

# **Herstellung beschichteter Mehrblechverbindungen im Karosseriebau mit Hilfe der Hochleistungslasertechnik**

**Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)**

von Dipl.-Ing. Pavel Sovetchenko  
geb. am 01.05.1976 in Tomsk, Russland

genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau  
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. E. h. H. Herold

Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Matthes

Dr.-Ing. S. Jüttner

Promotionskolloquium am 27.02.2007

## **Kurzfassung**

---

In den letzten Jahren ist eine erhebliche Weiterentwicklung von Laserstrahlquellen hinsichtlich der Strahlleistung und -qualität erfolgt, was zu neuen Anwendungen auf dem Gebiet der Laserstrahltechnik geführt hat. Insbesondere durch die Verfügbarkeit von Nd:YAG-Lasern mit Ausgangsleistungen über 4 kW und von CO<sub>2</sub>-Lasern mit Ausgangsleistungen über 10 kW werden Applikationen ermöglicht, die in der Zukunft eine enorme Steigerung der Wirtschaftlichkeit und Qualität in der schweißtechnischen Verarbeitung erwarten lassen.

Das Ziel der vorliegenden Dissertation bestand darin, das Schweißen von Mehrblechverbindungen aus oberflächenveredelten Dünnsblechen insbesondere verzinkten Blechen, mit der Hochleistungslasertechnik zu realisieren. Grundlegendes Kriterium bildete die Gewährleistung eines stabilen Prozessablaufs bei ausreichender Entfernung der gasförmigen Beschichtungsbestandteile.

Im Rahmen der Arbeit wurden Prozessstrategien zur Herstellung von Mehrblechverbindungen untersucht. Prinzipielle Lösungsmöglichkeiten wurden aufgezeigt und vorgestellt. Von der Einführung dieser Technologien in die Serienfertigung können in erster Linie kleine und mittelständische Unternehmen der Autozulieferindustrie profitieren. Die Forschungsergebnisse sind auch für andere Industriebranchen, wie z.B. dem Maschinen- und Apparatebau, von Interesse. Potentielle industrielle Anwender sind weiterhin alle Betriebe der metallverarbeitenden Industrie, in denen Mehrblechverbindungen an beschichteten Werkstoffen sicher und wirtschaftlich hergestellt werden müssen.

## **Vorwort**

---

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Füge- und Strahltechnik (heute Institut für Werkstoff und Fügetechnik) der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

Natürlich wäre diese Arbeit nicht ohne die Unterstützung einer Vielzahl von Personen zustande gekommen. Mein Dank gilt allen von ihnen, auch wenn ich an dieser Stelle nicht jeden gesondert erwähnen kann.

Zunächst möchte ich meiner Ehefrau besonderen Dank für ihre Geduld und ihr Verständnis aussprechen, da sie direkt unter dem Aufwand für diese Arbeit zu leiden hatte. Ebenso wichtig ist es mir, meinen Eltern zu danken, welche die Voraussetzung für diese Arbeit geschaffen haben.

Dem Institutsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. E. h. H. Herold, danke ich für die gebotene Möglichkeit zur Promotion sowie für das fördernde Interesse an der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. M. Karpenko für die intensive Betreuung sowie für seine stete Bereitschaft zur fachlichen Diskussion, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen hat.

Ferner möchte ich Frau Prof. Martinek, Frau Dr. Zinke und Herrn Dr. Pieschel für Ihre fachliche Unterstützung und gute Zusammenarbeit danken.

Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, die zum Entstehen der Arbeit beigetragen haben, danke ich für Ihre Unterstützung.

Der SLV Halle und ThyssenKrupp AG gilt mein Dank für die materielle und fachliche Hilfe zur Durchführung von experimentellen Untersuchungen.

Einige Ergebnisse dieser Arbeit entstanden im Rahmen eines durch die AiF geförderten Forschungsvorhabens. Für diese Förderung sei ebenfalls gedankt.

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Verzeichnis der Bilder</b> .....	<b>III</b>
<b>Verzeichnis der Tabellen</b> .....	<b>VI</b>
<b>Verzeichnis der Abkürzungen</b> .....	<b>VII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik</b> .....	<b>4</b>
2.1 Stahl als Konstruktionswerkstoff.....	4
2.2 Charakterisierung der Oberflächenveredlungen.....	8
2.2.1 Elektrolytisches Verzinken .....	8
2.2.2 Feuerverzinken .....	9
2.2.3 Zink-Magnesium-Oberflächenveredelung .....	10
2.3 Laserstrahlschweißen .....	12
2.3.1 Laserprinzip und Eigenschaften der erzeugten Strahlung.....	12
2.3.2 Trends in der Anlagentechnik.....	12
2.3.3 Innovative Verfahrensvarianten.....	15
2.3.4 Verfahrensprinzipien .....	21
2.3.5 Laserstrahlschweißen von beschichteten Werkstoffen .....	23
<b>3 Schlussfolgerungen und Erarbeiten der Aufgabestellung</b> .....	<b>32</b>
<b>4 Versuchsbedingungen und Arbeitsprogramm</b> .....	<b>34</b>
4.1.1 Elektrolytisch beschichtete Tiefziehstähle (DIN EN 10130/ 10132).....	34
4.1.2 Schmelztauchverzinkter Tiefziehstahl .....	35
4.1.3 Zum Kaltumformen geeigneter höherfester Stahl.....	35
4.2 Gerätetechnik .....	36
4.2.1 Diodengepumpter Festkörperlaser DY 044 .....	36
4.2.2 Axial schnellgeströmter CO <sub>2</sub> -Lasersystem TLF 12000 turbo .....	37
4.2.3 Diffusionsgekühltes CO <sub>2</sub> -Slab-Lasersystem DC035 .....	38
4.3 Versuchsaufbau zum Schweißen .....	40
4.4 Versuchsprogramm .....	41
<b>5 Grundlagenuntersuchungen</b> .....	<b>44</b>
5.1 Einfluss der Spannvorrichtung .....	44
5.2 Theoretisches Prozessmodell .....	46
<b>6 Versuchsdurchführung</b> .....	<b>50</b>
6.1 Schweißen von Mehrblechverbindungen aus elektrolytisch verzinkten Dünoblechen mit dem Festkörperlaser DY 044 .....	50
6.1.1 Variation der Lage der Zinkschichten im Dreifachüberlappstoß.....	50
6.1.2 Variation des Spaltabstandes im Dreifachüberlappstoß an beidseitig verzinkten Blechen.....	53
6.1.3 Einfluss des Pulsbetriebes auf das Schweißergebnis .....	55
6.1.4 Doppelfokustechnik .....	56
6.1.5 Laserstrahlschweißen unter Einsatz einer rotierender Optik .....	58
6.1.6 Zusammenfassung.....	60
6.2 Schweißen von Mehrblechverbindungen aus ZE-Mg-beschichteten Dünoblechen mit dem Festkörperlaser DY 044 .....	61

6.2.1	Variation der Lage der Zink-Magnesium-Schicht im Dreifachüberlappstoß.....	61
6.2.2	Bildung von Mikrorissen .....	62
6.2.2.1	Metallographische Untersuchungen .....	62
6.2.2.2	Einfluss der Einspannbedingungen auf die Mikrorissbildung .....	64
6.2.2.3	Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Mikrorissbildung.....	65
6.2.2.4	Einfluss des Grundwerkstoffes und der Stoßauslegung auf die Mikrorissbildung .....	66
6.2.2.5	REM-Untersuchungen der Mikrorisse .....	68
6.2.2.6	Bestimmung der Eigenspannungen in den lasergeschweißten Zwei- und Dreifachüberlappstößen.....	71
6.2.3	Einfluss der Schutzgase.....	73
6.2.4	Laserstrahlschweißen unter Einsatz der Doppelfokustechnik .....	75
6.2.5	Laserstrahlschweißen unter Einsatz der rotierenden Optik.....	75
6.2.6	Untersuchungen zur magnetischen Beeinflussung des Schmelzbades beim Laserstrahlschweißen .....	76
6.2.6.1	Versuchsbedingungen .....	77
6.2.6.2	Versuchsdurchführung.....	78
6.2.6.3	Versuchsergebnisse .....	79
6.2.7	Zusammenfassung.....	80
6.3	Schweißen von Mehrblechverbindungen mit einem CO <sub>2</sub> -Laser .....	80
6.3.1	Konventionelles CO <sub>2</sub> -Laserschweißen an verzinkten Blechen.....	80
6.3.2	CO <sub>2</sub> -Laserschweißen an verzinkten Blechen unter Einsatz der Doppelfokustechnik.....	82
6.3.3	CO <sub>2</sub> -Laserschweißen von ZE-Mg beschichteten Blechen.....	82
6.3.4	Schweißen von ZE-beschichteten Mehrblechverbindungen mit dem CO <sub>2</sub> -Slablaser .....	84
6.3.5	EDX-Analysen an der Nahtoberfläche der CO <sub>2</sub> -Laserschweißnähte .....	85
6.3.6	Zusammenfassung.....	89
<b>7</b>	<b>Auswertung der Schweißergebnisse.....</b>	<b>91</b>
7.1	Probenvorbereitung.....	91
7.2	Durchstrahlungsprüfung .....	91
7.3	Statische Zugversuche.....	93
7.4	Schwingfestigkeitsuntersuchungen .....	96
7.5	Korrosionsuntersuchungen an hochleistungsgeschweißten Mehrblechverbindungen .....	98
7.5.1	Probenübersicht.....	98
7.5.2	Salzsprühnebelprüfung nach DIN 50 021 SS.....	99
7.5.3	Klimawechseltest über drei Feucht-Trocken-Zyklen ohne Salznebelbelastung.....	99
7.5.4	Tauchversuch in 5 %-iger NaCl-Lösung.....	100
7.5.5	Einschätzung.....	100
7.6	Zusammenfassung.....	100
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Aussichten .....</b>	<b>102</b>

## Verzeichnis der Bilder

---

Bild 1:	Einsatz des Mehrblechschweißens.....	2
Bild 2:	Gewichtsreduzierung bei gleichzeitiger Steifigkeitserhöhung: .....	6
Bild 3:	Moderne Werkstoffe für den Automobilbau.....	7
Bild 4:	ZE-Mg-Beschichtung: Reduzierung der Überzugsdicke bei hervorragender Korrosionsbeständigkeit .....	11
Bild 5:	Doppelfokus: a) Erzeugung; b) Steigerung der Qualität .....	16
Bild 6:	Vergleich – Einschweißtiefe und Vorschubgeschwindigkeit beim Schweißen mit Einzelfokus, Doppelfokus und Fokusmatrix .....	17
Bild 7:	Schema zu Erzeugung und Nutzung eigenmagnetische Kräfte .....	18
Bild 8:	Anwendungsgrenzen des SHADOW-Verfahrens .....	19
Bild 9:	Prinzip des Scanner-Schweißens .....	20
Bild 10:	Scanner-Schweißen am Roboter .....	20
Bild 11:	Prinzip des Laserstrahlschweißens; a) Wärmeleitungsschweißen; b) Tiefschweißen .....	22
Bild 12:	Schematische Darstellung der Probleme beim Laserstrahlschweißen von beschichteten Mehrblechverbindungen .....	26
Bild 13:	Das moderne Laserschweiß- und Spannsystem: a) Detailansicht; b) Komponenten .....	28
Bild 14:	Makroaufnahmen von Dreiblechverbindungen an Tiefziehstählen :.....	30
Bild 15:	Detailaufnahme einer Oberfläche zwischen zwei Blechen.....	30
Bild 16:	Diodengepumpter Festkörperlaser DY 044 der Fa. Rofin .....	37
Bild 17:	Axial schnellgeströmter CO <sub>2</sub> -Laser TLF12000 turbo der Fa. Trumpf .....	38
Bild 18:	Diffusionsgekühltes CO <sub>2</sub> - Slablaser-System DC035 der Fa. Rofin .....	39
Bild 19:	Schweißstand: a) Nd:YAG-Laserstrahlschweißen; b) CO <sub>2</sub> -Laserstrahlschweißen .....	40
Bild 20:	Klassifizierung der verwendeten Spannvorrichtungen .....	44
Bild 21:	Qualitatives Prozessmodell des Laserstrahlschweißens von Überlappverbindungen aus verzinkten Dünoblechen.....	46
Bild 22:	Badauswürfe durch direkten Transport der Zn-Dämpfe aus dem Blechzwischenraum in das Schmelzbad.....	47
Bild 23:	Schweißergebnisse an den beidseitig verzinkten Blechen, 0-Spalt, geschweißt mit Nd:YAG-Laser, Werkstoff DC04+ZE .....	48
Bild 24:	Längsschliff eines laserstrahlgeschweißten Dreifachüberlappstoßes mit Zinkansammlung vor dem Schweißbad; geschweißt mit technischen 0-Spalt; Werkstoff DC04+ZE.....	49
Bild 25:	Untersuchte Varianten der Lage von Zinkschichten im Dreiblechstoß.....	50
Bild 26:	Ermittlung der Fokuslage. Lasergeschweißte Dreifachüberlappverbindungen am unbeschichteten Werkstoff DC04 .....	51
Bild 27:	Lasergeschweißte Dreifachüberlappverbindungen am Werkstoff DC04 .....	51
Bild 28:	Lasergeschweißte Dreifachüberlappverbindungen, Variante 3.....	52
Bild 29:	Lasergeschweißte Dreifachüberlappverbindungen, Variante 4. Volle Zerstörung des Schweißgutes .....	52
Bild 30:	Untersuchte Variation der Spalten im Dreiblechstoß (DC04+ZE, beidseitig verzinkte Bleche) .....	54

Bild 31:	Lasergeschweißte Dreifachüberlappverbindungen, beidseitig verzinkte Bleche, Spalt 0,2 mm: a) Variante 1; Variante 2; b) Variante 3.....	55
Bild 32:	Einfluss des Pulsbetriebes. Werkstoff DC04+ZE 75/75 (Variante 4 nach Bild 22) .....	57
Bild 33:	Anwendung der Doppelfokustechnik. Werkstoff DC04+ZE 75/75.....	57
Bild 34:	Variable Schweißgeschwindigkeit beim Laser-Schweißen mit rotierender Optik .....	58
Bild 35:	Einsatz der rotierenden Optik an unbeschichteten Blechen, Dreifachüberlappstoß.....	59
Bild 36:	Einsatz der rotierenden Optik an ZE-beschichteten Blechen (Werkstoff: DC04+ZE 75/75); Längs- und Quermakroschliffe sowie Nahtoberflächen a) fest eingespannt b) nur fixiert, geringfügig gespannt .....	59
Bild 37:	Untersuchte Varianten der Lage von ZE-Mg-Schichten im Dreifachüberlappstoß.....	61
Bild 38:	Makroaufnahmen der Oberflächen der Laser-Schweißnähte an den ZE-Mg-beschichteten Blechen von H220Y, Variante 5 .....	62
Bild 39:	Entnahme der Proben für die metallographischen Untersuchungen.....	63
Bild 40:	Mikrorisse im Schweißgut und in der WEZ einer Laser-Schweißnaht an den ZE-Mg-beschichteten Blechen von H220Y, Variante 5 (Mikroaufnahmen: poliert und ungeätzt) .....	64
Bild 41:	Einfluss der Spannbedingungen auf die Mikrorissbildung beim Laserschweißen an den ZE-Mg-beschichteten Blechen von H220Y, Variante 5 aus Bild 30.....	65
Bild 42:	Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Mikrorissbildung beim Laserschweißen an den ZE-Mg-beschichteten Blechen von H220Y, Variante 5 aus Bild 30.....	65
Bild 43:	Vergleichsuntersuchungen an den Werkstoffen H220Y und DC06 (Stoßauslegung, Schweißgeschwindigkeit und Nahtoberflächen) .....	67
Bild 44:	Querschliffe der Schweißverbindungen, Werkstoff: H220Y+ZE-Mg und DC06 ZE-Mg.....	67
Bild 45:	Querschliffe der Schweißverbindungen, Werkstoff: DC04+ZE .....	68
Bild 46:	REM-Übersichtsbild des Querschliffes der Laserschweißnaht .....	69
Bild 47:	REM-Detailbild des Übergangs vom Schweißgut zur Blechoberfläche – Punkt 33r im Bild 46.....	69
Bild 48:	REM-Detailbild des Spalts zwischen zwei Blechen (in Verlängerung zu Bild 47), ca. 10 mm von der Schweißnaht entfernt .....	69
Bild 49:	REM (BSE-Kontrast) Detailbild aus Bild 50: Bereich 29r .....	70
Bild 50:	REM (BSE-Kontrast) Detailbild zu Bild 2.2.4 mit Markierung der EDX-Analysestellen .....	70
Bild 51:	Schematische Darstellung der Flüssigmetallversprödung .....	71
Bild 52:	Anordnung der Schutzgasdüse.....	73
Bild 53:	Metaldampfleuchten an der Schweißstelle.....	74
Bild 54:	Einfluss des Schutzgases, Ar/He (70%/30%) auf die Qualität der Nahtoberflächen. Werkstoff H200Y, ZE-Mg-Beschichtung .....	74
Bild 55:	Anwendung der Doppelfokustechnik. Werkstoff H200Y+ZE-Mg.....	75
Bild 56:	Anwendung der rotierenden Optik. Werkstoff H200Y+ZE-Mg.....	76
Bild 57:	Anwendung der rotierenden Doppelfokusoptik, Werkstoff H200Y+ZE-Mg.....	76
Bild 58:	Versuchsaufbau der magnetischen Beeinflussung des Schweißbades .....	78

Bild 59:	Vorbereitung der Dreifachüberlappstöße zum Schweißen unter Einsatz eines Magneten .....	78
Bild 60:	Schweißungen an unbeschichteten und elektrolytisch verzinkten Dreifachüberlappstößen, hergestellt mit CO <sub>2</sub> -Laser, Werkstoff: DC04. konventionelle Optik: a) Nahtoberfläche; b) Nahtquerschliffe der verzinkten Verbindungen .....	81
Bild 61:	CO <sub>2</sub> -Hochleistungslaserschweißungen an unbeschichteten und elektrolytisch verzinkten Dreifachüberlappstößen DC04. Doppelfokusoptik. Nahtoberfläche .....	82
Bild 62:	CO <sub>2</sub> -Laserschweißung an ZE-Mg 35/35 beschichteten Dreifachüberlappstößen H220Y. Konventionelle Optik. Spannsystem: streifenförmigen Spannbacken mit relativ geringer Spannkraft. Oben: Oberfläche; unten: Würzelseite.....	83
Bild 63:	CO <sub>2</sub> -Hochleistungslaserschweißungen an ZE-Mg 35/35 beschichteten Dreifachüberlappstößen H220Y. Konventionelle Optik. Spannsystem „stabile streifenförmige Spannbacken“:.....	84
Bild 64:	Nahtoberfläche, geschweißt mit CO <sub>2</sub> -Slablaser, Dreifachüberlappstoß, Werkstoff: DC04 unbeschichteten und elektrolytisch verzinkt.....	85
Bild 65:	REM-Übersichtsbild der Laser-Schweißnaht (BSE-Kontrast) .....	86
Bild 66:	REM-Detailbild einer „Schweißperle“ aus Bild 65, rechter Bereich (BSE-Kontrast).....	86
Bild 67:	REM-Übersichtsbild der Schweißnaht (BSE-Kontrast) .....	86
Bild 68:	REM-Detailbild aus Bild 67 (BSE-Kontrast) .....	86
Bild 69:	REM-Detailbild der Beläge einer Kraterwandung mit hellen Metalluntergrund, einer hellgrauen kompakten Schicht im oberen Bereich und einer unteren porösen dunkleren Schicht (BSE-Kontrast).....	87
Bild 70:	REM-Detailbild einer Perle im Kratergrund (BSE-Kontrast) .....	87
Bild 71:	REM-Detailbild mit dunklem Belag (BSE-Kontrast).....	87
Bild 72:	REM-Detailbild einer Perle in einem Krater (SE-Kontrast).....	87
Bild 73:	REM-Detailbild eines Kraters mit schwammartigen Perlen (BSE-Kontrast).....	87
Bild 74:	REM-Detailbild zu Bild 73 (SE-Kontrast).....	87
Bild 75:	REM-Detailbild des Belages aus Bild 73 (SE-Kontrast).....	88
Bild 76:	REM-Detailbild der Oberfläche der Perle aus Bild 74 (SE-Kontrast).....	88
Bild 77:	REM-Aufnahme des teilweise abgeplatzten Belages der Oberfläche einer Kraterwand (SE-Kontrast).....	88
Bild 78:	Ausgewählte Ergebnisse der Durchstrahlprüfungen sowie entsprechende Oberfläche- und Würzelseiten der Schweißverbindungen, geschweißt mit a) Nd:YAG-Laser; b) CO <sub>2</sub> -Laser .....	92
Bild 79:	Material-Prüfmaschine Zwick Z250 .....	93
Bild 80:	Ausgewählte Zugproben und Schema des Zugproben .....	94
Bild 81:	Versagensbilder von I-Nähten am Dreifachüberlappstoß. Grundwerkstoff: DC04+ZE. CO <sub>2</sub> -Hochleistungslaserschweißen.....	94
Bild 82:	Ergebnisse der statischen Zugversuche, geschweißt: a) Nd:YAG-Laser; b) CO <sub>2</sub> -Laser .....	95
Bild 83:	Dauerschwingfestigkeits-prüfmaschine - Roell Amsler Hochfrequenzpulsator 250 HFP 5100.....	96
Bild 84:	Dauerschwingfestigkeitsversuche. Prüfstandaufbau.....	97



## Verzeichnis der Tabellen

---

Tabelle 1: Zum Laserschweißen verwendete Laser.....	12
Tabelle 2: Einfluss der Strahlqualität .....	13
Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung der Tiefziehstähle DC04 und DC06 nach EN10130; EN 10139.....	35
Tabelle 4: Mechanisch-technologische Eigenschaften der Tiefziehstähle DC04 und DC06 .....	35
Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung des Tiefziehstahles DX53D nach EN10142 .....	35
Tabelle 6: Mechanisch-technologische Gütwerte des Tiefziehstahles DX53D nach EN10142.....	35
Tabelle 7: Chemische Zusammensetzung des kaltgewalzten IF-Stahles mit hoher Streckgrenze H220Y nach EN10268 .....	36
Tabelle 8: Mechanisch-technologische Eigenschaften des kaltgewalzten Stahles mit hoher Streckgrenze H220Y LA nach EN10268 .....	36
Tabelle 9: Visuelle Bewertung der Laser-Schweißnähte an den ZE-Mg-beschichteten Blechen von H220Y.....	62
Tabelle 10: EDX-Analysen an ausgewählter Positionen der Laser-Schweißung .....	70
Tabelle 11: Chemische Zusammensetzung ausgewählter Positionen, at % .....	89
Tabelle 12: Beschreibung der Proben für die mechanischen Versuche .....	91
Tabelle 13: Ergebnisse der Dauerschwingfestigkeitsversuche.....	98
Tabelle 14: Verwendete Proben für Korrosionsuntersuchungen .....	99

## Verzeichnis der Abkürzungen

---

Zeichen	Bezeichnung	Dimension
$A_{80}$	Bruchdehnung	%
BSE	back scattered electron	
DOC	Dortmunder OberflächenCentrum	
EDX-Analyse	Energy Dispersive X-ray Analyse (energiedispersive Röntgenspektroskopie)	
IF	Interstitial Free	
IHU	Innen-Hochdruck-Umformen	
OEM	Original Equipment Manufacturers	
NSB	New Steel Body	
$P_D$	Dampfdruck in der Kapillare	Pa
$P_g$	hydrostatischer Druck	Pa
$P_K$	Kapillardruck	Pa
$P_U$	Druck durch die Bewegung der Schmelze	Pa
PVD	Physikal Vapour Deposition	
$P_{Zn}$	Druck der Zn-Dämpfe	Pa
$P_\sigma$	Oberflächenspannung	Pa
REM	Rasterelektronenmikroskop	
$R_m$	Zugfestigkeit	MPa
$R_{p02}$	0,2%-Dehngrenzen	MPa
SCHADOW	Stepless High Accurate and Discrete One Pulse Welding	
TWIP	Twinning Induced Plasticity	
ULSAB	Ultra Light Steel Body	
WEZ	Wärmeeinflußzone	

## 1 Einleitung

---

In den letzten Jahren hat sich das Laserstrahlschweißen für viele technische Anwendungen als Hochleistungsschweißprozess etabliert [1, 2]. Aufgrund seines örtlich stark begrenzten Wärmeeintrags wird ein Fügen bei vergleichsweise geringem Verzug ermöglicht. Aus diesem Grund hat sich das Laserstrahlschweißen zunächst besonders in solchen Bereichen der Wirtschaft bewährt, in denen lange Nähte an zwei relativ dünnen Blechen verzugsarm ausgeführt werden müssen. Um das große Entwicklungspotential der neuen Hochleistungslasergeneration auch in der klein- und mittelständischen Industrie nutzen zu können, sind jedoch neue und weiterführende Untersuchungen auf spezifischen Einsatzgebieten, wie z.B. der Herstellung von Mehrblechverbindungen, dringend notwendig. Dazu zählen u.a. der Schienenfahrzeugbau, die Bauindustrie, die Klimatechnik, die Haushaltsgeräteindustrie sowie der Automobil- und Containerbau.

Verstärkter Bedarf besteht heute an Fügeprozessen für das Verbinden von mehr als zwei, an einer Stelle zusammenlaufenden Blechen. Diese Mehrblechverbindungen ergeben neue konstruktive Möglichkeiten bei geringerem Platzbedarf unter nur einseitigem Zugang, eine Verringerung der Anzahl der Fügevorgänge und -stellen, damit eine Senkung der Bearbeitungszeiten sowie eine Erhöhung der Steifigkeit. Für Mehrblechschweißungen wurden bisher in erster Linie Untersuchungsergebnisse zum Widerstandsschweißen veröffentlicht [3]. Für Strahlverfahren fehlen dagegen noch weitgehend gesicherte Erkenntnisse. Dabei verspricht der vermehrte Einsatz laserstrahlgefügter Mehrblechverbindungen ein erhebliches Potential zur Steigerung der Effektivität und letztlich der Konkurrenzfähigkeit. Die genannten Gründe verdeutlichen die Notwendigkeit weiterführender Untersuchungen zum Hochleistungslaserstrahlschweißen von Mehrblechverbindungen, insbesondere von beschichteten Werkstoffen.

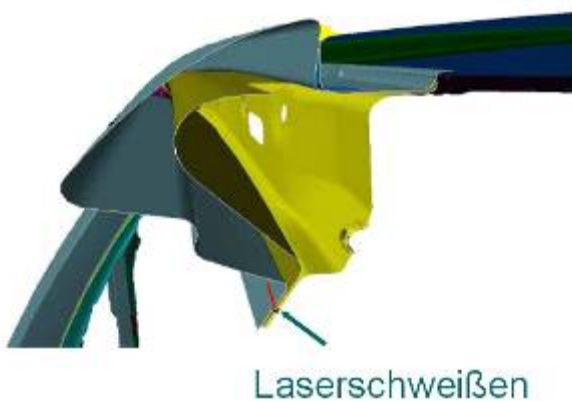
Mit der Verfügbarkeit von Hochleistungslasern wurde deren Weg in den Karosseriebau geebnet. Aus mehreren Blechen unterschiedlicher Dicke und Oberflächenbeschaffenheit zusammengesetzte Konstruktionen gewinnen nicht zuletzt aus Gründen des Leichtbaus in vielen Industriebereichen immer mehr an Bedeutung. Beim Fügen wird häufig eine Schweißnaht gewählt, bei der sich die Bleche überlappen. Aus konstruktiver, fertigungs- und anwendungstechnischer Sicht ist es oft notwendig, drei oder mehr Bleche an einer Verbindungsstelle zusammenlaufen zu lassen. Schweißtechnisch bringen solche Mehrblechverbindungen jedoch einige Probleme mit sich, so dass bei Einsatz der Strahlschweißtechnik derzeit fast ausschließlich nur zwei Bleche miteinander gefügt werden. Eine zweischnittige Verbindung wird also durch zwei einschnittige ersetzt. Dies

bedeutet Mehraufwand und stellt aus der Sicht der Festigkeit nicht die optimale Lösung dar.

Erschwerend kommt hinzu, dass ein erheblicher Anteil der eingesetzten Werkstoffe bereits oberflächenveredelt ist. Diese Schichten, z.B. Zink oder organische Materialien, verdampfen oder zersetzen sich durch die Schweißwärme und gasen im Schweißnahtbereich aus. Bei der Verwendung von beschichteten Blechen treten deshalb begrenzte Qualitätsbeeinträchtigungen auf. Unter anderen behindert diese Oberflächenbeeinflussung derzeit eine größere Verbreitung des Laserschweißens im Karosseriebau.

Diejenigen Unternehmen, die das Laserstrahlschweißen seit 3 bis 5 Jahren ohne entsprechende Voruntersuchungen im Karosseriebau an möglichst vielen Verbindungsstellen einsetzen, ziehen aus den bislang auftretenden Qualitätsmängeln an den Schweißnähten heute die Konsequenz, dass die Anwendung des Lasers zum Fügen von beschichteten Werkstoffen nur begrenzt und unter Berücksichtigung höchster Anforderungen an die Spanntechnik sinnvoll ist, Bild 1a).

Im Gegensatz dazu werden zum Fügen unbeschichteter CrNi-Dünnsbleche bereits mit Hochleistungslasern hergestellte Mehrblechverbindungen aufgrund der genannten Vorteile eingesetzt, z. B. bei der Herstellung von Abgassystemen für die Automobilindustrie, Bild 1b).



(a) im Karosseriebau an verzinkten Tiefziehstählen, Türeinstiegsbereich  
[Quelle: Volkswagen AG]



(b) im Abgasanlagebau an unbeschichteten CrNi-Blechen  
[Quelle: Laserzentrum Schorcht GmbH]

Bild 1: Einsatz des Mehrblechschweißens

Hierbei traten jedoch in der Serienfertigung Qualitätsprobleme in Form von Unregelmäßigkeiten in der Nahtausführung auf.

In der Fachliteratur gibt es, abgesehen von einigen Informationen über erste Testschweißungen, keine Veröffentlichungen über Grundlagenuntersuchungen bzw. Darlegungen gesicherter Erkenntnisse zur Herstellung von Mehrblechverbindungen unter Anwendung des Laserstrahlschweißens. Außerdem liegen aufgrund der noch unzureichenden Testuntersuchungen widersprüchliche Aussagen bezüglich der Eignung der verschiedenen Lasergruppen für derartige Aufgaben vor.

Aus den angeführten Gründen erschien es daher notwendig, Grundlagenuntersuchungen zum Hochleistungslaserstrahlschweißen von Mehrblechverbindungen durchzuführen.

## **2 Stand der Technik**

---

### **2.1 Stahl als Konstruktionswerkstoff**

Nach wie vor ist derzeit Stahl der bedeutendste Technologie-Werkstoff. Alle richtungsweisenden technischen Entwicklungen, die auch Grundlage für Fortschritt und Verbesserung der Lebensqualität waren und noch immer sind, hätte es ohne Stahl nicht gegeben. Stahl ist immer dort Bestandteil von Produkten, wo hohe Leistungen und besondere Zuverlässigkeit verlangt werden.

In besonders beanspruchten Stahlkonstruktionen, wie zum Beispiel in Druckbehältern, Druckrohrleitungen, Automobilen und Nutzfahrzeugen, Mobilkränen, Schiffen, Hochhäusern und Brücken hat das Eigengewicht der Konstruktionen wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit. Eine Verringerung des Eigengewichts ohne Einbuße der Tragfähigkeit, das heißt der Festigkeit und der Bauteilsicherheit, steht dabei im Vordergrund. Hochfeste Stähle mit einer um ein Vielfaches höheren Festigkeit als bei klassischen Stahlwerkstoffen geben den Ingenieuren die Möglichkeit, Sicherheit und Leichtbau kostengünstig miteinander zu verbinden. Zudem werden hierdurch Ressourcen geschont.

Der moderne Automobilbau ist mehr denn je geprägt von einer Vielzahl sich häufig widersprechenden technischen und wirtschaftlichen Anforderungen. Ein hoher Gebrauchswert für den Kunden, vor allem Sicherheit, Zuverlässigkeit, Wertigkeit, Fahrdynamik und Wirtschaftlichkeit, aber auch eine bestmögliche Erfüllung von Gesetzen und Auflagen erfordern die gezielte Weiterentwicklung und den Einsatz moderner Werkstoffe und Verarbeitungstechnologien. Standardmaterialien mit neuen Eigenschaften, aber auch neue Werkstoffklassen erschließen neue Möglichkeiten für das Kraftfahrzeug von morgen.

Der Wettbewerb der Werkstoffe im Fahrzeugbau wird durch die ständig steigenden Anforderungen an Leichtbau, Fahrzeugsicherheit, Komfort, Lebensdauer, Umweltverträglichkeit und Recyclingfähigkeit bestimmt. Hierbei nimmt Stahl durch immer neue Entwicklungen, wie z.B. hochfester Stahlsorten und neuer Oberflächenveredelungen sowie zukunftsweisender Verarbeitungstechnologien, eine herausragende Position ein. Neben technischen und wirtschaftlichen Anforderungen werden zunehmend auch ökologische Anforderungen an einen Werkstoff gestellt. Diese gilt es nicht erst bei der Entsorgung, sondern bereits bei der Planung und Konstruktion über den gesamten Lebenszyklus eines Fahrzeuges zu berücksichtigen.

Diesem Wettbewerb muss sich der Werkstoff Stahl mit verbesserten Produkten und werkstoffgerechten, konstruktiven Lösungen stellen. Dabei sind die Leichtbaupotenziale des Stahls im Bereich von Karosserie und Fahrzeug noch lange nicht ausgeschöpft, wie verschiedene Studien der jüngeren Vergangenheit zeigen.

Stahl ist der Basiswerkstoff für die deutsche Industrie. Von den 37 Millionen Tonnen Walzstahl, die im Jahr 2005 industriell in Deutschland verarbeitet wurden, sind 12,1 Millionen Tonnen im Straßenfahrzeugbau verwendet worden, d.h. direkt von den Stahlherstellern an die so genannten OEMs (Original Equipment Manufacturers), also die Fahrzeughersteller und Zulieferer, und indirekt über die Zulieferindustrie aus dem Bereich der Stahlumformung / Metallwaren, in Form von zum Beispiel Schrauben, Pressteile oder Kurbelwellen geliefert wurden. Die Autoindustrie steht für ein knappes Drittel des Stahlabsatzes und ist damit die wichtigste Industriebranche, die Fertigprodukte herstellt. Heute erlebt Stahl auch im Leichtbau eine Renaissance. Dafür sorgen die Stahlhersteller, die mit großer Innovationskraft gemeinsam mit den Kunden aus dem Automobilbau und anderen Industrien Lösungen entwickeln.

Betrachtet man Stahlwerkstoffe von der Herstellung, Veredelung, Verarbeitung über die Nutzungsphase bis hin zum Recycling, die zu 100 Prozent im Stahlproduktionsprozess wieder einsetzbar sind und Stahlschrott für die Stahlindustrie nach Erz der zweitwichtigste Rohstoff ist, bietet sich Stahl aufgrund seines technologischen Innovationspotentials, der hohen Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit als idealer Konstruktionswerkstoff an, der im Fahrzeugbau auch zukünftig dominierend sein wird [4-11].

Die Stahlindustrie bietet eine umfangreiche Angebotspalette an höherfesten Stahlgüten und höchstfesten Stählen. Höher- und höchstfeste Stähle sind als Konstruktionswerkstoffe, insbesondere vor dem Hintergrund des Leichtbaus, wirtschaftlich sehr attraktiv. Dies zeigen Projekte zur Entwicklung einer ultraleichten Stahlkarosserie in einem Konsortium aus Stahlherstellern und der Fahrzeugindustrie wie die „Ultra Light Steel Auto Body“-Studie (ULSAB) oder das „New Steel Body“-Projekt (NSB<sup>®</sup>). Dort werden durch den Einsatz neuer Stahlgüten Gewichts- und Kostenvorteile generiert, Bild 2 [12, 13].

Im Vergleich zu einem erfolgreichen Referenzfahrzeug aus der Großserie wiegt der NSB<sup>®</sup> 75 kg, d.h. 24 % weniger in der Rohkarosserie. Mit nur 3 % Mehrkosten in der Fertigung stellt der NSB<sup>®</sup> damit eine wirtschaftlich überlegene Alternative zu anderen Leichtbaukonzepten dar. Die größte Gewichtsersparnis wird durch den Einsatz moderner Technologien, wie dem Hydroforming von beispielsweise Thyssen Tailored Tubes<sup>®</sup> und Doppelplatinen, dem Walzprofilieren oder der DAVEX<sup>®</sup>-Technologie erzielt. Die

Gewichtsoptimierung ist aber auch auf die intensive Verwendung moderner Mehrphasen-Stähle zurückzuführen.

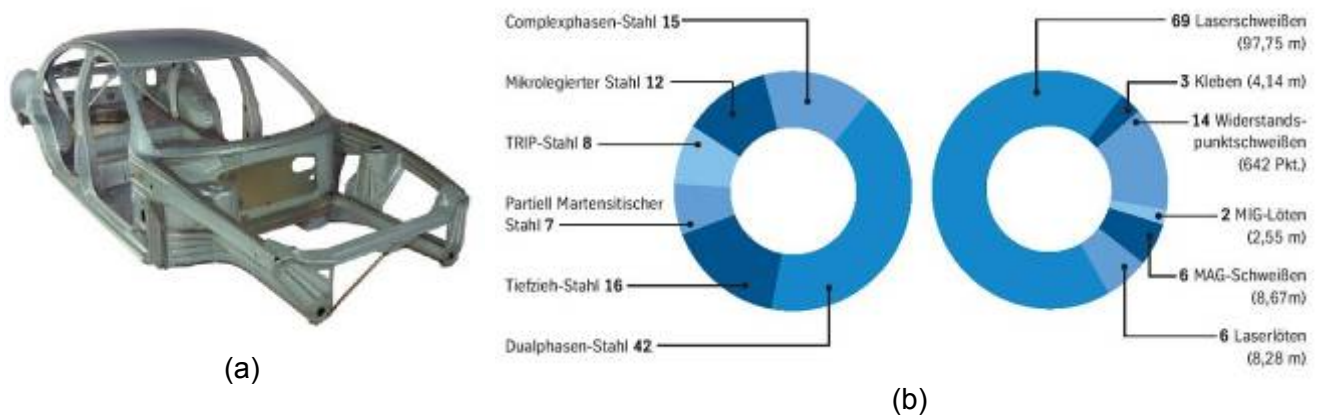


Bild 2: Gewichtsreduzierung bei gleichzeitiger Steifigkeitserhöhung:  
 a) die ULSAB Karosserie: 80% Steifigkeitserhöhung; 25% Gewichtsreduzierung [10]  
 b) Werkstoffeinsatz und Fügeverfahren im „New Steel Body“-Projekt [11]

Die Ergebnisse der ULSAB-Studie zeigten, dass höher- und höchstfeste Stähle auf Grund der realisierbaren Wandstärkenreduzierungen große Leichtbaupotentiale für den kostengünstigen Karosseriebau in der Großserienfertigung bieten. Gleichzeitig ergibt sich die Problematik, dass die einsetzbaren Stahlgüten mit steigender Festigkeit zumeist an Formänderungsvermögen gegenüber weicheren Stählen einbüßen [14, 10].

Die in der ULSAB-Studie verwendeten Werkstoffe bilden hierbei größtenteils nicht die Obergrenze der aktuell am Markt verfügbaren höchstfesten Stahlgüten, die Streckgrenzen von über 1000 N/mm<sup>2</sup> aufweisen. Durch den Einsatz von hoch- und höherfesten Stählen wird es möglich, Bauteile unter Verbesserung der Bauteileigenschaften durch reduzierten Werkstoffeinsatz deutlich leichter auszulegen und so einen effizienten und kostengünstigen Leichtbau zu betreiben.

Bei den klassischen im Automobilbau eingesetzten Fertigungsverfahren, wie z. B. dem Tiefziehen und dem Innenhochdruckumformen, ist bei Einsatz höchstfester Stahlgüten mit Problemen bei großen Umformgraden zu rechnen, da höher- und höchstfeste Stähle nicht die geforderten Bruchdehnungswerte besitzen [15]. Weiterhin zeigen höher- und höchstfeste Stähle auf Grund ihrer hohen Streckgrenzen starke Rückfederungseffekte nach der Umformung. Dies führt dazu, dass insbesondere genaue große Biegewinkel nur unter großem Werkzeug- bzw. Nachbearbeitungsaufwand herstellbar sind. Das Walzprofilieren bietet dem gegenüber durch die verfahrensspezifische, kontinuierliche



Umformung Möglichkeiten zum Überbiegen und somit zur definierten Berücksichtigung der Rückfederung bei gleichzeitig nicht bzw. nur gering gesteigerten Werkzeugkosten.

In modernen Fahrzeugkonzepten spielen die Fahrzeugsicherheit und die Werterhaltung eine immer wichtigere Rolle. Dabei kommt dem Einsatz korrosionsgeschützter, hochfester Stahlsorten in Verbindung mit modernen Fertigungstechnologien eine Schlüsselfunktion zu. Diese erlauben aufgrund der hohen Festigkeiten eine Reduzierung der Blechdicke. Der Anteil höher- und hochfester Stähle im Fahrzeugbau nimmt ständig zu. In aktuellen deutschen Fahrzeugen werden bereits bis zu 50 % dieser Stahlsorten in den Karosserien eingesetzt.

In der ULSAB-Studie ist man mit einem Einsatz höherfester Stähle von über 90 Prozent noch weitergegangen. Das heißt, es wurden nur dort moderne Mehrphasenstähle eingesetzt, wo der Festigkeitsgewinn eine Minimierung der Blechdicke zulässt. Weiche Güten wurden dementsprechend für Bauteile mit äußerst hoher Umformkomplexität und geringem Festigkeitsanspruch zur Kostenoptimierung verwendet.

Dem Anwender steht damit eine breite Werkstoffpalette zur Verfügung. Der Streckgrenzenbereich liegt für sehr weiche IF-Stähle bei 140 MPa, für moderne TWIP-Stähle bei 1000 MPa und reicht bis zu 1200 MPa bei martensitischen Stählen, Bild 3 [16].

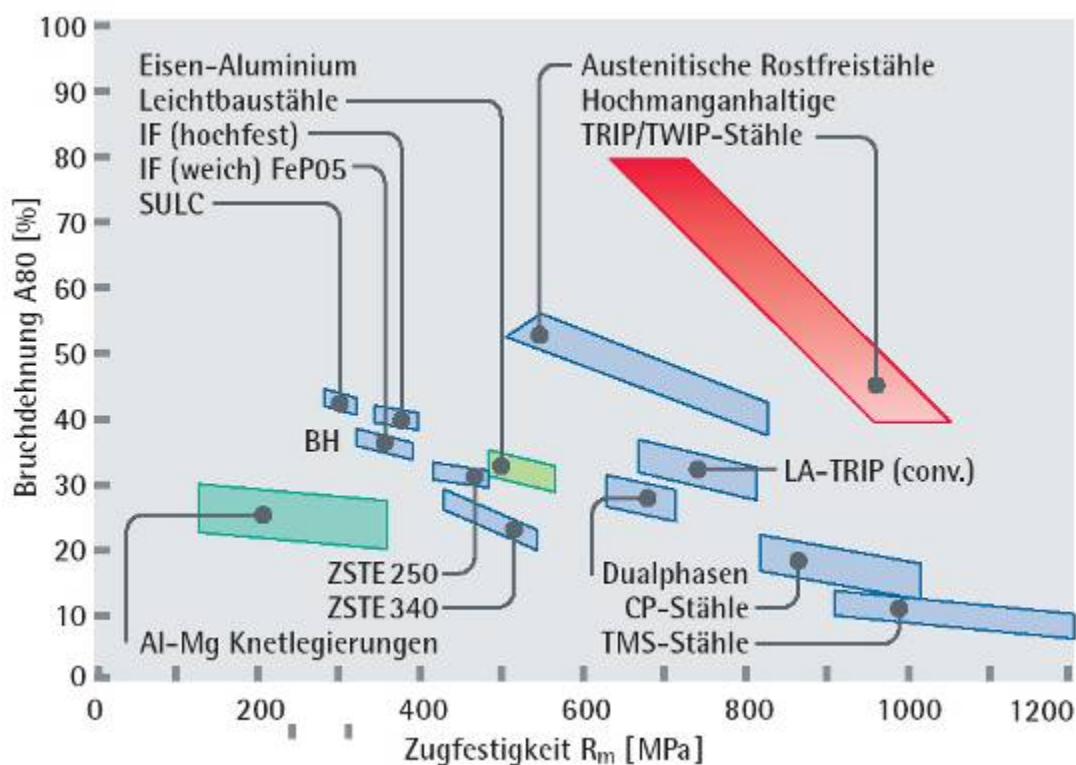


Bild 3: Moderne Werkstoffe für den Automobilbau

Im Trend liegen die austenitischen hochmanganhaltigen Stähle sowie Bor legierte Stahlsorten. Seit dem Jahr 2000 werden Stähle mit TWIP-Effekt (Twinning Induced Plasticity) entwickelt, die ab 2006 in der Autoproduktion eingesetzt werden. Diese Stähle erreichen bei der Kaltumformung Dehnungen von über 60 Prozent und sind dabei außerordentlich zugfest.

## **2.2 Charakterisierung der Oberflächenveredlungen**

Technische Oberflächen bestimmen wichtige Gebrauchseigenschaften des Produktes. So gehören Korrosions- und Verschleißverhalten, Design und optische Erscheinung zu kundenrelevanten Entscheidungskriterien, die in direkter Abhängigkeit mit den jeweiligen Oberflächeneigenschaften stehen. Maßgeschneiderte oberflächenveredelte Feinbleche haben nicht nur auf kundenrelevante Gebrauchseigenschaften Einfluss, sie müssen auch die fertigungsspezifischen Anforderungen der Automobilindustrie erfüllen. Das Umformverhalten und die Füge-technik werden maßgeblich durch das jeweilige Werkstoff- und Oberflächenverhalten bestimmt. Die Anforderungen an oberflächenveredelte Feinbleche im Fahrzeugbau sind aufgrund der Vielzahl von Werkstoffen und neuen Fertigungstechnologien komplex [17].

Zinküberzüge bieten nach der Lackierung auch bei Beschädigung der Lack- oder Zinkschicht noch einen guten Korrosionsschutz infolge ihrer kathodischen Schutzwirkung. Diese beruht darauf, dass Zink im Vergleich zum Eisen ein negatives Potential aufweist, es ist unedler. In Gegenwart eines Elektrolyten, z.B. Wasser, löst sich bevorzugt das Zink auf und verhindert dadurch, dass Eisen in Lösung gehen kann. Damit ist auch ein Schutz der Schnittkanten gewährleistet.

Gegenwärtig kommen für Automobile in Großserienfertigung vorwiegend verzinkte Stahlbleche zur Anwendung. Da dadurch der Korrosionsschutz in den letzten Jahren erheblich anstieg, konnten seitens der Fahrzeughersteller die Garantiezeiten gegen Durchrostung beträchtlich verlängert werden. Die Erzeugung oberflächenveredelter Feinbleche ist insbesondere in den letzten 12 Jahren ständig gestiegen. Bei ThyssenKrupp Stahl werden heute bereits 70-80 % der kaltgewalzten Feinbleche oberflächenveredelt [18].

### **2.2.1 Elektrolytisches Verzinken**

Bei der elektrolytischen Metallabscheidung nutzt man die Eigenschaft von Metallsalzen, z.B.  $ZnSO_4$ , sich in wässriger Lösung in positiv geladene Metallionen und negativ geladene Säurerestionen aufzuspalten. Wird nun ein Elektrodenpaar in diese Lösung, dem

Elektrolyt, getaucht und mit einer Gleichstromquelle verbunden, so wandern die positiv geladenen Metallionen zur negativen Elektrode, der Kathode, und die negativ geladenen Säurerestionen zur positiven Elektrode, der Anode. Die an den Elektroden ankommenden Ionen entladen sich und scheiden sich als neutrale Atome ab oder gehen mit dem Lösungsmittel neue Reaktionen ein. Mit dem Stromtransport ist somit ein Stofftransport verbunden.

Für die elektrolytischen Beschichtungsverfahren werden kaltgewalzte, bereits geglühte und nachgewalzte (dressierte) Bänder verwendet. Das bedeutet, dass die mechanischen Eigenschaften des Substrates durch das Oberflächenveredelungsverfahren nicht mehr verändert werden. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass nach der Kaltumformung das Material eine sehr große Härte und Festigkeit aufweist. Man bezeichnet diese Erscheinung als Kaltverfestigung. In diesem Zustand ist kaltgewalztes Material nicht zu verarbeiten. Erst durch einen anschließenden Glühprozess (Rekristallisieren) tritt eine Entfestigung ein. Nach einem leichten Nachwalzvorgang (Dressieren) erlangt das Material die entsprechenden gewünschten mechanischen Eigenschaften [19, 20].

Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten elektrolytisch verzinkten Stahlbleche waren entweder beidseitig (DC04+ZE 75/75) oder einseitig (DC04+ZE75/0) beschichtet.

### **2.2.2 Feuerverzinken**

Beim Feuerverzinken wird das Stahlband zunächst unter reduzierenden Bedingungen aufgeheizt und gereinigt. Danach durchläuft es die Zinkschmelze bei ca. 450 °C, wird senkrecht nach oben geführt und kühlt dabei frei an Luft ab. Die Schichtdicke wird über Abstreifdüsen eingestellt, die sich unmittelbar oberhalb der Schmelzenoberfläche befinden [20-22].

Diese thermische Behandlung für die feuerverzinkte Ausführung führt im Gegensatz zur elektrolytischen Bandbeschichtung zwangsläufig zu einer Änderung der mechanisch-technologischen Kennwerte des Grundmaterials in Richtung verringerter Festigkeitskennwerte. Demgegenüber kann bei einer elektrolytischen Verzinkung höherfestes Ausgangsmaterial eingesetzt werden [23].

Für die Schmelztauchbeschichtungsverfahren kommt überwiegend ungeglühtes, kaltgewalztes Band zum Einsatz. Der zur Erlangung der technologischen Eigenschaften erforderliche Glühprozess (Rekristallisation) findet in einem Durchlaufofen statt, der dem Beschichtungsprozess vorgeschaltet ist.

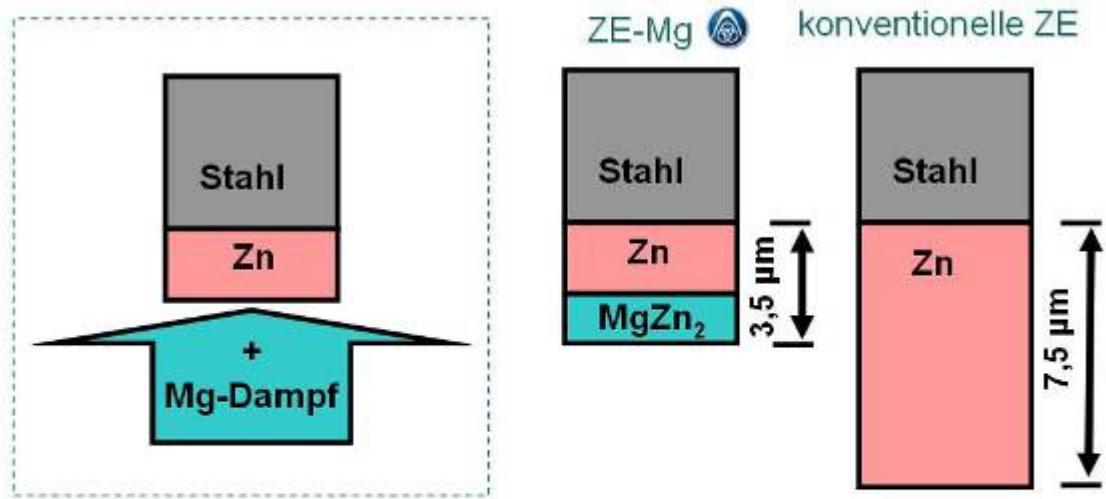
Das in der Arbeit verwendete feuerverzinkte Stahlblech (DX53D+Z) war beidseitig beschichtet.

### **2.2.3 Zink-Magnesium-Oberflächenveredelung**

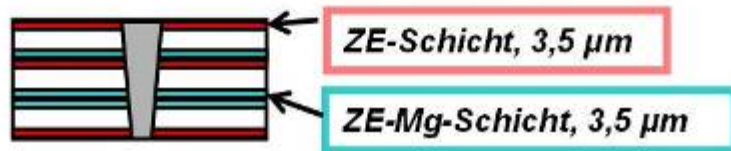
Nach knapp dreijähriger Entwicklungsarbeit ist es am DOC (Dortmunder Oberflächen Centrum) gelungen, unter produktionsnahen Bedingungen elektrolytisch verzinktes Stahlband mit einer neuartigen Zink-Magnesium-Oberflächenveredelung zu fertigen. Auf der Bandpilotanlage, die das DOC für die Erprobung und Prototypfertigung von neuartigen Schichtsystemen betreibt, wird diese Oberfläche in einem kontinuierlichen Prozess erzeugt. Der entscheidende Schritt zur Herstellung des neuen Legierungsüberzugs findet in der PVD-Station (PVD-Physical Vapour Deposition) der Bandpilotanlage statt. In diesem Anlagenteil lässt sich Vakuum von bis zu  $10^{-5}$  mbar erzeugen. Bei der Erzeugung der Zink-Magnesium-Oberfläche wird Magnesium in einem Tiegel innerhalb des PVD-Modus auf so hohe Temperatur erhitzt, dass es verdampft. Der Magnesiumdampf schlägt sich auf dem Stahlband nieder, das oberhalb des Tiegels geführt wird. Durch das Vakuum wird verhindert, dass der Magnesiumdampf auf seinem Weg zur Bandoberfläche abgelenkt oder an der Luft oxidiert wird. Nach Abscheidung des Magnesiums auf der Oberfläche des Bandes wird durch eine gezielte Wärmebehandlung eine Interdiffusion von Zink- und Magnesium herbeigeführt. Das Resultat ist ein Metallüberzug, der im oberen Bereich aus einer Zink-Magnesium-Legierung besteht [24, 25].

Der neue Legierungsüberzug bietet die Möglichkeit, bei mindestens gleichwertiger Korrosionsschutzwirkung wie bei herkömmlichen verzinktem Feinblech, die Dicke der metallischen Auflage zu halbieren, Bild 4 [26]. Dadurch wird die Schweißseignung, insbesondere die Schweißbarkeit von Überlappverbindungen deutlich verbessert [27].

Für die Untersuchungen standen Feinbleche der Stähle DC06 und H220Y mit einer ZE-Mg 35/35-Beschichtung zur Verfügung. Die Bleche sind beidseitig elektrolytisch verzinkt. Zusätzlich erfolgt eine einseitige Beschichtung dieser Stahlbleche mit Mg durch Mg-Bedampfung auf einer Bandpilotanlage (BPA 300). Die ZE-Mg-Blechseite besitzt eine gleichförmig mittelgraue Farbe. Die unbedampfte Blechrückseite weist ein hellgraues, teilweise streifiges (bedingt durch geringen Mg-Kantenumgriff) Aussehen auf.

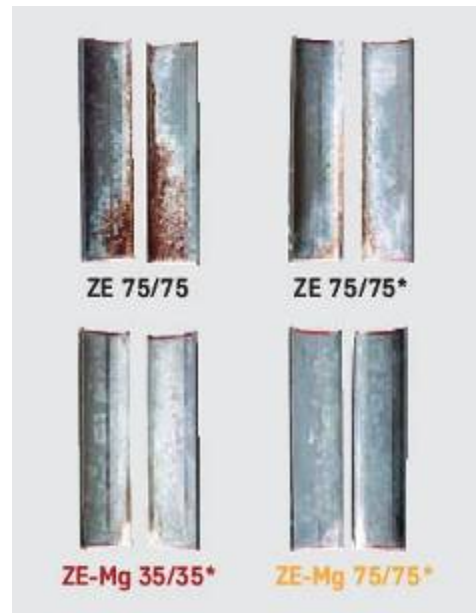


Untersuchte Variante von Dreiblechverbindungen:



(a)

Bild 4: ZE-Mg-Beschichtung: Reduzierung der Überzugsdicke bei hervorragender Korrosionsbeständigkeit  
 (a) – Schema des Beschichtungsaufbaus;  
 (b) – lasergeschweißte Modellhohlkörper, geöffnet nach 10 Zyklen Klimawechseltest gemäß VDA 621-415 [24]



\* Jeweils plus Dünnbeschichtung 1. Generation

(b)

## 2.3 Laserstrahlschweißen

### 2.3.1 Laserprinzip und Eigenschaften der erzeugten Strahlung

Der Laser ist ein Gerät zur Erzeugung monochromischer und kohärenter elektromagnetischer Strahlung im infraroten bis ultravioletten Frequenzbereich. Der Name dieser Lichtquelle setzt sich aus den Anfangsbuchstaben von „*light amplification by stimulated emission of radiation*“ zusammen und kennzeichnet den physikalischen Vorgang der Strahlerzeugung durch stimulierte Emission.

Voraussetzung für das Entstehen des Laserstrahles ist die Anregung eines laseraktiven Mediums, d.h. die Überführung dieses Mediums vom thermodynamischen Gleichgewichtszustand in einen Ungleichgewichtszustand. Befinden sich mehr Teilchen in höheren Energieebenen als in niedrigen, so ist der laseraktive Zustand erreicht. Die zur Erzeugung dieser Inversion notwendige Energie wird durch Stöße oder durch Strahlung zugeführt, und die im laseraktiven Medium gespeicherte Energie wird durch Emission in Form von elektromagnetischen Wellen abgegeben [28]. Diese Energieabgabe erfolgt gequantelt, wodurch die ausgesandte Strahlung eine für das Lasermedium typische Wellenlänge aufweist, Tabelle 1.

Als Lasermedien werden freie Elektronen, Gase, Flüssigkeiten, Festkörper, sowie Halbleiterelemente eingesetzt.

Tabelle 1: Zum Laserschweißen verwendete Laser

Laseraktives Medium	Lasertyp	Wellenlänge, $\mu\text{m}$	Strahlleistungen kommerziell erhältlicher Laser
CO <sub>2</sub>	Gaslaser	10,60	bis 20 kW
Nd:YAG	Festkörperlaser	1,06	bis 6 kW
Ytterbium	Festkörperlaser	1,07	bis 20 kW
GaAlAs in GaAsP	Halbleiterlaser (Diodenlaser)	0,81...0,98	bis 4 kW

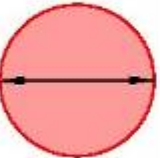
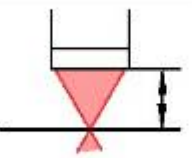
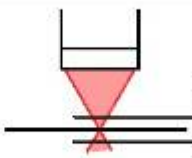



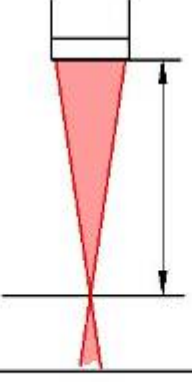
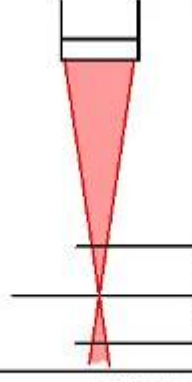

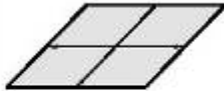
### 2.3.2 Trends in der Anlagentechnik

Die treibende Kraft bei der Entwicklung von Lasern für die industrielle Materialbearbeitung ist die Forderung nach höherer Leistung bei gleichzeitig besserer Strahlqualität. Bei herkömmlichen lampengepumpten Festkörperlasern mit ihren Nd:YAG Stäben ist die

Steigerung der Laserleistung aufgrund der sich ausbildenden thermischen Linse immer mit einer Verschlechterung der Strahlqualität verbunden. Durch die Verwendung von Laserdioden anstelle der Anregungslampen kann die thermische Linse zwar reduziert werden, die prinzipielle Verschlechterung der Strahlqualität, bei Erhöhung der Laserleistung bleibt aber. Anders verhält es sich beim Scheibenlaser. Dieses Laserprinzip eliminiert die thermische Linse im Kristall, so dass hohe Leistungen bei sehr guter Strahlqualität möglich werden. Damit sind wichtige Voraussetzungen für neue Laseranwendungen gegeben, indem kleinere Fokusbereiche, größere Abstände zwischen Bearbeitungsoptik und Werkstück und nicht zuletzt eine höhere Schärfentiefe des fokussierten Laserstrahls erzielt werden können [29], Tabelle 2.

Beim Schweißen und Schneiden kann die verbesserte Strahlqualität des Scheibenlasers direkt in eine Reduzierung des Fokusbereichs umgesetzt werden, was zur Folge hat, dass die Leistungsdichte des Laserstrahls auf dem Werkstück quadratisch zunimmt. Die Bearbeitungsschwelle verschiebt sich zu kleineren Leistungen hin und der Tiefschweißeffekt setzt früher ein. Das Prozessfenster der Schweißung und damit die Prozesssicherheit werden größer. Durch den schon bei kleinen Leistungen einsetzenden Tiefschweißeffekt kann die Nahtbreite klein gehalten werden. Daraus resultiert ein kleiner Wärmeeintrag und somit ein geringer Verzug der Bauteile. Effizientes und präzises Schweißen von dünnen Blechen wird dadurch erst möglich. Zudem werden beachtliche Einschweißstiefen und Schweißgeschwindigkeiten erreicht [30].

Tabelle 2: Einfluss der Strahlqualität [29]

Strahlqualität	Fokusbereich	Arbeitsabstand	Tiefschärfe	Optikgröße	Arbeitsbereich einer Scanneroptik
25 mm*mrad (LP Stab)					
6 mm*mrad (DP Scheibe)					
	Mit gleicher Fokussieroptik	Mit dem gleichen Fokusbereich			

Sehr vorteilhaft kann die Strahlqualität auch beim Schweißen mit Scanneroptiken ausgenutzt werden. Die Scanneroptiken mit ihren Galvospiegeln lenken den Laserstrahl innerhalb eines Bearbeitungsfeldes ab. Feldgröße, Fokussdurchmesser und Arbeitsabstand hängen dabei direkt von der Strahlqualität des verwendeten Lasers ab. Mit den bisher verwendeten Stabsystemen und ihrer Strahlqualität von 16 mm\* $mrad$  konnten bei Schweißungen im typischen Blechdickenbereich von 1-2 mm lediglich Bearbeitungsfelder von ca. 150 mm Seitenlänge abgedeckt werden. Größere Felder wären zwar mit größeren Scanneroptiken machbar, allerdings würde dies Nachteile in der Baugröße, bei den Kosten und bei der Dynamik des Scannersystems mit sich bringen. Mit dem Scheibenlaser können nun auch mit kleinen Scannersystemen problemlos Feldgrößen bis zu 300 mm Seitenlänge erreicht werden. Dieses so genannte Remote-Schweißen ersetzt das sonst notwendige Achsensystem, welches die Fokussieroptik oder das Bauteil bewegt, ist aber auch interessant in der Kombination mit Robotern [31].

Im kW-Leistungsbereich werden heute vorwiegend  $CO_2$ -Laser, longitudinal diodengepumpte Yb:YAG Stablaser, transversal angeregte Nd:YAG-Stablaser und Yb:YAG Scheibenlaser eingesetzt. Die  $CO_2$ -Laser zeichnen sich selbst bei Leistungen von mehreren kW durch nahezu beugungsbegrenzte Strahlen aus (typischerweise  $M^2 < 2$ ). Mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 10,6 \mu m$  kann das Strahlparameterprodukt eines  $CO_2$ -Lasers jedoch nicht kleiner sein als 3.4 mm\* $mrad$  ( $M^2 = 1$ ). Festkörperlaser erzeugen heute im kW Bereich zwar noch keine beugungsbegrenzten Strahlen, mit 2.8 mm\* $mrad$  ( $M^2 = 8$ ) bei 1 kW mittlerer Leistung (Stablaser) und 7 mm\* $mrad$  ( $M^2 = 21$ ) bei 4 kW (Scheibenlaser), weisen sie wegen der zehnmal kürzeren Wellenlänge aber bereits eine sehr gute Fokussierbarkeit auf. Zudem erreichen die diodengepumpten Festkörperlaser hohe Wirkungsgrade von über 20% (elektrisch-optisch ohne Kühlung). Durch inkohärente Bündelung mehrerer Fasern werden seit kurzem auch Faserlaser mit Leistungen von mehreren kW angeboten, beispielsweise 1 kW Ausgangsleistung bei einem Strahlparameterprodukt von 6 mm\* $mrad$  ( $M^2 = 18$ ) oder 4 kW mit 20 mm\* $mrad$  ( $M^2 = 59$ ) [32, 33].

Die einzigartigen Vorteile der Faserlaser sind deren unübertroffene Effizienz, ausgezeichnete Strahlqualität, geringes Volumen und kleines Gewicht, sowie eine ausgesprochene Robustheit. Die Vorteile dieser Laser entstammen inhärent der faseroptischen Mikrostruktur. Neuere Untersuchungen zeigen [34], dass die Leistungsskalierung ohne Beeinträchtigung der Strahlqualität mit mehreren evaneszent gekoppelten Wellenleitern erzielt werden kann. Mit solchen Entwicklungen haben auch die Faserlaser das Potential, im kW-Bereich einen Strahl mit sehr guter Fokussierbarkeit zu



erzeugen. Die Modenform kann durch entsprechende Auslegung der Wellenleiter (Brechungsindexverteilung) festgelegt werden.

Bezüglich der Wellenlänge sei hier darauf hingewiesen, dass CO<sub>2</sub>-Laser heute nicht nur mit 10,6 µm, sondern bis zu einer Leistung von 6 kW auch mit 9,3 µm verfügbar sind. Die reduzierte Wellenlänge führt zu einer um 10% besseren Fokussierbarkeit und verbessert das Einkopplungsverhältnis [34].

### **2.3.3 Innovative Verfahrensvarianten**

Im Bestreben, die Anwendungsbereiche und Prozessgrenzen des Laserstrahlschweißens zu erweitern, kommt neben der Wirtschaftlichkeit vor allem der erzielbaren Prozessqualität eine große Bedeutung zu. Hierbei spielen die Eigenschaften der Schweißnaht - insbesondere geometrische Form und Festigkeitsverhalten - eine zentrale Rolle. Da diese sich als Folge eines höchst dynamisch ablaufenden Prozesses ergeben, war und ist der bekannte Zusammenhang zwischen Prozessstabilität und Nahtqualität Thema zahlreicher experimenteller wie theoretischer Untersuchungen.

Als Hinderungsgrund bei der Einführung des Lasers beim Schweißen von Aluminium in die industrielle Fertigung stellte sich bislang das Auftreten von großen, unregelmäßig geformten Poren in der Nahtwurzel (Protzesporen) sowie das stochastische Auftreten von Schmelzauswürfen dar. Diese Schweißnahtunregelmäßigkeiten werden durch Prozessinstabilitäten beim Tiefschweißen verursacht, die aufgrund der Wechselwirkungsphänomene bei der Energieeinkopplung entstehen können. Das Überbrücken von Spalten, z.B. bei Tailored Blanks und das Erzielen breiterer Anbindequerschnitte beim Überlappstoß ist bei einem fokussierten Einzellaserstrahl zum Teil nicht möglich. Als Lösung bietet sich eine gezielte Anordnung zweier fokussierter Einzelstrahlen, die TWINFOKUS-Technik an. Durch das Schweißen mit zwei fokussierten Laserstrahlen in einer Fügezone mit einem oder mehreren Lasern, lässt sich vor allem eine störungsunempfindliche Kapillargeometrie erzielen, welche gleichzeitig ein ungehindertes Ausströmen des Metaldampfes und damit porenfreie Nähte gewährleistet. Mehrstrahltechnik kann sowohl durch Strahlteilung als auch durch Kombination von Einzelstrahlen erfolgen. Bei CO<sub>2</sub>-Lasern wird die Strahlteilung entweder durch einen Umlenkspiegel mit gekippten Flächen oder durch einen Parabolspiegel mit zwei Paraboloiden realisiert. Bei Nd:YAG-Lasern kann die Realisierung zum einen durch Verwenden einer Doppelfaser und zweier unabhängiger Strahlquellen oder durch Einbringen einer Keilplatte in den Strahlengang erfolgen [35].

