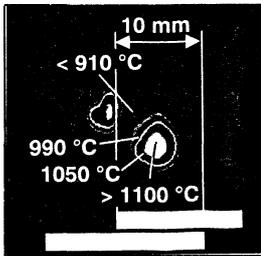
Das Intensitätsmaximum im Zentrum der nahezu gaußförmigen Intensitätsverteilung im Laserstrahl verursacht eine Temperatur von über 1100°C. Im Flankenbereich der Intensität sinkt die Temperatur bis auf Werte von ca. 990°C ab, **Bild 6.8, oben**. Bei der in **Bild 6.8, mitte** dargestellten Temperaturverteilung wurden Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit im Vergleich zum Bild oben etwa verdoppelt. Trotz nahezu gleicher Streckenenergie sinkt der Füllgrad im Spalt um mehr als 60 %. Die beiden Laserstrahlen sind so auf dem Werkstück angeordnet, daß sich im Bereich zwischen den beiden Laserstrahlwirkflächen ein lokales Temperaturminimum einstellt. Wird hier die für eine schnelle Reduktion der Oberflächenoxide im Spalt erforderliche Grenztemperatur von 990 °C nicht erreicht, ergeben sich stark verminderte Füllgrade. Stichversuche haben gezeigt, daß trotz niedrigerem Schmelzintervall des Silberbasislotes, für hohe Füllgrade im Spalt die gleichen Temperaturen wie für das Kupferbasislot erforderlich sind. Die weitere Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit von $v_s=0,24$ m/min auf $v_s=0,3$ m/min (**Bild 6.8, unten**) führt nur noch zu einer geringfügigen Verminderung des Füllgrades im Spalt um 3 %. Wird die Grenztemperatur zwischen den Wirkflächen der Laserstrahlen von 990 °C nicht erreicht, so erfolgt ein Fließen des Lotes in den Spalt nur soweit, wie diese Temperatur durch den auf den Kehlbereich der Naht gerichteten Laserstrahl dort erzielt werden kann.



1
 Laserleistung:
 $P_{L1}=530 \text{ W}$
 $P_{L2}=230 \text{ W}$
 Geschwindigkeiten:
 $v_s=0,12 \text{ m/min}$
 $v_D=3 \text{ mm/s}$



2
 Laserleistung:
 $P_{L1}=960 \text{ W}$
 $P_{L2}=510 \text{ W}$
 Geschwindigkeiten:
 $v_s=0,24 \text{ m/min}$
 $v_D=6 \text{ mm/s}$



3
 Laserleistung:
 $P_{L1}=960 \text{ W}$
 $P_{L2}=510 \text{ W}$
 Geschwindigkeiten:
 $v_s=0,3 \text{ m/min}$
 $v_D=7,5 \text{ mm/s}$

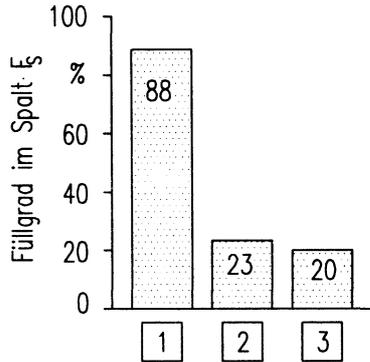
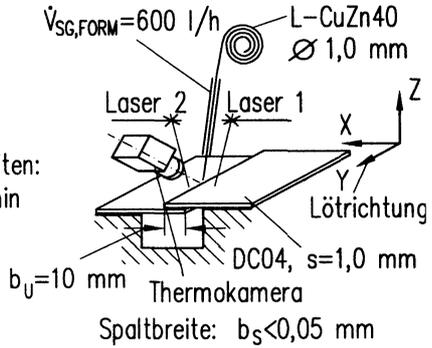


Bild 6.8: Zusammenhang zwischen Temperaturverteilung auf der Blechoberfläche und Füllgrad im Spalt beim Laserstrahlhartlöten von Flächennähten am Überlapstoß

6.4 On-line Prozeßregelung

Beim Laserstrahlhartlöten kann es durch eine schlechte Wärmeableitung an Blechkanten zu Prozeßbeginn und Prozeßende, aber auch bei Veränderung des Kontaktes

der beiden Blechteile zueinander, zur Überhitzung des Lotes und zu Anschmelzungen des Grundwerkstoffes kommen. Bei der räumlichen Bearbeitung kann zusätzlich das Umorientieren der Roboterachsen zur thermischen Schädigung in stark konturierten Werkstückbereichen führen. Zur Einhaltung einer hohen Bahngenaugigkeit verringert die Steuerung des Roboters die Bahngeschwindigkeit in diesen Konturbereichen, teilweise bis zum Stillstand der Bahnbewegung (siehe auch Abschnitt 4.3). Wird die Laserleistung nicht ebenfalls reduziert, kommt es zu Anschmelzungen des Grundwerkstoffes. Durch geeignete Bahnstrategien können diese Schädigungen zum Teil vermieden werden; das Bearbeitungsfenster wird jedoch dadurch hinsichtlich der zulässigen Prozeßparameter erheblich eingeschränkt.

Zur Erzielung einer automatisierten Prozeßführung bei der räumlichen Bearbeitung wurde deshalb eine on-line Prozeßregelung entwickelt und eingesetzt. Der Aufbau und die Funktionsweise dieser Prozeßregelung sind in Abschnitt 4.5 beschrieben. Das Regelkonzept basiert auf der pyrometrischen Erfassung der Blechoberflächentemperatur im Stoßbereich, separat für beide Blechteile. Die Meßorte der Pyrometer zur Erfassung der Blechoberflächentemperatur sind entsprechend, wie in **Bild 6.2** gezeigt, in den Laserstrahlwirkflächen angeordnet.

Für einen geregelten Lötprozeß lassen sich zwei wesentliche Störeinflüsse ausmachen. Das Pyrometer ist hinsichtlich des Emissionsfaktors unter anderem auf das Material und den Aggregatzustand des Werkstoffes im Meßfleck kalibriert. Ändern sich diese Bedingungen zeitweise, kommt es zu Signalschwankungen und damit zu Abweichungen vom realen Temperaturverlauf. Gelangt beispielsweise kurzzeitig flüssiges Lot in den Pyrometermeßpunkt, verändert sich der Emissionsfaktor sprunghaft von $\epsilon_{\text{STAHL}}=0,45$ (vorgegeben am Pyrometer) auf $\epsilon_{\text{KUPFER}}=0,15$ (Kupfer, flüssig) [101]. Festgestellt werden diese Signalveränderungen als Kleinsignalschwankungen überwiegend an I-Nähten bzw. am Pyrometer des auf das untere Blech justierten Meßpunktes an Flächennähten. Die in **Bild 6.2** gezeigte aussermittige Anordnung der Meßpunkte in den Wirkflächen an der I-Naht und im Kehlbereich der Flächennaht verhindert dabei größere Signalschwankungen.

Der zweite Störeinfluß wird durch die Ausdehnung der Laserstrahlwirkflächen im defokussierten Strahl verursacht, da die Pyrometermeßpunkte nicht im Tool-Center-Point des Roboters angeordnet sind. Dies führt zur Verschiebung der Position der Pyrometermeßpunkte bezüglich der Laserstrahlwirkflächen beim Umorientieren der Roboterachsen. Die Folge sind Unstetigkeiten im Verlauf des Großsignals der Pyrometer in Abhängigkeit des Konturradius.

Untersuchungen an 90°-Winkelblechen mit den Radien $r=2$, 5 und 10 mm zeigen nur für 10 mm Radien keine Großsignalschwankungen und damit einen relativ gleichmäßigen Temperaturverlauf. Das Umorentieren an 5 mm Radien verursacht demgegenüber geringe Signalunstetigkeiten, allerdings ohne Beeinträchtigung des Lötprozesses oder der Nahtqualität, **Bild 6.9**. Schädigungen am Grundwerkstoff weisen hingegen die Lötungen an 2 mm Radien auf. Hier werden erhebliche Anschmelzungen im Bereich des Radius festgestellt. Durch die Zerlegung des Lötprozesses in zwei unabhängige lineare Prozesse für Steig- und Fallnaht, ist das Laserstrahlhartlöten auch an 90°-Winkelblechen mit kleinen Radien möglich.

In **Bild 6.9** ist exemplarisch eine geregelte Lötung an einer Flächennaht am Überlappstoß, ausgeführt an einem 90°-Winkelblech gezeigt. Die Steignah (DIN ISO 6947: $S=60^\circ$, $R=90^\circ$), der Biegeradius ($r=5$ mm) und die Fallnaht (DIN ISO 6947: $S=330^\circ$, $R=90^\circ$) wurden in einem Vorgang ohne Unterbrechung gelötet. Das Pyrometer- und das Laserleistungssignal sind im Bild direkt über der Zeitachse einander gegenübergestellt. Es hat sich an Flächennahten als vorteilhaft hinsichtlich des Stör- und Führungsverhaltens der Regler erwiesen, für die Regelung der Temperatur auf dem oberen Blech einen P-Regler und für die Regelung der Temperatur auf dem unteren Blech einen PI-Regler zu wählen. Der Signalverlauf auf dem unteren Blech (T_{i2}) zeigt ein gutes Führungsverhalten. Dies ist wesentlich für ein prozeßsicheres Aufschmelzen des Lotdrahtes und um Überhitzungen oder ein Unterschreiten des Schmelztemperaturbereiches des Lotes zu vermeiden. Demgegenüber verläuft das Signal auf dem oberen Blech (T_{i2}) mit einer mehr oder weniger permanenten Regelabweichung vom Solltemperatursignal (T_{s2}). Dies ist das typische Verhalten eines P-Reglers. Das vorteilhafte Störverhalten dieser Reglertypen wirkt sich allerdings günstig beim Ausregeln der Störeinflüsse auf dem oberen Blech beim Umorentieren der Roboterachsen aus. Wie bereits erwähnt konnte an den Radien $r=5$ mm das Auftreten von Groß- und Kleinsignalschwankungen nicht vermieden werden. Durch die Verwendung verschiedener Reglertypen und die jeweilige Anpassung der Regeldynamik an die Prozeßführung am oberen und unteren Blech konnte eine Beeinträchtigung insbesondere des Füllgrades im Spalt auch an den Radien verhindert werden.

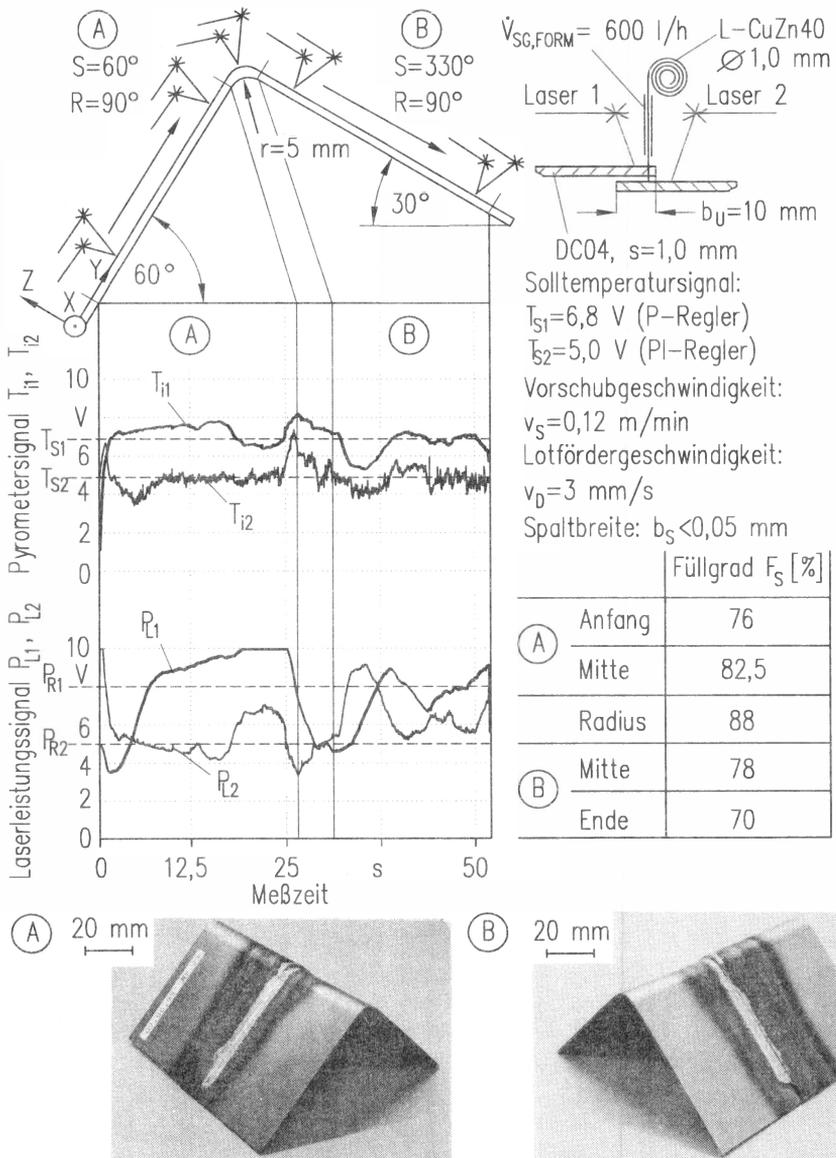


Bild 6.9: 3D-Laserstrahlhartlöten eines Winkelbleches mit on-line Prozeßregelung (Flächennaht am Überlappstoß)

In **Tabelle 6.4** sind die für einen stabilen Prozeß ermittelten Reglerparameter für die Hartlote L-CuZn40 und L-Ag55Sn an I- und Flächennähten am Überlappstoß zusammengefaßt. Mit diesen Einstellungen können die oben geschilderten Störeinflüsse wesentlich verringert werden und eine hohe Lötnahtqualität über den gesamten Nahtverlauf hinsichtlich des Füllgrades und einer gleichmäßigen Lotraupenausbildung an den untersuchten Blechteilen mit Blechdicken von $s=0,88$ mm sowie $s=1,0$ mm erzielt werden.

	I-Naht L-CuZn40, \varnothing 1 mm	Flächennaht L-Ag55Sn/L-CuZn40 \varnothing 1 mm
Laserleistungsangabe am Regler	$P_{R1}=310$ W, $P_{R2}=310$ W	$P_{R1}^*=900$ W, $P_{R2}^{**}=380$ W
Solltemperatursignal	$T_{S1}=4$ V, $T_{S2}=4$ V	$T_{S1}^*=6,8$ V, $T_{S2}^{**}=5,0$ V
Verstärkungsfaktor	Laser 1 und 2 (PI-Regler): $K_{PI}=0,05$	Laser 1* (P-Regler): $K_P=2,0$ Laser 2** (PI-Regler): $K_{PI}=0,03$
Nachstellzeit	Laser 1 und 2 (PI-Regler): $t_{N,PI}=0,075$ s	Laser 2* (PI-Regler): $t_{N,PI}=0,07$ s

*Laser 1: ausgerichtet auf den Überlappungsbereich

**Laser 2: ausgerichtet auf den Kehlbereich der Naht

Tabelle 6.4: Reglerparameter für das Laserstrahlhartlöten an Flächennähten am Überlappstoß

7 Eigenschaften laserstrahlhartgelöteter Verbindungen

Die Gebrauchseigenschaften eines Bauteils werden wesentlich durch die Qualität der Fügestellen am Bauteil bestimmt. Entsprechend den Güteanforderungen im Automobilbau zeichnet sich eine hohe Lötnahtqualität durch einen hohen Füllgrad im Spalt zur Erzielung hoher Festigkeiten und zur Vermeidung von Spaltkorrosion aus. Die Gefügeausbildung darf dabei die Festigkeit der Verbindung nicht herabsetzen oder die Korrosion fördern. Der thermische Verzug muß gering gehalten werden, um beispielsweise eine Lötnahtnachbearbeitung zu minimieren, und die Lackierbarkeit der nachbearbeiteten Lötnaht ist sicherzustellen.

In den folgenden Abschnitten werden die Eigenschaften laserstrahlhartgelöteter Verbindungen anhand der wesentlichen Bearbeitungsergebnisse diskutiert. Die laserstrahlhartgelöteten Verbindungen werden sowohl unter Berücksichtigung ausgewählter Merkmale in Anlehnung an die DIN 8515 als auch in dieser Norm nicht erfaßter Veränderungen des Grundgefüges und der Festigkeit der Verbindungen (vgl. Abschnitt 5.3) untersucht. Die Experimente wurden unter Berücksichtigung der in Kapitel 6 erarbeiteten Erkenntnisse zur Prozeßführung durchgeführt.

Die Lötnahtqualität läßt sich durch folgende Merkmale beschreiben:

- Füllgrad im Spalt
- Diffusionszone
- Härte
- Poren und Risse in der Naht
- Verbindungsfestigkeit
- thermischen Verzug

Das Kapitel ist entsprechend der Merkmale gegliedert und schließt mit der Vorstellung von Bearbeitungsbeispielen.

7.1 Füllgrad im Spalt

Der Füllgrad im Spalt F_s ist nach DIN 8505 T 1 der prozentuale Anteil des mit erstarrtem Lot gefüllten Spaltes. Damit werden nicht nur Füllfehler (DIN 8515: Ordnungsnr.: 4.405) sondern auch der gesamte Fließweg des Lotes erfaßt und Rückschlüsse auf das Fließverhalten und die Spaltbedingungen ermöglicht (siehe auch Tabelle 5.2 in Abschnitt 5.3). Die Füllgrade im Spalt bei I-Nähten liegen sowohl für

DC04 als auch für DC04+ZE bei etwa 60-70 %. Weitere Ergebnisse hierzu werden im Zusammenhang mit Nahtwurzelmaßnahmen diskutiert (siehe dazu Abschnitt 8.1).

Ein hoher Füllgrad im Spalt verhindert Spaltkorrosion und steigert die Festigkeit der Lötverbindung. Er wird zum einen durch Korrosionsschutzschichten auf der Blechoberfläche, wie z.B. Zinkbeschichtungen, beeinflusst, zum anderen aber auch wesentlich durch die Nahtgeometrie und Nahtlage im Raum. Die Nahtgeometrie ist dabei hauptsächlich durch die Spaltbreite b_s und bei Flächennähten zusätzlich durch die Überlappbreite b_u festgelegt.

Nachfolgend sind deshalb beispielhaft Ergebnisse zum Einfluß dieser den Füllgrad im wesentlichen bestimmenden Größen zusammengefaßt. Die räumliche Orientierung der Naht wird in bezug auf die Nahtdrehung R und die Nahtneigung S sowie die Spaltbreite b_s aufgezeigt. Dabei wird auch die Wirkung einer galvanisch auf den Grundwerkstoff aufgetragenen Zinkschicht (Grundwerkstoff: DC04+ZE) auf den Füllgrad im Spalt diskutiert.

7.1.1 Einfluß der räumlichen Nahtorientierung

Um den Einfluß der Gravitation auf das Lötresultat zu untersuchen, wurden Flächennähte am Überlappstoß in unterschiedlicher räumlicher Orientierung gelötet, **Bild 7.1**. Die untersuchten Bearbeitungspositionen nach DIN ISO 6947 [107] wurden dabei getrennt nach Nahtneigung und -drehung betrachtet. Die Versuche wurden unter Verwendung der on-line Prozeßregelung bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_s=0,14$ m/min durchgeführt.

Wie in **Bild 7.1** gezeigt, sind bei Veränderung des Nahtneigungswinkels S hohe Füllgrade im Spalt insbesondere bei Steignähten ($S=45^\circ$ und 90°) und in der Wannelage erzielbar. An Fallnähten ($S=315^\circ$ und 270°) sinkt mit abnehmendem Neigungswinkel der Füllgrad ab. Dennoch liegen die erreichbaren Füllgrade bei geeigneter Wahl der Prozeßparameter und sehr kleiner Spaltbreite $b_s < 0,05$ mm immer über $F_s=80$ %. Der geringere Füllgrad an Fallnähten wird dabei auf die gravitationsbedingte Lotausbreitung in Richtung des kalten Blechbereichs zurückgeführt.

Qualitätsmindernd wirkt sich zusätzlich an Fallnähten die Lotausbreitung außerhalb des Lotspaltes auf dem überlappenden Blech aus. Mit abnehmendem Nahtneigungswinkel von $S=360^\circ$ zu $S=270^\circ$ erhöht sich dabei das auf der Blechoberfläche verbleibende Lotvolumen.

Durch die Nahtdrehung R ergeben sich zwei Extrempositionen, die wesentlich durch die Gravitation beeinflusst werden. Mit einem Nahtdrehwinkel von $R=180^\circ$ ist die räumliche Orientierung der Naht so ausgerichtet, daß das Lot entgegen der Schwerkraft in den Spalt fließen muß. Daraus resultiert der in dieser Versuchreihe geringste Füllgrad im Spalt von nur $F_s=75\%$, in Verbindung mit einer großen Ergebnisstreue. Bei einem Nahtdrehwinkel $R=0^\circ$ unterstützt die Gravitation das Fließen des Lotes in den Spalt. Ein hoher Füllgrad mit $F_s=93\%$ und eine geringe Standardabweichung ist die Folge, **Bild 7.1**.

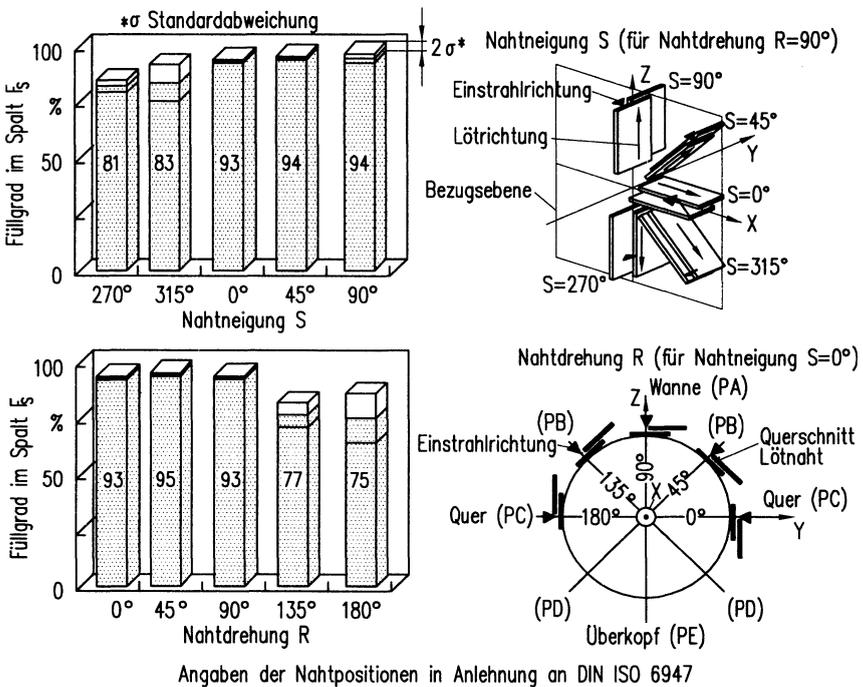


Bild 7.1: Einfluß der räumlichen Orientierung der Naht (Flächennaht am Überlappstoß) auf den Füllgrad im Spalt (Leistungsangabe am Regler: $P_{R1}=900\text{ W}$ (PI-Regler), $P_{R2}=380\text{ W}$ (P-Regler); Solltemperatursignal: $T_{S1}=6,8\text{ V}$, $T_{S2}=5,0\text{ V}$; Vorschubgeschwindigkeit: $v_s=0,14\text{ m/min}$; Lotfördergeschwindigkeit: $v_D=3,5\text{ mm/s}$; Schutzgasdurchflußmenge: $\dot{V}_{SG,FORM}=700\text{ l/h}$; Überlappbreite: $b_U=10\text{ mm}$)

7.1.2 Einfluß der Spaltbreite

Bild 7.2 zeigt den Einfluß der Spaltbreite auf den Füllgrad im Spalt bei Lötungen am abgesetzten Überlappstoß. Die Versuchsreihen wurden mit DC04 und DC04+ZE in Verbindung mit dem Hartlot L-Ag55Sn in der Wannenlage durchgeführt. Für die Bearbeitung der einseitig verzinkten Bleche wurden die Teile so angeordnet, daß nur die Zinkschicht vom oberen Blech im Spalt lag. Dies entspricht den Bedingungen, wie man sie häufig an einer Automobilkarosserie vorfindet.

