

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

A. Andreev
Schweißen mit dem Scheibenlaser
im Getriebebau – Prozessmerkmale
und Anlagenkonzepte

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart
Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW)

Das Strahlwerkzeug Laser gewinnt zunehmende Bedeutung für die industrielle Fertigung. Einhergehend mit seiner Akzeptanz und Verbreitung wachsen die Anforderungen bezüglich Effizienz und Qualität an die Geräte selbst wie auch an die Bearbeitungsprozesse. Gleichzeitig werden immer neue Anwendungsfelder erschlossen. In diesem Zusammenhang auftretende wissenschaftliche und technische Problemstellungen können nur in partnerschaftlicher Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschungsinstituten bewältigt werden.

Das 1986 gegründete Institut für Strahlwerkzeuge der Universität Stuttgart (IFSW) beschäftigt sich unter verschiedenen Aspekten und in vielfältiger Form mit dem Laser als einem Werkzeug. Wesentliche Schwerpunkte bilden die Weiterentwicklung von Strahlquellen, optischen Elementen zur Strahlführung und Strahlformung, Komponenten zur Prozessdurchführung und die Optimierung der Bearbeitungsverfahren. Die Arbeiten umfassen den Bereich von physikalischen Grundlagen über anwendungsorientierte Aufgabenstellungen bis hin zu praxisnaher Auftragsforschung.

Die Buchreihe „Laser in der Materialbearbeitung – Forschungsberichte des IFSW“ soll einen in der Industrie wie in Forschungsinstituten tätigen Interessentenkreis über abgeschlossene Forschungsarbeiten, Themenschwerpunkte und Dissertationen informieren. Studenten soll die Möglichkeit der Wissensvertiefung gegeben werden.

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebebau – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte

von Dr.-Ing. Andrey Andreev
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel

Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. mult. Engelbert Westkämper

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2011

D 93

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung,
des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der
Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem
Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwen-
dung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2011

ISBN 978-3-8316-4103-1

Printed in EC

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

Kurzfassung der Arbeit

Die Einsatzpotenziale des Scheibenlasers im Getriebebau wurden im Rahmen dieser Arbeit in zahlreichen Versuchsreihen für unterschiedliche Stähle untersucht. Ziel war es, durch Grundlagenuntersuchungen die genauen Zusammenhänge zwischen den Schweißparametern zu verstehen und daraus Strategien und Konzepte zu entwickeln, die ein wirtschaftliches Schweißverfahren bei hoher Schweißnahtqualität ermöglichen. Aufgrund der Praxisorientierung dieser Arbeit erfüllten die Schweißversuche hinsichtlich der Auswahl der Werkstoffe, der Schweißoptiken und der Versuchsparameter die Anforderungen der Getriebefertigung im Automobilbau.

Bei den Grundlagenuntersuchungen zum Potenzial des Scheibenlasers im Getriebebau wurde zunächst, nach Erklärung der Besonderheiten beim Schweißen mit dem Scheibenlaser, der Einfluss einiger prozessrelevanten Größen auf das Schweißergebnis in Betracht gezogen. Sodann wurden neben der Bedeutung der Laserleistung zum Erreichen höherer Einschweißtiefen, die im Automobilbau im Zusammenhang mit steigenden Drehmomenten und Motorenleistungen entscheidend sein können, die Ergebnisse hinsichtlich der Nahtqualität aufgezeigt. Danach wurden vergleichende Untersuchungen zwischen dem CO₂- und dem Scheibenlaser sowie zwischen dem Scheiben- und dem Faserlaser durchgeführt.

Zentrales Anliegen der Arbeit war der Transfer zu erarbeitender Grundlagenkenntnisse in die Getriebefertigung. Dabei ist es, als abschließender Punkt der Grundlagenuntersuchungen, gelungen, die Vorteile des Schweißens mit dem Scheibenlaser anhand realer Bauteile der Getriebeserienfertigung, zu demonstrieren und das Einsatzpotenzial des Scheibenlasers aufzuzeigen. Hinsichtlich einiger auf die optischen Komponenten der Bearbeitungsoptik wirkenden Nachteile des Schweißens mit dem Scheibenlaser konnte durch die Entwicklung einer modifizierten Bearbeitungsoptik eine Verbesserung erzielt werden.

Die Nutzung der Einsatzpotenziale des Scheibenlasers eröffnen neue Konzept-erstellungen von Laserschweißanlagen, von denen zwei abschließend vorgestellt und hinsichtlich den zu erwartenden Wirtschaftlichkeitsaspekten beispielhaft diskutiert wurden.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung der Arbeit	5
Inhaltsverzeichnis	7
Verzeichnis der Symbole	9
Extended Abstract	13
1 Einleitung	17
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit.....	17
1.2 Aufbau der Arbeit.....	19
2 Grundlagen und Stand der Technik	21
2.1 Laserstrahlschweißen	21
2.1.1 Verfahrensprinzip	21
2.1.2 Wirkungsgrade	25
2.1.3 Fokussierung.....	27
2.1.4 Qualität der Schweißnaht	29
2.2 Werkstoffe	33
2.3 Nahtvorbereitung	36
2.3.1 Nahtgeometrien	36
2.3.2 Oberflächenreinheit und Beschichtungen.....	41
2.3.3 Spannvorrichtung	41
2.3.4 Heften.....	41
2.4 Produktionsanlagen	42
2.4.1 Komponenten der Hauptgruppen.....	42
2.4.2 Typisches Beispiel einer Serienschweißanlage der Getriebefertigung.....	45
2.5 Verfahren zur Beurteilung von Laserschweißnähten	48
3 Systemtechnik, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	52
3.1 Strahlquellen	52
3.2 Strahlführung und Strahlformung	58

3.3	Prozessadapter und Bearbeitungsstationen	60
3.4	Untersuchte Werkstoffe	64
4	Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebebau	66
4.1	Besonderheiten beim Schweißen mit dem Scheibenlaser	66
4.2	Grundlagenuntersuchungen	67
4.2.1	Einfluss des Fokusedurchmessers auf das Schweißergebnis	68
4.2.2	Prozessgaseinfluss	73
4.2.3	Einfluss des Divergenzwinkels auf das Schweißergebnis	75
4.2.4	Einfluss der Fokuslage auf das Schweißergebnis	76
4.2.5	Einfluss des Strahlaufreffwinkels auf das Schweißergebnis	78
4.2.6	Einfluss der Laserleistung beim Schweißen von Getriebeteilen	80
4.3	Nahtqualität	83
4.4	Vergleichende Untersuchungen zu anderen Lasertypen	85
4.5	Schweißen von realen Bauteilen mit dem Scheibenlaser	91
4.5.1	Schweißen der Antriebswelle des NAG	92
4.5.2	Tellerradschweißen	93
4.5.3	Schweißen des Hohlrads mit dem Hohlradträger	95
4.6	Synopsis	103
5	Modifizierte Bearbeitungsoptik	106
5.1	Komponenten	107
5.2	Zusammenbau der D70-3L-Bearbeitungsoptik	108
5.3	Funktionsweise und Strahldiagnostik	109
5.4	Synopsis	110
6	Anlagenkonzepte mit dem Scheibenlaser als Strahlquelle	111
6.1	Konzept 1: Ersatz der Strahlquelle	111
6.2	Konzept 2: Be- und Entladung mittels Roboter	113
6.3	Wirtschaftlichkeitsberechnung	116
6.4	Synopsis	118
7	Zusammenfassung	120
8	Literatur- und Quellenverzeichnis	123

Verzeichnis der Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Absorptionsgrad	-
Δa_2	Nahtunterwölbung	mm
b	Nahtbreite	mm
b_D	durchschnittliche Nahtbreite (Mittelwert)	mm
b_v	Nahtbreite in der Verbindungsebene	mm
b_w	Nahtbreite in der Nahtwurzel	mm
c_p	spezifische Wärme	kJ/kgK
d, d_1, d_2	Blechdicke	mm
d_f	Fokusedurchmesser	mm
d_K	Kerndurchmesser der Lichtleitfaser	μm
D	Strahldurchmesser auf der Fokussierlinse	mm
E_i	Ionisationsenergie des Werkstoffes	eV
f	Brennweite	mm
f_F	Brennweite der Fokussierlinse	mm
f_K	Brennweite der Kollimationslinse	mm
F	Fokussierzahl (F-Zahl)	-
F_L	Fokuslage	mm
h	Kantenversatz	mm
I	Intensität (Leistungsdichte)	W/cm ²
κ	Wärmeleitfähigkeit	W/mK
K	Strahlqualitätszahl	-
M^2	Beugungsmaßzahl (Kennzahl für Strahlqualität)	-