Die Doppelfokustechnik beim Laserstrahlschweißen, d. h. die Anwendung zweier räumlich getrennter, ein gemeinsames Schmelzbad erzeugender Foki, ist eine neue Methode, die inzwischen den Übergang vom Labor in die Produktion vollzogen hat (Bild 5). Durch eine künstliche Aufweitung der Dampfkapillare ist es möglich, die Prozessstabilität beim Laserstrahlschweißen von Aluminium deutlich zu erhöhen, so dass Prozesssporen und Schmelzbadauswürfe fast gänzlich vermieden werden können. Die Aufweitung der Dampfkapillare führt jedoch gleichzeitig zu einer Abnahme des Prozesswirkungsgrades [36].

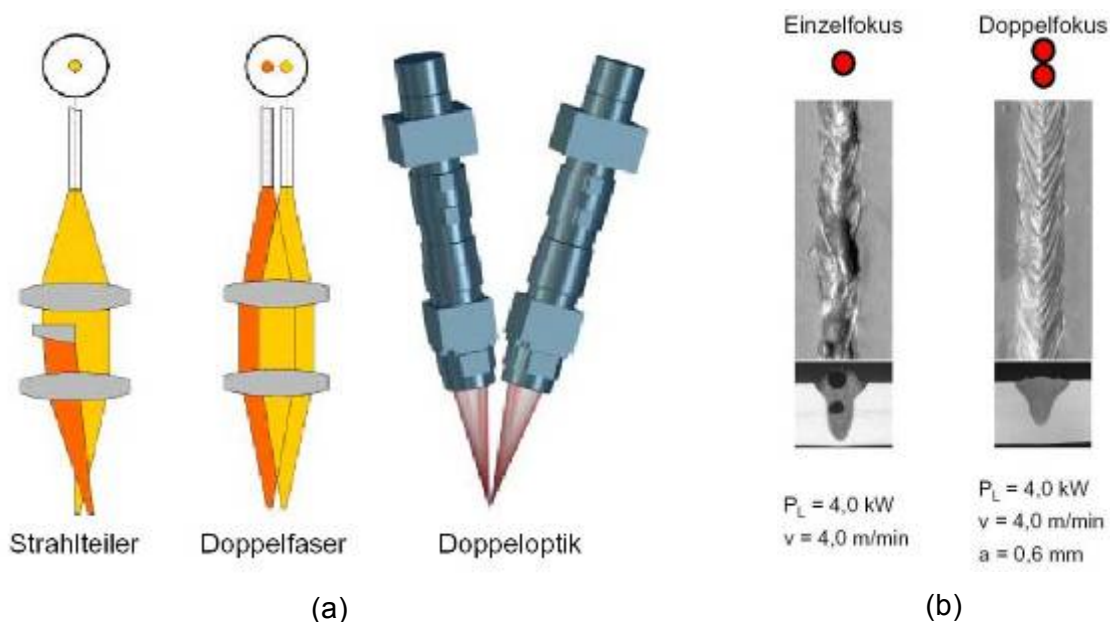


Bild 5: Doppelfokus: a) Erzeugung; b) Steigerung der Qualität [36]

Durch den Einsatz von Laserstrahlquellen höchster Strahlqualität ist es möglich, eine Fokusmatrix aufzubauen, welche die Vorteile der Doppelfokustechnik, nämlich gute Schweißnahtqualität, bei hohem Prozesswirkungsgrad ermöglicht [37], Bild 6.

Die Komplexität des Laserstrahlschweißprozesses legt eine wissenschaftliche Vorgehensweise nahe, bei der einzelne Phänomene identifiziert und Maßnahmen gegen deren negative Auswirkungen auf das Prozessergebnis entwickelt werden müssen. So ist das bei hohen Schweißgeschwindigkeiten bei Stahlwerkstoffen auftretende Humping auf einen hinter der Dampfkapillare in Schmelzbadmitte sich ausbildenden Fluidjet zurückzuführen, dessen negative Auswirkung durch Einsatz der o.g. Zweistrahltechnik drastisch reduziert werden kann. Weitere Beispiele sind die Nutzung von Lasern kürzerer Wellenlänge sowie die Kontrolle der Schutzgaszusammensetzung und -zuführung zur Minderung des Plasmaeinflusses und damit zur Erhöhung der Stabilität der Energieeinkopplung und des gesamten Schweißprozesses [51].

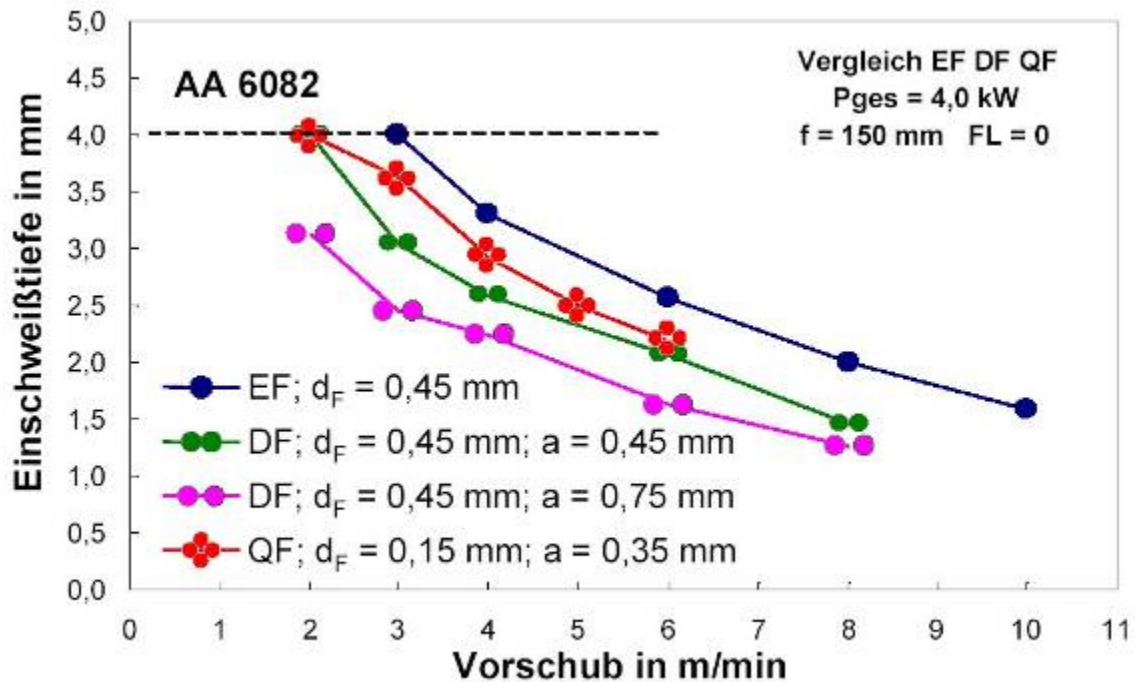


Bild 6: Vergleich – Einschweißtiefe und Vorschubgeschwindigkeit beim Schweißen mit Einzelfokus, Doppelfokus und Fokusmatrix [37].

Eine weitere Methode zur Erhöhung der Prozessstabilität ist das magnetisch gestützte Laserstrahlschweißen - basierend auf Anlegen eines externen Magnetfeldes während des Schweißprozesses. Bei dieser Verfahrensvariante können unter Ausnutzung magnetofluidynamischer Mechanismen die Strömungsverhältnisse im Schmelzbad stabilisiert und höhere Schweißgeschwindigkeiten erreicht werden. Im einzelnen wird bestätigt, dass dadurch das Humping unterdrückt, die Oberraupenqualität verbessert, die Form der Nahtquerschnitte in weiten Grenzen verändert, die Spritzertätigkeit reduziert, die Fluktuationen der Plasmafackel gedämpft und letztlich die Prozessstabilität erhöht werden kann [125].

Jeder stromführende Leiter ist von seinem selbstinduzierten Magnetfeld umgeben, weshalb in ihm Kräfte erzeugt werden, die senkrecht sowohl zur Richtung der Stromdichte  $j$  wie des Magnetfelds  $B$  wirken; ihr Betrag ist proportional zum Quadrat der Stromdichte. Dieses Prinzip wird anwendungstechnisch genutzt, Bild 7. Eine externe Stromquelle liefert Gleichstrom, der entweder mittels einer knapp vor dem Schmelzbad gleitenden Wolframelektrode oder eines Zusatzdrahts eingebracht wird. Die resultierende eigenmagnetische Kraft beeinflusst die Schmelzbadströmung bzw. die Schweißergebnisse. Die beiden letztgenannten Methoden (externes Magnetfeld und externer Strom) können auch gemeinsam zur Prozessbeeinflussung eingesetzt werden [124].

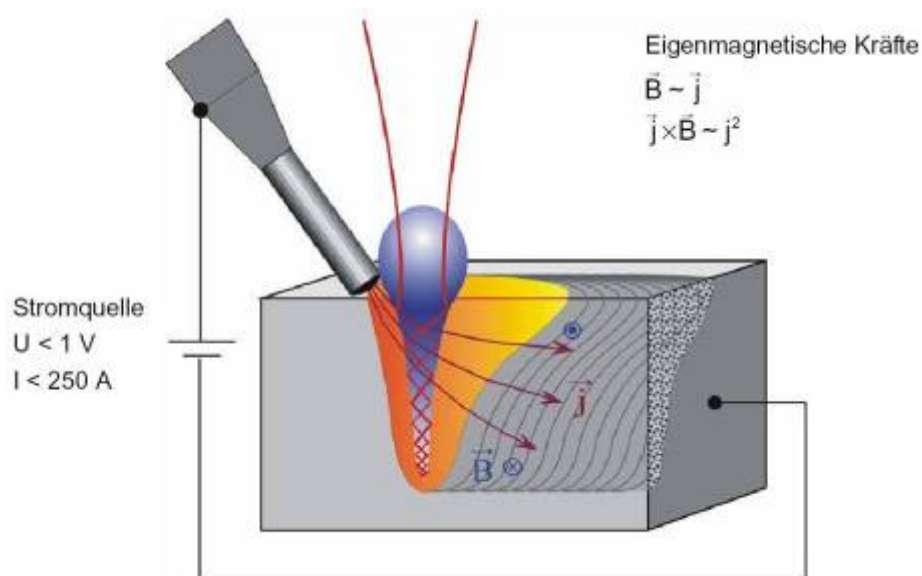


Bild 7: Schema zu Erzeugung und Nutzung eigenmagnetische Kräfte [124]

Typische Anwendungsfelder gepulster Nd:YAG-Laser sind traditionell in den Bereichen Bohren, Feinschneiden, Punkt- und Mikroschweißen zu finden. Aufgrund ihrer gepulsten Energieabgabe sind gepulste Festkörperlaser für Punktschweißaufgaben hervorragend geeignet. Jedoch kommen gepulste Laser auch bei Nahtschweißungen häufig in solchen Bereichen zur Anwendung, die sowohl hinsichtlich der Wärmeführung als auch metallurgisch anspruchsvoller Anwendungen und des Einkoppelverhaltens problematisch sind. Einschweißstiefen gepulster Festkörperlaser betragen typischerweise einige Zehntel Millimeter bis etwa 4 mm. Reine Tiefschweißungen mit hohen Schachtverhältnissen sind bei gepulsten Festkörperlaser üblicherweise nicht vorzufinden [38].

Eine weitere zukunftsweisende Technologie, die es erlaubt, das Anwendungsspektrum gepulster Nd:YAG-Laser zu erweitern ist das sogenannte SHADOW-Verfahren („Stepless High Accurate and Discrete One Pulse Welding“). Beim SHADOW-Verfahren werden Fugestellen mit einer Länge von mehreren Millimetern bzw. Zentimetern durch hohe Vorschubgeschwindigkeiten die durch die Verwendung schneller Rotationsachsen oder Scanner erreicht werden, mit nur einem einzigen Laserpuls verschweißt. Typische Pulslängen liegen bei 10 bis 50 ms für Schweißnähte die eine Länge von bis zu 80 mm aufweisen können (Bild 8). Die Effizienz des SHADOW-Verfahrens resultiert aus der speziellen Art und Weise der Energieeinbringung in den Werkstoff. Während für konventionelle Nahtschweißungen mit gepulsten Nd:YAG-Laser ein hoher Wärmeleitungsanteil charakteristisch ist, ist die Schweißgeschwindigkeit beim SHADOW-Verfahren typischerweise höher als die Wärmeleitung im Werkstoff [39].

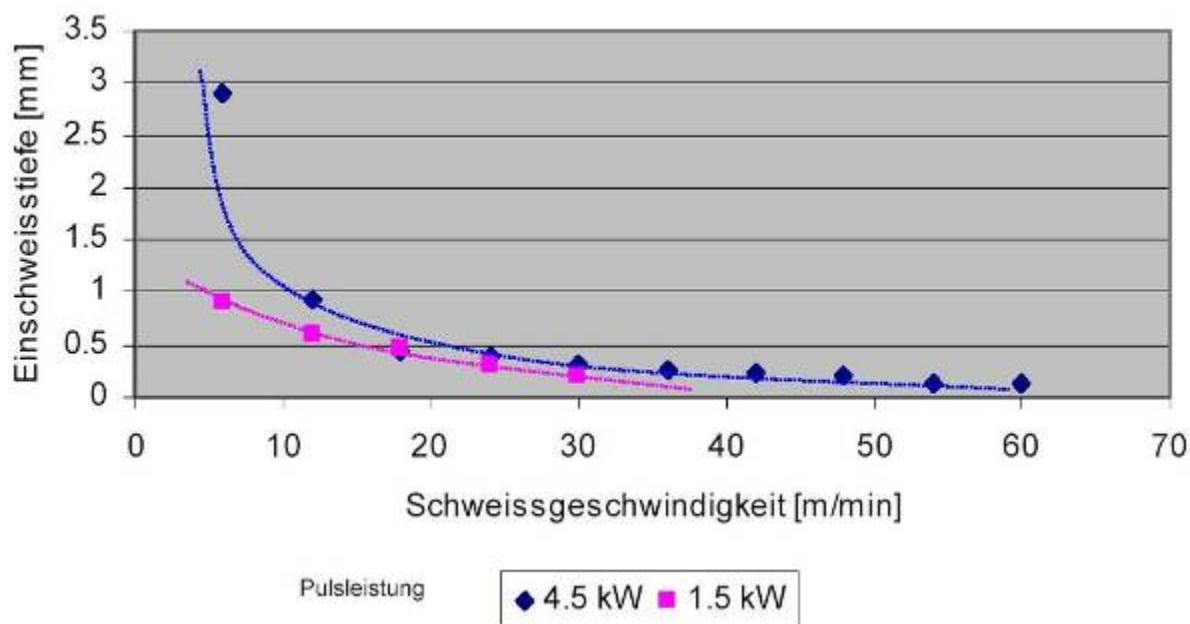


Bild 8: Anwendungsgrenzen des SHADOW-Verfahrens [40]

Beim Beschriften sind Scanner und Laserstrahl schon lange eine perfekte Kombination, allerdings für eher kleine Leistungen. Das Ablenken des Laserstrahls über zwei extrem schnell drehbare Spiegel kann jetzt auch das Schweißen revolutionieren (Bild 9). Entscheidender Vorteil dieses Prinzips: Die Positionierzeiten reduzieren sich, was die Gesamtbearbeitungszeit drastisch senkt. Der große Vorteil des Laserschweißens mit einem Scanner gegenüber dem herkömmlichen Laserschweißen liegt in der viel schnelleren Positionierbarkeit des Laserstrahls. Denn während konventionell bei Bauteilen mit mehreren Schweißnähten zwischen den einzelnen Schweißungen oft längere Fahrwege mit entsprechenden Nebenzeiten anfallen, gehen diese Nebenzeiten beim Einsatz eines Scanners gegen Null. Die hohe Positioniergeschwindigkeit und Flexibilität des Scannerschweißens bietet noch weitere Vorteile: Thermischer Verzug kann reduziert werden, indem die Schweißvorgänge ohne Zeitverlust über das Werkstück verteilt ausgeführt werden [41].

Durch die Kombination der Vorteile von scannerbasierten Prozessen und robotergeführter Bearbeitung können Werkstücke über weitere Entfernungen und hochgradig flexibel bearbeitet werden (Bild 10). Eine besondere Bedeutung haben die optischen Sensoren, die die Nahtposition erkennen und den Prozess automatisch überwachen. An die verwendeten Laser werden extreme Anforderungen bezüglich der Strahlqualität gestellt. Sie müssen bei den notwendigen sehr langen Brennweiten hinreichend kleine Fokaldurchmesser erreichen. Das robotergeführte Scanner-Schweißen wird vor allem im Automobilbau eingesetzt [42].

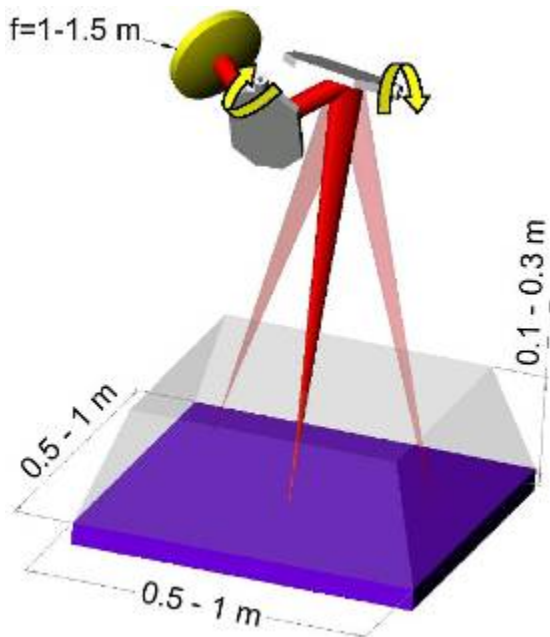


Bild 9: Prinzip des Scanner- Schweißens  
[Quelle: Fa. Trumpf]

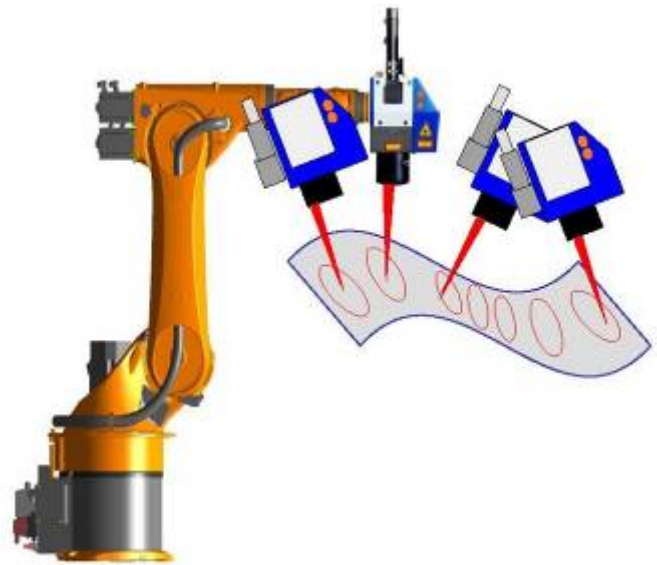


Bild 10: Scanner-Schweißen am Roboter [43]

Der Vorteil des Remoteschweißens liegt in den deutlich geringeren Positionierzeiten begründet, die aufgrund der hochdynamischen Strahlablenkung gegenüber herkömmlichen Systemen erzielt werden. Während heute beim Laserstrahlschweißen kurzer Nähte die tatsächlichen Lasernutzungs- und Fertigungszeiten oftmals gering gegenüber den Nebenzeiten sind, die hauptsächlich aus der Handhabung der Bearbeitungsköpfe resultieren, kann beim Remoteschweißen durch Positioniergeschwindigkeiten von rund 700 m/min ein sehr schnelles sequentielles Schweißen von Punkt- oder Kurznähten stattfinden. Dies zahlt sich vor allem bei Bauteilen mit zahlreichen kurzen, über das Werkstück verteilten Schweißnähten aus und ermöglicht so eine tatsächliche Lasernutzung von über 90%. Das Remoteschweißen tritt so ergänzend neben bestehende Laseranwendungen und eröffnet dem Laser neue Anwendungsbereiche, in denen heute beispielsweise das Widerstandspunktschweißen bevorzugt eingesetzt wird [44].

Die Remote-Technik kann ein Quantensprung für die Fertigung sein. Das Verfahren verspricht sowohl die Substitution vorhandener Techniken als auch neuartige Produkte. Im Karosseriebau erlaubt das Remote-Schweißen im Vergleich zum Punktschweißen eine Reduzierung der Investitionskosten um 30% und der Taktzeit um 60%. Entsprechend prognostiziert die Studie für 2015 der Remote-Technik einen Anteil von 8 bis 10% bezogen auf alle Fügeverfahren [45].

### 2.3.4 Verfahrensprinzipien

Das Laserstrahlschweißen hat sich als eines der bedeutendsten Fügeverfahren im Dünnblechbereich etabliert. Insbesondere im Bereich der Automobiltechnik wird es für unterschiedlichste Anwendungen und Werkstoffkombinationen eingesetzt. Grundsätzlich ist der Laser bereits fester Bestandteil in vielen Fertigungsstraßen der Automobilhersteller. Beim Laserschweißverfahren fügt die energiereiche Lichtquelle Stahl- und Blechteile mit einer Geschwindigkeit von über 5 Metern pro Minute und lässt aufgrund ihrer geringen Wärmeeinbringung Nacharbeiten fast überflüssig werden. Das Ergebnis sind durchgehende Schweißnähte und eine daraus resultierende hohe Verbindungssteifigkeit.

Die Vorteile der lasergestützten Verfahren resultieren aus der geringen Wärmemenge, die in das Werkstück eingebracht wird. Die für den Fügeprozess benötigte Energie kann im Bereich von Zehntel Millimetern gezielt am Wirkort appliziert werden. Umliegende Bereiche werden nur gering thermisch belastet, dies steht im Gegensatz zu anderen Wärmequellen, wie z. B. dem Lichtbogen oder der Flamme, und ist besonders im Hinblick auf die Verwendung von Stählen mit mehrphasigen Gefügen und Leichtmetallen von großer Bedeutung. Mehrphasige Stähle sind aufgrund ihrer Struktur auf wärmearme Verfahren angewiesen, damit die eingepprägten Eigenschaften auch nach einer Fügeoperation insbesondere in der wärmebeeinflussten Zone beibehalten werden. Ferner ist durch den reduzierten Energieeintrag eine deutliche Verminderung der thermisch bedingten Verzüge zu verzeichnen, die oftmals erheblichen Nacharbeitsaufwand erfordern. Weitere Vorteile liegen in der Berührungslosigkeit der Laserverfahren.

Laserstrahlung wird bei Metallen an der Oberfläche absorbiert und bei Wellenlängen im Infrarot-Bereich - Dioden-, Nd:YAG- und CO<sub>2</sub>-Laser emittieren in diesem Wellenlängenbereich - in Wärme umgewandelt. Diese Wechselwirkung erlaubt es, unterschiedliche thermische Prozesse durchzuführen. Zu diesen Prozessen gehören aus dem Bereich des Fügens das Tiefschweißen, das Wärmeleitungsschweißen, das Löten sowie das laserinduzierte Diffusionsschweißen. Vorteilhaft ist, dass der Laserstrahl auf sehr kleine Wirkdurchmesser von deutlich kleiner als 0,5 mm fokussiert werden kann. Somit ist eine gezielte, lokal eng begrenzte Energieeinbringung möglich, die zu sehr kleinen Fügezonen, kurzen Temperatur-Zeit-Zyklen und vor allem zu geringen Ausdehnungen von wärmebeeinflussten Zonen führen. In Abhängigkeit von der auf die Oberfläche wirkenden Leistungsdichte sind unterschiedliche Prozesse möglich.

Beim Laserschweißen unterscheidet man zwei wesentliche Prozesse, das *Wärmeleitungsschweißen* und das *Tiefschweißen*, Bild 11.



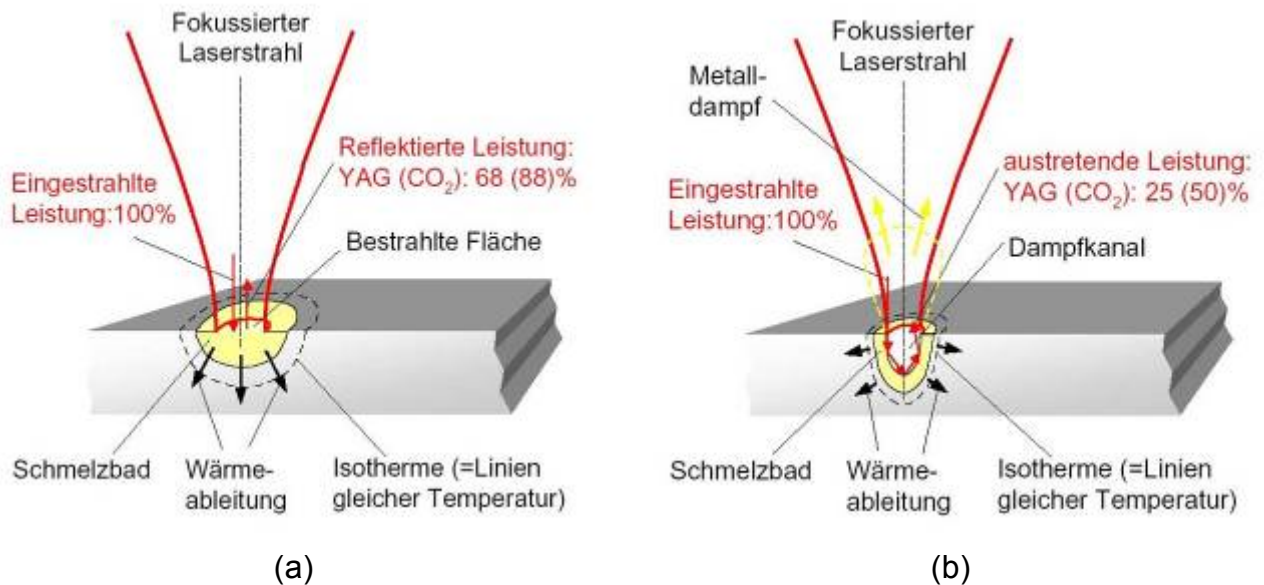


Bild 11: Prinzip des Laserstrahlschweißens; a) Wärmeleitungsschweißen; b) Tiefschweißen [46]

Das Wärmeleitungsschweißen ist ein Prozess, bei dem aufgrund der Wechselwirkung des Lasers mit dem Werkstoff bei Leistungsdichten unterhalb von  $10^6$  W/cm<sup>2</sup> (bezogen auf Stahl) Wärme entsteht, die zu einer Schmelzbadausbildung führt. Dieses Schmelzbad entsteht dadurch, dass dem Prozess mehr Energie zugeführt wird, als über die Wärmeleitung abgeführt werden kann. Bei einem stabilen Wärmeleitungsprozess wird mit dem Aufschmelzen ein Gleichgewichtszustand zwischen eingestrahelter und abgeleiteter Energie eingestellt. Die erstarrte Schmelze verbindet die Materialien. Die Einschweißiefen für dieses Verfahren liegen typischerweise bei  $< 1$  mm. Die Schmelzbadgeometrien sind in ihren Proportionen vergleichbar mit Schmelzbädern der Verfahren Mikroplasma und WIG, in ihrer Größe sind sie jedoch oftmals wesentlich kleiner.

Das Tiefschweißen wird durch eine Leistungsdichtesteigerung auf Werte größer  $10^6$  W/cm<sup>2</sup> erzielt. Charakteristisch für den Effekt ist die mit einer Leistungserhöhung einhergehende, überproportionale Steigerung der Einschweißtiefe ohne deutliche Vergrößerung der Einschweißbreite. Aufgrund der hohen Leistungsdichte wird lokal soviel Energie eingebracht, dass der Werkstoff verdampft und sich eine Dampfkapillare ausbildet.

Der dabei entstehende Dampfdruck im Material erzeugt eine Kapillare mit dem ca. 1,5fachen Durchmesser des Laserstrahlfokus, die mittels des Bewegungssystems in der zu verschweißenden Kontur durch das Material gezogen wird. Der hydrostatische Druck sowie die Oberflächenspannung der Schmelze und der Dampfdruck in der Kapillare stehen im Gleichgewicht, so dass die Kapillare (häufig auch als Keyhole bezeichnet) nicht zusammenfällt. Der einfallende Laserstrahl wird durch Totalreflexion im keyhole tief in das



Material geführt, so dass mit entsprechender Laserleistung heute Einschweißiefen von bis zu 25 mm (Stahl) realisiert werden können.

In dieser Dampfkapillare wird durch einen sprunghaften Anstieg der Absorption beim Phasenübergang flüssig-gasförmig Energie in die Kapillarwände eingekoppelt. Der Tiefschweißeffekt ermöglicht dem Anwender besondere Freiheiten hinsichtlich der Gestaltung *mehrlagiger* Blechstöße, die nur einseitig zugänglich sein müssen. Einschweißiefen bis zu einigen mm sind mit entsprechenden Hochleistungslasern möglich.

Im Vergleich zu anderen Verfahren unterscheidet sich das Laserschweißen durch folgende Eigenschaften:

- ca. 2-10fach höhere Prozessgeschwindigkeit im Vergleich zu MIG, MAG, WIG, Plasma,
- schmale und tiefe Nähte,
- Möglichkeit des einseitigen Schweißens mehrerer Bleche,
- geringe Wärmeeinbringung,
- geringste Verzüge,
- feinkörniges Schweißgut durch schnelle Abkühlung (Selbstabschreckung),
- hohe Festigkeiten,
- Möglichkeit des Schweißens schlecht schweißgeeigneter Werkstoffe sowie
- sehr glatte und feine Oberflächen.

Zunehmend werden Schweißanwendungen heute auch dreidimensional durchgeführt. Stellvertretend dafür sei das Schweißen von Dächern im PKW-Bereich genannt. Die Fokussiereinheit des Lasers wird dabei an einem 6-Achsen Knickarmroboter betrieben, der die entsprechenden Bewegungen im Raum ausführt. Eingesetzt werden vor allem Nd:YAG-Laser, die eine flexible Zuführung des Laserlichtes mittels Lichtleitfasern ermöglichen. Es können aber auch CO<sub>2</sub>-Laser in Kombination mit flexibler Spiegelführung (Flexarm<sup>®</sup>) verwendet werden. Dadurch bedingt lassen sich Karossen fertigen, die z.B. eine deutliche höhere Steifigkeit im Crashfall aufweisen und eine höhere Sicherheit für die Insassen bieten. Weiterhin benötigt eine Laserschweißung grundsätzlich nur eine einseitige Zugänglichkeit, so dass neue Konstruktionen möglich werden, die mittels herkömmlicher Schweißungen (Widerstandsschweißpunkten) nicht zu realisieren sind [47-54].

### **2.3.5 Laserstrahlschweißen von beschichteten Werkstoffen**

Das Laserstrahlschweißen eignet sich aufgrund seiner technischen und wirtschaftlichen Vorteile besonders für das Fügen dünner Blechbauteile. Dies wird einerseits direkt durch

das eigentliche Verfahren, also die hohe Schweißgeschwindigkeit und andererseits indirekt durch die Qualitätssteigerung und Reduzierung von manueller Nacharbeit durch blechebene, verzugsarme Verbindungen erreicht [55]. Bei entsprechender Vorbereitung sind mit moderner Lasertechnik neue konstruktive und fertigungstechnische Lösungen zuverlässig und wirtschaftlich zu verwirklichen. Die Erprobung neuer Technologien in der Fertigung bedingt eine Änderung bestehender bewährter Konstruktionen. Andererseits bereitet sie eine Fülle neuer und wirtschaftlicher Probleme bzw. Aufgabenstellungen [57]. Laserschweißungen werden z.B. im Karosseriebau im Dachbereich, an den Säulen, an Falznähten von Türen und Klappen, an Falzen im Kotflügelbereich, als Stumpfnähte an Platinen für den Karosserieboden und als Nähte an Trägern angewendet. Die Mehrzahl der diskutierten Anwendungen und Stoßarten entspricht dem Überlappstoß in Flanschform, direkt abgeleitet vom Punktschweißflansch oder gleicht diesem zumindest. Dabei ist es oft vorteilhaft, drei oder mehr Bleche an einer Verbindungsstelle zusammenlaufen zu lassen. Hierdurch können sich folgende Vorteile ergeben:

- Verringerung der Anzahl der Schweißungen,
- Schweißbarkeit bei nur einseitigem Zugang,
- geringerer Platzbedarf der Fügestellen,
- durchgängige Verbindung,
- höhere Festigkeit,
- höhere Steifigkeit sowie
- größeres konstruktives Potential durch neue Gestaltungsmöglichkeiten.

Schweißtechnisch bereiten solche Mehrblechverbindungen jedoch einige Probleme, Bild 12, so dass bei Einsatz der Laserstrahltechnik in solchen Fällen derzeit fast ausnahmslos nur zwei Bleche miteinander gefügt werden. Zweischnittige Verbindungen werden also durch zwei einschnittige Verbindungen umgangen. Erschwerend kommt hinzu, dass heute ein erheblicher Anteil der eingesetzten Bleche bereits oberflächenveredelt ist [57]. Diese Schichten, z. B. Zink, verdampfen oder zersetzen sich durch die Schweißwärme und gasen in den Schweißnahtbereich. Bei verzinkten Blechen ist das Laserstrahlschweißen nur begrenzt einsetzbar, da die unterschiedlichen Schmelztemperaturen des Stahlbleches und der Zink-Oberflächenschicht den Schweißprozess negativ beeinflussen.

Weil der Siedepunkt des Zn mit 906 °C erheblich unter dem Schmelzpunkt des Stahls mit 1530 °C liegt, resultieren daraus während des Schweißens eine heftige Zn-Verdampfung und ein Entweichen des Dampfes aus dem Schweißbad. Als Ergebnis entstehen große

Poren im Schweißgut und raue Nahtoberflächen beim Laserschweißen im Überlappstoß [58, 59].

Während des Laserschweißens wird eine Dampfkapillare erzeugt, deren Rand von schmelzflüssigem Stahl umgeben ist. Das als Beschichtungswerkstoff vorhandene Zink befindet sich dann in der Gasphase. Dieses gasförmige Zink führt zum unkontrollierten Verspritzen des schmelzflüssigen Stahls und damit zu Poren und Löchern in der Schweißnaht. Dadurch werden die notwendigen Bauteil- und Nahtfestigkeiten nicht mehr erreicht.

Ferner ist zu verhindern, dass die temperaturempfindlichen Oberflächenschichten zu stark zerstört werden, was sich bereits schon beim Fügen von zwei Blechen als problematisch erweist. Zahlreiche Forschungsarbeiten setzten sich daher schon intensiv mit dieser Problematik beim Zweiblechfügen auseinander und erarbeiteten diesbezüglich Lösungsvorschläge, z. B. in Form geeigneter Prozessführungen auch mit zwei Wärmequellen [60, 61], Pulsverfahren, konstruktiver Nahtgestaltungen, Oberflächenprägungen oder Oberflächentexturierungen, z. B. mit Laserstrahlung und vorherigem Entfernen der Beschichtung im Nahtbereich [62-70].

Für das Fertigen von Mehrblechschweißungen an beschichteten Blechen kam bisher vorrangig das Widerstandsschweißen zum Einsatz [3]. Für das Laserstrahlschweißen fehlen dagegen noch weitgehend gesicherte Erkenntnisse. Hier existieren lediglich grundlegende Untersuchungen, die u. a. im Rahmen des ULSAB-Programms sowie der am ISAF der TU Clausthal durchgeführten Untersuchungen gewonnen wurden. In [71] wird das Fertigen von Dreiblechverbindungen mit dem CO<sub>2</sub>-Laser, jedoch an unbeschichteten Werkstoffen behandelt. Die sich ergebende Problematik bei Verwendung beidseitig verzinkter Stähle wird nur grundsätzlich diskutiert. Im Gegensatz zum Widerstandspunktschweißen erreicht man in [72] mit dem CO<sub>2</sub>-Laser (3,0 kW) qualitativ hochwertige, porenfreie Schweißungen an Zweifachüberlappverbindungen aus 0,7 mm dicken verzinkten Feinblechen, ohne dass eine Schweißvorbereitung (wie das Schleifen zur Entfernung der Zn-Schicht) erforderlich wäre. Das zuunterst liegende Blech ist aber dabei nicht durchgeschweißt, so die gewonnene Erfahrung sich schwer auf Mehrblechverbindungen übertragen lässt.

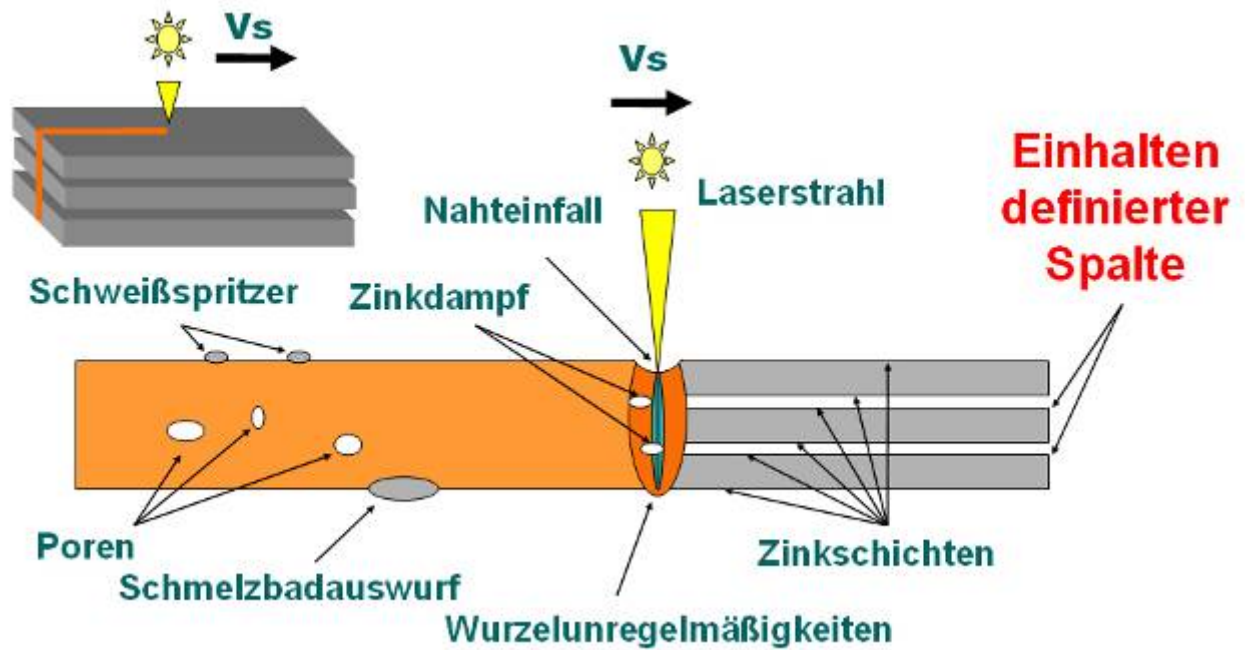


Bild 12: Schematische Darstellung der Probleme beim Laserstrahlschweißen von beschichteten Mehrblechverbindungen

Die aus den Zn-Beschichtungen resultierende Problematik kann bekanntlich durch *einen definierten Spalt zwischen den Blechen*, der den entstehenden Zinkdampf entweichen lässt, z.Z. gelöst werden.

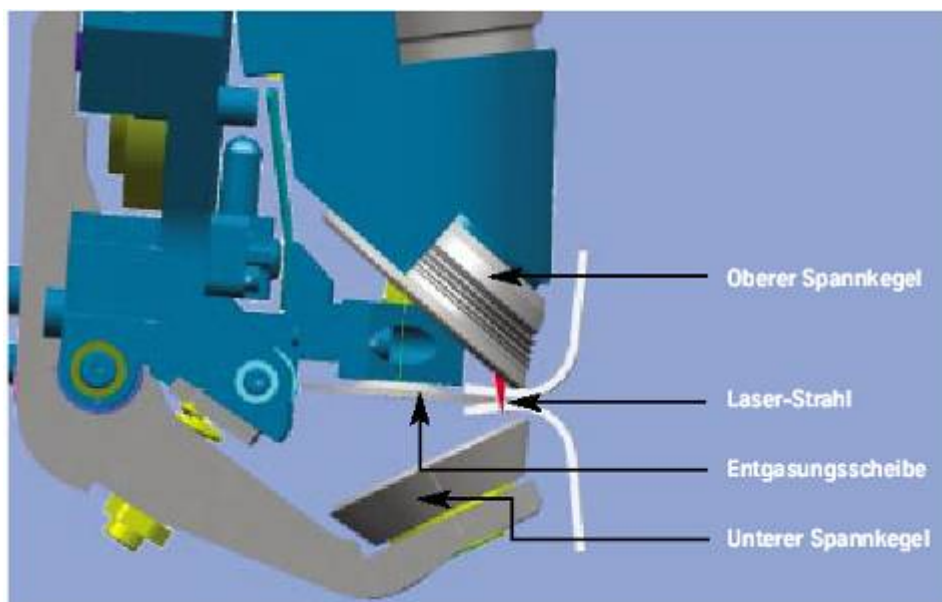
Gute Ausgasungsbedingungen liegen vor, wenn zwischen den Fügepartnern ein Spalt von 0,1 bis max. 0,2 mm vorliegt, der sich während des Schweißens nicht ändert [73-75]. Das verwendete Spannsystem muss folglich gewährleisten, dass die Bleche nicht nur kräftig aufeinander gepresst werden, sondern dass auch der o. g. Abstand zwischen den Blechen konstant bleibt [76]. Die Einhaltung dieser zweiten Forderung ist in der Produktion jedoch nur eingeschränkt möglich. Deshalb werden zur Verbesserung der Zinkentgasung zwischen den Blechen Distanzhalter verschiedenster Ausführungen genutzt, z. B Noppen im Blech der Serienfertigung [77]. Hierbei handelt es sich um Verprägungen in den Bauteilen, die einen konstanten Abstand zwischen den Fügepartnern erzeugen. Dieser Vorgang ist jedoch sehr kostenintensiv und an verschiedenen Bauteilen nicht realisierbar, da die Umformrichtungen nicht mit den Richtungen für die Verprägungen übereinstimmen [78].

Erst mit der von ThyssenKrupp Drauz entwickelten Anordnung der Rollenpaare (oberer und unterer Spannkegel) (Bild 13 a) ist es möglich, das Problem der Zinkentgasung im Schweißbereich zu lösen. Dadurch können die Noppen entfallen. Eine Entgasungsscheibe, die zwischen die Bleche gebracht wird, formt die Flansche so, dass

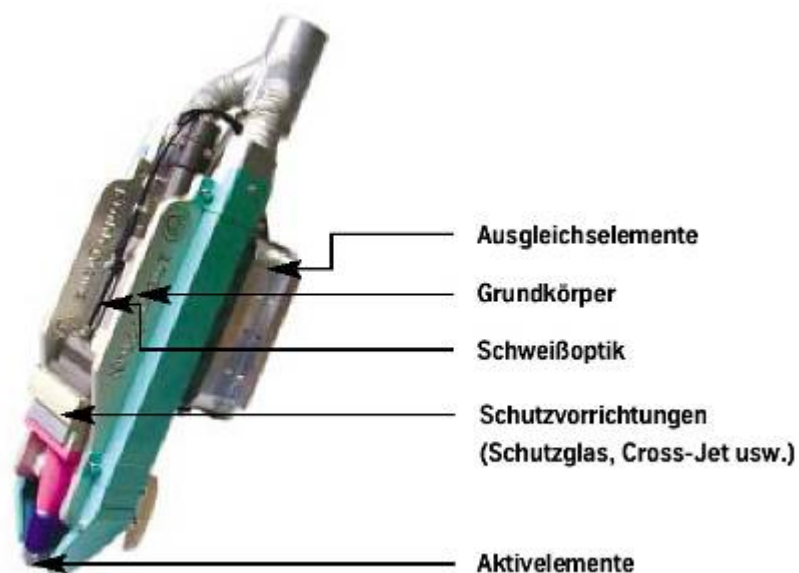
eine „Entgasungsschräge“ entsteht. Die feste Zuordnung von Spannkegel, Entgasungsscheibe und auftreffendem Laserstrahl sichert dabei eine reproduzierbare Fügegeometrie und damit eine konstante Qualität der Schweißnähte. Der modulare Aufbau des Systems ermöglicht die Anbindung an verschiedenste Robotertypen und die Anpassung an unterschiedliche Fügegeometrien. So sind einseitig zugängliche Flansche, die häufig im Bodenbereich von Fahrzeugen vorkommen, genauso schweißbar wie zweiseitig zugängliche Geometrien, wie sie im weiteren Fahrzeugaufbau dominieren. Die Komponentenbauweise aus Grundkörper, Optik, Schutzvorrichtungen, Aktivelementen, Ausgleichselementen (Bild 13 b) sowie dem Entgasungswerkzeug erleichtert die Übersichtlichkeit des Laserschweiß- und Spannsystems in der Anwendung für verschiedenste Laserschweißaufgaben.

Schweißgeschwindigkeiten bis zu 5 m/min können in der Produktion umgesetzt werden. Insbesondere der Einsatz bei Türeinstiegen von Karosserien und bei Fensterflanschen hat sich als vorteilhaft erwiesen. Aber auch Flansche im Unterbodenbereich können durch den modularen Aufbau des Laserschweiß- und Spannsystems für den Karosserierohbau mittels Laser verschweißt werden. Damit ergibt sich ein weites Spektrum von Anwendungsfällen im Karosseriebau. Im Serieneinsatz sind bisher 2-Blech-Verbindungen sicher verschweißt worden. Zukünftig wird die Bedeutung von 3-Blech-Verbindungen ansteigen. Diese ebenfalls mit integrierter Entgasung und Rollspanntechnik schweißen zu können, ist das Ziel weiterer Entwicklungen.

Im Serieneinsatz unterliegt das o.g. System verschiedensten Belastungen. Durch die Nähe der Spannkegel zur Schweißnaht entstehen hohe thermische Beanspruchungen. Das Zusammenpressen der Bleche muss zum Teil mit sehr hohen Kräften erfolgen, so dass hohe Reibungs- und Lagerungsbelastungen entstehen. Nicht zu vernachlässigen sind Dämpfe und Schweißspritzer, die beim Schweißen unvermeidlich sind. Die Entwicklungen konzentrierten sich auf die einzusetzenden Werkstoffe sowie auf vorteilhafte Konstruktionen für die unterschiedlichen Komponenten, um die Lebensdauer von Verschleißteilen sowie die Wartungsfreundlichkeit auf ein Maximum zu erhöhen. So konnte durch die Ermittlung der Belastungsfälle der Entgasungsscheibe und der Spannkegel eine Konstruktion erstellt werden, die die Lebensdauer praktisch verdoppelte [77]. Nachteilig bei o.g. Spannsystem sind hohe Wartungskosten und begrenzte Lebensdauer im Vergleich zum kompletten Lasersystem.



(a)



(b)

Bild 13: Das moderne Laserschweiß- und Spannsystem: a) Detailansicht; b) Komponenten [78]

Es ist auch ein Verfahren zum Vorbereiten der Fügebereiche beschichteter Werkstücke zum Schweißen mit Laserstrahlung und Überlappstoß zum Schweißen beschichteter Werkstücke bekannt, bei dem im Bereich der Schweißnaht rändelungsartig angeordnete, zwischen benachbarten Werkstückoberflächen Abstand schaffende Oberflächenstrukturen hergestellt werden. Durch den Verdampfungsvorgang wird ein Mikrokanal mit steilen Flanken gebildet, so dass der Mikrokanal schmal und/oder kurz sein kann und trotzdem in der Lage ist, entweichenden Beschichtungsdampf aufzunehmen

oder weiter zu leiten. Solcherweise werden Mikrokanäle in die Werkstückoberflächen eingearbeitet, die als Puffervolumen oder Gaskanal für den verdampften Beschichtungswerkstoff dienen, so dass der entstehende Beschichtungsdampf nicht durch die Schmelze der Schweißnaht entgasen muss [79, 80]. Dieser Vorgang ist jedoch für dreidimensional ausgebildete benachbarte Werkstückoberfläche schwer realisierbar und sieht in der Produktionseinführung einen zusätzlichen Arbeitsschritt vor. Die hohe Rauheit der zu schweißenden beschichteten Oberflächen kann sich auch positiv auf die Schweißergebnisse auswirken [81].

In [82] wird berichtet, dass der Spalt zwischen den zu schweißenden überlappenden Blechen durch einen Laserstrahl erzeugt werden kann. Die Unterseite des oben liegenden Bleches wird durch die Laserwärme örtlich leicht verformt, so dass gute Entgasungsbedingungen für den zweiten schweißenden Laserstrahl entstehen. Der Spalt ist dabei aber nicht einstellbar, um stabile gute Schweißergebnisse gewährleisten zu können.

Das fehlerfreie Laserstrahlschweißen von verzinkten Überlappnähten ist auch in der Raumposition PF (vertikal) möglich [83]. Der Zinkdampf wird dabei über das Schweißbad abtransportiert, man erreicht so gute Entgasungsbedingungen in der Schweißzone. Die lokale Ni-Beschichtung der verzinkten Bleche in den lokal entzinkten zu schweißenden Bereichen führt zu positiven Schweißergebnissen unter Beibehaltung eines guten Korrosionswiderstandes der geschweißten Verbindungen [84]. In [85, 86] erzielt man gute Schweißergebnisse an verzinkten Überlappstößen beim Laserschweißen in verformten Bereichen, z.B. neben einer Blechbiegung, da in solchen Fällen gute Entgasungsbedingungen vorliegen.

In der SLV Rostock gemeinsam mit BIAS Bremer wurden erste Untersuchungen zum Einsatz eines 6,9 kW Faserlasers beim Schweißen von elektrolytisch verzinkten Blechen im Dreifachüberlappstoß der Stahlsorte DC04 mit der Blechdicke 1,5...2,0 mm abgeschlossen. Für das Erzielen positiver Schweißergebnisse war es notwendig, das Einhalten eines definierten Spaltes von 0,3 mm einzustellen, Bild 14 a) [88].

Im ISAF der TU Clausthal wurden entsprechende Untersuchungen zum Hochleistungs-Laserstrahlschweißen von Dreifachüberlappverbindungen an oberflächenveredelten Dünoblechen durchgeführt [87]. Auch hier erwies sich als Hauptproblem die Zn-Verdampfung zwischen den Blechen und das daraus resultierende Auftreten von Schmelzbadauswürfen oder Poren. Grundsätzlich war es möglich, entsprechende Verbindungen herzustellen, Bild 14 b). Dies erforderte jedoch die Einhaltung eines sehr

eng begrenzten Parameterfensters sowie sehr geringer Spalttoleranzen, was für eine Serienfertigung ungeeignet ist.

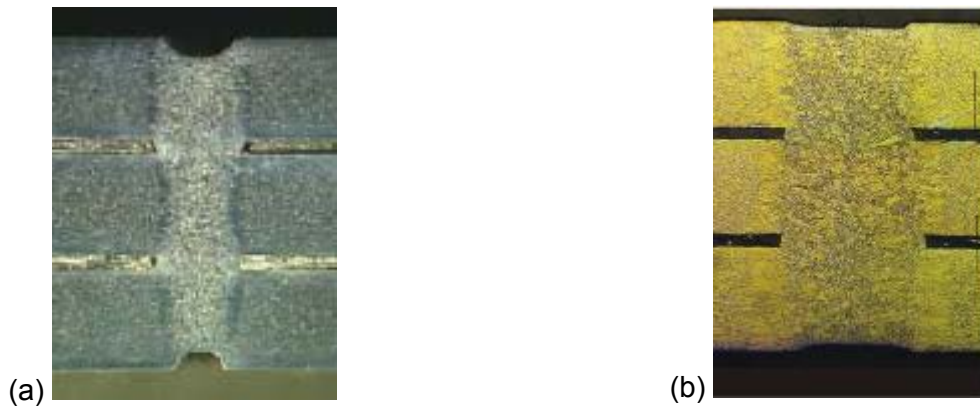


Bild 14: Makroaufnahmen von Dreiblechverbindungen an Tiefziehstählen [87, 88]:  
a) Faserlaser; b) Nd:YAG-Laser

Die Zugproben dieser Dreiblechverbindungen - gezogen wurde an den beiden äußeren Blechen, was eine sehr ungünstige Schälspannung zur Folge hat - erreichten Bruchspannungen von bis zu 250 N/mm<sup>2</sup>. Die Bruchflächen dieser Proben wiesen jedoch Fehler auf, die insbesondere bei Schwing- und dynamischer Belastung Ausgangspunkte für das Bauteilversagen darstellen könnten.

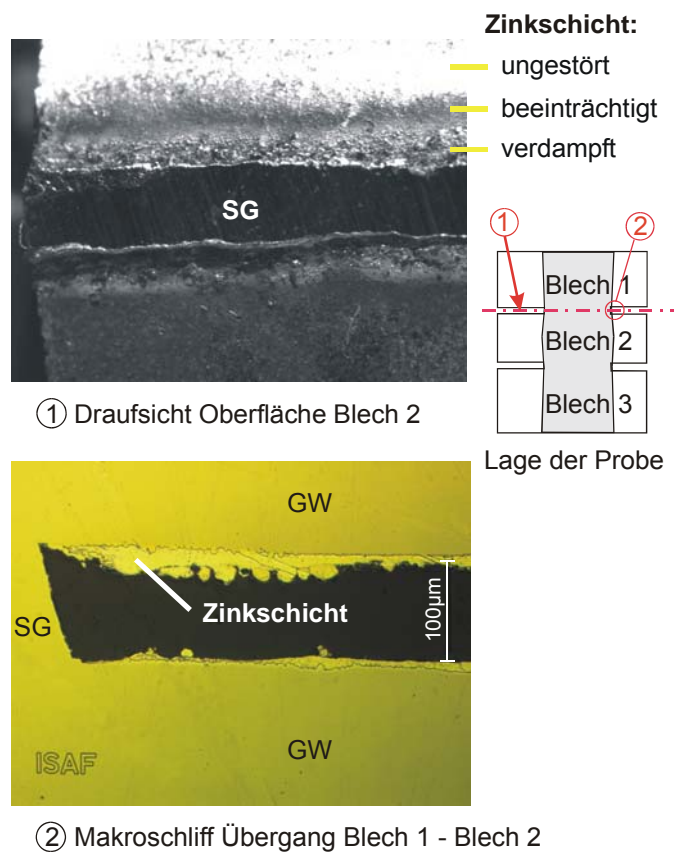


Bild 15: Detailaufnahme einer Oberfläche zwischen zwei Blechen [87]



Neben dem Prozessverhalten und den mechanisch-technologischen Eigenschaften ist auch das Korrosionsverhalten der Verbindungen von großer Bedeutung. Als Beispiel für einen problembehafteten Bereich ist die Beeinträchtigung der Zn-Beschichtung zwischen den Blechen zu nennen (Bild 15). Hier spielt für die mechanisch-technologischen Gütewerte die Einstellung einer guten Anbindung mit geringer Kerbwirkung und für die Korrosionsbeständigkeit der Erhalt der kathodischen Schutzwirkung eine große Rolle.

### **3 Schlussfolgerungen und Erarbeiten der Aufgabestellung**

---

Die ausgewertete Fachliteratur zum Laserschweißen von beschichteten Mehrblechstößen dokumentiert den noch unvollkommenen Kenntnisstand zu diesem Thema.

Da die bisher vorliegenden Erkenntnisse nicht ausreichen, die Fehlstellen im Prozess vermeiden zu können, besteht die Notwendigkeit, weiterführende Untersuchungen zur Minimierung des Schweißaufwandes sowie zur Senkung der Toleranzempfindlichkeit zu realisieren.

Die Automobilindustrie sieht ein sehr großes Marktpotenzial in der Einführung des Laserverfahrens in die Produktion. Seitens der Automobilindustrie gibt es gegenwärtig eine große Nachfrage an Schweißverfahren, die ein wirtschaftliches Fügen von beschichteten Mehrblechverbindungen gewährleisten. Gesicherte und wirtschaftliche Schweißtechnologien müssen entwickelt werden, weil sich so das enorme Potential in den o. g. Bereichen voll umsetzen lässt. Nur auf dieser Basis kann das Schweißen mit Laserstrahlung auch im Mehrblechbereich eine rationelle Alternative zu konventionellen Verfahren bieten.

Zum Schweißen von ZE-Mg beschichteten Blechen im Dreifachüberlappstoss existieren noch keine Erkenntnisse. Mit dieser Beschichtung sind Grundlagenuntersuchungen erforderlich, bei denen mögliche Vorteile gegenüber den konventionellen Verzinkungen erarbeitet werden sollen.

Hierbei sollen zuerst die metallurgischen und werkstoffkundlichen sowie verfahrenstechnischen Vorgänge beim Fügeprozess untersucht und, darauf aufbauend, konstruktive Grundlagen und Kriterien für die Auslegung und Durchführung von qualitativ hochwertigen Schweißverbindungen an Mehrblechstößen abgeleitet werden. Als Ergebnis sollen dem Anwender Richtlinien und Vorgaben zur Verfügung gestellt werden, die es ihm ermöglichen, mit Hilfe der Hochleistungslasertechnik innovative Lösungen mit Mehrblechschweißungen zu verwirklichen.

Das Ziel der Arbeit besteht deshalb darin, aufbauend auf grundlegenden experimentellen Untersuchungen wissenschaftliche Grundlagen und technologische Voraussetzungen für das Schweißen von Mehrblechverbindungen mit der Hochleistungslasertechnik zu realisieren, wobei insbesondere oberflächenveredelte Bleche zum Einsatz kommen sollen. Grundlegendes Kriterium bildet die Gewährleistung eines ruhigen Prozessablaufs bei ausreichender Abfuhr der gasförmigen Beschichtungsbestandteile. Als Stoßart ist der Dreifachüberlappstoß zu untersuchen. Aus wirtschaftlich-technologischen Gründen ist anzustreben, mit technischem 0-Spalt ohne Einsatz von Zusatzwerkstoff zu schweißen.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt auf der Grundlage der aufgenommenen Prozessdaten sowie von durch visuelle, messtechnische und metallographische Bewertungen der Proben.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse ist eine Technologie zu entwickeln, die eine qualitätssichere Herstellung von Mehrblechverbindungen aus beschichteten bzw. verzinkten Feiblechen unter Einsatz der Hochleistungslasertechnik ermöglicht. Folgende Aufgaben sollen deshalb im Resultat der mit der Standrecherche aufgezeigten Erfordernisse gelöst werden:

- I. Erarbeiten von optimalen, dem jeweiligen Werkstofftypenvertreter angepassten Schweißbedingungen für ein zuverlässiges und produktives Hochleistungslaserschweißen der ausgewählten Werkstoffe sowie Erhöhung der Prozesssicherheit und Minimierung bzw. Vermeidung von Nahtfehlern (Nahteinfall, Risse, Poren):
  - Auswählen der optimalen Laserstrahlquelle (Nd:YAG-, CO<sub>2</sub>-Laser)
  - Erprobung ergänzender Strahlmanipulation (Doppelfokustechnik, rotierende Optik, Strahlpolarisation, Pulsierung des Strahles) sowie des Einsatzes von Schutzgasen beim Festkörperlaser-schweißen
- II. Ermitteln des Einflusses verschiedener Versuchs- sowie Prozessparameter
  - Einfluss der Spannbedingungen
  - Einfluss der Beschichtungslage im Dreifachüberlappstoß
  - Einfluss der Schutzgase
- III. Beschreibung der beim Hochleistungslaserschweißen von Dreifachüberlappverbindungen durchgängigen Prozesse sowie Entwicklung eines entsprechenden qualitativen theoretischen Prozessmodells
- IV. Vergleich der Eigenspannungszustände der geschweißten Dreifachüberlappstöße mit denen der Zweifachüberlappstöße mittels röntgenographischer Spannungsanalyse.
- V. Prüfen und Bewerten der Qualität von hochleistungslasergeschweißten Dreifachüberlappverbindungen:
  - Ermitteln der Schweißverbindungsqualität und Aufdecken der inneren und äußeren Nahtunregelmäßigkeiten mit Hilfe der metallographischen Analyse sowie der Durchstrahlungsprüfung,
  - Prüfen der mechanisch-technologischen Gütewerte durch Bestimmung der statischen Festigkeit und Schwingfestigkeit
  - Durchführen von Korrosionsuntersuchungen

## **4 Versuchsbedingungen und Arbeitsprogramm**

---

### **4.1.1 Elektrolytisch beschichtete Tiefziehstähle (DIN EN 10130/ 10132)**

Es wurden folgende elektrolytisch beschichtete Werkstoffe eingesetzt:

- DC04+ZE 75/0, einseitig elektrolytisch verzinkt, s=0,9 mm
- DC04+ZE 75/75, beidseitig elektrolytisch verzinkt, s=0,9 mm
- DC06 ZE-Mg 35/35, s=1,0 mm

Bei den Tiefziehstählen DC04+ZE und DC06+ZE (Tabelle 3 und Tabelle 4) handelt es sich um elektrolytisch verzinkte kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus Stahl, die je nach Stahlgüte Kohlenstoffgehalte von max. 0,02 bis max. 0,12 % besitzen. Lediglich die so genannten Spezialtiefziehstähle, wie der DC06+ZE sind vakuumentkohlt und zur vollständigen Abbindung von Kohlenstoff und Stickstoff mit Ti und/oder Nb legiert. Sie sind folglich frei von den "Zwischengitteratomen" C und N, da diese als Ti/Nb-Karbonitride abgebunden werden. Diese Spezialtiefziehstähle, die auch als IF-Stähle bezeichnet werden, weisen unter allen Kaltumformstählen die besten Umformeigenschaften auf, sind alterungsbeständig und haben keine ausgeprägten Streckgrenzen. Die genannten Stahlsorten zum Kaltbiegen und Tiefziehen sind für die verschiedenartigsten Kaltumformungen bestimmt und für hohe Umformansprüche geeignet. Sie werden dort eingesetzt, wo die Verformungseigenschaften wichtiger als die Festigkeiten sind. Typische Anwendungsbereiche ergeben sich daher für die Automobilindustrie, den Tiefziehbereich, das Bauwesen und die Herstellung von Profilen und Rohren.

Beide genannten Stähle besitzen eine gute Schweißbarkeit, die sich vor allem aus ihren niedrigen Kohlenstoff- und Mangangehalten ableitet, da sie einer zu hohen Aufhärtung in der WEZ entgegenwirken. Sie lassen sich sowohl mit höherfesten als auch mit anderen unlegierten Stählen sehr gut verschweißen. Obwohl diese Stähle als uneingeschränkt schweißgeeignet gelten, müssen im Falle verschiedener Oberflächenbeschichtungen verfahrensspezifische Anpassungen durchgeführt werden [89].

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung der Tiefziehstähle DC04 und DC06 nach EN10130; EN 10139 [90]

WNR./Bezeichnung	Elemente in Gew.-%									
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	N	Cu
1.0338/DC04	Rest	≤ 0,08	-	≤ 0,40	0,030	0,030	-	-	-	-
1.0873/DC06	Rest	≤ 0,02	-	≤ 0,25	0,020	0,020	-	≤ 0,30	-	-

Tabelle 4: Mechanisch-technologische Eigenschaften der Tiefziehstähle DC04 und DC06 [91, 92]

WNR./Bezeichnung	Wärmebehandlung	R <sub>p02</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	A <sub>80</sub> [%]
1.0338/DC04	ungeglüht	140-210	270-350	38
1.0873/DC06	ungeglüht	120-180	270-350	38

#### 4.1.2 Schmelztauchverzinkter Tiefziehstahl

Als Vertreter schmelztauchverzinkter Tiefziehstähle wurde der Werkstoff DX53D+Z, s=1,0 mm verwendet (Tabelle 5 und Tabelle 6). Er gehört zur Gruppe der weichen Stähle zum Kaltumformen.

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung des Tiefziehstahles DX53D nach EN10142 [93]

WNR./Bezeichnung	Elemente in Gew.-%									
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	N	Cu
1.0355/DX53D	Rest	≤ 0,03	-	0,30	0,030	0,035	0,02	0,125	0,006	-

Tabelle 6: Mechanisch-technologische Gütwerte des Tiefziehstahles DX53D nach EN10142 [94]

WNR./Bezeichnung	Wärmebehandlung	R <sub>e</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	R <sub>m</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	A <sub>80</sub> [%]
1.0355/DX53D	spannungsarm	140-260	270-380	≥30

#### 4.1.3 Zum Kaltumformen geeigneter höherfester Stahl

Zur Gruppe der härtesten IF-Stähle zählt der Stahl H220Y (Tabelle 7 und Tabelle 8). Im Vergleich zu den anderen Versuchswerkstoffen weist dieser Stahl eine höhere Streckgrenze auf. Aufgrund der chemischen Zusammensetzung und der Herstellungsbedingungen des Stahles ergeben sich, gemessen an den höheren Streckgrenzenwerten, dennoch gute Kaltumformeigenschaften. Alle Stähle dieser Serie haben einen niedrigen Kohlenstoffgehalt (max. 0,1% nach DIN EN 10268) und sind

besonders beruhigt. Bezogen auf den Lieferzustand beruhen die höheren Streckgrenzwerte bei allen Stählen dieser Gruppe auf einer Kornfeinung ( $G \geq 9$  nach Euronorm 103-71) in Verbindung mit einer Mischkristallverfestigung. Diese Stähle eignen sich sowohl für elektrolytische als auch für eine Schmelztauchverzinkung.

Die verwendeten Bleche dieses Stahles waren mit einer ZE-Mg Schicht versehen (H220Y+ZE-Mg 35/35).

Der verwendete Stahl besitzt eine ferritische Matrix ohne interstitiell gelöste Kohlenstoff- oder Stickstoffatome (Abbindung über Mikrolegierungselemente; P und Mn zur Festigkeitseinstellung). Er verfügt über eine gute Umformbarkeit auch bei schwierigen Ziehteilen mit hohen Streck- und Tiefziehbeanspruchungen im unteren Festigkeitsbereich (z.B. Tür-Innenseite, Radhaus etc.), Tabelle 8 [95].

Mikrolegierte Stähle mit und ohne Verzinkung sind mit den im Karosseriebau üblichen Verfahren und Ausrüstungen sehr gut schweiß- und lötbar (außer Flammlöten). Bei verzinkten Blechen muss beim Laserstrahlschweißen durch bauteilabhängige, konstruktive Maßnahmen das Ausgasen des Zinkdampfes aus dem Schweißbereich gewährleistet werden [3].

Tabelle 7: Chemische Zusammensetzung des kaltgewalzten IF-Stahles mit hoher Streckgrenze H220Y nach EN10268 [96]

WNr./Bezeichnung	Elemente in Gew.-%									
	Fe	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	N	Cu
1.0923/H220Y	Rest	0,01	0,10	0,90	0,080	0,025	0,020	0,120	-	-

Tabelle 8: Mechanisch-technologische Eigenschaften des kaltgewalzten Stahles mit hoher Streckgrenze H220Y LA nach EN10268 [94, 95]

WNr./Bezeichnung	Wärmebehandlung	$R_{p02}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A_{80}$ [%]
1.0923/H220Y	ungeglüht	220-270	350-420	34

## 4.2 Gerätetechnik

### 4.2.1 Diodengepumpter Festkörperlaser DY 044

Für die Schweißuntersuchungen mit dem Festkörperlaser kam als Strahlquelle der diodengepumpte Festkörperlaser Rofin DY 044 zum Einsatz. Durch die Weiterentwicklung der Hochleistungsdiodenlaser und der damit verbundenen Senkung des Preisniveaus der Dioden, stellen diodengepumpte Nd:YAG-Laser eine Alternative zum lampengepumpten Laser dar. Die Pumpquellen (Dioden) weisen eine etwa 10fach höhere Lebensdauer auf,

womit sich deutlich verlängerte Wartungsintervalle ergeben. Bedingt durch die bessere Abstimmung der Diodenemission auf die Absorption des Nd:YAG-Kristalls ergibt sich mit rund 10 % ein höherer Gesamtwirkungsgrad bei Ausgangsleistungen der Strahlquellen bis 6 kW. Aufgrund einer deutlich besseren Strahlqualität ergeben sich Vorteile im Bereich einer geringen Wärmeeinbringung durch einen kleinen Fokussdurchmesser und eine höhere Flexibilität durch eine größere Schärfentiefe [97].

Der Rofin DY 044 (Bild 16) hat eine Ausgangsleistung von 4,4 kW. Er zeichnet sich durch eine gute Strahlqualität von 12 mm\* $mrad$ , einen hohen Wirkungsgrad und eine Diodenlebensdauer von über 10.000 Betriebsstunden aus. Hauptanwendungsgebiete der DY-Baureihe, die Strahlquellen im Leistungsbereich von 0,5 bis 6 kW umfasst, sind das Schweißen von Karosserieteilen und das Schneiden von Innen-Hochdruck-Umgeformten (IHU) Bauteilen. Grundsätzlich sind pro Festkörperlaser bis zu sechs Lichtleitfasern und damit bis zu sechs verschiedenartige Prozessstationen möglich [98].