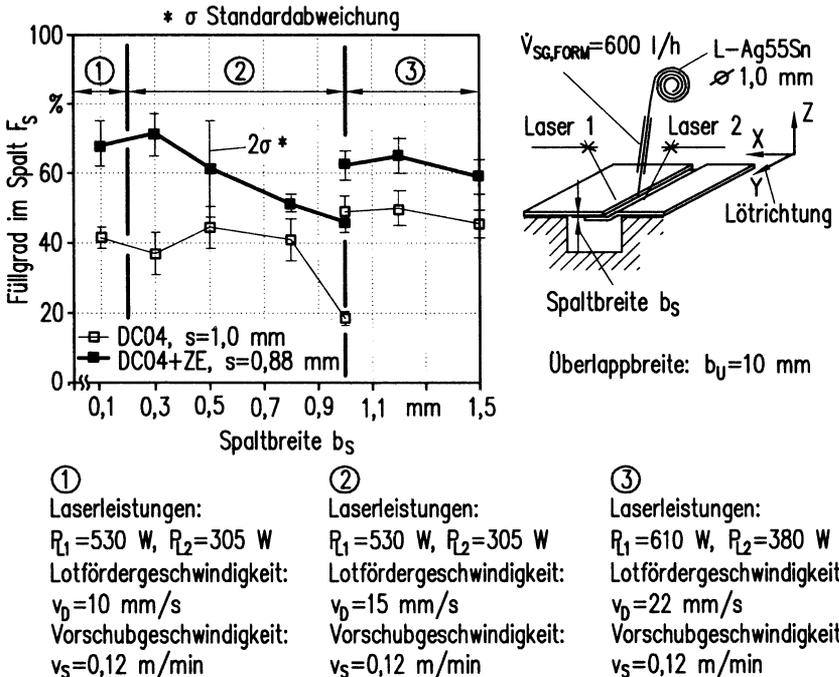


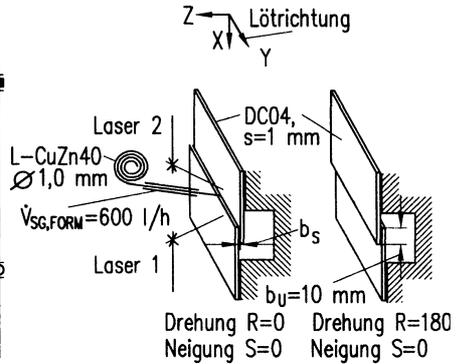
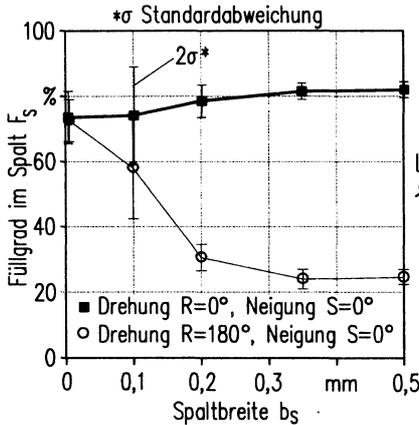
Bild 7.2: Einfluß einer galvanischen Zinkbeschichtung und der Lötspaltbreite auf den Füllgrad im Spalt bei Lötungen in der Wannenlage

Zwei Effekte sind durch die Veränderung der Spaltbreite $b_s > 0,05$ mm auszumachen: die Verschlechterung der Kapillarwirkung im Spalt (vgl. dazu Abschnitt 2.3) und die Unterbrechung der Wärmeleitung vom oberen zum unteren Blech. Die Folge ist ein mit zunehmender Spaltbreite absinkender Füllgrad im Spalt. Durch den komplexen Zusammenhang von Laserleistung, Lotmenge und Vorschubgeschwindigkeit führt erst die Erhöhung der Lotmenge über die Fördergeschwindigkeit bei gleichzeitiger Erhöhung der Laserleistung wieder zu einer Steigerung des Füllgrades im Spalt, **Bild 7.2**.

Bei vorhandener galvanischer Zinkschicht im Spalt können grundsätzlich höhere Füllgrade im Spalt erzielt werden als bei unbeschichteten Blechen. Unter gleichen Bedingungen sind Füllgradunterschiede von bis zu 30 % feststellbar. Offensichtlich verbessert die Zinkschicht die Benetzungsbedingungen für das Lot. Beim Fließen des Lotes in den Spalt treibt das Lot den Zinkbelag in Richtung Spaltende aus und bewirkt teilweise eine Verdampfung der Zinkschicht im Spalt (vgl. dazu auch **Bild 7.7**). Das Verdampfen verursacht Poren im Spalt (siehe Abschnitt 7.2.3). Unter der Zinkschicht liegt eine oxidfreie Metalloberfläche vor, die leicht durch das Lot benetzt werden kann. Der von der Nahtwurzel eindringende atmosphärische Sauerstoff wird außerdem durch den ausgasenden Zinkdampf verdrängt. Beide Effekte verbessern die Benetzung insbesondere im Nahtwurzelbereich und führen so zu höheren erzielbaren Füllgraden im Spalt an den verzinkten Blechqualitäten.

Den Zusammenhang zwischen der Spaltbreite b_s bei unterschiedlicher räumlicher Nahtorientierung ($R=0^\circ$ und 180° für $S=0^\circ$) zeigt **Bild 7.3**. Entsprechend den Spaltabmessungen erfolgt die Zustellung der Lotmenge. Die on-line Prozeßregelung stellt die notwendige Laserleistung stufenlos zur Verfügung. Während bei der Spaltorientierung entgegen der Schwerkraft ($R=180^\circ$) der Füllgrad im Spalt schon bei geringer Erweiterung absinkt, kann bei Unterstützung durch die Schwerkraft ($R=0^\circ$) eine Steigerung des Füllgrades erzielt werden.

Die erhebliche Ergebnisstreuung des Füllgrades bei einer Spaltbreite von $b_s=0,1$ mm markiert das Absinken der Kapillarwirkung. Eine ausreichende Spaltfüllung durch die Kapillarkräfte ist ab dieser Spaltbreite nicht mehr gewährleistet. Gleichzeitig erhöht sich mit zunehmender Spaltbreite der Einfluß der Gravitation. Die ermittelte Grenzspaltbreite wird in der Literatur bestätigt (vgl. Abschnitt 2.3).



Laserleistungsangabe am Regler:

$P_{R1}=900$ (P-Regler), $P_{R2}=380$ W (PI-Regler)

Solltemperatursignal: $T_{S1}=6,8$ V, $T_{S2}=5$ V

Vorschubgeschwindigkeit: $v_s=0,15$ m/min

Lotfördergeschwindigkeit:

$v_D=3$ mm/s – 19 mm/s

Bild 7.3: Einfluß der Breite und räumlichen Orientierung des Spaltes auf den Füllgrad im Spalt (Flächennäht am Überlapstoß)

7.2 Metallurgie

Thermische Fügeverfahren beeinflussen durch hohe Temperaturen und Temperaturgradienten die Gefügeausbildung und -ausdehnung sowie die Diffusionsvorgänge im Bereich der Wärmeeinflußzone (WEZ). Dies bestimmt weitgehend die Festigkeit an der Fügestelle, wirkt sich dadurch aber auch auf die Beanspruchbarkeit des gesamten Bauteils aus. Zusätzlich ist die Lackierbarkeit der Naht eine geforderte Gebrauchseigenschaft und wird durch das Auftreten von Oberflächenmikroporen und -rissen in der Lotraupe sowie Bindefehlern zwischen Lot und Grundwerkstoff beeinträchtigt.

Nachfolgend werden Ergebnisse zur Ausdehnung der Diffusionszone am Phasenübergang zwischen Lot und Grundwerkstoff sowie zur Kleinlasthärte im Bereich der Wärmeeinflußzone dargestellt und diskutiert. Abschließend sind die Erkenntnisse

hinsichtlich des Auftretens von Poren im Spalt und Oberflächenrissen in der Lotraupe zusammengefaßt.

7.2.1 Diffusionszone

Der Bindemechanismus beim Hartlöten hängt von der Werkstoffkombination Grundwerkstoff-Lotwerkstoff sowie der Löttemperatur und -zeit ab. Während es beim Weichlöten zu reinen Adhäsionsbindungen kommt, werden die höchsten Festigkeiten mit Diffusionsverbindungen beim Hart- und Hochtemperaturlöten erzielt. Dabei diffundieren eine oder mehrere Lotkomponenten in den Grundwerkstoff und umgekehrt diffundieren Grundwerkstoffkomponenten in das Lot [52].

Das Laserstrahlhartlöten ist im Vergleich z.B. zum Ofenlöten ein sehr schneller Prozeß. Die Wechselwirkungszeiten zwischen Lot und Grundwerkstoff bei erhöhter Temperatur liegen hier unter 10 s. Dementsprechend werden im Vergleich zu Ofenlötungen, die Diffusionszonen mit einer Tiefe von ca. 10 µm aufweisen, beim Laserstrahlhartlöten nur sehr geringe Diffusionswege der Legierungselemente erwartet. Die Diffusionszone kann über eine Berechnung des Diffusionsweges einzelner Elemente, wie in Abschnitt 11.5 im Anhang beschrieben, abgeschätzt werden.

Bild 7.4 zeigt exemplarisch die Untersuchungsergebnisse mit der Mikrosonde (siehe Abschnitt 5.3) zum Nachweis einer Diffusionszone an einer Flächennaht am Überlappstoß. Gelötet wurde DC04+ZE in Verbindung mit dem Hartlot L-CuZn40. Die einseitig verzinkten Bleche wurden so angeordnet, daß nur die Zinkschicht vom oberen Blech im Spalt lag. Dadurch können gleichzeitig sowohl der unverzinkte als auch der verzinkte Werkstoff hinsichtlich Diffusion überprüft werden.

Für die Laserleistungen $P_{L1}=270$ W und $P_{L2}=570$ W ist die Elementverteilung von Fe, Cu und Zn quer zur Lötnaht für die Geschwindigkeiten $v_s=0,09$ m/min und $0,15$ m/min dargestellt. Die aufgenommenen Verläufe beziehen sich auf den Spaltanfang (1 mm von der Stirnfläche des oberen Bleches), die Spaltmitte und das Spaltende (1 mm vom Ende des im Spalt befindlichen Lotes) bei einer Überlappbreite von $b_U=10$ mm.

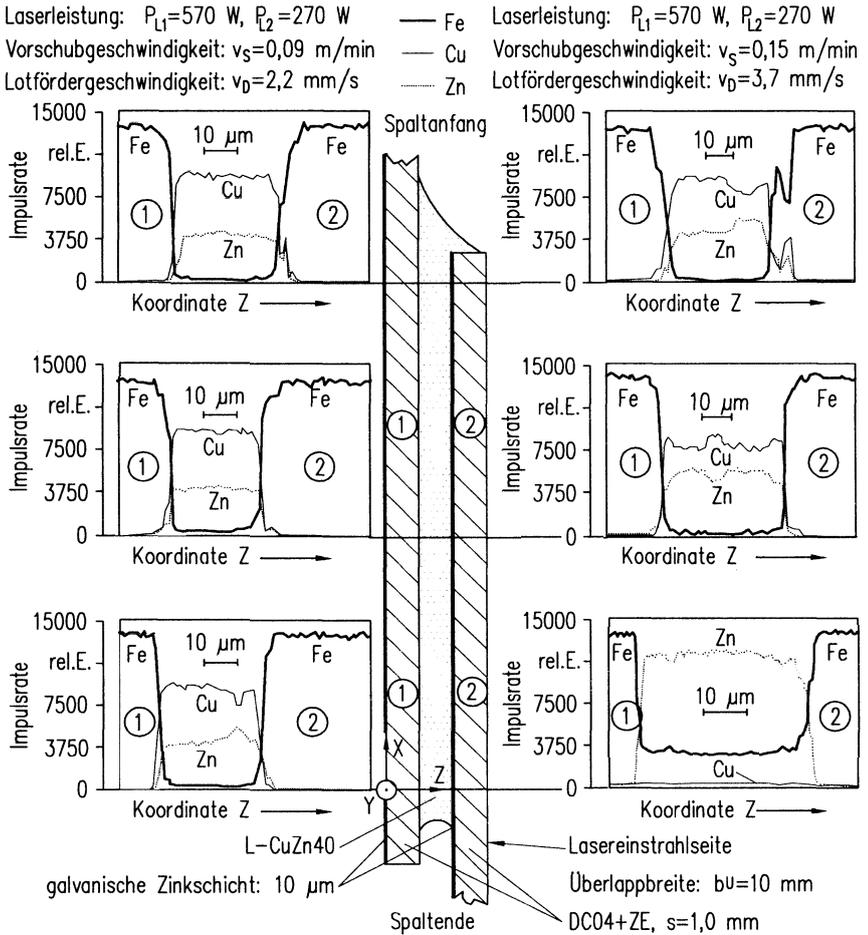


Bild 7.4: Elementverteilung über dem Nahtquerschnitt bei Flächennähten am Überlappstoß aus DC04+ZE

Während des Verfahrens des feinfokussierten Elektronenstrahls über einen Querschliff der Lötnaht, wird die Impulsrate in Abständen von $1 \mu\text{m}$ und $2 \mu\text{m}$ über dem Nahtquerschnitt gemessen. Die Konzentrationen der im Meßstrahl befindlichen Materialien

sind dabei über die pro Zeiteinheit wellenlängendispersiv aufgezeichneten Impulse wiedergegeben, d.h. die Zuordnung zu den Elementen erfolgt über die entsprechenden Spektrallinien. Die Konzentrationsgradienten in **Bild 7.4** zeigen für beide Geschwindigkeiten ein einheitliches Bild. So finden sich bei beiden Geschwindigkeiten mehr oder weniger steile Impulsratenverläufe in den Übergangsbereichen zwischen Stahlblech und Lot bzw. Lot und Stahlblech.

Aufgrund des sehr erosiven Verhaltens von flüssigem Zink an Eisen [123], lösen Grenzflächenreaktionen im Bereich der galvanischen Zinkschicht während des Lötprozesses den Grundwerkstoff im Spalt an. Unstetigkeiten der Konzentrationsgradienten am Phasenübergang zwischen Lot und oberem Blech im Bereich des Spaltanfanges zeigen für beide Geschwindigkeiten die Erosion des Grundwerkstoffes.

Bei einer Auflösung von ca. 1-2 μm (vgl. Abschnitt 5.3) ist eine Feststoffdiffusion in den Grundwerkstoff bei keiner der Kurven eindeutig nachweisbar. Gradienten, die eine Diffusionszone vermuten lassen, sind auf Eisenausscheidungen an der Phasengrenze im Bereich des Lotes zurückzuführen. Falls vorhanden, liegt somit die Diffusionszone unter der Nachweisgrenze von 1-2 μm . Dieses Ergebnis stimmt mit Angaben aus der Literatur überein. So wird in [66] die Diffusionszone mit unter 2 μm für das Laserstrahlhartlöten angegeben.

Die Konzentrationsverteilung von Kupfer und Zink über der Lötnaht bei der Vorschubgeschwindigkeit $v_s=0,09$ m/min ist nahezu konstant. Leichte Schwankungen um eine Mittelkonzentration sind auf Mikroseigerungen innerhalb des Lotes zurückzuführen. Die einseitige Zinkschicht mit einer Dicke von 10 μm ist bei keiner Messung nachweisbar. Der erfaßte Zinkanteil resultiert aus der Zusammensetzung des Lotes. Offensichtlich verdampft die Zinkschicht beim Lötprozeß insbesondere bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten vollständig (siehe Konzentrationskurven für Zink bei $v_s=0,09$ m/min).

Höhere Vorschubgeschwindigkeiten ($v_s=0,15$ m/min) führen demgegenüber hauptsächlich zum Aufschmelzen der Zinkschicht. Beim Fließen des Lotes in den Spalt treibt das Lot den Zinkbelag in Richtung Spaltende aus. So erklärt sich die hohe Zinkkonzentration im Lot am Ende des Spaltes (siehe Konzentrationskurve für Zink bei $v_s=0,15$ m/min am Ende des Spaltes). Während des Lotflusses im Spalt wird über Konvektion ein Teil des geschmolzenen Zinks in das Lot transportiert und erhöht geringfügig die Zinkkonzentration am Spaltanfang und in der Spaltmitte. Am Spaltende seigert zusätzlich der erodierte Grundwerkstoff aus. Hier wird ein hoher Eisen-gehalt über die gesamte Spaltbreite detektiert. Konvektionsbedingt werden die feinge-

lösten Eisenausscheidungen in das noch schmelzflüssige Lot bzw. Zink transportiert und erstarren unter Mischkristallbildung.

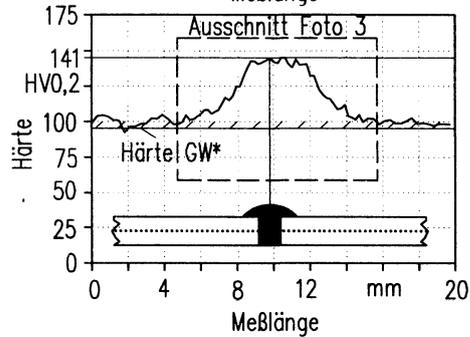
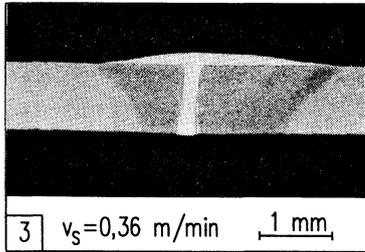
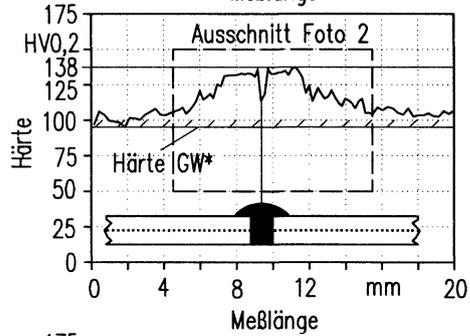
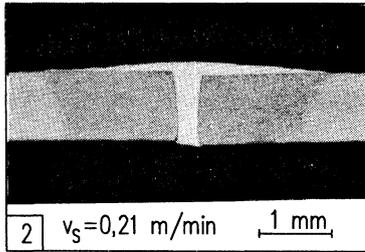
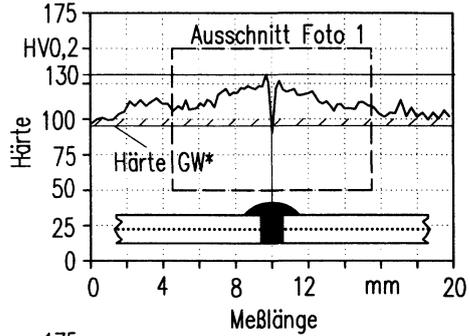
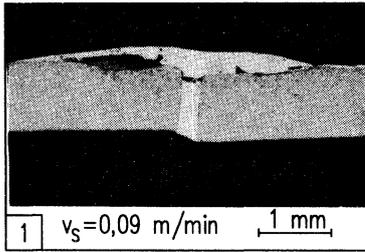
Der Schmelzaustrieb der Zinkschicht ist aus praktischer Sicht vorteilhaft. Nach dem Lötvorgang besteht durch die direkte Verbindung zwischen dem Lot und der Zinkschicht wieder eine geschlossene Korrosionsschutzschicht.

Eine Diffusionszone von Silberloten beim Laserstrahlhartlöten konnte mit der eingesetzten Mikrosondenanalyse nicht nachgewiesen werden und liegt somit unter der Nachweisgrenze von 1-2 μm . Als Bestätigung finden sich in der Literatur Angaben, daß beim Ofenlöten und den im Vergleich zum Laserstrahlhartlöten langen Lötzeiten von ca. 1 min Diffusionszonen mit weniger als 1 μm nachgewiesen werden (z.B. [124]).

7.2.2 Härteverläufe

Grundsätzlich ist die Aufhärtung von unlegierten Baustählen durch Martensitbildung nur bei extrem hohen Abkühlgeschwindigkeiten möglich. Die Einhärtetiefe ist im Vergleich zu legierten Stählen gering. Eine Aufhärtung kann aber dennoch auch bei geringeren Abkühlgeschwindigkeiten auftreten. Der unlegierte Feinbaustahl DC04/ZE mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,08 Gew-% weist ein rein ferritisches Gefüge auf. Bei Temperaturen oberhalb von 911°C kommt es zur $\alpha \rightarrow \gamma$ -Umwandlung beim Überschreiten der A_{c3} -Linie im Eisen-Kohlenstoff-Schaubild (z.B. in [125]). Die kubisch-raumzentrierte Gitterstruktur (krz) des Ferrits wandelt sich in die kubisch-flächenzentrierte Struktur (kfz) des Austenits um. Ausgehend von einer Keimbildung an den Korngrenzen entsteht ein feinkörniges Austenitgefüge, das sich bei der Abkühlung in feinkörniges Ferrit umwandelt [125, 126]. Diese Kornfeinung in der Wärmeeinflußzone führt zu einer Festigkeitssteigerung, die im wesentlichen auf erhöhter Hemmung der Versetzungsbewegung an den Korngrenzen beruht [62].