P	Laserleistung	W
P/d_f	Strahlparameterquotient	W/mm
P/v	Streckenenergie	J/mm
P_A	absorbierte Laserleistung	W
Pe	Péclet-Zahl	-
P_L	Gesamtleistung	W
P_P	Prozessleistung	W
P_R	reflektierte Laserleistung	W
P_S	Schwellleistung	W
P_T	transmitierte Laserleistung	W
Q	Querschnittsfläche der Naht	mm ²
Q_D	durchschnittliche Querschnittsfläche (Mittelwert)	mm ²
r	Radius (allgemein)	mm
R	Reflexionsgrad	-
r_f	Strahlradius des fokussierten Strahls	mm
s	Fügespalt (Spaltmaß)	mm
SPP	Strahlparameterprodukt	mm*mrad
t	Einschweißtiefe	mm
t_D	Durchschnittliche Einschweißtiefe (Mittelwert)	mm
t_Z	Taktzeit	s
T	Transmissionsgrad	-
T_S	Schmelztemperatur	K
T_V	Verdampfungstemperatur	K
v	Vorschubgeschwindigkeit	m/min
v_H	Heftgeschwindigkeit	m/min
v_S	Schweißgeschwindigkeit	m/min
z_R	Rayleighlänge	mm
z_{Rf}	Rayleighlänge des fokussierten Strahls	mm

<u>Abkürzung</u>	<u>Bedeutung</u>
AfA	Abschreibung für Abnutzung
BEO	Bearbeitungsoptik
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CO₂	Kohlendioxid
DPFKL	diodengepumpter Festkörperlaser
DG	Durchschweißgrad
DLZ	Durchlaufzeit
EG	Einschweißgrad
FL	Faserlaser
HV	Vickershärte
LAM	laseraktives Medium
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LPFKL	lampengepumpter Festkörperlaser
LLK	Lichtleitkabel
MM	Multi-Mode
MSS	Maschinenstundensatz
NAG	neues automatisches Getriebe
Nd:YAG	mit Neodym (Nd) dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat (YAG)
SL	Scheibenlaser
SM	Single-Mode
VK	Verbindungskennzahl
WEZ	Wärmeeinflusszone
WLS	Wärmeleitungsschweißen
WT	Werkstückträger
WWZ	Wechselwirkungszone
YAG	Yttrium-Aluminium-Granat

Yb:YAG	mit Ytterbium (Yb) dotiertes Yttrium-Aluminium-Granat (YAG)
ZB	Zusammenbau

Griechische

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
α	Absorptionskoeffizient	m^{-1}
α_{P}	Absorptionskoeffizient des Plasmas	m^{-1}
α_{S}	Anstellwinkel der Schweißoptik (Schweißwinkel)	$^{\circ}$
α_{W}	Wärmeausdehnungskoeffizient	$10^{-6}/\text{K}$
β	Wärmespeicherzahl	$\text{kJ}/\text{m}^3\text{K}$
γ	Neigungswinkel	$^{\circ}$
η_{A}	Einkoppelgrad	%
η_{L}	Gesamtwirkungsgrad der Laserquelle	%
η_{P}	Prozesswirkungsgrad	%
η_{th}	thermischer Wirkungsgrad	%
θ_0	Divergenzwinkel des Rohstrahls (halber Winkel)	mrad
θ_{f}	Divergenzwinkel im Fokus (halber Winkel)	mrad
κ	Temperaturleitfähigkeit	m^2s^{-1}
λ	Wellenlänge	μm
ρ	Dichte	kg/m^3
σ	Oberflächenspannungskoeffizient	N/m
ω_0	Radius des Rohstrahls	mm
ω_{f}	Radius des fokussierten Strahls	mm
$\omega(\mathbf{z})$	Strahlradius auf der Fokussierlinse	mm

Extended Abstract

Through advantages like the selective energy supply, the slim seam geometry, the higher welding speed and, hence, the lower warm stress for the material, laser welding compared to the conventional welding methods has gained in the last years a large popularity in the automotive industry. Its advantages reduce the reworking of the welded parts, facilitate the design of low weight constructions and make the laser welding, despite of the higher investment costs, to a leading profitable joining method.

In the last few years some new laser sources, the diode pumped solid state lasers of highest brilliance, were developed. Their two representatives: the fiber and the thin disc laser, combine, compared to the other solid state lasers, advantages like a very good beam quality with on the same time a high degree of efficiency. In addition, their wavelengths around $1\text{ }\mu\text{m}$ provide the possibility for a flexible beam guide system. These advantages make these laser sources very interesting for the welding of gear parts.

Taking into consideration these aspects, the emphasis of this thesis is laid on the analysis of the laser welding process and the potentials to use the thin disc laser in the gear production. In order to understand the coherence of the various single welding parameters and their influence on welding depth, seam geometry and seam quality, detailed experiments were performed. In analysing of the process efficiency, the advantages of these laser sources are outlined. On this basis new strategies and concepts for the systems technology and the machine building were developed.

The possibility to achieve with the thin disc laser at the same time spot diameters smaller than $0,3\text{ mm}$ and large Rayleigh lengths has led to some unforeseen results. For steel alloys, laser power of 3 kW and beam spot diameters smaller than $0,2\text{ mm}$ a reversal of the inverse proportionality between the spot diameter and the welding depth became obvious. The first explanation for this effect, which was made based on experiences with CO_2 -laser welding, were that plasma effects might be the cause. However, an analysis of the shielding gas influence clearly gives a negative answer about the existence of any plasma effects during the welding with the thin disc laser. Some changes in the shape of the seam cross section as function of the welding speed

indicates that for velocities smaller than 6 m/min the proportionality reversal might be caused by temperature gradient driven surface tension, the so-called Marangoni effect.

Analysis of the welding process with different beam divergences showed for the beam spot diameter of 0,1 mm that, on the one hand, a smaller beam divergence leads to a larger welding depth. On the other hand, it reduces the seam cross section area and the process efficiency for speeds smaller than 4 m/min.

Further trials to find the effect of the focal position on the welding result showed for the thin disc laser and large Rayleigh lengths that the largest welding depth is achieved in the range between -1 and +1 mm. Inclination of the welding optics in the range between 0 and 30° at beam spot diameters smaller than 0,2 mm did not show an effect on the welding result.

The seam geometry and the welding depth showed a degradation of the weld quality and an increase of the metal vapor, when the laser power was increased from 3 to 6 kW. The first effect can be characterised by a high number of blowouts and considerable seam porosity. The second one has an indirect detrimental influence on the welding result: the vapor jet leads to an extra thermal load of the optical components, which change their physical properties resulting in varying focusing conditions.

Comparison tests between different laser sources show the effects of wavelength, intensity profile of the laser beam in the focus, different welding optics and Rayleigh lengths on the welding result. Because of its lower wave length and higher absorption the thin disc laser leads, compared to the CO₂-laser, for welding speeds higher than 3 m/min to the achievement of higher welding depths. In addition to this advantage, a higher efficiency can be achieved with the thin disc laser, too. The larger Rayleigh length of the CO₂-laser was an advantage for velocities lower than 3 m/min and led in this range to the achievement of larger welding depths. Comparisons between the fiber and the thin disc laser showed that both laser sources could be used for the same welding tasks.

After analysing the process data, some welding parameters were used in further trials to weld real parts from the gear production of Daimler AG. Using these parameters the welding in the serial production (weld quality, seam geometry, welding depth, hardness in the weld zone) was achieved with a speed coefficient of 1,5. Due to this, for the first time it became possible to weld the ring gear with the housing of a differential without using of filler metal.

Based on the Trumpf welding optics (D70) a modified head, called 3L-module, was developed. Its purpose was to expand the collimated beam and to focus it. Thus, the combination between the D70 optics and the 3L-module (the combined optics was called “D70-3L”) led to an increase of the working distance, which improved the accessibility of the welding optics, reduced the pollution of the protective glass and hence, reduced the thermal stress of the optical components. In summary, it protected the optical components from spatters and fume, which is strongly produced in the welding process with the thin disc laser.

The increase of the welding speed during the trials with the parts from the real gear production of Daimler AG led to a reduction of the welding time, which is needed to produce one part. This fact suggested a review of the existing welding machine concepts. The mere substitution of the CO₂-laser by the thin disc laser led to a first concept, which was developed in this thesis, characterised by a reduction of the theoretical cycle time and of the throughput time. However, based on the unchanged large loading and unloading time, the laser’s uptime was reduced. In the second concept, new types of the loading and unloading components were chosen, so that the theoretical cycle time and the throughput time were increased again. In addition, this new concept has led, compared to the existing CO₂-laser welding machine, to an increase of the laser’s uptime. It allowed the highest parts production per hour and led, for high number of parts, to the lowest costs per piece.