Bild 16: Diodengepumpter Festkörperlaser DY 044 der Fa. Rofin

Über folgende Parameter verfügt die genutzte Laserstrahlquelle:

- Laserausgangsleistung: 4,4 kW
- Wellenlänge: 1064 nm
- Faserkerndurchmesser:  $\varnothing$  400  $\mu$ m
- Bearbeitungsbrennweiten:
  - Kollimator: 120 mm, 160 mm, 200 mm
  - Fokussierung: 120 mm, 200 mm

#### 4.2.2 Axial schnellgeströmter CO<sub>2</sub>-Laser TLF 12000 turbo

Für die Schweißuntersuchungen mit dem Gaslaser wurde der CO<sub>2</sub>-Laser TLF 12000 der Fa. Trumpf eingesetzt. Die TRUMPF-TLF-Laseraggregate zeichnen sich durch höchste Zuverlässigkeit und hohe Wirtschaftlichkeit aus. Modernste magnetgelagerte,

wartungsfreie Turboradialgebläse bieten höchste Effizienz bei der Gasumwälzung und damit die optimale Kühlung und einen hohen Wirkungsgrad. Die TLF-Laserbaureihe ist modular aufgebaut und basiert auf einem skalierbaren Konzept. Die hohe thermomechanische Stabilität ihrer Resonatoren erlaubt den Einsatz in nahezu beliebiger industrieller Umgebung.

Der TLF12000 turbo-CO<sub>2</sub>-Laser der Fa. Trumpf (Bild 17) verfügt über folgende Parameter:

- Laserausgangsleistung: 12,5 kW
- Wellenlänge: 10,6 μm
- Rohstrahldurchmesser: ø 36,4 mm  
(zirkular polarisiert)
- Bearbeitungsbrennweiten:
  - Fokussierung: 250 mm, 300 mm
  - K-Zahl = 0,19 bei 10 kW, F = 300 mm
  - Twin-Spot verfügbar



Bild 17: Axial schnellgeströmter CO<sub>2</sub>-Laser TLF12000 turbo der Fa. Trumpf

Zirkulare Polarisation des Strahles bedeutet, dass der Feldstärkevektor mit hoher Frequenz um die Ausbreitungsrichtung rotiert. Dadurch ist die Absorption im Werkstoff unabhängig von der Vorschubrichtung. Dieser Polarisationszustand wird durch speziell beschichtete Spiegel erreicht.

#### 4.2.3 Diffusionsgekühltes CO<sub>2</sub>-Slab-Lasersystem DC035

Für ergänzende Schweißuntersuchungen wurde ein CO<sub>2</sub>-Slab-Laser eingesetzt. Neben den geströmten Systemen, wo dem Gaskreislauf im Resonator ständig frisches Resonatorgas zugeführt werden muss, stellen CO<sub>2</sub>-Laser mit plattenförmiger Resonatorgeometrie, die so genannten „Slab-Laser“, eine in der Materialbearbeitung etablierte Weiterentwicklung umströmter CO<sub>2</sub>-Laser dar. Die Ausgangsleistungen dieser Laser reichen bis etwa 5 kW. Das Funktionsprinzip des Slab-Lasers gestattet einen kompakten Aufbau der Strahlquellen, den Wegfall der Gasumwälzung und externen Gasversorgung bei minimalem Gasverbrauch in Verbindung mit einer sehr guten Strahlqualität und verringertem Serviceaufwand, Bild 18 [99].

Die im Laserkopf integrierte Gasflasche reicht für ca. 15 Monate Dauerbetrieb. Dazu kommen beste Strahlqualität und deutlich verringerter Serviceaufwand.

Die DC-Baureihe zeichnet sich durch extrem gute Fokussierbarkeit, sehr kompakte Bauweise und geringe Betriebskosten, vor allem beim Energie- und Lasergasverbrauch



sowie den Wartungskosten aus. Die Bezeichnung Slab-Laser bezieht sich auf den speziellen Aufbau des Resonators (Slab = Platte). Mit der sehr guten Fokussierbarkeit ( $K$ -Zahl  $> 0,9$ , d.h. nahe dem physikalischen Maximum  $K = 1$ ) lässt sich die Schweißnahtgeometrie exakt auf die Anforderungen des Werkstücks abstimmen. Es sind damit sowohl sehr schlanke, tiefe Schweißnähte mit minimalem Wärmeeintrag als auch breitere Schweißnähte herstellbar. Damit können auch bei längeren Brennweiten die Schweißoptiken wirksam gegen Schweißspritzer geschützt werden. Diffusionsgekühlte Laser weisen einen extrem niedrigen Lasergasverbrauch auf. Zugeführt wird ein vorgemischtes Premix-Gas aus einer Lasergasflasche, welches lediglich im Rahmen der Regelwartung erneuert werden muss. Es entfällt somit die bei anderen Lasern mit einer Betriebsunterbrechung verbundene Bereitstellung von hochreinen Lasergasen [100].

Beim Slab-Laser bilden der vordere und der hintere Metallspiegel den optischen Resonator. Zwischen den wassergekühlten Elektrodenplatten erfolgt die Anregung des Lasergases mittels Hochfrequenz. Die bei der Anregung entstehende Wärme wird von den Elektrodenplatten aufgenommen (Diffusionskühlung) und über das Kühlwasser abgeleitet. Eine Gasumwälzung durch ein Gebläse zum Kühlen des Lasergases entfällt. Der aus dem optischen Resonator austretende Strahl erhält durch eine im Laserkopf integrierte Optik seine rotationssymmetrische Form. Die für die Versuche genutzte Slab-Laserstrahlquelle besitzt nachfolgende Parameter:

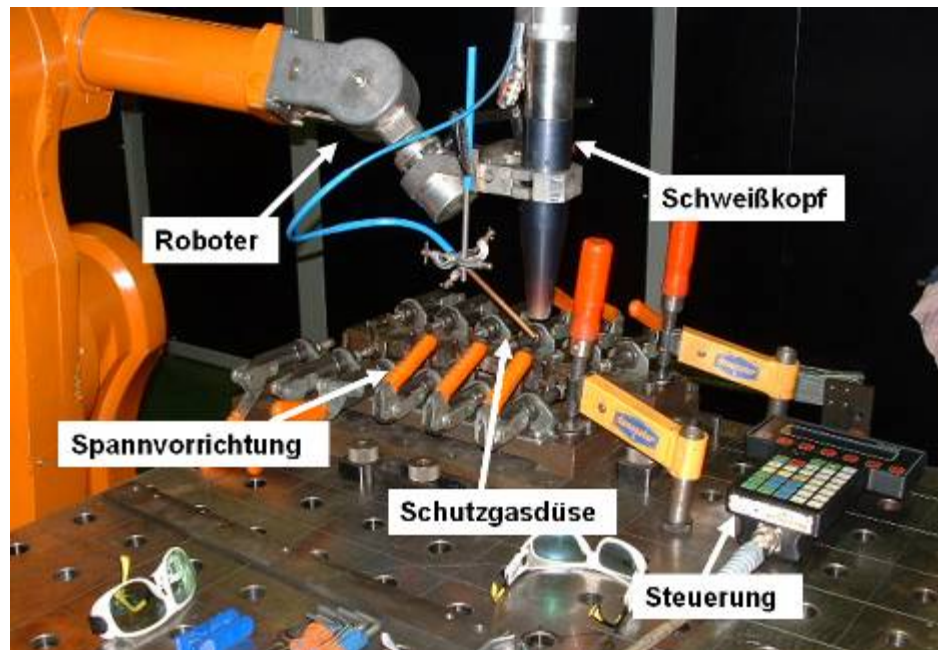
- Laserausgangsleistung: 3,5 kW
- Wellenlänge: 10,6  $\mu\text{m}$
- Rohstrahldurchmesser:  $\varnothing$  20,4 mm  
(linear polarisiert)
- Bearbeitungsbrennweiten:
  - Fokussierung: 250 mm, 300 mm
  - $K$ -Zahl = 0,6 bei 3,5 kW,  $F = 250$  mm
  - Twin-Spot verfügbar



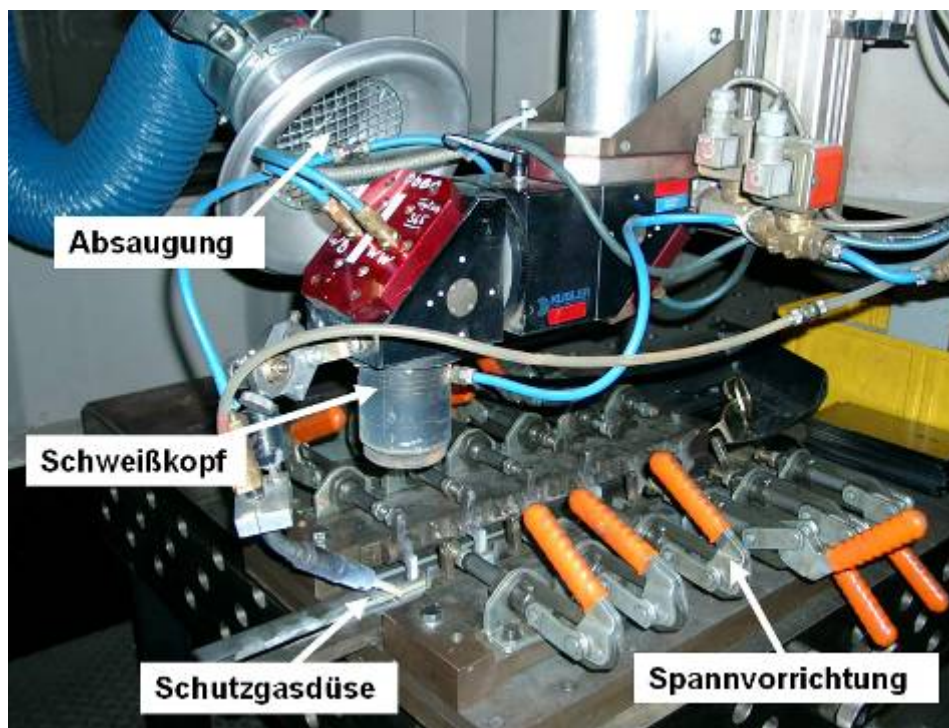
Bild 18: Diffusionsgekühltes CO<sub>2</sub>-Slablasersystem DC035 der Fa. RoFin

### 4.3 Versuchsaufbau zum Schweißen

Die Schweißungen wurden im Versuchsfeld SLV Halle durchgeführt.



(a)



(b)

Bild 19: Schweißstand: a) Nd:YAG-Laserstrahlschweißen; b) CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschweißen

Zur Bewegung des Laserschweißkopfes beim Schweißen mit DY044 diente der 6-Achsenroboter der Firma CLOOS, Bild 19 a). Als Vorschubeinheit beim CO<sub>2</sub>-Schweißen

wurde ein entsprechender Auslegerbalken eingesetzt. Der CO<sub>2</sub>-Laserschweißstand ist im Bild 19 b) dargestellt.

Für das Fixieren und Spannen der Schweißproben dienten in Abschnitt 5.1 beschriebene Spannsysteme. Die Spannleisten gewährleisteten dabei eine konstante Anpressung der zu schweißenden Probe über die gesamte Breite. Für die Gasversorgung kamen handelsübliche Druckgasflaschen zum Einsatz. Die Menge des Schutzgases war über Rotameter des Druckminderers an der verwendeten Schutzgasflasche einstellbar.

### **4.4 Versuchsprogramm**

Die geplanten Untersuchungen wurden in der Schweißposition PA durchgeführt. Als primäres Qualitätskriterium der Schweißverbindungen waren die Nahtgeometrie bzw. das Nahtaussehen heranzuziehen. Darüber hinaus sind die in EN ISO 13919-1 definierten Nahtkenngrößen, wie Nahtunterwölbung, Wurzelkerbe etc. [101] bewertet worden. Dabei wurde eine besondere Bedeutung der Porosität der Schweißnähte beigemessen.

Für jeden Untersuchungsschwerpunkt bzw. Werkstoff wurde zunächst eine ausführliche Parameterstudie durchgeführt. Aufbauend darauf erfolgte eine Weiterentwicklung der Prozessstrategie.

Im ersten Teil der Untersuchungen wurden die Einflüsse der Lage der Zinkschichten sowie Zn-Mg-Schichten im Dreifachüberlappstoß auf die Prozessstabilität und Nahtqualität untersucht. Zusätzlich wurden auch Entgasungsbedingungen in der Schweißzone näher betrachtet. Auf der Basis der Ergebnisse dieser ersten Versuchsserie erfolgte die Entwicklung eines theoretischen Prozessmodells zum Schweißen von verzinkten Überlappstößen.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen wurden die weiteren Arbeitsschwerpunkte festgelegt. Das Ziel dieser Arbeiten war in erster Linie die Ermittlung der signifikanten Prozessgrößen und deren Kombinationen, die eine sichere Einflussnahme auf die Geometrie und Dynamik des Dampfkanals ermöglichen sollen. Hierzu wurden neben den bekannten Prozesseinflussgrößen, auch neue innovative Lösungsansätze, wie z. B. die Erzeugung einer rotierenden Bewegung des Laserstrahles und die Doppelfokustechnik herangezogen. Es wurden auch ergänzende Maßnahmen zur Erhöhung der Prozessstabilität beim Laserschweißen untersucht, wie z. B. eine Optimierung der Gaszufuhr und der Einsatz verschiedener Schutzgase. Überdies ist der Einfluss verschiedener Spannsysteme erprobt worden.

Daran anschließend erfolgten Untersuchungen zum Einfluss einer Strahlpolarisation beim Einsatz von gasförmigen Laserstrahlquellen. Genutzt wurden hierfür ein

zirkularpolarisierter CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser (Ausgangsleistung: 12 kW) sowie ein diffusionsgekühlter CO<sub>2</sub>-Slablaser (Ausgangsleistung: 3,5 kW).

Abschließend sind Tastversuche zur Anwendung des magnetisch unterstützten Laserschweißens am Institut für Strahlwerkzeuge, Stuttgart durchgeführt worden.

Dabei wurde folgendes Versuchsprogramm absolviert:

❖ **Versuchswerkstoffe**

- DC04, Blechdicke: 0,9 mm, unbeschichtet
- DC04+ZE, Blechdicke: 0,9 mm, einseitig elektrolytisch verzinkt
- DC04+ZE, Blechdicke: 1,0 mm, beidseitig elektrolytisch verzinkt
- DC06+ZE-Mg 35/35, Blechdicke: 1,0 mm Überzug: ca. 3,0 µm Zn (beidseitig) + ca. 0,26 µm Mg (einseitig)
- DX53D+Z, Blechdicke: 1,0 mm, beidseitig feuerverzinkt
- H220Y+ZE-Mg 35/35, Blechdicke: 1,0 mm, Überzug ca. 3,0 µm Zn (beidseitig) + ca. 0,26 µm Mg (einseitig)

❖ **Beschichtung**

- elektrolytische Zn-Beschichtung (Schichtdicke: ca. 7,5 µm)
- im Tauchverfahren abgeschiedene Zn-Überzüge (Schichtdicke: ca. 7,5 µm)
- ZE-Mg 35/35 (Überzug: ca. 3,0 µm Zn [beidseitig] + ca. 0,26 µm Mg [einseitig]).

❖ **Laserstrahlquelle**

- Festkörperlaser DY 044 (4,4 kW)
- CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser TLF 12000 turbo (12 kW)
- CO<sub>2</sub>-Slablaser - Diffusionsgekühltes CO<sub>2</sub>-Lasersystem (3,5 kW).  
(Die Schweißversuche wurden im Versuchsfeld der SLV Halle durchgeführt.)

❖ **Lasertechnologie**

- Rotierende Optik (Entwicklung der SLV Halle)
- Doppelfokustechnik unter Einsatz eines Festkörperlaser
- Betriebsart (Dauerstrich- oder Pulsbetrieb) unter Einsatz eines Festkörperlaser
- Doppelfokustechnik unter Einsatz eines CO<sub>2</sub>-Lasers
- Polarisationsrichtung des Laserstrahles
- Elektromagnetische Beeinflussung mit einem Festkörperlaser
- Prozessgasvariation (Schweißen ohne Schutzgas, inerte sowie aktive Schutzgase)

❖ **Laser- und Prozessparameter**

- Variation der Laser- und Prozessparameter

❖ **Stossauslegung**

- Variation der Lage der Zinkschichten im Dreifachüberlappstoß

- Variation der Lage der Zink-Magnesium-Schichten im Dreifachüberlappstoß
- Variation der Spalte (beidseitig verzinkte Bleche)

❖ **Spannart**

- Einfluss der Spannvorrichtung
- Einfluss der Wärmeableitung

## 5 Grundlagenuntersuchungen

### 5.1 Einfluss der Spannvorrichtung

Die Grundlagenuntersuchungen fanden mit dem Ziel statt, die signifikanten Haupteinflussfaktoren auf das Fügen von verzinkten Dünnblechen im Dreifachüberlappstoß zu evaluieren. Es zeigte sich, dass die Art der Spannvorrichtung einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität hergestellter Schweißungen hat.

Es wurden folgende vier Spannsysteme verwendet:

- streifenförmige Spannbacken (sechs Spannelemente, vier außerhalb der Bleche),
- einzelne rechteckenförmige Spannbacken (acht Spannelemente),
- stabile streifenförmige Spannbacken (acht Spannelemente) sowie
- einzelne fingerförmige Spannbacken (acht Spannelemente).

Der Unterschied zwischen den verwendeten Spannsystemen ist im Bild 20 verdeutlicht.

<b>Spannsystem</b>	<b>Anzahl der Spannelementen</b>	<b>Kraftverteilung</b>	
<b>1. streifenförmige Spannbacken</b>	6 (4 außerhalb der Bleche)	linear flächig	
<b>2. einzelne rechteckförmige Spannbacken</b>	8	diskret flächig	
<b>3. stabile streifenförmige Spannbacken</b>	8	linear flächig	
<b>4. punktförmige Spannbacken</b>	8	punktförmig	

**Blechstreifen**    
  **Spannelemente**    
  **Schweißnaht**

Bild 20: Klassifizierung der verwendeten Spannvorrichtungen

Die von der ersten Vorrichtung mit streifenförmigen Spannbacken ausgehenden geringen Spannkraften ermöglichten einen stabilen Schweißprozess an ZE-Mg-beschichteten Blechen und eine ausreichende Oberflächenqualität der geschweißten Nähte, (s. Anhang A1, Bild A1-1).



Weitere stichprobenartige Schweißversuche mit einzelnen rechteckförmigen Spannbacken (2. Spannsystem) zeigten, dass die ungleichmäßige Verteilung der Spannkkräfte zu Prozessinstabilitäten führen kann. Dies ruft das Austreten grober Badauswürfe unmittelbar zwischen Spannbacken hervor, (s. Anhang A1, Bild A1-2).

Ganz anders sahen die mit Hilfe der dritten Spannvorrichtung geschweißten Proben aus. Die Prozessstabilität nahm offensichtlich deutlich zu und anstelle von Badauswürfen traten Oberflächenporen auf, (s. Anhang A1, Bild A1-3). Die meisten Poren hatten dabei ein dreieckenförmiges Aussehen.

Um die Erstarrungszeit des Schweißbades mit dem Ziel der Porenfüllung zu erhöhen, wurden die Stahl-Spannbacken dieser Vorrichtung durch Pertinax-Spannbacken ersetzt. Obwohl sich damit vermutlich auch die Kraftverteilung von linear in diskret flächig veränderte, blieb es jedoch bei der Porenbildung im Schweißgut, (s. Anhang A1, Bild A1-5).

Im Unterschied zu allen Spannsystemen zeigten die mit dem 4. Spannsystem unter Nutzung von fingerförmigen Spannbacken geschweißten Proben die beste Nahtqualität. Obwohl die Bleche in diesem Fall gut fixiert und stark punktförmig zusammengepresst wurden, entstand offensichtlich in der Fügezone ein Spalt. Dieser Spalt führte zur wesentlichen Verbesserung der Entgasungsbedingungen und infolgedessen zu einem stabileren Schweißprozess (s. Anhang A1, Bild A1-4). Beim Schweißen von konventionell ZE-beschichteten Blechen war dieser positive Effekt jedoch nicht so stark ausgeprägt.

Die Ergebnisse der metallographischen Untersuchungen zeigten, dass die Schweißnähte in Fällen „1“ und „4“ (Bild 23) die Bewertungsgruppe „B“ nach EN ISO 13919-1 sowie Fall „3“ die Bewertungsgruppe „D“ erfüllen. Die Qualität von den mit einzelnen rechteckenförmigen Spannbacken - und mit Pertinax-Spannbacken – geschweißten Nähten war unzureichend.

Weitere Schweißuntersuchungen wurden unter Anwendung stabiler streifenförmigen Spannbacken (Fall „3“, vgl. Bild 23) realisiert, da diese Spannvorrichtung am praxisrelevantesten ist. Nur in den Fällen, wo es unmöglich war, unter Anwendung dieser Vorrichtung qualitativhochwertige Nähte zu erzielen, wurde das erste Spannsystem verwendet (z. B. zur Erzeugung der Schweißnähte, aus denen Zug- und Korrosionsproben entnommen wurden).

## 5.2 Theoretisches Prozessmodell

Die Analyse der Schweißergebnisse an unverzinkten und einseitig verzinkten Blechen der Stahlsorte DC04 und die parallel zu den Untersuchungen durchgeführte Literaturanalyse [102-112] ermöglichten das Erstellen eines qualitativen Arbeitsmodells zum Laserstrahlschweißen von verzinkten Dreifachüberlappstößen, Bild 21. Die Energieeinkopplung wird beim Tiefschweißen durch die Mehrfachreflexion dominiert; der Gesamtabsorptionsgrad hängt vorwiegend von der Kapillarform ab. Die Mehrfachreflexion in der Dampfkapillare führt zu einem Strahlungsaustausch zwischen den einzelnen Bereichen der Kapillare und zu einer Selbstfokussierung der Strahlung auf die Kapillarspitze. Die Gleichgewichtsbedingung in der Kapillare setzt voraus, dass der Dampfdruck in der Kapillare  $P_d$  dem Druck durch die Oberflächenspannung  $P_\sigma$ , dem hydrostatischen Druck  $P_g$  und dem Druckbeitrag durch die Bewegung der Schmelze  $P_u$  in jedem Punkt der Kapillaroberfläche gleich ist.

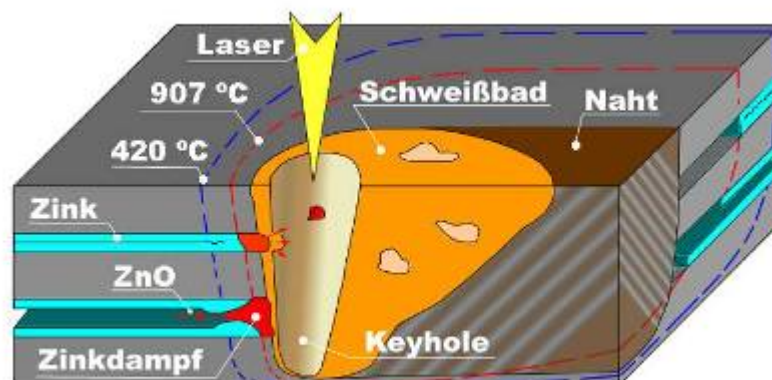


Bild 21: Qualitatives Prozessmodell des Laserstrahlschweißens von Überlappverbindungen aus verzinkten Dünnsblechen

In der Kapillare fällt der Druck von der Kapillarspitze bis zur –öffnung ab; die Dampfströmungsgeschwindigkeit entspricht dem Druckgradienten. Durch den ausströmenden Metalldampf werden an der Kapillarwand Schubspannungen induziert; deren Betrag hängt von der Kapillargeometrie und der Dampftemperatur ab. Mit zunehmender Dampftemperatur  $T_d = f(\lambda^2)$  nimmt die Viskosität zu und die Dichte des Dampfes ab (Plasmabildung); die Dampfströmung wird dadurch abgebremst; die Schubspannungen steigen. Größere Kapillarquerschnitte führen deshalb zum besseren Druckausgleich. Aufgrund der Vergrößerung des Kapillarquerschnittes muss mit Leistungsüberschuss gearbeitet werden.



Beim Laserstrahlschweißen von Dreifachüberlappverbindungen wird die Zn-Schicht an den Blechoberflächen innerhalb der 420 °C-Isotherme aufgeschmolzen und innerhalb der 907 °C-Isotherme verdampft (Bild 21). Eine Zinkverdampfung an der Oberfläche des oberen Bleches hat keinen negativen Einfluss auf den Schweißprozess, da diese Dämpfe ungestört entweichen können. Der Druck der Zn-Dämpfe im Blechzwischenraum  $P_{Zn}$  wird durch die Dicke der Zn-Schicht, die Spaltbreite und die 907 °C-Isotherme bestimmt. Bei einem ausreichend großen Spalt kann sich folglich kein Dampfdruck aufbauen, der den Schweißprozess stören kann. Der Abtransport der Zn-Dämpfe erfolgt durch den Spalt. Beim 0-Spalt kann der Massentransport der Zn-Dämpfe durch die Dampfkapillare oder das Schmelzbad erfolgen.

Die letzte Variante ist ungünstig und bedeutet in der Regel Poren oder Schmelzbadauswürfe, Bild 22. Einerseits kann durch längere Erstarrungszeiten und Schmelzebewegung vom Kapillargrund zur Badoberfläche die Entgasung begünstigt werden. Andererseits wird die Strömung im Schmelzbad durch die Bewegung der Dampfkapillare, den ausströmenden Metall Dampf und die Temperaturabhängigkeit der materialspezifischen Oberflächenspannung erzeugt, d. h. die Strömungsgeschwindigkeit und die in das Schmelzbad eingebrachte Bewegungsenergie steigt mit der Bearbeitungsgeschwindigkeit an. Eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit kann demzufolge die Abgasungsbedingungen über die Schmelze auch verbessern. Die kurzen Erstarrungszeiten des Schmelzbades erschweren jedoch die Entgasung.

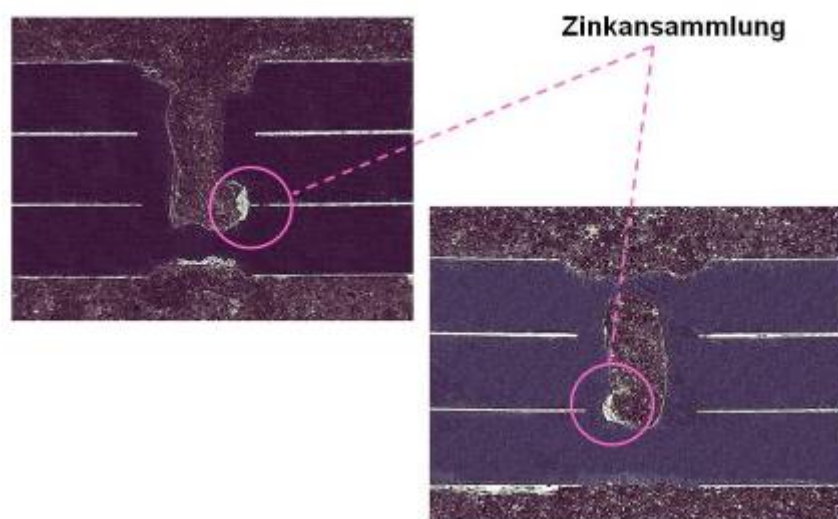


Bild 22: Badauswürfe durch direkten Transport der Zn-Dämpfe aus dem Blechzwischenraum in das Schmelzbad

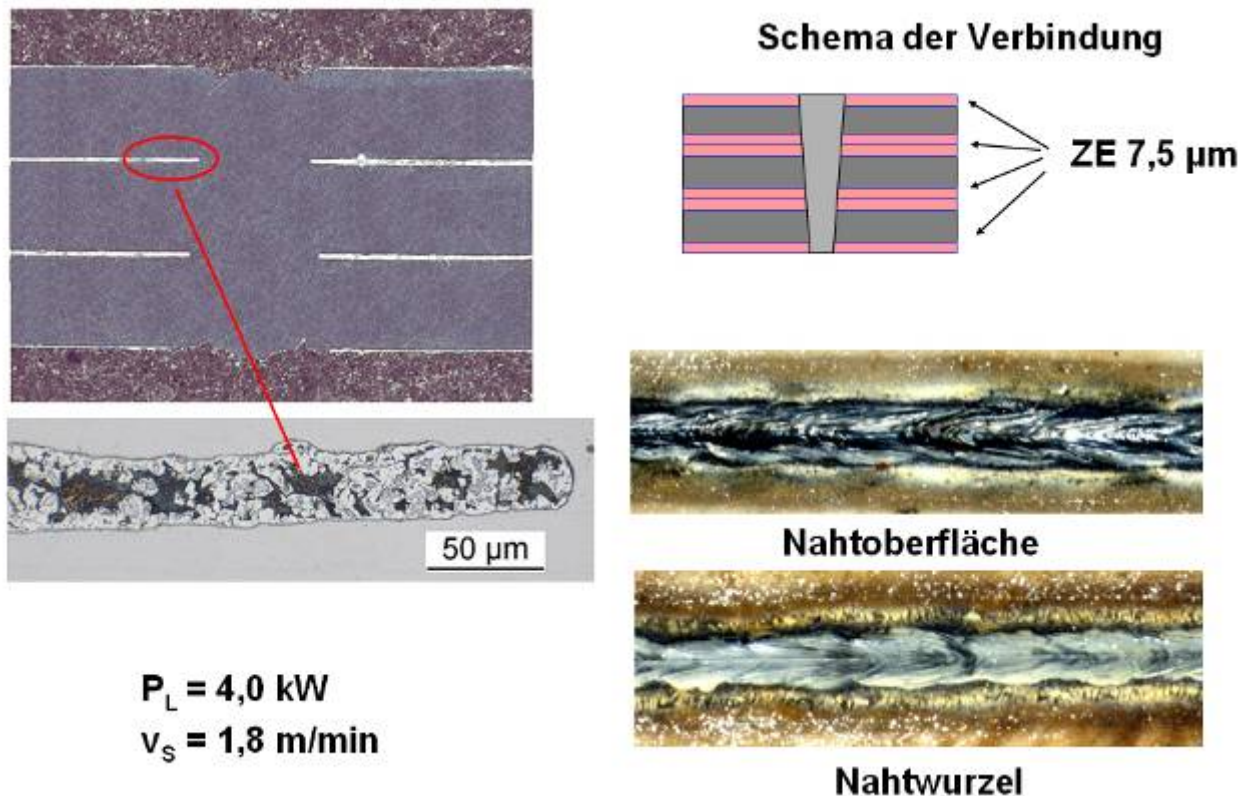


Bild 23: Schweißergebnisse an den beidseitig verzinkten Blechen, 0-Spalt, geschweißt mit Nd:YAG-Laser, Werkstoff DC04+ZE

Die Bedingung für den Massenstrom der Zn-Dämpfe in die Kapillare lautet:

$$P_{Zn} > P_d + P_k, \quad (1)$$

wobei  $P_k$  – der Kapillardruck der Schmelze im Blechzwischenraum und  $P_d$  – der Dampfdruck in der Kapillare ist. Dabei soll für die Gleichgewichtsbedingung in der Kapillare der Dampfdruck in der Kapillare gleich der Summe des Druckes durch die Oberflächenspannung ( $P_\sigma$ ), dem hydrostatischen Druck ( $P_g$ ) und dem Druckbeitrag durch die Bewegung der Schmelze ( $P_u$ ) sein:

$$P_d = P_\sigma + P_g + P_u \quad (2)$$

Beim stabilen Massentransport der Zn-Dämpfe in die Dampfkapillare wird sich die Kapillargeometrie den neuen Gegebenheiten anpassen und stabilisieren. Der Schweißprozess wäre in diesem Fall stabil.

Ausgehend von dieser Tatsache wird vermutet, dass beim technischen 0-Spalt der Massentransport der Zn-Dämpfe in die Dampfkapillare aufgrund der verzugsbedingten Veränderungen der Spaltbreite diskontinuierlich erfolgt. Dies verursacht eine plötzliche Druckerhöhung in der Kapillare und führt zur Verdrängung der Schmelze.

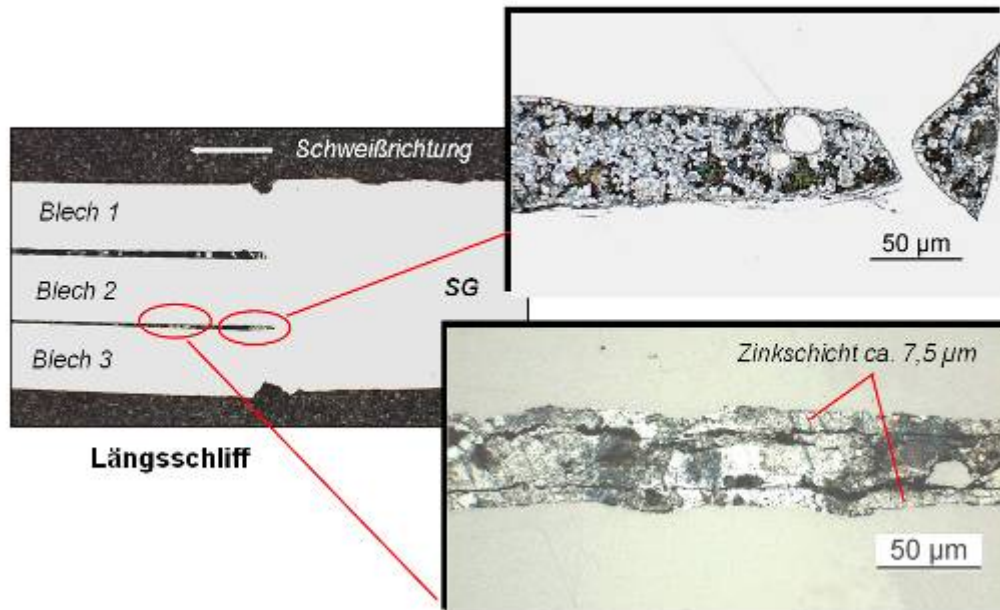


Bild 24: Längsschliff eines laserstrahlgeschweißten Dreifachüberlappstoßes mit Zinkansammlung vor dem Schweißbad; geschweißt mit technischem 0-Spalt; Werkstoff DC04+ZE

*Unter der Voraussetzung, dass der Massenstrom der Zn-Dämpfe in die Kapillare kontinuierlich und stabil erfolgt, müsste ausgehend von theoretischen Vorstellungen über die Vorgänge im Kapillarbereich ein Gleichgewicht entstehen.*

Eine Bestätigung dafür findet sich in den experimentellen Untersuchungen (Bild 23).

In [113] wurde mit Hilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen nachgewiesen, dass der bei der Verdampfung einer 7,5 µm dicken Verzinkung entstehende Druck bzw. die kinetische Energie nicht ausreichen, um die auftretenden Schmelzbadauswürfe zu verursachen. Daraus lässt sich unter anderem schlussfolgern, dass die entstehenden hohen Dampfdrücke durch die Verdampfung einer o. g. Zinkansammlung entstehen können.

Bei der konventionellen schweißtechnologischen Problemlösung – Erzeugung definierter Spaltbreiten zwischen den Blechen - muss beachtet werden, dass *die maximale Spaltbreite* die Stabilität der Dampfkapillare nicht stören darf. Außerdem ist zu gewährleisten, dass *die minimale Spaltbreite* größer als die Gesamtdicke des Zn-Schmelzfilmes sein muss, dessen Dicke aber unmittelbar vor dem bewegten System Schmelze/Keyhole vielfach die Dicke der Zinkschicht überschreiten kann. Erreicht das System o. g. Ansammlungen von flüssigem Zn, entsteht durch rapide Druckerhöhung ein Badauswurf. Bild 24 veranschaulicht dies an einem Längsschliff, der dem Nahtende einer geschweißten Probe entnommen wurde.

## 6 Versuchsdurchführung

### 6.1 Schweißen von Mehrblechverbindungen aus elektrolytisch verzinkten Dünoblechen mit dem Festkörperlaser DY 044

#### 6.1.1 Variation der Lage der Zinkschichten im Dreifachüberlappstoß

Im ersten Arbeitsschritt wurden Schweißversuche an unverzinkten und einseitig verzinkten Blechen der Stahlsorte DC04 durchgeführt. Ziel dieser Versuche war einerseits die Aufstellung eines Parameterfensters für das Laserstrahlschweißen von Überlappverbindungen mittels o. g. Nd:YAG-Lasers und andererseits die Erarbeitung von neuen Lösungsstrategien und -ansätzen zum Erreichen der Arbeitszielstellung.

Des Weiteren sollten die Einflüsse der Lage und Dicke der Zinkschichten im Dreifachüberlappstoß auf die Qualität der Schweißergebnisse und auf die Prozessstabilität untersucht werden, um Empfehlungen zur technologischen Auslegung solcher Stöße für konkrete Anwendungsfälle zu ermöglichen. Die untersuchten Varianten der Stoßauslegung sind im Bild 25 dargestellt.

Die Qualität der hergestellten Schweißverbindungen wurde qualitativ und quantitativ bewertet. Zur Bewertung wurden vor allem die Nahtgeometrie, die Anzahl der Poren und die Spritzerbildung herangezogen.

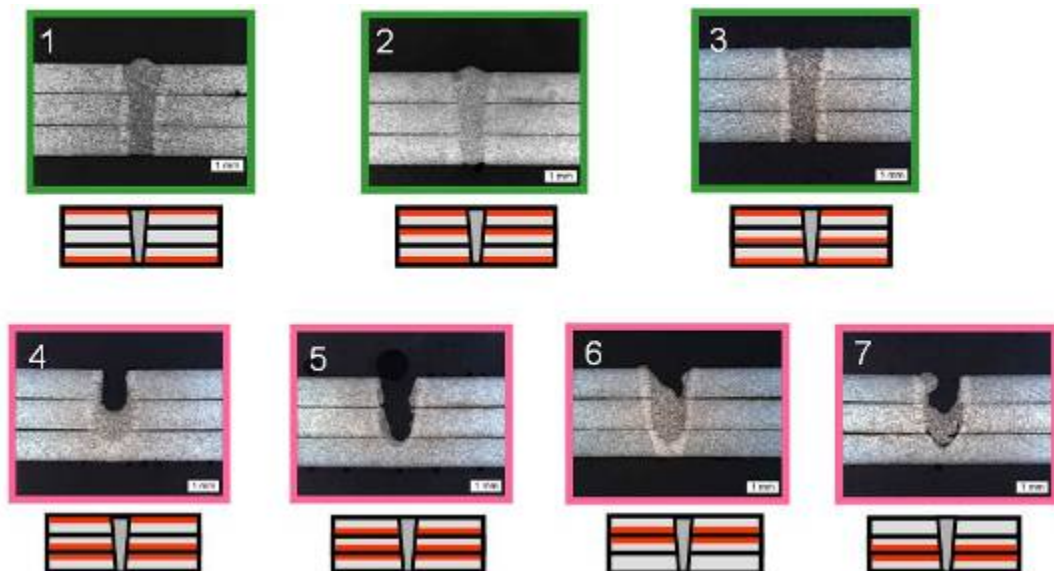


Bild 25: Untersuchte Varianten der Lage von Zinkschichten im Dreiblechstoß.  
 $P_L=4,0 \text{ kW}$ ;  $v_S=3,5 \text{ m/min}$



Als Optimum für die Fokusslage wurde +2,0 mm über der Blechoberfläche ermittelt, Bild 26. Dieser Wert wurde bei allen weiteren Versuchen konstant gehalten und vor jeder Versuchserie genau eingestellt bzw. überprüft.

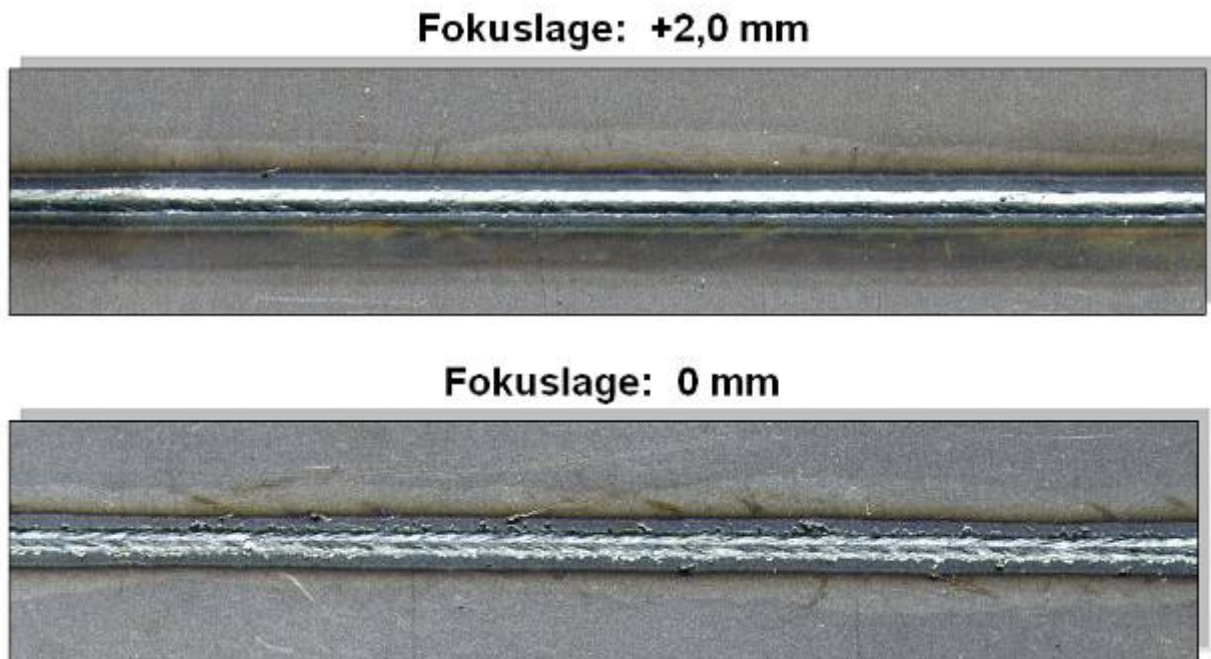


Bild 26: Ermittlung der Fokusslage. Lasergeschweißte Dreifachüberlappverbindungen am unbeschichteten Werkstoff DC04.  $P_L=3,0$  kW;  $v_S=2$  m/min

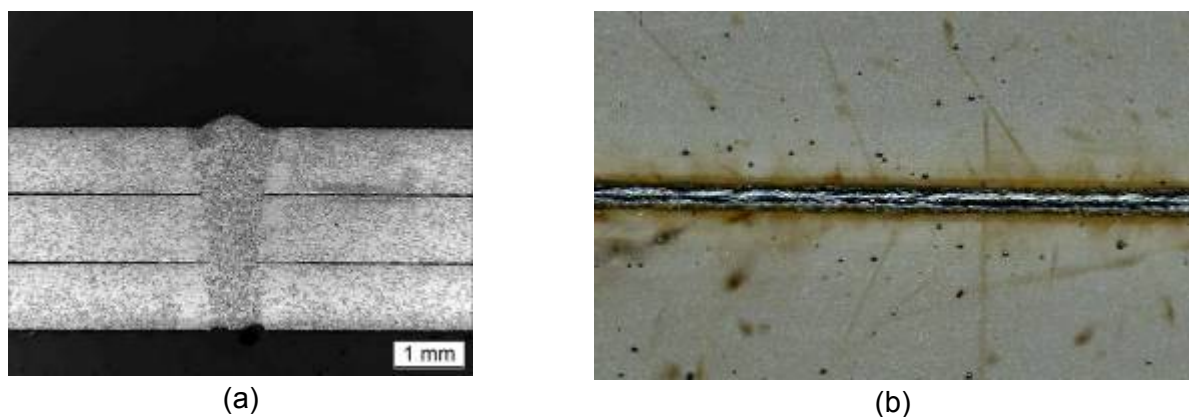


Bild 27: Lasergeschweißte Dreifachüberlappverbindungen am Werkstoff DC04

- a) unverzinkte Bleche im Lieferzustand, Makroschliff
- b) nur an den äußeren Blechflächen verzinkt, Nahtoberfläche

Nach Anpassung der Prozessparameter war es erwartungsgemäß möglich, fehlerfreie Schweißverbindungen an den unverzinkten Dreifachüberlappverbindungen herzustellen. Dies gilt sowohl für speziell entfettete Bleche als auch für die im Anlieferungszustand mit einem Konservierungsmittel versehenen Bleche. Da die gewählten Parameter trotz der herstellungs- und lagerungsbedingten Verunreinigungen auf der Blechoberfläche keinen negativen Einfluss auf die Nahtqualität ausübten (Bild 27 a), wurden alle nachfolgenden

Schweißversuche an verzinkten Blechen im Lieferzustand durchgeführt. Dieser Lieferzustand spiegelt am besten die Bedingungen wieder, die in der Produktion vorliegen. Ähnlich gute Ergebnisse wie beim HL-Laserschweißen der unverzinkten Bleche ließen sich auch beim Schweißen der Dreifachüberlappstöße mit einseitiger Verzinkung auf der Außenseite der beiden äußeren Bleche erreichen, Variante 1 im Bild 25 (Bild 27, b).

Weiterführende Schweißuntersuchungen an den Varianten 2 und 3 (Bild 28) – hier befindet sich auch im unteren oder oberen Blechzwischenraum eine Zinkschicht – haben gezeigt, dass das Schweißen mit geringer Laserleistung, z.B. 2,5 kW, starke Prozessstörungen, wie z. B. ungewünschte Schmelzbadauswürfe, hervorruft (Bild 28). Diese Prozessstörungen lassen sich jedoch durch eine Erhöhung der Laserleistung und daraus resultierender Anpassung der Prozessparameter kontrollieren bzw. vermeiden (Bild 28 b).

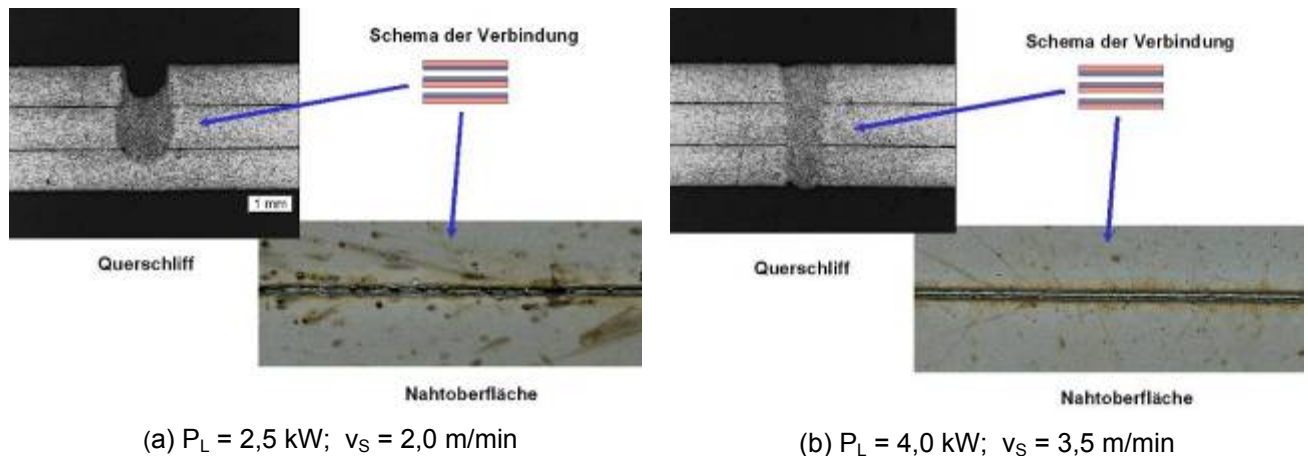


Bild 28: Lasergeschweißte Dreifachüberlappverbindungen, Variante 3

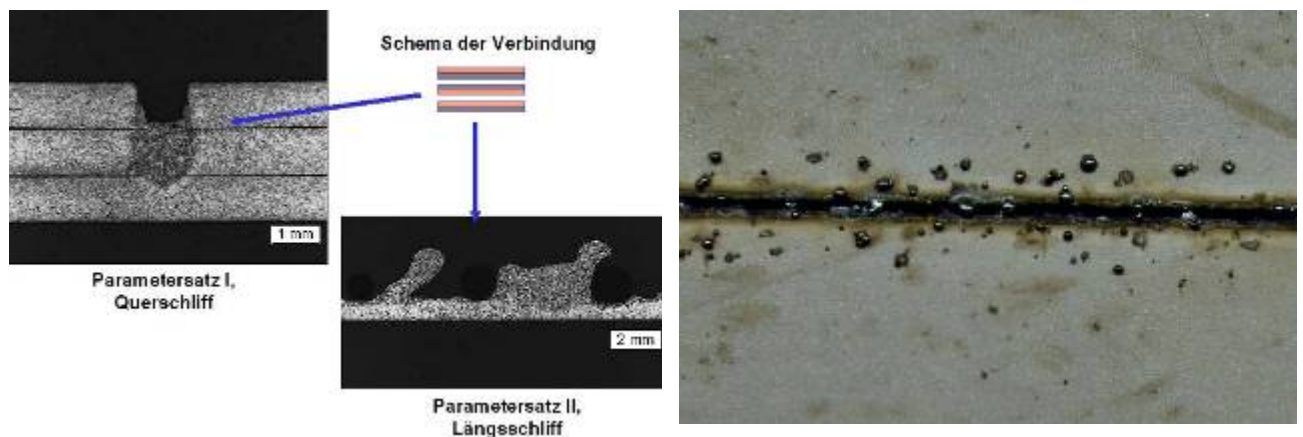


Bild 29: Lasergeschweißte Dreifachüberlappverbindungen, 0-Spalt, Variante 4. Volle Zerstörung des Schweißgutes.

Parametersatz I:  $P_L = 2,5 \text{ kW}$ ;  $v_S = 2,0 \text{ m/min}$ ;

Parametersatz II:  $P_L = 4,0 \text{ kW}$ ;  $v_S = 2,0 \text{ m/min}$

Als günstig erwiesen sich die aus den größeren Laserstrahlleistungen resultierenden höheren Schweißgeschwindigkeiten.

Ein Grund dafür besteht offensichtlich in der beim schnelleren Schweißen entstehenden Ausdehnung des Dampfkanals und der damit verbundenen Verbesserung des Abtransportes (Entgasung) des Zinkdampfes. Außerdem liegen die Werte der Streckenenergie beim Schweißen mit 4,0 kW Laserstrahlleistung um ca. 10 % niedriger als beim Schweißen mit 2,5 kW, was zur Reduzierung der Wärmebelastung der verzinkten Bleche bzw. zur Reduzierung der Zinkverdampfung führt.

Weiterhin war festzustellen, dass das Vorhandensein der Zinkschicht im unteren Blechzwischenraum des Dreifachüberlappstoßes für den Schweißprozess kritischer ist als das Vorhandensein dieser Schicht im oberen Blechzwischenraum. Im oberen Teil der entstehenden Schweißnaht liegen bessere Entgasungsbedingungen vor als im unteren, da dort zum einen der Dampfkanal breiter ist und zum anderen das Schmelzbad eine höhere Dynamik aufweist.

Als äußerst problematisch für den Schweißprozess erwies sich die doppelte Zinkschicht sowohl im oberen als auch im unteren Blechzwischenraum. Durch die Verdopplung der Schichtdicke kam es zur Zunahme der abzuführenden Zinkdampfmenngen in der Prozesszone. Eine Vielzahl von Prozessinstabilitäten und Schmelzbadauswürfen war die Folge. Die Schweißproben zeigten charakteristische Schweißnahtunregemässigkeiten, wie z. B. Bindefehler, (Varianten 4-7), Bild 29.

Zum effektiven störungsfreien Abtransport der Zinkdämpfe aus der Prozesszone müssen folglich neben dem Schmelzbad auch andere „Transportkanäle“ zur Verfügung stehen. Im Idealfall würde der Abtransport der Zinkdämpfe durch das Keyhole erfolgen, ohne seine Stabilität zu beeinträchtigen. Im Fall der doppelten Zinkschicht im Blechzwischenraum (Varianten 4.-7, Bild 25) erfüllt das Keyhole diese Rolle vermutlich jedoch nicht. Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass auf die Einstellung eines Luftspaltes während dieser Teiluntersuchungen bewusst verzichtet wurde, um kritischste Versuchsbedingungen zu schaffen.

### **6.1.2 Variation des Spaltabstandes im Dreifachüberlappstoß an beidseitig verzinkten Blechen**

Im zweiten Arbeitsschritt wurden Schweißversuche an beidseitig verzinkten Blechen der Stahlsorte DC04 durchgeführt, Bild 30. Ziel dieser Versuche war festzustellen, wie sich das Vorhandensein einer definierten Spaltbreite (0,1 und 0,2 mm) in den Blechzwischenräumen auf die Prozessstabilität auswirkt. Die Einstellung eines definierten Spaltes gehört heutzutage zum Stand der Technik. Die Spaltvariation sollte auch zum besseren Verständnis der Einwirkung der doppelten Zinkschicht zwischen den Blechen auf den Schweißvorgang dienen.

Positive Schweißergebnisse ließen sich nur im Fall der Gewährleistung eines definierten Luftspaltes im Blechzwischenraum erreichen, Bild 31 b). Dies gilt sowohl für Spaltbreiten von 0,1 als auch von 0,2 mm. Bei dieser technologischen Lösung besteht aber die Gefahr einer zu starken Nahtunterwölbung.

Beim Schweißen mit 0-Spalt (Variationen 1, 2 und 4, Bild 30) war es nicht möglich, fehlerfreie Nähte zu erzeugen, Bild 31 a). Dies gilt für alle untersuchten Parameterbereiche (Laserstrahlleistung: 1,0...4,4 kW, Schweißgeschwindigkeit: 1,0...3,5 m/min).

Schlussfolgernd daraus ist abzuleiten, dass beim Schweißen beidseitig verzinkter Bleche eine Einflussnahme auf die Prozessstabilität ohne Spalt zwischen Blechen über die Schweißparameter (Laserstrahlleistung, Schweißgeschwindigkeit) möglich ist, und dass in diesem Fall nur die Gewährleistung definierter Spaltabstände zwischen den Blechen zu fehlerfreien Schweißungen am Mehrfachstoß führt.

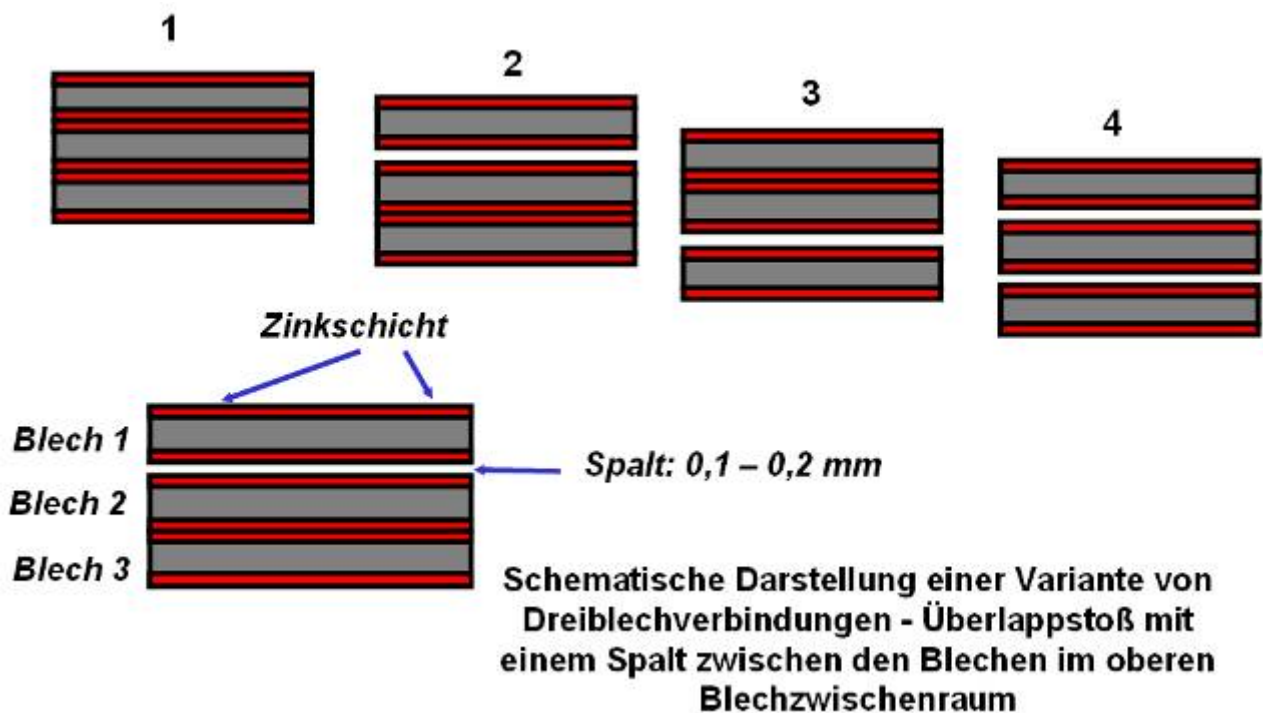


Bild 30: Untersuchte Variation der Spalten im Dreiblechstoß (DC04+ZE, beidseitig verzinkte Bleche)



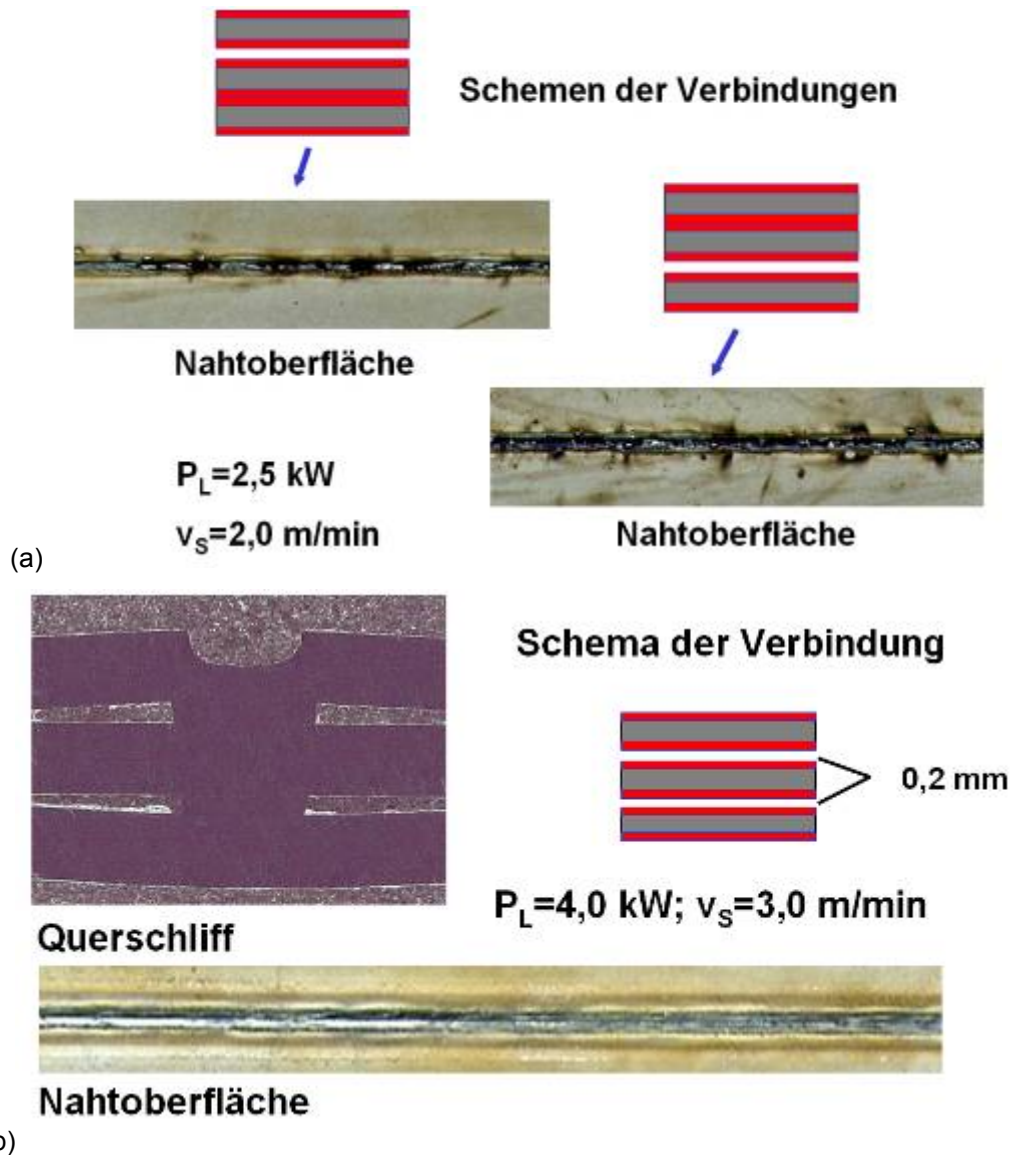


Bild 31: Lasergeschweißte Dreifachüberlappverbindungen, beidseitig verzinkte Bleche, Spalt 0,2 mm: a) Variante 1; Variante 2; b) Variante 3

### 6.1.3 Einfluss des Pulsbetriebes auf das Schweißergebnis

Die Steuerung des eingesetzten Festkörperlasers ermöglicht auch das Schweißen im Pulsbetrieb. Durch den Pulsbetrieb ist eine Reduzierung bzw. präzise Dosierung des Wärmeeintrages in den Werkstoff möglich. Es wurde erwartet, dass eine Reduzierung des Wärmeeintrags zur Verringerung der Zn-Verdampfung führt und sich somit positiv auf die Schweißergebnisse auswirkt [114-118].

Die umfangreichen Schweißversuche zum Einfluss des Pulsbetriebes zeigten, dass keine Erhöhung der Prozessstabilität sowie keine Verbesserung der Schweißergebnisse in dem für die industrielle Anwendung relevanten Schweißgeschwindigkeitsbereich beobachtet werden konnten, Bild 32. An den Nahtoberflächen sind Schmelzbadauswürfe und Oberflächenporosität deutlich ausgeprägt. Der Pulsbetrieb kann sogar im untersuchten

Parameterfenster als ein zusätzlicher Störfaktor betrachtet werden, der zur Instabilitäten führt.

#### **6.1.4 Doppelfokustechnik**

Des weitern wurden Schweißversuche unter Anwendung der Doppelfokusoptik (Strahlverteilung: ca. 70/30 [%]) mit der im Bild 33 a) dargestellten Doppelfokusanordnung zur Schweißrichtung und dem dort angegebenen Parameterfenster realisiert. In der Fachliteratur fanden sich jedoch zum Teil widersprüchliche Angaben über die Auswirkungen vom Doppelfokus auf die Schweißergebnisse. So wird in [119] berichtet, dass die Doppelfokustechnik keinen positiven Einfluss auf die Prozessstabilität ausübte und qualitative Schweißnähte an beschichteten Überlappverbindungen nur durch Gewährleistung eines Spaltes zwischen den zu schweißenden Blechen erzielt werden konnten. Hingegen sammelten [86 und 120] positive Erfahrungen mit dieser Doppelfokustechnik. Nach [120] lässt sich erfahrungsgemäß beim Schweißen von verzinkten Blechen im Zweifachüberlappstoß mit doppeltem Fokus eine störungsunempfindlichere Kapillargeometrie erzielen, welche gleichzeitig ein ungehindertes Ausströmen des Metaldampfes gewährleistet und damit porenfreie Nähte ermöglicht. Auch in [86] wurden mit der Doppelfokustechnik hochwertige Schweißnähte erzeugt. Der erste Strahl verdampfte das Zink, ohne einen Tiefschweißeffekt hervorzurufen, den zweiten Strahl benutzte man unmittelbar für das Schweißen.

Bei den Untersuchungen an unbeschichteten Blechen (Brennweite der Fokussieroptik: 200 mm) bildete sich eine sehr gleichmäßige Nahtschuppung ohne Oberflächenporosität aus. Die Nahtqualität verbesserte sich deutlich und die Schweißnaht wurde etwas breiter. Die optimale Schweißgeschwindigkeit ist dabei herabsetzt worden. Die Anordnung der Foki in oder quer zur Schweißrichtung hatte kaum Einfluss auf die Nahtqualität, jedoch auf den Querschnitt der Naht. Durch eine Anordnung quer zur Schweißrichtung können flachere und breitere Nähte erzeugt werden, was zur Vergrößerung der Anbindungsbreite bei Überlappverbindungen führt.

<u>Untersuchtes Parameterfenster</u>	<u>Beispiel: Probe geschweißt mit folgendem Parametersatz</u>
• Überlagerung des Pulsspotes .... ca. 50 [%]	50 [%]
• Frequenz ..... 75 [Hz]	75 [Hz]
• Schweißgeschwindigkeit ..... 1,5 - 2,0 [m/min]	1,8 [m/min]
• Pulsleistung ..... 4,0 - 4,4 [kW]	4,4 [kW]
• Pausenlevel ..... 1,0 - 2,5 [kW]	2,5 [kW]
• Tastverhältnis ..... 15/85 - 85/15 [% / %]	75/25 [% / %]



**Zum Vergleich:**  
Schweißen von  
unverzinkten  
Blechen



Bild 32: Einfluss des Pulsbetriebes. Werkstoff DC04+ZE 75/75 (Variante 4 nach Bild 22)

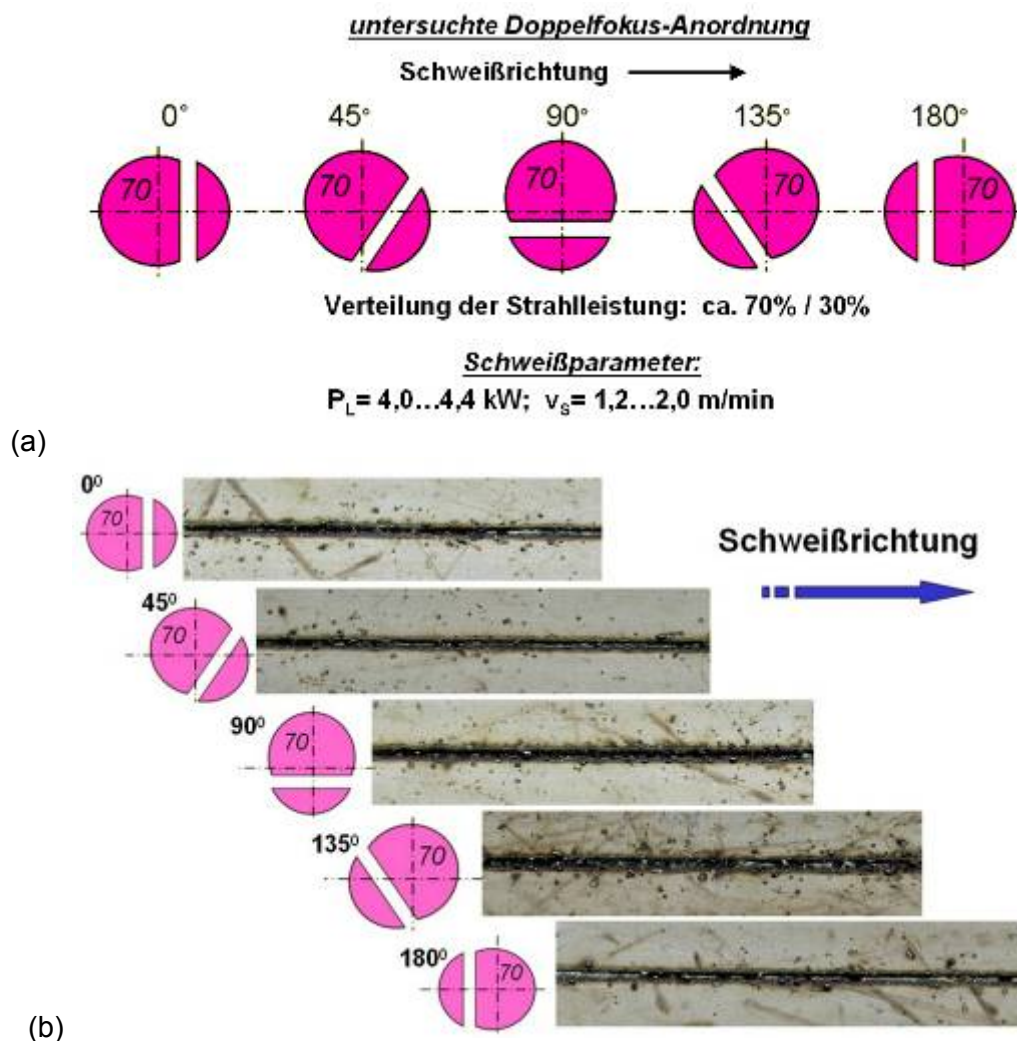


Bild 33: Anwendung der Doppelfokustechnik. Werkstoff DC04+ZE 75/75 (Variante 4 nach Bild 22)  
a) untersuchte Doppelfokusordnung; b) Nahtoberflächen

Die durchgeführten Schweißuntersuchungen mit dem Doppelfokus an verzinkten Blechen ergaben jedoch keine Verbesserung der Schweißergebnisse gegenüber den mit einem Spalt geschweißten Verbindungen, Bild 33 b). Unter den gegebenen Schweißbedingungen und bei bestimmten Doppelfokusanordnungen nahm die Spritzerbildung im Vergleich zur konventionellen Optik sogar zu.