Im folgenden wird auf den Zusammenhang zwischen der Härte und der Gefügeausbildung an laserstrahlhartgelöteten I-Nähten eingegangen, **Bild 7.5**. Stichversuche haben gezeigt, daß die Härteverläufe an der Blechoberkante, der Blechmitte und der Blechunterkante nur geringfügige Differenzen aufweisen. Deshalb werden repräsentativ die Härtemessungen von der Blechmitte diskutiert. Die im **Bild 7.5** unter den Härteverläufen skizzierten Nahtquerschnitte sind nicht maßstabsgerecht dargestellt und geben nur qualitativ die Lage der Naht und der Meßeindrücke wieder.



*GW: Grundwerkstoff

Bild 7.5: Einfluß der Vorschubgeschwindigkeit auf die Härte im Nahtbereich (Grundwerkstoff: DC04, $s=1,0$ mm; Lot: L-CuZn40, \varnothing 1 mm; Spaltbreite: $b_s=0,3$ mm; Laserleistung: $P_{L1}=310$ W, $P_{L2}=310$ W; Schutzgasdurchflußmenge: $\dot{V}_{SG,FORM}=600$ l/h; Formiergas)

Die Versuche wurden mit den in **Tabelle 6.3** (Abschnitt 6.3) angegebenen Laserleistungen für I-Nähte von $P_{L1}=310$ W, $P_{L2}=310$ W mit dem Hartlot L-CuZn40 durchgeführt. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde dabei zwischen $v_s=0,09$ m/min und $0,36$ m/min variiert. Die Härte des Grundgefüges wurde mit 95 HV_{0,2} bis 100 HV_{0,2} ermittelt. Diese Meßwerte stimmen mit Angaben aus der Literatur überein [126].

Prinzipiell kann die thermisch beeinflusste Zone um den Lötspalt in verschiedene Bereiche unterteilt werden, **Bild 7.5, Foto 1**. Für die langsame Vorschubgeschwindigkeit ($v_s=0,09$ m/min) ist mit dem Lichtmikroskop links und rechts neben der Lötnaht eine Grobkornzone von hier ca. $1,3$ mm Breite nachzuweisen. Anschließend folgt ein Gefüge, das von der Korngröße dem des Grundwerkstoffes entspricht. An den äußeren Flanken, am Übergang zum scheinbar unbeeinflussten Grundgefüge, schließt sich eine Feinkornzone mit ca. 1 mm Breite an. Bedingt durch die geringe Vorschubgeschwindigkeit kommt es im Spalt zum Anschmelzen des Grundwerkstoffes. Dunkle Bereiche im Lot zeigen Ansammlungen von geschmolzenem Grundwerkstoff im Lot (**Bild 7.5, Foto 1**).

Vom Grundwerkstoff ausgehend steigt die Härte zum Spalt hin stetig an und erreicht ihren maximalen Härtewert von 130 HV_{0,2} in unmittelbarer Nähe des Lötspaltes. Die ungewöhnlich hohen Härtewerte im Bereich des grobkörnigen Gefüges sind auf feinverteilte Ausscheidungen von Tertiärzementit an den Korngrenzen zurückzuführen. Die Fe_3C -Partikeln behindern das Wandern der Versetzungen und verfestigen so diesen Werkstoffbereich. Die aus dem Härteverlauf ersichtliche Wärmeeinflußzone beträgt hier ca. 16 mm. Dieser Bereich ist damit mehr als doppelt so breit wie die über die Gefügeveränderung unter dem Lichtmikroskop auszumachende thermisch beeinflusste Zone. Es ist anzunehmen, daß auch in Werkstoffbereichen die nicht über die Ac_3 -Linie erwärmt wurden, die feinverteilte Ausscheidung von Tertiärzementit zu einer Härtesteigerung führen.

Schon bei geringfügiger Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit ist keine Grobkornzone mehr feststellbar. Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_s=0,21$ m/min findet sich direkt neben dem Lötspalt ein Gefüge mit einer Korngröße, daß der Körnung des unbearbeiteten Grundwerkstoffes entspricht und sich mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit in diesem Bereich weiter verfeinert. Danach folgt eine Feinkornzone (**Bild 7.5, Foto 2**). Anschmelzungen des Grundwerkstoffes treten nicht mehr auf.

In **Bild 7.6, Foto 3** zeigt sich für eine Vorschubgeschwindigkeit von $v_s=0,36$ m/min in der Wärmeeinflußzone ein typisches Härteplateau mit Härtewerten von 141 HV_{0,2}.

Die Steigerung der Härte ist auf eine höhere Aufheizgeschwindigkeit zurückzuführen, die ein feineres Gefüge verursacht.

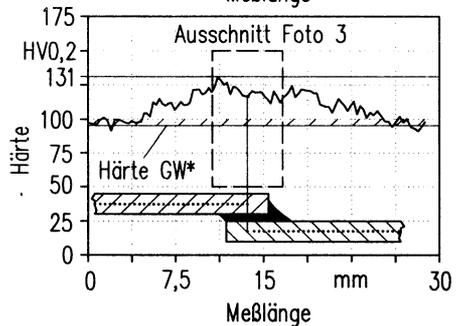
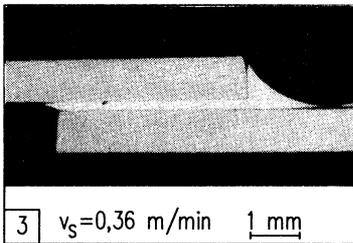
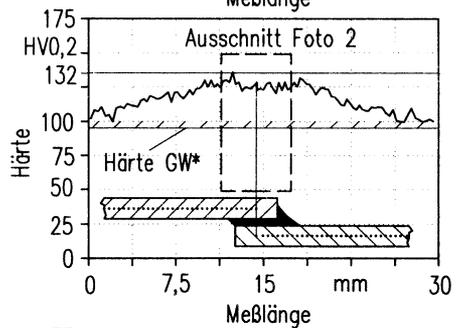
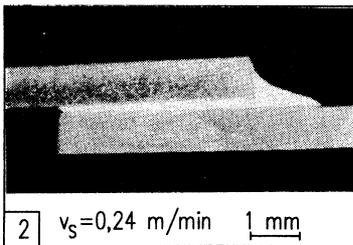
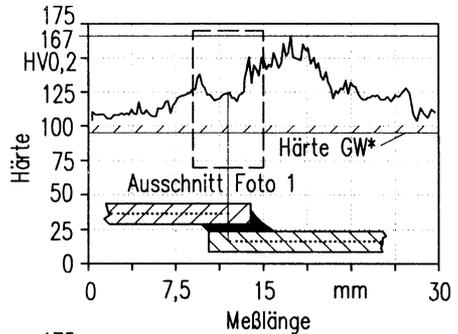
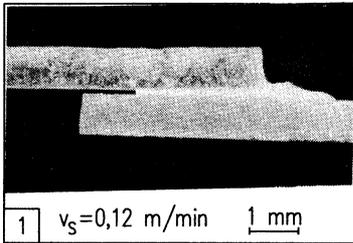
Insbesondere bei der sehr hohen Vorschubgeschwindigkeit erfolgt eine Aufhärtung des Lotwerkstoffes (α - β Messing). Durch das schnelle Abschrecken aus dem schmelzflüssigen Zustand überwiegt der Anteil an kubischraumzentriertem β -Gefüge und bewirkt einen raschen Abfall der Zähigkeit bei gleichzeitigem Anstieg der Härte auf Werte über 140 HV_{0,2}.

Härten bis zu 175 HV_{0,2} im Grundwerkstoff werden nur bei sehr hohen Vorschubgeschwindigkeiten von $v_s=0,6$ m/min beim Lötten von I-Nähten mit dem Silberbasislot L-Ag55Sn in Pulverform erreicht. Die Ursachen und der Verlauf der Härte sind den oben vorgestellten Ergebnissen vergleichbar.

Bild 7.6 zeigt beispielhaft den Härteverlauf an Flächennähten am Überlappstoß für drei verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten. Die Verbindungen wurden mit dem Hartlot L-Ag55Sn erzielt. Die unter den Härteverläufen skizzierten Nahtquerschnitte sind dabei nicht maßstabsgerecht wiedergegeben und zeigen nur qualitativ die Lage der Naht und der Meßeindrücke. Den Härteverläufen sind die Photos der Querschliffe gegenübergestellt.

Bei der Vorschubgeschwindigkeit $v_s=0,12$ m/min ist im oberen Blech eine ausgeprägte Grobkornzone zu erkennen. Sie erstreckt sich über die gesamte Überlappbreite. Die geringe Vorschubgeschwindigkeit in Verbindung mit hoher Laserleistung verursacht lange Haltezeiten bei Temperaturen oberhalb von 911°C (Ac_3) und führt so zur Vergrößerung des Gefüges und verursacht Härtewerte von ca. 120 HV_{0,2}. Im unteren Blech hat sich in der gesamten Wärmeeinflußzone Feinkorn gebildet. Hier erreicht die Härte ihre höchsten Werte von 167 HV_{0,2}. Das Lot besitzt eine Härte von 125 HV_{0,2}. Unter dem Lichtmikroskop wird mit Blick auf Gefügeveränderungen eine Wärmeeinflußzone mit einer Ausdehnung von 10,5 mm gemessen. Die über den Härteverlauf nachweisbare Wärmeeinflußzone mißt eine Breite von über 30 mm und geht über den Bereich des angefertigten Querschliffes hinaus.

Nur noch feinkörniges Gefüge sowohl im oberen als auch im unteren Blech ist bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_s=0,24$ m/min zu finden. Entsprechend gleichmäßig ist der Härteverlauf, der stetig bis zur Mitte des Überlappungsbereiches auf Werte von 136 HV_{0,2} ansteigt. Während die unter dem Mikroskop auszumachende Wärmeeinflußzone 10 mm beträgt, überschreitet die mittels Härtemessung erfaßte Ausdehnung die Abmessungen des Querschliffes.



*GW: Grundwerkstoff

Bild 7.6: Einfluß der Vorschubgeschwindigkeit auf die Härte im Nahtbereich (Grundwerkstoff: DC04, $s=1,0$ mm; Lot: L-Ag55Sn, $\varnothing 1$ mm; Überlappbreite: $b_U=4$ mm; Spaltbreite: $b_S=0,2$ mm; Laserleistung: $P_{L1}=530$ W bis 960 W, $P_{L2}=300$ W bis 480 W; Schutzgasdurchflußmenge: $\dot{V}_{SG,FORM}=600$ l/h)

Die bei Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit auf $v_s=0,36$ m/min meßbare thermisch beeinflusste Zone weist eine Abmessung von ca. 25 mm auf. Die unter dem Mikroskop sichtbaren Gefügeveränderungen haben demgegenüber nur eine Ausdehnung von 8 mm. Der ungleichmäßige Härteverlauf ist auf den Wechsel von Grob-, Fein- und Normalgefüge zurückzuführen. Grobkörniges Gefüge findet sich im oberen Blech direkt unterhalb der Wechselwirkungszone zwischen Laserstrahl und Blech. Hier werden Spitzenwerte von 131 HV_{0,2} nachgewiesen und damit die gleiche Härte wie für das Lot. Im unteren Blech hat sich die Korngröße im Einflußbereich des Laserstrahls im Vergleich zum unbeeinflussten Grundwerkstoff nicht verändert. Die hier erreichte Maximalhärte beträgt 125 HV_{0,2}. Im Überlappbereich schwankt die Härte um 120 HV_{0,2}.

7.2.3 Poren und Oberflächenrisse

Das Auftreten von Poren in der Lotschmelze ist charakteristisch für das Hartlöten von zinkbeschichteten Stahlblechen, **Bild 7.7, Foto 1 und 2**. Poren sind aber auch bei Anwendung konventioneller Schweißtechniken feststellbar. Eine 100 % porenfreie Verbindung wird beim Schweißen verzinkter Werkstoffe in vielen Fällen durch vorheriges Entfernen der Zinkschicht erzielt [127, 128].

Bei der Röntgendurchstrahlungsaufnahme in **Bild 7.7, Foto 2**, hebt sich das Lot außerhalb des Lotspaltes dunkel hervor. Während auf der rechten Seite die Lotraupe in der Nahtkehle verläuft, ist in der Nahtwurzel auf der linken Seite des Überlappungsbereiches das aus dem Lotspalt ausgetretene Lot zu sehen. Dieses Phänomen ist auf die gute Benetzung auf einer oxidfreien Metalloberfläche zurückzuführen, die unter einer geschmolzenen bzw. verdampften Zinkschicht vorliegt. Zusätzlich verdrängt offenbar der ausgasende Zinkdampf den von der Nahtwurzel eindringenden atmosphärischen Sauerstoff (vgl. dazu auch Abschnitt 7.1.2).

Verursacht werden die Poren durch die niedrige Verdampfungstemperatur des Zinks (906 °C) in Verbindung mit einem hohen Dampfdruck. Zur Porenbildung kommt es, wenn die beim Fügen entstehenden Zinkdämpfe nicht vollständig entweichen können [129]. Aus diesem Grund werden für die Praxis beim Löten von verzinkten Stahlblechen I-Nähte oder Überlappverbindungen mit Überlappbreiten bis maximal $b_L=2$ mm empfohlen, da hier ein verbessertes Entgasen des Zinkdampfes sichergestellt ist [130].

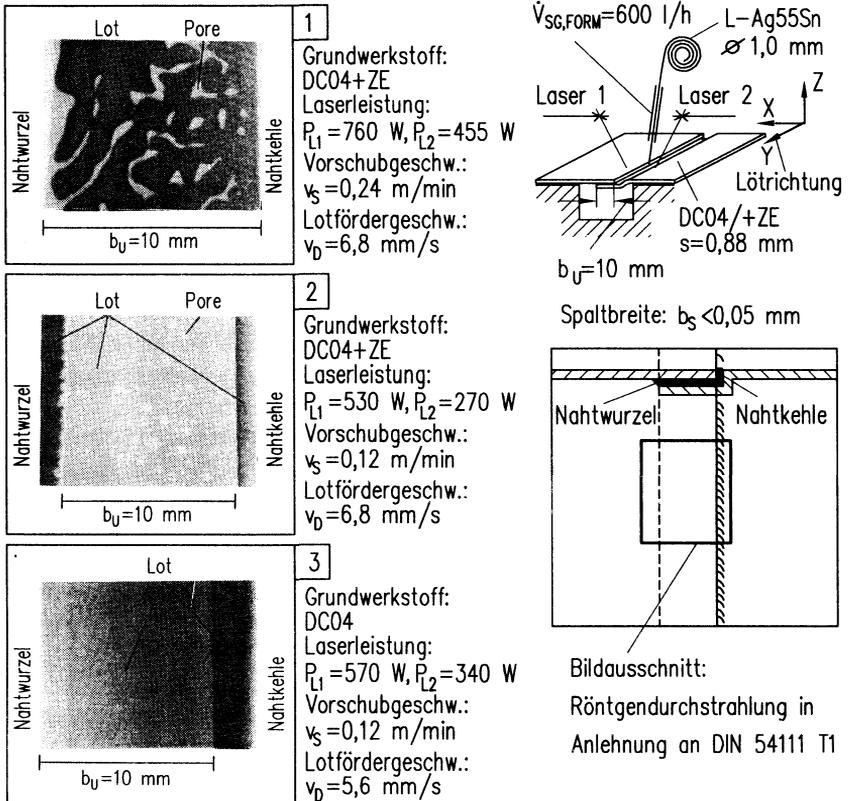


Bild 7.7: Porenbildung und Füllgrad im Spalt beim Laserstrahlhartlöten von DC04 und DC04+ZE

Hohe Laserleistungen verursachen eine verstärkte Verdampfung der am Grundwerkstoff im Lötspalt befindlichen galvanischen Zinkschicht. Die beim Laserstrahlhartlöten verwendete Nahtgeometrie mit der im Karosserierohbau üblichen Überlappbreite von $b_U = 10 \text{ mm}$ sowie einer geringen Spaltbreite von $b_s < 0,05 \text{ mm}$, erschweren vor allem bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten das Ausgasen des Zinkdampfs aus dem Spaltbereich. Poren, insbesondere großflächige Schlauchporen, sind die Folge (**Bild 7.7, Foto 1**). Niedrige Vorschubgeschwindigkeiten und geringe Laserleistungen vermindern die Porenbildung. Die Zinkschicht wird überwiegend aufgeschmolzen und durch das Lot aus dem Spalt getrieben (vgl. Abschnitt 7.2.1). Der in geringerem

Umfang entstehende Zinkdampf kann aus der Lotschmelze, hauptsächlich aus den Randbereichen des Spaltes, entweichen. Die dennoch im Spalt nachweisbaren Poren befinden sich deshalb überwiegend in der Mitte des Überlappungsbereiches und weisen nur ein geringes Volumen auf (**Bild 7.7, Foto 2**). Beim Laserstrahlhartlöten von Baustählen ohne Zinkbeschichtung (DC04) werden keine Poren nachgewiesen (**Bild 7.7, Foto 3**).

Neben der Porenbildung gibt es zwei weitere wesentliche Nachteile des entweichenden Zinkdampfs. Dies ist zum einen die gesundheitsschädliche Wirkung und zum anderen die Entstehung von Zinkoxid (ZnO), das sich als weißer Belag im Nahtwurzelbereich auf dem Grundwerkstoff niederschlägt.

Beim Laserstrahlhartlöten von I-Nähten beeinflusst eine Zinkbeschichtung die Ausbildung der Naht nicht. Wird die Zinkschicht direkt dem Laserstrahl ausgesetzt, kommt es zur Verdampfung des Zinks. Befindet sich die Zinkschicht auf der dem Strahl abgewandten Seite, erfolgt ein Anschmelzen und Verdampfen der Zinkschicht im Bereich der Wärmeeinflußzone. Typischerweise wird dadurch die Zinkschicht in einer Breite von ca. 5-8 mm um die Naht beschädigt und damit der Korrosionsschutz im Bereich der Naht beeinträchtigt.

Mikrorisse und -poren in der Lotraupe beeinträchtigen die Lackierbarkeit einer im Sichtbereich liegenden Naht. Sie können auch nach dem Schleifprozeß während der Nachbearbeitung mit bloßem Auge nicht festgestellt werden und zeichnen sich erst bei der Lackierung deutlich ab.

Von der Oberfläche ausgehende Risse und Mikroporen in der Lotraupe (DIN 8515: Ordnungsnr.: 4.100) wurden, wie in Abschnitt 5.3 beschrieben, mit einem Farbeindringverfahren nach DIN 54152 überprüft. Untersucht wurden Lötungen mit den Hartloten L-Ag55Sn und L-CuZn40 sowohl an I- als auch an Flächennähten.

Während an Verbindungen mit dem Silberbasislot keine Oberflächenporen oder -risse feststellbar sind, zeigen Löt Nähte mit dem Kupferbasislot bereichsweise eine poröse Naht. Bei geringen Geschwindigkeiten ($v_s=0,09$ m/min bis 0,15 m/min) weisen die Löt Nähte mit dem Hartlot L-CuZn40 vereinzelt Mikroporen auf, überwiegend am Nahtanfang und Nahtende. Diese Mikroporen, die nur ein kleines Porenvolumen besitzen, treten nur in der Nahtüberhöhung auf und werden beim Abschleifen der Lotraupe beseitigt. Oberflächenrisse und Bindefehler zwischen Lot und Grundwerkstoff konnten nicht nachgewiesen werden.

Mit Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit ($v_s=0,18$ m/min bis $0,36$ m/min) verringert sich die Neigung zur Ausbildung von Poren in der Lotraupe. Lediglich am Nahtanfang und am Nahtende sind bei hohen Geschwindigkeiten geringe Fehler nachweisbar.

Die festgestellte Porosität ist auf die Überhitzungsneigung des Kupferbasislotes zurückzuführen (vgl. Abschnitt 5.1). Ursache sind hohe Temperaturen insbesondere während des Aufheizens im Randbereich der Blechteile zu Prozeßbeginn, aber auch zum Prozeßende.

7.3 Festigkeit

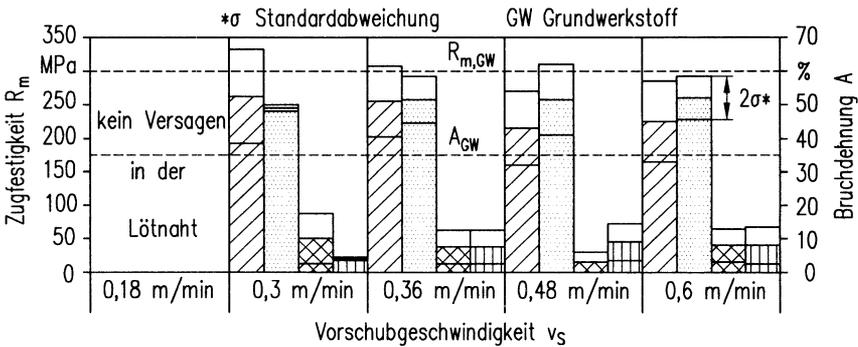
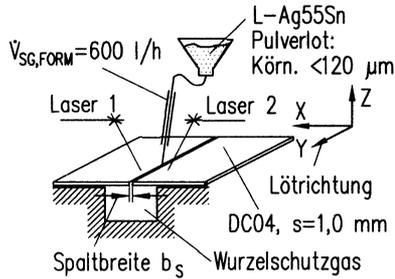
Die nachfolgend zusammengefaßten Ergebnisse zu den Zug- und Zugscherfestigkeiten geben Aufschluß über die Grenzen der erreichbaren Festigkeiten beim Laserstrahlhartlöten von DC04/+ZE. Im weiteren lassen sich dadurch auch konstruktive Hinweise für die Auswahl der Stoßgeometrie an einem Bauteil oder die Auslegung der notwendigen Überlappbreite ableiten.

7.3.1 Zugfestigkeit und Bruchdehnung

In Vorversuche wurde zunächst nachgewiesen, daß unter Verwendung gleicher Bearbeitungsparameter die Festigkeitseigenschaften von Verbindungen mit dem Silberbasislotes in Drahtform vergleichbar zu den Eigenschaften von Löt Nähten sind, die mit dem gleichen Lot in Pulverform gelötet wurden. Alle Zugproben für die Untersuchungen wurden danach mit dem Pulverlot unter Einsatz eines Wurzelschutzes gelötet und wiesen dementsprechend Füllgrade von 100 % auf (vgl. dazu Abschnitt 8.1). Am Grundwerkstoff wurden Zugfestigkeiten von im Mittel $R_m=297$ MPa bei einer Dehngrenze von $R_{p0,2}=162$ MPa festgestellt, wobei keine ausgeprägte Vorzugsrichtung in bezug auf die Walzrichtung des Bleches vorlag. Die Bruchdehnung lag bei ca. $A=35$ %, **Bild 7.8**. Zu den Bedingungen des Zugversuchs und der Geometrie der Zugproben siehe Abschnitt 5.3.