In conclusion, the results of this thesis led to a better understanding of the welding process on gear parts using the thin disc laser. The analysis of the welding process in combination with the welding of real parts from the gear production of Daimler AG clearly demonstrated the advantages and the disadvantages of the thin disc laser. The new machine concepts, which were adapted especially for this laser source, showed the economical potentials of the thin disc laser in the gear parts production.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

Das Strahlwerkzeug Laser zusammen mit dem Laserstrahlschweißen als Fügeverfahren gewinnt in der industriellen Fertigungstechnik in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung. Die Gründe hierfür sind die Vorteile des Laserstrahlschweißens gegenüber den klassischen Schweißverfahren wie gezielte Energieeinkbringung, schlanke Nahtgeometrie und geringe Wärmebelastung des Bauteils. Diese Vorteile ermöglichen eine reduzierte Nachbearbeitung nach dem Schweißprozess. Insgesamt führen sie somit sowohl zur Entwicklung materialsparender Konstruktionen als auch zu geringeren Prozesskosten. Darüber hinaus ist das Laserstrahlschweißen bezogen auf die Schweißgeschwindigkeit den konventionellen Schweißverfahren deutlich überlegen. Zusätzlich ist das Verfahren selbst bei sehr hohen Schweißgeschwindigkeiten reproduzierbar und lässt sich in automatisierte Abläufe gut integrieren. Dank dieser Eigenschaften ist das Laserstrahlschweißen trotz hoher Anschaffungskosten in vielen Fällen wirtschaftlicher als die konventionellen Schweißverfahren.

Das Laserstrahlschweißen hat sich in den letzten Jahren im Antriebstrang des Automobilbereichs, der aus Getriebe-, Achsen- und Motorenbau besteht, sehr stark verbreitet und ist inzwischen, wie mit Bild 1.1 gezeigt, als gängiges Fügeverfahren in der Automobilindustrie etabliert.



Bild 1.1: Abtriebswelle des neuen automatischen Getriebes (NAG): axiale Schweißung (links) und radiale Schweißung (rechts) [Quelle: Daimler AG].

Im Getriebebau werden vom Laserstrahl sehr gute Zugänglichkeitseigenschaften und sehr gute Fokussierbarkeit vorausgesetzt, da die geschweißten Bauteile nur eine geringe Wärmeausdehnung nach dem Schweißen aufweisen dürfen, um nicht nachgearbeitet werden zu müssen. Dank seiner guten Strahlqualität und damit sehr guten Fokussierbarkeit erfüllte bis vor kurzem nur der CO₂-Laser diese Bedingungen, siehe Bild 1.2. Im Getriebebau wurden deshalb trotz komplizierter und unflexibler Strahlführungen, deren Notwendigkeit durch die Wellenlänge des Lasers bestimmt ist, überwiegend CO₂-Laser als Standardgeräte für den Schweißprozess eingesetzt.

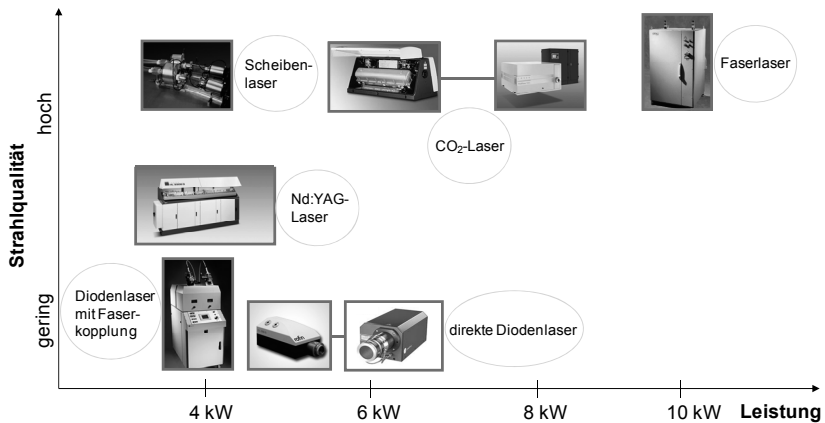


Bild 1.2: Qualitative Einordnung der Strahlquellen auf dem Markt bezüglich deren Strahlqualität- und Ausgangsleistung (Stand: Anfang 2005).

Basierend auf den Festkörperlaser wurden in den letzten Jahren die so genannten diodengepumpten Festkörperlaser höchster Brillanz (Scheiben- und Faserlaser) entwickelt. Diese Strahlwerkzeuge haben besondere Vorteile gegenüber den CO₂- und den herkömmlichen lampen- oder diodengepumpten Festkörperlaser, sodass ihr Einsatz im Getriebebau untersucht werden muss. Ihre Vorteile liegen in der sehr guten Strahlqualität bei gleichzeitig hohem Gesamtwirkungsgrad und durch die kürzere Wellenlänge möglicher flexibler Strahlführung.

Unter diesen Gesichtspunkten soll im Rahmen dieser Arbeit das Einsatzpotenzial des Scheibenlasers im Getriebebau untersucht werden, wobei es gilt, die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Schweißparametern zu verstehen, die erzeugten Nahtgeometrien zu untersuchen, die Prozesswirkungsgrade zu analysieren und daraus unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit neue Strategien zum Anlagenbau im Getriebebau zu entwickeln, die ein effizientes Schweißen bei hoher Schweißnahtqualität

ermöglichen. Eingebettet in das BMBF-Projekt „Scheibenlaser höchster Brillanz“ wurden die Untersuchungen im Rahmen einer Zusammenarbeit des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge) der Universität Stuttgart mit der Daimler AG durchgeführt.

1.2 Aufbau der Arbeit

Das Vorgehen und der Aufbau dieser Arbeit basieren auf dem Stand der Technik und der o. g. Zielsetzung. Zunächst wird in Kapitel 2 der bisherige Stand der Kenntnisse zum Laserstrahlschweißen erklärt. Dabei wird auf das Verfahrensprinzip, dessen Einflussgrößen und typische Prozessphänomene eingegangen. Darüber hinaus werden in diesem Kapitel die im Getriebebau meist verwendeten Werkstoffe und ihre Eigenschaften, die Nahtvorbereitung, der Stand der Anlagentechnik heutiger Laserschweißanlagen in der Getriebefertigung und die Verfahren zur Beurteilung von Laserschweißnähten erläutert.

In Kapitel 3 wird die verwendete Systemtechnik, beginnend von den Strahlquellen und den optischen Komponenten zur Strahlführung und Strahlformung, über die Prozessadapter und die Bearbeitungsstationen bis hin zu der chemischen Zusammensetzung der untersuchten Werkstoffe, beschrieben.

Als Grundlage weiterer Entwicklungen wird in Kapitel 4 das Schweißen von Stahllegierungen mit dem Scheibenlaser detailliert untersucht. Ziel dabei ist, die genauen Abhängigkeiten des Prozesses und die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Schweißparameter zu verstehen und daraus Ergebnisse zu liefern, die ein effizientes Schweißen bei hoher Schweißnahtqualität ermöglichen. Zusätzlich werden neben einem Strahlquellenvergleich die Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen auf reale Bauteile bzw. Bauteilgruppen der Daimler-Getriebefertigung übertragen.

In Kapitel 5 wird eine modifizierte Bearbeitungsoptik, die auf der D70-Optik der Firma Trumpf basiert, vorgestellt. Durch sie wird der kollimierte Strahl aufgeweitet. Die daraus entstehenden Vorteile werden in diesem Kapitel diskutiert.

In Kapitel 6 werden für den Zusammenbau (ZB) Hohlrad basierend auf den Ergebnissen der Grundlagenuntersuchungen neue Anlagenkonzepte entwickelt. Dabei werden alle Vorteile, die sich vom Einsatz des Scheibenlasers ergeben, dargestellt und genau analysiert. Um die Untersuchungen zu komplettieren, wird eine Wirtschaftlich-

keitsberechnung erstellt. Neben der Wirtschaftlichkeit stellt die Nahtqualität einen zentralen Punkt der Untersuchungen dar.

Abschließend werden im Kapitel 7 alle Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.

2 Grundlagen und Stand der Technik

2.1 Laserstrahlschweißen

Beim Laserstrahlschweißen wird die Energie des Laserstrahls für das lokale Aufschmelzen des Materials der zu fügenden Werkstücke genutzt. Die Vorteile des Laserstrahlschweißens gegenüber konventionellen Schweißverfahren, wie z. B. MIG (Metallinertgasschweißen) oder MAG (Metallaktivgasschweißen), sind die gezielte und konzentrierte Wärmeeinbringung, die zusammen mit deutlich höheren Vorschubgeschwindigkeiten eine geringe Wärmebelastung auf dem Werkstück zur Folge hat. Dies führt im Vergleich zu den konventionellen Schweißverfahren zu geringeren Energieverlusten und ermöglicht die Erzeugung von schlanken und präzisen Nahtgeometrien. Infolgedessen können auch Schweißnahtnacharbeiten in der Prozesskette minimiert werden.

2.1.1 Verfahrensprinzip

Nach DIN 8593 handelt es sich beim Fügeverfahren Laserstrahlschweißen um ein Schmelzverbindunggsschweißverfahren. Die für den Prozess erforderliche Energie wird dabei kraftlos, d. h. ohne elektrischen oder mechanischen Kontakt zwischen Energiequelle und zu schweißenden Werkstücken, hinzugefügt [1].