### 6.1.5 Laserstrahlschweißen unter Einsatz einer rotierender Optik

Darüber hinaus ist an elektrolytisch verzinkten Blechen eine Versuchsserie unter Anwendung einer rotierenden Optik durchgeführt worden. Die üblichen Durchmesser der Strahltaile betragen beim Laserschweißen 0,2...0,6 mm, wodurch das Laserschweißen eine Reihe von Nachteilen wie geringe Spaltüberbrückbarkeit, geringe Toleranzverträglichkeit, hoher Aufwand für Nahtvorbereitung sowie aufwendige Spanntechnik hat. Eine Strahlmanipulation in Form des rotierenden Laserstrahles, die mit einer im Hause SLV Halle entwickelten rotierenden Optik realisiert wird, ermöglicht durch Rotation des Laserstrahles eine Vergrößerung des Schmelzbades sowie bessere Spaltüberbrückbarkeit und Toleranzverträglichkeit. Außerdem ermöglicht dieses Verfahren eine bessere Durchmischung der Schmelze und Verringerung der Abkühlgeschwindigkeit [121].

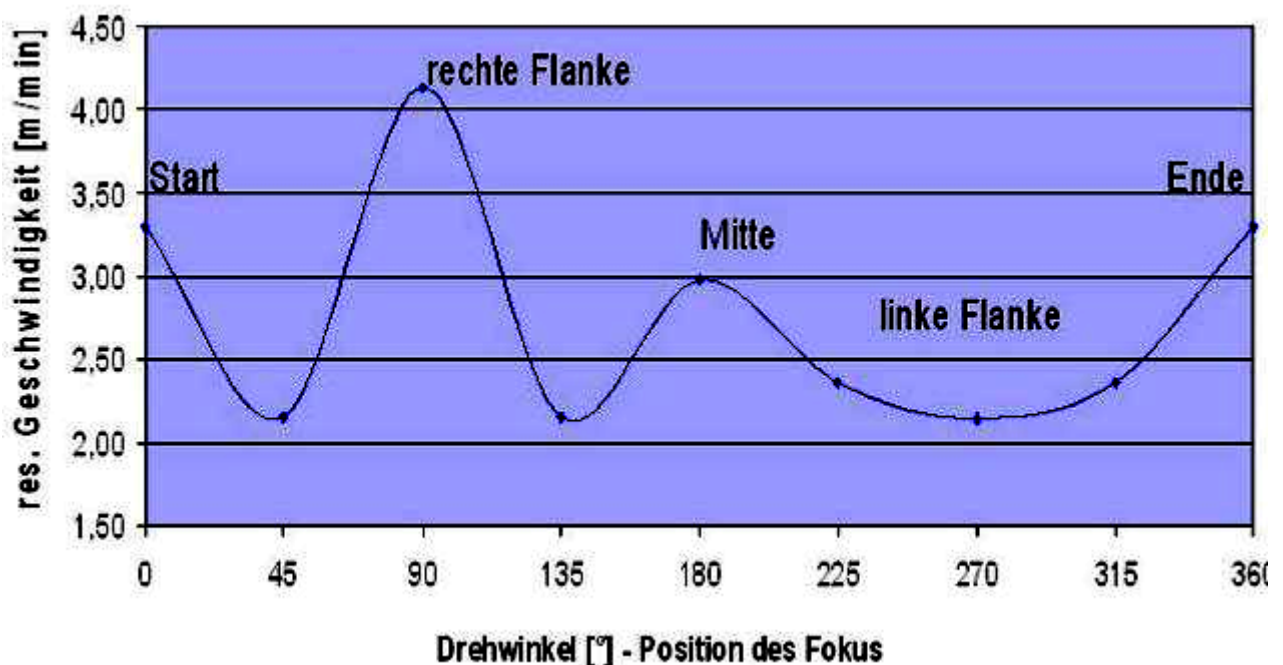


Bild 34: Variable Schweißgeschwindigkeit beim Laser-Schweißen mit rotierender Optik [121]



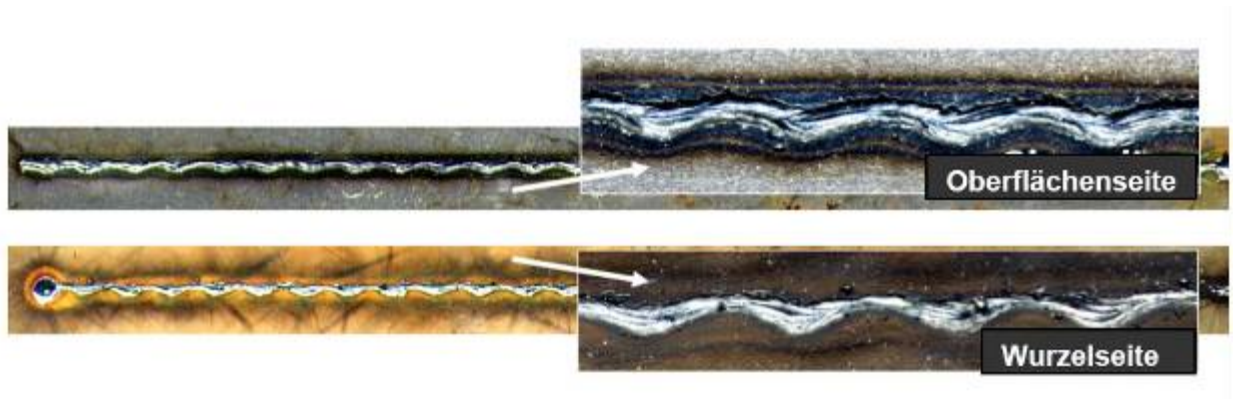


Bild 35: Einsatz der rotierenden Optik an unbeschichteten Blechen, Dreifachüberlappstoß  
 (Laserstrahlleistung: 4,0 kW; Vorschubgeschwindigkeit: 3,5 m/min;  
 Winkelgeschwindigkeit: 500 U/min)

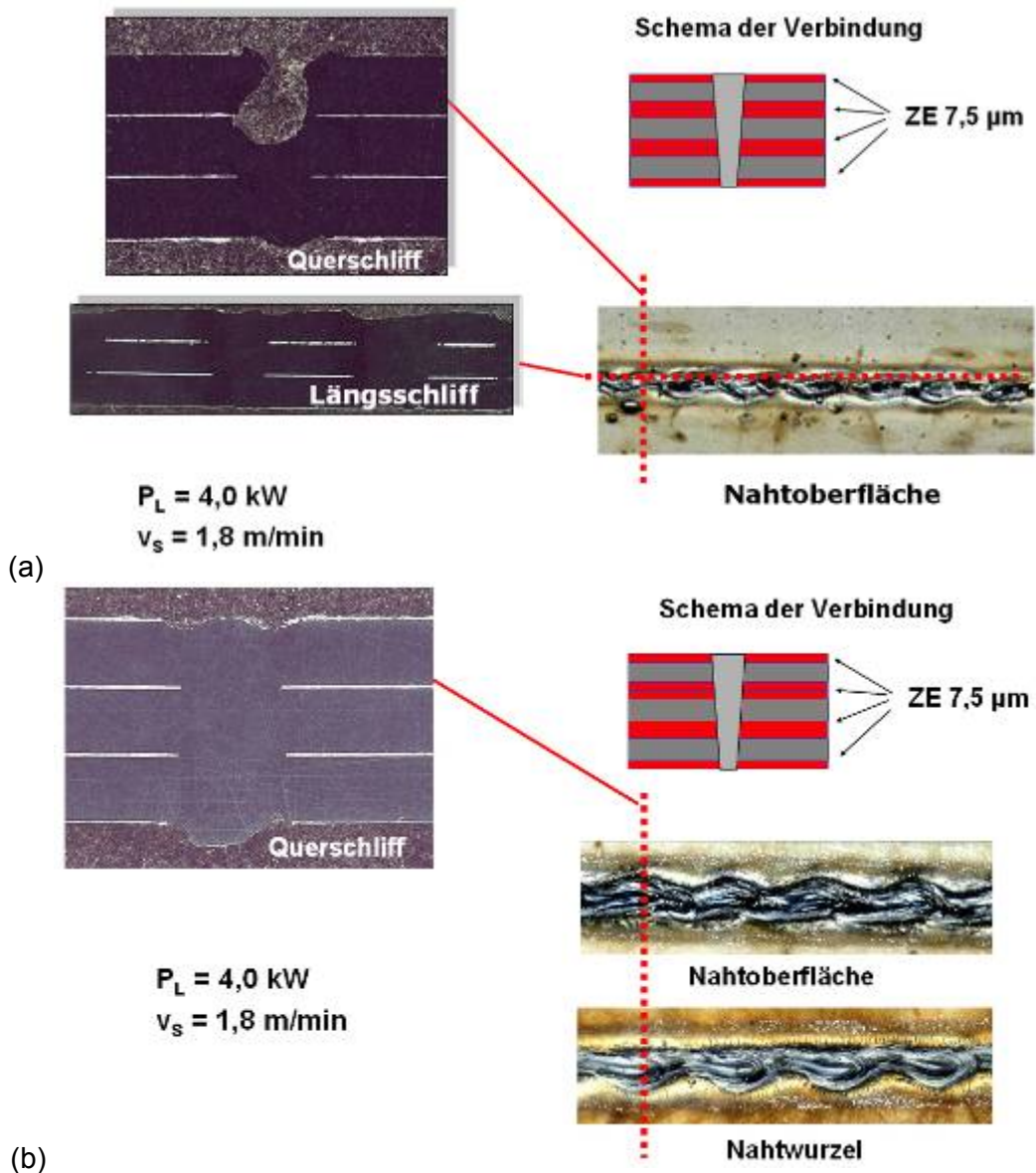


Bild 36: Einsatz der rotierenden Optik an ZE-beschichteten Blechen (Werkstoff: DC04+ZE 75/75);  
 Längs- und Quermakroschliffe sowie Nahtoberflächen  
 a) fest eingespannt  
 b) nur fixiert, geringfügig gespannt

Bei der o. g. Methode erfolgt eine sehr komplexe Bewegung durch die Überlagerung der Schweißbewegung mit einer Rotation, Bild 34.

Die Schweißparameter wurden zuerst an unbeschichteten Blechen unter Berücksichtigung der praxisrelevanten Schweißgeschwindigkeiten optimiert, Bild 35. Die ermittelten Parameter ließen sich jedoch nicht auf einen verzinkten Dreifachüberlappstoß übertragen. Trotz weiterer Anpassung der Parameter traten wesentliche Prozessinstabilitäten und Badauswürfe auf, Bild 36 a).

Positive Schweißergebnisse wurden nur dann erzielt, wenn die Dreifachüberlappstöße mit einer Spannvorrichtung geringer Spannkraft fixiert wurden, Bild 36 b). Dabei waren jedoch die Spaltbreiten größer als 0.

### **6.1.6 Zusammenfassung**

Im Abschnitt 6.1 wurden die Ergebnisse der Schweißversuche mit dem Nd:YAG-Laser an unbeschichteten und elektrolytisch verzinkten DC04-Blechen dargestellt.

Die wesentlichen Schlussfolgerungen für das Schweißen im Dreifachüberlappstoß an den elektrolytisch verzinkten Dünoblechen sind:

- ❖ Konservierungsmittel an der Blechoberfläche haben keinen negativen Einfluss auf die Prozessstabilität.
- ❖ Als problematisch erwies sich für den Schweißprozess die doppelte Zinkschicht sowohl im oberen als auch im unteren Blechzwischenraum. Eine Vielzahl von Prozessinstabilitäten und Schmelzbadauswürfen war die Folge.
- ❖ Eine der signifikanten Ursachen für Prozessstörungen ist der instabile Massentransport der Zn-Dämpfe in die Dampfkapillare, bedingt durch variierende Spaltbreiten und Ansammlungen des flüssigen Zn vor dem Schweißbad während des Schweißens.
- ❖ Über die Prozessparameter (Schweißgeschwindigkeit, Laserstrahlleistung, Fokusslage, Einstrahlwinkel) ist nur eine begrenzte Einflussmöglichkeit auf die Prozessstabilität beim Laser-Schweißen gegeben.
- ❖ Ein fehlerfreies Schweißen ist nur mit voreingestelltem Spalt oder mit einer Spannvorrichtung möglich, die der Spaltbildung während des Schweißens nicht entgegenwirkt.
- ❖ Sowohl das Laserschweißen mit Pulsbetrieb als auch der Einsatz der Doppelfokustechnik (70/30) und einer rotierenden Optik erbrachten keine Verbesserung der Schweißergebnisse. Es traten weiterhin Prozessinstabilitäten sowie Poren und Badauswürfe auf.

## 6.2 Schweißen von Mehrblechverbindungen aus ZE-Mg-beschichteten Dünoblechen mit dem Festkörperlaser DY 044

Ergänzend zu den Schweißuntersuchungen an unverzinkten und elektrolytisch verzinkten Blechen der Stahlsorte DC04 wurden Laserschweißungen an ZE-Mg beschichteten Blechen der Stahlsorte H220Y und DC06 mit technischem 0-Spalt durchgeführt.

### 6.2.1 Variation der Lage der Zink-Magnesium-Schicht im Dreifachüberlappstoß

Der erste Teil der Untersuchungen ist mit der ersten Spannvorrichtung (s. Bild 20) realisiert worden. Dabei sollten die Einflüsse der Lage und Dicke der ZE-Mg-Schichten im Dreifachüberlappstoß auf die Qualität der Schweißergebnisse und auf die Prozessstabilität untersucht werden. Die verschiedenen Varianten der Stoßauslegung sind im Bild 37 dargestellt.

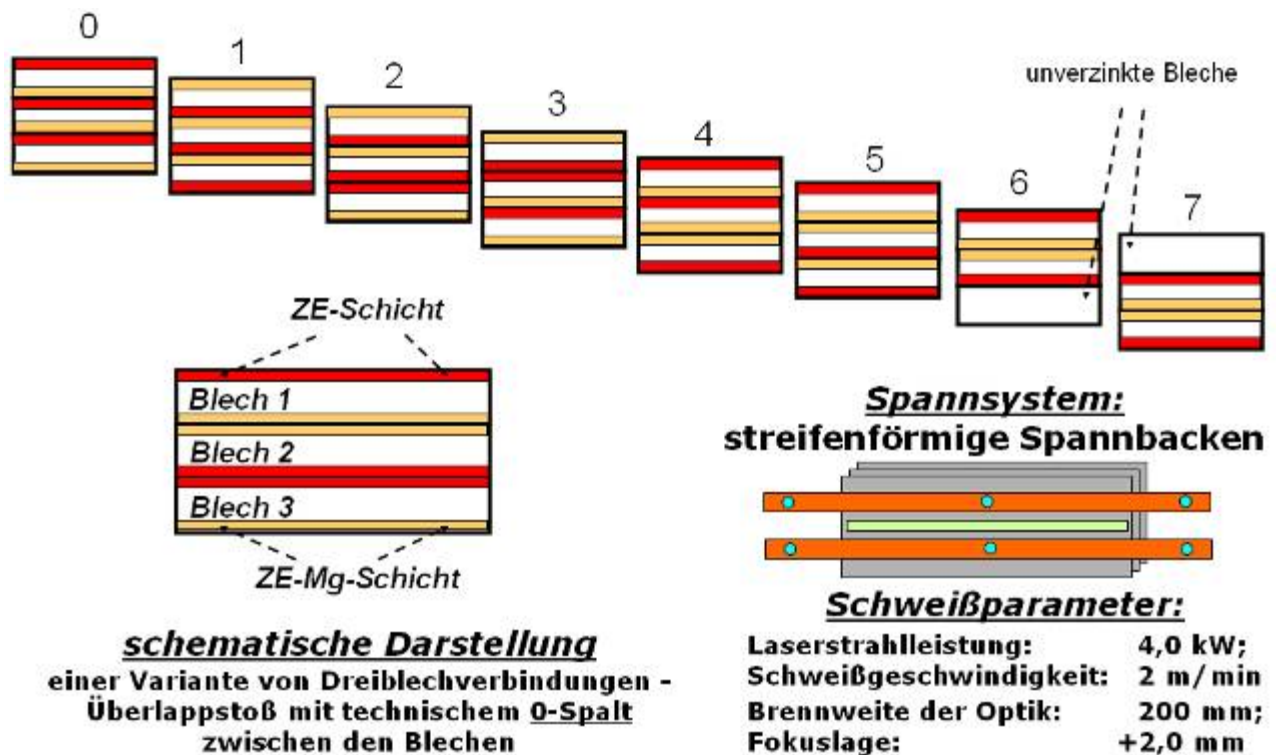


Bild 37: Untersuchte Varianten der Lage von ZE-Mg-Schichten im Dreifachüberlappstoß

Nach dem Schweißen wurde eine visuelle Bewertung der Nähte durchgeführt. Als ungünstig erwies sich die Variante 5 (Tabelle 9, Bild 38). Hierbei befand sich zwischen dem obersten und mittleren Blech eine doppelte ZE-Mg-Schicht und zwischen dem mittleren und unteren Blech eine ZE-Mg- und eine ZE-Schicht.

Vergleicht man jedoch die Nahtqualität der Schweißung dieser ungünstigen Variante 5 mit der der Laserschweißnähte an den nur ZE-verzinkten Blechen, so ist diese immer noch deutlich besser.

Tabelle 9: Visuelle Bewertung der Laser-Schweißnähte an den ZE-Mg-beschichteten Blechen H220Y

	0	1	2	3	4	5	6	7
<b>Schicht-variation</b>								
<b>Oberflächenlöcher</b>	+	-	++	++	++	+	-	++
<b>Randkerben/ Nahtunregel- mässigkeit</b>	+	+	++	++	+	+	+	+
<b>Spritzer</b>	+	+	+	+	+	-	+	+

**Bewertungsskala**

++	sehr gut
+	gut
-	befriedigend



Oberseite



Wurzelseite

Bild 38: Makroaufnahmen der Oberflächen der Laser-Schweißnähte an den ZE-Mg-beschichteten Blechen von H220Y, Variante 5

## 6.2.2 Bildung von Mikrorissen

### 6.2.2.1 Metallographische Untersuchungen

Zur metallographischen Bewertung der Laserschweißungen sind den Schweißverbindungen mittels Trennschneiden unter Wasserkühlung Proben für Quer- und Längsschliffe entnommen worden, Bild 39. Danach wurden die Proben wie folgt weiter vorbereitet:

- ➔ Einbetten: Warmeinbettung - Epoplast
- ➔ Schleifen: Siliziumkarbid-Naßschleifpapier ab ca. 200 µm – P80 in verschiedenen Stufen bis ca. 15 µm – P1200
- ➔ Polieren:
  1. hartes Kunstfasertuch, Poliermittel 15 µm
  2. mittelhartes Kunstfasertuch, Poliermittel 3 µm
  3. weiches Synthetiktuch, Poliermittel ¼ µm
 Diamantsuspension - wasserfrei wurde für Präparation verwendet.
- ➔ Reinigen 1: kurze Ultraschallreinigung im Alkoholbad



Nach dem Reinigen wurden die Querschliffe sowohl im ungeätzten als auch im geätzten Zustand (Ätzung: 0,3 % Salpetersäure, danach sofort mit verdünnter Kaliumhydroxid-Lösung gespült und anschließend mit Alkohol gereinigt) metallographisch untersucht.

An den geätzten Querschliffen zeigten sich lichtmikroskopisch rissähnliche Erscheinungen, bei denen es sich um Mikrorisse handelt (Bild 40).

Diese Mikrorisse traten im Schweißgut und in der WEZ entweder vereinzelt oder auch in Form von verästelten Anhäufungen auf. Als Ausgangsort für das Risswachstum in das Schweißgut hinein diente der Grenzbereich Spalt-Schweißgut.

Nach EN ISO 13919-1 sind alle Arten von Rissen mit Ausnahme von Mikrorissen (Rissfläche:  $< 1 \text{ mm}^2$ ) für alle drei Bewertungsgruppen B, C und D nicht zulässig. Da die nachgewiesenen Mikrorisse in den untersuchten Querschliffen der Laserproben jedoch eine Gesamtfläche von  $< 1 \text{ mm}^2$  haben, gelten diese Schweißungen – wenn man nur das Kriterium „Riss“ heranzieht - als zulässig.

Mit dem Lichtmikroskop war es nicht möglich, festzustellen, ob diese Mikrorisse „ungefüllt“ oder mit dem Zink „gefüllt“ sind.

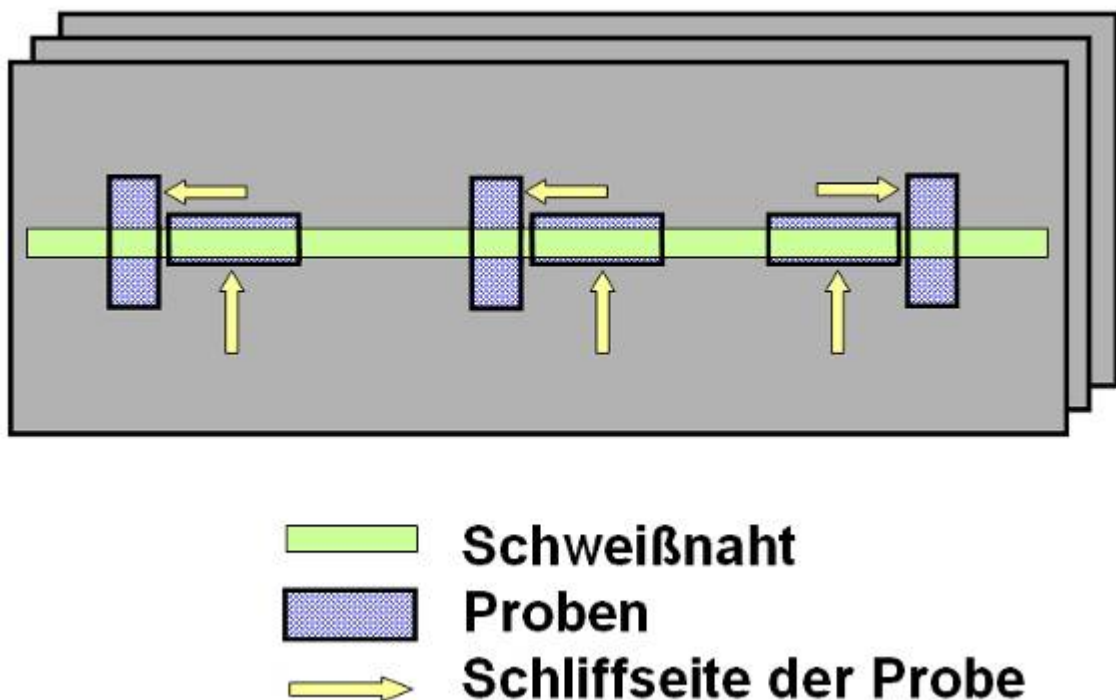


Bild 39: Entnahme der Proben für die metallographischen Untersuchungen

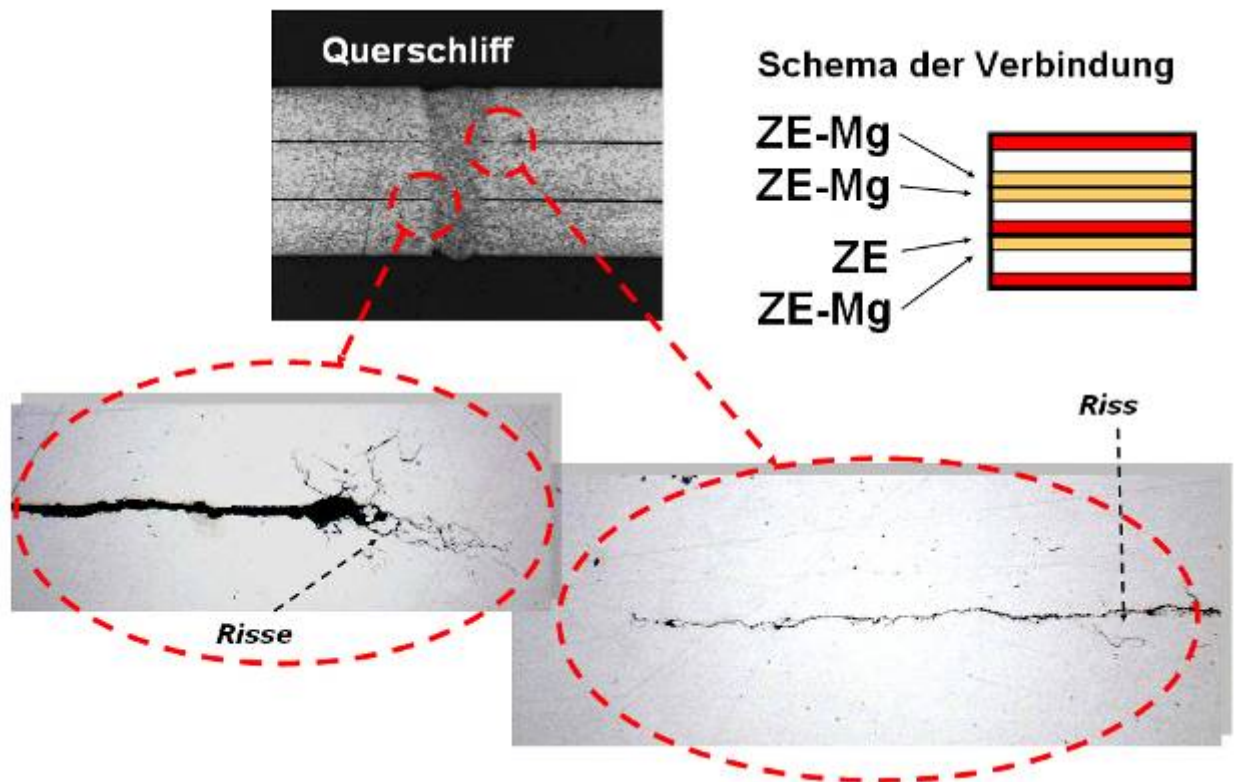


Bild 40: Mikrorisse im Schweißgut und in der WEZ einer Laser-Schweißnaht an den ZE-Mg-beschichteten Blechen von H220Y, Variante 5 (Mikroaufnahmen: poliert und ungeätzt)

### 6.2.2.2 Einfluss der Einspannbedingungen auf die Mikrorissbildung

Die weiteren Untersuchungen zu dieser Problematik befassten sich mit der Klärung der Frage, ob über die Einspannbedingungen der Proben Einfluss auf die Mikrorissneigung in den Schweißverbindungen genommen werden kann. Im Ergebnis dieser Schweißungen war festzustellen, dass Mikrorisse sowohl in den während des Schweißens eingespannten, als auch in den ohne Spannvorrichtung geschweißten Verbindungen auftraten, Bild 41. Folglich bewirkt selbst der geringere Spannungszustand bei den nicht eingespannten Proben Mikrorissbildung in den Schweißnähten. Für die Rissbildung sind offensichtlich nur mechanische Spannungen (z.B. thermisch induziert), wie sie während des Schweißens auftreten, verantwortlich (vgl. auch Abschnitt 6.2.2.6). Diese können u. a. durch die Streckenenergie bzw. Schweißgeschwindigkeit bei konstanter Laserleistung beeinflusst werden.

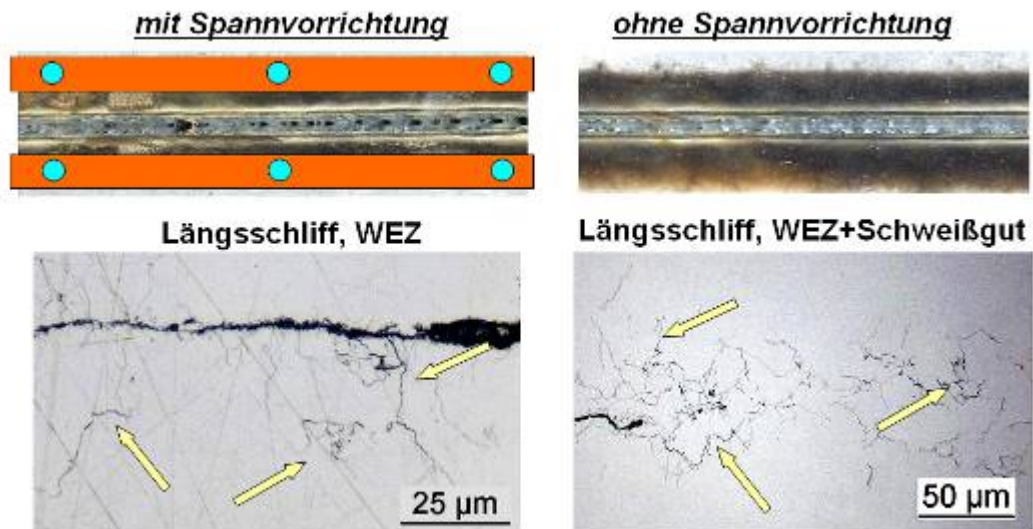


Bild 41: Einfluss der Spannbedingungen auf die Mikrorissbildung beim Laserschweißen an den ZE-Mg-beschichteten Blechen von H220Y, Variante 5 aus Bild 30

### 6.2.2.3 Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Mikrorissbildung

Die Untersuchungen hierzu zeigten, dass über die Schweißgeschwindigkeit Einfluss auf die Mikrorissbildung genommen werden kann. Mit zunehmender Schweißgeschwindigkeit und folglich abnehmender Streckenenergie reduziert sich das Auftreten der Mikrorisse, Bild 42. Die rissähnlichen Erscheinungen wiesen ca. 25..30% der untersuchten Schliffebenen auf. Eine quantitative Aussage über die Häufigkeit des Rissauftretens ist dadurch nicht möglich.

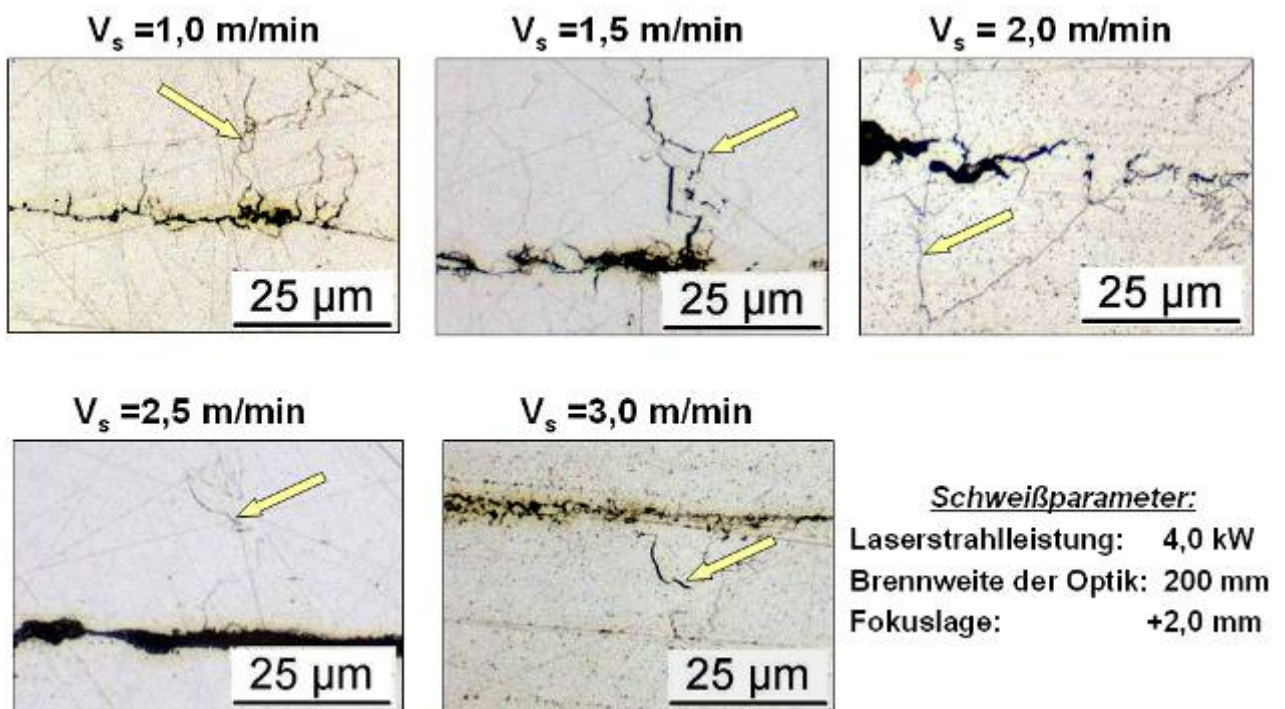


Bild 42: Einfluss der Schweißgeschwindigkeit auf die Mikrorissbildung beim Laserschweißen an den ZE-Mg-beschichteten Blechen von H220Y, Variante 5 aus Bild 30

#### **6.2.2.4 Einfluss des Grundwerkstoffes und der Stoßauslegung auf die Mikrorissbildung**

Ergänzend fanden vergleichende Schweißuntersuchungen mit dem Nd:YAG-Laser DY 044 an ZE-Mg-beschichteten Dünoblechen der Stähle H220Y und DC06 mit folgendem Versuchsprogramm statt:

- H220Y / Dreifachüberlappstoß, 0-Spalt
- H220Y / Zweifachüberlappstoß, 0-Spalt
- H220Y / Dreifachüberlappstoß, 0,2 mm Abstand zwischen Blechen
- DC06 / Dreifachüberlappstoß, 0-Spalt
- DC06 / Zweifachüberlappstoß, 0-Spalt

Die Bleche wurden mit dem 1. Spannsystem (Bild 20) geschweißt. Für die Fertigung der Zweifachüberlappstöße erfolgte eine Anpassung der Schweißgeschwindigkeit (Bild 43). Alle Nähte wiesen eine gute Oberflächenqualität auf.

Die anschließenden metallographischen Untersuchungen hatten zum Ergebnis, dass beim Schweißen im Dreifach- und im Zweifachüberlappstoß in den mit 0- bzw. 0,2-Spalt gefertigten Schweißnähten (Schweißgut, WEZ) beider Grundwerkstoffe (H220Y+ZE-Mg und DC06 ZE-Mg) Mikrorissbildung auftrat. Interessant ist, dass Spaltbreite und Stoßauslegung also keinerlei Einfluss auf die Rissbildung zu haben scheinen.

Ergänzend wurden nochmals ausgewählte Querschliffe der im Dreifachüberlappstoß gefertigten Laserschweißnähte der elektrolytisch verzinkten Bleche von DC04 mit der gleichen Präparationsmethodik angefertigt. Diese zeigten jedoch keine Mikrorisse (Bild 45). Die aufgeführten Ergebnisse basieren auf der Auswertung von mindestens 3 Querschliffen je Schweißung.





Bild 43: Vergleichsuntersuchungen an den Werkstoffen H220Y und DC06 (Stoßauslegung, Schweißgeschwindigkeit und Nahtoberflächen)

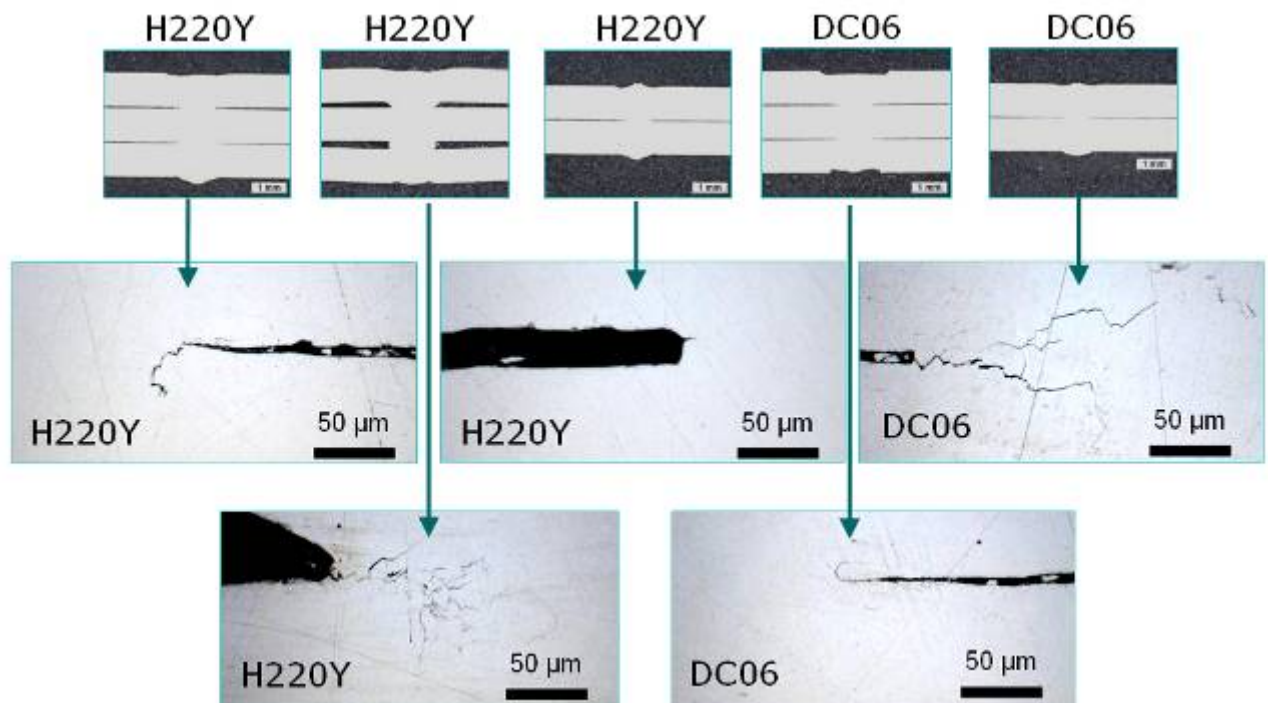


Bild 44: Querschliffe der Schweißverbindungen, Werkstoff: H220Y ZE-Mg und DC06 ZE-Mg

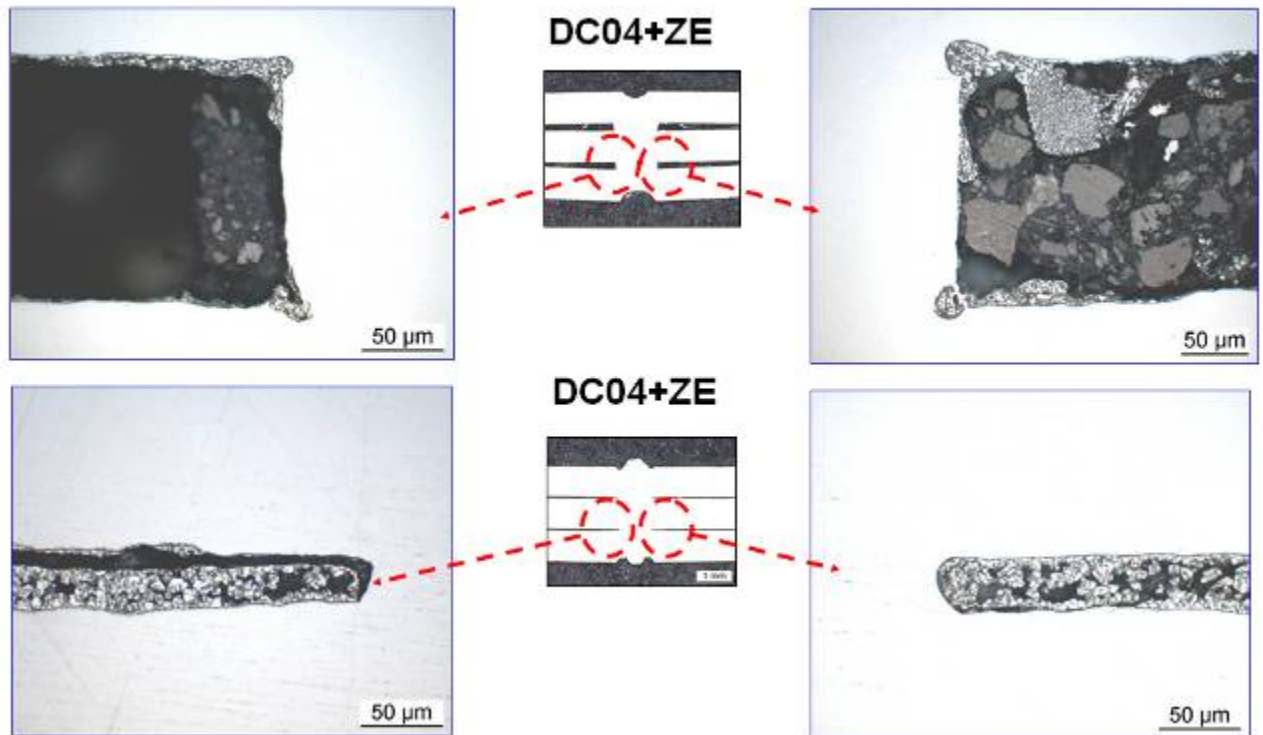


Bild 45: Querschliffe der Schweißverbindungen, Werkstoff: DC04+ZE

#### 6.2.2.5 REM-Untersuchungen der Mikrorisse

Zur Klärung der Ursachen für die Mikrorissbildung wurde eine Reihe von weiteren Untersuchungen realisiert. Zu diesen Untersuchungen gehörten REM-Untersuchungen der Risse sowie Eigenspannungsbestimmungen im Rissbereich am Röntgendiffraktometer.

Die REM-Aufnahmen (alle im BSE-Kontrast) und EDX-Analysen dienen zur Klärung der Ursache für die Mikrorissbildung bzw. zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der lichtmikroskopisch sichtbaren Füllungen in den Mikrorissen.

Für die Aufnahmen kam BSE-Kontrast-Verfahren (back scattered electron) zur Anwendung. Das Verfahren liefert einen verstärkten Materialkontrast, d.h. die Elektronen reflektieren stärker und erscheinen dann heller als leichtere Atome, wie z.B. nichtmetallische und organische Bestandteile mit geringerer elektrischer Leitfähigkeit.

Für diese Untersuchungen wurde eine typische Schliffprobe (Variante 5, Bild 37) mit doppelter ZE-Mg-Schicht im oberen Blechzwischenraum verwendet. Die Spaltbreite betrug an dieser Stelle 0,2 mm (Bild 46). Um den Einfluss eines Ätzmittels auf die Ergebnisse der EDX-Analysen auszuschließen, ist diese Probe im polierten und ungeätzten Zustand analysiert worden.

Zunächst war für die Blechzwischenräume direkt neben dem Schweißgut festzustellen, dass es zu einer ca. 50 µm breiten vollständigen Abdampfung der ZE-Mg-Beschichtung kommt (Bild 47), währenddessen in weiter entfernten Bereichen keine Zerstörung der

Schicht erfolgt (Bild 48). Wie die Analysen aus Tabelle 8 zeigen, befindet sich Magnesium nur im oberen Bereich der Beschichtung.

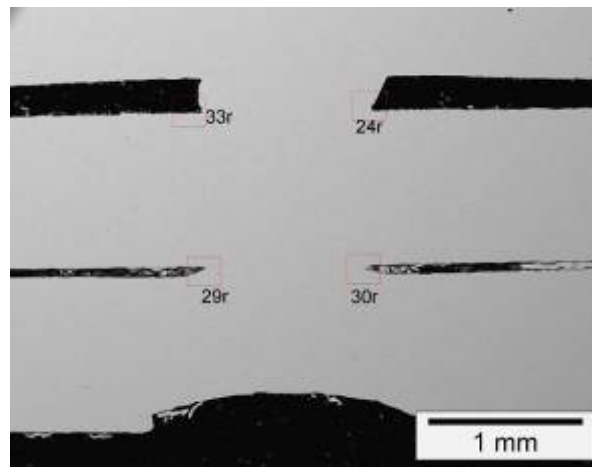


Bild 46: REM-Übersichtsbild des Querschliffes der Laserschweißnaht

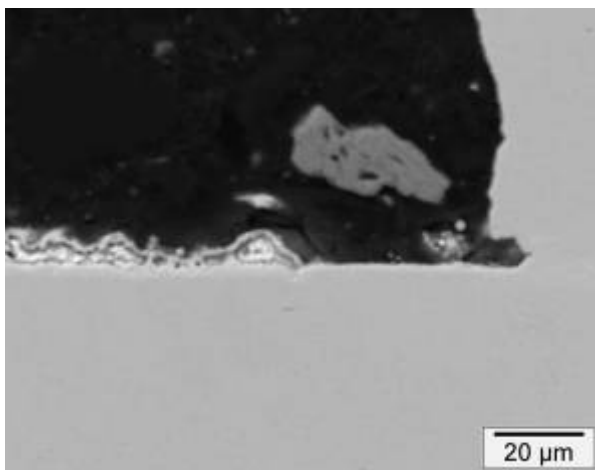


Bild 47: REM-Detailbild des Übergangs vom Schweißgut zur Blechoberfläche – Punkt 33r im Bild 46

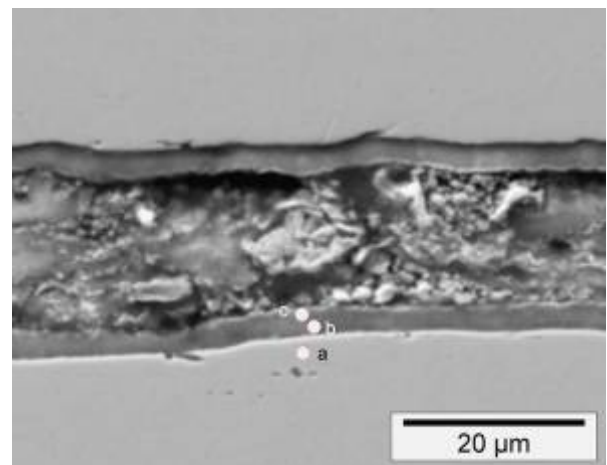


Bild 48: REM-Detailbild des Spalts zwischen zwei Blechen (in Verlängerung zu Bild 47), ca. 10 mm von der Schweißnaht entfernt

In den Nahtbereichen im unteren Blechzwischenraum (Punkte 29r und 30r im Bild 46) wurden Mikrorissagglomerationen festgestellt (Bild 49).

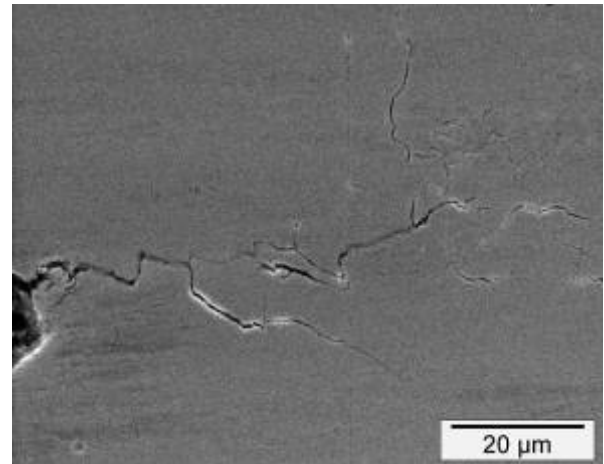
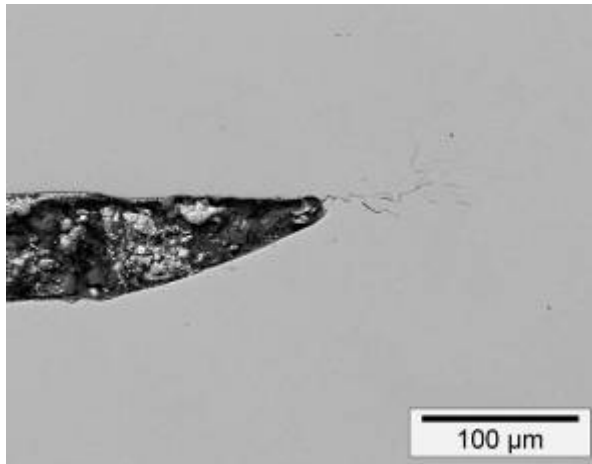


Bild 49: REM (BSE-Kontrast) Detailbild aus Bild 50: Bereich 29r

An ausgewählten Stellen im Mikroriss selbst und in den mikrorissnahen Bereichen erfolgten EDX-Analysen (Bild 48, Tabelle 10). Diese Analysen weisen darauf hin, dass die untersuchten Risse gefüllt sind. Währenddessen die Grundmatrix (Bild 50 d) nur Fe, C, O aufwies, wurden im Riss außerdem die Elemente Mg, Zn sowie Al und Si nachgewiesen. Da der Durchmesser des EDX-Messpunktes größer war, als der Riss breit, wurde bei diesen Messungen auch der rissnahen Grundwerkstoffbereich mit analysiert, was z.B. das Auftreten der relativ hohen Fe-Gehalte erklärt.

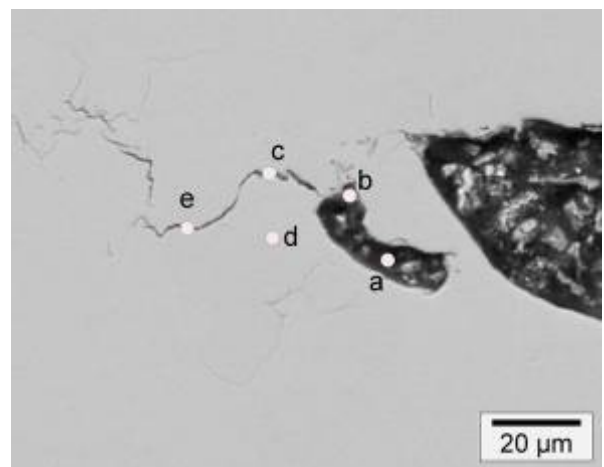


Bild 50: REM (BSE-Kontrast) Detailbild zu Bild 2.2.4 mit Markierung der EDX-Analysestellen

Tabelle 10: EDX-Analysen an ausgewählter Positionen der Laser-Schweißung (Angaben in at-%)

Position	C	N	O	Mg	Fe	Zn	Bemerkungen
Bild 48 a	16,9	-	1,4	-	81,7	-	Grundmaterial
Bild 48 b	32,0	-	10,7	-	5,2	52,1	Zn-Deckschicht nahe Grundmaterial
Bild 48 c	28,9	-	9,2	6,5	2,2	53,3	oberer Bereich der Zn-Deckschicht
Bild 50 d	17,6	-	3,3	-	79,1	-	Grundmaterial
Bild 50 a	71,0	-	4,8	2,2	13,3	7,8	Rissinneres, zusätzlich Al, Si, S, K, Ca
Bild 50 b	58,1	-	7,8	3,3	29,7	0,4	Rissinneres, zusätzlich Al, Si
Bild 50 c	28,4	-	3,7	2,2	58,8	7,0	Riss
Bild 50 e	47,9	-	5,1	1,5	39,6	5,9	Riss





möglichen Unterschied im Spannungszustand der geschweißten Werkstoffe H220Y und DC06 geachtet.

Das o. g. Messverfahren beruht auf der Interferenz monochromatischer Röntgenstrahlung bei der Beugung an Gitterebenen im Metallgitter. Aus Interferenzstreifen kann auf die Netzebenenabstände des Gitters geschlossen werden, welche sich durch die Eigenspannungen verändern. Aufgrund der geringen Eindringtiefe der Röntgenstrahlung erhält man jedoch lediglich Informationen über den oberflächennahen Eigenspannungszustand. Bei metallischen Werkstoffen kann durch elektrolytisches Polieren die Tiefenverteilung ermittelt werden [123].

Die Eigenspannungsmessungen wurden röntgenographisch mit einem  $\Omega$ -Diffraktometer senkrecht zur Naht durchgeführt. Unter Verwendung der Cr-K $_{\alpha}$ -Strahlung sind Interferenzlinien der {211}-Ebene des Ferrits unter sechs  $\Psi$ -Winkeln gemessen worden.

Die verwendeten Messparameter sind:

- Röntgenstrahlung / Filter: Cr-K $_{\alpha}$  / Vanadium-Folie 99,9%
- Wellenlänge: 0,2289 nm
- Primärebene: 1 mm
- Detektor: Szintillationszähler 1°
- Gitterebene {hkl}: {211}-Ebene des Ferrits
- 2 $\theta$ -Bereich und Schrittweite: 152-160° in 0,1°-Schritten
- Zählzeit je Schrittweite: 5 s
- $\Psi$ -Bereich und Schrittweite: 0°, 18°, 27°, 33°, 39° und 45°
- $-\frac{1}{2} S_2$  {hkl}:  $6.08 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$
- $S_1$  {hkl}:  $-1.25 \cdot 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{N}$

Die Messungen erfolgten vorwiegend an unbehauelter Blechoberfläche. Um den Einfluss des Blechkaltwalzens (Dressierung) auf die Messergebnisse zu minimieren, wurde an einigen Proben eine ca. 0,03 mm dicke Schicht an den Messstellen elektrolytisch abgetragen.

Im Werteverlauf der Längseigenspannungen der sowohl ohne Spalt als auch mit einem Spalt geschweißten Proben wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt (s. Anhang 2, Bild A2-1). Das Niveau der Längsspannungen im Nahtbereich übersteigt das Niveau der Querspannungen um ein Vielfaches.

Im Nahtbereich sind an allen Proben des Werkstoffes H220Y hohe Zugspannungen bis zu 350...400 MPa festgestellt worden, (s. Anhang 2, Bild A2-2). Im Werkstoff DC06 erreichen

sie dagegen nur einen maximalen Wert von 190 MPa (s. Anhang 2, Bild A2-3). Der Spannungsgradient im DC06 ist generell nicht so stark ausgeprägt wie der im H220Y. Die Eigenspannungsmessungen zeigten, dass alle Schweißungen einen relativ hohen Spannungszustand sowie hohe Spannungsgradienten in der WEZ aufweisen. Die beim Schweißen entstehenden Zugspannungen, die in der Nähe der Dehngrenze des jeweiligen Werkstoffes liegen, begünstigen die Rissbildung.

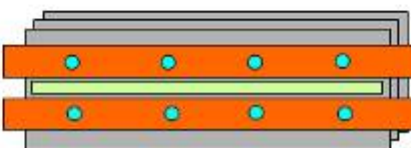
### 6.2.3 Einfluss der Schutzgase

Im Weiteren wurden die Einflüsse der Schutzgase auf die Naht- bzw. Oberflächenqualität untersucht. Als Schutzgase dienen das Gasgemisch Ar/He 70%/30%, Ar, He sowie  $N_2$ . Die Schutzgasmenge wurde zwischen 10 und 30 l/min variiert. Die Anordnung der Schutzgasdüse ist im Bild 52 dargestellt. Nach der Optimierung der Düsenanordnung betrug der Neigungswinkel der Schutzgasdüse zur Blechoberfläche ca.  $30^\circ$ . Der Abstand zwischen der Düse und dem Auftreffpunkt des Strahles betrug ca. 7 mm. Es wurde ohne Crossjet mit dem 3. Spannsystem 3 aus Bild 20 geschweißt.

Durch das Kühlen und Wegblasen der ausströmenden Metalldämpfe mit dem Schutzgas höherer Ionisationsenergie reduziert sich die Größe der Dampffackel oberhalb des Keyholes, Bild 53. Der Schweißprozess wird dadurch stabiler.



**Spannsystem:**  
stabile streifenförmige  
Spannbacken



Schweißrichtung

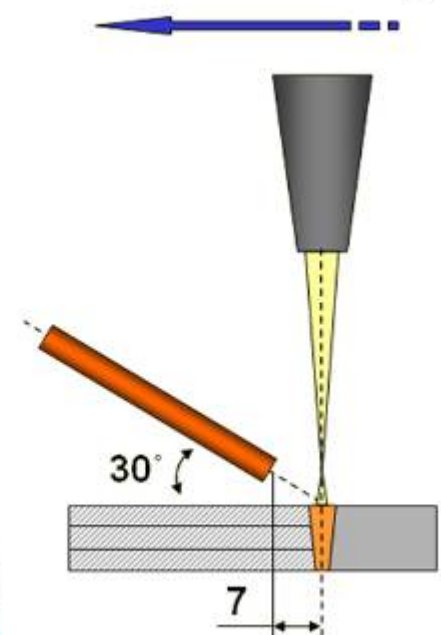


Bild 52: Anordnung der Schutzgasdüse



Bild 53: Metalldampfplüchten an der Schweißstelle

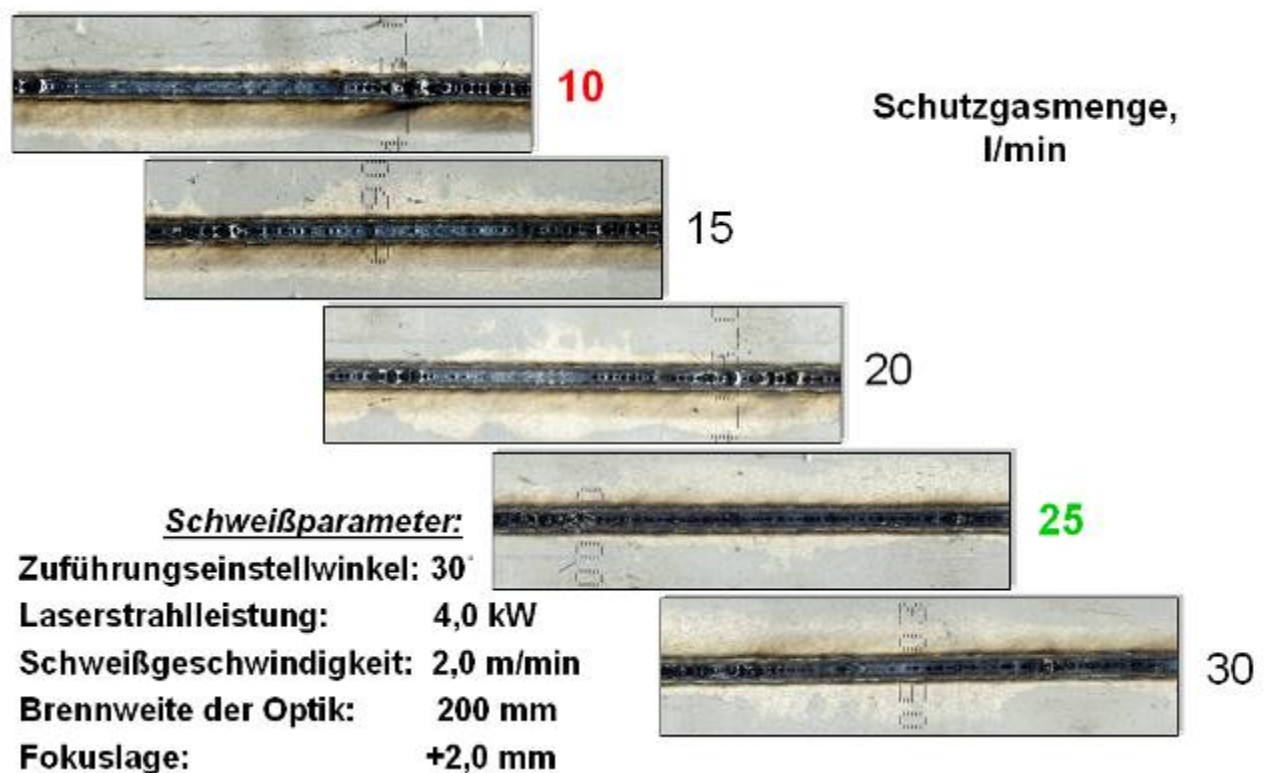


Bild 54: Einfluss des Schutzgases, Ar/He (70%/30%) auf die Qualität der Nahtoberflächen.  
Werkstoff H200Y, ZE-Mg-Beschichtung

Es zeigte sich, dass eine optimale Gasdurchflussmenge für die dargestellte Düsenanordnung bei ca. 20-25 l/min liegt, Bild 54. Die Spritzerbildung war dabei minimal. Die besten Ergebnisse wurden unter Einsatz von Ar und He erreicht, Anhang A3. Der Einfluss der Schutzgase auf die Oberflächenporosität war jedoch begrenzt. Es war nicht möglich, die Oberflächenporosität vollständig zu beseitigen.

### 6.2.4 Laserstrahlschweißen unter Einsatz der Doppelfokustechnik

Der Einsatz der Doppelfokustechnik mit einer Strahlleistungsverteilung 70/30 [%] brachte keine Verbesserung in der Nahtqualität beim Schweißen von ZE-Mg-beschichteten Dünnblechen. Es wurde sogar eine Zunahme der Spritzerbildung beobachtet, Bild 55.

### 6.2.5 Laserstrahlschweißen unter Einsatz der rotierenden Optik

Die Schweißuntersuchungen mit der von der SLV Halle entwickelten rotierenden Optik zeigten, dass am unbeschichteten Dreifachüberlappstoß eine weitgehende Veränderung der Nahtgeometrie bzw. Nahtbreite realisierbar ist. Bei einem entsprechenden Verhältnis von Vorschub- und Drehgeschwindigkeit wurden im Gegensatz zu wellenförmigen Nähten (s. A. 6.1.5) geradlinige breite Nähte erzeugt. Nahtaussehen und Nahtschuppung waren bei der Drehgeschwindigkeit von 1000 U/min und der Vorschubgeschwindigkeit von 0,9 m/min denen von konventionell geschweißten Nähten ähnlich. An ZE-Mg beschichteten Blechen ließ sich somit keine Qualitätserhöhung erzielen, Bild 55.

Als weitere Variante der rotierenden Optik ist die rotierende Doppelfokustechnik stichprobenartig untersucht worden. Eine Anwendung der rotierenden Doppelfokusoptik hat zur Reduzierung der Oberflächenporosität geführt, Bild 57. Die metallographischen Untersuchungen zeigten aber eine Zunahme der Porosität in der Schweißnaht.

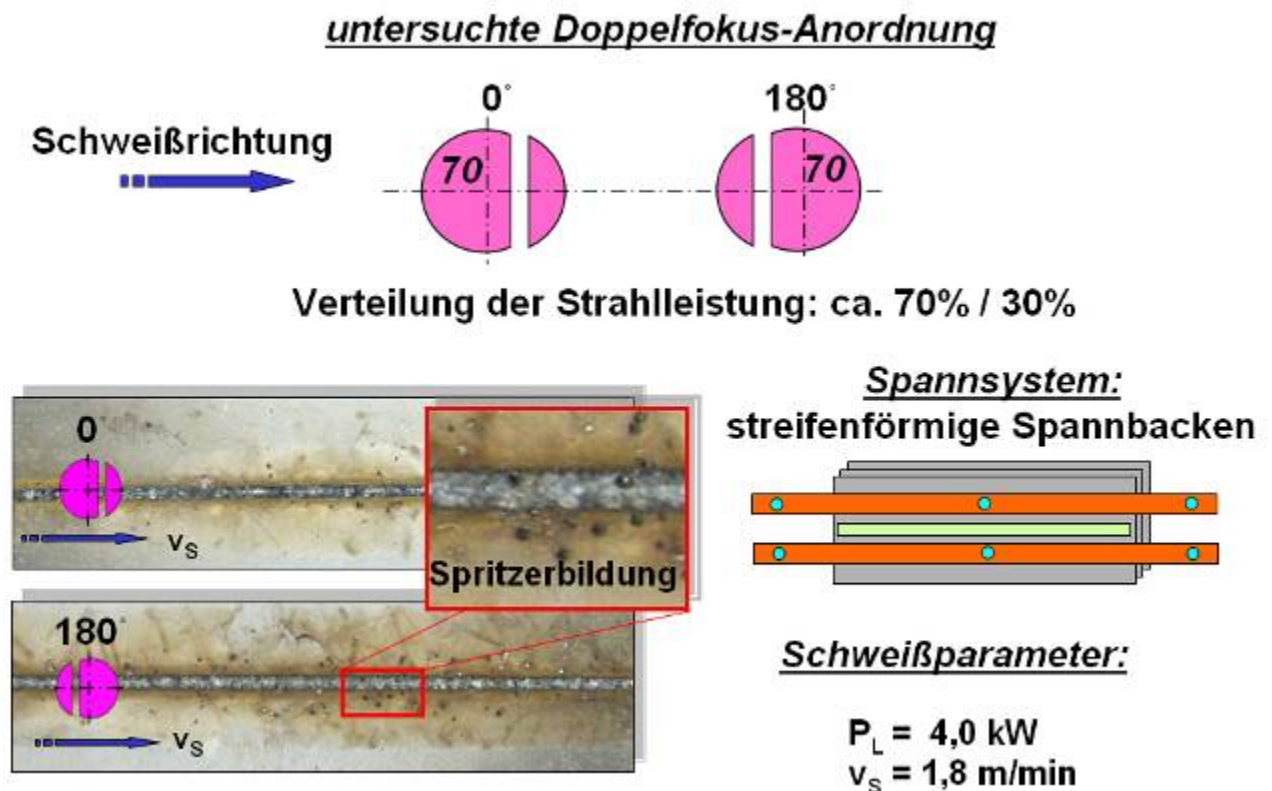



Bild 55: Anwendung der Doppelfokustechnik. Werkstoff H200Y+ZE-Mg




**Schweißparameter:**

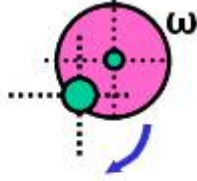
<b>Schweißgeschwindigkeit:</b>	0,9 [m/min]
<b>Laserstrahlleistung:</b>	2,0 [kW]
<b>Fokusslage:</b>	+ 2,0 [mm]
<b>Dreheregler:</b>	790



**zum Vergleich: Schweißung an unbeschichteten Blechen**



**Schema der Strahldrehung**



**Spannsystem:**  
stabile streifenförmige Spannbacken

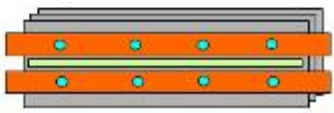



Bild 56: Anwendung der rotierenden Optik. Werkstoff H200Y+ZE-Mg

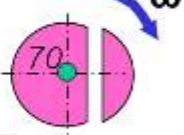
**Schweißparameter**

<b>Schweißgeschwindigkeit:</b>	0,9 [m/min]
<b>Laserstrahlleistung:</b>	3,2 [kW]
<b>Fokusslage:</b>	0 [mm]
<b>Dreheregler:</b>	790

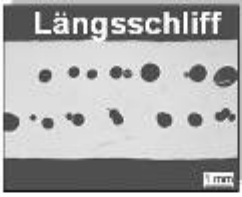


**zum Vergleich:**  
Schweißverbindung an unbeschichteten Blechen

**Schema der Strahldrehung**



**Längsschliff**






Bild 57: Anwendung der rotierenden Doppelfokusoptik, Werkstoff H200Y+ZE-Mg

### 6.2.6 Untersuchungen zur magnetischen Beeinflussung des Schmelzbades beim Laserstrahlschweißen

Die im Rahmen vorheriger Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse hatten ergeben, dass mittels Festkörperlaser und unter Einsatz des 3. Spannsystems (0-Spalt-Bedingungen, Bild 20) die Herstellung einer Schweißverbindung am Dreifachüberlappstoß der ZE-Mg-beschichteten Dünobleche zwar möglich ist, dass jedoch dann eine zur Nahtoberfläche hin geöffnete Porosität in Kauf genommen werden muss.

Diese Poren traten reihenweise in der Nahtmitte auf. Eine der Ursachen für eine derartige Porosität wird darin gesehen, dass die Dampfkapillare bedingt durch den Druck der Zinkdämpfe vor dem Erstarren des Schweißgutes nicht „geschlossen“ werden kann. Eine weitreichende Optimierung der Prozess- und Laserparameter konnte diese Porenbildung nicht beseitigen. Es sollte deshalb untersucht werden, ob durch eine magnetische Badbeeinflussung die Nahtqualität entscheidend verbessert werden kann. Die primäre Zielstellung lag in der Verbesserung der Entgasungsbedingungen im Schmelzbad.