Grundsätzlich zeigte sich für die beiden eingesetzten Lotwerkstoffe an I-Nähten, daß für Festigkeiten der Lötverbindungen über der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes ein 100 %iger Füllgrad im Spalt erforderlich ist. Geringere Füllgrade hatten aufgrund des kleineren tragenden Querschnitts der Naht und der Kerbwirkung des nicht ausgefüllten Nahtwurzelbereiches ein frühes Versagen in der Löt Naht zur Folge.

Zugproben: AWS-Standard C3.1-63
 Füllgrad im Spalt: $f_s = 100\%$
 Laserleistung: $P_{L1} = 460\text{ W} - 655\text{ W}$
 $P_{L2} = 460\text{ W} - 655\text{ W}$
 Lotfördermenge:
 $m_{zW} = 2\text{ g/min} - 6,5\text{ g/min}$



$R_{m,GW}$ Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes	A_{GW} Bruchdehnung des Grundwerkstoffes
Zugfestigkeit R_m beim Versagen in der Lötnaht	Bruchdehnung A beim Versagen in der Lötnaht
Spaltbreite: $b_s = 0,2\text{ mm}$	Spaltbreite: $b_s = 0,2\text{ mm}$
Spaltbreite: $b_s = 0,5\text{ mm}$	Spaltbreite: $b_s = 0,5\text{ mm}$

Bild 7.8: Zugfestigkeit von I-Nähten in Verbindung mit dem Hartlot L-Ag55Sn

Da bei der gewählten Werkstoffkombination eines unlegierten Baustahls in Verbindung mit Kupfer- und Silberbasisloten die Festigkeit der Lotwerkstoffe, über der Festigkeit des Grundwerkstoffes liegt (vgl. dazu **Tabelle 11.2** im Anhang), konnte die in der Literatur erwähnte Erhöhung der Zugfestigkeit mit abnehmender Spaltbreite (z.B. [52]), nicht nachgewiesen werden.

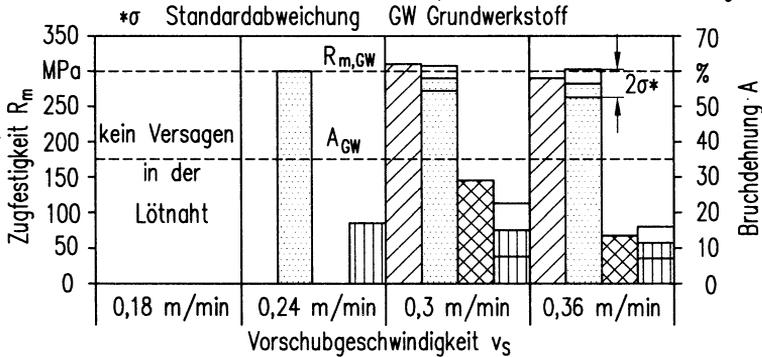
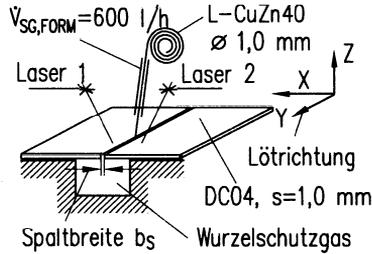
In **Bild 7.8** sind für den Grundwerkstoff DC04 in Verbindung mit dem Lot L-Ag55Sn die Zugfestigkeiten und die Bruchdehnung beim Versagen der Proben in der Lötnaht über die Vorschubgeschwindigkeit aufgetragen. Die Zugfestigkeit der Proben mit der

geringeren Spaltbreite von $b_s=0,2$ mm liegt dabei überwiegend unter der Festigkeit der Proben mit einer Spaltbreite von $b_s=0,5$ mm und ist auf die Kerbwirkung von vereinzelt Lotfehlstellen in der Nahtwurzel zurückzuführen. Diese Fehlstellen traten geschwindigkeitsabhängig bei Vorschubgeschwindigkeiten über $v_s=0,18$ m/min trotz Wurzelschutzmaßnahmen auf. Dennoch werden bei einem Versagen in der Lötnaht und unter Berücksichtigung aller Vorschubgeschwindigkeiten im Mittel Zugfestigkeiten von ca. 250 MPa erzielt. Dies entspricht ca. 80 % der Festigkeit des Grundwerkstoffes. Die Bruchdehnung erreicht hingegen nur ca. 20 % der Bruchdehnung des Grundwerkstoffes. Die geringe Bruchdehnung ist auf die Aufhärtung im Nahtbereich zurückzuführen (vgl. Abschnitt 7.2.2), die hier eine verminderte Duktilität des Werkstoffes verursacht. Aufgrund des Zusammenhangs zwischen maximaler Härte und Vorschubgeschwindigkeit sollte mit zunehmender Geschwindigkeit ein Absinken der Bruchdehnung sowie ein Ansteigen der Zugfestigkeit erkennbar sein. Beide Trends sind aber durch die erheblichen Ergebnisstreuungen nicht eindeutig nachweisbar.

Zugproben, die mit dem Kupferbasislot L-CuZn40 gelötet wurden, erreichten beim Versagen in der Lötnaht Zugfestigkeiten von im Mittel 95 % der Festigkeit des Grundwerkstoffes und wiesen eine geringere Streuung der Ergebnisse im Vergleich zum Silberbasislot auf, **Bild 7.9**. Höchste Festigkeiten wurden insbesondere bei der geringeren Spaltbreite von $b_s=0,2$ mm und Vorschubgeschwindigkeiten von $v_s=0,18$ m/min sowie 0,24 m/min erzielt. Die Bruchdehnung beim Versagen in der Lötnaht nimmt mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ab. Diese wird, wie bereits für das Silberbasislot beschrieben, durch die mit der Geschwindigkeit ansteigende Aufhärtung im Nahtbereich verursacht. Bei einem Vorschub von $v_s=0,36$ m/min erreicht die Bruchdehnung mit ca. 32 % ($b_s=0,5$ mm) bzw. 38 % ($b_s=0,2$ mm) der Bruchdehnung des Grundwerkstoffes ihr Minimum.

Die Brucheinleitung tritt beim Versagen in der Lötnaht an der Phasengrenze zwischen Lot und Grundwerkstoff auf. Bricht die Probe im Grundwerkstoff, erfolgt das Versagen im Bereich der größten Dehnung zwischen Probeneinspannung und Lötnaht. Während eine Abhängigkeit der Bruchdehnung von Vorschubgeschwindigkeit und damit auch von der Aufhärtung in der Wärmeeinflußzone zumindest für das Kupferbasislot nachgewiesen werden kann, ist der Einfluß der Aufhärtung auf die Zugfestigkeit nicht eindeutig auszumachen. Hier wäre ein entgegengesetzter Trend, d.h. die Zunahme der Zugfestigkeit mit der Vorschubgeschwindigkeit bzw. der Härte zu erwarten und wird in der Literatur bestätigt (z.B. [57]).

Zugproben: AWS-Standard C3.1-63
 Füllgrad im Spalt: $F_S = 100\%$
 Laserleistung: $P_{L1} = 310\text{ W}$, $P_{L2} = 310\text{ W}$
 Lotfördergeschwindigkeit:
 $v_p = 4,5\text{ mm/s} - 8,5\text{ mm/s}$



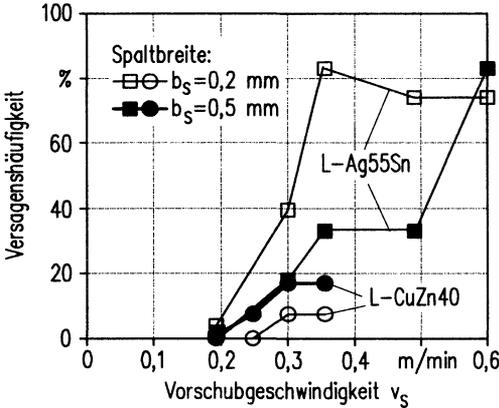
$R_{m,GW}$ Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes A_{GW} Bruchdehnung des Grundwerkstoffes
 Zugfestigkeit R_m Bruchdehnung A
 beim Versagen in der Lötnaht beim Versagen in der Lötnaht

Spaltbreite: $b_s = 0,2\text{ mm}$ Spaltbreite: $b_s = 0,2\text{ mm}$
 Spaltbreite: $b_s = 0,5\text{ mm}$ Spaltbreite: $b_s = 0,5\text{ mm}$

Bild 7.9: Zugfestigkeit von I-Nähten in Verbindung mit dem Hartlot L-CuZn40

In **Bild 7.10** ist die Anzahl der Proben, die in der Lötnaht gebrochen sind, über die Vorschubgeschwindigkeit für die beiden Lote L-Ag55Sn und L-CuZn40 aufgetragen. Niedrige Vorschubgeschwindigkeiten zeigen sowohl für das Silber- als auch für das Kupferbasislot die höchste Zuverlässigkeit der Lötverbindungen. Die geringste Versagenshäufigkeit in der Lötnaht weist dabei das Kupferbasislot L-CuZn40 auf. Insbesondere Hartlötverbindungen mit der geringeren Spaltbreite von $b_s = 0,2\text{ mm}$ führen dabei seltener zu einem Bruch in der Lötnaht. Die oben erwähnten Lotfehlstellen, die für das frühzeitige Versagen der Verbindungen mit dem Lot L-Ag55Sn bei $b_s = 0,2\text{ mm}$ verantwortlich gemacht werden, wurden bei den Zugproben mit L-CuZn40 nicht

festgestellt. Dies deutet möglicherweise auf einen unzulänglichen Nahtwurzelschutz beim Löten mit dem Silberbasislot hin und wird offensichtlich durch hohe Vorschubgeschwindigkeiten begünstigt.



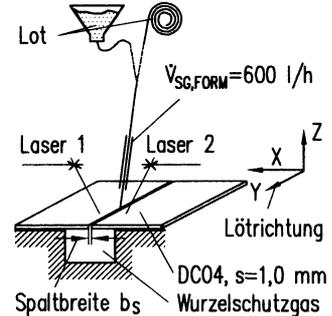
L-Ag55Sn, Pulverlot: Körn. <math>< 120 \mu\text{m}</math>

Laserleistung:

$P_{L1} = 460 \text{ W} - 655 \text{ W}$ $P_{L2} = 460 \text{ W} - 655 \text{ W}$

Lotfördermenge:

$m_{ZW} = 2 \text{ g/min} - 6,5 \text{ g/min}$



Zugproben: AWS-Standard C3.1-63

Füllgrad im Spalt: $F_s = 100 \%$

L-CuZn40, $\varnothing 1,0 \text{ mm}$:

Laserleistung:

$P_{L1} = 310 \text{ W}$ $P_{L2} = 310 \text{ W}$

Lotfördergeschwindigkeit:

$v_0 = 4,5 \text{ mm/s} - 8,5 \text{ mm/s}$

Bild 7.10: Einfluß der Vorschubgeschwindigkeit auf die Versagenshäufigkeit in der Lötnaht bei I-Nähten

7.3.2 Zugscherfestigkeit

Die Festigkeiten von Überlappverbindungen werden wesentlich durch die Überlappbreite b_u und den Füllgrad im Spalt F_s bestimmt. Für einen 100 %igen Füllgrad ist die Belastbarkeit einer auf Scherung beanspruchten Lötverbindung eine Funktion der Überlappbreite b_u . Die maximale Belastbarkeit der Verbindung wird erreicht, wenn die auf Scherung beanspruchte Lötnaht mindestens ebenso fest ist, wie der schwächste Querschnitt des Grundwerkstoffes.

Die maximale Belastbarkeit des Blechwerkstoffes U_{BLECH} ergibt sich nach [131] zu:

$$U_{BLECH} = R_m \cdot l \cdot s \quad (7.1)$$

mit R_m Zugfestigkeit [MPa]
 l Überlapplänge [mm]
 s Werkstückdicke [mm]

Für die Ermittlung der Belastbarkeit der Lötverbindung $U_{LÖTNAHT}$ gilt:

$$U_{LÖTNAHT} = b_U \cdot l \cdot \tau_{LOT} \quad (7.2)$$

mit b_U Überlappbreite [mm]
 τ_{LOT} Scherfestigkeit des Lotes [MPa]

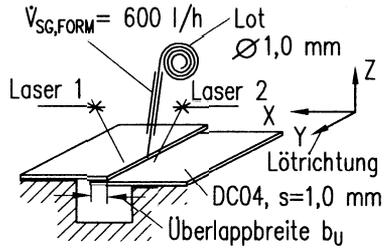
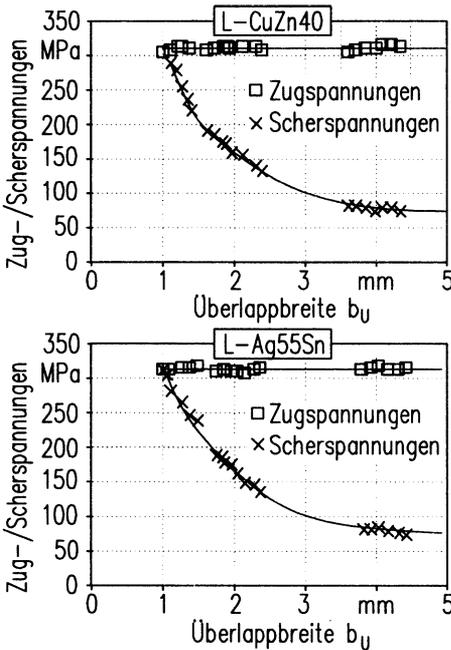
Durch Gleichsetzen der Belastbarkeit von Lötnaht und Blech errechnet sich die erforderliche Mindestüberlappbreite $b_{U,MIN}$ nach:

$$b_{U,MIN} = \frac{R_{m, BLECH}}{\tau_{LOT}} \cdot s \quad (7.3)$$

Nach Gleichung (7.3) ergibt sich für den Baustahl DC04 ($R_m \approx 300$ MPa, $s=1$ mm) in Verbindung mit dem Kupferbasislot L-CuZn40 ($\tau_{L-CUZn40} = 300$ MPa [132]) eine Mindestüberlappbreite von $b_{U,MIN}=1$ mm.

In den in **Bild 7.11** dargestellten Versuchsreihen wurde die Zugsheerfestigkeit bei unterschiedlicher Überlappbreite b_U untersucht. Die Zugproben wurden ohne Wurzelschutzgas mit den Hartloten L-Ag55Sn und L-CuZn40 gelötet und wiesen Füllgrade im Spalt von 80 % bis 98 % auf, die bei der angegebenen Überlappbreite b_U berücksichtigt wurden.

In **Bild 7.11** ergeben sich die erreichten Zugspannungen aus dem Quotienten der maximalen Zugkräfte bezogen auf die kleinsten Probenquerschnitte vor der Belastung. Die Scherspannungen ermitteln sich aus dem Verhältnis der Zugspannungen zu den Überlappungsflächen.



Zugproben: AWS-Standard C3.1-63
 Füllgrad im Spalt: $F_S = 80\% - 98\%$

Spaltbreite: $b_S = 0,5\text{ mm}$

Laserleistung: $P_{L1} = 530\text{ W} - 960\text{ W}$
 $P_{L2} = 300\text{ W} - 480\text{ W}$

Vorschubgeschwindigkeit:
 $v_S = 0,3\text{ m/min}$

Bild 7.11: Erreichbare Zug- und Zugscherspannungen an laserstrahlhartgelöteten Flächennähten am Überlappstoß

Die Ergebnisse in **Bild 7.11** belegen die hohe Festigkeit der laserstrahlhartgelöteten Überlappverbindungen. Überlappbreiten in der Größenordnung der oben für das Kupferbasislot ermittelten Mindestüberlappbreite von 1 mm, führen auch beim Silberbasislot nicht zum Versagen in der Lötnaht. Die Kerbwirkung, die sich aus dem nicht vollständig ausgefüllten Spalt ergibt, beeinflusst dabei die Festigkeit nicht. Ein Einfluß der Spaltbreite b_S auf die Scherfestigkeit kann auch an Flächennähten nicht nachgewiesen werden. Dies wird auch in der Literatur bestätigt [z.B. 51]. Allerdings versagen einzelne Proben bei Überlappbreiten $b_U < 2\text{ mm}$, die mit höheren Vorschubgeschwindigkeiten als $v_S = 0,3\text{ m/min}$ gelötet wurden. Für die konventionelle Lötpraxis wird unter Berücksichtigung derartiger Unsicherheiten - je nach Festigkeit des Grundwerkstoffes - eine Überlappbreite vom 3- bis 6-fachen der Blechdicke empfohlen [133].

7.4 Thermischer Verzug

Der Verzug ist eines der Hauptprobleme aller thermischen Fügeverfahren und beeinträchtigt auch beim Hartlöten die Bauteilqualität. Nachfolgend werden die grundlegenden Mechanismen hinsichtlich des thermischen Verzugs erläutert. Aufgrund ihrer geringen Struktursteifigkeit und Eigenspannungszustände wurden spannungsarmgeglühte, ebene Blechteile für die Untersuchungen eingesetzt. Abschließend wird ein praxisnaher Verfahrensvergleich hinsichtlich des thermischen Verzug unter Einbeziehung unterschiedlicher Fügetechniken an Realbauteilen (Kofferraumdeckeln) durchgeführt. Für den Vergleich werden bereits in der Automobilindustrie eingesetzte und mit dem Laserstrahlhartlöten konkurrierende Fügeverfahren herangezogen. Berücksichtigt werden das Handflammlöten und das Laserstrahlschweißen. Die Bearbeitungsparameter sind in der **Tabelle 11.3** im Anhang zusammengefaßt.

Ungleichmäßige, thermisch induzierte Wärmeausdehnungen verursachen an einem Werkstück Eigenspannungen und Verzug. Bei thermischen Fügeverfahren hängt dieser Verzug von einer Vielzahl von Faktoren wie dem Werkstoff, dem thermischen Verfahren, der zeitlichen Temperaturführung, der Nahtform und den mechanischen Randbedingungen ab [51].

Beim Verzug unterscheidet man zwischen der Längs- und der Querschrumpfung, die entsprechend in Längs- oder Querrichtung zur Lötnaht auftreten. An dünnwandigen Bauteilen führen Längsschrumpfungen zu einer Längsverformung und damit zu einer Durchbiegung des Bauteils, hier Längskrümmung genannt. Querschrumpfungen führen zu einer Querverformung in Form von Winkelverzug [51, 57].

Beim Laserstrahlhartlöten ebener Blechteilgeometrien an Flächennähten am Überlappstoß mit großer Überlappbreite b_U ergibt sich ein großes Verhältnis von der Breite der mit beiden Lasern bestrahlten Fläche ($>b_U$) zur Blechdicke s . Zusätzlich zum großen Durchmesser des erwärmten Bereichs wird mit geringen Vorschubgeschwindigkeiten gelötet (siehe **Tabelle 6.3** in Abschnitt 6.3), wodurch sich nur kleine Temperaturgradienten auch über die doppelte Blechdicke im Überlappungsbereich einstellen. Der unter den Laserstrahlen erwärmte Bereich steht damit aufgrund der thermischen Ausdehnung unter einer über die Blechdicke nahezu konstanten Druckspannung. Dies gilt sowohl für das obere als auch für das untere Blech. Diese lokal begrenzten Biegezonen weisen im Bereich höchster Temperaturen eine plastische Biegung auf, da dort die Fließspannung durch die Erwärmung herabgesetzt wurde. Im Übergangsbereich zum umliegenden Blech ist aufgrund der höheren Fließspannungen die

Biegung rein elastisch. Durch das Verfahren der Brennflecke entlang der Naht über die gesamte Länge der Bleche wird auch der Bereich verschoben, in der die Bleche ausknicken und verursacht so den typischen Winkelverzug. Nach beenden des Lötvorgangs wird die Relaxation der elastischen Biegung zum Teil durch die Einspannung behindert. Dadurch wird erst nach Entnahme aus der Spannvorrichtung der gesamte Verzug sichtbar. Durch die niedrigere Fließgrenze der Lote im Vergleich zum Grundwerkstoff bei erhöhten Temperaturen können zum Teil sowohl elastische als auch plastische Dehnungen solange über das Lot abgebaut werden, wie die durch sie verursachten Spannungen über der Fließgrenze des Lotes liegen (vgl. dazu Abschnitt 7.4.1). Die Richtung der Biegung der Bleche und damit des Winkelverzugs ergibt sich aus dem Eigenspannungszustand und einer plastischen bzw. elastischen Vorbiegung der Blechteile. Der Winkel kann sich sowohl in Richtung des Laserstrahl als auch in die entgegengesetzte Richtung ausbilden. Die Längskrümmung der Lötnaht ergibt sich bei den geringen Lötgeschwindigkeiten und geringen Temperaturgradienten aufgrund von über der Länge der Naht ungleichmäßig verteilten Zugeigenspannungen. Bei der sich dabei typischerweise ausbildenden Sattelform der Blechteile (im Vergleich zur Schalenform) strebt das Werkstück ein Energieminimum an und die Längskrümmung ist der Richtung des Winkelverzugs entgegengerichtet (in Anlehnung an [134-136]).

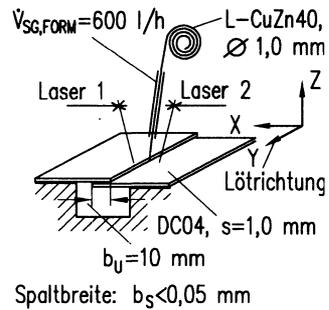
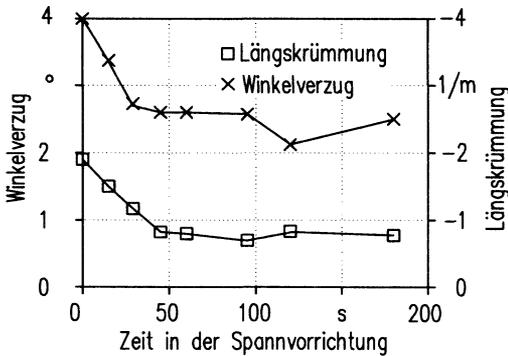
7.4.1 Einflußgrößen auf den thermischen Verzug

Im Gegensatz zum Schweißen können beim Hartlöten die nach dem oben beschriebenen Mechanismus eingebrachten Eigenspannungen während des Hartlötprozesses über das Lot wieder teilweise abgebaut und dadurch der Verzug verringert werden. Ursache ist die niedrigere Fließgrenze vieler Lote im Vergleich zum Grundwerkstoff bei erhöhten Temperaturen.

Die Entspannung von Kohlenstoffstählen beginnt bei 500°C, die von Messing schon bei 300°C. Bei einer Verbindung von niedriglegiertem Baustahl mit Messinglot können sich aus diesem Grund Abkühlspannungen erst unter 300°C ausbilden, bei Verbindungen mit Silberbasislot, das durch Entfestigungstemperaturen unter 200°C gekennzeichnet ist, sogar erst bei noch tieferen Temperaturen [137].