Zunächst seien die grundsätzlich auftretenden Phänomene bei der Bestrahlung eines Werkstückes anhand Bild 2.1 diskutiert. Bei niedrigen Intensitäten im Bereich einiger 10^3 W/cm^2 bleibt die Temperatur in der Wechselwirkungszone unter der Schmelztemperatur und das Werkstück wird erwärmt. Der Zustand wird in Bild 2.1 als Erwärmung bezeichnet. Wird die Intensität im Bereich einiger 10^4 W/cm^2 erhöht, so wird in der Wechselwirkungszone eine Temperatur erreicht, die gleich bzw. höher als die Schmelztemperatur ist. Somit bildet sich an der Werkstückoberfläche ein Schmelzbad aus. Die Tiefe dieses Schmelzbads ist in der Regel kleiner als die Breite. Dieser Zustand wird normalerweise als Wärmeleitungsschweißen (WLS) bezeichnet. In Bild 2.1 ist er als Aufschmelzen dargestellt.

Das Verfahren „Wärmeleitungsschweißen“ ist hauptsächlich in der Feinwerktechnik gebräuchlich, beispielsweise beim Schweißen von Teilen für die Elektronikindustrie oder beim Schweißen von sehr dünnen Blechen [2].

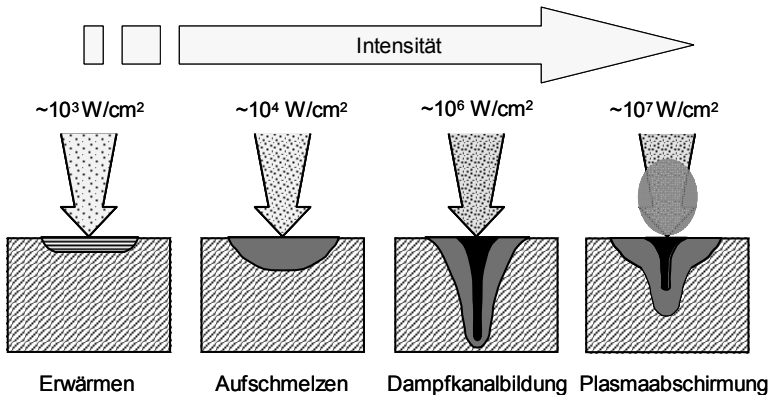


Bild 2.1: Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Werkstück [3].

Steigt die Intensität beim Stahl bis zu Werten einiger 10^6 W/cm^2 , wird die Verdampfungstemperatur erreicht. Durch das Verdampfen und den Druck des abströmenden Metaldampfes bildet sich im Schmelzbad ein Dampfkanal (Dampfkapillare, Keyhole) aus. In dem Dampfkanal, dessen Durchmesser dem des fokussierten Laserstrahls näherungsweise entspricht, dringt die Energie des Laserstrahls als Folge von Mehrfachreflexionen tief in das Werkstück hinein. Die Tiefe der Schmelze ist dann um das Mehrfache größer als die Breite. Aus verfahrenstechnischer Sicht wird dieser Zustand als Tiefschweißen (engl. „keyhole welding“) bezeichnet. Die erreichbare Schweißnahttiefe ist dabei viel größer als die des Wärmeleitungsschweißens. Das Tiefschweißen wird in den meisten Powertrain- und Karosserieanwendungen des Automobilbaus angewendet. Sein Verfahrensprinzip ist in Bild 2.2 [3] skizziert. Das resultierende Bearbeitungsergebnis hängt sowohl von der Vielzahl an dynamischen Vorgängen in der Wechselwirkungszone (WWZ) zwischen dem Laserstrahl und dem Werkstück, wie z. B. Metaldampf- und Plasmabildung, als auch von Strömungsvorgängen im Schmelzbad ab. Die resultierende Naht entsteht durch die relative Bewegung zwischen dem Laserstrahl und dem Werkstück.

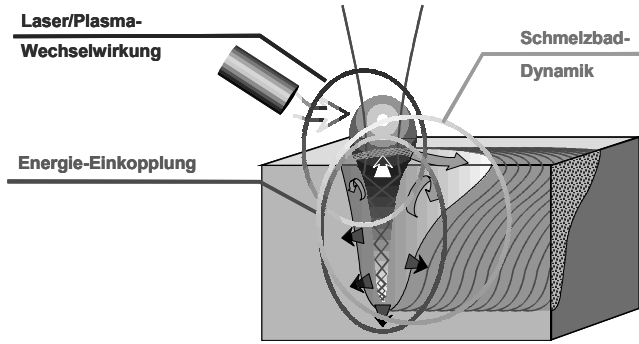


Bild 2.2: Schematische Darstellung des Tiefschweißens [3].

Wird bei der Wechselwirkung zwischen Laserstrahl und Werkstück das Temperaturfeld auf der Werkstückoberfläche, die mit Laserleistung beaufschlagt wird, betrachtet, gilt vereinfacht für die maximale Temperatur in Brennfleckpunktmittle folgende Beziehung [4]:

$$T_{\max} = \frac{1}{2 \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \frac{A \cdot P}{r_f \cdot k \cdot \sqrt{\frac{Pe}{2} + 1,1}} \quad (2.1)$$

Dabei ist die Péclet-Zahl Pe abhängig von der Vorschubgeschwindigkeit v , dem Strahlradius r_f bzw. dem Strahldurchmesser d_f des fokussierten Strahls und der Temperaturleitfähigkeit κ . Sie ergibt sich wie folgt:

$$Pe = \frac{v \cdot r_f}{\kappa} = \frac{v \cdot d_f}{2 \cdot \kappa} \quad (2.2)$$

Da beim Tiefschweißen sich im Zentrum des Brennflecks ein Dampfkanal bildet, kann die in Gleichung (2.1) berechnete T_{\max} durch die Verdampfungstemperatur T_V ersetzt und nach der folgenden Formel berechnet werden:

$$\frac{P}{d_f} = \underbrace{\sqrt{\pi}}_B \cdot \underbrace{\frac{T_V \cdot k}{A}}_M \cdot \underbrace{\sqrt{\frac{Pe}{2} + 1,1}}_V \quad (2.3)$$

Die rechte Seite dieser Gleichung kann nach [5] in die Faktoren B, M und V aufgeteilt werden. Der Faktor B (Beam) ist bestimmt von dem Strahlprofil. Im Faktor M

(Material) sind die Materialeigenschaften zusammengefasst. Sie zeigen, dass die Schwelle des Tiefschweißprozesses direktproportional zu der Verdampfungstemperatur T_V und der Wärmeleitfähigkeit k ist. Darüber hinaus ist sie abhängig von dem Absorptionsgrad A , der auch von der Wellenlänge bestimmt wird und für metallische Werkstoffe im Allgemeinen mit kürzerer Wellenlänge größer ist. Der Faktor V (Vorschubgeschwindigkeit) beinhaltet die beschriebene Péclet-Zahl. Aus Gleichung (2.3) ist ersichtlich, dass mit kleinerem Fokusbereich eine niedrigere Leistung erforderlich ist, um die Schwelle zum Tiefschweißen zu erreichen. Außerdem ist der sprunghafte Anstieg der Einschweißtiefe umso stärker ausgeprägt, je geringer der Absorptionsgrad und je größer der Fokusbereich ist [4].

Steigt die Leistungsdichte (bei Stahl) weiter in Bereiche größer als 10^7 W/cm^2 an, erhöht sich die Verdampfungsrate und ein Teil des Metaldampfes wie auch des Umgebungsgases oberhalb der Wechselwirkungszone wird -in Abhängigkeit von der Wellenlänge- ionisiert. Es entsteht Plasma, welches die Laserleistung absorbiert. Dadurch geht zum einen ein Teil der Leistung für den Prozess verloren und zum anderen wird der Strahl durch die als Linse wirkende Plasmaschicht defokussiert bzw. es wird der Laserstrahldurchmesser auf der Fokusebene vergrößert [4]: Insgesamt herrscht auf dem Werkstück eine niedrigere Intensität. Dieser Zustand wird Plasmaabschirmung genannt. Er führt zur Entstehung von breiten und flachen Schweißnähten.

Die Maßnahme zur Steuerung der Entstehung des Plasmas ist die Nutzung von:

- Strahlquellen mit kürzerer Wellenlänge;
- Schutzgasen (Prozessgasen) mit hohen thermischen Geschwindigkeiten und hohem Ionisationspotenzial.

Der Absorptionskoeffizient des Plasmas α_p ist proportional zu der Wellenlänge des Strahls λ im Quadrat [6]. Somit sind die Intensitätsverluste im Plasma viel kleiner, wenn eine Strahlquelle mit kürzerer Wellenlänge verwendet wird, gleichzeitig ist der Absorptionsgrad höher. Unter diesen prozesstechnischen Aspekten ist der Einsatz von Festkörperlaser und insbesondere von Scheiben- und Faserlasern für den Schweißprozess im gesamten Getriebe-, Achsen- und Motorenbau als sinnvoll zu betrachten.