Das magnetisch unterstützte Laserschweißen wurde am Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW), realisiert. Im Schrifttum wird publiziert, dass die Überlagerung der magnetischen Kräfte beim Laserschweißen von Leichtlegierungen zur gezielten Veränderungen der Nahtform, der Einschweißtiefe und der Oberflächentopographie sowie Reduktion der Porenbildung führt [124].

Mit einem im Wesentlichen in Schweißrichtung das Schmelzbad durchfließenden Strom lässt sich je nach Magnetfeldorientierung ein Niederdrücken oder ein Anheben des gesamten Schmelzbades realisieren. Die in [125] vorgestellten Versuchsergebnisse demonstrieren eindeutig das Wirksamwerden elektromagnetischer Kräfte innerhalb des Schmelzbades auch beim Laserstrahlschweißen von Feinkornbaustählen. Es wurde gezeigt, dass elektromagnetische Volumenkräfte erzeugt und nutzbar gemacht werden können, um das Strömungsfeld im Schmelzbad zu beeinflussen, um so die Prozessergebnisse des Laserstrahlschweißens gezielt in vorteilhafter Weise zu verändern.

### **6.2.6.1 Versuchsbedingungen**

Als Laserstrahlquelle kam der Nd:YAG-Laser HLD4006 4,0 kW der Fa. Trumpf zum Einsatz. Der Versuchsplan sah folgende Arbeitsschritte vor:

- Schweißen mit einer externen Stromzufuhr von 300-600 A zur Fügezone (Zusatzstrom) ohne magnetische Beeinflussung,
- Schweißen mit Zusatzstrom und DC-Magnet,
- Schweißen mit DC-Magnet, jedoch ohne Zusatzstrom,
- Schweißen mit Zusatzstrom und Permanentmagneten.

Der Versuchsaufbau ist im Bild 58 dargestellt. Das Schweißbad wurde durch einen externen Strom, durch ein externes Magnetfeld und durch das Zusammenwirken beider elektromagnetischen Komponenten beeinflusst.



Magnetanordnung – Schema

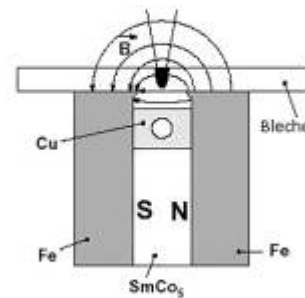


Bild 58: Versuchsaufbau der magnetischen Beeinflussung des Schweißbades [Foto: IFSW]

### 6.2.6.2 Versuchsdurchführung

Die Positionierung der Magnete unter der Schweißnaht erforderte einen relativ großen Abstand zwischen den Spannbacken einer Spannvorrichtung. Dadurch war eine Fixierung der Bleche mit 0-Spalt nicht möglich. Zur Realisierung eines technischen 0-Spaltes wurden Proben im Überlappstoß durch das Punktschweißen aneinander geheftet. Um negative Einflüsse der Zinkverdampfung auf die Schweißpunktqualität auszuschließen, wurden die Beschichtungen vor dem Punktschweißen lokal elektrolytisch abgetragen, Bild 59. Die Beschichtung der Fügestellen blieb dabei erhalten. Das Versuchsprogramm ist Anhang A4.1 zu entnehmen.

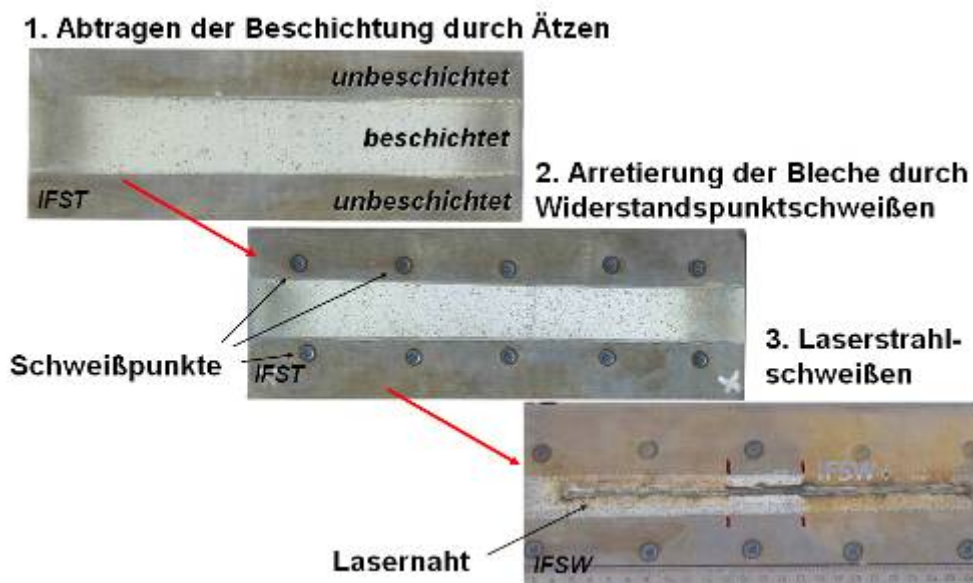


Bild 59: Vorbereitung der Dreifachüberlappstöße zum Schweißen unter Einsatz eines Magneten



### **6.2.6.3 Versuchsergebnisse**

Trotz des Heftens der Bleche war es nicht möglich, an allen Proben gleiche Spaltbedingungen zu realisieren. Die meisten Proben wiesen geringfügige Spalte in den Blechzwischenräumen auf (s. Anhang A4.4). Das Vorhandensein dieser Spalte wirkte sich positiv auf die Schweißergebnisse aus. Alle Proben konnten sogar ohne magnetische Beeinflussung mit sehr guter Nahtqualität verschweißt werden. Die Nähte waren nahezu porenfrei.

Aufgrund unterschiedlicher Versuchsbedingungen (Strahlquelle, Spaltbreite) ist jedoch eine direkte Vergleichbarkeit der erzielten Schweißergebnisse mit denen der vorhergehenden Schweißversuche nicht gegeben.

Der Einsatz von Magnetfeldern und durchlaufenden Strömen hat nachweisbare Einflüsse sowohl auf die Nahtoberfläche als auch auf die Nahtform gezeigt. Die Einflüsse auf die Nahtporosität konnten aus o. g. Gründen nicht eindeutig definiert werden.

In Abhängigkeit von Magnetart und zusätzlicher Stromeinbringung änderte sich die Oberflächenqualität der Schweißraupen. Die mit einem Permanentmagnet geschweißten Proben M19-M22 hatten in den Bereichen der Magneteinwirkung eine besonders gleichmäßige Schuppung (s. Anhang, A4.2).

Die Durchstrahlungsprüfung der Proben M17-M26 zeigte, dass die mit gleichzeitig einwirkendem Zusatzstrom und Permanentmagnet hergestellten Proben M18 und M19 minimale innere Fehler aufwiesen (s. Anhang A4.3). Durch den Schweißbadbereich floss dabei ein Strom von 500-600 A.

Die metallographischen Untersuchungen ergaben auch, dass sich die Geometrie der Nähte bei den Proben M10 und M14 infolge elektromagnetischer Einflussfaktoren leicht änderte. Am Querschliff der Probe M10 ist eine Vergrößerung der Breite der Nahtwurzel zu erkennen. Die Naht der Probe M14 ist durch eine externe magnetische Einwirkung asymmetrisch geworden.

Die durchgeführten Untersuchungen hatten zum Ergebnis, dass prinzipiell die Möglichkeit zur Beeinflussung der Schweißergebnisse beim Laserschweißen von ZE-Mg-beschichteten Dreifachüberlappstößen durch zusätzliche magnetische Beeinflussung des Schmelzbades gegeben ist. Die Einflüsse auf die Nahtgeometrie sind eindeutig. Aussagen über die Wichte dieser Einflüsse auf die Steigerung der Bearbeitungsqualität sind zum heutigen Zeitpunkt jedoch nicht möglich. Hierzu wären weitere Untersuchungen notwendig, die eine höhere statistische Sicherheit ermöglichen.

### 6.2.7 Zusammenfassung

Im Ergebnis der Schweißversuche mit dem Nd:YAG-Laser an ZE-Mg beschichteten H220Y-Blechen ist zusammenfassend festzustellen:

- ❖ Die ZE-Mg-beschichteten Bleche lassen sich generell besser als die ZE-beschichteten Bleche schweißen. Der Schweißprozess ist wesentlich stabiler.
- ❖ Die größten Einflüsse auf den Schweißprozess gehen, wie auch im Falle der verzinkten Bleche, von der Spannvorrichtung aus.
- ❖ Die Schweißnähte, die mit dem 1. und 4. Spannsystem (Bild 20) gefertigt wurden, erfüllen die Bewertungsgruppe B nach EN ISO 13919-1; die mit dem 3. Spannsystem hergestellten Schweißnähte nur die Bewertungsgruppe D.
- ❖ Beim Schweißen mit technischem 0-Spalt (Spannvorrichtung „C“) wird eine über die Nahtlänge annähernd gleichmäßig verteilte Porenbildung beobachtet.
- ❖ Die Bildung von Oberflächenporen lässt sich zwar durch eine Prozessoptimierung reduzieren, jedoch nicht vollständig beseitigen.
- ❖ Zn- und Mg-Oxide lagern sich an der Schweißbadober- und Poreinnenfläche ab und begünstigen dadurch die Entstehung der Oberflächenporosität.
- ❖ In den Schweißverbindungen aus Zn-Mg-beschichteten Blechen konnten sowohl im Schweißgut als auch in der WEZ Mikrorisse nachgewiesen werden. Die genaue Ursache für die Mikrorissbildung muss noch geklärt werden.
- ❖ Durch die magnetische Methode ist prinzipiell die Möglichkeit zur positiven Beeinflussung der Nahtgeometrie beim Laserschweißen von ZE-Mg-beschichteten Dreifachüberlappstößen gegeben. Hierzu sind jedoch weitere Untersuchungen notwendig.

## 6.3 Schweißen von Mehrblechverbindungen mit einem CO<sub>2</sub>-Laser

### 6.3.1 Konventionelles CO<sub>2</sub>-Laserschweißen an verzinkten Blechen

Für die Schweißversuche wurde ein CO<sub>2</sub>-Laser vom Typ TLF 12000 eingesetzt. Alle Schweißversuche sind unter Anwendung der 3. Spannvorrichtung (Bild 20), also mit technischem 0-Spalt, durchgeführt worden. Als Schutzgas kam das Gasgemisch 30 % Ar / 70 % He zum Einsatz.

Zunächst fanden die Schweißversuche an unbeschichteten Blechen statt (Bild 60a oben). Anschließend wurde eine umfangreiche Parameterstudie an elektrolytisch- und feuerverzinkten Dünoblechen durchgeführt.

Mit den optimierten Parametern ließen sich die verzinkten Bleche verschweißen (Bild 60 unten). Es waren zwar innere Fehler vorhanden (Bild 60b), aber nicht so stark ausgeprägt, wie bei den vorherigen Untersuchungen mit dem Festkörperlaser.

Die erzeugten Schweißnähte beim Schweißen mit technischem 0-Spalt (Einsatz von stabilen streifenförmigen Spannbacken) erreichen noch die Bewertungsgruppe B nach EN ISO 13919-1.

Vermutlich liegen beim CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaserschweißen bessere Entgasungsbedingungen in der Dampfkapillare und im Schweißbad vor als beim Festkörperlaserschweißen. Ursache dafür ist vor allem der größere Spotdurchmesser des CO<sub>2</sub>-Lasers, der eine größere Dampfkapillare zur Folge hat. Außerdem wurde beim Schweißen mit dem CO<sub>2</sub>-Laser mit Leistungsüberschuss gearbeitet, was die Entgasung des Schmelzbades begünstigte.

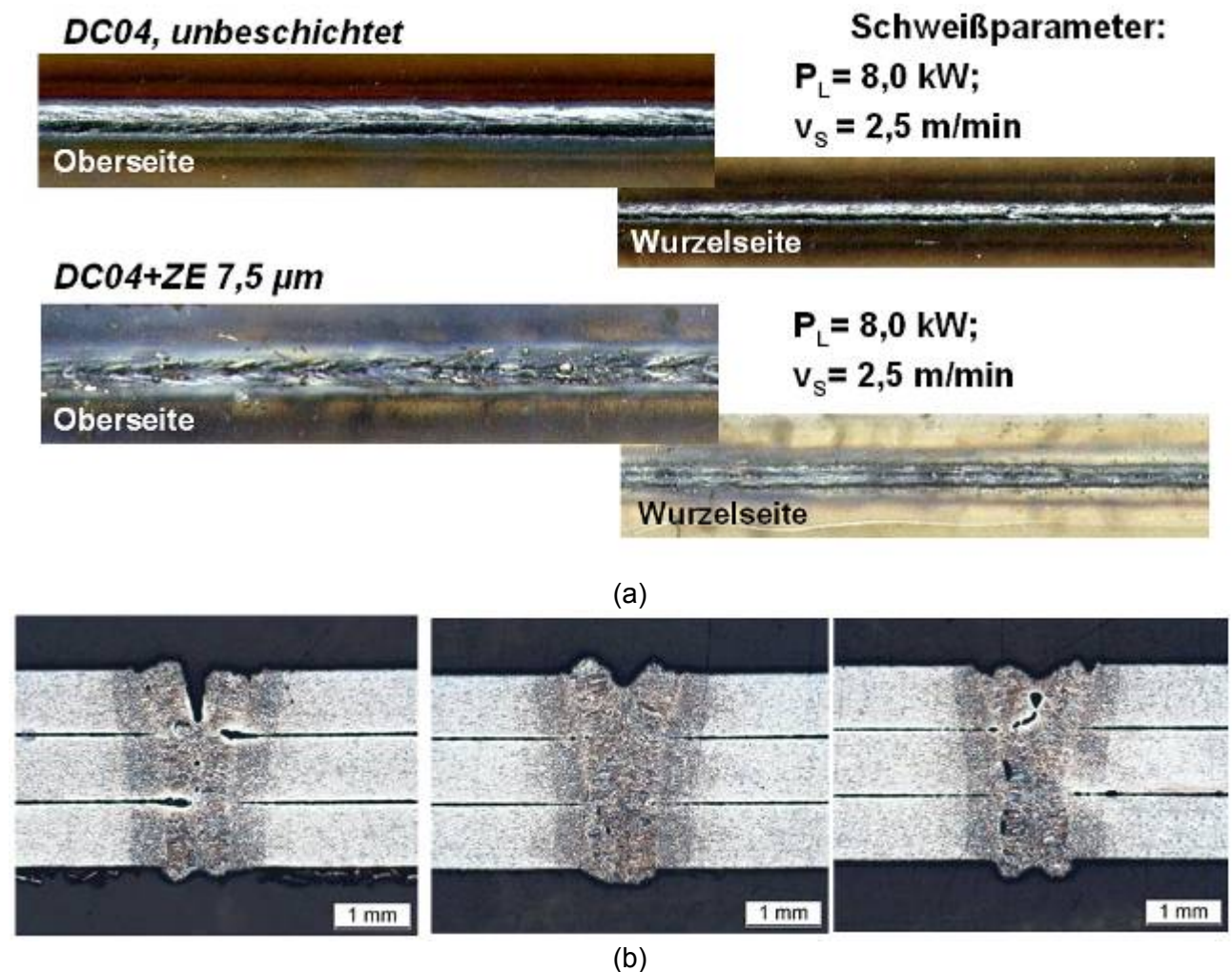


Bild 60: Schweißungen an unbeschichteten und elektrolytisch verzinkten Dreifachüberlappstößen, hergestellt mit CO<sub>2</sub>-Laser, Werkstoff: DC04. konventionelle Optik: a) Nahtoberfläche; b) Nahtquerschliffe der verzinkten Verbindungen

### 6.3.2 CO<sub>2</sub>-Laserschweißen an verzinkten Blechen unter Einsatz der Doppelfokustechnik

Die primäre Zielstellung hierbei war die Verbesserung der Schweißergebnisse durch die lineare Ausdehnung der Dampfkapillare mittels Doppelfokus. Es wurde mit folgenden Parametern gearbeitet:

- Abstand zwischen Spots: 1,0 mm
- Leistungsverteilung: 50/50 [%]
- Spotanordnung: parallel zur Schweißrichtung

Nach den entsprechenden Vorversuchen an unbeschichteten und elektrolytisch verzinkten Dreifachüberlappstößen sind, wie beim Schweißen mit konventioneller Optik, qualitativ gute Verbindungen an unbeschichteten Blechen erzeugt worden, Bild 61 oben. Die Schweißergebnisse an den verzinkten Blechen sind bei dieser Technologie den Ergebnissen des Einstrahlschweißens ähnlich, Bild 61 unten. Der Einsatz der Doppelfokustechnik ermöglichte zwar eine gute Nahtqualität, aber die ohnehin relativ guten Ergebnisse des Einstrahlschweißens wurden nicht weiter verbessert. Alle Versuchsergebnisse sind im Anhang A5 dargestellt.

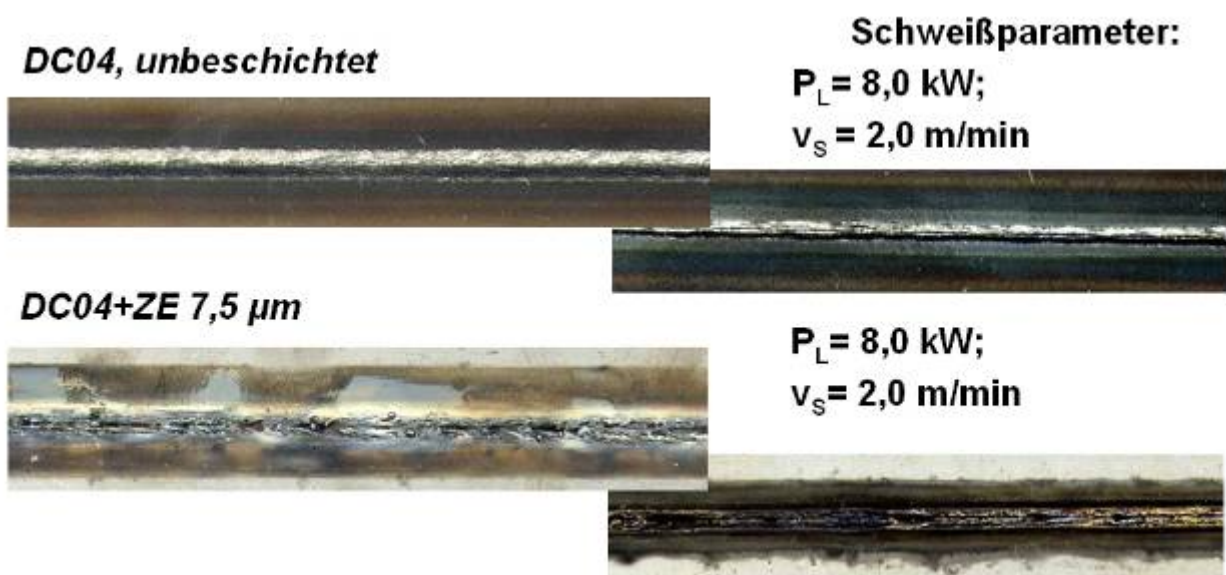


Bild 61: CO<sub>2</sub>-Hochleistunglaserschweißungen an unbeschichteten und elektrolytisch verzinkten Dreifachüberlappstößen DC04. Doppelfokusoptik. Nahtoberfläche

### 6.3.3 CO<sub>2</sub>-Laserschweißen von ZE-Mg beschichteten Blechen

Diese Schweißergebnisse waren stark von der Art der Spannvorrichtung abhängig. Die Qualität der mit dem 1. Spannsystem (Bild 20) gefertigten Nähte war immer gleich gut. Ein Vertreter davon ist die im Bild 62 dargestellte qualitativ gute Schweißnaht, die mit einer

Laserstrahlleistung von 7 kW, einer Schweißgeschwindigkeit von 2,5 m/min und einer Fokusbildung von +2,0 mm hergestellt wurde.



Bild 62: CO<sub>2</sub>-Laserschweißung an ZE-Mg 35/35 beschichteten Dreifachüberlappstößen H220Y. Konventionelle Optik. Spannsystem: streifenförmigen Spannbacken mit relativ geringer Spannkraft. Oben: Oberfläche; unten: Wurzelseite

Unter Einsatz des 3. Spannsystems (s. Bild 20) trat beim Schweißen von H200Y+ZE-Mg 35/35, ähnlich wie beim Schweißen mit dem Festkörperlaser, Oberflächenporosität auf. Diese Erscheinung wurde in allen untersuchten Parameterbereichen beobachtet (Bild 63 a). Die metallographischen Untersuchungen zeigten, dass die Gasblasen vom oberen Blechzwischenraum nach oben „wachsen“ (Bild 63 b).

In einer ergänzenden Versuchserie wurden Dünnscheiben des Typs H220Y+ZE-Mg und DC04+ZE unter gleichen Bedingungen unter Nutzung des 3. Spannsystems (s. Bild 20) verschweißt. Diese Versuchsserie sollte eine bessere Gegenüberstellung der Schweißergebnisse an ZE- und ZE-Mg-beschichteten Blechen ermöglichen. Alle Schweißungen sind im Anhang A7 gegenübergestellt. Offensichtlich ist, dass die Schweißungen an den Blechen mit ZE-Mg-Beschichtung im Unterschied zu denen mit ZE-Beschichtung offene Poren an der Nahtoberfläche aufweisen. Die Porenbildung ist mehr oder weniger stark in allen Parameterbereichen ausgeprägt. Eine exakte Vergleichbarkeit der Ergebnisse ist somit nicht gegeben, da die Versuche aus Verfügbarkeitsgründen an zwei verschiedenen Grundwerkstoffen durchgeführt wurden.



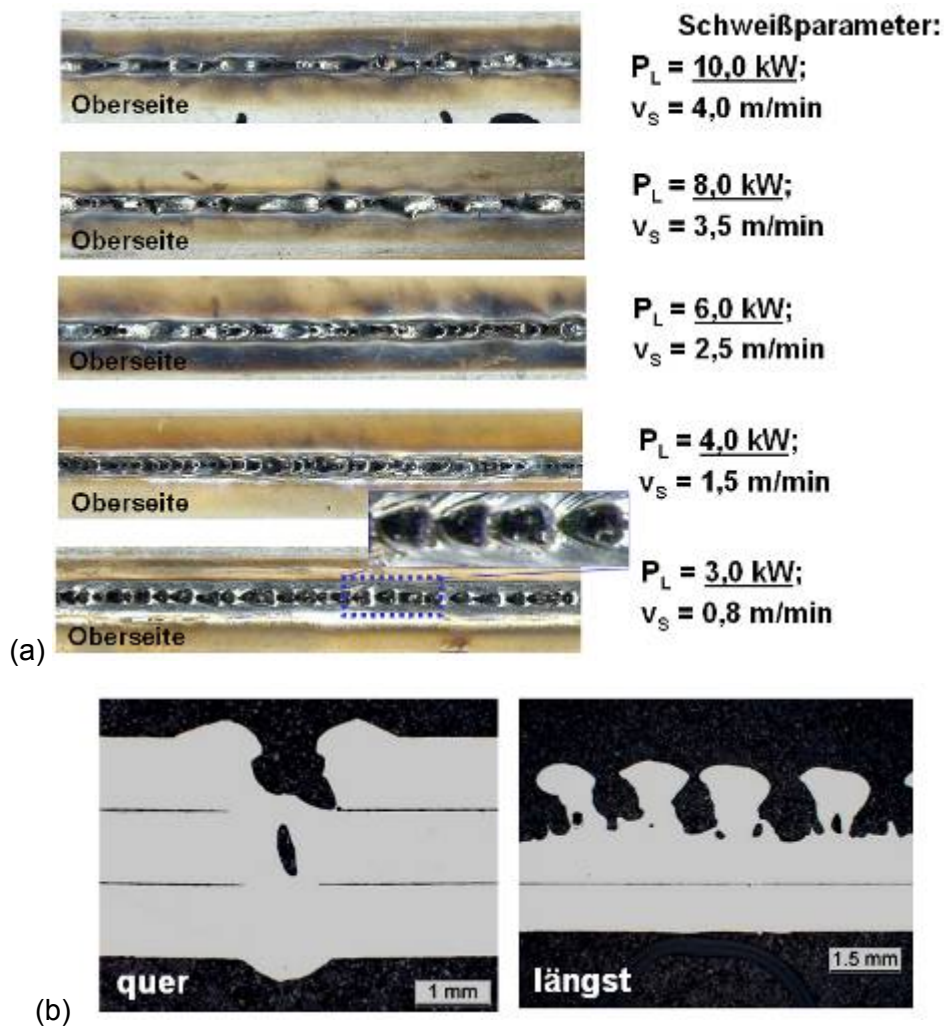


Bild 63: CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaserschweißungen an ZE-Mg 35/35 beschichteten Dreifachüberlappstößen H220Y. Konventionelle Optik. Spannsystem „stabile streifenförmige Spannbacken“:  
a) Makroaufnahme der Oberflächen; b) Makroschliffe

### 6.3.4 Schweißen von ZE-beschichteten Mehrblechverbindungen mit dem CO<sub>2</sub>-Slablaser

In diesem Arbeitsschritt wurde untersucht, inwieweit die Polarisationsrichtung des Laserstrahles Einfluss auf den Schweißprozess nehmen kann. Zum Einsatz kam dafür ein CO<sub>2</sub>-Slablaser mit linear polarisiertem Strahl.

Die Polarisation der Laserstrahlung beeinflusst die Verteilung der absorbierten Energieströme auf der Kapillaroberfläche. Die parallel zur Vorschubrichtung polarisierte Strahlung führt zu Absorptionsmaxima an der Vorder- und Rückseite der Dampfkapillare. Durch die Anordnung der Strahlpolarisation in Schweißrichtung sollte die Dampfkapillargeometrie beeinflusst werden, wodurch auch die Schweißergebnisse beeinflusst werden können [126]. Es muss aber an dieser Stelle beachtet werden, dass sich die Polarisationsrichtung linearpolarisierter Laserstrahlung bei Mehrfachreflexion drehen kann [18].

Die unbeschichteten Bleche ließen sich mit diesem Verfahren sehr gut verarbeiten (Bild 64 oben). Die anschließenden Schweißversuche an verzinkten Dünoblechen erbrachten jedoch keine positiven Ergebnisse, Bild 64 unten. Schweißparameter und entsprechende Aufnahmen von Nahtoberflächen sind im Anhang A6 dargestellt. Alle Nähte waren durch grobe Badauswürfe gekennzeichnet.

Eine mögliche Ursache dafür liegt offensichtlich in der hohen Strahlqualität des o. g. Lasers und dem resultierenden kleineren Durchmesser des Dampfkanals. Für bessere Entgasungsbedingungen und höhere Kapillarstabilität sind jedoch größere Kapillardurchmesser vorteilhaft.

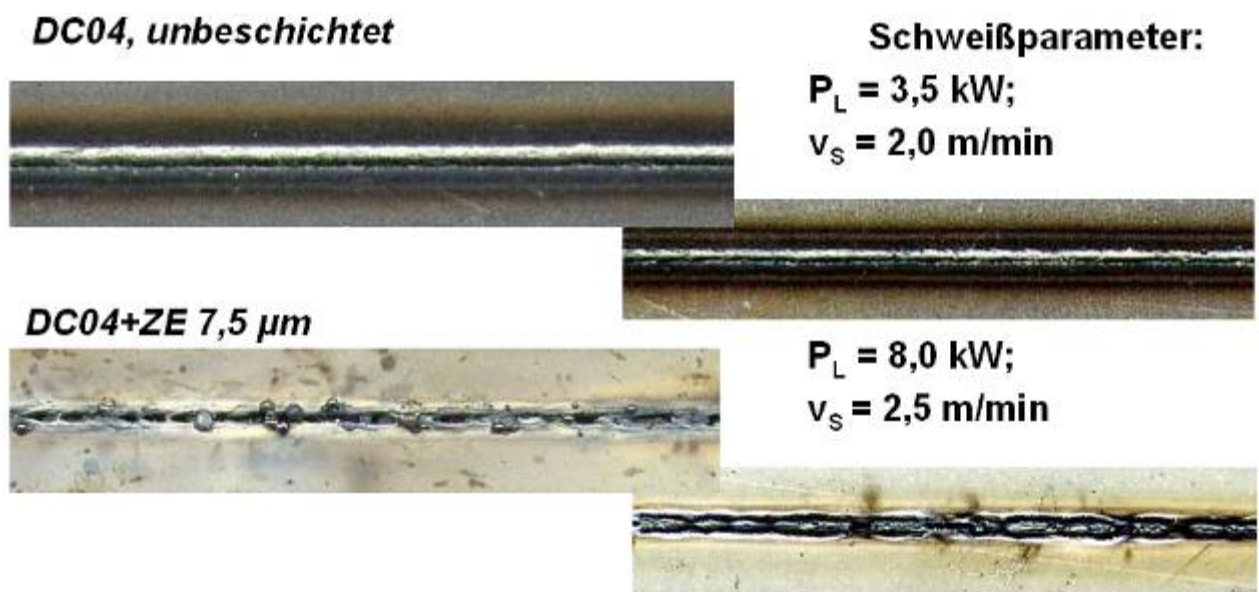


Bild 64: Nahtoberfläche, geschweißt mit CO<sub>2</sub>-Slablaser, Dreifachüberlappstoß, Werkstoff: DC04 unbeschichteten und elektrolytisch verzinkt

### 6.3.5 EDX-Analysen an der Nahtoberfläche der CO<sub>2</sub>-Laserschweißnähte

Die Untersuchungen dienen in erster Linie zur Klärung der Ursachen der Oberflächenporosität beim CO<sub>2</sub>-Laserschweißen der Dünobleche von H220Y+ZE-Mg. Für die EDX-Analyse ist eine CO<sub>2</sub>-lasergeschweißte Probe der Variante 5 (Bild 37) mit doppelter ZE-Mg-Schicht im oberen Blechzwischenraum ausgewählt worden. Diese Probe wurde mit einer Laserleistung von 6,0 kW und Schweißgeschwindigkeit von 1,5 m/min geschweißt.

Die Oberfläche der untersuchten Schweißnaht ist durch eine größere Anzahl von zur Oberfläche hin geöffneten Poren gekennzeichnet, die unter gegebenen Versuchsbedingungen nicht beseitigt werden konnten (Bild 65). Auffällig sind die tiefen Krater im Schweißgut sowie deren dunkel erscheinender Belag. Die dunkle Färbung deutet

im Sekundärelektronenbild (SE-Kontrast) auf einen hohen Anteil von Atomen mit geringer effektiver Atommasse hin, also auf leichte Elemente, wie z. B. O<sub>2</sub>, C, Al, Mg. Demgegenüber erscheinen die Stellen hell, an denen das Fe-Basismaterial sichtbar wird (vgl. dazu auch Bild 69). Die Oberflächen der Naht und der nach oben geöffneten Poren sind folglich zum größten Teil mit einem Belag überzogen. Bei den EDX-Analysen (Bild 68 bis Bild 71) zeigte sich, dass dieser Belag aus Oxiden besteht (vgl. Tabelle 11).

Die REM-Untersuchungen legen die Schlussfolgerung nahe, dass gerade der o. g. Oxidbelag die Dünneffizienz der Schmelze unter gegebenen Versuchsbedingungen (Laserparameter, Prozessgas etc.) beeinträchtigen könnte. Eine effektive Entgasung bzw. „Schließung“ der Porenkanäle würde dadurch erschwert, was schließlich zur Oberflächenporosität führt. Einige Schichten weisen dabei eine poröse Morphologie auf (Bild 76, Bild 77 und Bild 75).

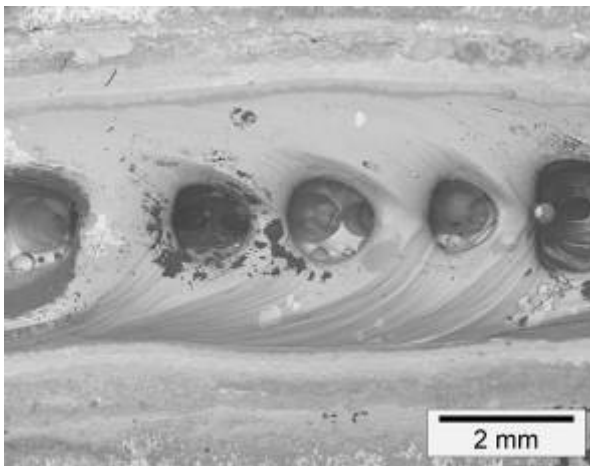


Bild 65: REM-Übersichtsbild der Laser-Schweißnaht (BSE-Kontrast)

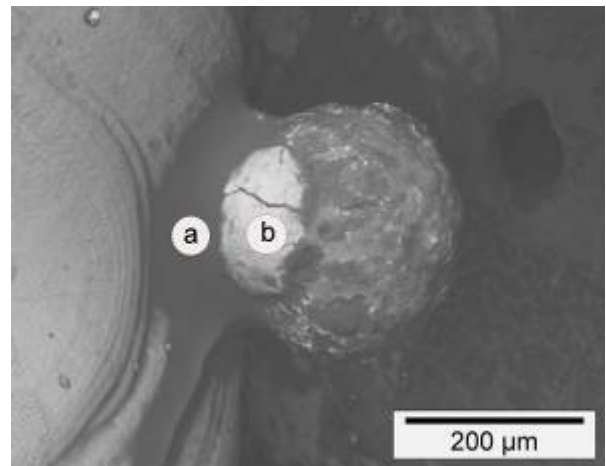


Bild 66: REM-Detailbild einer „Schweißperle“ aus Bild 65, rechter Bereich (BSE-Kontrast)

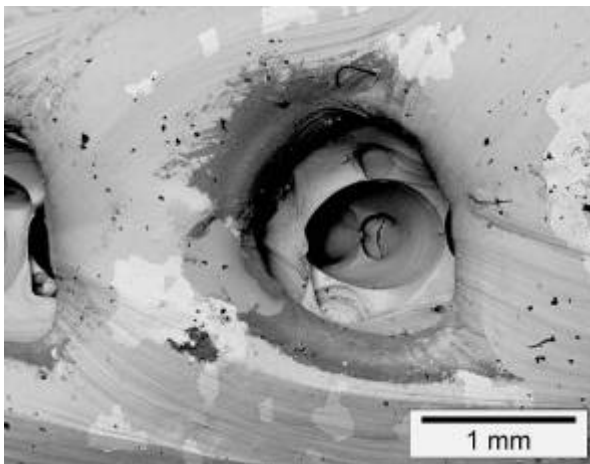


Bild 67 :REM-Übersichtsbild der Schweißnaht (BSE-Kontrast)

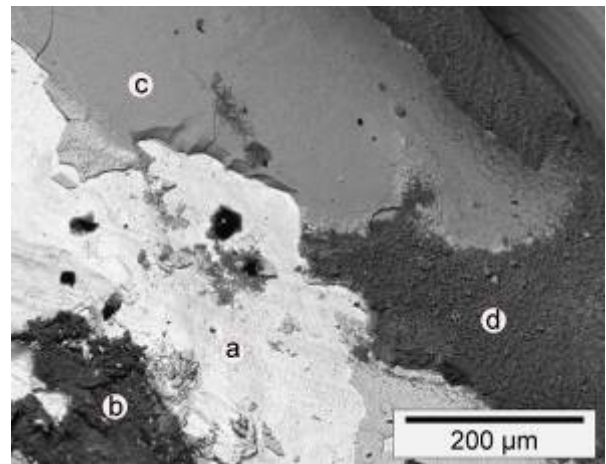


Bild 68: REM-Detailbild aus Bild 67 (BSE-Kontrast)



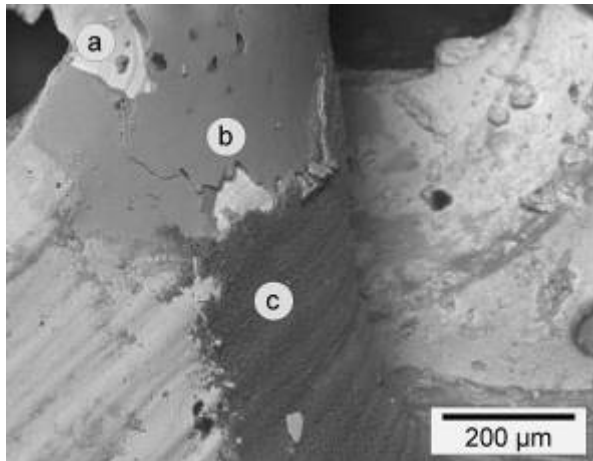


Bild 69: REM-Detailbild der Beläge einer Kraterwandung mit hellem Metalluntergrund, einer hellgrauen kompakten Schicht im oberen Bereich und einer unteren porösen dunkleren Schicht (BSE-Kontrast)

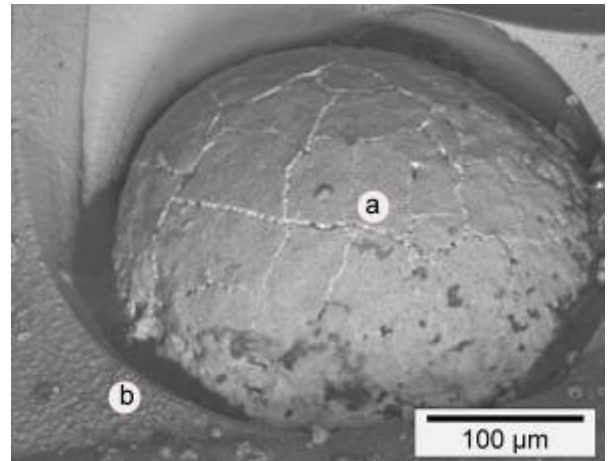


Bild 70: REM-Detailbild einer Perle im Kratergrund (BSE-Kontrast)

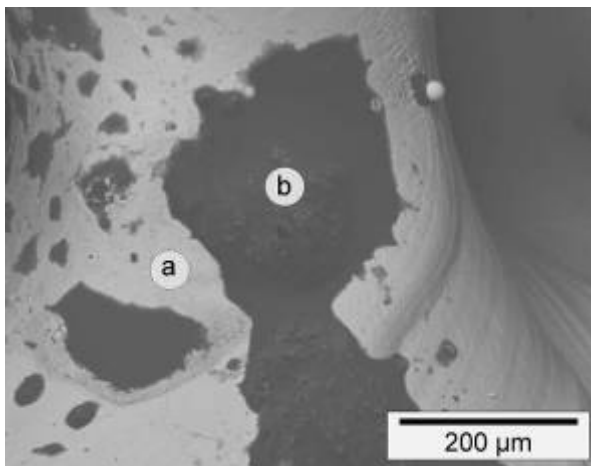


Bild 71: REM-Detailbild mit dunklem Belag (BSE-Kontrast)

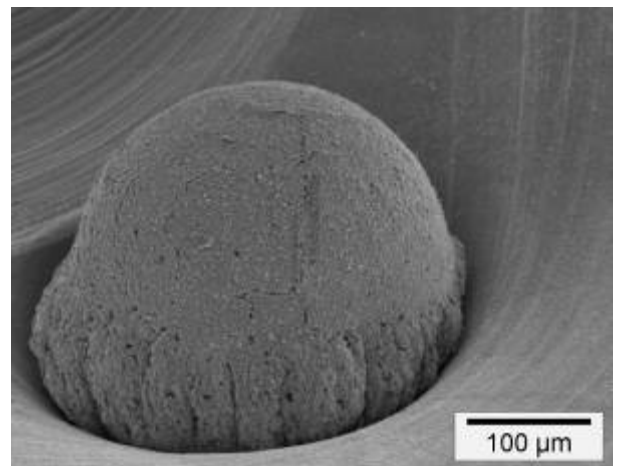


Bild 72: REM-Detailbild einer Perle in einem Krater (SE-Kontrast)

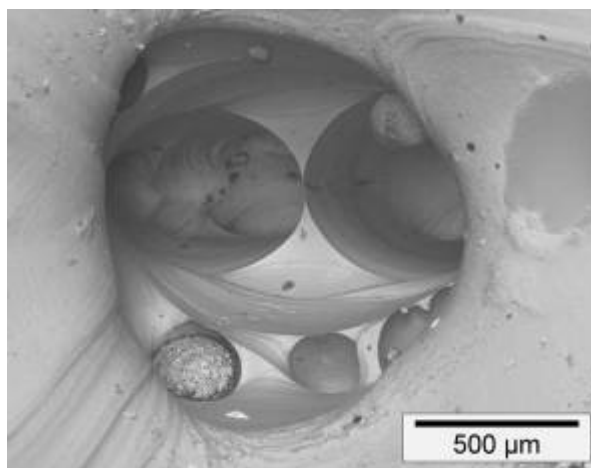


Bild 73: REM-Detailbild eines Kraters mit schwammartigen Perlen (BSE-Kontrast)

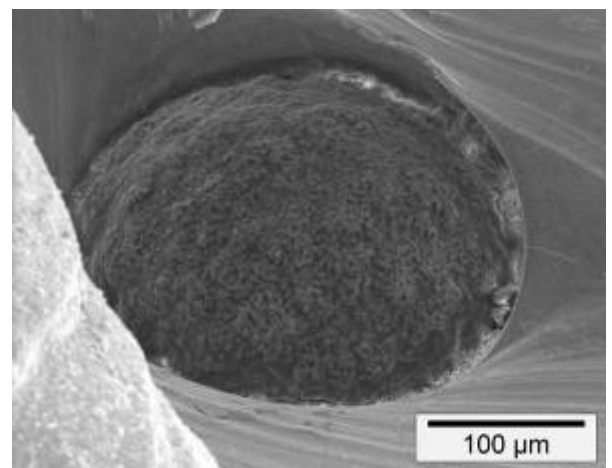


Bild 74: REM-Detailbild zu Bild 73 (SE-Kontrast)

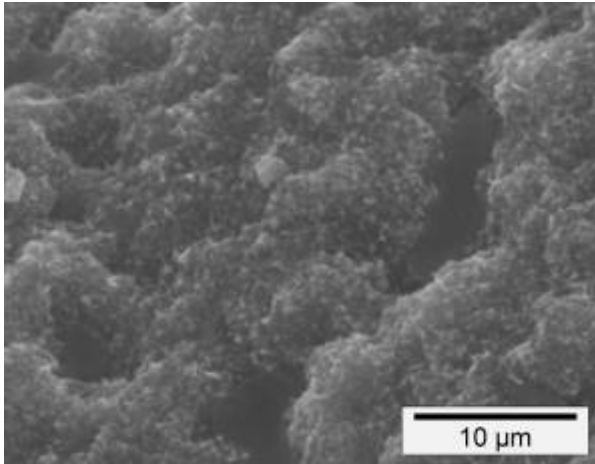


Bild 75: REM-Detailbild des Belages aus Bild 73 (SE-Kontrast)

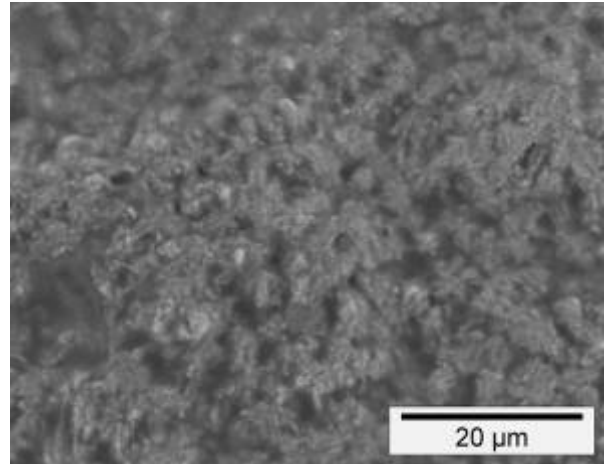


Bild 76: REM-Detailbild der Oberfläche der Perle aus Bild 74 (SE-Kontrast)

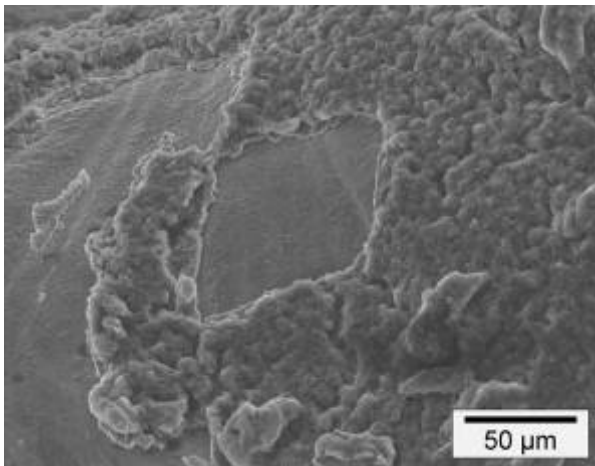


Bild 77: REM-Aufnahme des teilweise abgeplatzten Belages der Oberfläche einer Kraterwand (SE-Kontrast)

Tabelle 11: Chemische Zusammensetzung ausgewählter Positionen, at %

Position	C	N	O	Mg	Fe	Zn	Bemerkungen
Bild 68 a	35,0	-	4,7	-	59,5	-	Grundmaterial, zusätzlich Mn
Bild 68 b	61,6	-	2,9	-	1,0	3,7	
Bild 68 c	40,3	-	38,2	0,3	1,6	1,0	dicke glatte Schicht, zusätzlich Al, Si, Nb, Ti, Mn, wie Bild 69 b
Bild 68 d	85,9	-	10,4	0,2	0,4	3,0	dünne, poröse Schicht, wie Bild 69 c
Bild 69 a	47,6	-	4,9	-	47,6	-	Grundmaterial mit dünner Oxidschicht
Bild 69 b	51,8	3,0	31,9	0,4	1,3	0,7	dicke glatte Schicht, zusätzlich Al, Si, Nb, Ti, Mn
Bild 69 c	84,0	2,2	10,1	0,6	0,4	2,6	dünne, poröse Schicht
Bild 70 a	76,5	-	14,5	0,4	6,5	2,0	Perle
Bild 70 b	77,0	-	16,0	0,6	4,1	2,3	Wand
Bild 66 a	59,0	6,4	20,6	2,6	1,8	6,2	
Bild 66 b	47,8	-	18,9	1,2	3,2	28,8	Perlenoberfläche
Bild 71 a	50,9	-	24,5	-	23,7	0,8	Grundmaterial
Bild 71 b	62,9	7,4	23,3	2,2	1,8	0,6	zusätzlich K, Ca
Bild 72 a	43,3	-	42,7	1,1	12,4	0,5	Perle
Bild 72 b	41,8	-	45,7	-	9,6	2,5	Wand

### 6.3.6 Zusammenfassung

Im Abschnitt 6.3 wurden die Ergebnisse der Schweißuntersuchungen mit dem CO<sub>2</sub>-Laser vorgestellt. Die wesentlichen Ergebnisse sind zusammengefasst:

- ❖ DC04+ZE-Feinbleche ließen sich mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser (TLF 12000) unter gegebenen Prozessbedingungen besser schweißen als H220Y+ZE-Mg-Feinbleche.
- ❖ Beim Schweißen mit technischem 0-Spalt (3. Spannvorrichtung, Bild 20) erreichen die Schweißverbindungen nur die Bewertungsgruppe D nach EN ISO 13919-1.
- ❖ Der Einsatz der Doppelfokustechnik (CO<sub>2</sub>-Laser TLF 12000) hat gegenüber der konventionellen Optik keinen signifikanten Einfluss auf das Schweißergebnis.
- ❖ Die Schweißversuche mit dem CO<sub>2</sub>-Slablaser DC035 erbrachten bei verzinkten Blechen keine positiven Ergebnisse. Die mögliche Ursache liegt offensichtlich in der hohen Strahlqualität und den daraus resultierenden kleineren Kapillardurchmessern (schlechte Entgasung).

- ❖ Als Hauptproblem beim Schweißen von H220Y+ZE-Mg-Dünnsblechen mittels CO<sub>2</sub>-Laser (TLF 12000) erwies sich die zur Oberfläche hin nicht geschlossene Nahtporosität.
- ❖ Beim Schweißen unter Einsatz der 1. Spannvorrichtung mit relativ geringer Spannkraft (Bild 20) erreichten alle Schweißverbindungen die Bewertungsgruppe B nach EN ISO 13919-1.

## 7 Auswertung der Schweißergebnisse

### 7.1 Probenvorbereitung

Für die statischen und dynamischen Prüfungen wurden Proben unter Einsatz der 1. Spannvorrichtung (Bild 20) mit geringen Spannkraften mit dem Nd:YAG-Laser DY044 und dem CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser TLF 12000 gefertigt. Die Schweißparameter dafür sind nachfolgend aufgelistet:

Nd:YAG-Laser DY 044 (4,4 kW):	- Laserstrahlleistung:	4,0 kW
	- Schweißgeschwindigkeit:	2,0 m/min
	- Fokusslage:	+2,0 mm
CO <sub>2</sub> -TLF 12000 turbo (12 kW):	- Laserstrahlleistung:	7,0 kW
	- Schweißgeschwindigkeit:	2,5 m/min
	- Fokusslage:	+2,0 mm

Alle Proben besaßen eine rechteckige Form mit einer Breite von 45 mm. Tabelle 12 gibt einen Überblick über die geprüften Werkstoffe, Blechdicken sowie Stoßarten.

Tabelle 12: Beschreibung der Proben für die mechanischen Versuche

<u>Proben</u>	<u>Spalt</u>	<u>Dicke</u>
<b><i>Nd:YAG-Laser DY 044</i></b>		
01. H220Y ZE-Mg 35/35	0,2 mm	1,0 mm
02. H220Y ZE-Mg 35/35	0	1,0 mm
03. DC04+ZE	0,2 mm	0,9 mm
04. DC04+ZE	0	0,9 mm
05. DX53D+Z	0,2 mm	1,0 mm
06. DX53D+Z	0	1,0 mm
07. DC04, unbeschichtet	0	0,9 mm
<b><i>CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser TLF 12000 turbo</i></b>		
08. H220Y ZE-Mg 35/35	0,2 mm	1,0 mm
09. H220Y ZE-Mg 35/35	0	1,0 mm
10. DC04+ZE	0,2 mm	0,9 mm
11. DC04+ZE	0	0,9 mm
12. DX53D+Z	0,2 mm	1,0 mm
13. DX53D+Z	0	1,0 mm
14. DC04, unbeschichtet	0	0,9 mm

### 7.2 Durchstrahlungsprüfung

Die Durchstrahlungsprüfung zeigte, dass alle für die mechanischen Prüfungen geschweißten Nähte an den H220Y+ZE-Dünnsblechen nahezu porenfrei waren, Bild 78. An den geschweißten Proben von H220Y+ZE-Mg trat Spritzerbildung in den Spaltbereichen auf. Die DC04-ZE-Verbindungen besaßen einzelne Poren und Inhomogenität im Schweißbereich. An den tauchverzinkten Proben nahm die Porenbildung und Schmelzeansammlung in den Spaltbereichen deutlich zu.

Die Ergebnisse der Durchstrahlungsprüfung sind im Anhang A8 dargestellt.

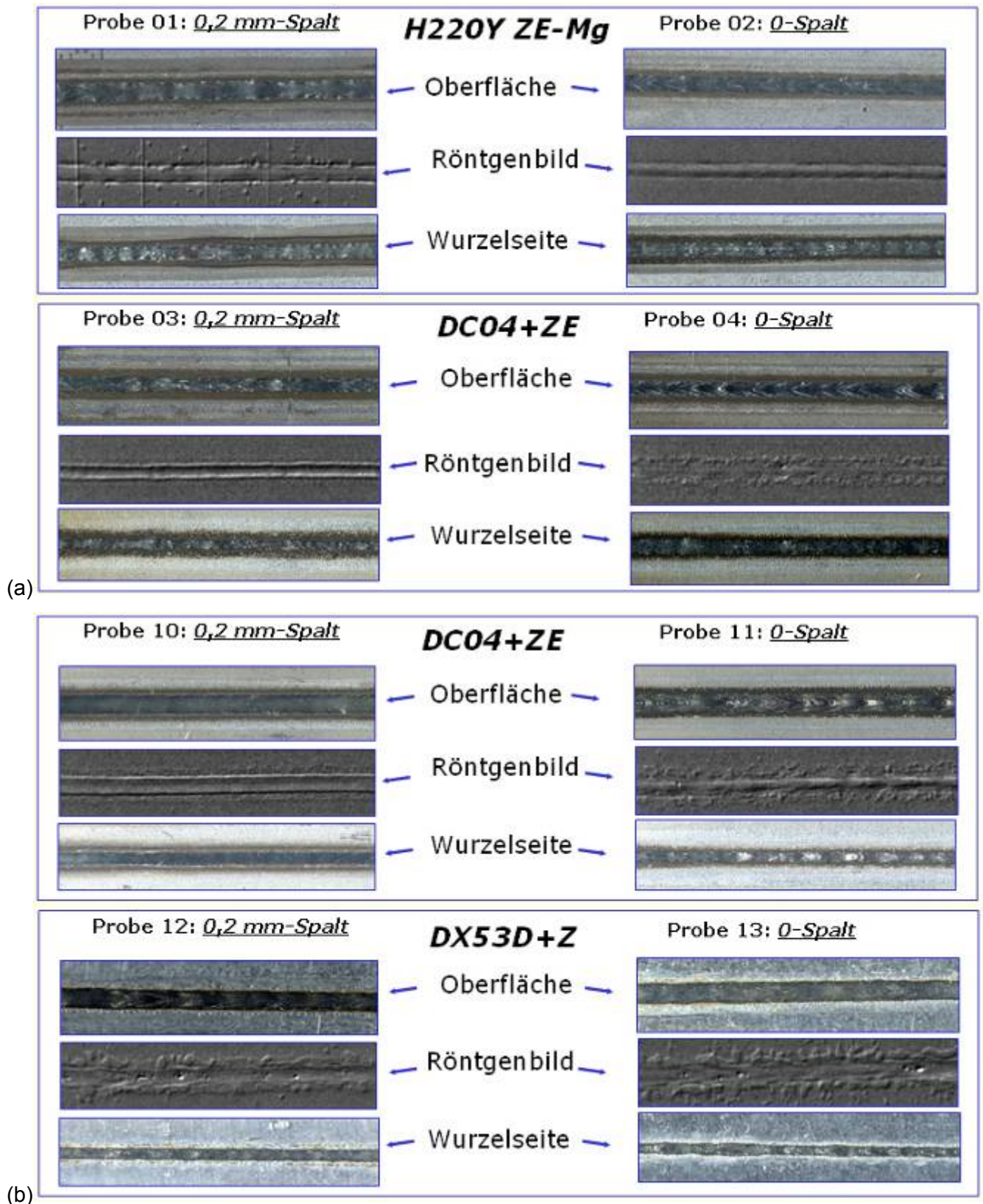


Bild 78: Ausgewählte Ergebnisse der Durchstrahlprüfungen sowie entsprechende Oberflächen- und Wurzelseiten der Schweißverbindungen, geschweißt mit a) Nd:YAG-Laser; b) CO<sub>2</sub>-Laser



### 7.3 Statische Zugversuche

Die Zugprüfung erfolgte an Überlappverbindungen in Anlehnung an EN 10002. Da der Probenquerschnitt (Bruchquerschnitt) bei den Überlappverbindungen nicht genau bestimmt werden kann, wurde im Zugversuch nur die maximale Zugkraft  $F_m$  gemessen. Aus jeder Schweißverbindung wurden mindestens drei Zugproben quer zur Schweißrichtung entnommen. Zusätzlich war zu berücksichtigen, dass bei der gewählten Stoßauslegung neben der Zugbeanspruchung auch eine Biegebeanspruchung in der Schweißnaht entsteht. Die Zugprüfung erfolgte mit einer Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min. Als Prüfmaschine kam die Material-Prüfmaschine Zwick Z250 zum Einsatz, Bild 79.

Insgesamt wurden 14 Varianten der Verbindungen geprüft. Um Referenzwerte zu erhalten, sind zusätzlich alle Grundwerkstoffe unter gleichen Bedingungen geprüft worden. Ausgewählte Zugproben sowie das Schema des Zugversuches sind im Bild 80 dargestellt.

Die Ergebnisse der Zugversuche enthält das Bild 82. Obwohl man die Probenform wegen des Entstehens von hohen tangentialen Spannungen und Vorhandenseins der Spalte als sehr ungünstig bezeichnen kann, erreichten die Zugproben der geschweißten Nähte in der maximalen Zugkraft nahezu das Grundwerkstoffniveau. Die Bruchstelle lag immer in der Schweißnaht.



Bild 79: Material-Prüfmaschine Zwick Z250

Nur die Zugproben der CO<sub>2</sub>-lasergeschweißten Bleche von DC04+ZE versagten nicht im Nahtbereich, sondern im Grundwerkstoff, Bild 81. Der Spalt im Blechzwischenraum (von 0 bis 0,2 mm) übte keinen negativen Einfluss auf die Zugversuchergebnisse aus. Im Vergleich zu den elektrolytisch verzinkten Proben zeigten hingegen die feuerverzinkten Bleche einen 20-prozentigen Festigkeitsabfall.

Die besten Ergebnisse wurden folglich mit dem Nd:YAG-Laser am ZE-Mg-beschichteten Werkstoff H220Y, und mit dem CO<sub>2</sub>-Laser am verzinkten Werkstoff DC04 erreicht. Die oben erwähnte Mikrorissbildung bei ZE-Mg-Beschichtungen hat offensichtlich keinen negativen Einfluss auf die statische Festigkeit der Schweißverbindungen.



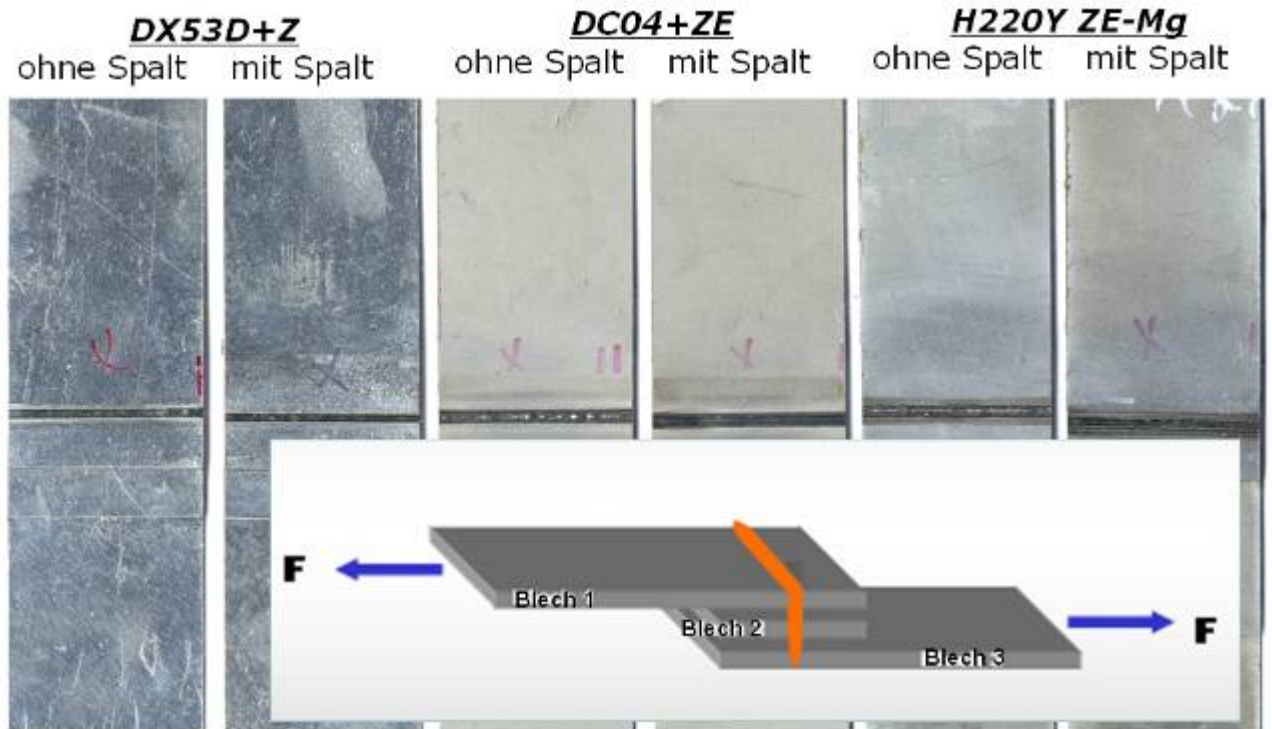


Bild 80: Ausgewählte Zugproben und Schema der Zugproben

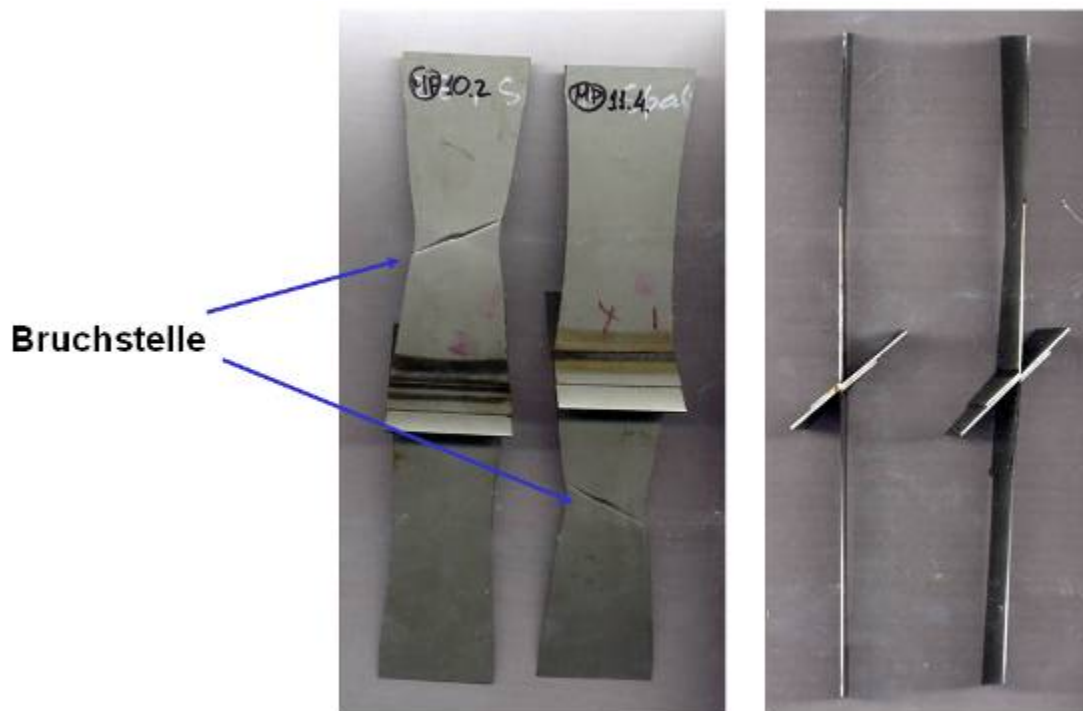
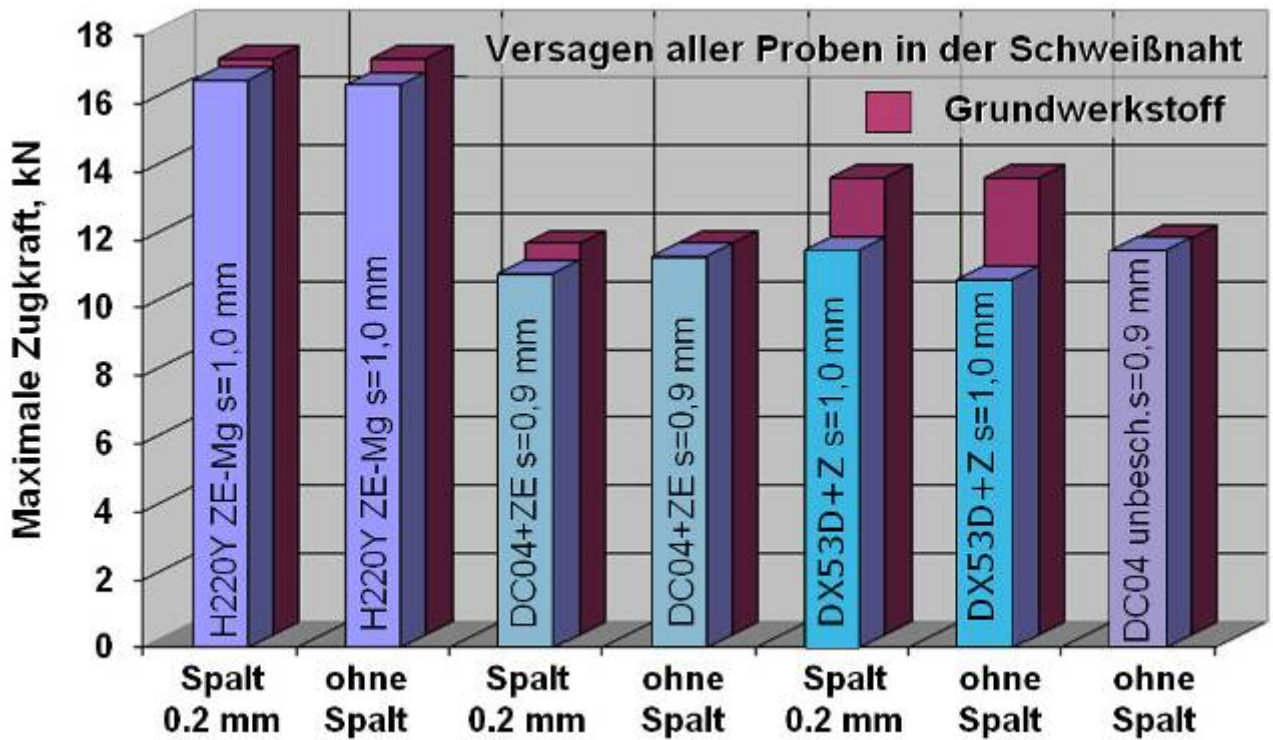
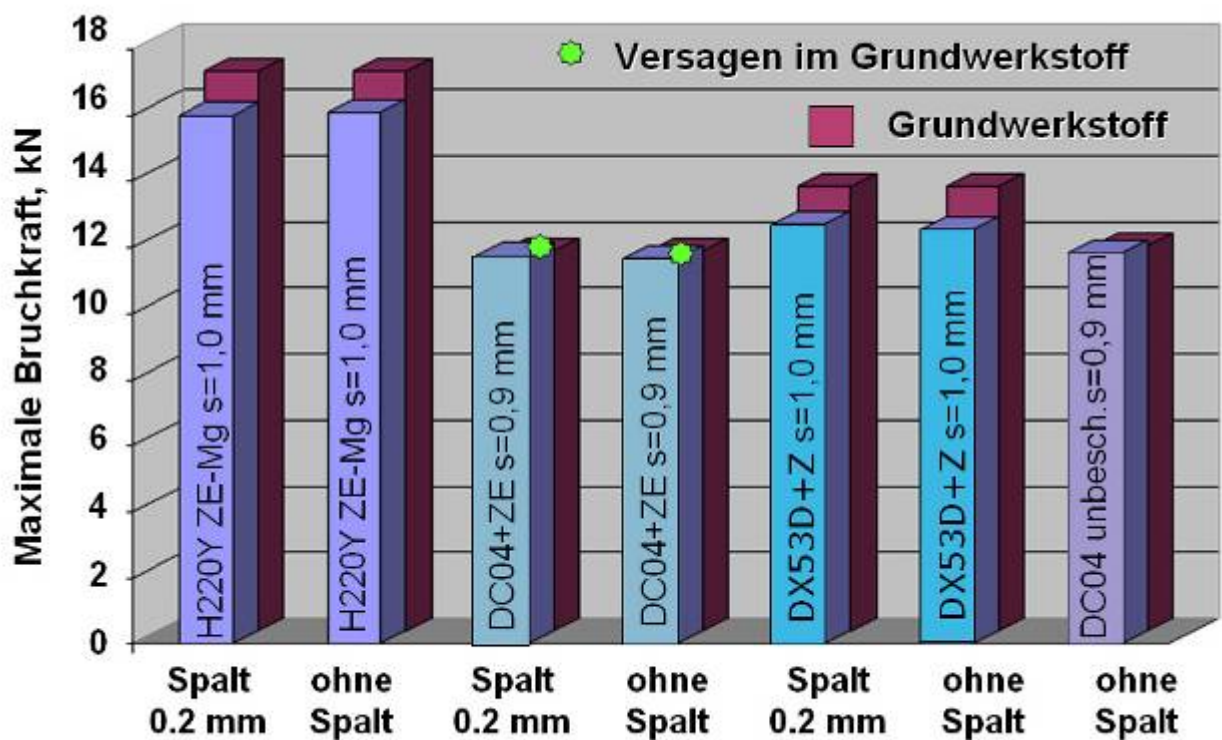


Bild 81: Versagensbilder von I-Nähten am Dreifachüberlappstoß. Grundwerkstoff: DC04+ZE. CO<sub>2</sub>-Hochleistunglaserschweißen



a)



b)

Bild 82: Ergebnisse der statischen Zugversuche, geschweißt: a) Nd:YAG-Laser; b) CO<sub>2</sub>-Laser

## 7.4 Schwingfestigkeitsuntersuchungen

Neben den statischen Eigenschaften der Schweißverbindungen sollte das dynamische Verhalten der Nähte untersucht werden. Die durchgeführten Versuche dienten der Ermittlung von Kennwerten für das mechanische Verhalten von Schweißverbindungen bei dauernder schwellender Beanspruchung.