Damit die thermischen Spannungen über das Lot abgebaut werden können, muß das Bauteil formschlüssig fixiert sein. Wird das Bauteil vor dem völligen Abbau der Abkühlspannungen aus der Werkstückaufspannung entfernt, kommt es zu erhöhtem Verzug. Für die Meßwerte in **Bild 7.12** sind Flächennäht am Überlappstoß mit dem Kupferbasislot gelötet und nach unterschiedlichen Zeiten zwischen 0 s und 180 s aus

der Spannvorrichtung entnommen worden. Anschließend wurden sie hinsichtlich des thermischen Verzugs vermessen. Mit zunehmender Zeit, die das Blechteil in der Spannvorrichtung verbleibt, sinken zunächst sowohl Längskrümmung als auch Winkelverzug gleichmäßig. Erst nach etwa 50 s sind die Temperaturen im Bauteil soweit gesunken, daß die temperaturabhängige Fließgrenze des Lotes über den Abkühlspannungen im Werkstück liegt. Eine Verlängerung der Spannzeit über 50 s hat keinen weiteren Einfluß auf den Verzug, da ein weiterer Abbau der Spannungen über das Lot nicht mehr möglich ist.



Laserleistungsangabe an Regler:
 $P_{R1}=900\text{ W}$ (P-Regler), $P_{R2}=305\text{ W}$ (PI-Regler)
 Solltemperursignal: $T_{S1}=6,8\text{ V}$, $T_{S2}=5,0\text{ V}$

Vorschubgeschwindigkeit: $v_S=0,15\text{ m/min}$
 Lotfördergeschwindigkeit: $v_D=3,0\text{ mm/s}$

Bild 7.12: Abbau des thermischen Verzugs über den Lotwerkstoff bei unterschiedlichen Einspannzeiten (Flächennaht am Überlappstoß)

Einen wesentlichen Einfluß auf den thermischen Verzug haben Länge, Ausdehnung und Geometrie einer Naht. Grundsätzlich erhöht sich der thermische Verzug mit steigendem Fügequerschnitt. Insbesondere an Flächennahten am Überlappstoß bestimmt der Füllgrad im Spalt den Nahtquerschnitt und beeinflusst dadurch den Verzug. In **Bild 7.13** ist der Zusammenhang zwischen dem Füllgrad im Spalt und dem Winkelverzug sowie der Längskrümmung dargestellt. Mit zunehmendem Füllgrad steigt proportional sowohl der Winkelverzug als auch die Längskrümmung. Im Vergleich zum Füllgrad im Spalt ist der Einfluß der veränderten Energieeinbringung über die unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten vernachlässigbar.

Die im **Bild 7.13** dargestellten Meßwerte beziehen sich auf Lötungen an DC04 mit einer Dicke von $s=1,0$ mm. Die verwendete Nahtgeometrie, die Flächennaht am Überlapstoß, wurde mit dem Hartlot L-CuZn40 gelötet. Die insgesamt relativ hohen Verzugswerte ergeben sich durch die Entnahme der Proben direkt (bis 5 s) nach dem Lötvorgang.

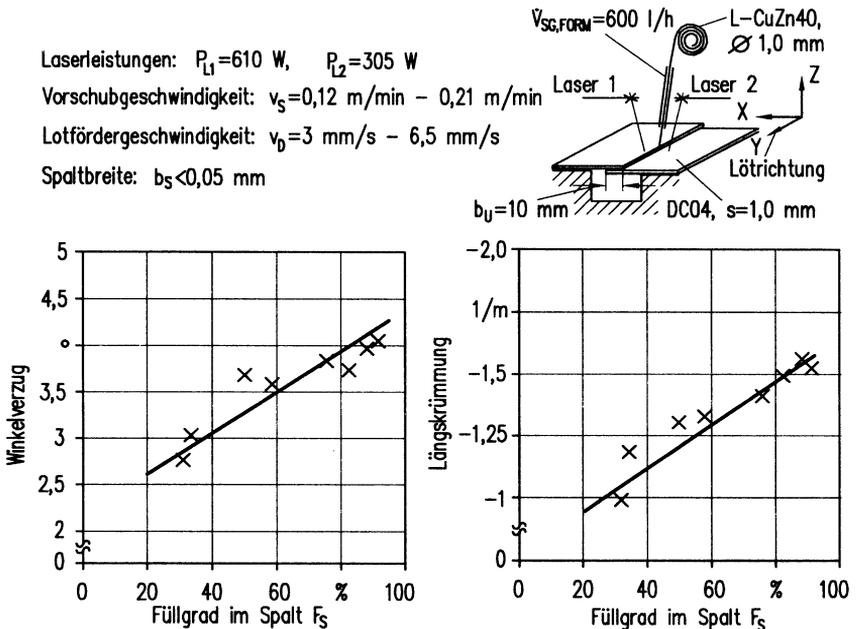


Bild 7.13: Einfluß des Füllgrades im Spalt (Flächennaht am Überlapstoß) auf den thermischen Verzug an ebenen Stahlblechen

In **Tabelle 7.1** sind die minimal erzielbaren Verzugswerte für die beiden eingesetzten Lotwerkstoffe für I- und Flächennahten am Überlapstoß an ebenen Blechproben gegenübergestellt. Die Lötungen erfolgten mit den in **Tabelle 6.3** angegebenen Parametern. Stichversuche zeigten für Lötungen mit on-line Laserleistungsregelung vergleichbare Verzugsergebnisse. Die Entnahme der Proben aus der Aufspannung erfolgte ca. 1 min nach Ende des Lötprozesses. Der geringere Verzug mit dem Silberbasislot ist hauptsächlich auf den oben erwähnten werkstoffbedingten besseren Abbau der thermisch induzierten Spannungen zurückzuführen.

Obwohl die I-Naht im Vergleich zur Flächennaht einen kleineren Nahtquerschnitt aufweist, werden für beide Lotwerkstoffe höhere Verzugswerte gemessen. Da die Größe des Winkelverzugs weitgehend von der Nahtgeometrie abhängt, löst der Aufbau einer I-Naht, d.h. der schmale Spalt in Verbindung mit einer breiten Lotraupe, nach dem Erkalten außermittige Schrumpfkkräfte aus, die je nach Steifigkeit eine Winkeländerung bewirken. Demgegenüber sind die Schrumpfkkräfte über einer Flächennaht am Überlappstoß relativ gleichmäßig über dem Nahtquerschnitt verteilt. Dies erhöht die Formsteifigkeit in bezug auf den Winkelverzug. Trotz der hohen thermischen Belastung beim Laserstrahlhartlöten von Flächennahten ergibt sich deshalb im Vergleich zu I-Nähten ein geringerer Verzug.

Nahtform Lotwerkstoff	I-Naht		Flächennaht am Überlappstoß	
	Winkelverzug [°]	Längskrümmung [1/m]	Winkelverzug [°]	Längskrümmung [1/m]
L-Ag55Sn	1,8	-0,6	1,3	-0,4
L-CuZn40	2,6	-0,8	2,4	-0,8

Tabelle 7.1: Thermischer Verzug an laserstrahlhartgelöteten I-Nähten und Flächennahten am Überlappstoß für die Lote L-Ag55Sn und L-CuZn40

7.4.2 Einordnung des Laserstrahlhartlötens gegenüber anderen Fügeverfahren

Für einen Verfahrensvergleich stoffschlüssiger Fügeverfahren wurden Schweißungen und Hartlötungen mit dem Laserstrahl sowie Hartlötungen manuell mit der Flamme an Kofferraumdeckeln durchgeführt und hinsichtlich des auftretenden thermischen Verzugs vermessen, **Bild 7.14**. Die Kofferraumdeckel wurden für den Fügevorgang auf dem Bearbeitungstisch fixiert. Eine formschlüssige Aufspannung wurde nicht eingesetzt. Die rundumlaufende Falznaht, die durch einen engen Spalt $b_s < 0,05$ mm und eine einseitige Zinkschicht (10 μ m) im Spalt gekennzeichnet ist, wurde in Wannenlage gefügt. Die Wahl der Bearbeitungsparameter (siehe **Tabelle 11.3** im Anhang) erfolgte für das Laserstrahlschweißen hinsichtlich des Durchschweißens der beiden oberen Bleche. Ziel des Hartlötens war ein 100 %iger Füllgrad im Spalt.

Im Vergleich zum Laserstrahlhartlöten wurde mit dem Handflammlöten nur ein geringer Füllgrad im Spalt erzielt. Der Grund ist in der Verwendung eines Flußmittels in Verbindung mit einem geringen Fügespalt zu sehen. Für das Löten mit Flußmitteln wird in der Praxis ein Spalt $b_s > 0,05$ mm empfohlen (vgl. Abschnitt 2.3).

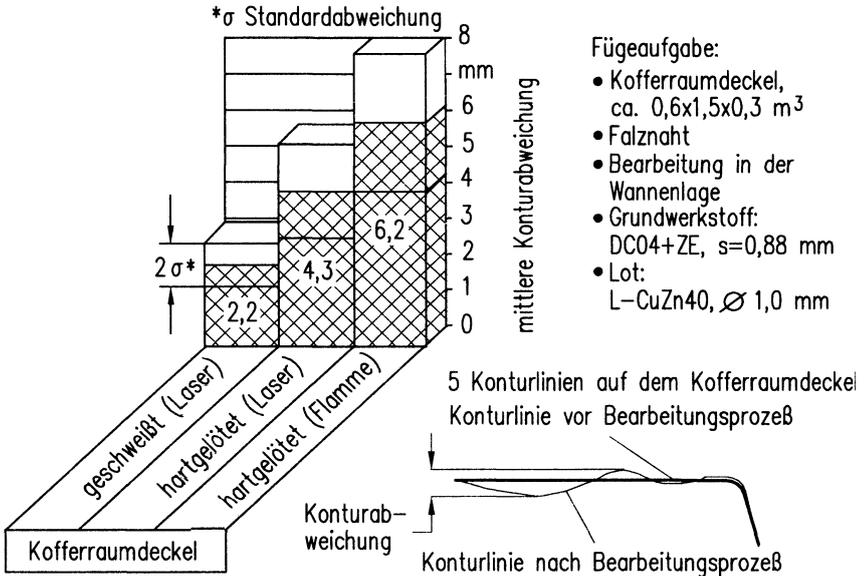


Bild 7.14: Vergleich von unterschiedlichen stoffschlüssigen Fügeverfahren hinsichtlich des thermischen Verzugs an Kofferraumdeckeln (Fügeparameter in **Tabelle 11.3** im Anhang)

Zur Bestimmung des thermischen Verzugs an den räumlich geformten Blechteilen erfolgte eine Konturerfassung vor und nach dem Lötvorgang (vgl. Abschnitt 5.3).

Bezüglich des thermischen Verzugs zeigte das Laserstrahlschweißen eindeutige Vorteile gegenüber den beiden Lötverfahren, **Bild 7.14**. Hier ist nicht nur die Konturabweichung mit nur 2,2 mm am geringsten, auch die Standardabweichung ist um die Hälfte geringer als beim Hartlöten. Der Verzug ergibt sich insgesamt durch die hohe thermische Belastung in Verbindung mit einer breiten Nahtgeometrie. Werden beim Laserstrahlschweißen Streckenenergien von 0,38 kJ/cm eingesetzt und damit mittlere Nahtbreiten von 1,4 mm (tragender Nahtquerschnitt im Spalt) erzielt, so liegen die Streckenenergien beim Laserstrahlhartlöten mit 4,5 kJ/cm um mehr als den Faktor 10

höher. Die Nahtbreiten für das Laserstrahllöten betragen im Mittel 11,5 mm (Fließweg des Lotes im Spalt inklusive Lotraupe). Daraus resultiert beim Laserstrahlhartlöten eine Konturabweichung von im Mittel 4,3 mm.

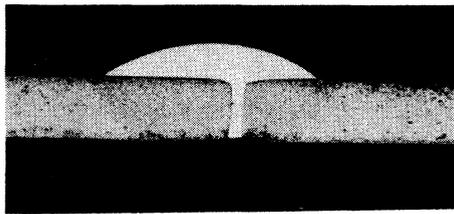
Die thermische Belastung zeigt sich auch durch die beim Laserstrahlhartlöten auftretende Oxidation auf der dem Fügebereich abgewandten Seite. Hier wird während des Prozesses soviel Energie in den Grundwerkstoff eingebracht, daß die Anlaßtemperatur von über 200°C auf der Unter- bzw. Außenhautseite erreicht wird.

Am ausgeprägtesten ist der thermische Verzug beim Handflammlöten. Die Konturabweichung von im Mittel 6,2 mm ist im Vergleich zum Schweißen dreimal so groß. Bedingt durch die ungleichmäßige manuelle Ausführung fällt auch die Streuung der Ergebnisse beim Handflammlöten höher als bei den Strahlverfahren aus. Vergleichbar dem Laserstrahlhartlöten findet sich beim Handflammlöten eine Oxidschicht auf der Außenseite der Fügestelle.

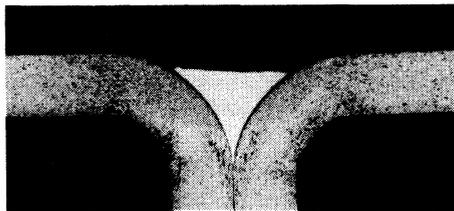
7.5 Bearbeitungsbeispiele

Im folgenden werden Bearbeitungsbeispiele von Laserstrahlhartlötungen in der Wannenlage an unterschiedlichen Stoßverbindungen vorgestellt. Dabei lassen sich vergleichbare Lötnahtqualitäten sowohl mit dem Hartlot L-Ag55Sn als auch mit L-CuZn40 erreichen.

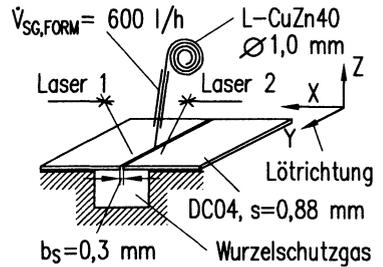
Die Ergebnisse an den Stumpfstoßverbindungen in **Bild 7.15** wurden unter Einsatz eines Wurzelschutzgases (95 % N₂, 5 % H₂) erzielt. Aufgrund der in der Automobilindustrie einseitigen Zugänglichkeit der Bördelnähte von der dem Flansch abgewandten Seite, kann eine Erwärmung des Spaltes auf die Arbeitstemperatur der Lote nicht erzielt werden. Geringe Füllgrade sind die Folge. Gut sichtbar ist bei diesen Lötungen die Feinkornausbildung im Bereich der Wärmeeinflußzone. An der Bördelnah wirken insbesondere die Versetzungen in den durch Kaltumformung verfestigten Bereichen keimbildend für ein feinkörniges Gefüge.



I-Naht 1 mm



Bördelnaht 1 mm



Laserleistung: $P_{L1} = 280 \text{ W}$

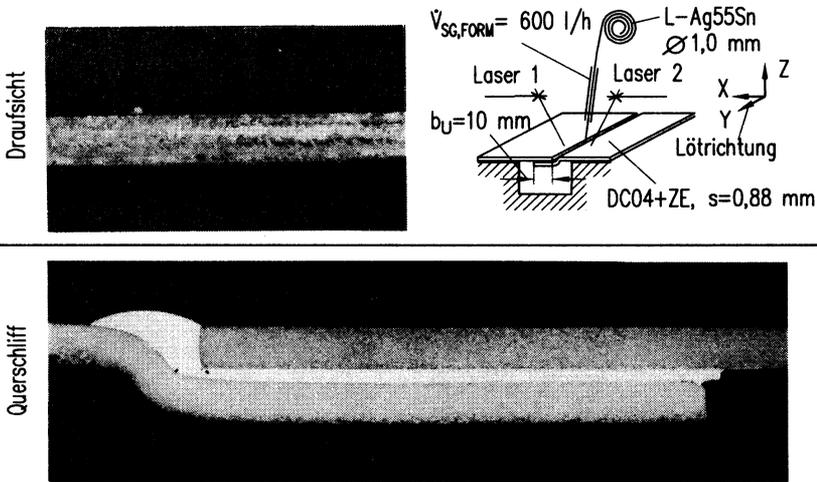
$P_{L2} = 280 \text{ W}$

Vorschubgeschwindigkeit:
 $v_s = 0,12 \text{ m/min}$

Lotfördergeschwindigkeit:
 $v_p = 3,0 \text{ mm/s}$

Bild 7.15: Benetzung und Füllgrad im Spalt bei Stumpfstoßverbindungen

Eine typische Flächennaht am abgesetzten Überlappstoß mit einer Überlappbreite von $b_U=10 \text{ mm}$ zeigt **Bild 7.16**. Ausgeprägte Nahtüberhöhungen im Kehlbereich der Naht in Verbindung mit hohen Füllgraden sind möglich.



Flächennah am abgesetzten Überlappstoß 1 mm

Bild 7.16: Benetzung und Füllgrad im Spalt bei Überlappverbindungen (Laserleistung: $P_{L1}=540$ W, $P_{L2}=305$ W; Vorschubgeschwindigkeit: $v_s=0,15$ m/min; Lotfördergeschwindigkeit $v_D=6,2$ mm/s)

Eine spezielle Form der Flächennah am Überlappstoß stellt die Falznah dar. Die hier im **Bild 7.17** gezeigten Löt-nähte wurden unter Verwendung der on-line Prozeßregelung gelötet. Falznähte garantieren eine gute Kapillarwirkung durch eine optimal kleine Spaltbreite. Das Auftreten von Poren im Spalt ist charakteristisch für Flächennähte an galvanisch verzinktem Stahl (vgl. dazu Abschnitt 7.2.3).

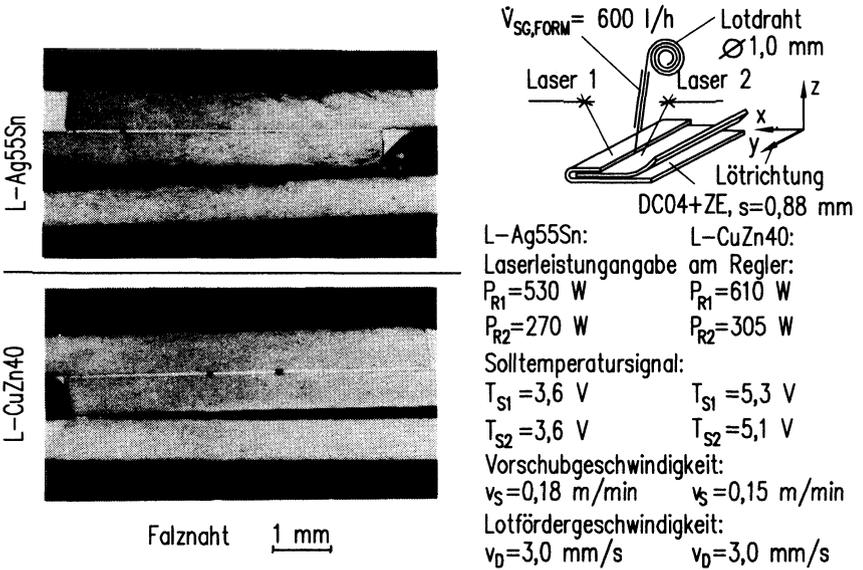


Bild 7.17: Benetzung und Füllgrad im Spalt an Falzverbindungen

8 Maßnahmen zur Steigerung der Nahtqualität und Prozesseffizienz

Obwohl im Gegensatz zum Schweißen auch Verbindungen mit großen Toleranzen hartgelötet werden können, sind zur Erzielung hoher Lötnahtqualitäten bezüglich des Füllgrades im Spalt sowohl für das konventionelle Löten als auch für das Laserstrahlhartlöten enge Stoßtoleranzen und eine direkt der Fügeaufgabe angepaßte Prozeßführung notwendig. Je höher dabei die Anforderungen an die Nahtqualität gestellt werden, umso kleiner wird das Parameterfenster.

Die Reduktionsgeschwindigkeit der Oberflächenoxide, die Wärmeleitungsbedingungen im Grundwerkstoff und im Lot, aber auch das Fließverhalten des Lotes beschränken die erreichbare Vorschubgeschwindigkeit. Der dadurch verursachte geringe prozeßtechnische Wirkungsgrad der eingebrachten Laserenergie macht hohe Laserleistungen notwendig und ist somit unter anderem für einen hohen thermischen Verzug verantwortlich.

In den folgenden Abschnitten werden zum einen Maßnahmen untersucht, die die Toleranz der Prozeßführung um den optimalen Arbeitspunkt hinsichtlich der Erzielung hoher Füllgrade im Spalt vergrößern sollen. Zum anderen sollen Maßnahmen zur Steigerung der Prozesseffizienz hinsichtlich hoher Vorschubgeschwindigkeiten und geringer Verzugswerte überprüft werden.

Diese Maßnahmen beziehen sich auf das Laserstrahlhartlöten mit:

- Nahtwurzelschutz
- vorgeheiztem Lot
- Pulverlot

8.1 Hartlöten mit Nahtwurzelschutz

Der Nahtwurzelschutz dient beim Schweißen im wesentlichen der Vermeidung von Reaktionen des Schweißgutes mit der umgebenden Atmosphäre (Nitrieren, Oxidieren) (z.B. [51]). Bei konventionellen Lötverfahren wird der Wurzelschutz bei optischen Güteanforderungen zur Vermeidung von Oxidschichten zusätzlich zum Flußmittel eingesetzt [130].

In Analogie zum Lichtbogenschweißen mit Badsicherung [138] wurden bei den Untersuchungen auch Bleche für den Wurzelschutz beim Laserstrahlhartlöten eingesetzt. Im Gegensatz zum Schweißen hat die Badsicherung allerdings beim Hartlöten nicht die Aufgabe, das Durchsacken der Naht zu verhindern, sondern dient dem Erhalt der Schutzgasatmosphäre im Wurzelbereich. Nichtrostender temperaturbeständiger Edelstahl (hier: X5CrNi18 9, $s=2,0$ mm) eignet sich besonders gut für die Badsicherung, da er einerseits von dem verwendeten Kupferbasislot nicht benetzt wird und andererseits die Wärmeableitung über die Badsicherung geringer ist als z.B. bei einem Aluminiumblech.