In Bild 2.3 ist das Prozessfenster des Tiefschweißens in Abhängigkeit des Strahlparameterquotienten P/d_f dargestellt. Wie schon erwähnt, ist es durch die Schwelle vom Wärmeleitungsschweißen (links) und die Plasmaabschirmung (rechts) begrenzt.

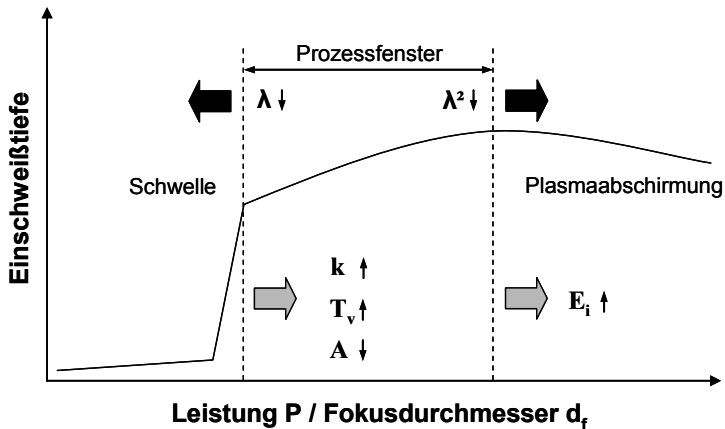


Bild 2.3: Prozessfenster beim Laserschweißen nach [7].

2.1.2 Wirkungsgrade

Trifft der fokussierte Laserstrahl mit der Leistung P auf die Werkstückoberfläche, wird ein Teil dieser Leistung absorbiert und in Wärme umgewandelt (P_A). Der Rest wird reflektiert (P_R) und transmittiert (P_T):

$$P = P_A + P_R + P_T \quad (2.4)$$

Aus Sicht der Energieeinkopplung kann Gleichung (2.4) so modifiziert werden:

$$1 = A + R + T, \quad (2.5)$$

wodurch der Absorptionsgrad A , der Reflexionsgrad R und der Transmissionsgrad T dabei als Verhältnis von Leistungen definiert sind. Für den thermischen Prozess „Laserstrahlschweißen“ selbst ist nur der Absorptionsgrad A bzw. die absorbierte Leistung P_A , die in Wärme umgewandelt wird, von Bedeutung. Die Werte von A hängen von der Wellenlänge der Laserstrahlung, ihrer Polarisation, dem Strahl-auffreffwinkel, den Eigenschaften des Werkstoffes und seiner Temperatur ab [6], [8].

Bis Intensitäten weniger 10^6 W/cm^2 , also im Bereich des Wärmeleitungsschweißens, findet auf der Werkstückebene ein einmaliges Auftreffen der Laserstrahlung statt. Somit ist in diesem Intensitätsbereich die absorbierte Energie proportional zum Absorptionsgrad.

Bei Vorhandensein einer Kapillare trifft der Laserstrahl im Dampfkanal mehrmals auf. Die in der Wechselwirkungszone absorbierte Energie ist in diesem Fall proportional zum Absorptionsgrad und hängt zudem von den im Dampfkanal entstehenden Mehrfachreflexionen ab. Werden zusätzlich noch Energieverluste durch den abströmenden Metaldampf und das Plasma berücksichtigt, so wird die absorbierte Energie durch den Einkoppelgrad η_A beschrieben. Aufgrund der Mehrfachreflexionen ist der Einkoppelgrad um das Mehrfache höher als der Absorptionsgrad. Der Einkoppelgrad ist nicht nur von Parametern wie der Wellenlänge und der Werkstoffeigenschaften, sondern auch von der Geometrie der Dampfkapillare abhängig [6].

Neben dem Einkoppelgrad ist der thermische Wirkungsgrad η_{th} eine weitere Größe zur Beschreibung der Energieumsetzung. Er beschreibt, in welchem Umfang die eingekoppelte Laserleistung, P_A , in diesem Fall zur Erzeugung einer Schweißnaht, P_p , umgesetzt wird. Er ist abhängig von den Werkstoffeigenschaften, der Vorschubgeschwindigkeit, der Geometrie der Dampfkapillare und der Bauteilgeometrie. Der thermische Wirkungsgrad bei einer streng zweidimensionalen Kapillar- und Schmelzbadgeometrie wird durch die Wärmeleitungsverluste auf einen theoretischen Wert von maximal 48 % begrenzt [7], [9].

Die Prozesseffizienz wird durch den Prozesswirkungsgrad η_P beschrieben. Er ist in [6] als Verhältnis von genutzter Prozessleistung P_p (jener Wert, der zum Aufschmelzen des Nahtvolumens erforderlich ist) zu eingestrahelter Laserleistung P bzw. als Produkt von Einkoppel- und thermischem Wirkungsgrad definiert:

$$\eta_P = \frac{P_p}{P} = \eta_A \cdot \eta_{th} \quad (2.6)$$

Er zeigt, dass eine Einflussnahme auf η_A bzw. η_{th} durch geeignete Wahl der Lasereigenschaften (Wellenlänge, Polarisation der Laserstrahlung) bzw. der Prozessgestaltung (Einfallswinkel, Geometrie der Dampfkapillare, Vorschubgeschwindigkeit) die Wirtschaftlichkeit des Prozesses positiv oder negativ beeinflussen kann [6].

In Zusammenhang mit dem Prozesswirkungsgrad ist die Streckenenergie P/v als eine wichtige Größe zu erwähnen. Sie beschreibt die thermische Belastung eines Werkstückes: je höher ihr Wert, desto höher ist die pro Längeneinheit zugefügte Energie. Beim Schweißen ergibt die Streckenenergie in Verhältnis zu der Nahtquerschnittsfläche Q ein direktes Maß -das energiespezifische Volumen [6]- für den Prozesswirkungsgrad, siehe Gleichung (2.7).

$$\frac{Q}{P/v} \sim \eta_p \quad (2.7)$$

Für den Prozesswirkungsgrad ist demnach vorteilhaft, mit geringer Streckenenergie und somit in den meisten Fällen mit höheren Vorschubgeschwindigkeiten zu arbeiten. Nach [10] führen geringe Streckenenergien zu schlanken Nähten mit, in Abhängigkeit vom Werkstoff, hohen Härten im Bereich der Schweißnaht.

2.1.3 Fokussierung

Abhängig vom Lasertyp und von der Laserbauart werden Strahlen unterschiedlicher Qualität erzeugt. Nach [3] wird unter Strahlqualität die mit der Strahlqualitätszahl K oder der Beugungsmaßzahl M^2 charakterisierte „Nähe“ eines Laserstrahls zum bestfokussierbaren Strahl, dem Gaußschen Grundmode, verstanden:

$$K = \frac{1}{M^2} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{1}{\omega_0 \theta_0} \quad (2.8)$$

Das in Gleichung (2.8) gezeigte Produkt aus Tailenradius ω_0 und Divergenzwinkel θ_0 bezeichnet man als Strahlparameterprodukt (SPP):

$$SPP = \omega_0 \theta_0 \quad (2.9)$$

Es ist eine inhärente und invariante Eigenschaft des Laserstrahls. Für den Gaußschen Grundmode ist $\omega_0 \theta_0 = \lambda/\pi$ und K wie M^2 haben den Wert eins.

Es sei nachstehend gezeigt, dass je kleiner das Strahlparameterprodukt ist, desto besser der Strahl fokussierbar wird. Wenn ein bestfokussierbarer Laserstrahl ($M^2 = 1$ und $SPP = \lambda/\pi$) von einer sich im Abstand z von der Strahltaile befindenden Linse der Brennweite f fokussiert wird, bewirkt die Linse eine Änderung der geometrischen Strahleigenschaften, siehe Bild 2.4: Bei gleichbleibendem Strahlparameterprodukt ändern sich auf der Fokussierebene der Tailenradius und der Divergenzwinkel. Da im Allgemeinen sich die Linse mehrere Meter von der Auskoppelenebene und damit von der Strahltailebene befindet, kann die Annahme gemacht werden, dass $f \ll z$ ist. Unter dieser Annahme gelten auf der Fokussierebene folgende Abhängigkeiten [3]:

$$\omega_f \approx \frac{\omega_0 \theta_0 f}{\omega(z)} \quad (2.10)$$

$$\theta_f = \frac{\lambda}{\pi \omega_f} \quad (2.11)$$

Werden die Gleichungen $\omega(z) = D/2$ und $\omega_0 \theta_0 = \lambda/\pi$ in Gleichung (2.10) eingesetzt, ergibt sich für den Radius des fokussierten Strahls (Fokusradius) folgende Vereinfachung:

$$\omega_f = \frac{2\lambda}{\pi} \cdot \frac{f}{D} \quad (2.12)$$

Das in Gleichung (2.12) gezeigte Verhältnis der Brennweite der Fokussierlinse f zu dem Strahldurchmesser auf der Fokussierlinse D wird als Fokussierzahl F , genannt auch F-Zahl, bezeichnet.