In der Literatur werden verschiedene Verfahren zur Beurteilung des Schwingfestigkeitsverhaltens genannt [127].

Zur Ermittlung der Schwingfestigkeit wurden in den eigenen Prüfungen jeweils 5 Proben zweckmäßig gestaffelten Schwingbeanspruchungen unterzogen (vgl. DIN 50100: 1978). Vorteilhaft war die schnelle Prüfungsdurchführung, allerdings handelte es sich bei den ermittelten Werten nicht um eine reine Dauerschwingfestigkeit, bei der eine Probe eine schwingende Beanspruchung „unendlich oft“ ohne Bruch und ohne unzulässige Verformung aushält, sondern um den Mittelwert von fünf Bruch-Schwingspielzahlen (N) mit begrenzter Aussagekraft. Es ging dabei in erster Linie um Vergleichsversuche. Die Bruchschwingspielzahlen sollten Aufschluss über den Einfluss des Schweißverfahrens sowie der Beschichtungsart auf die Festigkeit geben.

Um ein Ausknicken der Proben zu vermeiden, ist im Zugschwellbereich geprüft worden. Als Abbruchbedingung wurde der Abfall der Mittelkraft unter 2000 N gewählt. Als Prüfmaschine kam der Roell Amsler Hochfrequenzpulsator 250 HFP 5100 mit elektromagnetischem Resonanzantrieb zum Einsatz, Bild 83. Nach den entsprechenden Vorversuchen wurden als Mittelkraft  $F_m = 2,5 \text{ kN}$  und als Kraftamplitude  $F_a = 1,5 \text{ kN}$  ausgewählt. Die selbstregulierende Eigenfrequenz des Systems "Maschine-Probe" betrug ca. 45 Hz.



Die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Bild 83: Dauerschwingfestigkeitsprüfmaschine - Roell Amsler Hochfrequenzpulsator 250 HFP 5100

Als Referenz wurden auch die einzelnen Bleche der verschiedenen Grundwerkstoffe der Prüfung unterworfen. Alle Grundwerkstoffproben erreichten unter gleichen Beanspruchungsbedingungen eine Grenz-Schwingspielzahl von  $2 \cdot 10^6$ .

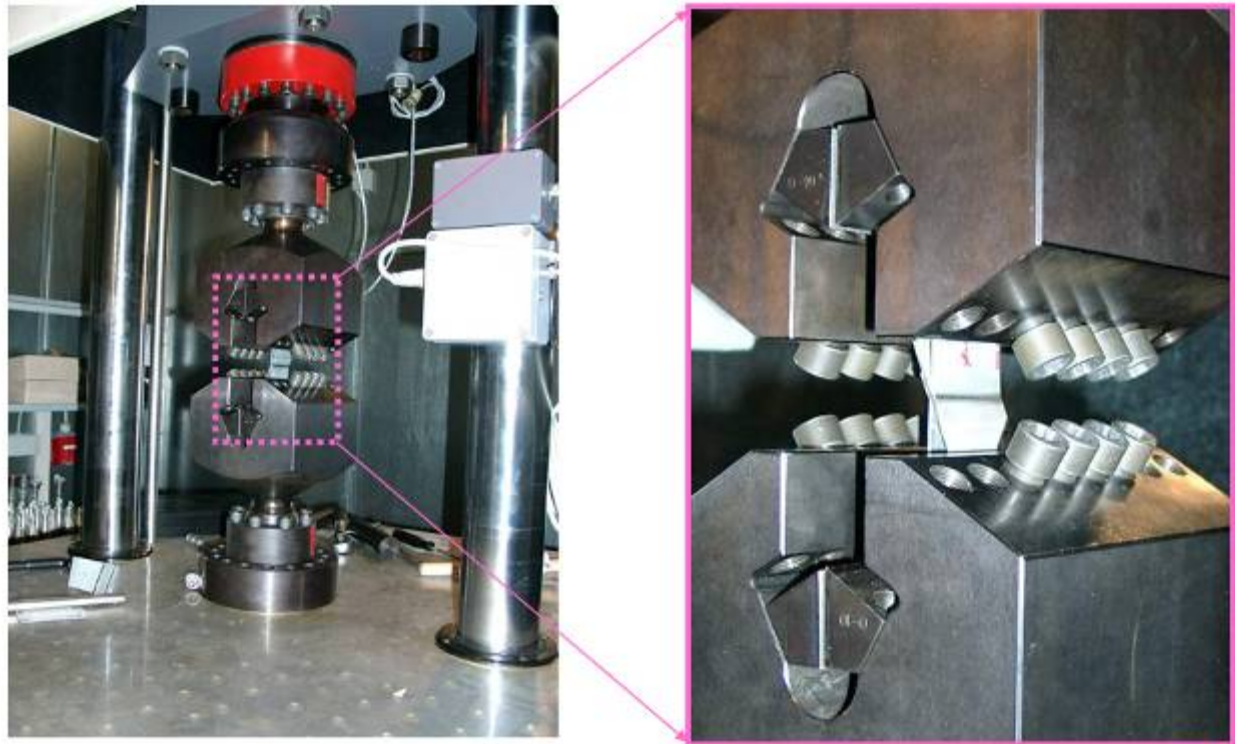


Bild 84: Dauerschwingfestigkeitsversuche. Prüfstandaufbau

Die durchgeführten Prüfungen ergaben, dass die Beschichtungen die Dauerfestigkeit von Schweißverbindungen signifikant beeinflussen. Im Falle des Schweißens mit einem Festkörperlaser lag die Schwingspielzahl bei den feuerverzinkten Proben um ca. 30 % niedriger als bei den unbeschichteten Proben (obwohl die verzinkten Bleche um 0,1 mm dicker waren). Bei Proben, die mittels CO<sub>2</sub>-Laser geschweißt wurden, betrug die Wertdifferenz ca. 50 %.

Der Spalt (0,2 mm) zwischen den Blechen hat sich im Gegensatz zu den statischen Zugversuchen, insbesondere bei den verzinkten Proben, negativ auf die Schwingspielzahl ausgewirkt.

Im Unterschied zu den konventionellen Beschichtungen, weisen die mit dem Nd:YAG-Laser geschweißten ZE-Mg-beschichteten H220Y-Blech-Zugproben, bei denen mit und ohne Spalt geschweißten Verbindungen nur eine minimale Differenz in der Schwingspielzahl auf. Beim CO<sub>2</sub>-Laserschweißen ist die durchschnittliche Schwingspielzahl der mit Spalt geschweißten Proben etwa 50% geringer als die der ohne Spalt geschweißten Proben.



Tabelle 13: Ergebnisse der Dauerschwingfestigkeitsversuche

Proben- bezeichnung (s. Tabelle 12)	Blechdicke, mm	Querschnitt, mm <sup>2</sup>	Schwingspielfrequenz, Hz	Schwingspielzahl, N·10 <sup>3</sup>
01	1,0	45	43,0	134,2
02	1,0	45	44,7	131,1
03	0,9	40,5	43,8	38,2
04	0,9	40,5	43,9	73,0
05	1,0	45	44,9	34,7
06	1,0	45	45,5	35,4
07	0,9	40,5	45,6	95,2
08	1,0	45	43,4	106,0
09	1,0	45	44,2	229,4
10	0,9	40,5	44,7	50,0
11	0,9	40,5	45,1	108,2
12	1,0	45	45,8	48,1
13	1,0	45	45,1	61,5
14	0,9	40,5	45,7	116,0

Im Verhältnis zu den unter gleichen Beanspruchungsbedingungen geprüften Grundwerkstoffproben wurde deutlich, dass eine Dreifachüberlappung eine ungünstige Stossauslegung für dynamisch beanspruchte Bauteile ist. Bei der Entwicklung von Konstruktionen, die mehrfach überlappende Schweißverbindungen beinhalten, sollte der negative Einfluss vorher immer sorgfältig geprüft werden.

Die im Dauerschwingfestigkeitsversuch ermittelten Tendenzen stimmen mit denen der statischen Zugversuche grundsätzlich überein.

## 7.5 Korrosionsuntersuchungen an hochleistungsgeschweißten Mehrblechverbindungen

### 7.5.1 Probenübersicht

Die Proben für Korrosionsuntersuchungen wurden aus Dreifachverbindungen in den Abmaßen 100x100 mm entnommen. Es wurde u. a. der Einfluss der Spalte auf die Korrosionsbeständigkeit untersucht.

Tabelle 14 gibt einen Überblick über die getesteten Proben.

Tabelle 14: Verwendete Proben für Korrosionsuntersuchungen

<i>Nd: YAG-Laser</i>	<i>CO<sub>2</sub>-Laser</i>
1. H220Y+ZE-Mg, Spalt 0,2 mm	7. H220Y+ZE-Mg, Spalt 0,2 mm
2. H220Y+ZE-Mg, ohne Spalt	8. H220Y+ZE-Mg, ohne Spalt
3. DC04+ZE, Spalt 0,2 mm	9. DC04+ZE, Spalt 0,2 mm
4. DC04+ZE, ohne Spalt	10. DC04+ZE, ohne Spalt
5. DX53D+Z, Spalt 0,2 mm	11. DX53D+Z, Spalt 0,2 mm
6. DX53D+Z, ohne Spalt	12. DX53D+Z, ohne Spalt

### 7.5.2 Salzsprühnebelprüfung nach DIN 50 021 SS

Die Salzsprühnebelprüfung erfolgte nach DIN 50 021 SS in einer Korrosionswechselltest-Prüfkammer SSC 1000 der Fa. Weiss Umwelttechnik GmbH. Nach Norm dient diese Prüfung sowohl zur Beschreibung der Wirksamkeit von Korrosionsschutzsystemen als auch zum schnellen Erkennen von Fehlstellen im Überzug. Dies gilt jedoch nicht für Überzüge, die unedler als der Grundwerkstoff sind, wie es bei verzinktem Stahlblech der Fall ist. Kleine Fehler in der Beschichtung sollten also keine Auswirkung zeigen. Die Prüfung sollte vor allem den Zinkabbrand in der Wärmeeinflusszone verdeutlichen.

Die Salzsprühnebelprüfung dauert 96 h. Nach der Prüfung wurden die Proben visuell beurteilt. Das Aussehen der Proben ist in den Bildern A9-1...A9-12 des Anhangs A9.1 dokumentiert.

Die Proben 1, 2, 7 und 8 zeigen Weiß- und Rotrostbildung auf dem gesamten Blech einschließlich der Schweißnaht. An der Stelle ist zu beachten, dass die Oberseite der ZE-Mg-beschichteten Bleche nur elektrolytisch mit einer 3,5 µm dicken Schicht verzinkt ist. Bei den Proben 3, 4, 9 und 10 begrenzt sich die Rotrostbildung auf die Schweißnaht und deren unmittelbare Umgebung und ist wesentlich geringer ausgeprägt. Die Weißrostbildung ist erwartungsgemäß stark ausgeprägt. Die geringste Rotrostbildung zeigen die Proben 5, 6, 11 und 12.

### 7.5.3 Klimawechseltest über drei Feucht-Trocken-Zyklen ohne Salznebelbelastung

Die Prüfung erfolgte in einer Klimakammer der Fa. Feutron. Die Proben wurden über 3 Zyklen belastet, wobei sich ein Prüfzyklus wie folgt aufbaut:

- 4 x 24 Stunden Kondenswasserwechselklima nach DIN 50 017, bestehend aus einem Wechsel von 8 Stunden bei 40 °C mit 100 % Betauung der Proben und 16 Stunden bei 25 °C und 70 % relativer Luftfeuchte,

– 3 x 24 Stunden bei Raumtemperatur nach DIN 50 014.

Das Aussehen der Proben ist in den Bildern 13-24 der Anlagen A7.2 dokumentiert. Alle Proben zeigen nach der Belastung Rotrostbildung im Schweißnahtbereich.

#### **7.5.4 Tauchversuch in 5 %-iger NaCl-Lösung**

Proben mit den Abmaßen 100 mm x 50 mm wurden über einen Zeitraum von 96 h bei Raumtemperatur ausgelagert. Die Proben wurden etwa zu 2/3 getaucht. Das Aussehen der Proben ist in den Bildern 25-36 der Anlagen A7.3 dokumentiert. Auf dem linken Teilbild sind die atmosphärische Seite und auf dem rechten Teilbild der getauchte Bereich erkennbar. Die Grenzlinie zwischen der flüssigen und gasförmigen Phase ist ebenfalls gut zu sehen. Nach der Auslagerung tritt auf der gesamten Probe Fleckenbildung auf. Sonst haben die Proben diese Belastung gut überstanden.

#### **7.5.5 Einschätzung**

Zink korrodiert unter atmosphärischen Bedingungen normalerweise sehr langsam. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Schichtdicken verzinkter Teile ist ein Einsatz bei hoher Feuchtbelastung nicht empfehlenswert. Die Einwirkung von Salznebel bei 35 °C führt bei den Proben generell zur Korrosion. Diese ist im Schweißnahtbereich besonders stark ausgeprägt. Die Beaufschlagung im Klimawechseltest ohne Salznebel mit Feuchtigkeit und Wärme führt zu leichter Korrosion im Schweißnahtbereich.

#### **7.6 Zusammenfassung**

In Abschnitt 7 wurden die Ergebnisse der mechanischen Versuche sowie Durchstrahl- und Korrosionsprüfung dargestellt. Die wesentlichen Ergebnisse zusammengefasst sind:

- ❖ Alle Schweißverbindungen wiesen im statischen Zugversuch eine hohe Festigkeit auf, trotz der „ungünstigen“ Stoßgeometrie.
- ❖ Die Versuchsergebnisse waren stark werkstoff- und verfahrensabhängig. Die besten Resultate wurden unter folgenden Bedingungen erreicht: Dünnscheibe H220Y+ZE-Mg – beim Schweißen mit Nd:YAG-Laser; DC04+ZE - beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Laser.
- ❖ Ein Spalt von 0 bis 0,2 mm zwischen den Blechen hatte beim statischen Zugversuch (im Unterschied zum Schwingfestigkeitsversuch) keinen signifikanten Einfluss auf die Versuchsergebnisse.
- ❖ Bei der Prüfung von ZE-Mg-beschichteten Schweißungen konnten keine negativen Einflüsse von Mikrorissen auf die statische Festigkeit der Schweißverbindungen festgestellt werden.



- ❖ Die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsprüfungen wurden im wesentlichen durch die (ungünstige) Stoßauslegung - Dreifachüberlappung beeinflusst.
- ❖ Im Falle des Schweißens mit dem Nd:YAG-Laser zeigen die feuerverzinken Proben im Schwingfestigkeitstest einen bemerkbaren Festigkeitsabfall.
- ❖ Im Schwingfestigkeitsversuch bewirkt ein „scharfes“ Spaltende in den Überlappstößen mit technischem 0-Spalt eine Kerbwirkung, so dass die Schwingversuche für die Beurteilung von Schweißtechnologien nur eine begrenzte Eignung besitzen. Konstruktive Einflüsse dominieren.
- ❖ Die Schweißungen besitzen eine gute Korrosionsbeständigkeit im Klimawechseltest sowie in Tauchversuchen.
- ❖ Die Einwirkung von Salznebel bei 35 °C führt bei den Proben generell zur Korrosion, die im Schweißnahtbereich besonders stark ausgeprägt ist.

## 8 Zusammenfassung und Aussichten

---

Das Ziel der Arbeit bestand darin, das Schweißen von Mehrblechverbindungen aus oberflächenveredelten Dünoblechen mit der Hochleistungslasertechnik zu untersuchen, wobei insbesondere verzinkte Bleche zum Einsatz kamen. Grundlegendes Kriterium bildete die Gewährleistung eines stabilen Prozessablaufs bei ausreichender Abfuhr der gasförmigen Beschichtungsbestandteile.

Als typischer Vertreter der Mehrblechverbindungen wurde der Dreifachüberlappstoß untersucht. Die Untersuchungen wurden vorwiegend mit zwei Lasersystemen durchgeführt: einem diodengepumpten Nd:YAG-Laser DY 044 (4,4 kW) und einem axial schnellgeströmten CO<sub>2</sub>-Laser TLF 12000 (12,0 kW).

Als erstes wurden Voruntersuchungen zum Einfluss der Versuchsbedingungen, wie die Lage der Zinkschicht im Stoß, Spaltbreite, Spannvorrichtung etc., auf das Schweißergebnis durchgeführt. Zur Prozessbeschreibung wurde auch ein qualitatives Prozessmodell entwickelt.

Im zweiten und dritten Teil der Arbeit fanden Untersuchungen zur Herstellung von Dreifachüberlappverbindungen mit einem Nd:YAG- und CO<sub>2</sub>-Laser statt. Ergänzend wurden einige Maßnahmen zur Steigerung der Nahtqualität, wie Doppelfokus, Strahlrotation und magnetische Prozessbeeinflussung untersucht.

Im letzten Teil der Arbeit erfolgte die Prüfung der Schweißergebnisse durch statische Zug- und Schwingversuche sowie Korrosionsprüfungen.

In den ersten Schweißuntersuchungen wurde festgestellt, dass die größten Einflüsse auf den Schweißprozess von der Spannvorrichtung ausgingen. Die besten Resultate wurden mit einer Spannvorrichtung erreicht (z. B. Spannvorrichtung mit fingerförmigen Spannbacken), die die Entstehung eines Spaltes im Blechzwischenraum nahe der Fügezone nicht verhinderte und gleichzeitig eine gute Fixierung der Bleche ermöglichte. Der Spalt führte zur wesentlichen Verbesserung der Entgasungsbedingungen und infolgedessen zu einem stabileren Schweißprozess. Allerdings muss die Spannvorrichtung durch eine entsprechend starke Presskraft einen realen 0-Spalt über die ganze Nahtlänge gewährleisten. Die Entgasungsbedingungen sind dabei zwar ungünstig, aber der Schweißprozess verläuft kontinuierlich ("stabil"). Unbedingt zu vermeiden ist eine Spannvorrichtung, bei der sich die Spaltbreite während des Schweißprozesses ändern kann. Dies würde zu plötzlichen Veränderungen des Zn-Dampfdruckes und als Folge zur Prozessstörungen und Badauswürfen führen.

Bei der konventionellen schweißtechnologischen Problemlösung – Erzeugung definierter Spaltbreiten zwischen den Blechen - muss beachtet werden, dass *die maximale Spaltbreite* die Stabilität der Dampfkapillare nicht stören darf. Außerdem ist zu gewährleisten, dass *die minimale Spaltbreite* größer als die Gesamtdicke des Zn-Schmelzfilmes sein muss, dessen Dicke aber unmittelbar vor dem bewegten System Schmelze/Keyhole vielfach die Dicke der Zinkschicht überschreiten kann.

Des Weiteren wurden die Einflüsse der Lage und Dicke der Zinkschichten im Dreifachüberlappstoß auf die Qualität der Schweißergebnisse und auf die Prozessstabilität untersucht, um Empfehlungen zur technologischen Auslegung solcher Stöße für konkrete Anwendungsfälle zu ermöglichen. Es war festzustellen, dass das Vorhandensein der Zinkschicht im unteren Blechzwischenraum des Dreifachüberlappstoßes für den Schweißprozess kritischer ist als das Vorhandensein dieser Schicht im oberen Blechzwischenraum. Im oberen Teil der entstehenden Schweißnaht liegen bessere Entgasungsbedingungen vor als im unteren, da dort zum einen der Dampfkanal breiter ist und zum anderen das Schmelzbad eine höhere Dynamik aufweist.

Als äußerst problematisch erwies sich für den Schweißprozess die doppelte Zinkschicht sowohl im oberen als auch im unteren Blechzwischenraum. Durch die Verdopplung der Schichtdicke kam es zur Zunahme der abzuführenden Zinkdampfmengen in der Prozesszone. Eine Vielzahl von Prozessinstabilitäten und Schmelzeauswürfen war die Folge. Die Schweißproben zeigten charakteristische Nahtfehler, wie z. B. Bindefehler.

Die Hauptuntersuchungen fanden unter Einsatz des Nd:YAG- und des CO<sub>2</sub>-Lasers statt. Für jeden Untersuchungsschwerpunkt bzw. Werkstoff wurde zunächst eine ausführliche Parameterstudie durchgeführt. Aufbauend darauf erfolgte eine Weiterentwicklung der Prozessstrategie.

Ein fehlerfreies Schweißen von verzinkten Blechen DC04+ZE war nur mit einem voreingestellten Spalt  $>0$  möglich. Bei der Blechfixierung in einer Spannvorrichtung geringer Spannkraft erreichen die Schweißungen noch eine Bewertungsgruppe D nach EN ISO 13919-1. Im Gegensatz dazu erfüllten die Schweißnähte an den Blechen H220Y+ZE-Mg bei Fixierung in der selben Spannvorrichtung die Bewertungsgruppe B. Es zeigte sich, dass sich die mit ZE-Mg-beschichteten Bleche von H220Y generell besser als die mit ZE-beschichteten Bleche DC04 schweißen lassen. Der Schweißprozess war immer stabil. Beim Schweißen mit technischem 0-Spalt wurde jedoch eine über die ganze Nahtlänge annähernd gleichmäßig verteilte Porenbildung beobachtet. Die Bildung der Oberflächenporen ließ sich zwar durch eine Prozessoptimierung und Anwendung der

Schutzgase reduzieren, jedoch nicht vollständig beseitigen. Badauswürfe waren jedoch nicht beobachtbar.

Beim Fügen mit dem CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser erreichten die Schweißungen an DC04+ZE unter Einsatz einer Spannvorrichtung mit starken gleichmäßig verteilten Spannkraften (0-Spalt) nur die Bewertungsgruppe D nach EN ISO 13919-1. Beim Schweißen unter Einsatz der Spannvorrichtung mit relativ geringer Spannkraft (Spalt > 0) wurden von den Schweißnähten an beiden Blechsorten die Bewertungsgruppe B nach EN ISO 13919-1 erzielt.

Es zeigte sich, dass sich die DC04+ZE-Feinbleche mit dem CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaser (TLF 12000) unter gegebenen Prozessbedingungen besser schweißen lassen als H220Y+ZE-Mg-Feinbleche. Dagegen zog der Einsatz des Nd:YAG-Lasers (DY 044) zum Schweißen der ZE-Mg-beschichteten Bleche deutlich bessere Schweißergebnisse nach sich. Das Hauptproblem lag hier aber im Auftreten von Mikrorissen in der WEZ und im Schweißgut. Nach den Ergebnissen der REM-Analyse sind diese Mikrorisse mit einer Zn-Legierung gefüllt.

Im Rahmen der Arbeit wurde eine Reihe von ergänzenden Technologien zum Laserschweißen untersucht. Der Pulsbetrieb des Laserstrahles im für die Industrie relevanten Schweißgeschwindigkeitsbereich zog keine Erhöhung der Prozessstabilität nach sich. Auch der Einsatz einer Doppelfokustechnik sowie einer rotierenden Optik erbrachte keine Verbesserung der Schweißergebnisse im Vergleich zu den mit konventioneller Optik geschweißten Dreifachüberlappstößen. Die am IFSW Stuttgart durchgeführten Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen mit magnetischer Beeinflussung des Schmelzbades zeigten, dass prinzipiell die Möglichkeit zur Beeinflussung der Schweißergebnisse beim Laserschweißen von ZE-Mg-beschichteten Dreifachüberlappstößen gegeben ist. Die Einflüsse auf die Nahtgeometrie waren eindeutig. Aussagen über die Bedeutung dieser Einflüsse für die Steigerung der Bearbeitungsqualität sind zum heutigen Zeitpunkt jedoch nicht möglich. Hierzu sind spezielle Untersuchungen notwendig, die eine höhere statistische Sicherheit ermöglichen.

Alle Schweißungen erreichten im statischen Zugversuch nahezu die Festigkeit der entsprechenden Grundwerkstoffe, trotz der ungünstigen Verbindungsgeometrie. Die besten Ergebnisse in den statischen Zugversuchen zeigten die ZE-Mg-beschichteten mit dem Nd:YAG-Laser geschweißten Proben des Werkstoffes H220Y und im Falle des CO<sub>2</sub>-Laserschweißen die elektrolytisch verzinkten DC04-Schweißverbindungen. Es wurde festgestellt, dass ein Spalt (0,2 mm) zwischen den Blechen im Gegensatz zu den Schwingversuchen keinen signifikanten Einfluss auf die Zugfestigkeit hat. Die o. g.

Mikrorisse haben sich ebenfalls in keiner Weise negativ auf die statische Festigkeit der Schweißverbindungen ausgewirkt. Die schlechtesten Festigkeitswerte wurden bei den geschweißten Proben an den feuerverzinkten Blechen festgestellt, die mittels Nd:YAG-Laser verschweißt wurden.

Allgemein ist zu bemerken, dass die Dreifachüberlappung eine äußerst ungünstige Stossauslegung für dynamisch stark beanspruchte Bauteile ist. Bei den Überlappnähten wirken die Spalte als Spannungskonzentrator, so dass die Schwingversuche zur Beurteilung einer Schweißtechnologie nur eine begrenzte Eignung besitzen. Die Ergebnisse der Schwingfestigkeitsprüfungen werden im wesentlichen durch konstruktive Faktoren bestimmt.

Die Einwirkung von Salznebel bei 35 °C über einen Zeitraum von 96 h führte bei den untersuchten Schweißungen generell zu Korrosionserscheinungen. Diese sind im Schweißnahtbereich besonders stark ausgeprägt. Die Beaufschlagung im Klimawechseltest mit Feuchtigkeit und Wärme bewirkte ebenfalls leichte Korrosionserscheinungen im Schweißnahtbereich. Die Schweißungen wiesen jedoch eine gute Beständigkeit in den Tauchversuchen auf.

Auch wurden Prozessstrategien zur Herstellung von Mehrblechverbindungen untersucht. Prinzipielle Lösungsmöglichkeiten werden aufgezeigt und vorgestellt. Von der Einführung dieser Technologien in die Serienfertigung können in erster Linie kleine und mittelständische Unternehmen der Autozuliefererindustrie profitieren. Die Ergebnisse sind auch für andere Industriebranchen, wie z.B. dem Maschinen- und Apparatebau, von Interesse. Potentielle industrielle Anwender sind weiterhin alle Betriebe, die Mehrblechverbindungen an beschichteten Werkstoffen sicher und wirtschaftlich herstellen müssen.

Abschließend lässt sich feststellen, dass im Rahmen der vorliegenden Arbeit neue Prozessstrategien entwickelt wurden, die eine prozesssichere und wirtschaftliche Herstellung von Schweißungen vor allem im Karosseriebau sowie anderen Bauteilen aus beschichteten Feinblechen ermöglichen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Kalla, G. Werkstoffeigenschaften von CO<sub>2</sub>- laserstrahlgeschweißten Stählen StE 355 und StE 460. DVS- Berichte 135, Strahltechnik 1991, S. 152.
- [2] Dilba D. Schweißender Sternenkreuzer. Der Spiegel 8/2006. S. 134.
- [3] Jung, W.W., Young Dal Kwon. Selecting the Spot Welding Condition of Multi-Layer Vehicle Structure. Society of Automotive Engineers, Inc., Art.-Nr. 970083, S. 19-25
- [4] Alsmann M., Hower K.-H. u.a. Innovative oberflächenveredelte Feinblechprodukte für den Fahrzeugbau. Stahl und Eisen 121 (2001) Nr. 6. S. 29-33.
- [5] Ameling D., Brunnhuber u.a. Sicher und Sparsam. Faszination Stahl. 01/2002. S. 11.
- [6] Ameling D. Die Stahlindustrie in Deutschland – Stark im globalen Wettbewerb. Vortrag anlässlich der 10. Handelsblatt Jahrestagung für die Stahlwirtschaft – Stahlmarkt 2006. 1. März 2006. Düsseldorf.
- [7] N.N. Potenzial aus Stahl. Positionen und Perspektiven im Weltmarkt. Herausgeber: ThyssenKrupp Steel AG. April 2002.
- [8] Ameling D. All you need is Steel. SCT 2005 - Steels in Cars and Trucks Pressegespräch 6. Juni 2005, Wiesbaden.
- [9] Brüninghaus B. Vorfahrt für Stahl. Konferenz über Stahl im Automobilbau. 5. bis 10. Juni 2005, Wiesbaden.
- [10] Heller T., Hoffmann O., Etzold U., Imlau K.-P. Neue Stähle für moderne Fahrzeugkarosserien. 26.01.2006.  
[http://www.dgm.de/past/2004/metallographie/download/686\\_80.pdf](http://www.dgm.de/past/2004/metallographie/download/686_80.pdf).
- [11] N.N. Lieferprogramm. Ein glänzendes Angebot. ThyssenKrupp Stahl-Januar 2002.
- [12] N.N.: Ultraleichte Stahlkarosserie. ULSAB-Broschüre, ThyssenKrupp, 2002
- [13] Adam H., Osburg B., Patberg L. u.a. NSB<sup>®</sup> NewSteelBody – Karosserieleichtbau mit Stahl. ThyssenKrupp techforum Juli | 2004.
- [14] Jarms, C.: Ist Verschleißschutz simulierbar? Software gestützte Verschleißschutzempfehlung für das Presswerk. Tagungsband des 4. Tribologieforums an der TU Darmstadt am 24. und 25.09.2003 in Darmstadt.
- [15] Jeswiet, J.: A comparison of friction coefficients in cold rolling. Journal of materials processing technology 80-81, S. 239-244, Elsevier, 1998.
- [16] Schröder T. Ausgekochter Stahl für das Auto von morgen. 3/2004 MAXPLANCK FORSCHUNG. S. 37-41.
- [17] Alsmann M., Hower K.-H. u.a. Innovative oberflächenveredelte Feinblechprodukte für den Fahrzeugbau. Stahl und Eisen 121 (2001) Nr. 6. S. 29-33.
- [18] Nebel G. Stahlband und seine Oberflächenveredelung. Vortrag von Herrn Dipl. Ing. Gerhard Nebel, ThyssenKrupp Stahl AG. <http://www.tis-gdv.de/tis/tagungen/svt/svt00/neba1/neba1.htm>
- [19] Reinhold B. Anforderungen der Automobilindustrie an technische Oberflächen. Galvanotechnik, Band 92 (2001) Heft 1, S. 85-97.

- [20] Franzen A. Untersuchungen zur Entzinkung von beschichtetem Stahlband durch thermische Behandlung im festen Zustand. Dissertation, TU Clausthal 1998.
- [21] N.N. Merkblatt 400 „Korrosionsverhalten von feuerverzinktem Stahl“ 6. Auflage 2001. ISSN 0175-2006. Herausgeber: Stahl-Informations-Zentrum.
- [22] Adam H. Moderne Oberflächenveredlungstechnologie im Karosseriebau. 4. Fachtagung „Prozesskette Karosserie“ Partnerschaft im 3. Jahrtausend. Design – Werkstoffe – Werkzeugbau – Preßwerk – Karosseriebau, Fellbach, 17.-18. Feb, 2000, S. 83-124.
- [23] Reinhold B. Anforderungen der Automobilindustrie an technische Oberflächen. Galvanotechnik. Band 92 (2001) Heft 1, S. 85-97.
- [24] Zwick A. Stahlbleche mit verbesserter Laserschweißeignung. VDI-Z Integrierte Produktion - Ausgabe 1/2-2004. S. 72.
- [25] Beenken H. Innovative Automobilkonzepte mit modernen Mehrphasen-Stählen erfordern optimal angepasste Fügeverfahren. ThyssenKrupp techforum. Dezember 2003. S. 20-23.
- [26] Schumacher B., Zwick A. Zink-Magnesium-Oberflächenveredelung für verbesserten Korrosionsschutz. ThyssenKrupp Techforum. Dezember 2003. S. 11-13.
- [27] N.N. ZE-Mg Die neue Generation von Zinklegierungsüberzüge: korrosionsbeständiger, verarbeitungsfreundlicher. Information der Fa. ThyssenKrupp. November 2003. 8 Seiten.
- [28] Weber H., Herziger G. Laser: Grundlagen und Anwendungen. Weinheim: Physik Verlag, 1972.
- [29] Mann, K., Hutfless, J., Ruß, A.: Mit dem Scheibenlaser zu neuen Anwendungen. Stuttgarter Lasertage 2003, Tagungsband, S.71-75.
- [30] Ruß, A.; Gref, W; Leimser, M.; Dausinger, F.; Hügel, H.: High Speed welding of metal sheets with thin disk Laser, Proceedings of the 2. International WLT-Conference an Lasers in Manufacturing 2003, Munich, June 2003
- [31] Debschütz, K.; Becker, W ; Bernhardt, R.; Mann, K.: New Laser Application Potential through Robot-Guided Remote Laser Welding, 3rd European Conference and Exhibition, Bad Nauheim, January 2002.
- [32] Masaki Seguchi, Shuichi Fujikawa, Keisuke Furuta, Yushi Takenaka, Koji Yasui, „1kW high-beamquality and highly efficient diode-pumped Nd:YAG rod laser“, SPIE Proceedings Vol. 4831, 101103 (2003).
- [33] Graf, Th.: Entwicklungsperspektiven verschiedener Hochleistungslaserkonzepte. Stuttgarter Lasertage 2003, Tagungsband, S.59-61.
- [34] Jerems, S., u. a. Innovative CO<sub>2</sub>-Laser-Verfahren. Stuttgarter Lasertage 2003, Tagungsband, S.49-52.
- [35] Faisst F. Fügetechniken für- den Werkstoff Aluminium, EUROFORUM-Konferenz "Herausforderung Aluminium-Industrie", 11. und 12. März 1999, Marriott Hotel, Frankfurt am Main.
- [36] Gref W., Ruß A., Leimser M.u.a. Double focus technique - influence of the focal distance and intensity distribution an the welding process. Proceedings of the International Congress an Laser Advanced Materials processing "LAMP 2002", Osaka, Japan



- [37] Gref, W., u.a.: vom Doppelfokus zur Fokusmatrix. Stuttgarter Lasertage 2003, Tagungsband, S.189-192.
- [38] Holtz, R., Jokiell, M.: Neue Strategien beim Mikroschweißen mit gepulsten Lasern. Stuttgarter Lasertage 2003, Tagungsband, S.203-209.
- [39] Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Institut für Lasertechnologie ILT Aachen: Patentanmeldung: Verfahren zum Laserstrahlschweißen eines Werkstücks. PST-Fallnummer: F37322-ILT.
- [40] Holtz, R., Jokiell, M.: Neue Strategien beim Mikroschweißen mit gepulsten Lasern. Stuttgarter Lasertage 2003, Tagungsband, S.203-209.
- [41] N.N. Information der Fa. SCANLAB AG. [www.scanlab-america.com](http://www.scanlab-america.com).
- [42] N.N. Information der Firma IVAM e.V. [www.neuematerialien.de](http://www.neuematerialien.de).
- [43] Rippl, P.: Neue Rohbaukonzepte mit KUKA RboScan. Lasertechnologien im Automobilbau. Forum Auto Vision in Wolfsburg am 28.10.2004.
- [44] N.N. Information der Fa. Bremer Institut für angewandte Strahltechnik GmbH. [www.bias.de](http://www.bias.de)
- [45] N.N. Trumpf - Remote-Schweißen steht vor großer Zukunft  
[http://www.maschinenmarkt.de/fachartikel/mm\\_fachartikel\\_1676239.html](http://www.maschinenmarkt.de/fachartikel/mm_fachartikel_1676239.html)
- [46] NN: Fügetechnik Vorlesungen. Fa. Trumpf 2003.
- [47] N.N. Mobile, handgeführte Lasersysteme für die Laser-Materialbearbeitung. Information der Fa. Mobil Laser Tec GmbH.
- [48] Amende W., Behnisch H., Beyer E. u.a. Laserstrahltechnologien in der Schweißtechnik. Düsseldorf: DVS-Verl., 1989, 154 S.
- [49] Löffler K. Laseranwendungen bei Volkswagen. Forum „Lasertechnologien im Automobilbau. Heute und morgen“, 28. Oktober 2004, Wolfsburg.
- [50] Rippl P. Neue Rohbaukonzepte mit KUKA RoboScan. Forum „Lasertechnologien im Automobilbau. Heute und morgen“, 28. Oktober 2004, Wolfsburg.
- [51] Dausinger, F. Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität. Stuttgart: Teubner, 1995 (Laser in der Materialbearbeitung), 143 S.
- [52] Dausinger, F. Prozessverständnis als Grundlage der Verfahrensentwicklung. Stuttgarter Lasertage 25.-26. September 2003. S. 65-69.
- [53] Haller, E., Bartl R. Laser – eine Technologie mit Zukunft in der Automobilindustrie. Stuttgarter Lasertage 25.-26. September 2001. S. 31-34.
- [54] Beck, M. Modellierung des Lasertiefschweißens. Universität Stuttgart, Diss., 1996, Stuttgart: Teubner, 1996 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).
- [55] Rapp, H. u. A. Rief. Laserstrahlschweißen im Karosseriebau. DVS-Berichte 146, S. 210-212.
- [56] Imhoff, K., Behler, K. und Beyer, E. Der Laser im Karosseriebau - Substitution oder Ergänzung herkömmlicher Schweißverfahren? Schweißen und Schneiden 40 (1988) 9, S. 446-450.
- [57] Alsmann, M. Gebrauchs- und Verarbeitungseigenschaften von organisch vorbeschichteten Feinblechen für die Automobilindustrie. Industriekolloquium „Fertigen in Feinblech“, Clausthal-Zellerfeld 1998, S. 66-70.

- [58] Killing R. Schweißen nach dem Verzinken. Schweißen bei verzinkten Konstruktionen – Der Praktiker – Band 50 (1998) Heft 2. S. 51-54, 56.
- [59] Xie J. and Denney P. Galvanized Steel Joined with Laser. Welding Journal, New York, Band 80 (June 2001) Heft 6. S. 59-61.
- [60] Kodama Shinji, Miyazaki Yasunobu u.a. – Nipon Steel Corp. Lap laser-beam welding method for galvanized steel sheet. Japanese Patent Nr. 2003094184. 02.04.2003.
- [61] Pezzutti M. Innovative welding technologies for the automotive industry. Innovative Schweißtechniken für die Automobilindustrie. Welding Journal, New York, Band 79 (2000) Heft 6. P. 43-46.
- [62] Flohr, J., Wanke R. Welding Zinc-Coated Steels for the Body-in-White with Nd:YAG Lasers. IBEC`94, Vol.10, S. 84-88.
- [63] Forrest, M.G., W.A. Martilla, T.G. Tomakich u. R.M. Klein. Laser Knurling Seam Preparation for Laser Welding of Zinc Coated Sheet Metal. Proceedings IBEC, Sept./Oct., 1997, Stuttgart, Vol.33, S. 69-77.
- [64] Graham, M.P., D.M. Hirak, H.W. Kerr u. D.C. Weckman. Nd:YAG Laser Welding of Coated Sheet Steel. Journal of Laser Applications (1994) 6, S. 212-222.
- [65] Haferkamp, H., F.-W. Bach, M. Marquering, K. Kreuzburg u. M. Höfemann. Fügen verzinkter Stahlfeinbleche mit Nd:YAG-Laserstrahlung. Stahl 6/95, S. 26-29.
- [66] Katayama, S. u. A. Matsunawa. Laser Weldability of Zn-coated steels. 6th International Conference on Welding and Melting by Electron and Laser Beams, Toulon, France, 1998, S. 233-240.
- [67] Kielwasser, M., R. Fabbro, D. Petring u. R. Poprawe. Process Behaviour During Nd:YAG Pulsed Laser and CO<sub>2</sub>-CW Laser Welding of Zinc Coated Steel. European Conference on Laser Treatment of Materials, ECLAT, Sept. 1998, S. 251-257.
- [68] Klein, R., L. Abram, R. Fischer, R. Polzin, H. Pircher u. W. Prange. Laserstrahlfügen von verzinktem Feinblech und Al/St-Mischverbindungen. Tagungsreihe Dünoblechverarbeitung, Neues zum Schweißen von Leichtbauwerkstoffen, Erding, 1998, S. 231-241.
- [69] Poprawe, R., Klein R. u. Abram L. Lasertechnik in der Verarbeitung beschichteter Feinbleche. Stahl und Eisen 115 (1995), S. 31-37.
- [70] Williams, S.W., P.L. Salter, G. Scott u. S.J. Harris. New Welding Process for Galvanised Steel. 26th International Symposium on Automotive Technology and Automation, 1993, S.49-57.
- [71] N.N. 3-D-Bearbeiten mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern. Hrsg.: VDI-Technologiezentrum, Physikalische Technologien, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1995.
- [72] El-Batahgy A.M. A study on weldability of zink-coared steel in lap joint coniguration. Steel Research, Band 68 (1997) Heft 12, S. 546-551.
- [73] Matsunawa A., Zaghfoi B. u.a. Laser beam welding of lap joints of dissimilar materials. Transactions of JWRI (Japan Welding Research Institute), Band 27 (1998) Heft 2, S. 13-19.
- [74] Haferkamp H., Goede M. u.a. Laser-MIG-Hibridschweissen von Tailored Tubes. Stahl (2001) Heft 4, Seite 58-60.

- [75] Piante A.D., Turin S. u.a. Method of laser welding sheet metal protected by low vaporizing temperature materials. U.S. Patent Nr. 4,682,002. 31.10.1984.
- [76] Löffler K. Laseranwendungen im Karosseriebau bei Volkswagen. Stuttgarter Lasertage `03. 25.-26. September 2003. S.35-37.
- [77] Spies B., Thoms V. – Mercedes Benz AG. Überlapp – oder Steg-Schweißnaht für verzinkte Bleche. Deutschland Patent Nr. DE 3933408 C2. 24.01.1991/ EU Patent Nr. 0421091 A1. 11.08.1990.
- [78] Möckel A., Günter H, Jansche M. Laserschweiß- und Spannsystem für den Karosserierohbau. Forum. Technische Mitteilungen ThyssenKrupp (2002) Heft 1. S. 19-22.
- [79] Lutz A., Fischer R. u.a. – Thyssen Laser-Technik GmbH. Verfahren zum Vorbereiten der Fügebereiche beschichteter Werkstücke zum Schweißen mit Laserstrahlung und Überlappstoß zum Schweißen beschichteter Werkstücke. Europäische Patent Nr. EP 0 748 268 B1. 03.02.1995.
- [80] Behler K., Imhoff R. u.a. Arrangement for welding coated workpieces using laser beam. International Patent Nr. WO 90/11161. 04.10.1990.
- [81] Inomata Tetsuro, Tanigichi Yuichi u.a. Nipon Steel Corp. Method for lap welding of galvanized steel plates with laser beam. Japanese Patent Nr. 2002346780 A. 04.12.2002.
- [82] Fujimoto Hironori, Fukui Kiyoyuki – Sumitomo Metal IND Ltd. Laser lap welding method for metal with surface coating. Japanese Patent Nr. 2002178178 A. 25.06.2002.
- [83] Bilge U., Jurczynszyn C.E. u.a. - General Motors Corp. Laser welding method. U.S. Patent Nr. 5,183,992. 29.08.1991.
- [84] Erward J. – General Motors Corp. Laser welding of galvanized steel. US Patent Nr. 4,642,446. 03.10.1985.
- [85] Radscheit C. Fügen von ferzinkten Feinblechen. Fügen zukunftsweisender Werkstoffe. 6. Aachener Schweißtechnik kolloquium (1999) S. 233-240.
- [86] Kitano Hiroshi - Toyota Motor Corp. Laser beam welding method. Japanese Patent Nr. 2002035970 A. 05.02.2002.
- [87] Bouaifi B., Draugelates U. Schweißen von Mehrblechverbindungen mit Hilfe der Hochleistungslaserstrahltechnik. Ausführliche Beschreibung zum AiF-Forschungsantrag vom 26.04.2001.
- [88] Seefeld T., Thomy C ., Kohn H. u.a. Erste Erfahrungen und Anwendungsuntersuchungen mit einem 10 kW Faserlaser. 5. Workshop „Industrielle Anwendungen von Hochleistungs - Diodenlasern“ 21. / 22. Oktober 2004 Fraunhofer IWS, Dresden.
- [89] Bösch, L., Pasic H., Neges J. Ultraschallprüfung von Widerstandspunktschweißverbindungen an hochfesten Stahlverbindungen im Karosseriebau. DACH - Jahrestagung 2004 Salzburg. <http://www.ndt.net/article/dgzfp04/papers/v29/v29.htm>
- [90] Wegst C.W. Stahlschlüssel. Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH. 19. vollständig neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2001. ISBN 3-922599-17-6. 2001
- [91] N.N. Information der Fa. ThyssenKrupp. 05.07.2005. [http://www.thyssen-stahl-service-center.com/produkte/pro\\_kw\\_spaltundblech.html](http://www.thyssen-stahl-service-center.com/produkte/pro_kw_spaltundblech.html)

- [92] N.N. Information der Fa. Voestalpine Stahl GmbH. 05.02.2004  
[http://www.voestalpine.com/downloads/download/vasn/KaltgewalztesStb\\_D2.pdf](http://www.voestalpine.com/downloads/download/vasn/KaltgewalztesStb_D2.pdf)
- [93] N.N. Hot-dip galvanised products. Product catalogue. Information der Fa. Corus Automotive. International Automotive Research Centre  
[http://www.corusautomotive.com/file\\_source/StaticFiles/Business%20Units/CSP%20UK/Hot\\_dip\\_galvanised.pdf](http://www.corusautomotive.com/file_source/StaticFiles/Business%20Units/CSP%20UK/Hot_dip_galvanised.pdf)
- [94] N.N. Bänder und coils und Rundkantiger Flachstähle. Information der Fa. MARCEGA-GLIA S.p.A. 07.07.2005. <http://www.europoficz.com/pdfs/nastri.pdf>.
- [95] N.N. Höherfester Stahl für den Automobil-Leichtbau. ThyssenKrupp Stahl. August 1999.
- [96] DIN EN 10268 „Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus Stählen mit hoher Streckgrenze zum Kaltumformen“.
- [97] Holthaus, M.: Der Laserstrahlschweißprozess. VDI-Zeitung 144 (2002), S. 60-64.
- [98] N.N: Presseinformation der Fa. Rofin. Oktober 2002.  
[http://www.rofin.com/deutsch/aktuelles/presse/Euroblech\\_dt\\_final.pdf](http://www.rofin.com/deutsch/aktuelles/presse/Euroblech_dt_final.pdf).
- [99] Matthes, K.-J., Seliga, E. Studie “Gerätetechnischer Forschungsbedarf in der Fügetechnik aus Sicht mittelständischer Anlagenhersteller oder Systemanbieter“ Chemnitz und Düsseldorf im März 2003. 75 S.
- [100] N.N. Die EMAG LaserCell ELC: ein innovatives Produktionsmittel für die Prozesse Fügen + Laserschweißen Information der Fa. EMAG MASCHINENFABRIK GMBH. Juni 2004.  
[http://www.emag.de/ger/presse/2\\_6\\_PI\\_06-2004\\_EMAG\\_LaserCell.pdf](http://www.emag.de/ger/presse/2_6_PI_06-2004_EMAG_LaserCell.pdf)
- [101] N.N. EN ISO 13919-1. Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen. Leitfaden für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten.
- [102] Naeem M. YAG laser welding of thin sheet –. Welding and Metall Fabrication – Band 68 (2000) Heft 6, S. 6, 8-10.
- [103] Maazunder J. Laser Material Processing: Atom to Application. FEL users’ workshop at Jefferson Laboratory, January 18, 2002. Präsentation.
- [104] Gurgey A., Olainek C. Das Verhalten hoch fester Feinkornbaustähle beim Laserstrahlschweißen – Ergebnisse der Probeauswertung. Der Praktiker, Band 55 (2003), Heft 1. S. 6-11.
- [105] Jokinen T., Hovikorpi J. u.a. The effect of an air gap on the properties of high power Nd:YAG laser welds. Acta Universitatis Lappeenrantaensis Band 84 (1999) S. 111-119.
- [106] Möckel A. u.a. Laserschweiß- und Spannsystem für den Karosserierohbau – Forum. Technische Mitteilungen ThyssenKrupp – (2002) Heft 1. S. 19-22.
- [107] Kielwasser M., Fabbro R., Poprawe R. Physical processes during pulsed Nd-YAG laser and CW-CO2 laser welding of zinc coated steel. LIA, Laser Inst. Of Am. Band 91 (2000) S. A. 10-19.
- [108] Loreda A., Martin B. u.a. Numerical Study of Zinc Coated Car Body Laser Welding. Konferenz-Einzelbericht. SAE-P \* Band P-369 (2001). S. 59-64.
- [109] Beersiek J. (Fa. PROMETEC GmbH, Aachen) New Aspects of Monitoring with a CMOS camera for Laser Materials Processing. ICALEO’02 (Welding Monitor PD 2000).

- [110] Xie J. und Denney P. The welding of galvanized steel. LIA, Laser Inst. Of Am. Band 91 (2000) S. A. 1-9.
- [111] Bergmann J.P. Remote-Schweißen verzinkter Stähle mit einem Kohlendioxidlaser –und M. Kunst. Der Praktiker – Band 55 (2003) Heft 10, S. 323-326.
- [112] Vanschen W. Die Lasertechnologie, Teil 3. Schweiß- und Prüftechnik, Wien, Band 57 (2003) Heft 1. S.2-5.
- [113] Ono M., Kaizu S. u.a. Laser welding of steel sheets for automobiles. NKK Technical Review (1997) Heft 77, S. 56-63.
- [114] Tzeng Y. F. Pulsed Nd: YAG Laser Seam Welding of Zinc-Coated Steel – Welding research supplement - Yuli 1999. P. 238-244.
- [115] Tzeng Y. F. Toward process optimization in pulsed Nd:YAG laser seam welding of zinc coated steel –. JSME International Journal – Band 43 (2000) Heft 1. P. 47-54.
- [116] Tzeng Y.F. Effects of operation parameters on surface quality for the pulsed laser welding of zinc-coated steel. Journal of Materials Processing Technology, Band 100 (2000) Heft 1-3. S. 163-170.
- [117] Tzeng Y.F. Effects of operation parameters on the static properties of pulsed laser welded zinc-coated steel. International Journal of Advanced Manufacturing, Band 18 (2001) Heft 9. S. 641-647.
- [118] Tzeng Y. F. Effects of process parameters on the corrosion rate of pulsed Nd:YAG laser-welded zinc-coated steel. Journal of Materials Processing Technology, Band 124 (2002) Heft ½. S. 1-7.
- [119] Naeem M., Stolarczyk J. High power YAG laser welding of automotive materials – LIA, Laser Inst. Of Am. Band 91 (2000) S. A.20-27.
- [120] Faißt F., Weick J.-M. u.a. Anwendungen der TWINFOKUS-Technik. Stuttgarter Lasertage 28.-29. September 1999. S. 50-52.
- [121] Rude S. Strahlmanipulation in Form des rotierenden Laserstrahles - Diplomarbeit. Stand: 14. April 2004. Forschungsstelle: Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle GmbH.
- [122] Zwickert H. Schweissverbindungen zwischen Buntmetallen und Stählen. ZIS-MITT. \* (1976) Heft 2, Seite 127-136.
- [123] Birkel U. Ein neues Verfahren zur Ermittlung des Eigenspannungszustandes am Beispiel der Scheibe mit Kreisloch mit Hilfe der Elektronischen Speckle-Pattern-Interferometrie und der Finite-Elemente-Methode. Dissertation. Von der Fakultät Energietechnik der Universität Stuttgart. 2001.
- [124] Lindenau D., Ambrosy G., Berger P., Hügel H. Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen. Stuttgarter Lasertage 25.-26. September 2001. S. 39-42.
- [125] Kern M., Berger P. und Hügel H. Magnetisch gestütztes Laserschweißen. Stuttgarter Lasertage 28.-29. September 1999. S. 12-17.
- [126] Mombo-Caristan J.C., Müller R.E. u.a. Parabolic mirror adapted-alignment for high speed-high power laser welding with on oblong focused beam spot. Laser materials processing conf. ICALEO 1997 Band 83 (1997), S. 191-199.
- [127] Haibach, E. Betriebsfestigkeit: Verfahren und Daten zur Bauteilberechnung. 2. Berlin, Heidelberg, New-York : Springer-Verlag, 2002. – (VDI-Buch).

Anhang

# *Anhang*



### Anhang A1: Einfluss der Art der Spannvorrichtung auf die Qualität hergestellter Schweißverbindungen, Werkstoff H220Y+ZE-Mg 35/35

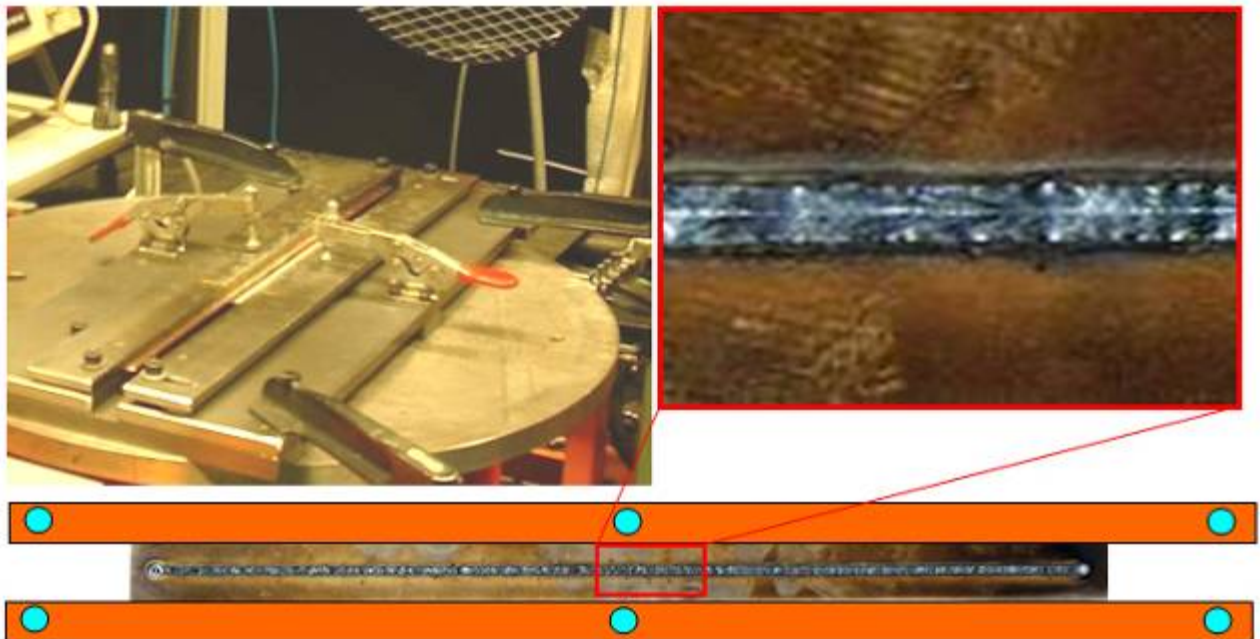


Bild A1-1: Streifenförmige Spannbacken (sechs Spannelemente, vier außerhalb der Bleche)

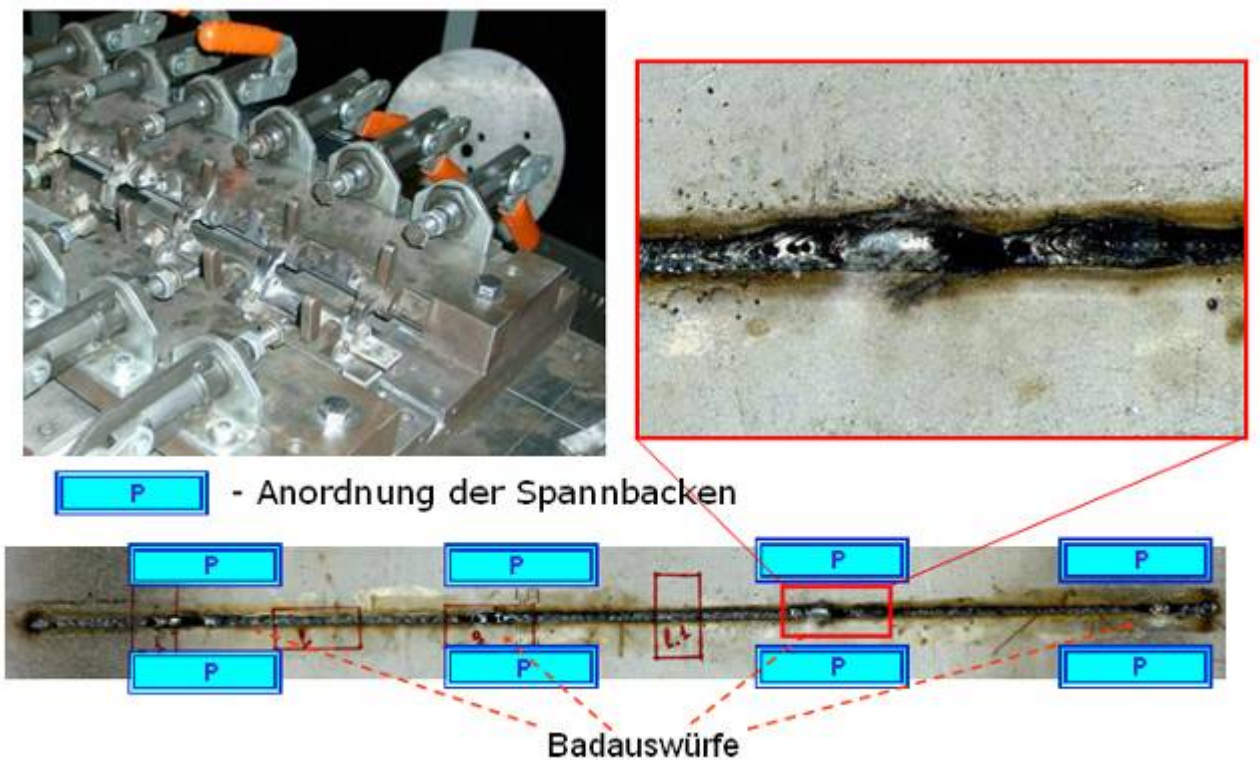


Bild A1-2: Einzelne rechteckenförmige Spannbacken (acht Spannelemente)

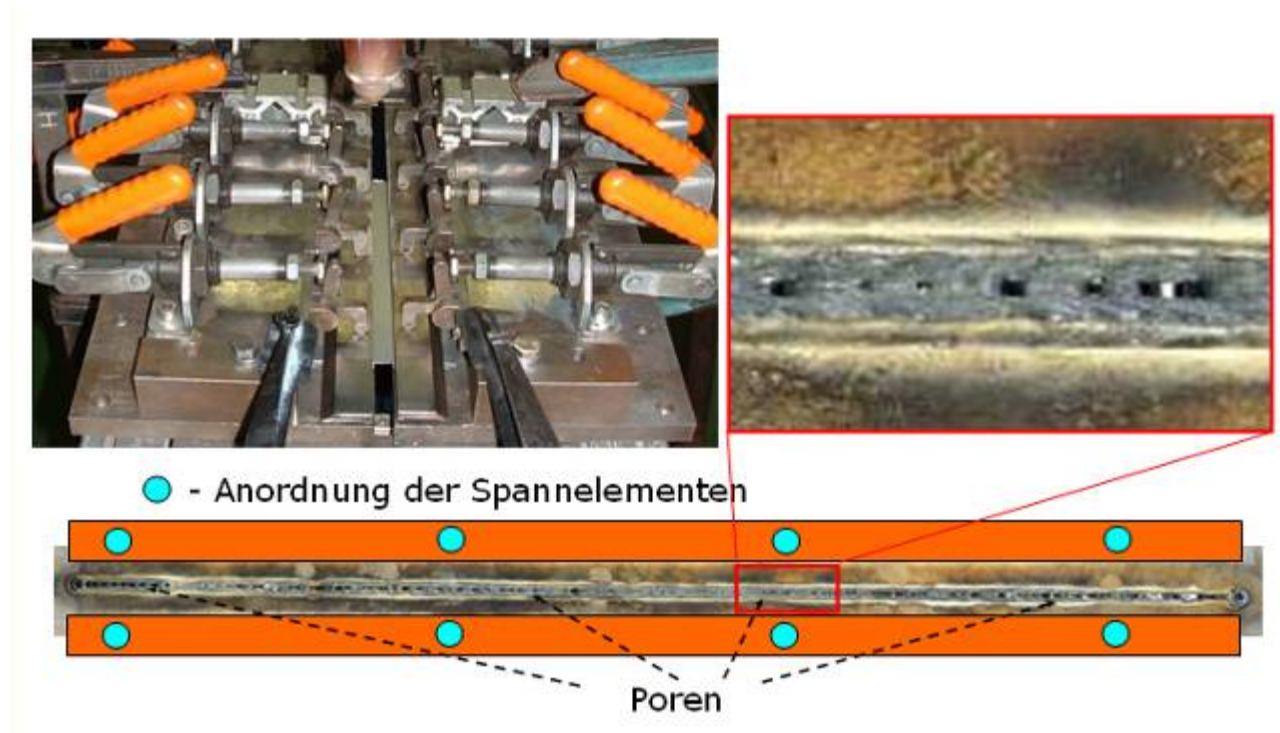


Bild A1-3: Stabile streifenförmige Spannbacken (acht Spannelemente)

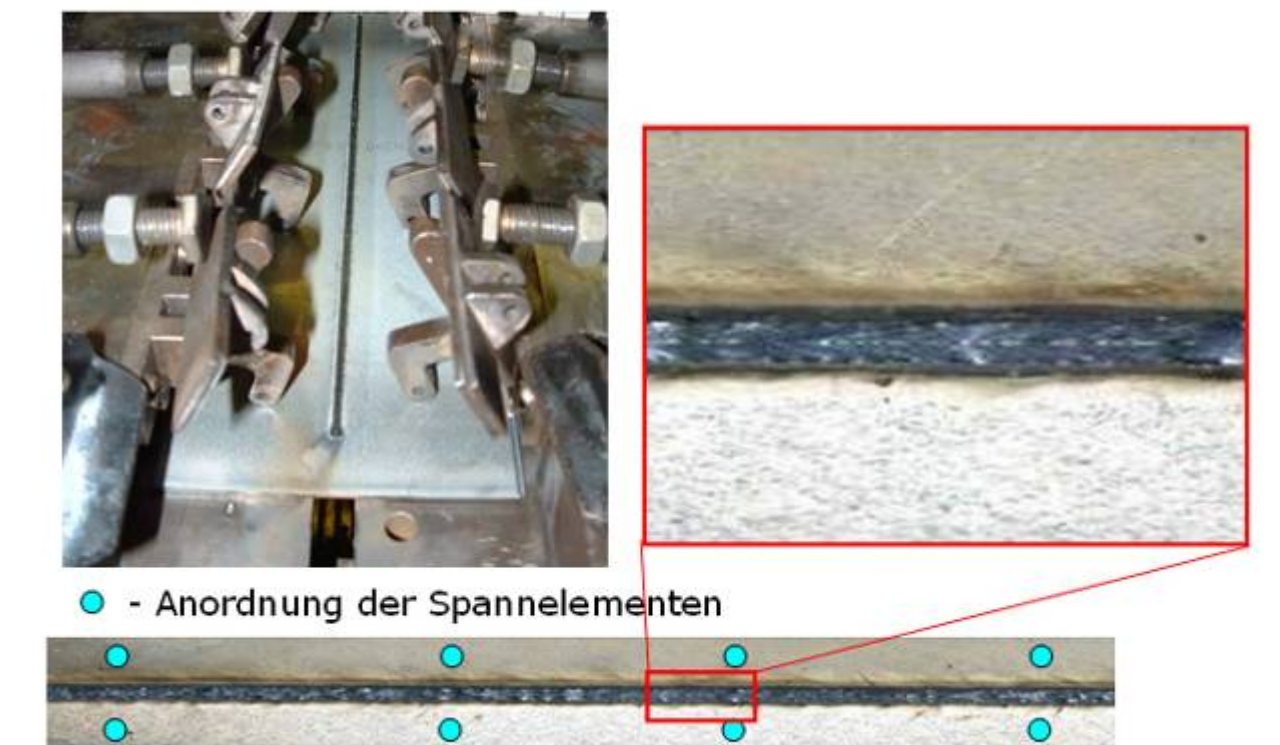


Bild A1-4: Einzelne punktförmige Spannbacken (acht Spannelemente)