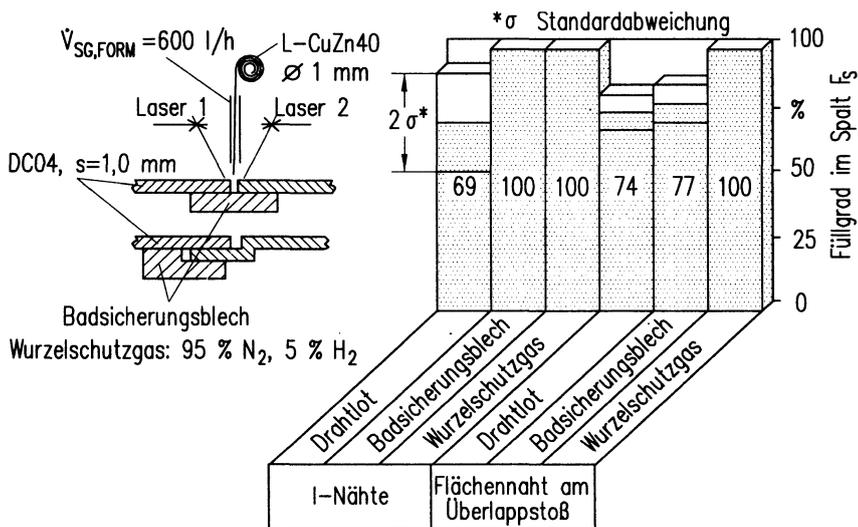


Bild 8.1: Füllgrad im Spalt beim Laserstrahlhartlöten mit und ohne Nahtwurzelschutz (I-Naht: Laserleistung: $P_{L1}=310$ W, $P_{L2}=310$ W; Vorschubgeschwindigkeit: $v_s=0,18$ m/min; Drahtfördergeschwindigkeit: $v_d=4$ mm/s; Spaltbreite: $b_s=0,3$ mm; Flächennaht am Überlapstoß: Laserleistung: $P_{L1}=610$ W, $P_{L2}=305$ W; Vorschubgeschwindigkeit: $v_s=0,18$ m/min; Lotfördergeschwindigkeit: $v_d=4,5$ mm/s; Überlappbreite: $b_u=10$ mm)

Bei den durchgeführten Versuchsreihen liegen die typischen Füllgrade beim Laserstrahlhartlöten ohne Wurzelschutzmaßnahmen bei ca. 69 % (I-Naht) und ca. 74 % (Flächennaht), **Bild 8.1**. Durch die Verwendung eines reduzierenden Wurzelschutzgases (Formiergas) mit 95 % N_2 und 5 % H_2 (vgl. dazu Abschnitt 6.1) werden sowohl für I-Nähte als auch für Flächennähte am Überlapstoß stets 100%ige Füllgrade im

Spalt erreicht, **Bild 8.1**. Offensichtlich kann die einseitige, koaxial zum Lotdraht erfolgende Schutzgaszuführung die Reduktion der Oberflächenoxide im Nahtwurzelbereich des Spaltes nicht sicherstellen. Strömt das Schutzgas zusätzlich wurzelseitig in den Lötspalt wird der atmosphärische Sauerstoff verdrängt und die Benetzungsfähigkeit der Blechoberfläche in diesem Bereich erzielt.

Bei der Verwendung eines Badsicherungsbleches zum Wurzelschutz ist eine Verbesserung hinsichtlich des Füllgrades im Spalt nur bei I-Nähten feststellbar. Hier gewährleistet die gute Zugänglichkeit des Spaltes ($b_s=0,1$ mm bis 0,5 mm) und die geringe Spalthöhe ($s=0,88$ mm und 1,0 mm) den Aufbau einer Schutzgasatmosphäre in der Nahtwurzel. Der so erzielte Füllgrad beträgt 100 %, **Bild 8.1**.

Im Gegensatz zu I-Nähten kann bei Flächennähten am Überlappstoß das Schutzgas bei einseitiger Zuführung nicht bis in den Nahtwurzelbereich vordringen. Die Ursache ist die geringe Spaltbreite ($b_s<0,05$ mm) in Verbindung mit einem verhältnismäßig langen Strömungsweg im Spalt bis in die Nahtwurzel (Überlappbreite 10 mm). Der Füllgrad im Spalt liegt dadurch sowohl mit als auch ohne Badsicherung im Mittel nicht über 80 %. Die Versuche mit Wurzelschutzgas bestätigen die obige Annahme.

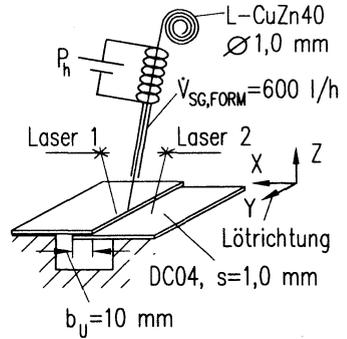
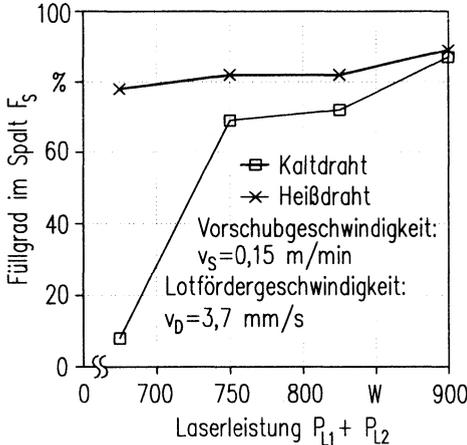
8.2 Hartlöten mit vorgeheiztem Lotdraht

In Anlehnung an Erkenntnisse aus dem Auftragsschweißen mit Heißdraht [98, 139], wird auch für das Hartlöten mit dem Laser bei Einsatz einer Heißdrahtzuführung eine höhere Prozeßeffizienz bezüglich der Bearbeitungsgeschwindigkeit und der thermischen Belastung des Werkstücks erwartet.

In **Bild 8.2** und **Bild 8.3** sind die Ergebnisse zwischen Hartlöten am Überlappstoß mit vorgeheiztem und kaltem Lotdraht gegenübergestellt. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, wurden die Kaltdraht-Versuche mit der selben Zuführung bei abgeschalteten Heizelementen durchgeführt (vgl. dazu Abschnitt 4.6.2). Verwendet wurde das Hartlot L-CuZn40. Die eingestellte elektrische Heizleistung von $P_h=129$ W beim Löten mit Heißdraht entsprach einer maximalen Lottemperatur von 830 °C nach Verlassen der Zuführungsdüse.

Den Einfluß des vorgeheizten Lotdrahtes bei Variation der Laserleistung von $P_{L1}+P_{L2}=675$ W bis 900 W auf den Füllgrad im Spalt verdeutlichen die Meßwerte in **Bild 8.2, oben**. Die Verwendung eines vorgeheizten Lotdrahtes zeigt im Gegensatz zum Löten mit Kaltdraht eine große Unempfindlichkeit hinsichtlich der Veränderung

der Laserleistung. Die erreichten Füllgrade liegen über dem gesamten Leistungsbereich oberhalb von 80 % und damit im allgemeinen deutlich höher als beim Löten mit kaltem Lotdraht. Nur für die Maximalleistung von $P_{L1}+P_{L2}=900$ W ist mit dem Kaltdraht ein zum Heißdraht adäquater Füllgrad im Spalt erreicht worden.



Spaltbreite: $b_s < 0,05$ mm

elektr. Heizleistung: $P_h = 129$ W

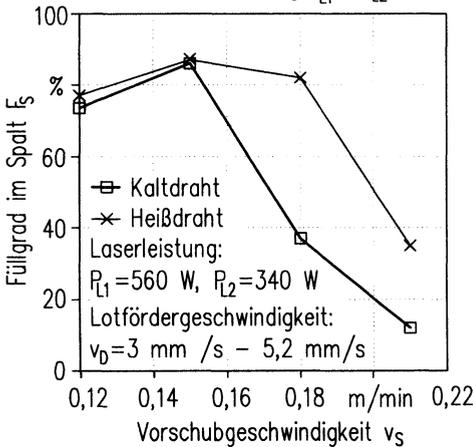


Bild 8.2: Einfluß von Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit auf den Füllgrad im Spalt beim Vergleich zwischen Hartlöten mit kaltem und mit vorgeheiztem Lotdraht

Inwieweit das Laserstrahlhartlöten mit Heißdraht eine Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit ermöglicht, zeigen die Ergebnisse in **Bild 8.2, unten**. Die Veränderung des Füllgrades im Spalt bei Variation der Vorschubgeschwindigkeit von $v_s=0,12$ m/min bis $0,21$ m/min zeichnet sich für beide Temperaturzustände des Lotes deutlich ab. Das Optimum von ca. 88 % liegt sowohl für den Kalt- als auch für den Heißdraht bei einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_s=0,15$ m/min. Die Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit führt bei kaltem Lotdraht zu geringen Füllgraden. Demgegenüber zeigt sich das vorgeheizte Lot tolerant gegenüber der Veränderung der Vorschubgeschwindigkeit. Über einen im Vergleich zum Kaltdraht größeren Geschwindigkeitsbereich liegt hier der erreichbare Füllgrad um 80 %. Eine wesentliche Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit ist allerdings nicht erzielbar.

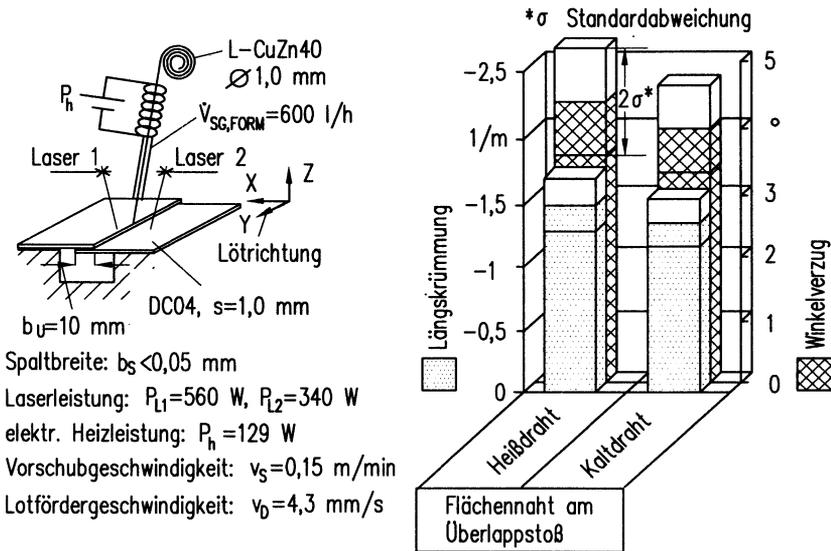


Bild 8.3: Vergleich zwischen kaltem und vorgeheiztem Lotdraht hinsichtlich des thermischen Verzugs

Da die Nahtdimension erheblichen Einfluß auf den Verzug hat (vgl. Abschnitt 7.4), werden die Werkstücke mit den höchsten Füllgraden im Spalt hinsichtlich Winkelverzug und Längskrümmung verglichen. Die Ergebnisse zeigen geringfügig höhere Verzugswerte für die Lötungen mit Heißdraht. Die Ursache ist die zusätzliche Wärmeeinbringung in die Werkstücke, **Bild 8.3**. Die relativ hohen Verzugswerte der

Blechproben begründen sich in der frühzeitigen Entnahme aus der Aufspannung (innerhalb von 5 s nach dem Lötvorgang).

8.3 Hartlötten mit Pulverlot

Vom Auftragsschweißen mittels Laserstrahl ist bekannt, daß bei der Verwendung von pulverförmigem Zusatzwerkstoff weniger Schmelzenergie benötigt wird als bei einem drahtförmigen Zusatzwerkstoff [140]. In Analogie zum Auftragsschweißen wurden deshalb Untersuchungen zum Laserstrahlhartlöten mit pulverförmigem Lot durchgeführt. Ziel war der Nachweis, daß auch beim Laserstrahlhartlöten mit Pulverlot die notwendige Lötenergie reduziert und damit der thermische Verzug minimiert werden kann. Dementsprechend sollten bei Vernachlässigung des Verzugs bei hohen Lötenergien höhere Vorschubgeschwindigkeiten erreichbar sein.

Die Anordnung der Laserstrahlwirkflächen ist für die Untersuchungen mit Pulverlot sowohl für I-Nähte als auch für Flächennähte am Überlapstoß analog dem Aufbau zum Laserstrahlhartlöten mit drahtförmigem Lot (vgl. Abschnitt 6.2). Das Lotpulver wurde stechend mit einem Zuführwinkel von 45° und einem Abstand von $\Delta_{D,Y,Z}=10$ mm in die Lötzone eingebracht. Die verwendete Pulverzuführung ist in Abschnitt 4.6.3 beschrieben.

In **Bild 8.4** ist für das Laserstrahlhartlöten mit Pulver- und Drahtlot an Flächennähten am Überlapstoß der Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und Füllgrad im Spalt dargestellt. Das Hartlöten mit Pulverlot erlaubt für hohe Füllgrade im Spalt ($F_S > 80\%$) Vorschubgeschwindigkeiten, die bis zu 40 % über der Maximalgeschwindigkeit mit Drahtlot liegen. Für einen prozeßsicheren Lötvorgang mit Lotdraht ist diese Maximalgeschwindigkeit bei $v_{S,MAX}=0,21$ m/min erreicht (vgl. Abschnitt 6.3), hingegen mit dem Pulverlot erst bei $v_{S,MAX}=0,36$ m/min.

Die höchsten Vorschubgeschwindigkeiten werden bei Verwendung des Pulverlotes mit $v_{S,MAX}=0,6$ m/min an I-Nähten erreicht. Mit dem Drahtlot liegt die Maximalgeschwindigkeit nur bei $v_{S,MAX}=0,48$ m/min. Allerdings kann beim Pulverlöten an I-Nähten ein Füllgrad im Spalt nur bei Verwendung eines Badsicherungsbleches sichergestellt werden. Ohne eine derartige Wurzelschutzmaßnahme fällt das Lotpulver durch den Spalt und es kommt zu keiner Lötverbindung der beiden Blechteile. Nachteilig ist außerdem beim Löten mit Pulverlot die eingeschränkte räumliche Bearbeitung. Das Fördern des Lotpulvers entgegen der Gravitation ist nicht möglich und begrenzt deshalb das Löten von Steignähten auf Nahtneigungswinkel von maximal $S=45^\circ$.

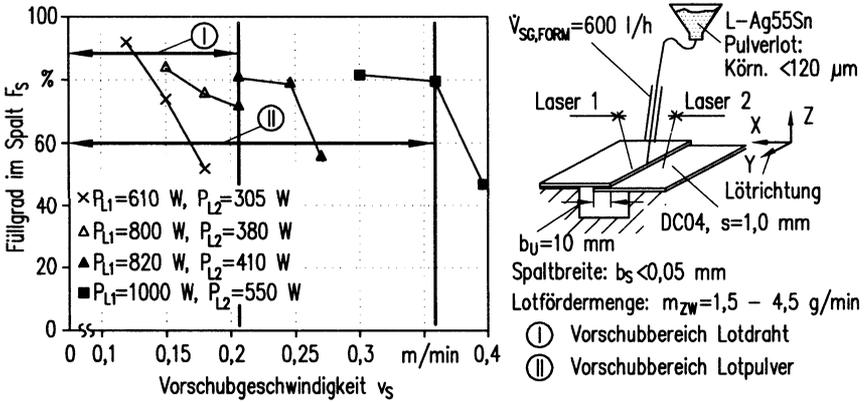


Bild 8.4: Erreichbare Vorschubgeschwindigkeiten beim Löten mit Pulverlot an Flächennähten am Überlappstoß

Ein Vergleich des thermischen Verzugs von Lötungen mit vergleichbaren Füllgraden über $F_s=80\%$ ist in **Bild 8.5** dargestellt. Die Lötproben wurden während der Abkühlphase in der Spannvorrichtung belassen, um die günstigsten Bedingungen für den Abbau des Verzugs zu schaffen (vgl. dazu Abschnitt 7.4).

Mit $0,6^\circ$ liegt der Winkelverzug für pulvergelötete Proben weniger als halb so hoch wie für drahtgelötete Proben mit $1,3^\circ$. Die Längskrümmung ist sogar um den Faktor 3 geringer. Es ist anzunehmen, daß sowohl die höhere Vorschubgeschwindigkeit als auch der geringere Winkelverzug, auf eine bessere Energieumsetzung bei Verwendung des Lotpulvers zurückzuführen sind. Betrachtet man den quasi-stationären Lötbetrieb mit stationären Wärmeleitbedingungen, so befindet sich flüssiges Lot auf der Blechoberfläche in der Lötzone. Diesem Lotbad wird kontinuierlich Lotdraht bzw. Lotpulver zugeführt. Eine Wärmeableitung zur Zuführungsdüse, wie sie über den Lotdraht erfolgen kann, ist beim Pulverlot nicht gegeben. Zusätzlich ermöglicht die Kontaktfläche zwischen kaltem Lot und Lotbad beim Löten mit Pulverlot einen besseren Wärmeübergang. Sie ist über die Summe der einzelnen vom Lotbad umgebenen Lotpulverpartikel wesentlich größer als die Kontaktfläche des Lotdrahtes.

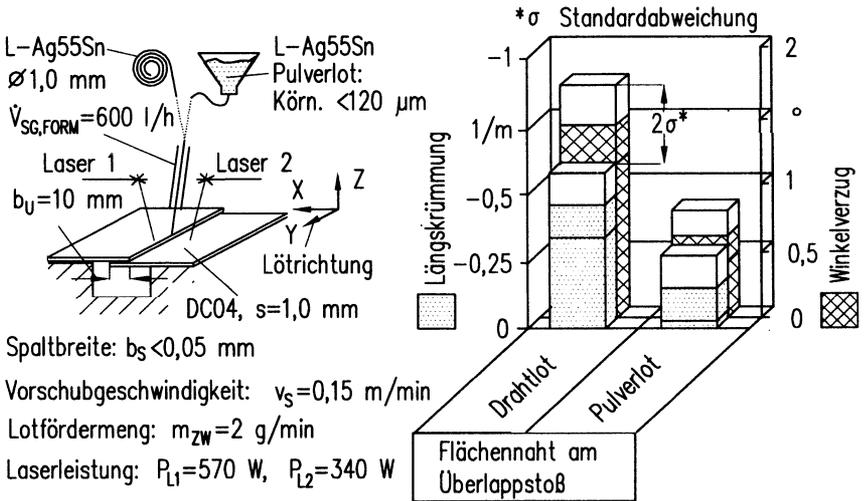


Bild 8.5: Thermischer Verzug an Flächennahten am Überlapstoß im Vergleich zwischen Pulver- und Drahtlot

9 Zusammenfassung

Es wurde ein Laserstrahlhartlötssystem mit Zweistrahltechnik für die Bearbeitung von ebenen und räumlichen Blechteilen aufgebaut. Das System besteht aus zwei handelsüblichen kontinuierlich angeregten Nd:YAG-Lasern als Strahlquellen, einem Handhabungssystem in Form eines 6-Achsen-Gelenkarmroboters sowie einer Lot- und Schutzgaszuführung. Eigenentwicklungen wie z.B. der Bearbeitungskopf und die Prozeßregelung ergänzen den Aufbau.

Nach der Auswahl des Schutzgases für einen flußmittelfreien Laserstrahlhartlötprozeß an unlegiertem Baustahl in Verbindung mit konventionellen Kupfer- und Silberbasisloten, wurden die Ergebnisse zur Prozeßführung bei ebener und räumlicher Nahtorientierung diskutiert. Die Schwerpunkte der Untersuchungen lagen bei der Justierung der Laserstrahlen sowie der Lot- und Schutzgaszuführung, aber auch beim Einsatz der on-line Prozeßregelung. Die Eigenschaften der erzielten Lötverbindungen und Maßnahmen zur Steigerung der Nahtqualität und Prozeßeffizienz wurden umfassend untersucht.

Die Verwendung von zwei Laserstrahlquellen, die unabhängig voneinander in ihrer Ausgangsleistung geregelt werden können, erlaubt eine gezielte und für beide Stoßpartner separate Energieeinbringung. Dadurch lassen sich Temperaturprofile für verschiedene Stoßformen über die Fokusslage, die Einstrahlwinkel und die Anordnung der Laserstrahlwirkflächen zum Spalt optimal einstellen. Die Erwärmung der Fügepartner ist zeitlich abgestimmt auf das Fließverhalten des Lotes. Die Veränderung des Lasereinstrahlwinkels in Vorschubrichtung erlaubt ein prozeßsicheres Aufschmelzen des stechend zugeführten Lotdrahtes. Zusätzlich können so schädliche Rückkopplungen durch Reflexion der Laserstrahlung in die optischen Elemente des Laserlötsystems vermieden werden.

Mit einer on-line Prozeßregelung, basierend auf der Erfassung der Blechoberflächentemperatur mittels Einfarbenpyrometer, werden thermische Schädigungen, wie sie insbesondere bei der Umorientierung der Roboterachsen in stark konturierten Blechbereichen auftreten, vermieden. Auf den Regelvorgang einwirkende Störeinflüsse sind dabei im wesentlichen die beim Umorientieren der Roboterachsen sich verändernde Position der Pyrometermeßpunkte in den Laserstrahlwirkflächen, aber auch die Lotausbreitung in die Meßpunkte der auf den Emissionsfaktor von Stahl kalibrierten Pyrometer. Durch eine entsprechende Justierung der Meßpunkte in den Wirkflächen, die Verwendung verschiedener Regler und die Anpassung der Regeldynamik über die Verstärkungsfaktoren und Nachstellzeiten der Regler lassen sich diese Störeinflüsse

an 90°-Winkelblechen mit Biegeradien $r > 5$ mm kompensieren. Kleinere Konturradien erfordern eine Zerlegung der Bearbeitung in zwei Teillötprozesse für Steig- und Fallnaht.

Durch die Verwendung eines reduzierenden Schutzgasgemisches, bestehend aus 95 % Stickstoff und 5 % Wasserstoff, kann auf ein Flußmittel verzichtet werden. Sowohl an Stumpfstoß- als auch an Überlappverbindungen sind damit gute Benetzungen und hohe Füllgrade im Spalt erzielbar. Ohne Wurzelschutzmaßnahmen werden bei Lötungen in der Wannelage an I-Nähten Füllgrade von ca. $F_s = 70$ % bei maximalen Vorschubgeschwindigkeiten von $v_s = 0,48$ m/min (L-Ag55Sn) bzw. $v_s = 0,36$ m/min (L-CuZn40) erreicht. An Flächennähten am Überlappstoß liegen die Füllgrade zwischen $F_s = 80$ % bis 95 % und können für beide Lote bis zu einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_s = 0,21$ m/min sichergestellt werden.

Wesentlichen Einfluß auf den Füllgrad haben die Spaltbreite und die räumliche Orientierung der Naht. Höchste Füllgrade werden nur bei kleinen Spaltbreiten $b_s < 0,1$ mm erreicht. Nahtorientierungen, die das Fließen des Lotes in den Spalt durch die Gravitation unterstützen, gestatten auch bei Spaltbreiten von $b_s = 0,5$ mm Füllgrade von über 80 %. Wirkt die Schwerkraft der Spaltfüllung durch das Lot entgegen, sinkt der Füllgrad mit der Spaltbreite auf $F_s = 25$ % bis 30 %. Ein günstiger Einfluß auf den Füllgrad im Spalt ist bei galvanischer Zinkbeschichtung des Grundwerkstoffes im Spalt nachweisbar. Diese verursacht sogar bei Überlappbreiten von $b_v = 10$ mm ein Fließen des Lotes aus der Nahtwurzel heraus. Durch die Zinkbeschichtung in Verbindung mit der großen Überlappbreite tritt allerdings verstärkt eine Porenbildung in der Lötnaht auf. Geringe Laserleistung vermindern die Entstehung der Poren im Spalt und geringe Vorschubgeschwindigkeiten erlauben ein Ausgasen aus der Lotschmelze. Die Porenbildung kann jedoch durch diese Maßnahmen nicht vollständig vermieden werden.