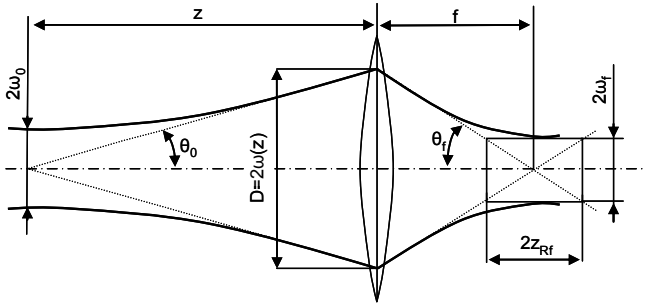


Bild 2.4: Fokussierung eines Gaußschen Strahls [3].

Da der Durchmesser auf der Fokussierebene, d_f , dem Zweifachen des Radius entspricht, wird er aus Gleichung (2.12) unter Berücksichtigung der F-Zahl abgeleitet:

$$d_f = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot F \quad (2.13)$$

Eine weitere charakteristische Kenngröße des Laserstrahls ist die Rayleighlänge z_R , die auch als Schärfentiefe bekannt ist. Für den fokussierten Strahl wird sie mit z_{Rf} bezeichnet und gibt die Entfernung vom Fokus an, bei der sich der Strahlradius um den Faktor $\sqrt{2}$ vergrößert, die Querschnittsfläche verdoppelt oder die Leistungsdichte halbiert hat. Sie wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$z_{Rf} = \frac{\omega_f}{\theta_f} = d_f \cdot F = \frac{4\lambda F^2}{\pi} \quad (2.14)$$

Für einen Strahl mit der Beugungsmaßzahl $K = 1/M^2 \neq 1$ gelten analog zu den Gleichungen (2.13) und (2.14) die Beziehungen:

$$d_f = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot F \cdot M^2 \quad (2.15)$$

$$z_{Rf} = \frac{4\lambda}{\pi} \cdot F^2 \cdot M^2 \quad (2.16)$$

In der Praxis ist man an langen Rayleighlängen interessiert, da sie bei den in der Schweißanlage existierenden Positionierungstoleranzen die hier beschriebenen Fokussierkenngrößen auf der Werkstückoberfläche konstant und somit den Prozess nahezu gleich halten. Da die Rayleighlänge zu F direkt proportional ist, nimmt sie bei kleiner werdenden F -Zahlen bzw. Brennweiten wie der Fokusedurchmesser ab. Ändert sich demnach beim Schweißen mit kurzen Brennweiten die Fokusslage, hat das eine große Veränderung der Leistungsdichte zur Folge. Dies sind wichtige Zusammenhänge, die bei der Auswahl einer für den Prozess geeigneten Bearbeitungsoptik beachtet werden müssen. Es sei zusätzlich erwähnt, dass ein besser im Vergleich zu einem weniger gut fokussierbaren Strahl bei gleicher Brennweite und Durchmesser auf der Fokussierlinse eine größere F -Zahl und somit eine längere Rayleighlänge hat.

2.1.4 Qualität der Schweißnaht

Zur Bewertung einer Schweißverbindung gelten die Kriterien der DIN EN 25817 [11]. Sie beschreibt im Wesentlichen Lage, Größe, Anzahl und Ort von Fehlern. Unter Fehlern werden nach DIN EN 26520 bzw. DIN 8524 Teil 3 [12] Unregelmäßigkeiten in der Schweißverbindung sowie Abweichungen von der vorgesehenen Form und Lage der Schweißverbindung und der Schweißlinse oder der Schweißnaht verstanden.

Die Norm ordnet die Fehler in sechs Fehlergruppen. Die Fehler der ersten drei Gruppen (Poren, Risse und feste Einschlüsse) sind dabei im Wesentlichen werkstoffbedingt, während die restlichen Fehler (wie z. B. Bindefehler, Formfehler, Schmelzbadauswürfe) von den Verfahren und deren Handhabung abhängig sind.

Einige dieser Fehler werden in diesem Kapitel erläutert.

Poren

Bei den Poren wird zwischen Prozess- und Wasserstoffporen unterschieden. Die Prozessporen sind typisch für das Tiefschweißen und somit vom Verfahren bestimmt. Die Form der Dampfkapillare beim Tiefschweißen ist nicht kontinuierlich und stationär, sondern fluktuiert in ihrer Geometrie aufgrund der hohen Dynamik. Diese Fluktuation verursacht eine stetige Änderung der Einschweißtiefe entlang der Schweißnaht und kann auch zu einer kurzzeitigen Verschließung der Dampfkapillare durch die Schmelze führen, siehe Bild 2.5. Es bildet sich daher die sogenannte Verschließungsbrücke, durch die zwei Teile der Dampfkapillare entstehen. Im unteren Teil herrscht in allen Richtungen ein hoher Druck, der aber für die Zerstörung der Verschließungsbrücke im Allgemeinen nicht ausreichend ist, weil der Dampf rasch kondensiert. Wenn das Schmelzbad und somit die Verschließungsbrücke erstarren, entsteht im unteren Teil der Schweißnaht eine Pore, siehe Bild 2.5, Teil III [13], [14].

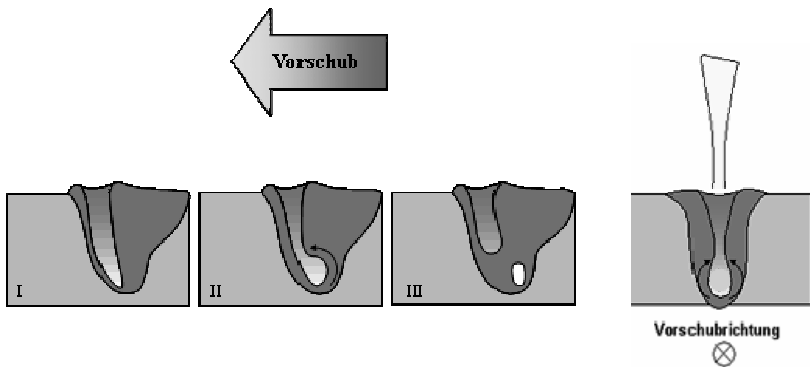


Bild 2.5: Prozessporenbildung [6], [15].

Bei dem Übergang vom Einschweißen zum Durchschweißen wandern die Prozessporen von der unteren Mitte zum unteren Rand der Schweißnaht. Das Durchschweißen führt zu einer Porenreduktion. Um Prozessporen beim Schweißen von Aluminiumlegierungen zu vermeiden, kann die Schmelzbadbreite durch die sogenannte Zweistrahlschweißtechnik vergrößert werden [16], [17].

Die zweite Art von Poren, die Wasserstoffporen, werden von der chemischen Zusammensetzung des Materials verursacht. Die Legierungen enthalten sehr oft Werkstoffe, die bei Erwärmung in der Lage sind, sich aufzulösen. Beispiel hierfür sind Wasserstoffmoleküle, die oft unvermeidlicher Bestandteil der unterschiedlichen

Aluminiumlegierungen sind. Bei Erwärmung des Werkstoffes lösen sich die Wasserstoffmoleküle auf und bilden kugelförmige Poren, die einen Durchmesser in der Größenordnung von 0,1 bis 0,5 mm haben. Der Prozess der Wasserstoffporenbildung und seine Ursachen sind in [18], [19], [20] und [21] ausführlich dokumentiert.

Beim Schweißen von verzinkten Stählen verursacht der Zn-Werkstoff in der Schmelze eine ähnliche Problematik. Da Zink eine sehr niedrige Verdampfungstemperatur hat, verdampft es bereits unterhalb der Temperatur der Stahlschmelze, was infolge der damit zusammenhängenden Vorgänge im Schmelzbad zu starker Porosität führt [22]. Eine Möglichkeit zur Vermeidung solcher Poren beim Schweißen von verzinkten Stählen in I-Naht und Überlappstoß ist die gezielte Spaltbildung zwischen den Stahlblechen, die ein leichtes Entweichen des Zn-Dampfes erlaubt. Weitere Möglichkeiten zur Vermeidung von Wasserstoffporen beim Schweißen von Zn-Stählen werden ausführlich in [22] diskutiert.

Risse

Unter Rissen versteht man in der Ausdehnung begrenzte, meist flächenförmige Werkstofftrennungen. Die Risse können nach der äußeren Erscheinung (Makro- und Mikrorisse), der Lage (Längs- und Querrisse) oder den Entstehungsbedingungen (Heiß- und Kaltrisse) sowie der Entstehungsursache (z. B. Schrumpfrisse) unterschieden werden [12], [23].

Heißrisse entstehen während des Erstarrens oder des Aufschmelzens im Bereich der Solidustemperatur. Entsprechend sind zwei Formen zu unterscheiden, der Erstarrungsrisse und der Aufschmelzungsrisse.



Bild 2.6: Heißrissbildung.