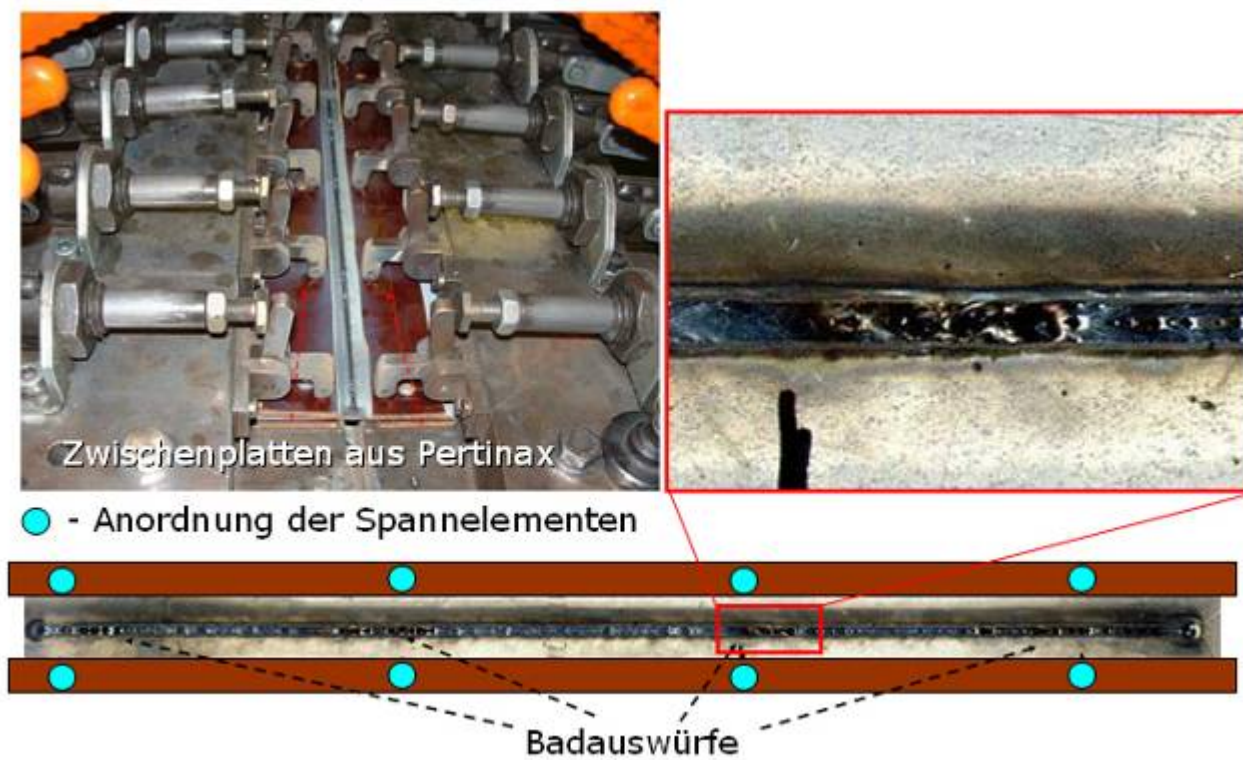
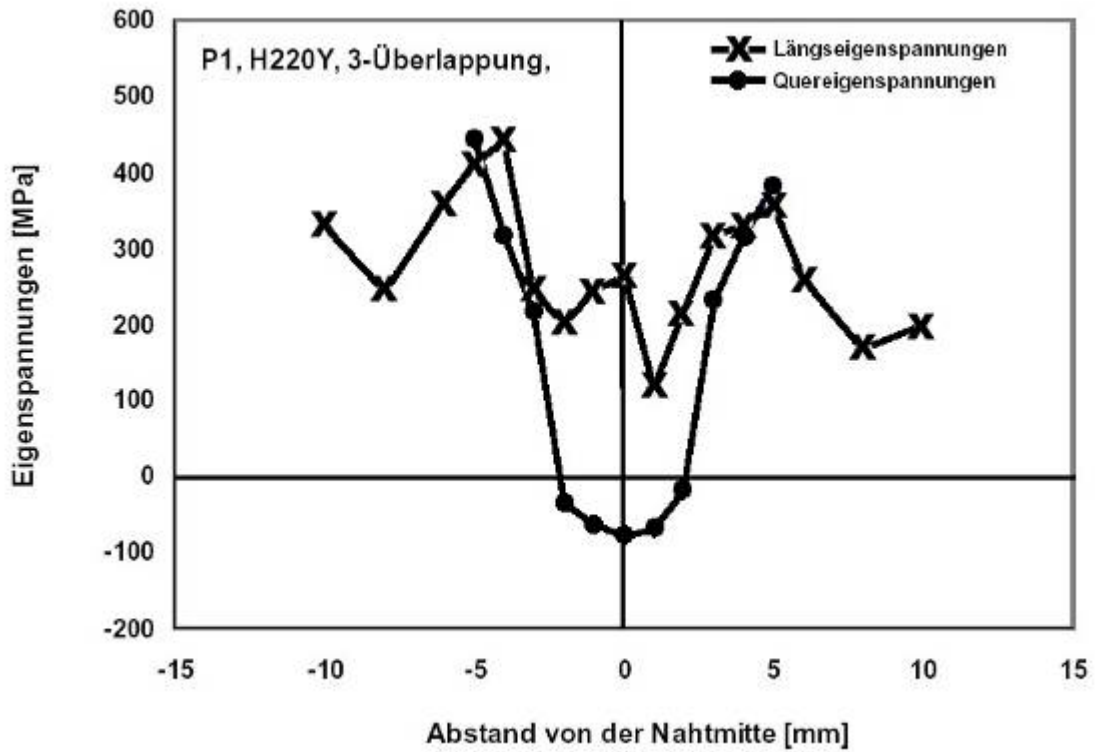
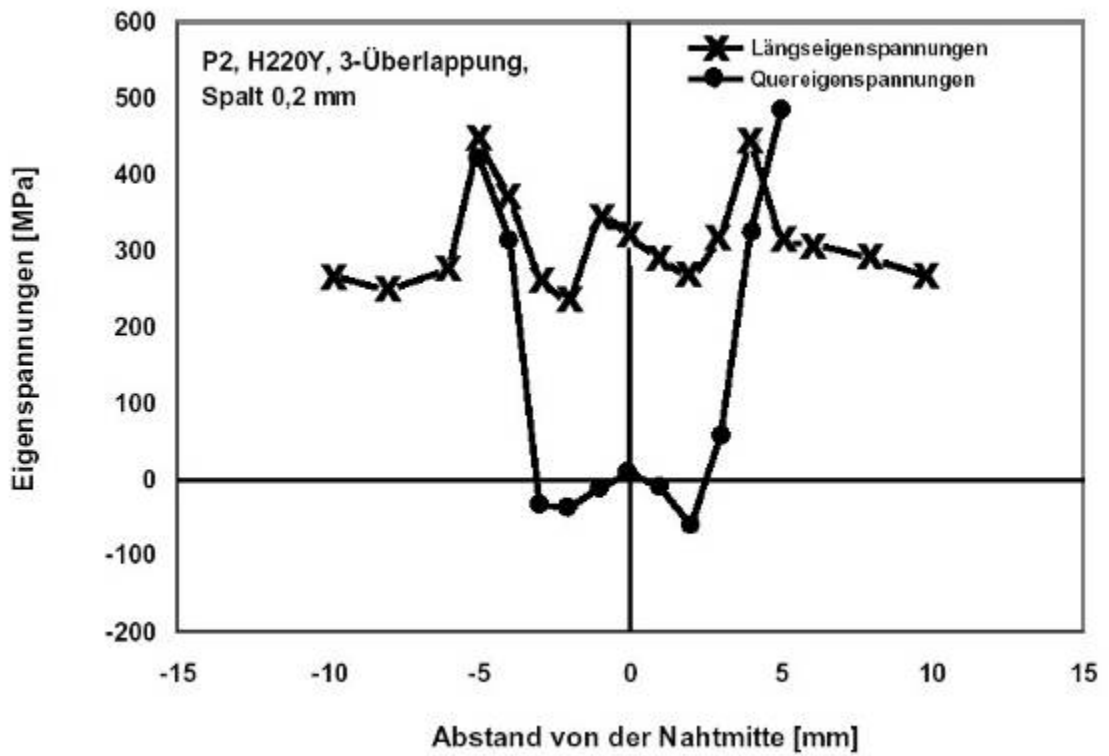


Bild 01-5: Streifenförmige Pertinax-Spannbacken (acht Spannelemente)

**Anhang A2: Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen.  
Vergleichsuntersuchungen an Werkstoffen H220Y und DC06:**

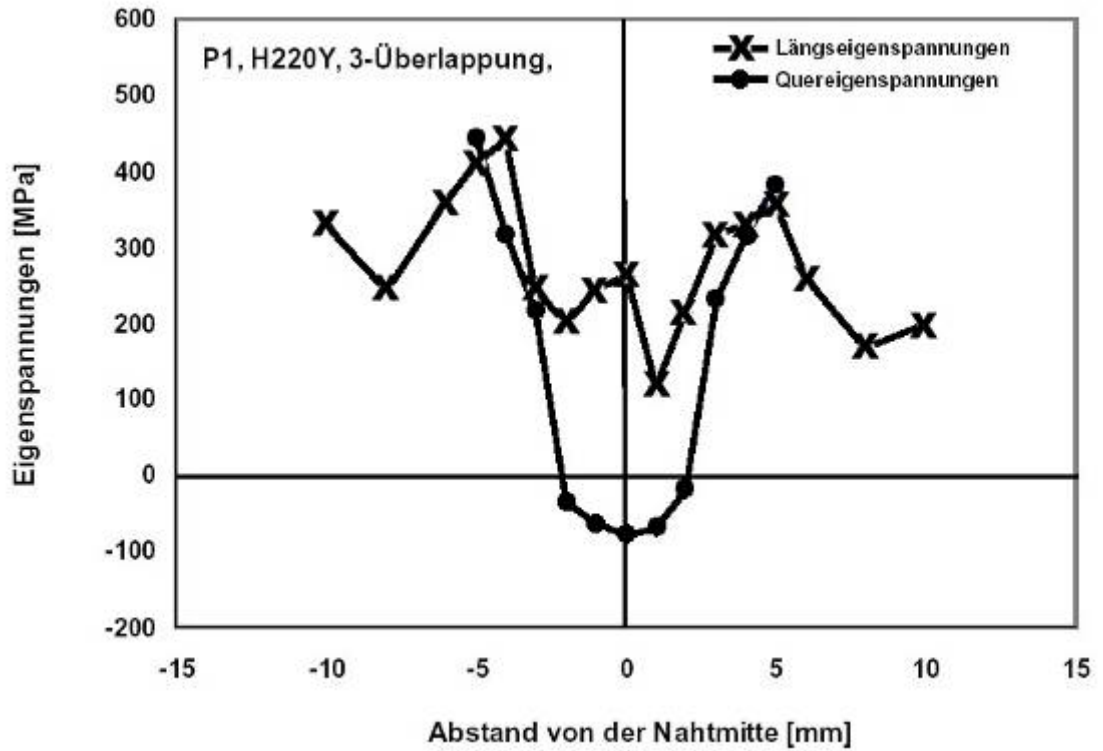


a)

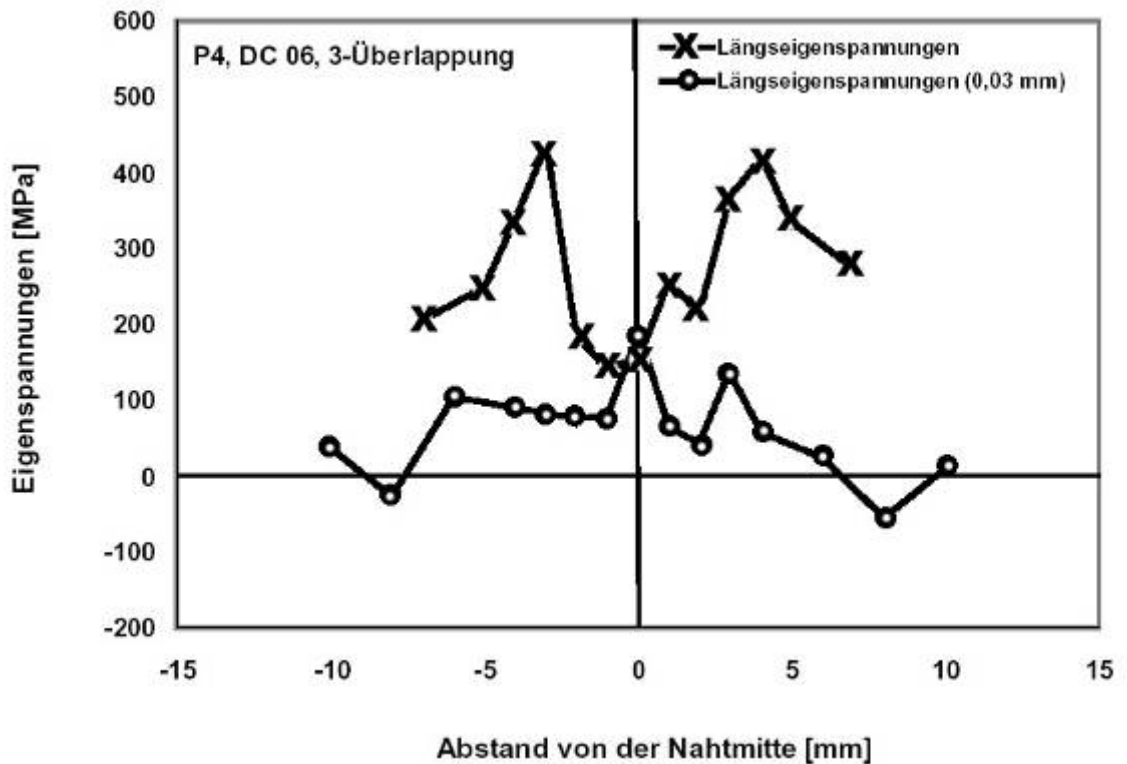


b)

Bild A2-1: Eigenspannungen: a) H220Y 3-fach ohne Spalt; b) H220Y 3-fach mit Spalt 0,2 mm. Messung an der Oberfläche

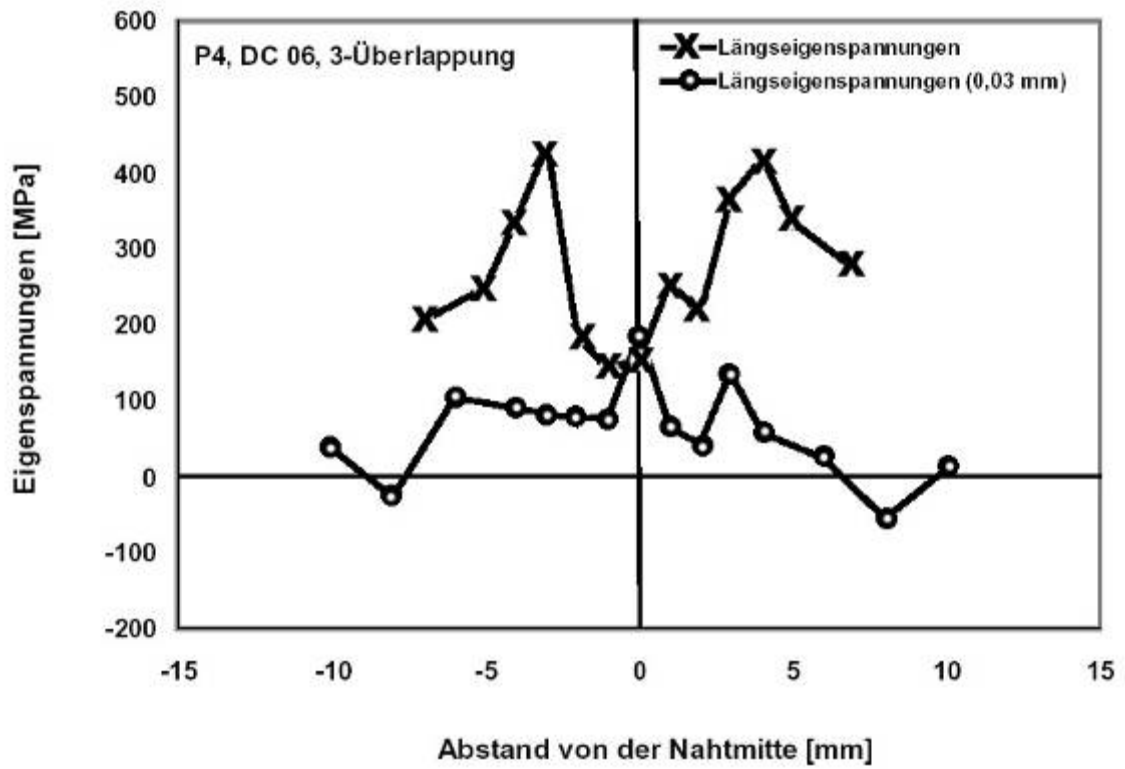


a)

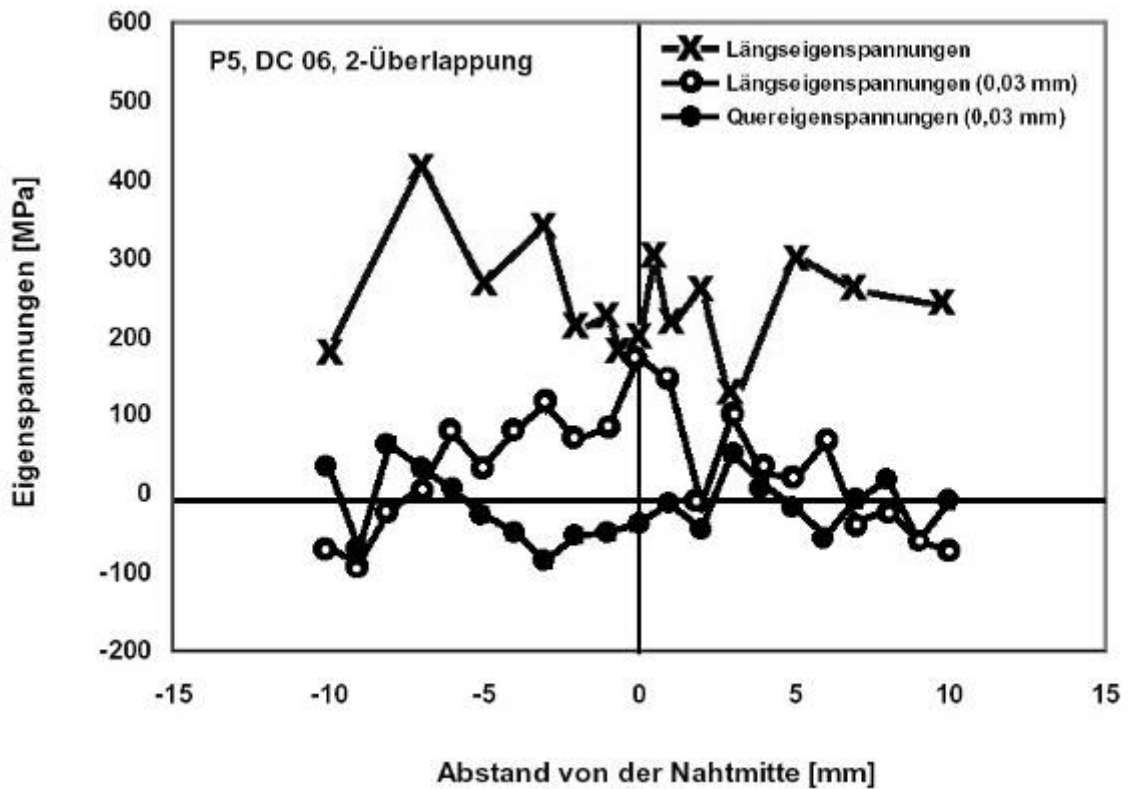


b)

Bild A2-2: Eigenstressungen: a) H220Y 3-fach ohne Spalt; b) H220Y 2-fach ohne Spalt. Vor der Messung fand elektrolytisches Oberflächenschichtabtragen von 0,03 mm statt



a)



b)

Bild A2-3: Eigenspannungen: a) DC06 3-fach ohne Spalt; b) DC06 2-fach ohne Spalt Vor der Messung fand elektrolytisches Oberflächenschichtabtragen von 0,03 mm statt

**Anhang A3: Einfluss der Schutzgase auf die Schweißergebnisse  
beim Festkörperlaserschweißen**

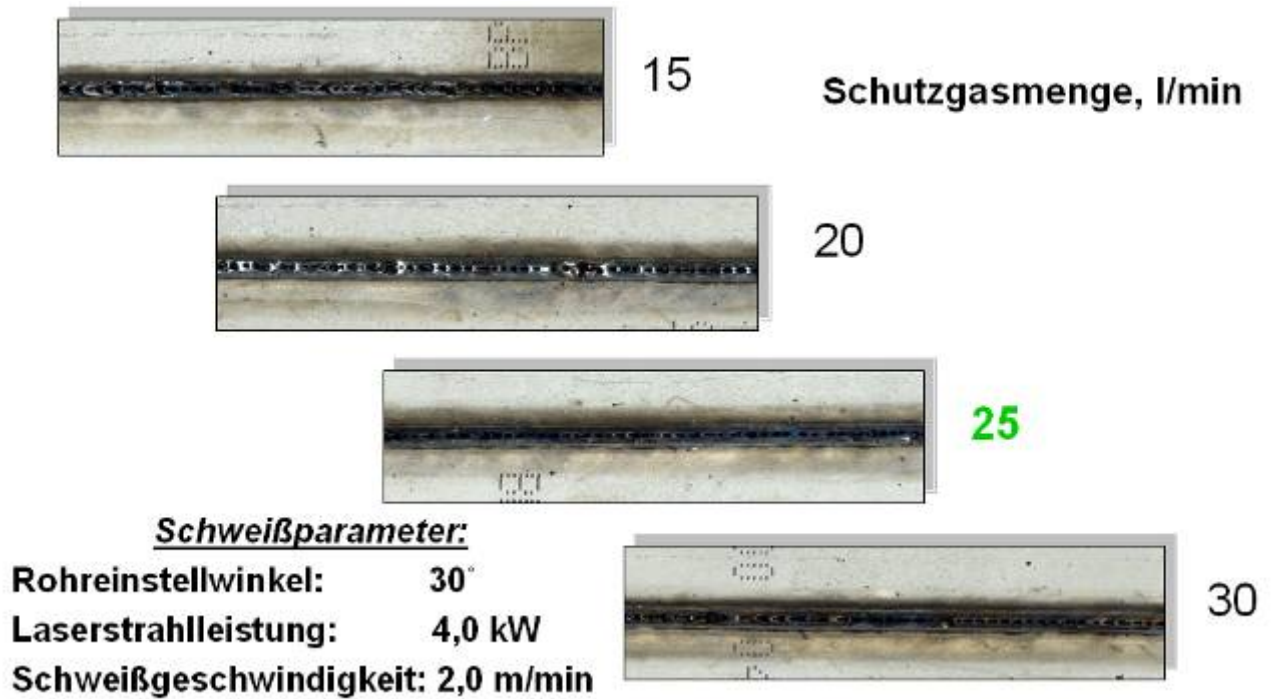


Bild A3-1: Schutzgas Ar

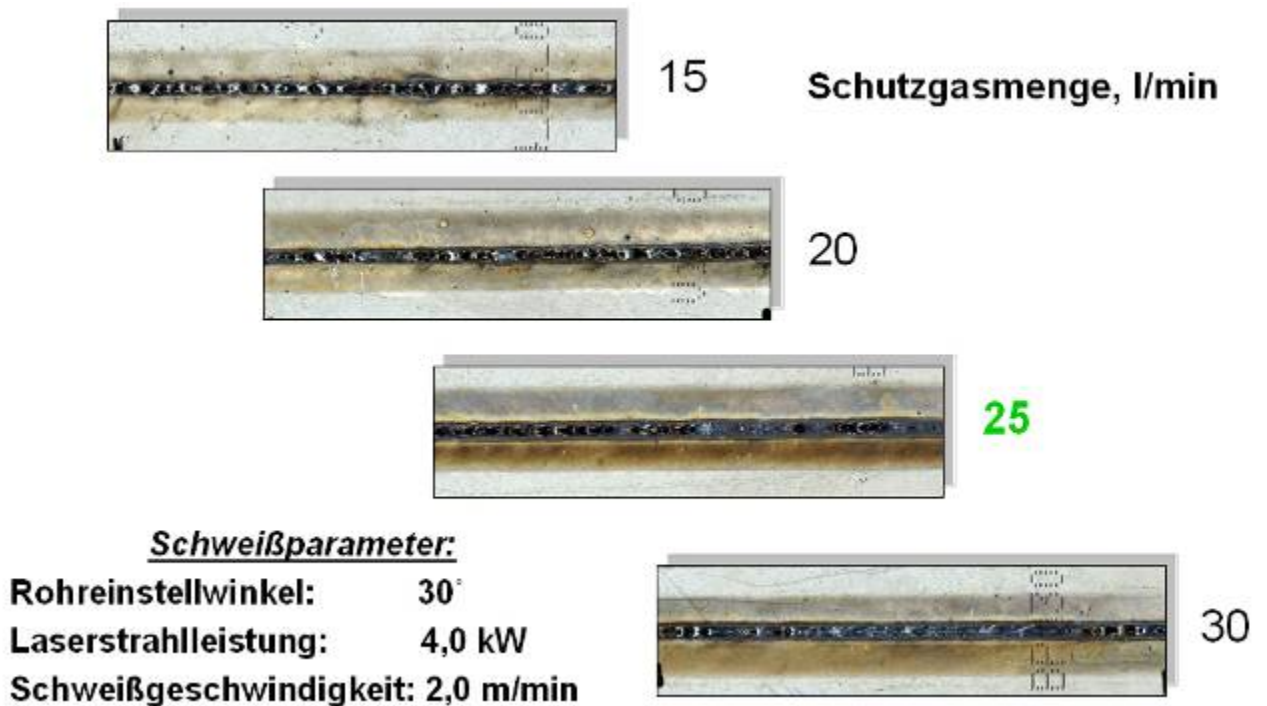


Bild A3-2: Schutzgas He



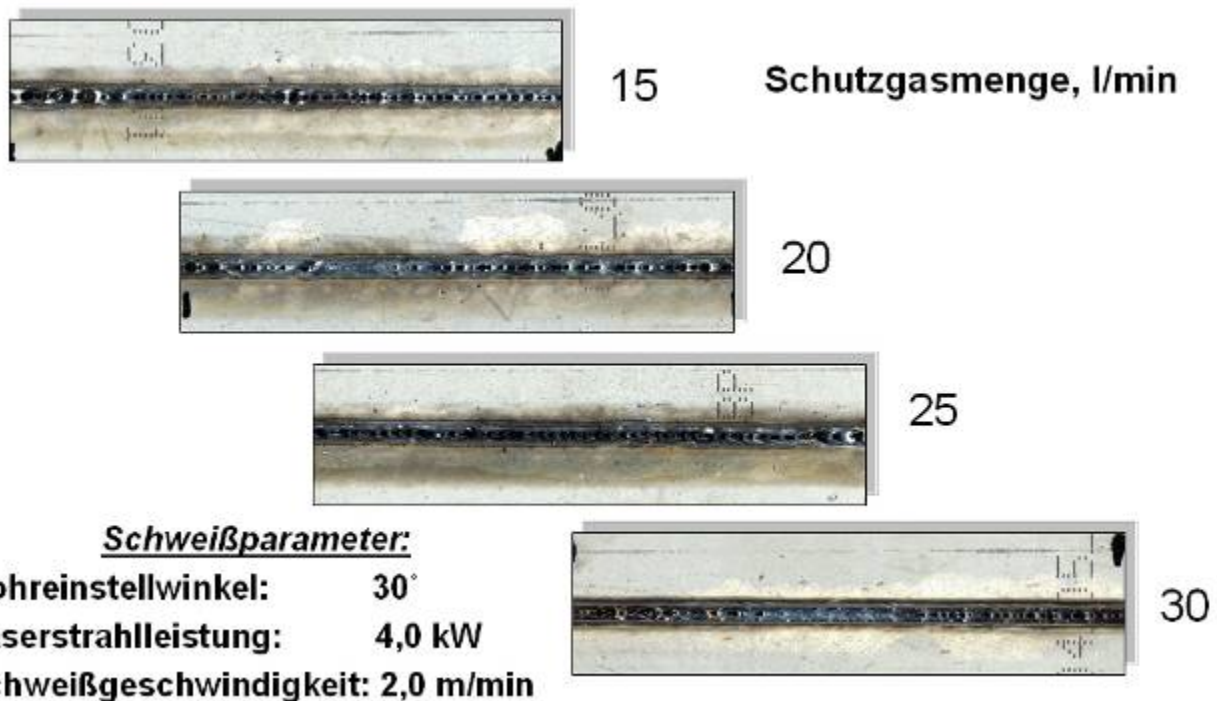


Bild A3-3: Schutzgas N<sub>2</sub>

**Anhang A4: Beeinflussung des Schweißbades über elektromagnetische Kräfte****A4.1: Universität Stuttgart Institut für Strahlwerkzeuge. Herr Dipl.-Ing. Günter Ambrosy**

Versuchsprotokoll „Verzinkte Bleche“. Stand 23.03.2005

Nd: YAG 4 kW; Prozessadapter „Kuschko 150“; Stromquelle: EA/Xantex; Werkstoff H220Y ZE-Mg/ZE 3,5/3,5; Dreifachüberlappstoß; Schutzgas He 15 l/min, stechend für alle Versuche

Probe Nr.	Laser HDL 4006			Zusatzstrom		Magnetfeld		Bemerkung
	Leistung	Fokus	Vorschub	Stärke	Richtung	Stärke	Richtung	
	kW	mm	m/min	A		A		
M-01	4,0	0	2,0	-	-	-	-	Referenz
M-02	4,0	0	2,5	-	-	-	-	Referenz
M-03	4,0	0	3,0	-	-	-	-	Referenz
M-04	4,0	0	3,0	200	+ -	60	+	Abstand Magnet/Blech 3 mm
M-05	4,0	0	3,0	500	+ -	60	+	Abstand Magnet/Blech 3 mm
M-06	4,0	0	3,0	500	+ -	60	.	
M-07	4,0	0	3,0	-	-	-	-	Referenz
M-08	4,0	0	3,0	500	+ -	-	-	nur Strom
M-09	4,0	0	3,0	-	-	60	.	nur Magnetfeld
M-10	4,0	0	3,0	500	+ -	60	.	
M-11	4,0	0	3,0	300	+ -	60	+	
M-12	4,0	0	3,0	-	-	60	+	nur Magnetfeld
M-13	4,0	0	3,0	-	-	60	+	nur Magnetfeld, Stromausfall 600 A
M-14	4,0	0	3,0	500	+ -	60	+	
M-15	4,0	0	3,0	-	-	-	-	Referenz
M-16	4,0	0	4,0	-	-	-	-	Referenz
M-17	4,0	0	3,0	300	+ -		Permanentmagnet	KR nach u
M-18	4,0	0	3,0	500	+ -		Permanentmagnet	
M-19	4,0	0	3,0	600	+ -		Permanentmagnet	
M-20	4,0	0	3,0	300	+ -		Permanentmagnet	KR nach o
M-21	4,0	0	3,0	500	+ -		Permanentmagnet	
M-22	4,0	0	3,0	600	- +			KR nach o
M-23	4,0	0	3,0	300	- +	60		Hufeisenmagnet
M-24	4,0	0	3,0	600	- +	60		Hufeisenmagnet, KR nach u
M-25	4,0	0	3,0	600	+ -	60		Hufeisenmagnet, KR nach o
M-26	4,0	0	3,0	500	+ -	60		Hufeisenmagnet

## A4.2 Makroaufnahme der Nahtoberflächen mit einem Stereomikroskop

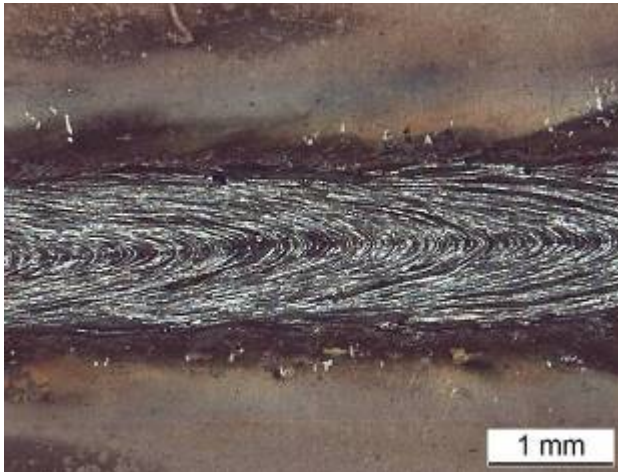


Bild A4-1: Probe M1, ohne Einfluss - Referenz

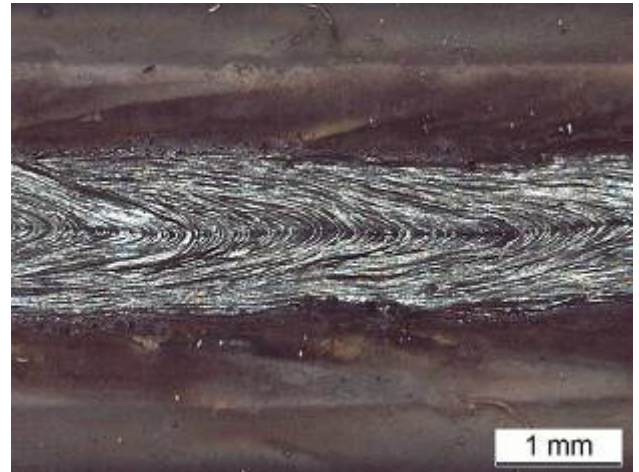


Bild A4-2: Probe M2, ohne Einfluss - Referenz

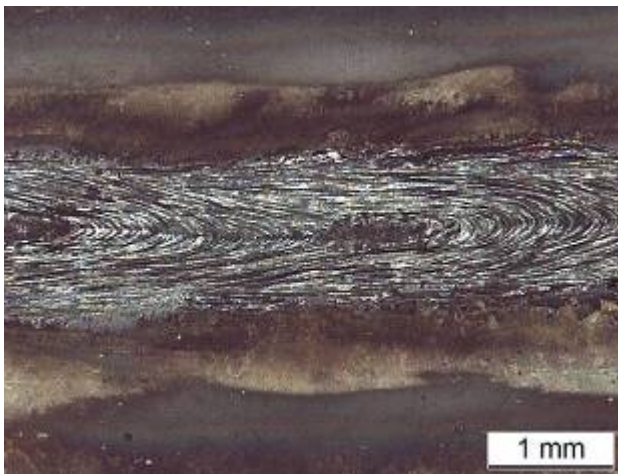


Bild A4-3: Probe M3, ohne Einfluss - Referenz

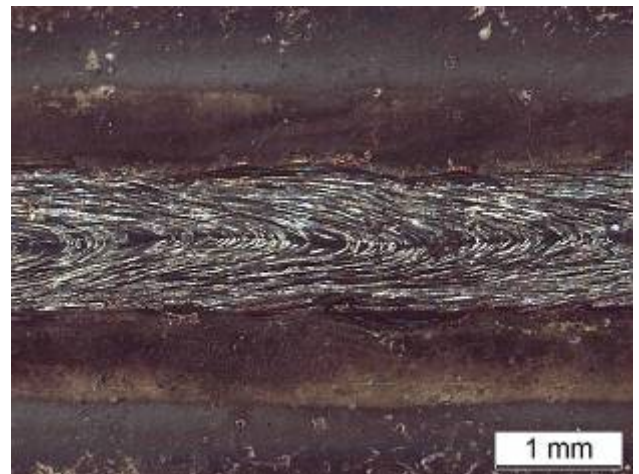


Bild A4-4: Probe M4, Zusatzstrom 200A (+/-),  
Magnetfeld 60A (+)

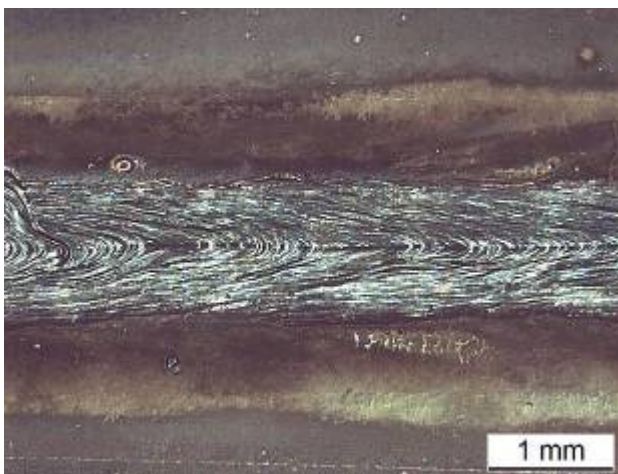


Bild A4-5: Probe M5, Zusatzstrom 500A (+/-),  
Magnetfeld 60A (+)

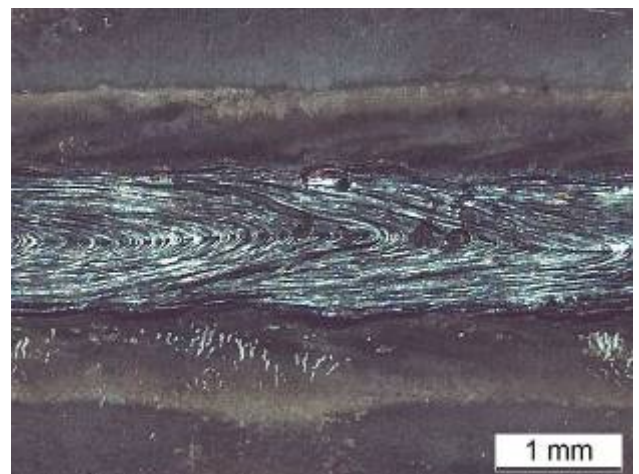


Bild A4-6: Probe M6, Zusatzstrom 500A (+/-),  
Magnetfeld 60A (•)



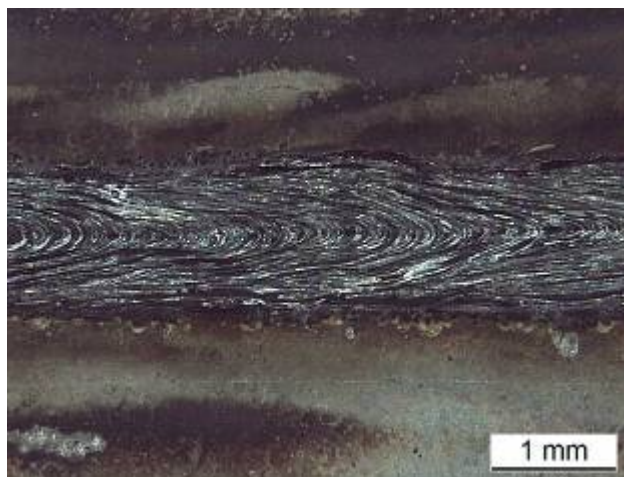


Bild A4-7: Probe M7, ohne, Referenz

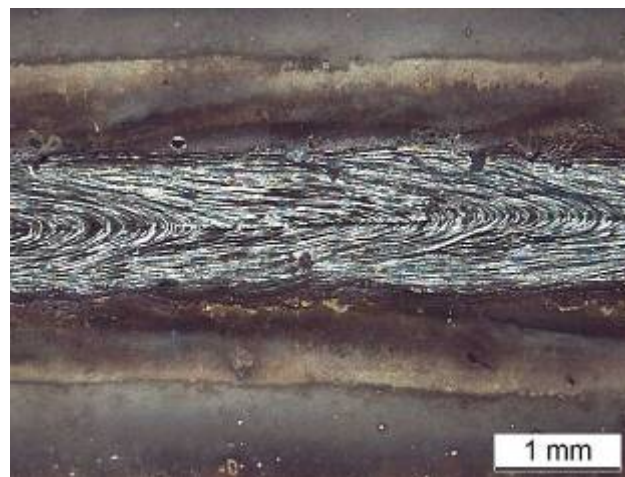


Bild A4-8: Probe M8, nur Zusatzstrom 500A (+/-)

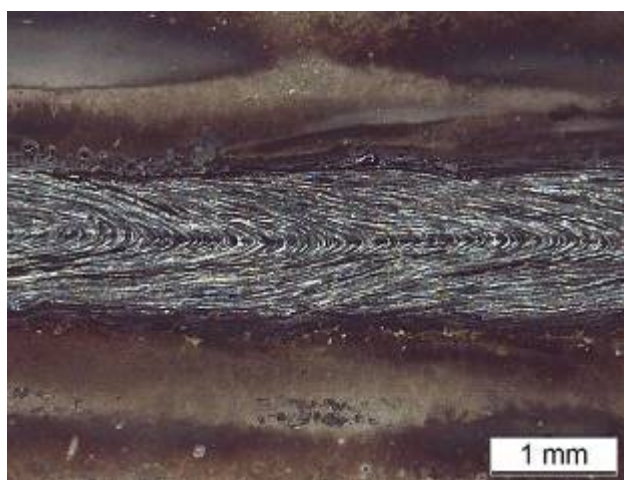


Bild A4-9: Probe M9, nur Magnetfeld 60A (●)

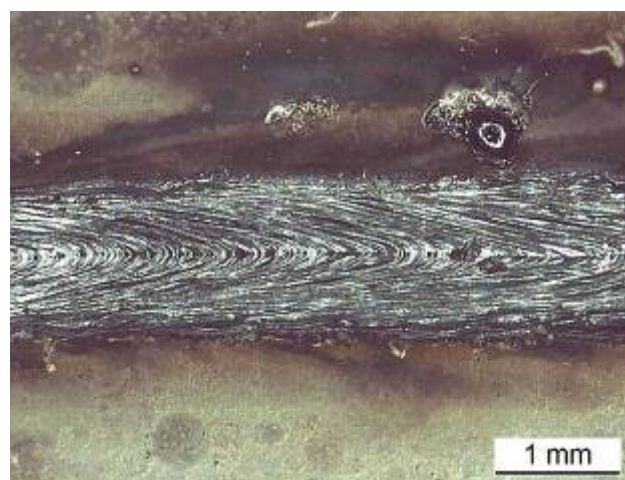


Bild A4-10: Probe M10, Zusatzstrom 300A (+/-), Magnetfeld 60A (●)

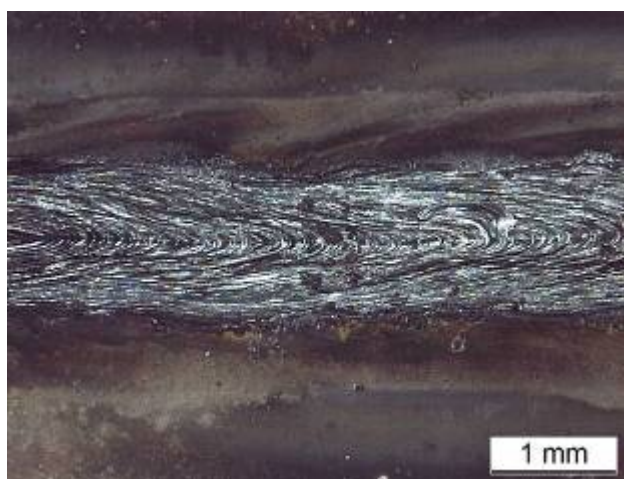


Bild A4-11: Probe M11, Zusatzstrom 300A (+/-), Magnetfeld 60A (+)

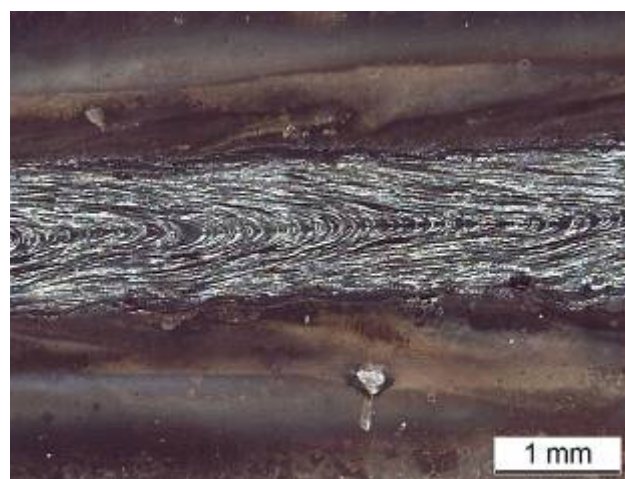


Bild A4-12: Probe M12, nur Magnetfeld (+)



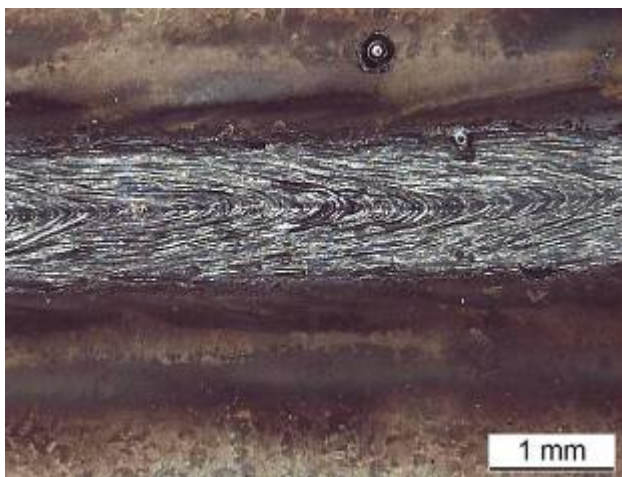


Bild A4-13: Probe M13, nur Magnetfeld (+), Stromausfall 600 A

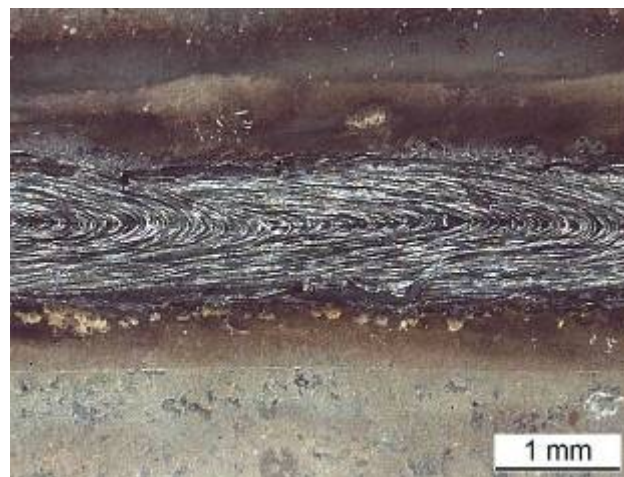


Bild A4-14: Probe M14, Zusatzstrom 500A (+/-), Magnetfeld 60A (+)

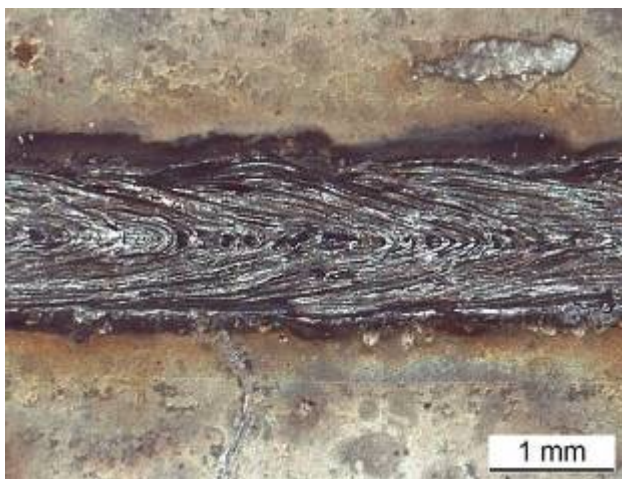


Bild A4-15: Probe M15, ohne, Referenz

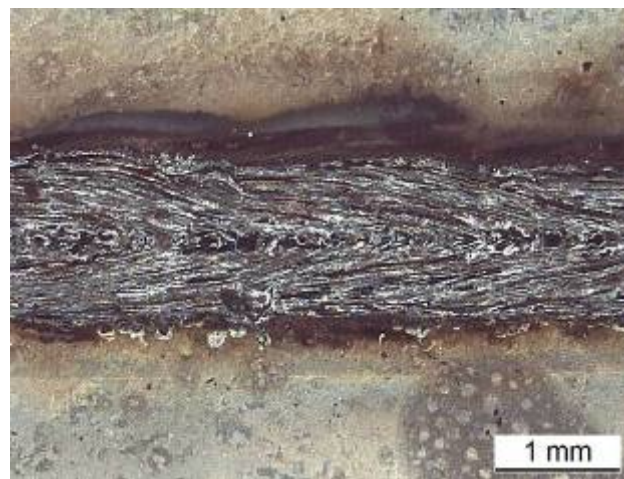


Bild A4-16: Probe M16, ohne, Referenz



**Unbeeinflusste Zone**

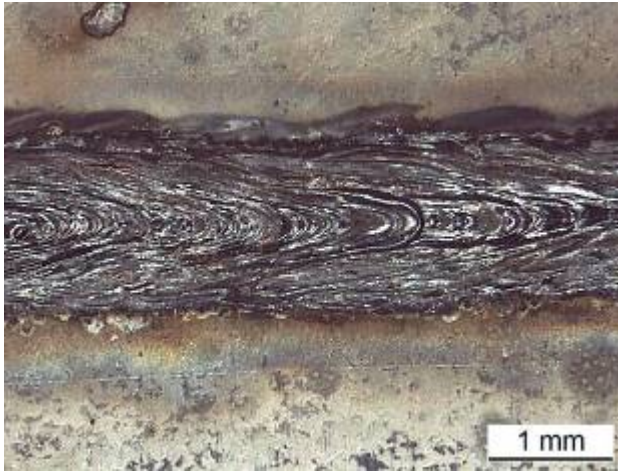


Bild A4-17: Probe M17, ohne

**Beeinflusste Zone**



Bild A4-18: Probe M17, Zusatzstrom 300A (+/-), Perm. Magnet KR nach u

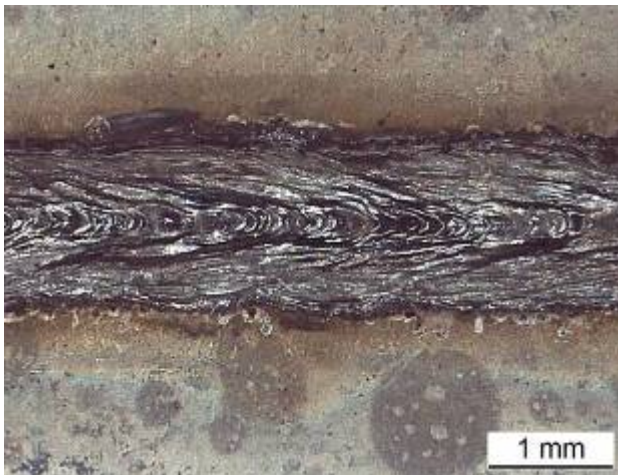


Bild A4-19: Probe M18, ohne



Bild A4-20: Probe M18, Zusatzstrom 500A (+/-), Perm. Magnet KR nach u

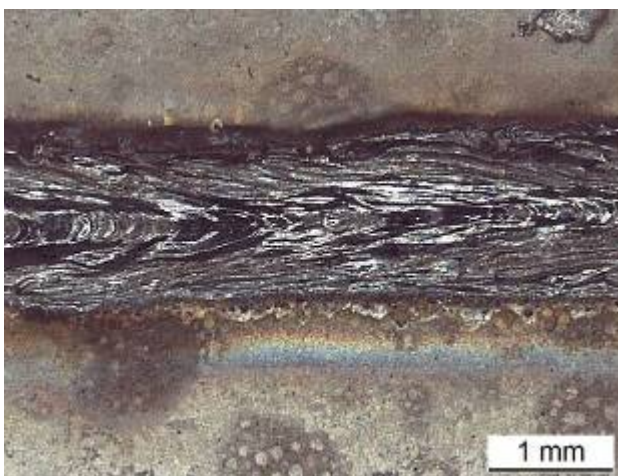


Bild A4-21: Probe M19, ohne

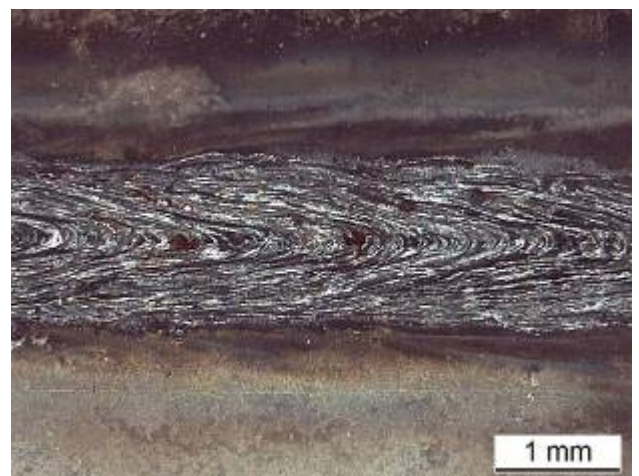


Bild A4-22: Probe M19, Zusatzstrom 600A (+/-), Perm. Magnet KR nach u



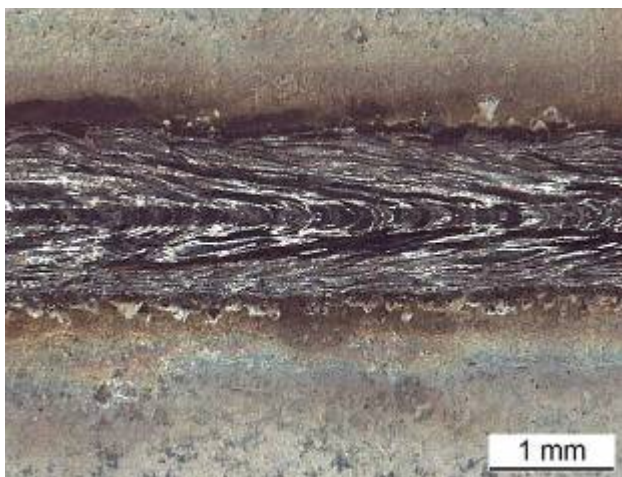


Bild A4-23: Probe M20, ohne

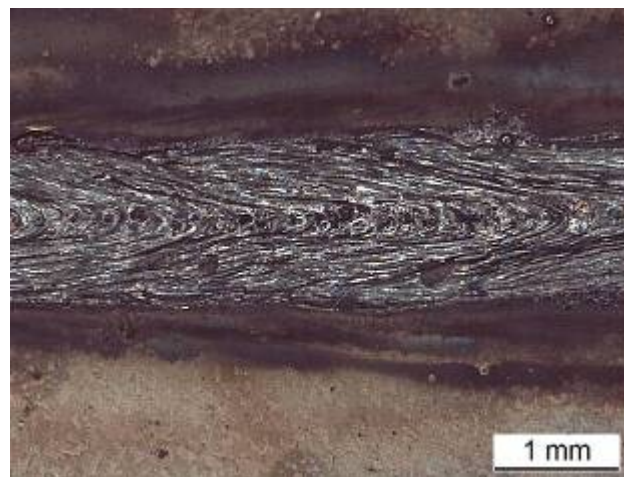


Bild A4-24: Probe M20, Zusatzstrom 300A (+/-),  
Perm. Magnet KR nach o

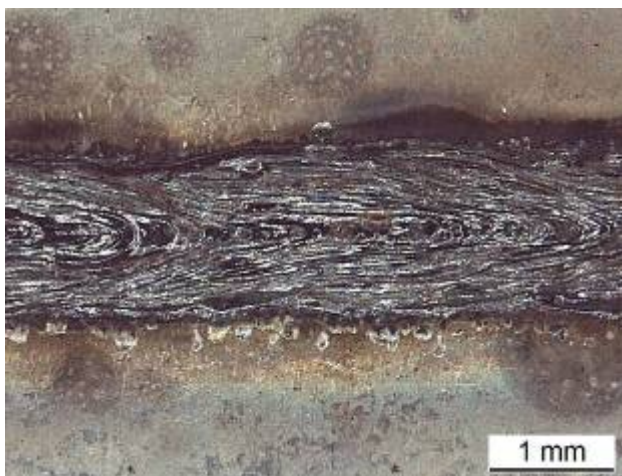


Bild A4-25: Probe M21, ohne

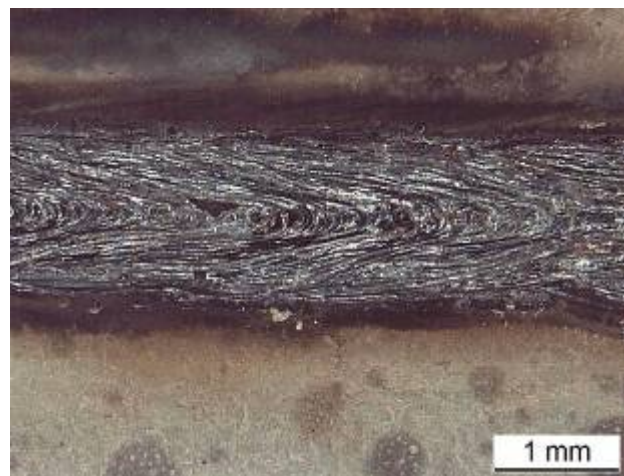


Bild A4-26: Probe M21, Zusatzstrom 500A (+/-),  
Perm. Magnet KR nach o



Bild A4-27: Probe M22, ohne

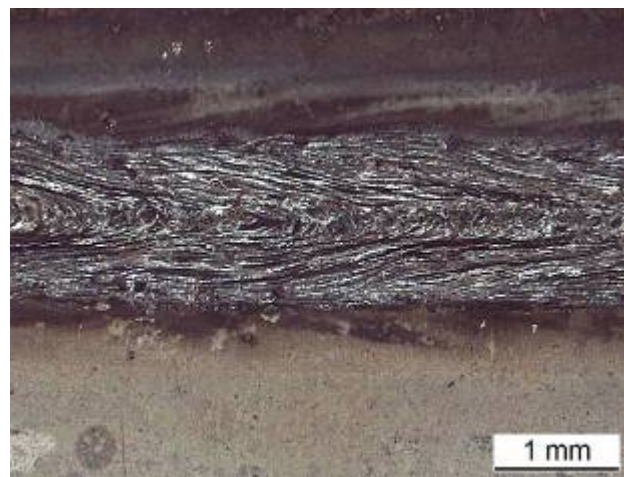


Bild A4-28: Probe M22, Zusatzstrom 600A (-/+),  
Perm. Magnet KR nach o



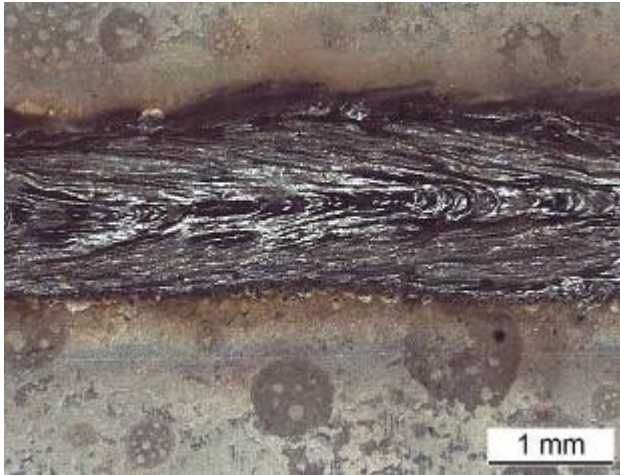


Bild A4-29: Probe M23, ohne



Bild A4-30: Probe M23, Zusatzstrom 300A (-/+),  
Hufeisenmagnet

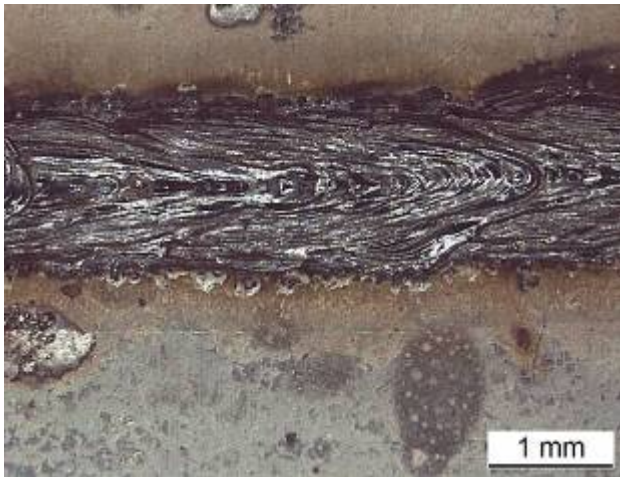


Bild A4-31: Probe M24, ohne

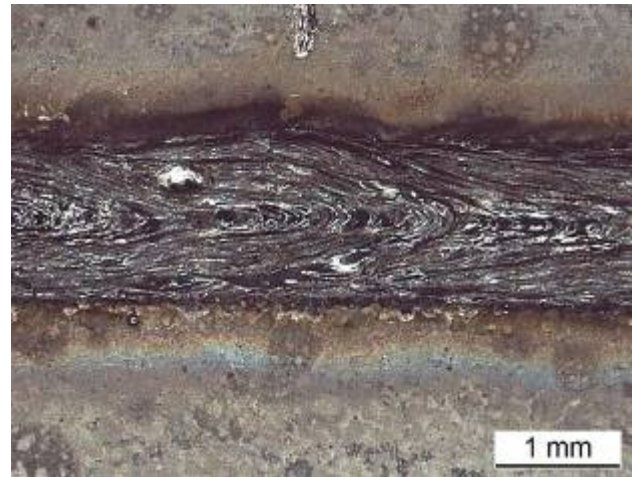


Bild A4-32: Probe M24, Zusatzstrom 600A (-/+),  
Hufeisenmagnet KR nach u

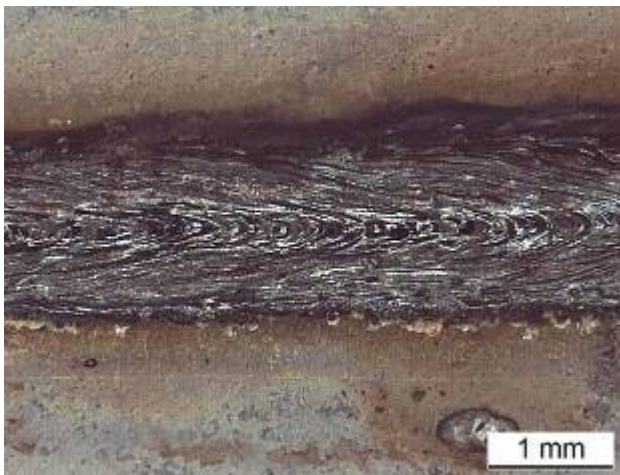


Bild A4-33: Probe M25, ohne

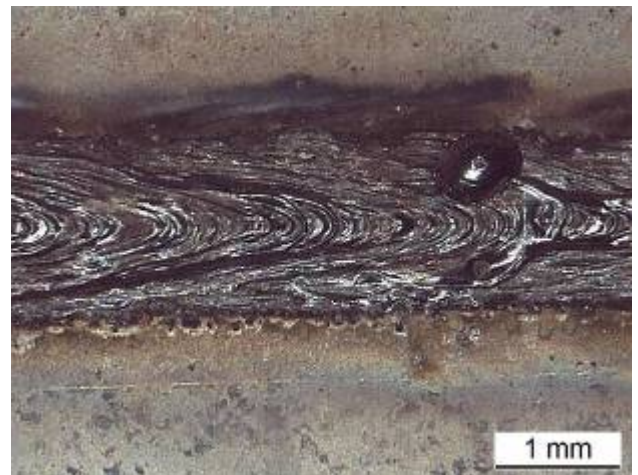


Bild A4-34: Probe M25, Zusatzstrom 300A (+/-),  
Hufeisenmagnet KR nach o

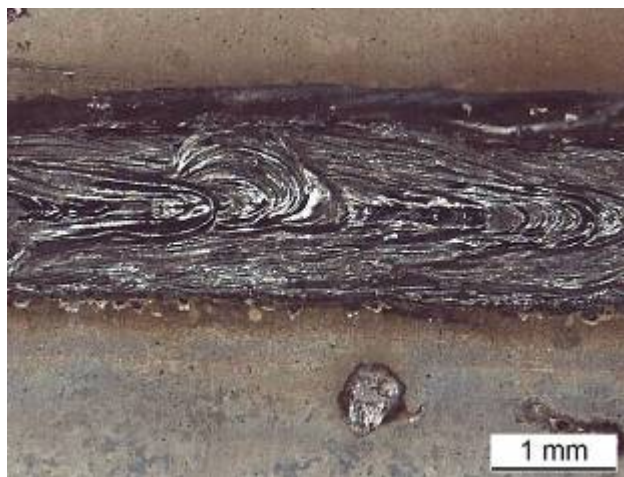


Bild A4-35: Probe M26, ohne

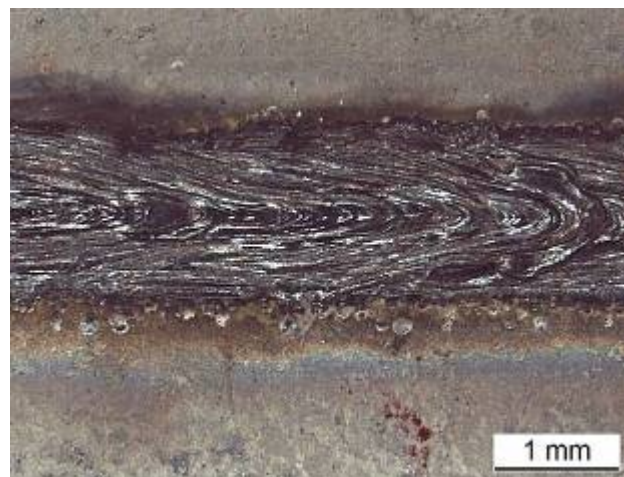


Bild A4-36: Probe M26 Zusatzstrom 500 A (+/-),  
Hufeisenmagnet o

### A4.3: Durchstrahlprüfung, Proben M17-M26

#### **Unbeeinflusste Zone**

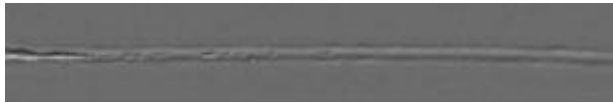


Bild A4-37: Probe M17, ohne



Bild A4-39: Probe M18, ohne



Bild A4-41: Probe M19, ohne

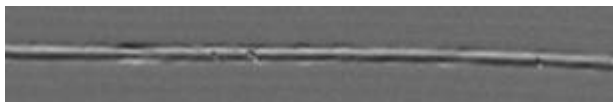


Bild A4-43: Probe M20, ohne

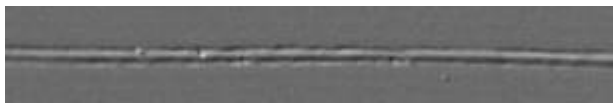


Bild A4-45: Probe M21, ohne



Bild A4-47: Probe M22, ohne

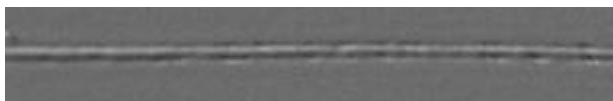


Bild A4-49: Probe M23, ohne

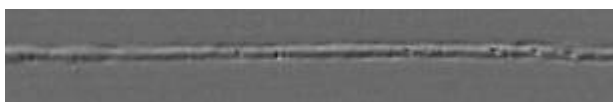


Bild A4-51: Probe M24, ohne



Bild A4-53: Probe M25, ohne

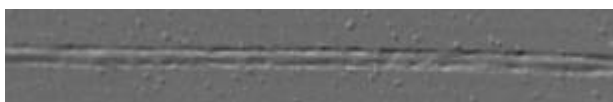


Bild A4-55: Probe M26, ohne

#### **Beeinflusste Zone**



Bild A4-38: Probe M17, Zusatzstrom 300A (+/-), Perm. Magnet KR nach u

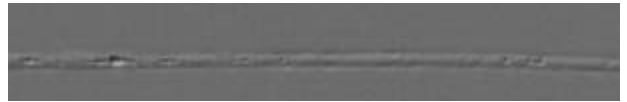


Bild A4-40: Probe M18, Zusatzstrom 500A (+/-), Perm. Magnet KR nach u



Bild A4-42: Probe M19, Zusatzstrom 600A (+/-), Perm. Magnet KR nach u



Bild A4-44: Probe M20, Zusatzstrom 300A (+/-), Perm. Magnet KR nach o



Bild A4-46: Probe M21, Zusatzstrom 500A (+/-), Perm. Magnet KR nach o



Bild A4-48: Probe M22, Zusatzstrom 600A (-/+), Perm. Magnet KR nach o



Bild A4-50: Probe M23, Zusatzstrom 300A (-/+), Hufeisenmagnet



Bild A4-52: Probe M24, Zusatzstrom 600A (-/+), Hufeisenmagnet KR nach u



Bild A4-54: Probe M25, Zusatzstrom 300A (+/-), Hufeisenmagnet KR nach o

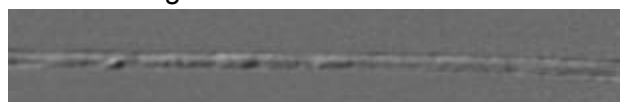


Bild A4-56: Probe M26, Zusatzstrom 500A (+/-), Hufeisenmagnet



#### A4.4: Makroaufnahme der Querschliffe

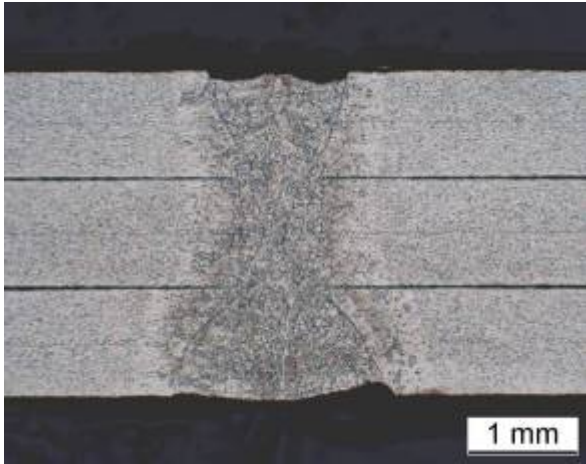


Bild A4-57: Probe M1, ohne Einfluss- Referenz

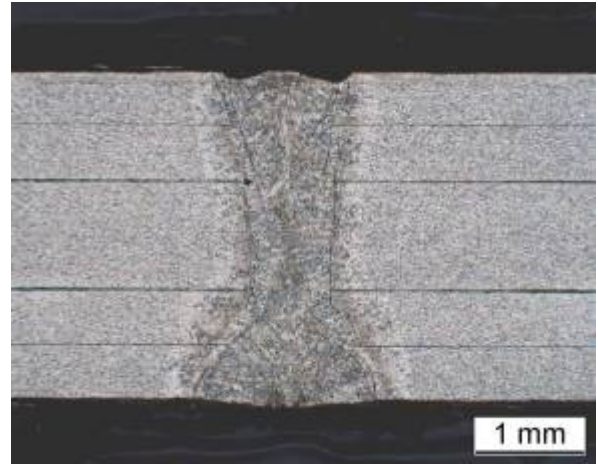


Bild A4-58: Probe M2, ohne Einfluss- Referenz

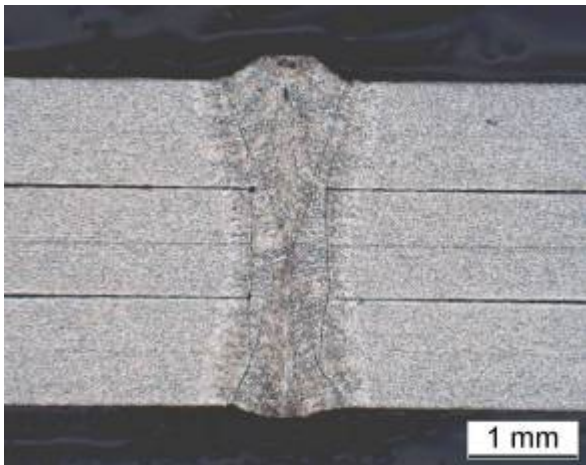


Bild A4-59: Probe M3, ohne Einfluss- Referenz

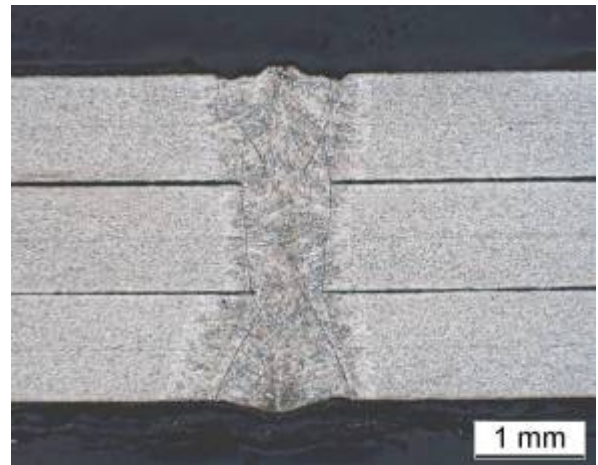


Bild A4-60: Probe M4, Zusatzstrom 200A (+/-),  
Magnetfeld 60A (+)