Mikroporen in der Lotraupe treten nur beim Kupferbasislot aufgrund seiner Überhitzungsneigung in Verbindung mit geringen Vorschubgeschwindigkeiten und hohen Laserleistungen auf. Sie finden sich an der Oberfläche der Lotraupe, überwiegend am Nahtanfang und -ende. Da sie nur ein geringes Volumen besitzen, lassen sie sich durch Abschleifen der Lotraupe einfach entfernen.

Ein thermischer Prozeß wie das Laserstrahlhartlöten verursacht an dem unlegierten Baustahl DC04/+ZE typischerweise ein feinkörniges Gefüge im Bereich der Wärmeinflußzone. Für beide Lotarten und die untersuchten Stoßformen liegen die Härte- werte in der Lötnaht und in den angrenzenden Werkstoffregionen im Mittel bei ca.

130 HV_{0,2} bis 140 HV_{0,2}. In Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit werden bei sehr hohen Geschwindigkeiten beim Laserstrahlhartlöten von I-Nähten mit dem Silberbasislot in Pulverform Spitzenwerte von bis zu 175 HV_{0,2} erreicht.

Eine Diffusionszone zwischen Lot- und Grundwerkstoff ist nicht vorhanden bzw. liegt unterhalb der Nachweisgrenze von 1-2 µm. Trotzdem sind an I-Nähten bei Füllgraden von 100 % Festigkeiten oberhalb der Festigkeit des Grundwerkstoffes zu erzielen. Dies gilt sowohl für Lötungen mit dem Silber- als auch mit dem Kupferbasislot. Beim Versagen in der Lötnaht werden mit dem Lot L-CuZn40 Festigkeiten von 95 % und mit dem Lot L-Ag55Sn von 80 % der Grundwerkstofffestigkeit erzielt. Die Versagenshäufigkeit hinsichtlich eines Bruches in der Lötnaht sinkt mit abnehmender Vorschubgeschwindigkeit. Unterhalb von $v_s=0,18$ m/min versagten die Proben stets im Grundwerkstoff. Die Versagenshäufigkeit ist dabei mit dem Kupferbasislot erheblich geringer. Die Belastbarkeit von Flächennähten ist im wesentlichen vom Füllgrad bzw. von der Überlappbreite abhängig. Bis zur theoretisch ermittelten Mindestüberlappbreite von 1 mm tritt bei beiden Lotwerkstoffen und geeigneter Wahl der Bearbeitungsparameter kein Versagen in der Lötnaht auf.

Der Verzug an hartgelöteten Blechteilen hängt wesentlich von der Wahl des Lotes ab. Niedrigschmelzende Silberbasislote besitzen die Eigenschaft, Eigenspannungen während der Abkühlphase in einem größeren Umfang abzubauen als höher schmelzende Kupferbasislote. Dadurch stellt sich nach der Bearbeitung ein geringerer Verzug ein. Lötungen mit dem Hartlot L-Ag55Sn ergaben einen Winkelverzug, der 30 % bis 45 % unter dem mit dem Hartlot L-CuZn40 verursachten lag. Gleichzeitig ist mit einem steigenden Nahtquerschnitt, z.B. durch höhere Füllgrade bei Flächennähten am Überlappstoß, eine proportionale Zunahme des Verzugs feststellbar. Flächennähte am Überlappstoß weisen einen um bis zu 30 % geringeren Verzug auf als I-Nähte mit einem wesentlich kleineren Nahtquerschnitt. Dies ist auf die hohe Formstabilität der Nahtgeometrie zurückzuführen. Ein Vergleich mit anderen stoffschlüssigen Fügeverfahren zeigte an den gelöteten Kofferraumdeckeln eine mittlere Konturabweichung von 4,3 mm für das Laserstrahlhartlöten, gegenüber 6,2 mm beim Handflammlöten und nur 2,2 mm beim Laserstrahlschweißen.

Der Einsatz eines reduzierenden Schutzgases für den Nahtwurzelbereich erlaubt an I- und an Flächennähten 100 %ige Füllgrade im Spalt bei höchster Prozeßsicherheit. Das Laserstrahlhartlöten mit vorgeheiztem Lotdraht auf Temperaturen knapp unterhalb der Erweichungstemperatur des Lotes macht den Prozeß hinsichtlich der erreichbaren Füllgrade über einen weiten Bereich unempfindlich für Änderungen der Laserleistung. Die Vorschubgeschwindigkeit läßt sich über die Zuführung eines

Heißdrahtes um ca. 20 % erhöhen. Allerdings steigt durch die zusätzliche Energieeinbringung geringfügig der thermische Verzug um rund 5 %.

Ein Pulverlot (L-Ag55Sn) erlaubt um ca. 20 % (I-Nähte) bzw. 40 % (Flächennähte) höhere Vorschubgeschwindigkeiten im Vergleich zum Drahtlot gleicher Zusammensetzung. Durch die effektivere Energieausnutzung beim Lötten mit dem Pulverlot stellt sich dabei ein um 50 % bis 70 % geringerer thermischer Verzug ein. Nachteilig ist beim Lötten mit Pulverlot die eingeschränkte räumliche Bearbeitung, ein Lotverlust von etwa 10 % während des Lötprozesses und die Notwendigkeit eines Badsicherungsbleches für das Lötten von I-Nähten.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit resultiert, daß das flußmittelfreie Laserstrahlhartlöten mit der Zweistrahltechnik das Potential eines neuartigen Verfahrens für das Hartlöten von Blechformteilen bietet. Hohe Nahtqualitäten erfordern gegenwärtig noch die Einhaltung geringer Stoßtoleranzen und die Verwendung einer formschlüssigen Spanntechnik. Lösungsansätze für eine fehlertolerante Prozeßführung ist der Einsatz eines optischen Sensors für die Erfassung der Spalttoleranzen oder die Verwendung einer flexiblen Spanntechnik, wie das Spannen über Andruckrollen.

10 Literatur

- [1] Norm DIN 18730 1991: Laser und Laseranlagen; Grundbegriffe der Lasertechnik. Berlin: Beuth
- [2] Norm DIN EN ISO 11145 1994: Optik und Optische Instrumente, Laser und Laseranlagen: Begriffe und Formelzeichen. Berlin: Beuth
- [3] Mann, K.; Schäfer, P.; Schmid, J.: Der Laser für alle Fälle. Laser-Praxis 9 (1992), S. 96-98
- [4] Hügel, H.: Strahlwerkzeug Laser. Stuttgart: Teubner Verlag, 1992
- [5] Geiger, M.; Vollertsen, F.: The Mechanisms of Laser Forming. Annals of the CIRP Vol. 42/1/1993. Bern: Hallwag Ltd., 1993, S. 301-304
- [6] Pfeifer, T; Eversheim, W.; König, W.; Weck, M.: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik. AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1993
- [7] Simonsson, S.: Hohe Leistungen machen den Festkörperlaser für angestandene CO₂-Märkte interessant. Euro Laser 1 (1994), S. 14-15
- [8] Mann, K.: Raus aus dem Schattendasein. Euro Laser 1 (1994), S. 21-23
- [9] Solarz, R.W.: Status Report on High-Power Diode-Pumped Solid State Laser Development at Lawrence Livermore National Laboratory. Vortrag im Rahmen des "International Symposium on High-Power Gas and Solid State Lasers V", Technische Universität Wien, 25.04.-28.04.1994
- [10] Gropp, A.; Geiger, M.: Laserstrahlschneiden in der industriellen Praxis. Ergebnisse einer Umfrage bei Laserherstellern und -anwendern. Bleche Rohre Profile 40 (1993) Nr. 11, S. 845-848
- [11] Mayer, A.: Lasermaterialbearbeitung: Querschnittstechnologie mit vielfältigen Anwendungen. Euro Laser 1 (1994), S. 38-39
- [12] Buchholz, J.: Welche Materialbearbeitung - welcher Laser? Laser Magazin 4 (1985), S. 34

- [13] Witherell, C.E.; Ramos, T.J.: Laser Brazing. *Welding Journal*, Vol. 59 (10) 1980, S. 267-277
- [14] Frings, A.; Prange, W.: Bearbeitung von Stahl-Feinblechen mit dem Laserstrahl. *Thyssen Technische Berichte 2* (1989), S. 181-190
- [15] N.N.: *Brazing Handbook 4th ed.*, Miami, Fla: American Welding Society, 1991
- [16] Horneff, P.; Treusch, H.-G.; Beyer, E.; Herziger, G.: Temperaturgeregeltes Lasermikrolöten. *DVS-Berichte Nr. 129*, Düsseldorf: DVS-Verlag, 1990, S. 62-65
- [17] Burns, F.P. et.al.: Precision Soldering with Lasers. *Proc. of the techn. Programm Vol .1 "International electronics packaging and production conference"*. Los Angeles, 1981, S. 380-383
- [18] Iffländer, R.: *Festkörperlaser zur Materialbearbeitung*. Berlin: Springer Verlag, 1990
- [19] Koechner, W.: *Solid State Laser Engineering*. New York: Springer Verlag, 1976
- [20] Bimberg, D. et. al: *Materialbearbeitung mit Lasern: Grundlagen und Anwendungen*. Ehningen: Expert Verlag, 1991
- [21] Wodnicki, R.: Pockels cells. *Laser Magazin*, 1/1991, S. 24-27
- [22] N.N.: Die neu definierte Obergrenze. *Euro Laser 2* (1995), S. 14-15
- [23] N.N.: Berliner Leistungsspitzen. *Euro Laser 3* (1995), S. 10-12
- [24] Jabczynski, J.; Mindak, M.: Focus shift of multimode cw YAG laser beam. *Optical Engineering*, Vol. 31 (3) 1992, S. 447-452
- [25] Tönshoff, H.-K.; Beske, E.U.: Flexible Anwendung von kW-Nd:YAG-Lasern. *Proc. des 2. Int. Anwenderforums Laser-Materialbearbeitung für den Automobilbau, Laser-Forum '90*. Bremen, 1990, S. 30-40
- [26] Göller, E.; Huber, R.; Iffländer, R.; Schäfer, P.; Wallmeroth, K.: 2 kW-CW-Laser, Ergebnisdarstellung zum EUREKA-Projekt. *Laser und Optoelektronik 25* (2) 1993, S. 42-46

-
- [27] N.N.: Fünf Achsen mit Slab. Laser, Juni 1991, Ausg. 3, S. 202
- [28] Hodgson, N.: Hochleistungs-Festkörper-Laser in Slab-, Slab- und Rohr-Geometrie. Laser und Optoelektronik 23 (3) 1991, S. 82
- [29] Ziegs, W.: Konzept eines glasfasergekoppelten, diodengepumpten Festkörper-Lasersystems. Laser und Optoelektronik 20 (3) 1988, S. 61-67
- [30] Greve, R.: Optische Probleme diodengepumpter Festkörperlaser. Laser Magazin 6/1988, S. 35-39
- [31] Lawrenz, J.; Reingruber, J.; Seelert, W.; Wedekind, D.: Neue Anwendungsgebiete für diodengepumpte Festkörperlaser. Laser und Optoelektronik 23 (3) 1991, S. 112-120
- [32] Golla, D.; Knoke, S.; Schöne, W.; Schmidt, H.; Tünnermann, A.: Mit Diodenlasern transversal angeregte Stablasers. Laser und Optoelektronik 26 (3) 1994, S. 76-81
- [33] N.N.: Diodengepumpte Festkörperlaser im LZH - Halbleiterbauelemente ersetzen Gasentladungslampen. LZH Aktuell Ausgabe 7/Okttober 1993
- [34] N.N.: Diodengepumpte YAG-Laser sind kompakter. Laser-Praxis, Mai 1992, S. 46
- [35] Hack, H.; Neuroth, N.: Internal Damage To Optical Glasses With 3 ns Pulse Laser. Proc. of the 12th Annual Symposium on Optical Materials for High Power Lasers, 30.09.-01.10.1980, Boulder, USA, S. 117-121
- [36] Garnich, F.: Laserbearbeitung mit Robotern. Berlin: Springer Verlag, 1992
- [37] Zeidler, G.: Grundlagen der Lichtwellenleitertechnik. Sonderdruck aus "telekom report" (Beiheft), 10. Jg. März 1987, S. 3-8
- [38] Homburg, A.; Meyer, C.: Strahlanalyse eines kW-Festkörperlasers mit Lichtleitfaser. Laser Magazin 4/89, S. 19-25
- [39] Prause, L.; Hering, P.: Lichtwellenleiter für gepulste Laser: Transmissionsverhalten, Dämpfung und Zerstörungsschwellen. Laser und Optoelektronik, 1/1987, S. 25-31

- [40] 2 kW-CW-Laser, Ergebnisdarstellung zu einem EUREKA-Projekt. Laser und Optoelektronik 25 (2) 1993, S. 42-46
- [41] Pfister, R.; Buchholz, J.: Nd:YAG-Laser in Verbindung mit flexiblen Lichtleitfasern: Die Lösung für automatisiertes Schweißen und Schneiden mit Robotern. Opto Elektronik Magazin, Vol. 5 (3) 1989, S. 304-308
- [42] Wehr, H.; Wiechert, D.: Meßtechnische Verfahren zur optischen Charakterisierung von Lichtleitfasern. Opto Elektronik Magazin, Vol. 3 (2) 1987, S. 120-124
- [43] Norm DIN 8505 1979: Löten: Allgemeines, Begriffe. Berlin: Beuth
- [44] Dorn, L.: Fügetechniken im Vergleich. Konstruktionspraxis 21 Jg., Nr. 12 Dezember 1991, S. 34-38
- [45] Norm DIN 8514 Teil 1 1978: Lötbarkeit: Begriffe. Berlin: Beuth
- [46] Martinez, L.: Hart- und Hochtemperaturlöten: eine vielseitige Fügetechnik (III). Der Konstrukteur 7-8 (1992), S. 56-57
- [47] Martinez, L.: Hart- und Hochtemperaturlöten: eine vielseitige Fügetechnik (I). Der Konstrukteur 1-2 (1992), S. 10-12
- [48] Blümel, K.; Frings, A.: Verarbeitung moderner oberflächenveredelter Feinbleche durch Umform- und Schweißverfahren, VDI-Berichte Nr. 614. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1986, S. 129-147
- [49] van't Hoen, H.; Heller, F.: Weich und Hartlöten - Bewährte Verbindungsmethoden von bandverzinktem Feinblech. Düsseldorf: Deutscher Zinkerei Verband e.V., 1993
- [50] Ruge, J.: Handbuch der Schweißtechnik. Band III: Konstruktive Gestaltung der Bauteile. Berlin: Springer Verlag, 1985
- [51] Ruge, J.: Handbuch der Schweißtechnik. Band II: Verfahren und Fertigung. Berlin: Springer Verlag, 1980
- [52] Petrunin, I.E.: Handbuch Löttechnik. Berlin: Verlag Technik GmbH, 1991

-
- [53] Zaremba, P.: Hart- und Hochtemperaturlöten. Die Schweißtechnische Praxis Bd. 20. Düsseldorf: DVS-Verlag, 1988
- [54] Böhme, D.; Hermann, F.-D.: Handbuch der Schweißtechnik. Band 76 Teil II. Düsseldorf: DVS-Verlag, 1992
- [55] Norm DIN 8511 1967: Flußmittel zum Löten metallischer Werkstoffe. Berlin: Beuth
- [56] Wuich, W.: Kleben Löten Schweißen. Konstanz: Leuchtturm-Verlag, 1977
- [57] Wuich, W.: Löten. Würzburg: Vogel-Verlag, 1972
- [58] Richardson, F. D.: Physical Chemistry of Melts in Metallurgy Vol. 2. London: Academic Press, 1974
- [59] Swalin, R. A.: Thermodynamics of Solids. New York: John Wiley & Sons, 1992
- [60] Degussa: Mechanisiertes Hartlöten auf Lötvorrichtungen und Lötmaschinen. Hanau, 1989 (MH 44-4-2-789 H) - Firmenschrift
- [61] Degussa: Lieferprogramm. Hanau, 1989 (MH 102-0-15-989 Be) - Firmenschrift
- [62] Bargel, H.-J.; Schulze, G.: Werkstoffkunde. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1988
- [63] Norm DIN 8513 Teil 1 1979: Hartlote: Kupferbasislote. Berlin: Beuth
- [64] Norm DIN 1733 Teil 1 1963: Schweißzusatzwerkstoffe für Kupfer und Kupferlegierungen, Zusammensetzung, Verwendung und Technische Lieferbedingungen. Berlin: Beuth
- [65] Koller, R. (Hrsg.): Laserschweißgerechtes Konstruieren im Karosseriebau: Handbuch für Konstrukteure. Aachen: Rhein.- Westf. Technische Hochschule Aachen (RWTH), 1992
- [66] Radscheit, C.; Binroth, C.; Sepold, G.: Laserstrahlhartlöten mit kontinuierlichem Festkörperlaser. VDI-Berichte 1080, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994, S. 229-236

- [67] Geiger, M.; Deinzer, G.; Hanebuth, H.: High Precision Laser Beam Welding and Brazing - New Technologies and Components für Quality Assurance. Proc. of the 75th American Welding Society Annual Meeting and 25th International AWS Brazing and Soldering Conference, 10.-15.04.1994, Philadelphia USA
- [68] Vayhinger, K.-U.: Fertigungstechnik des prozeßgesteuerten Laserlötens. Waidelich, W. (Hrsg.): Vorträge zum 10. internationalen Kongress "Laser in der Technik" auf der Laser '91, 1991, S. 419-423
- [69] Hamann, C.: Schweißen und Löten mit dem Laser. Laser-Praxis, Oktober 1990, München: Carl Hanser Verlag, 1990, S. 90-94
- [70] Hanebuth, H.; Hoffmann, P.; Geiger, M.: Laserstrahlhartlöten in der Automobilindustrie. Bleche, Rohre, Profile 41 (1994) 12, S. 825-828
- [71] Kreuzburg, K.: Fügen von Leichtbauteilen aus Aluminium mit Nd:YAG-Lasern. VDI-Berichte Nr. 1080, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994, S. 281-284
- [72] Hanebuth, H.; Hoffmann, P.; Geiger, M.: Laser Beam Brazing Using the Twin Spot Technology. SPIE Vol. 2207: Proc. of the International Symposium on High Power Lasers and Applications V, Wien: SPIE 1994, S. 146-153
- [73] Steffens, H.-D.; Wilden, J.; Berthold, M.: Laser Brazing - Promising Brazing Technology? Proc. der Deutsch-Französischen Tagung "Mechanik und Optik - Hochleistungslaser im Maschinenbau, Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis, vom 25.-27.04.1995, S. 363-374
- [74] Orlick, H.; Gramsch, M.; Hannemann, A.: Schweißen, Schneiden und Hartlöten mittels Hochleistungs-Nd:YAG-Lasern. Proc. der Deutsch-Französischen Tagung "Mechanik und Optik - Hochleistungslaser im Maschinenbau, Deutsch-Französisches Forschungsinstitut Saint-Louis, vom 25.-27.04.1995, S. 299-310
- [75] Geiger, M.; Hanebuth, H.; Hoffmann, P.: Process-Oriented Adaptation of Laser Beam Brazing to Production Techniques. Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktion (WGP) (Hrsg.): Production Engineering - Research and Development in Germany. Annals of the German Academic Society for Production Engineering, WGP Vol. II/2 (1995), S. 41-46

- [76] Abram, L.: BMBF-Forschungsprojekt (Fkz.: 13N6049): Präzisionsfügen mit Festkörperlasern unter fertigungstechnischen Aspekten. 2. Zwischenbericht, Aachen: Thyssen Laser Technik GmbH, 1994
- [77] Tönshoff, H.K.; Beske, E.U.; Schumacher, J.; Kreutzburg, K.: Sheet Metal Joining of Materials with Poor Weldability Using Kw Nd:YAG-Lasers. Proc. of the ICALEO, Orlando (USA), 1993, S. 110-115
- [78] N.N.: Vielversprechende Ergebnisse beim Laserstrahlhartlöten. BIAS bulletin - Lasertechnik aktuell 4/93, S. 1-2
- [79] Hanebuth, H.; Geiger, M.: Automated Brazing of Sheet Metal Parts with Nd:YAG-Laser and 6-axis-Robot. In Proc. of the 5th European Conference on Laser Treatment of Materials ECLAT'94, Bremen: DVS-Berichte Bd. 163, S. 361-367
- [80] Haferkamp, H.; Marquering, M.; Kreutzburg, K.: Laser Beam Brazing Of Car Body Components For The Automotive Industry. Proc. of the Conference on Laser Applications in the Automotive Industry, 26th International Symposium on Automotive Technology and Automation, Aachen, Germany 13th-17th September 1993, S. 81-88
- [81] N.N.: Der Laser sorgt für präzise Schichten. VDI Nachrichten Nr. 46, 19. November 1993, S. 21
- [82] Hanebuth, H.; Geiger, M.: Fügen von niedriglegiertem Baustahl im Dünoblechbereich durch flußmittelfreies Laserstrahlhartlöten. Proc. der Deutsch-Französischen Tagung "Mechanik und Optik - Hochleistungslaser im Maschinenbau" im Deutsch-Französischen Forschungsinstitut Saint-Louis, vom 25.-27. April 1995, S. 187-198
- [83] Hanebuth, H.; Hoffmann, P.; Geiger, M.: Automated laser beam brazing for automobile body construction. Geiger, M.; Vollertsen, F. (Hrsg): Proc. of the LANE'94, Vol. 1, Bamberg: Meisenbach, 1994, S. 213-218
- [84] Sepold, G.; Binroth, C.; Radscheit, C.: Laserstrahlhartlöten - ein neues Füge- und Beschichtungsverfahren. VDI-Fortschrittsberichte Reihe 2: Fertigungstechnik, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995, in Druck