Erstarrungsrisse entstehen im Schweißgut gegen Ende der Erstarrung in dem zuletzt erstarrenden Bereich der Schmelze. Die Restschmelze, mit einer oft niedrigeren Schmelztemperatur, liegt als dünner Film auf den primär erstarrten Kristalliten. Dieser ist nicht in der Lage, die bei der Schrumpfung auftretenden Spannungen aufzunehmen,

sodass eine Trennung an den Korngrenzen erfolgt. Gut erkennbar sind Erstarrungsrisse daran, dass sie zumeist bis zur Oberfläche reichen und in der Regel in der Mitte der Schweißnaht liegen [23]. Die Heißrissbildung ist eine Funktion der chemischen Zusammensetzung des Werkstückes und der Vorschubgeschwindigkeit. Die Geschwindigkeit bestimmt die Abkühlrate und ist dadurch eng mit dem Erstarrungsprozess und der Heißrissbildung verbunden. Besonders bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten können ungünstige Spannungszustände auftreten, die zu Fehlern in der Schweißnaht führen könnten (Bild 2.6).

Aufschmelzrisse treten dagegen in der Wärmeeinflusszone der Naht bzw. bei Mehrlagenschweißungen auf. Ursache für diese Rissbildung sind wiederum niedrigschmelzende Verbindungen auf den Korngrenzen, die unter dem Einfluss der beim Schweißen eingebrachten Wärme aufschmelzen, ohne dass der Werkstoff selbst die Schmelztemperatur erreicht. Bei der Abkühlung reißen diese aufgeschmolzenen Korngrenzen infolge der Spannung beim Schrumpfen auf [23].

Heißrisse können durch Schweißen mit breitem Schmelzbad, geringer Wärmezufuhr, Verwendung von Werkstoffen höherer Reinheit und Zusatzwerkstoffen, Vorwärmung sowie freies Schrumpfen der Teile vermieden werden.

Kaltrisse entstehen entsprechend im festen Zustand bei Temperaturen im Bereich unter der Erstarrungsgrenze. Dabei wird der Werkstoff durch Schrumpfvorgänge bei der Abkühlung stark beansprucht. Dies ist sowohl mit elastischen als auch mit plastischen Verformungen verbunden. Wird das temperaturabhängige Formänderungsvermögen des Werkstoffes dabei überschritten, kommt es örtlich zur Bildung eines Risses.

Spritzer und Schmelzbadauswürfe

Der Mechanismus, der zu Schmelzbadauswürfen führt, ist vergleichbar mit jenem, der die Bildung von Prozesssporen verursacht. Innerhalb weniger Millisekunden führt das Aufblähen der Kapillare zu einem explosionsartigen Auswurf der Schmelze. Die Ursachen sind noch nicht wissenschaftlich erklärt, es kann jedoch eine eindeutige Korrelation zwischen der Häufigkeit von Auswürfen und einem lokal zu kleinen Öffnungsdurchmesser der Kapillare nachgewiesen werden. Erklärt wird dies mit der Hypothese, wonach die Bildung von Schmelzbrücken bei ungünstigsten Voraussetzungen zu einer Blockade der Metaldampfströmung führt [6]. Inwieweit dabei an der Kapillarfront im Strahlrichtung laufende Stufen („moving humps“) [24] eine Rolle spielen, ist Gegenstand jüngerer wie aktueller Untersuchungen [25], [26], [27].

Humping

Das sogenannte „Humping“ ist eine Instabilitäterscheinung, die bei sehr hohen Vorschubgeschwindigkeiten in der Schmelzeströmung weit hinter der Kapillare entsteht. Ausbildende Nahtüberhöhungen und -einfälle in mehr oder weniger periodischen Abständen sind charakteristisch für diesen Instabilitätsfehler [6]. Aufgrund der hier verwendeten vergleichsweise niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten ist das Humping für diese Arbeit nicht relevant.

2.2 Werkstoffe

Im Getriebebau werden meistens allgemeine Baustähle (St37, St52) oder tiefziehfähige Stähle, wie z. B. St W 24, mit entsprechenden Einsatz- (20MoCr4, 16MnCr5) oder Vergütungsstählen (27MnVS6), zusammengeschweißt. Eine Ausnahme ist der Bau von Ausgleichsgetrieben (AGG), bei dem für das Grundgehäuse des Tellerrads Gusseisen mit Kugelgraphit nach DIN 1693 (GGG) [28] verwendet wird. Die Zähne des Tellerrads werden selbstverständlich aus gehärtetem Einsatzstahl gefertigt.

Zu den wichtigsten Eigenschaften der allgemeinen Baustähle gehören unter anderem der niedrige Kohlenstoffgehalt, die gute Umformbarkeit in kaltem Zustand sowie die gute Schweißbarkeit. Letzteres ist von herausragender Bedeutung für den Einsatz dieser Stähle im Automobilbau, da die Industrie zunehmend von den Niet- und Schraubenkonstruktionen zum Schweißen übergeht. Aus diesen Werkstoffen werden im Getriebebau niedrig beanspruchte Dreh- oder Stanzteile hergestellt. In Tabelle 2.1 sind die physikalischen Eigenschaften der allgemeinen Baustähle aufgeführt.

Von der Gruppe der tiefziehfähigen Stähle werden im Getriebebau von der Abmessung her hauptsächlich Feinbleche der Dicke von 0,5 bis 2,99 verwendet. Daraus werden meist Teile für die automatischen Getriebe hergestellt. Die Feinbleche bestehen überwiegend aus weichen unlegierten Stählen, die sich nach dem Walzen im kaltgewalzten rekristallisierten Zustand befinden und die später durch Umformarbeiten wie Tiefziehen oder Biegen in ihre endgültige Form gebracht werden. Aufgrund des niedrigen Kohlenstoffgehalts sind tiefziehfähige Stähle sehr gut schweißbar.

Stoffkennwert	Allgemeine Baustähle (z. B. St37-2, St52-3 usw.)
c_p in kJ/kgK	0,46 - 0,48
ρ in kg/dm ³	7,85
κ in W/mK	40 - 60
α_w in 10 ⁻⁶ /K	12
β in kJ/m ³ K	3611
T_s in K	ca. 1823
T_v in K	ca. 3273

Tabelle 2.1: Physikalische Eigenschaften der allgemeinen Baustähle.

Die Einsatzstähle sind unlegierte oder niedrig legierte Baustähle mit niedrigem Kohlenstoffgehalt, die an der Oberfläche aufgekühlt und anschließend gehärtet werden. Dadurch haben diese Stähle nach dem Härten in der Oberflächenzone eine hohe Härte und eine gute Verschleißfestigkeit, während der Kern eine besonders günstige Zähigkeit aufweist [29]. Da die harte Randschicht sich hauptsächlich gegen Reibung und Druck widerstandsfähig verhält und der Kern weich und zäh ist, ist das gesamte Stahlteil unempfindlich gegen stoßende, verdrehende oder schlagende Beanspruchung. Diese Eigenschaften machen die Einsatzstähle zum idealen Werkstoff für hoch beanspruchte Drehteile, wie z. B. Wellen im Getriebebau. Außerdem sind die Einsatzstähle, wenn nicht gehärtet, gut schweißbar.

Die Vergütungsstähle sind Baustähle, die sich aufgrund ihres Kohlenstoffgehalts zum Härten eignen und die im vergüteten Zustand hohe Zähigkeit bei bestimmter Zugfestigkeit aufweisen. Sie sind im eigentlichen Sinn keine schweißbaren Stähle. Unter Beachtung einiger Randbedingungen ist jedoch das Schweißen der Vergütungsstähle möglich [29].

Die Schweißneigung des Gusseisens mit Kugelgraphit (GGG) ist abhängig einerseits von der chemischen Zusammensetzung, andererseits vom heterogenen Gefügeaufbau. Der hohe Kohlenstoffgehalt, dieses Werkstoffs, bewirkt, dass sich bei schnellem Abkühlen nach dem Schweißen in der WEZ Martensit bildet, was zu einer Versprödung führt. Beeinträchtigt wird die Schweißneigung weiterhin auch durch höhere P- und S-

Gehalte. Bei einem Schwefelgehalt über 0,06 % und einem Phosphorgehalt über 0,1 % besteht die Gefahr der Bildung von Heiß- wie auch Kaltrissen. Kritisch ist auch die Verwendung artgleicher Zusatzwerkstoffe. Sie führen zur Bildung von Ledeburit im Schweißgut, wodurch die Naht spröde und rissanfällig wird. Bedingt durch den kugelförmigen Grafit hat dieser Werkstoff, verglichen mit dem Grauguss, günstigere Verformungseigenschaften, die die Rissbildungsgefahr stark vermindern. Es ist jedoch zu beachten, dass auch hier wegen des Kohlenstoffgehaltes in der Wärmeeinflusszone (WEZ) Aufhärtungen und Risse auftreten können [23].

Zum Schweißen von Gusseisen mit Kugelgrafit stehen wie beim Schweißen mit Grauguss zwei Arbeitsverfahren zur Verfügung: Warm- und Kaltschweißen.