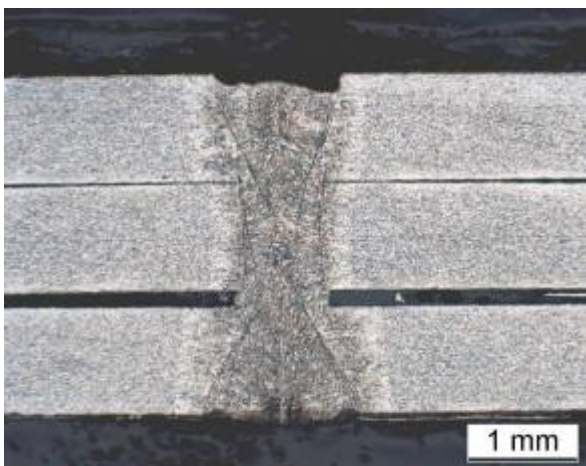


Bild A4-61: Probe M5, Zusatzstrom 500A (+/-),  
Magnetfeld 60A (+)

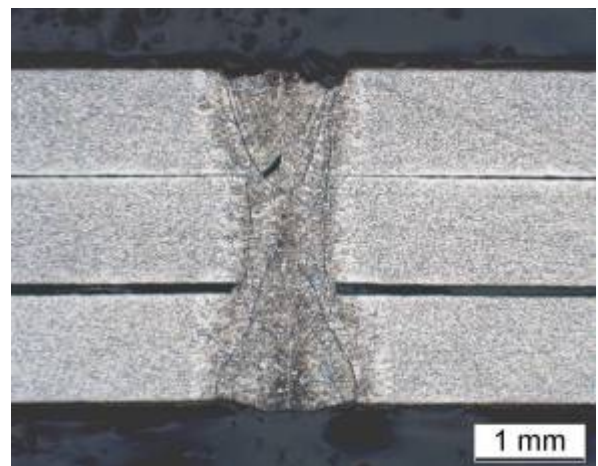


Bild A4-62: Probe M6, Zusatzstrom 500A (+/-),  
Magnetfeld 60A (•)

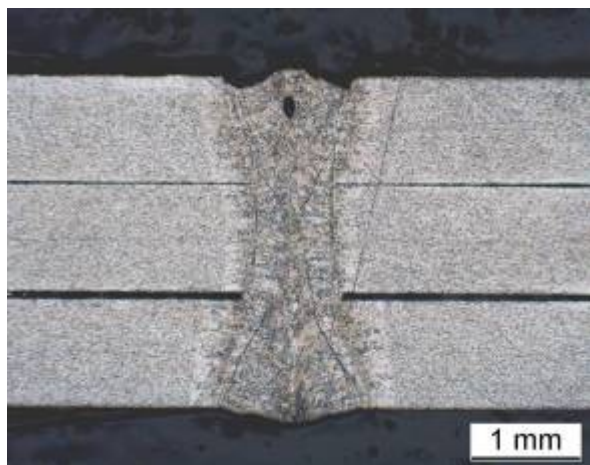


Bild A4-63: Probe M7, ohne, Referenz

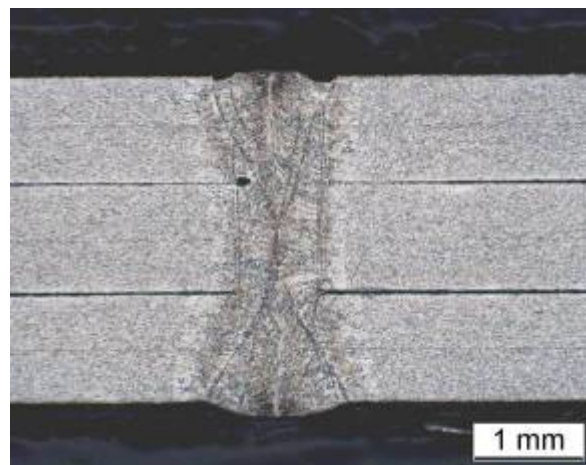


Bild A4-64: Probe M8, nur Zusatzstrom 500A (+/-)

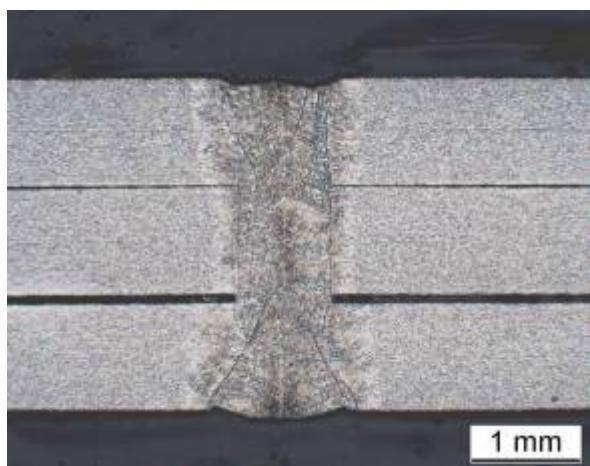


Bild A4-65: Probe M9, nur Magnetfeld 60A (●)

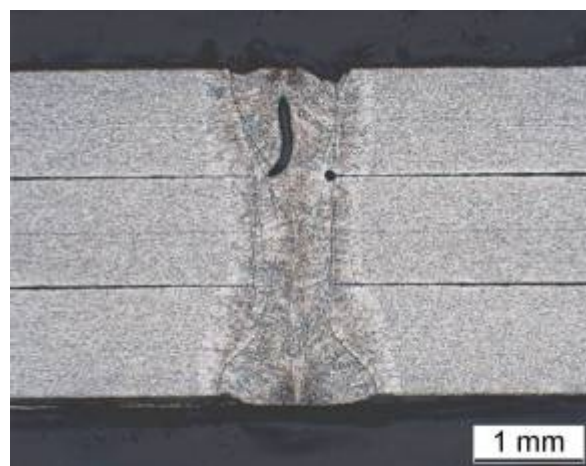


Bild A4-66: Probe M10, Zusatzstrom 300A (+/-), Magnetfeld 60A (●)

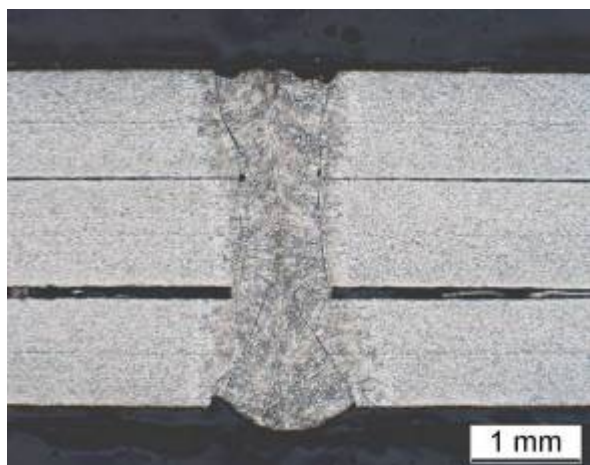


Bild A4-65: Probe M11, Zusatzstrom 300A (+/-), Magnetfeld 60A (+)

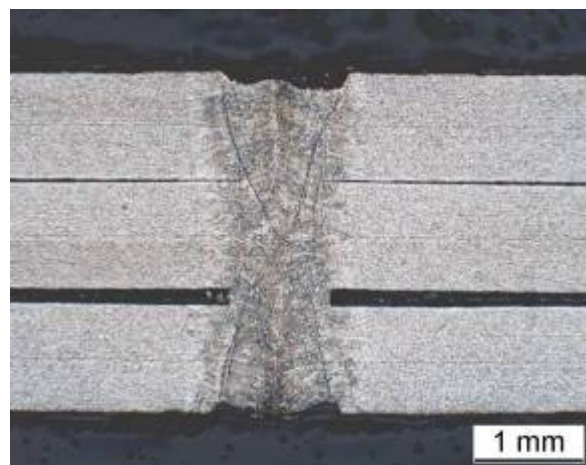


Bild A4-66: Probe M12, nur Magnetfeld (+)



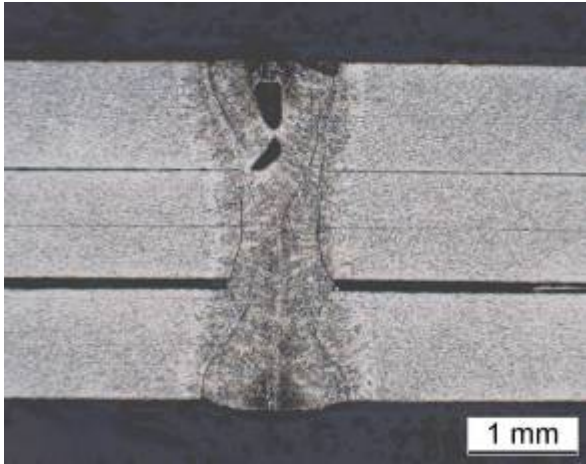


Bild A4-67: Probe M13, nur Magnetfeld (+), Stromausfall 600 A

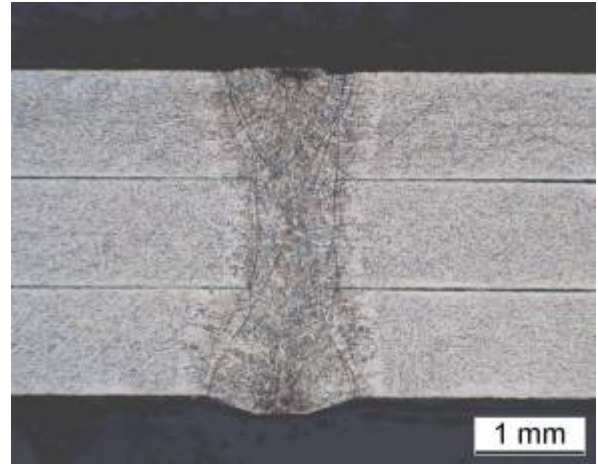


Bild A4-68: Probe M14, Zusatzstrom 500A (+/-), Magnetfeld 60A (+)

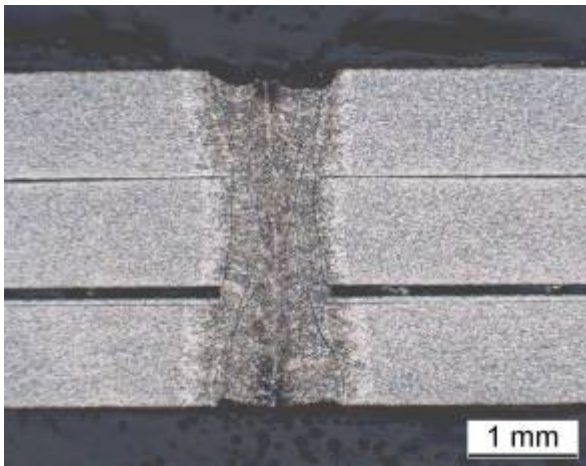


Bild A4-69: Probe M15, ohne, Referenz

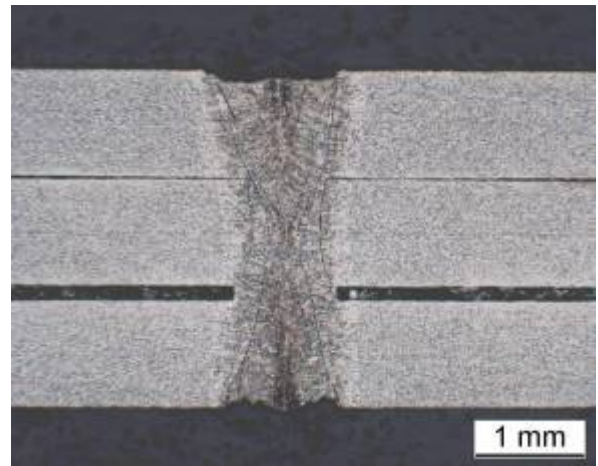


Bild A4-70: Probe M16, ohne, Referenz

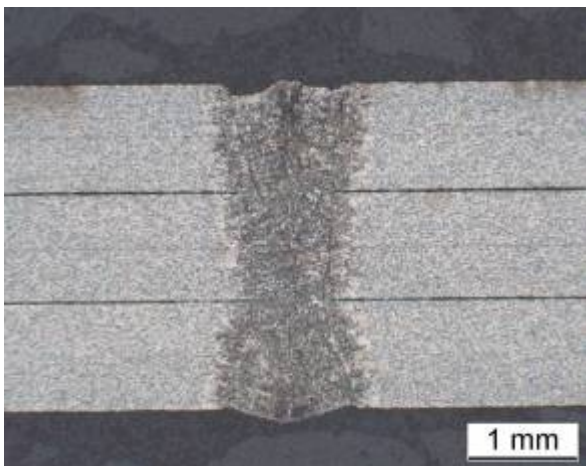


Bild A4-71: Probe M17, ohne

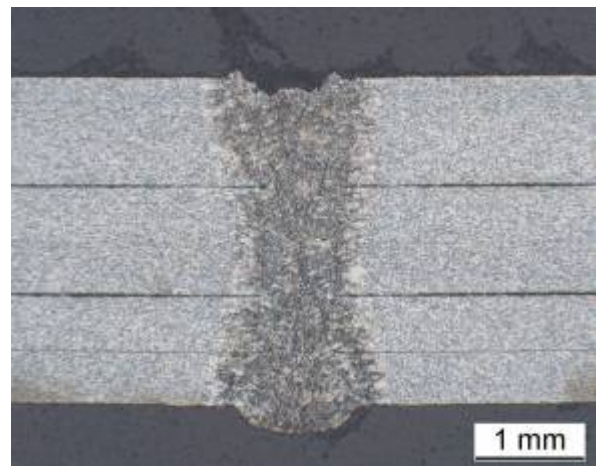


Bild A4-72: Probe M17, Zusatzstrom 300A (+/-), Perm. Magnet KR nach u

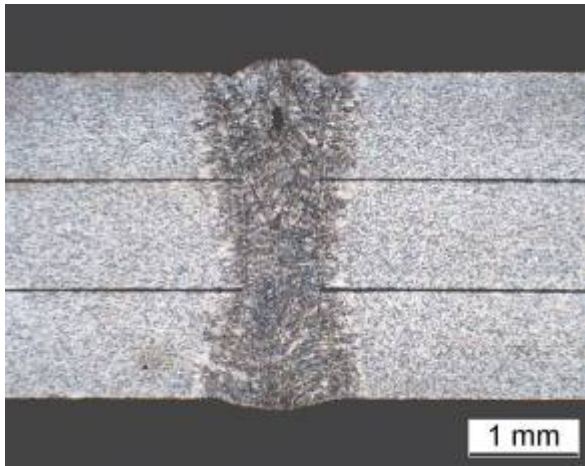


Bild A4-73: Probe M18, ohne

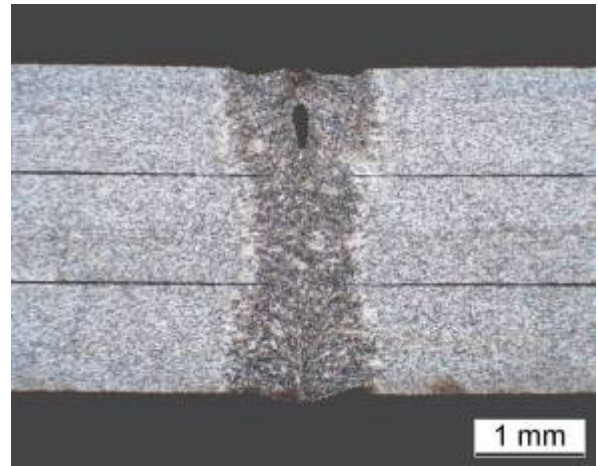


Bild A4-74: Probe M18, Zusatzstrom 500A (+/-),  
Perm. Magnet KR nach u

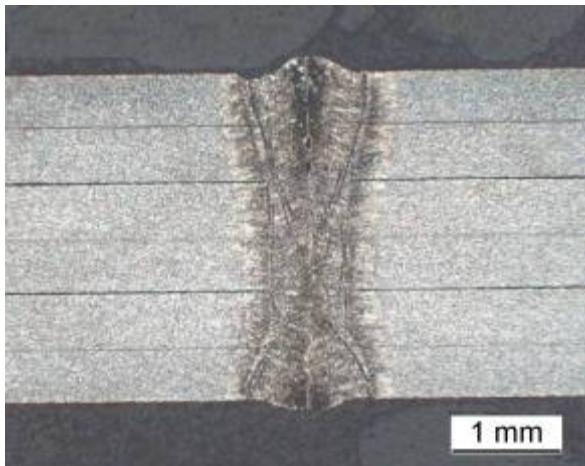


Bild A4-75: Probe M19, ohne

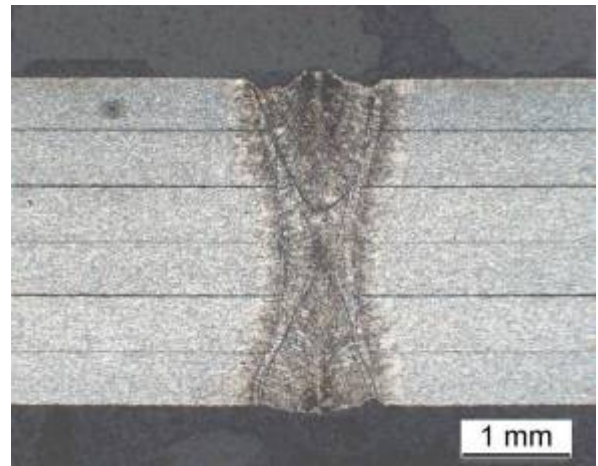


Bild A4-76: Probe M19, Zusatzstrom 600A (+/-),  
Perm. Magnet KR nach u

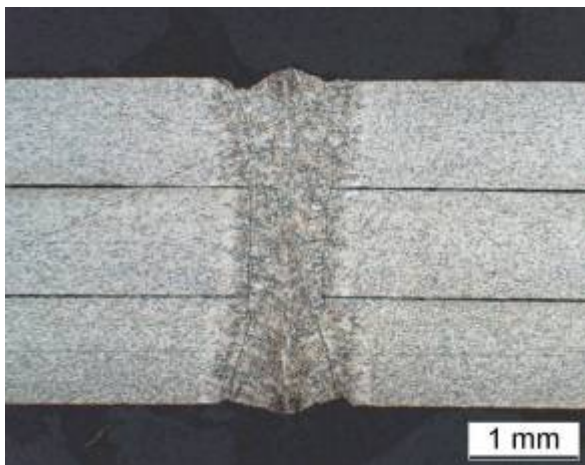


Bild A4-77: Probe M20, ohne

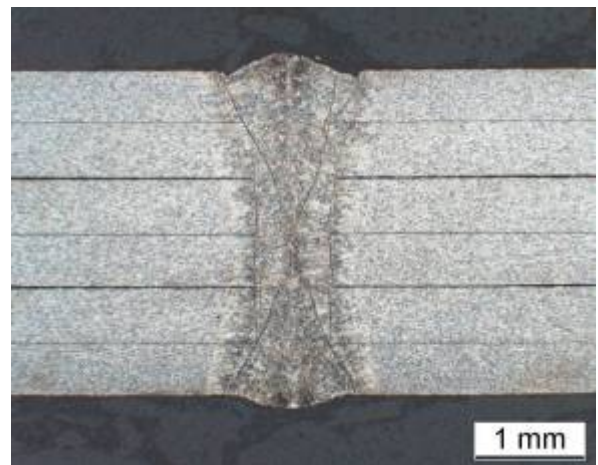


Bild A4-78: Probe M20, Zusatzstrom 300A (+/-),  
Perm. Magnet KR nach o



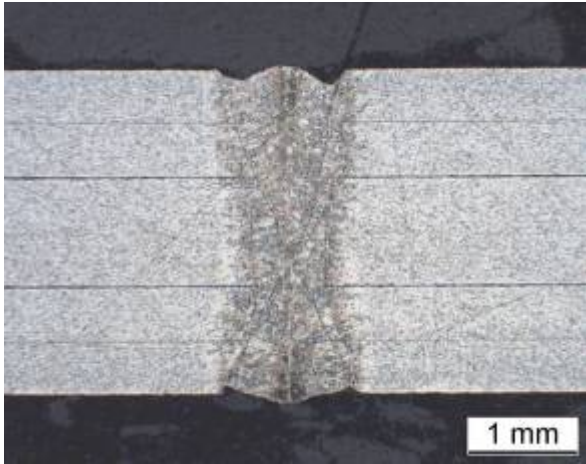


Bild A4-79: Probe M21, ohne

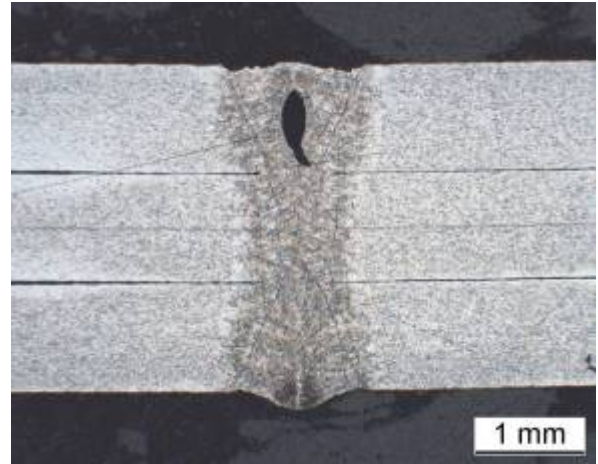


Bild A4-80: Probe M21, Zusatzstrom 500A (+/-),  
Perm. Magnet KR nach o

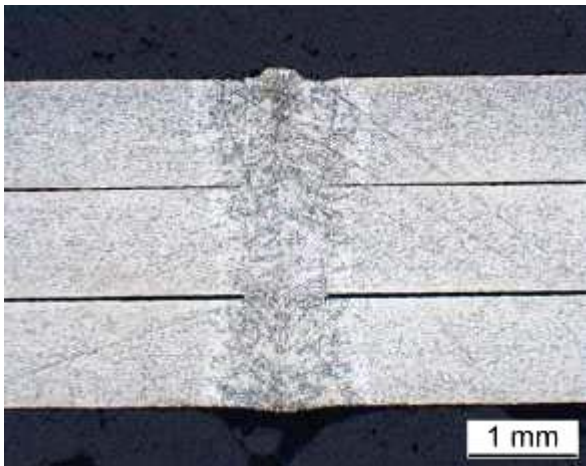


Bild A4-81: Probe M22, ohne

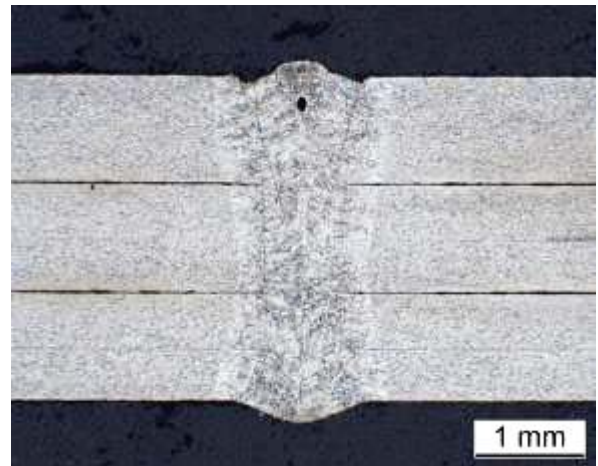


Bild A4-82: Probe M22, Zusatzstrom 600A (-/+),  
Perm. Magnet KR nach o

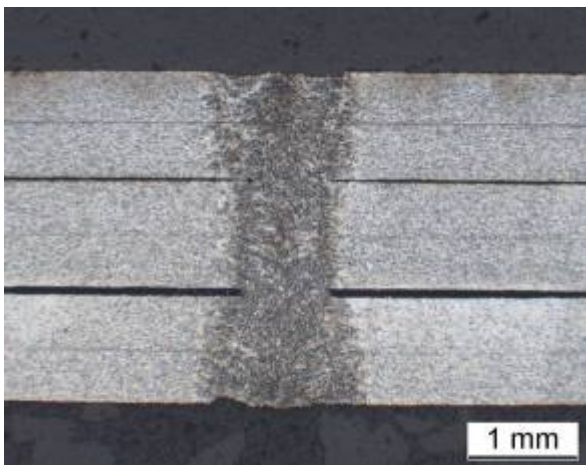


Bild A4-83: Probe M23, ohne

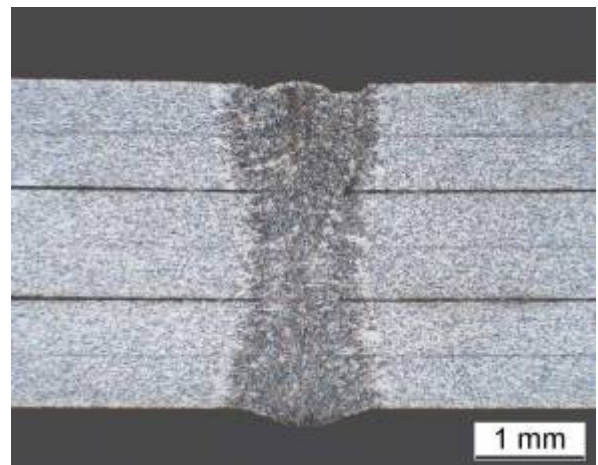


Bild A4-84: Probe M23, Zusatzstrom 300A (-/+),  
Hufeisenmagnet

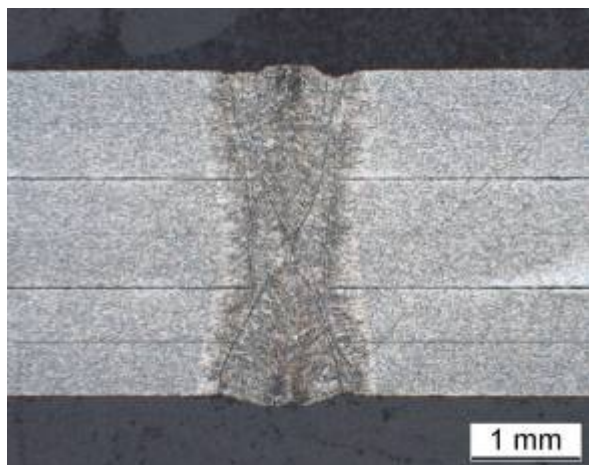


Bild A4-85: Probe M24, ohne

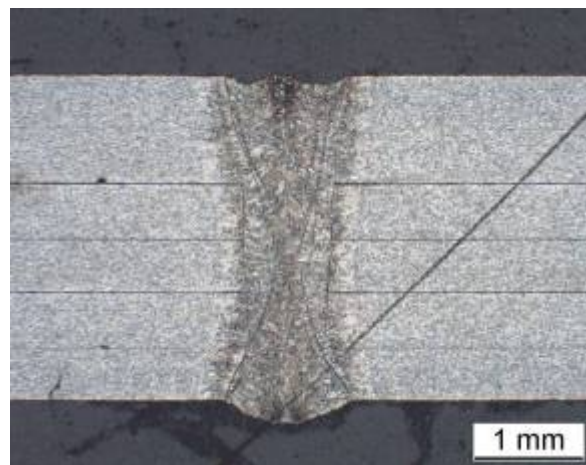


Bild A4-86: Probe M24, Zusatzstrom 600A (-/+),  
Hufeisenmagnet KR nach u

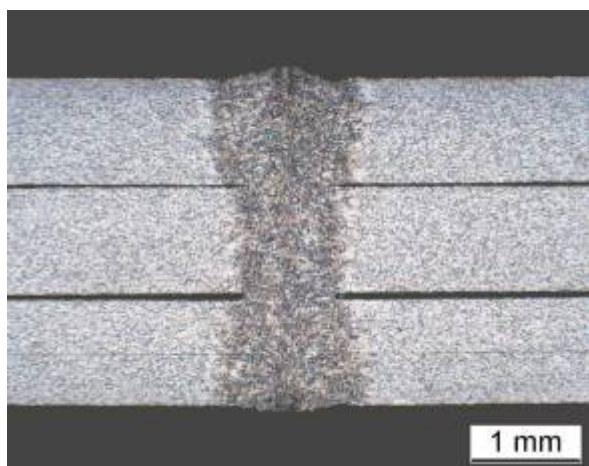


Bild A4-87: Probe M25, ohne

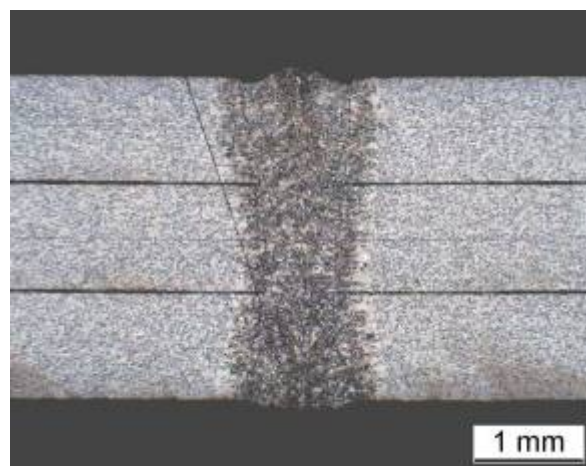


Bild A4-88: Probe M25, Zusatzstrom 300A (+/-),  
Hufeisenmagnet KR nach o

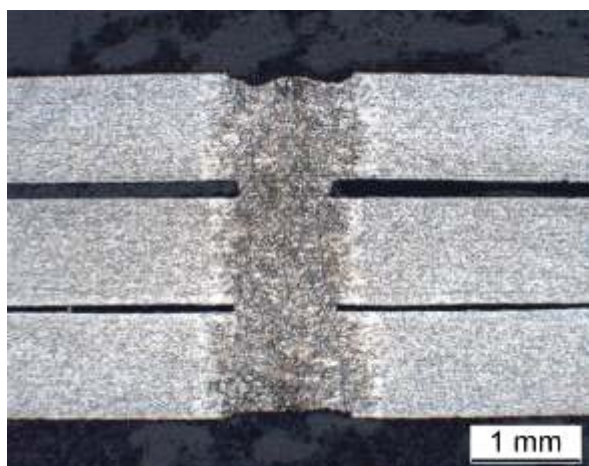


Bild A4-89: Probe M26, ohne

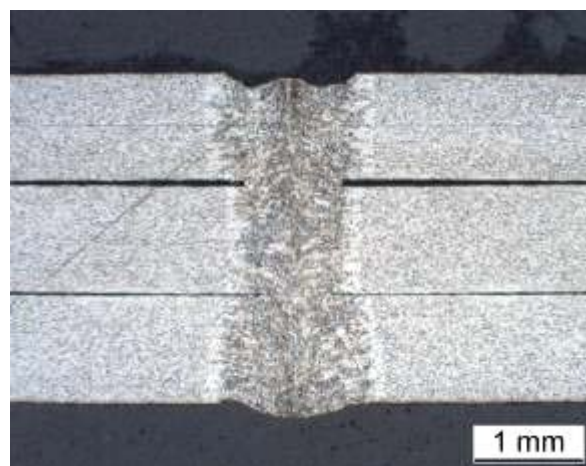


Bild A4-90: Probe M26, Zusatzstrom 500A (+/-),  
Hufeisenmagnet



**Anhang A5: Doppelfokustechnik unter Einsatz eines CO<sub>2</sub>-Lasers.  
Werkstoff DC04+ZE. Parameterstudie**

**Oberfläche**



Bild A5-1:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 1,5$  m/min;  $F=+1,0$ mm



Bild A5-2:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 1,5$  m/min;  $F=+1,0$ mm



Bild A5-3:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 1,5$  m/min;  $F=0,0$ mm



Bild A5-4:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 1,5$  m/min;  $F=-1,0$ mm



Bild A5-5:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 1,5$  m/min;  $F=-2,0$ mm



Bild A5-6:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 2,0$  m/min;  $F=+2,0$ mm



Bild A5-7:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 2,0$  m/min;  $F=+1,0$ mm



Bild A5-8:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 2,0$  m/min;  $F=0,0$ mm



Bild A5-9:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 2,0$  m/min;  $F=-1,0$ mm



Bild A5-10:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 2,0$  m/min;  $F=-2,0$ mm



Bild A5-11:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 2,5$  m/min;  $F=+2,0$ mm



Bild A5-12:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 2,5$  m/min;  $F=+1,0$ mm

**Wurzelseite**



Keine sichere Durchschweißung





Bild A5-13:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 2,5$  m/min;  $F=0,0$ mm



Bild A5-14:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 2,5$  m/min;  $F=-1,0$ mm



Bild A5-15:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s=2,5$  m/min;  $F= -2,0$ mm



Bild A5-16:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 3,0$  m/min;  $F=+2,0$ mm



Bild A5-17:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 3,0$  m/min;  $F=+1,0$ mm



Bild A5-18:  $P_L= 8,0$  kW;  $V_s= 3,0$  m/min;  $F=0,0$ mm



Bild A5-19:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 3,0$  m/min;  $F= -1,0$ mm



Bild A5-20:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 3,0$  m/min;  $F=-2,0$ mm



Bild A5-21:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 3,5$  m/min;  $F=0,0$ mm



Bild A5-22:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 3,5$  m/min;  $F=-1,0$ mm



Keine sichere Durchschweißung

Keine sichere Durchschweißung





## Anhang A6: CO<sub>2</sub>-Slablaserschweißungen. Werkstoff DC04+ZE. Parameterstudie

### Oberfläche



Bild A6-1:  $P_L=3,5$  kW;  $V_s=1,25$  m/min;  $F=0,0$ mm



Bild A6-2:  $P_L=3,5$  kW;  $V_s=1,25$  m/min;  $F=-1,0$ mm



Bild A6-3:  $P_L=3,5$  kW;  $V_s=1,5$  m/min;  $F=+2,0$ mm



Bild A6-4:  $P_L=3,5$  kW;  $V_s=1,5$  m/min;  $F=+1,0$ mm



Bild A6-5:  $P_L=3,5$  kW;  $V_s=1,5$  m/min;  $F=0,0$ mm



Bild A6-6:  $P_L=3,5$  kW;  $V_s=1,75$  m/min;  $F=+3,0$ mm



Bild A6-7:  $P_L=3,5$  kW;  $V_s=1,75$  m/min;  $F=+2,0$ mm



Bild A6-8:  $P_L=3,5$  kW;  $V_s=1,75$  m/min;  $F=+1,0$ mm



Bild A6-9:  $P_L=3,5$  kW;  $V_s=1,75$  m/min;  $F=0,0$ mm



Bild A6-10:  $P_L=3,5$  kW;  $V_s=1,75$  m/min;  $F=-1,0$ mm

### Wurzelseite



**Anhang A7: Vergleichuntersuchungen CO<sub>2</sub>-Laserschweißen von DC04+ZE  
und H220Y ZE-Mg**

*DC04+ZE*

*H220Y ZE-Mg*

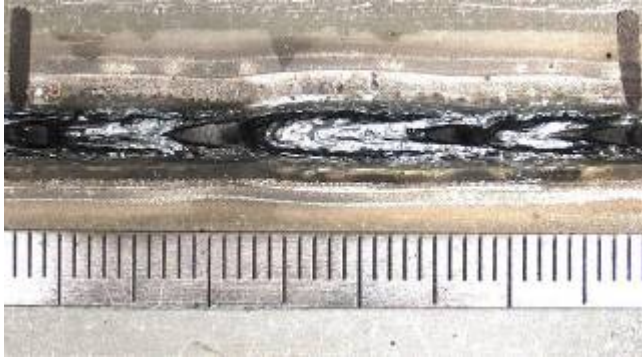


Bild A7-1:  $P_L = 8,0$  kW;  $V_s = 1,0$  m/min

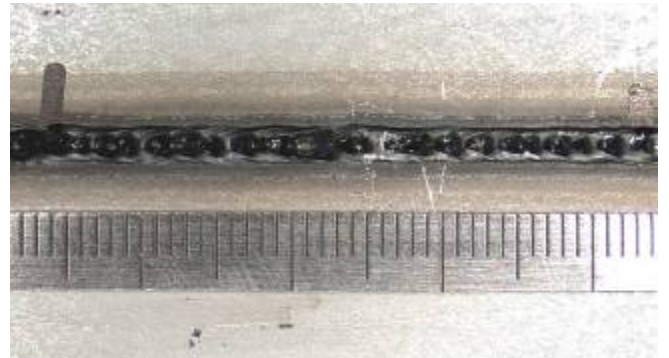


Bild A7-2:  $P_L = 8,0$  kW;  $V_s = 1,5$  m/min

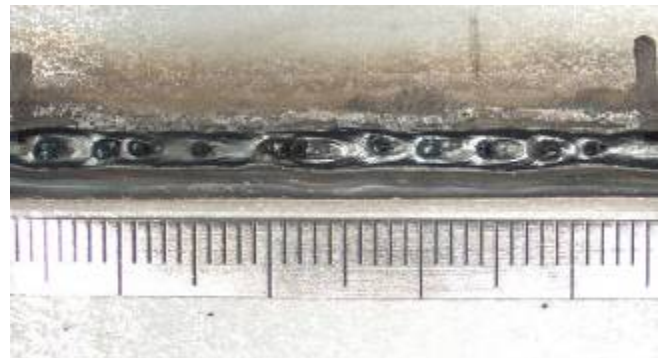


Bild A7-3:  $P_L = 8,0$  kW;  $V_s = 1,5$  m/min, Wurzel

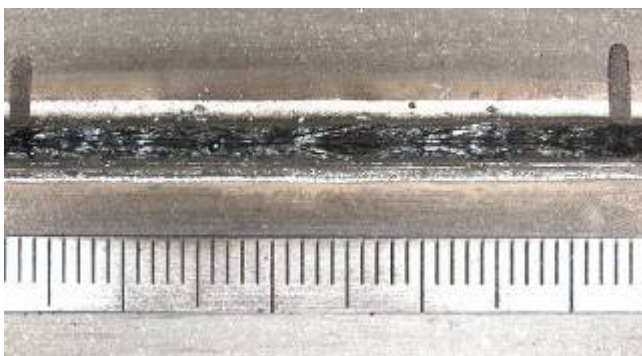


Bild A7-4:  $P_L = 8,0$  kW;  $V_s = 2,0$  m/min



**DC04+ZE**

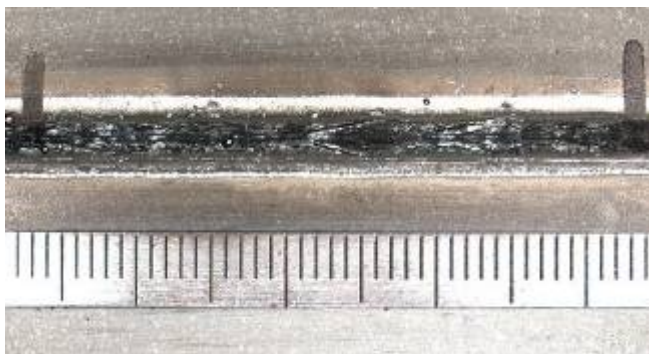


Bild A7-5:  $P_L = 8,0$  kW;  $V_s = 2,0$  m/min, Wurzel



Bild A7-6:  $P_L = 8,0$  kW;  $V_s = 2,5$  m/min

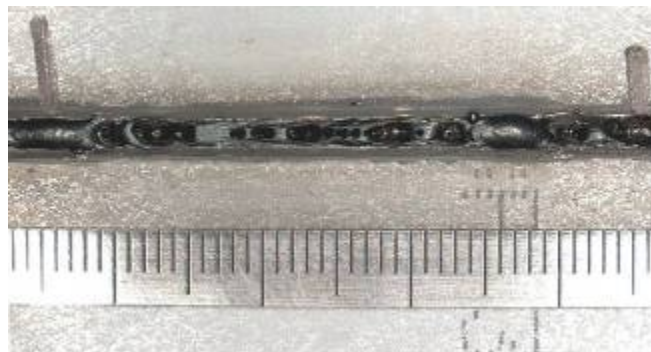
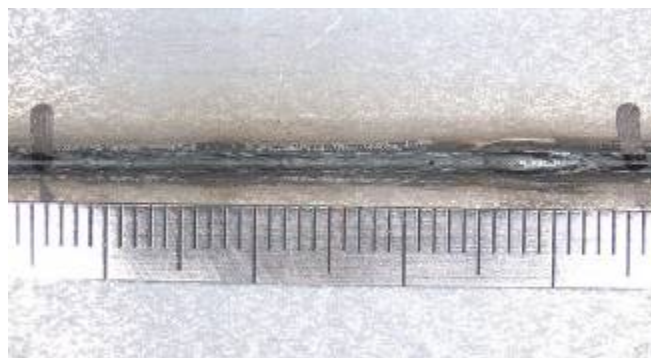
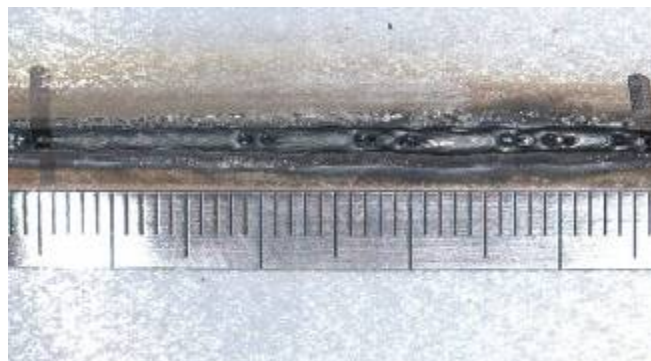


Bild A7-7:  $P_L = 8,0$  kW;  $V_s = 2,5$  m/min, Wurzel



Bild A7-8:  $P_L = 8,0$  kW;  $V_s = 3,0$  m/min

**H220Y ZE-Mg**





**DC04+ZE**

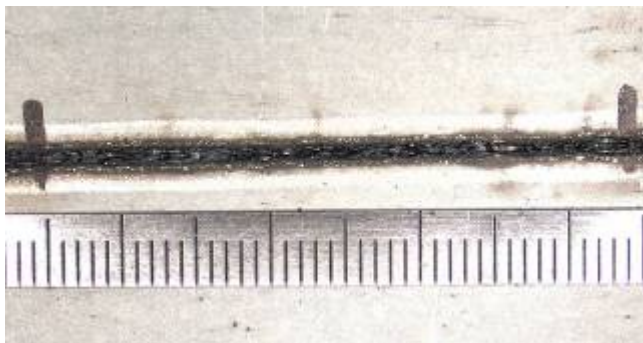


Bild A7-9:  $P_L=8,0$  kW;  $V_s= 3,0$  m/min, Wurzel

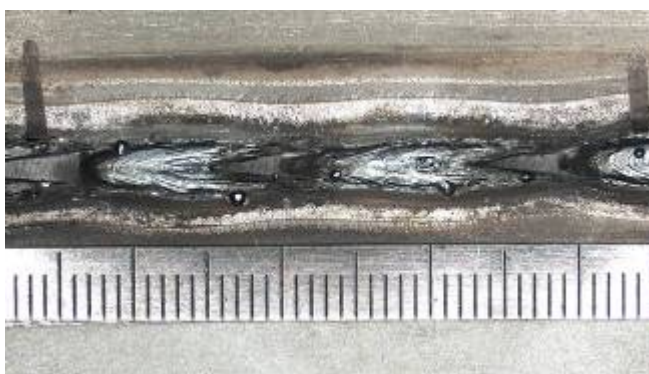


Bild A7-10:  $P_L= 10,0$  kW;  $V_s= 1,0$  m/min

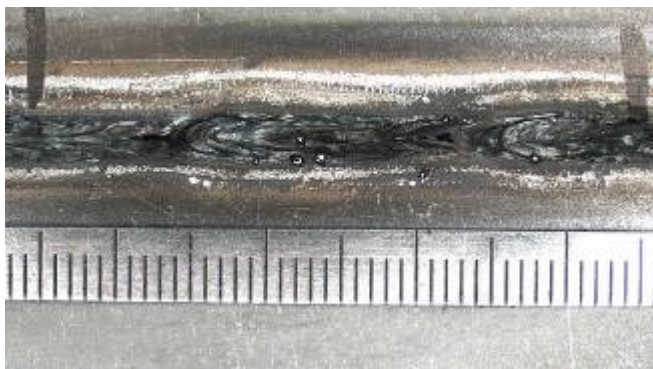
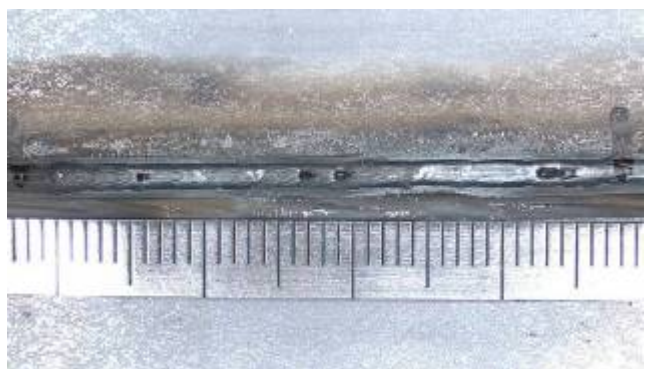


Bild A7-11:  $P_L=10,0$  kW;  $V_s= 1,5$  m/min



Bild A7-12:  $P_L=10,0$  kW;  $V_s= 1,5$  m/min, Wurzel

**H220Y ZE-Mg**





**DC04+ZE**

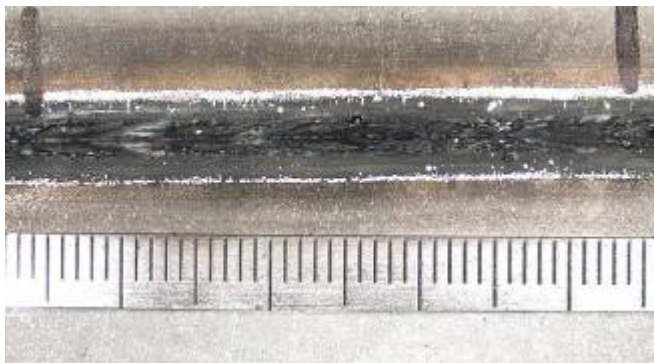


Bild A7-13:  $P_L=10,0$  kW;  $V_s= 2,0$  m/min

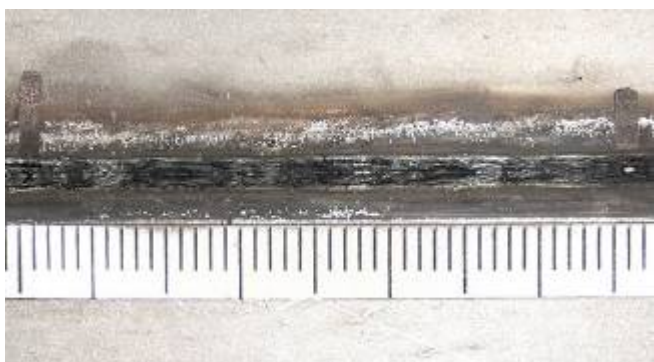


Bild A7-14:  $P_L=10,0$  kW;  $V_s= 2,0$  m/min, Wurzel

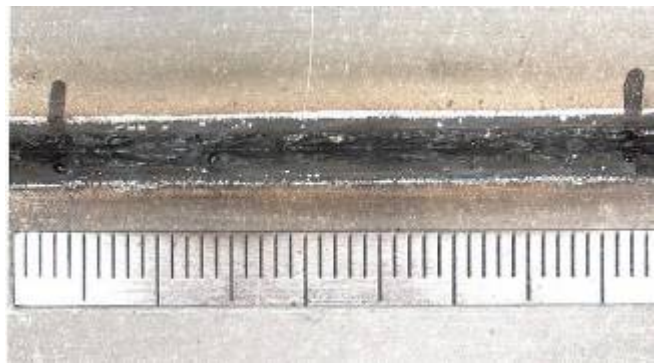
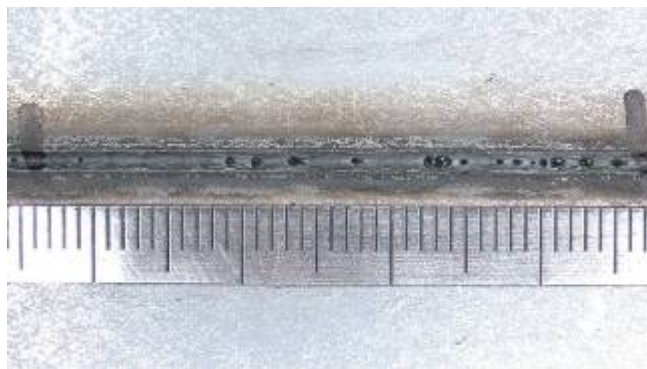
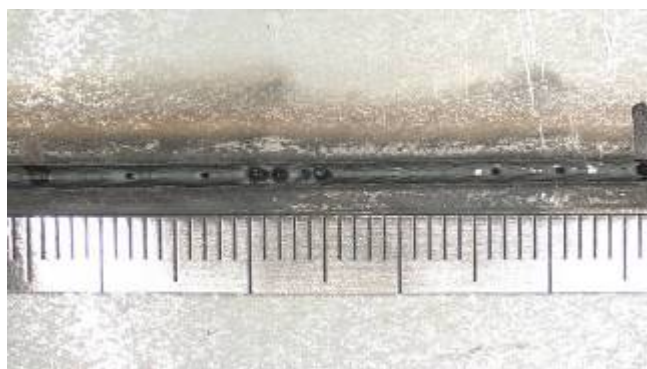


Bild A7-15:  $P_L= 10,0$  kW;  $V_s= 2,5$  m/min



Bild A7-16:  $P_L= 10,0$  kW;  $V_s= 2,5$  m/min, Wurzel

**H220Y ZE-Mg**





**DC04+ZE**

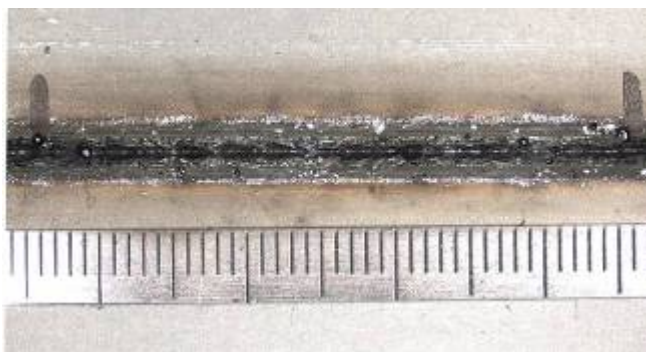


Bild A7-17:  $P_L=10,0$  kW;  $V_s= 3,0$  m/min

**H220Y ZE-Mg**

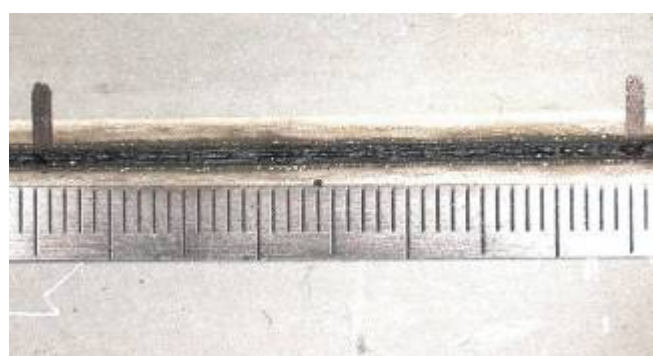


Bild A7-18:  $P_L=10,0$  kW;  $V_s= 3,0$  m/min, Wurzel

## Anhang A8: Durchstrahlprüfungen von Proben für mechanische Versuche

### *Nd:YAG-Laser*

#### *Spalt 0,2 mm*

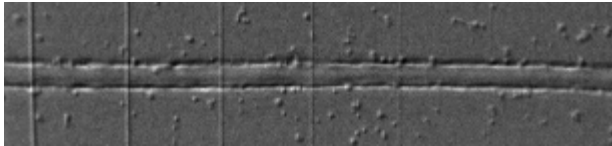


Bild A8-1: Probe 01, H220Y Ze-Mg 35/35;  
Spalt 0,2 mm

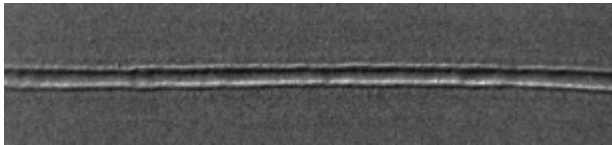


Bild A8-3: Probe 03, DC04+ZE; Spalt 0,2 mm

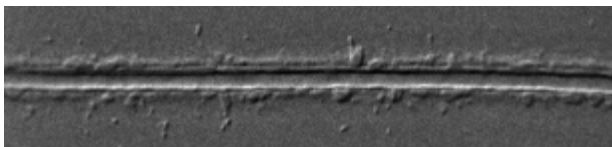


Bild A8-5: Probe 05, DX53D+Z; Spalt 0,2 mm

#### *Ohne Spalt*

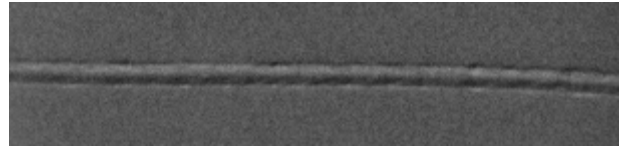


Bild A8-2: Probe 02, H220Y ZE-Mg 35/35

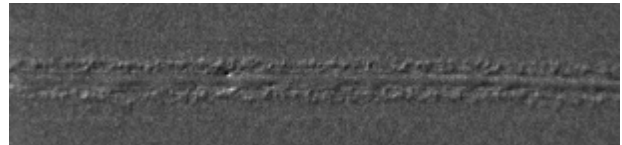


Bild A8-4: Probe 04, DC04+ZE

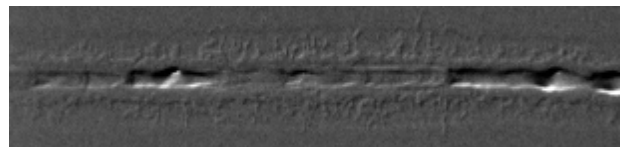


Bild A8-6: Probe 06, DX53D+Z

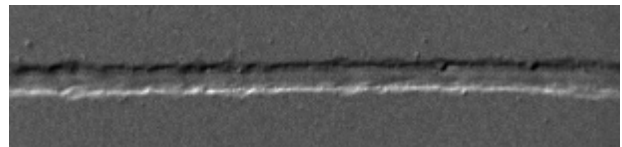


Bild A8-7: Probe 07, DC04, unbeschichtet

### *CO<sub>2</sub>-Laser*

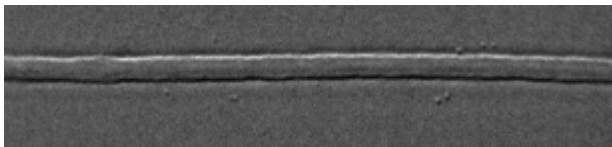


Bild A8-8: Probe 08, H220Y Ze-Mg 35/35;  
Spalt 0,2 mm

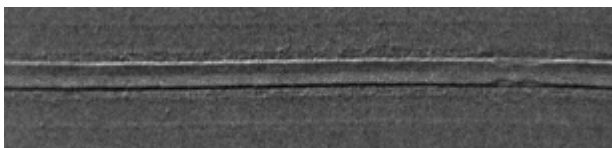


Bild A8-10: Probe 10, DC04+ZE; Spalt 0,2 mm

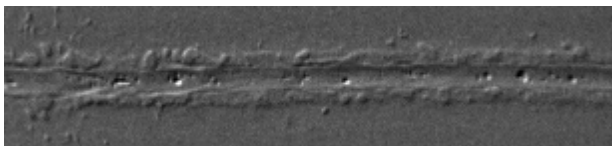


Bild A8-12: Probe 12, DX53D+Z; Spalt 0,2 mm

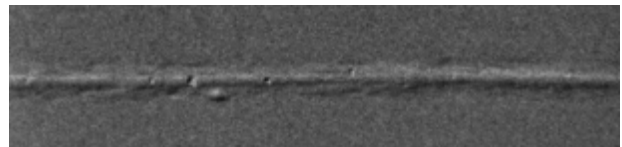


Bild A8-9: Probe 09, H220Y ZE-Mg 35/35

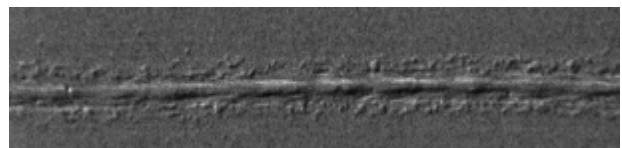


Bild A8-11: Probe 11, DC04+ZE



Bild A8-13: Probe 13, DX53D+Z

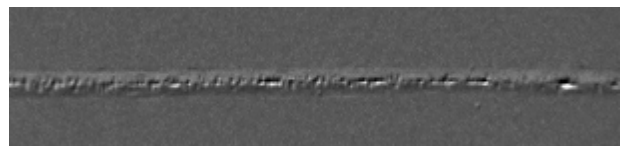


Bild A8-14: Probe 14, DC04, unbeschichtet

## Anhang A9: Korrosionsuntersuchungen

### A9.1: Salzsprühnebelprüfung nach DIN 50 021 SS



Bild A9-1: Probe 1 SS. Nd: YAG-Laser. H220Y  
Ze-Mg 35/35; Spalt 0,2 mm.



Bild A9-2: Probe 2 SS. Nd: YAG-Laser. H220Y  
Ze-Mg 35/35



Bild A9-3: Probe 3 SS. Nd:YAG-Laser.  
DC04+ZE; Spalt 0,2 mm



Bild A9-4: Probe 4 SS. Nd:YAG-Laser.  
DC04+ZE



Bild A9-5: Probe 5 SS. Nd:YAG-Laser.  
DX53D+Z; Spalt 0,2 mm



Bild A9-6: Probe 6 SS. Nd:YAG-Laser.  
DX53D+Z





Bild A9-7: Probe 7 SS. CO<sub>2</sub>-Laser. H220Y  
ZE-Mg 35/35; Spalt 0,2 mm.



Bild A9-8: Probe 8 SS. CO<sub>2</sub>-Laser.  
H220Y ZE-Mg 35/35



Bild A9-9: Probe 9 SS. CO<sub>2</sub>-Laser. DC04+ZE;  
Spalt 0,2 mm



Bild A9-10: Probe 10 SS. CO<sub>2</sub>-Laser.  
DC04+ZE



Bild A9-11: Probe 11 SS. CO<sub>2</sub>-Laser. DX53D+Z;  
Spalt 0,2 mm



Bild A9-12: Probe 12 SS. CO<sub>2</sub>-Laser. DX53D+Z

### A9.2: Klimawechseltest



Bild A9-13: Probe 1 Klima. Nd:YAG-Laser.  
H220Y ZE-Mg 35/35; Spalt 0,2 mm

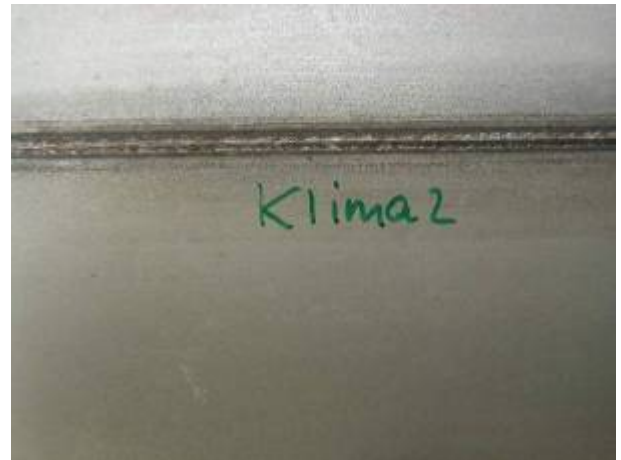


Bild A9-14: Probe 2 Klima. Nd:YAG-Laser.  
H220Y ZE-Mg 35/35



Bild A9-15: Probe 3 Klima. Nd:YAG-Laser.  
DC04+ZE; Spalt 0,2 mm



Bild A9-16: Probe 4 Klima. Nd:YAG-Laser.  
DC04+ZE



Bild A9-17: Probe 5 Klima. Nd:YAG-Laser.  
DX53D+Z; Spalt 0,2 mm



Bild A9-18: Probe 6 Klima. Nd:YAG-Laser.  
DX53D+Z





Bild A9-19: Probe 7 Klima. CO<sub>2</sub>-Laser. H220Y ZE-Mg 35/35; Spalt 0,2 mm



Bild A9-20: Probe 8 Klima. CO<sub>2</sub>-Laser. H220Y ZE-Mg 35/35

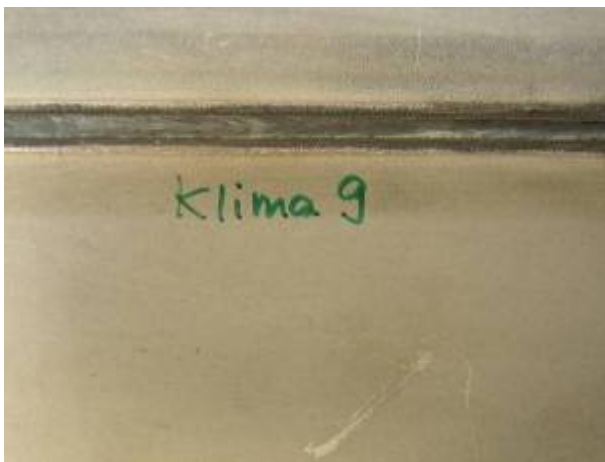


Bild A9-21: Probe 9 Klima. CO<sub>2</sub>-Laser. DC04+ZE; Spalt 0,2 mm



Bild A9-22: Probe 10 Klima. CO<sub>2</sub>-Laser. DC04+ZE



Bild A9-23: Probe 11 Klima. CO<sub>2</sub>-Laser. DX53D+Z; Spalt 0,2 mm



Bild A9-24: Probe 12 Klima. CO<sub>2</sub>-Laser. DX53D+Z

**A9.3: Tauchversuch in 5 %-iger NaCl-Lösung**



Bild A9-25: Probe 1 Tauchversuch. Nd:YAG-Laser. H220Y ZE-Mg 35/35; Spalt 0,2 mm

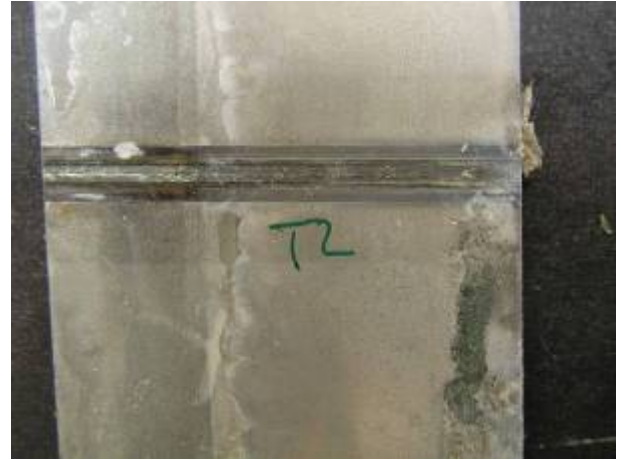


Bild A9-26: Probe 2 Tauchversuch. Nd:YAG-Laser. H220Y ZE-Mg 35/35

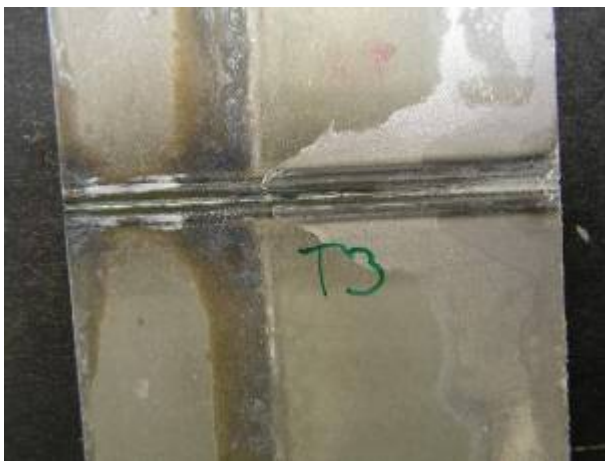


Bild A9-27: Probe 3 Tauchversuch. Nd:YAG-Laser. DC04+ZE; Spalt 0,2 mm



Bild A9-28: Probe 4 Tauchversuch. Nd:YAG-Laser. DC04+ZE



Bild A9-29: Probe 5 Tauchversuch. Nd:YAG-Laser. DX53D+Z; Spalt 0,2 mm



Bild A9-30: Probe 6 Tauchversuch. Nd:YAG-Laser. DX53D+Z



Bild A9-31: Probe 7 Tauchversuch. CO<sub>2</sub>-Laser.  
H220Y ZE-Mg 35/35; Spalt 0,2 mm



Bild A9-32: Probe 8 Tauchversuch. CO<sub>2</sub>-Laser.  
H220Y ZE-Mg 35/35

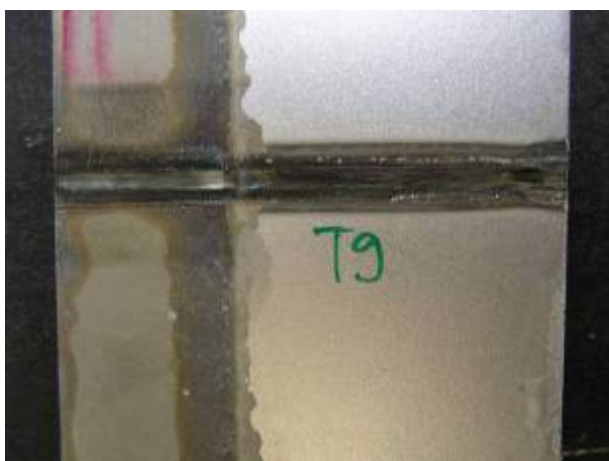


Bild A9-33: Probe 9 Tauchversuch. CO<sub>2</sub>-Laser.  
DC04+ZE; Spalt 0,2 mm



Bild A9-34: Probe 10 Tauchversuch. CO<sub>2</sub>-Laser.  
DC04+ZE



Bild A9-35: Probe 11 Tauchversuch. CO<sub>2</sub>-Laser.  
DX53D+Z; Spalt 0,2 mm



Bild A9-36: Probe 12 Tauchversuch. CO<sub>2</sub>-Laser.  
DX53D+Z



## Lebenslauf

### **Persönliche Daten**

Name: Pavel Sovetchenko  
Anschrift: 39106 Magdeburg, Kühleweinstr. 1  
Geburtsdatum: 01. Mai 1976  
Geburtsort: Tomsk  
Familienstand: verheiratet, ein Kind



### **Schulausbildung:**

09/83-06/93 Gymnasium in Tomsk, Russland

### **Studium:**

09/93-06/97 Polytechnische Universität Tomsk  
*Abschluss: Bachelor für Maschinenbau*

09/97-06/99 Polytechnische Universität Tomsk  
*Abschluss: Magister für Maschinenbau*

11/04 Polytechnische Universität Tomsk  
*Abschluss: Kandidat technitcheskich nauk*

### **Praktika:**

06/95-09/95 Tomsker Werkzeugwerk, Tomsk

01/00-05/00 Forschungszentrum Volkswagen AG, Wolfsburg

### **Berufstätigkeit:**

07/99-09/02 Polytechnische Universität Tomsk  
Lehrstuhl für Schweißtechnik  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter/Aspirant

10/02-10/06 Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg  
Institut für Füge- und Strahltechnik (IFST/IFW)  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter/Doktorand

seit 11/06 Siemens AG Power Generation (extern - OSB AG), Mülheim

### **Zusatzqualifikationen:**

12/04 Internationaler Schweißfachingenieur (IWE)