- [85] Reiss, H.: Warum gibt es Benetzung? Physik in unserer Zeit 23. Jg., Nr. 5/1992, S. 204-212
- [86] Geisler, E.: Mathematische Simulation des temperatur-geregelten Laserstrahlhärtens und seine Verifikation an ausgewählten Stählen. Erlangen, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Werkstoffwissenschaften II (Metalle), Diss. 1993
- [87] Burger, D.: Beitrag zur Optimierung des Laserhärtens. Stuttgart, Universität Stuttgart, Diss. 1988
- [88] Wissenbach, K.: Umwandlungshärten mit CO₂-Laserstrahlung. Darmstadt, Universität Darmstadt, Diss. 1985
- [89] Schutzrecht EP 0 267 141 B1 (11.03.92).
- [90] HAAS-Laser: Bedienungsanleitung für cw-Laseraggregat LAY 1000 D. Schramberg, 1990 (Ident. Nr. 14-03-04-00) - Firmenschrift
- [91] Kortöm, G.: Reflectance Spectroscopy. Berlin: Springer Verlag, 1969
- [92] N.N.: Infrared Materials Properties. Laser & Optoelectronics 1989 Buying Guide, S. 302 ff
- [93] Stoll, H.-G.: Strahldiagnostik an einem cw-Nd:YAG-Laser. Erlangen, Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Diplomarbeit 1993
- [94] Hack, R.; Faisst, F.; Meiners, E.; Dausinger, F.; Hügel, H.: Schneiden mit fasergeführtem Nd:YAG-Hochleistungslaser - Festkörperlaser dringt in Bereiche des CO₂-Lasers vor. Laser und Optoelektronik 25 (2) 1993, S. 62-68
- [95] GMFanuc Robotics Europe: Referenzhandbuch für Wartung und Fehlersuche. Erkrath, 1988 (MARMKS17H0882GF) - Firmenschrift
- [96] Groppe, A.: Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser. Reihe Fertigungstechnik Erlangen, Nr. 42. München: Hanser, 1995. Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1994
- [97] Messer Lincoln: Betriebsanleitung. Liederbach, 1982 (Sach.-Nr. 751.061.59 9082) - Firmenschrift

- [98] Steffens, H.-D.; Wielage, B.: Gegenwärtiger Stand und Zukunftsaussichten von Beschichtungsverfahren. *Werkstoff und Innovation 2* (1989) 2, S. 45-50
- [99] Müller, K.: BMFT-Forschungsprojekt (Fkz.: 13N56564): Pulverförmige Zusatzwerkstoffzugabe beim Laserstrahlschweißen. 1. Zwischenbericht, Essen: Krupp Forschungsinstitut, 1989
- [100] Kobold: Umrechnungen, Tabellen, Diagramme. Hofheim/Ts, ca. 1980 (1.6090-80/Pallott.) - Firmenschrift
- [101] Kleiber: Infrarot - Pyrometer zur berührungslosen Temperaturmessung. Meßkopf Typ 270. Erlangen, ca. 1992 - Firmenschrift
- [102] Hörotron: Infravision 500 HT - Produktinformation. Elmshorn ca. 1993 - Firmenschrift
- [103] Norm DIN EN 10130 1993: Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus Stahl. Berlin: Beuth
- [104] Norm DIN EN 10152 1993: Elektrolytisch verzinkte kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus Stahl. Berlin: Beuth
- [105] Deutscher Zinkerei Verband: Elektrolytisch verzinktes Band und Blech. Düsseldorf, 1990 (990.44.1) - Firmenschrift
- [106] Schwethelm, K.J.; Fang, X.F.: Verstärkter Einsatz höherfester Stähle zur Reduzierung des Fahrzeuggewichts. VDI-Bericht Nr. 1134. Düsseldorf: DVS-Verlag, S. 71-88
- [107] Norm DIN ISO 6947 1990: Schweißen Arbeitspositionen: Definitionen der Winkel von Neigung und Drehung. Berlin: Beuth
- [108] Norm DIN 1912 1987: Zeichnerische Darstellung Schweißen, Löten. Berlin: Beuth
- [109] Norm DIN 8515 Teil 1 1979: Fehler an Lötverbindungen aus metallischen Werkstoffen: Hart- und Hochtemperaturlötverbindungen - Einteilung, Benennung, Erklärungen. Berlin: Beuth

- [110] Norm DIN 32515 1991: Bewertungsgruppen für Lötverbindungen: Hart- und hochtemperaturgelötete Bauteile. Berlin: Beuth
- [111] Norm DIN 54111 Teil 1 1984: Zerstörungsfreie Prüfverfahren; Prüfung von Schweißverbindungen metallischer Werkstoffe mit Röntgen- oder Gammastrahlen, Aufnahme von Durchstrahlungsbildern. Berlin: Beuth
- [112] AGFA: Industrielle Radiografie. Morsel (Belgien), 1990 (AL4Z D 199006) - Firmenschrift
- [113] Norm DIN 54152 1979: Eindringverfahren: Durchführung. Berlin: Beuth
- [114] Hunger, H.-J.: Ausgewählte Untersuchungsverfahren in der Metallkunde. Leipzig: VEB Deutscher Verlag, 1978
- [115] Hommelwerke: Hommel Tester T20-DC: Bedienungsanleitung. Schwenningen, ca. 1987 - Firmenschrift
- [116] vom Ende, A.: Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize. Reihe Fertigungstechnik Erlangen, Nr. 19. München: Hanser, 1991. Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1991
- [117] Hoffmann, P.: Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen - Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen. Reihe Fertigungstechnik Erlangen, Nr. 29. München: Hanser, 1992. Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1991
- [118] Leitz: Quindos Basisdokumentation. Wetzlar, 1992 (M41-091-000-111) - Firmenschrift
- [119] Norm DIN 50133 1985: Härteprüfung nach Vickers. Berlin: Beuth
- [120] Norm DIN 50145 1975: Zugversuch. Berlin: Beuth
- [121] Ortner, H. M. (Hrsg.): Gase in Metallen. Oberursel: DGM-Verlag, 1982
- [122] Linde: Formiergas. Höllriegelskreuth, 1993 (07770193-6.3ku) - Firmenschrift
- [123] Schumann, H.: Metallographie. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1990

- [124] Mahler, W.: Metallkunde, physikalische und chemische Gesichtspunkte beim Hartlöten. Löten. Fachbuchreihe Schweißtechnik Bd. 41. Düsseldorf: DVS-Verlag, 1964, S. 13-17
- [125] Domke, R.: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. Düsseldorf: Cornelsen Verlag, 1987
- [136] Kiessler, H.: Kleine Stahlkunde für den Maschinenbau. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1982
- [127] Deutscher Zinkerei Verband: Schweißen. Düsseldorf, 1992 (1292.83.0) - Verbandsschrift
- [128] Deutscher Zinkerei Verband: Umformen und Fügen. Düsseldorf, 1994 (1094.85.0) - Verbandsschrift
- [129] Merkblatt DVS 2513: Instandsetzungsschweißen an Straßenfahrzeugen - verzinkte Feibleche. Düsseldorf: DVS-Verlag, 1992
- [130] Deutscher Zinkerei Verband: Weich- und Hartlöten. Düsseldorf, 1989 (289.46.1) - Verbandsschrift
- [131] Zimmermann, K. F.: Erforderliche Überlapplängen von auf Scherung beanspruchten Hartlötstellen. Schweißen und Schneiden 18. Jg., 9/1966, S. 467-471
- [132] Brandes, E. A.; Brook, G. B.: Smithells Metals Reference Book. Oxford (GB): Butterworth-Heinemann Ltd., 1992
- [133] Degussa: Lötgerechtes Konstruieren Nr. 9. Hanau, 1987 (MH 38-6-2-889 H) - Firmenschrift
- [134] Otto, A.; Geiger, M.: FEM Simulation of the Laser Beam Welding Process. Kaplan, A. F. H.; Schuöcker, D. (Hrsg.): Proceedings on the 11th Meeting on Mathematical Modelling of Material Processing with Lasers (M4PL 11), Marseille (F), LP3-IRPHE-CNRS, 27./28.09.1995, S. 1-12
- [135] Holzer, S.; Arnet, H.; Geiger, M.: Physical and Numerical Modelling of the Buckling Mechanism. Laser Assisted Net shape Engineering, eds. M. Geiger, F. Vollertsen, Bamberg: Meisenbach, 1994, S. 379-386.

-
- [136] Vollertsen, F.; Komel, I.; Kals, R.: The laser bending of steel foils for micro parts by buckling mechanism - a model. Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 3 (1995), S. 107-119
- [137] Degussa: Lötgerechtes Konstruieren Nr. 6. Hanau, 1987 (MH 35-5-3-987 H) - Firmenschrift
- [138] Killing, R.: Handbuch der Schweißverfahren - Lichtbogenschweißen Teil 1. Düsseldorf: DVS-Verlag, 1991
- [139] Burchards, D.: Laserdraht- und Laserheißdrahtbeschichten. HTM 46 (1991) 5, S. 277-283
- [140] Hensel, F.; Binroth, C.; Sepold, G.: A Comparison of Powder- and Wire-Fed Laser Beam Cladding. Proc. of the 4th European Conference on Laser Treatment of Materials ECLAT'92, Göttingen: DGM-Verlag, 1992, S. 39-44
- [141] Wirth, T. (Hrsg.): Repetitorium der Ingenieur-Mathematik. Hannover: Dissertationsdruck E. Böttger, 1983
- [142] Vollertsen, F.; Vogler, S.: Werkstoffeigenschaften und Mikrostruktur. München: Hanser Verlag, 1989
- [143] Schatz, J.: Die metallurgischen Vorgänge zwischen Hartlot und Grundwerkstoff und die Folgerung für lötgerechte Konstruktion. Schweißen und Schneiden, 9. Jg., 12/1957, S. 522-530
- [144] Merkel, T.: Taschenbuch der Werkstoffe. Leipzig: Fachbuchverlag, 1994
- [145] N.N.: Handbook of chemistry and physics. 67th, 1986-1987. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1986

11 Anhang

- Reduktions-Oxidations-Diagramm
- Strahlkennwerte
- Materialkennwerte der Grundwerkstoffe und Lote
- Berechnung der Laserstrahlwirkflächen
- Berechnung der Diffusionszone
- Parameter zum Schweißen und Hartlöten

11.1 Reduktions-Oxidations-Diagramm

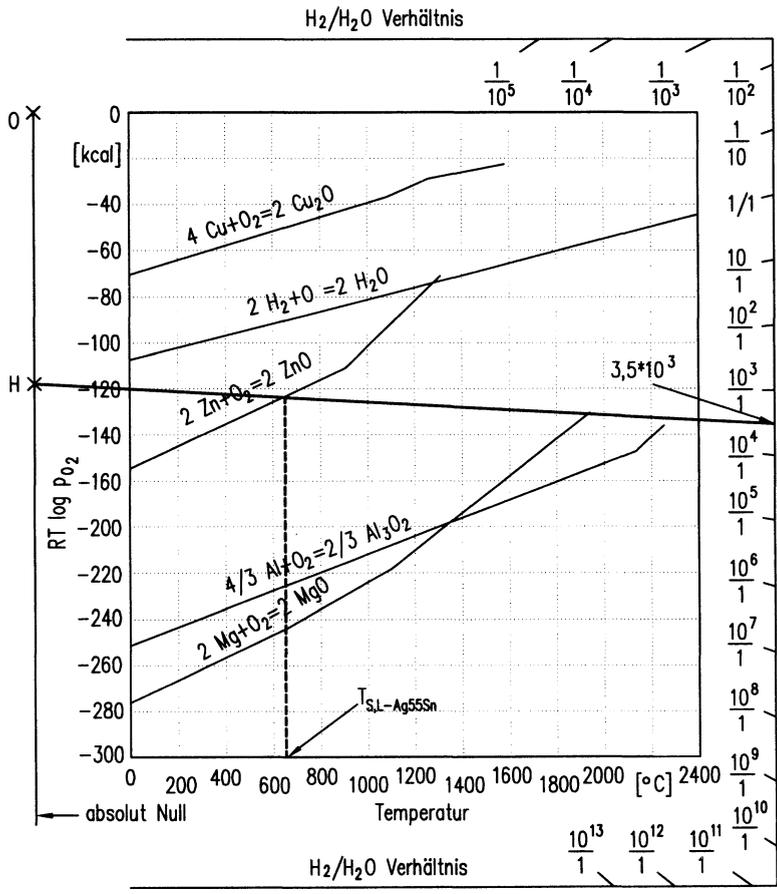


Bild 11.1: Reduktions-Oxidations-Diagramm nach Richardson für verschiedene Werkstoffe in Abhängigkeit der Temperatur (Auszug aus [58])

11.2 Strahlkennwerte

Rohstrahl		Kurzzeichen	Wert
Strahltaillendurchmesser	[mm]	$d_0(86\%)$	10
Divergenz	[mrad]	Θ	10
Polarisation			unpolarisiert
Mode			Multimode
nach Fokussierung			
Fokussdurchmesser	[mm]	d_F	0,58
Fokussierwinkel	[mrad]	Θ_F	113
Rayleighlänge	[mm]	z_R	ca. 4,5
Strahlparameterprodukt	[mm mrad]	$1/4d_0\Theta_F$	32
Strahlkennzahl		K	$1,03 \cdot 10^{-2}$

Tabelle 11.1: Strahlkennwerte der verwendeten Nd:YAG-Laser für den Rohstrahl und für den Strahl am Bearbeitungsort (nach der Fokussierung) [90, 93]

11.3 Materialkennwerte der Grundwerkstoffe und Lote

Werkstoff		Grundwerkstoff DC04/+ZE	Hartlot L-CuZn40	Hartlot L-Ag55Sn
Eigenschaften				
Dichte	[kg/dm ³]	7,9	8,4	9,4
Zugfestigkeit R _m	[N/mm ²]	310	350	330
Dehngrenze R _{p0,2}	[N/mm ²]	198	309	
Bruchdehnung A ₅	[%]	36	35	25
Härte (HB10)	[kg mm ⁻²]	120	110	110
Elastizitätsmodul	[kN/mm ²]	210	102	210
Wärmeleitfähigkeit (20°C)	[W/mK]	59,5	126	
Wärmekapazität (20°C)	[kJ/kgK]	0,42	0,385	
Wärmeausdehnungskoeff.	[10 ⁻⁶ 1/K]	12,6	20,8	

Tabelle 11.2: Mechanisch-technologische sowie thermo-physikalische Kennwerte der verwendeten Grund- und Lotwerkstoffe (Herstellerangaben und Werte aus allgemeingültigen Werkstofftabellen)

11.4 Berechnung der Laserstrahlwirkflächen

Der schräg auf eine Werkstückoberfläche fallende fokussierte Laserstrahl bildet sich entsprechend einem Kegelschnitt als elliptische Fläche ab. Diese kann über die geometrischen Beziehungen des Laserstrahls, wie dem Einstrahlwinkel φ_L und der Fokusslage z_F , angenähert berechnet werden. Der aus **Tabelle 11.1** zu entnehmende Fokussierwinkel Θ_F des Strahls beträgt nach Umrechnung in das Winkelmaß $\Theta_F = 6,5^\circ$.

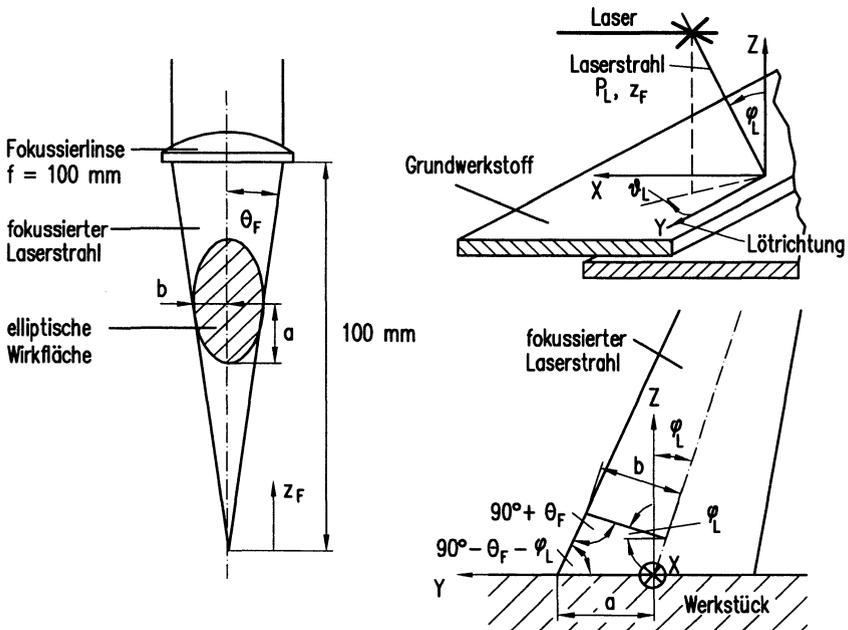


Bild 11.2: Angenäherte Berechnung der Laserstrahlwirkflächen über geometrische Beziehungen

Bild 11.2 zeigt die Berechnung einer Laserstrahlwirkfläche A_w über die geometrischen Beziehungen des Strahls. Die kleine Halbachse b der Ellipse entspricht dem Kreisra-

dus der Wirkfläche in Abhängigkeit der Fokusslage z_F bei orthogonalem Einstrahlwinkel auf der Blechoberfläche und ergibt sich trigonometrisch nach:

$$b(z_F) = \tan \theta_F \cdot z_F = 0,113 \cdot z_F \quad (11.1)$$

Die Halbachse a der Ellipse läßt sich mit den in **Bild 11.2** aufgeführten Winkeln und der Halbachse b berechnen. Mit den Winkeln Θ_F und φ_L sind alle Winkel in dem von a und b aufgespannten Dreieck bekannt. Nach dem Sinussatz für schiefwinkelige Dreiecke gilt [141]:

$$\begin{aligned} \frac{a}{\sin(90^\circ + \theta_F)} &= \frac{b}{\sin(90^\circ - \varphi_L - \theta_F)} \\ \Rightarrow a &= b \frac{\sin(90^\circ + \theta_F)}{\sin(90^\circ - \varphi_L - \theta_F)} \end{aligned} \quad (11.2)$$

Die Wirkfläche A_W des Laserstrahls ermittelt sich nach:

$$A_W = \pi ab = \pi b^2 \frac{\sin(90^\circ + \theta_F)}{\sin(90^\circ - \varphi_L - \theta_F)} \quad (11.3)$$

11.5 Berechnung der Diffusionszone

Diffusion ist ein irreversibler Platzwechselfvorgang von Atomen, Ionen oder Molekülen in festen, flüssigen oder gasförmigen Phasen infolge von Konzentrationsunterschieden bzw. eines Gradienten des elektrochemischen Potentials [142]. Aufgrund des Konzentrationsausgleichs erreichen die Atome einen günstigeren energetischen Zustand, wodurch sich eine Verstärkung der Haftkraft beim Lötten ergibt. Beim Lötten finden Diffusionsvorgänge in zwei Richtungen statt. Zum einen diffundiert flüssiges Lot in den festen Grundwerkstoff, zum anderen wandern Atome des Grundwerkstoffes in das Lot. Infolge der höheren Atombeweglichkeit von Metallen im Bereich der Schmelztemperatur findet man häufig eine bis zu fünfmal stärker ausgeprägte Diffusionszone auf der Lotseite. Eine besonders diffusionsfördernde Rolle spielen die Korngrenzen in polykristallinen Metallen. Korngrenzen sind die Bereiche mit großer Störstellenkonzentration, insbesondere Leerstellenkonzentration. Die Diffusion eines Diffusionspartners wird bei niedrigen Temperaturen daher längs der Korngrenzen begünstigt [143].

Der Stofftransport bei konstantem Konzentrationsgefälle kann mit dem 1. Fick'schen Gesetz über den Teilchenfluß J berechnet werden [144]:

$$J = \frac{dm}{dt} = -D \cdot \frac{dc}{dx} \quad (11.4)$$

mit m Masse des diffundierten Stoffes [g]
 t Diffusionszeit [s]
 dc/dx Konzentrationsgefälle [g cm⁻²]
 D Diffusionskoeffizient [cm² s⁻¹]

Unter Berücksichtigung der zeitlichen Konzentrationsänderung ergibt sich das 2. Fick'sche Gesetz:

$$\frac{\delta c}{\delta t} = D \cdot \frac{\delta^2 c}{\delta x^2} \quad (11.5)$$

Der Diffusionskoeffizient D ist temperaturabhängig und läßt sich aus der Arrhenius-Gleichung folgender Form berechnen:

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (11.6)$$

mit	D_0	Frequenzfaktor (temperaturabhängige Konstante) [$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$]
	Q	Aktivierungsenergie [J mol^{-1}]
	R	Gaskonstante [$\text{J mol}^{-1} \text{K}^{-1}$]
	T	Temperatur [K]

Die Aktivierungsenergie Q ist erforderlich, damit ein Atom seinen Gitterplatz verlassen kann. Die Diffusionskoeffizienten für unterschiedliche Werkstoffe und Temperaturen sind z.B. in [145] tabelliert.

Der mittlere Diffusionsweg x , den das Lot beim Löten im Grundgefüge zurücklegt, läßt sich aus dem 2. Fick'schen Gesetz ableiten. Nach dem parabolischen Zeitgesetz gilt:

$$x^2 = D \cdot t \quad (11.7)$$

mit	D	Diffusionskoeffizient (für T) [$\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$]
	T	Temperatur [K]
	t	Diffusionszeit [s]

11.6 Parameter zum Schweißen und Hartlöten

Parameter	Laserstrahl-schweißen	Laserstrahl-hartlöten	Handflammlöten
Leistung P_L	1900 W	Prozeßregelung: Leistungsangabe am Regler P_{R1} : 610 W P_{R2} : 305 W Solltemperatursignal: T_{S1} =5,3 V T_{S2} =5,1 V	Acetylen-Sauerstoffflamme
Fokuslage z_f	+2 mm	Laser 1: +50 mm Laser 2: +19 mm	-----
Vorschub v_s	3 m/min	0,12 m/min	manuell
Lotzuführung	-----	L-CuZn40 und $\varnothing = 1,0$ mm $v_D = 5,6$ mm/s	manuell Lotstab mit Flußmittelfüllung L-CuZn40, F-SH 2
Schutzgas Durchflußmenge V_{SG}	100 % Ar 350 l/h	95% N ₂ , 5% H ₂ 600 l/h	-----

Tabelle 11.3: Parameter zum Schweißen und Hartlöten der auf Verzug untersuchten Kofferraumdeckel

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

Projektierung 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 CO₂-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 Fiohr
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
CO₂-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 : Prozeßführung 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 CO₂-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 Laserstrahlchneiden**
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. Kartonierte.

Band 44

Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung

180 Seiten, 101 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 45

Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion

195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartonierte.

Band 46

Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile

126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995. Kartonierte.

Band 47

Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung

144 Seiten, 75 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 48

Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen

156 Seiten, 62 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 49

Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen

144 Seiten, 96 Bilder. 1995. Kartonierte.

Band 50

Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)

196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995. Kartonierte.

Band 51

Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter

190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995. Kartonierte.

Band 52

Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen

200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996. Kartonierte.

Band 53

Robert Hopperditzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie

180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996. Kartonierte.

Band 54

Thomas Rebhahn

Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern – Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen

148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996. Kartonierte.

Band 55

Henning Hanebuth

Laserstrahlhärten mit Zweistrahltechnik

157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996. Kartoniert.