Beim Warschweißen wird das Gussstück langsam auf 400 bis 600 °C vorgewärmt, unter Anwendung artgleicher Zusatzwerkstoffe verschweißt und langsam abgekühlt. Das Vorwärmen ermöglicht einen Ausgleich der Spannungen und Formänderungen während des Schweißens, vermindert das Temperaturgefälle und sichert eine einwandfreie Verbindung von Grund- und Zusatzwerkstoff. Die Ledeburitbildung im Schweißgut wird dadurch weitgehend unterdrückt. Zusätzlich wird die Martensitbildung in der WEZ verhindert [23]. Eine Variante des Warschweißens ist das Halbwarm-schweißen, das sich durch örtliche Aufwärmung des Gussstückes auszeichnet. Beim Halbwarm-schweißen wird vorausgesetzt, dass das Bauteil die Möglichkeit hat, sich in der entsprechenden Spannvorrichtung auszudehnen bzw. zusammenzuziehen.

Beim Kaltschweißen wird das zu schweißende Grundstück entweder gar nicht oder nur bis etwa 300 °C vorgewärmt. Beim Kaltschweißen mit artfremdem Schweißzusatz beträgt die Vorwärmtemperatur nicht mehr als 100 °C. Zum Schweißen werden in der Regel Nickel-Eisen-Legierungen als Zusatzwerkstoff verwendet. Das führt dazu, dass das Schweißgut austenitisch bleibt. Bei Nickelgehalten kleiner als 35 % bildet sich jedoch auch bei langsamem Abkühlen im aufgeschmolzenen Teil der WEZ des Grundwerkstoffes Nickelmartensit hoher Härte [23].

2.3 Nahtvorbereitung

2.3.1 Nahtgeometrien

Wegen des geringen Schmelzvolumens beim Laserstrahlschweißen haben die Fugenformen und die schweißgerechte Bauteilkonstruktion einen besonderen Einfluss auf die Qualität des Schweißergebnisses. Die typischen Fugenformen für das Schweißen bei unterschiedlichen Blech- und Wanddicken sowie die verschiedenen Stoßarten sind in DIN EN 29692 [30] beschrieben. Die geometrischen Nahtkenngrößen bei den meisten Fugenformen und Stoßarten des Laserstrahlschweißens sind am besten in [31] dargestellt.

Im Getriebebau werden meistens Nahtgeometrien wie I- und Y-Naht am Stumpfstoß, Kehlnaht am T-Stoß und Bördelnaht am Flanschanfang verwendet. In diesem Kapitel werden in Anlehnung der entsprechenden DIN- und ISO-Normen die typischen Kenngrößen dieser drei Nahtgeometrien näher erläutert. Sie sind ein wichtiger Bestandteil einer metallografischen Untersuchung des Nahtquerschnittes.

I-Naht am Stumpfstoß

Die I-Naht stellt die einzige sinnvolle Stumpfstoßform für Dünnsbleche bis 2,5 mm dar. Alle anderen Stumpfstoßformen sind nur bei wesentlich dickeren Blechen, meistens unter Verwendung von Zusatzmaterial, anwendbar. Anlehnend an DIN 8563 Teil 3 [32] und EN ISO 13919-1 [33] sind in [31] die geometrischen Nahtkenngrößen für die I-Naht am Stumpfstoß definiert, siehe Bild 2.7.

Aus den in Bild 2.6 gezeigten Kenngrößen können zusätzlich der Durchschweißgrad (DG), dem Verhältnis zwischen Nahttiefe oder -breite und den Blechdicken, sowie die Verbindungskennzahl (VK), einer für die Kraftübertragung relevanten Nahtkenngröße, ermittelt werden:

$$DG = \frac{t}{\min(d_1, d_2)} \quad (2.17)$$

$$VK = \frac{t - h}{\min(d_1, d_2)} \quad (2.18)$$

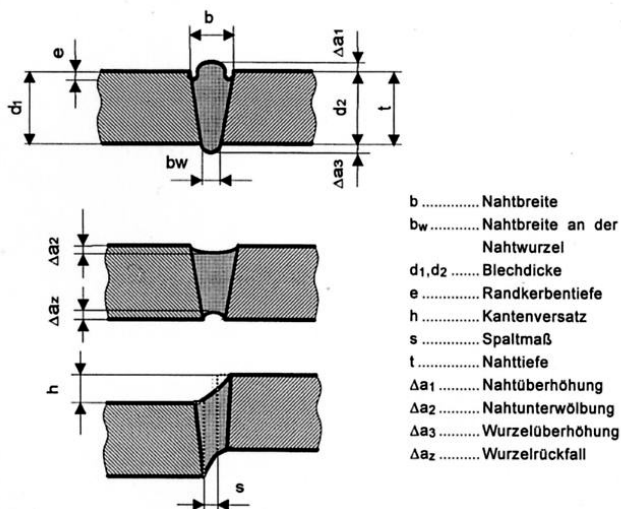


Bild 2.7: Geometrische Nahtkenngrößen bei der I-Naht am Stumpfstoß [31] unter Berücksichtigung unterschiedlicher Spaltbildung (Bild oben: „ohne Spalt“, Bild mittig „mit Spalt“) und Kantenversätze (Bilder oben und mittig: „ohne Kantenversatz“, Bild unten: „mit Kantenversatz“).

Charakteristisch für diese Nahtgeometrie und für die Auswertung am wichtigsten sind jedoch die Kenngrößen Nahtbreite an der Blechoberseite b , die Nahtbreite an der Nahtwurzel b_w im Falle einer Durchschweißung und die Nahttiefe (Einschweißtiefe) t . Anlehnend an [33] können zur Abschätzung der Schweißgeschwindigkeit in einer Verfahrensentwicklungsphase für diese Nahtform Ergebnisse von Blindschweißungen herangezogen werden, da die charakteristischen Nahtkenngrößen sehr gut mit jenen einer unter gleichen Bedingungen durchgeführten Blindschweißung übereinstimmen. Wobei durch die Blindschweißung die Problematik der Spaltbildung und des Kantenversatzes nicht nachgebildet werden kann. Aus diesem Grund ist die Nahtvorbereitung in der Praxis speziell bei der I-Naht am Stumpfstoß aufgrund des immer geringer werdenden Nahtquerschnittes für die erzielbare Nahtqualität von essenzieller Bedeutung, denn schon eine geringe Geometrieabweichung kann relativ große Nahtfehler bewirken.

Beim Laserstrahlschweißen ohne Zusatzwerkstoff, wie im Getriebebau meist der Fall, wird je nach Spaltbreite und Streckenenergie der tragende Querschnitt durch Nahtunterwölbung deutlich kleiner. Bei zu großem Spalt zwischen den zu schweißenden

Teilen kann der Laserstrahl sogar den Fügespalt passieren, ohne ein Schmelzbad zu erzeugen, sodass keine Schweißnaht entsteht. Der Kantenversatz führt auch trotz vorhandenem Nullspalt zur Verringerung des tragenden Querschnittes. Die in der Automobilindustrie üblichen Motorenleistungen verlangen den Getriebeteilen immer höhere Drehmomente ab, sodass in Bezug auf den tragenden Querschnitt sowohl der Fügespalt als auch der Kantenversatz in der Praxis sehr klein gehalten werden müssen. Die Grenzwerte für Fügespalt und Kantenversatz hängen von der Blechdicke ab und werden durch Multiplikation der Blechdicke mit dem Faktor 0,1 ermittelt.

Bei dieser Nahtgeometrie hängt die Auswahl der Schweißparameter sehr stark von den produktionstechnischen Anforderungen ab. Im Getriebebau dürfen keine hohe Streckenenergien verwendet werden, da erstens die thermische Ausdehnung der Bauteile sehr gering gehalten werden muss, und zweitens die Schmelze im dadurch entstehenden breiten Schmelzbad von der Oberflächenspannung nicht getragen werden kann, wodurch ein Teil der Schmelze nach unten fällt und somit Löcher in der Schweißnaht entstehen.

Bördelnaht am Flanschanfang

Die Bördelnaht am Flanschanfang ist eine im Dünnblechbereich des Getriebebaus, insbesondere bei automatischen Getrieben, sehr oft eingesetzte Nahtgeometrie. Die geometrischen Nahtkenngrößen für diese Nahtgeometrie sind schematisch in Bild. 2.8 dargestellt.

Ähnlich wie bei der I-Naht am Stumpfstoß können die Kenngrößen Durchschweißgrad (DG), Einschweißgrad (EG), Verhältnis zwischen einem Teil der Nahttiefe oder breite und einer Blechdicke, und die Verbindungskennzahl (VK) ermittelt werden:

$$DG = \frac{t_1 + t_2 + s}{d_1 + d_2 + s} \quad (2.19)$$

$$EG = \min \left(\frac{t_1}{d_1}, \frac{t_2}{d_2} \right) \quad (2.20)$$

$$VK = \frac{t}{\min(d_1, d_2)} \quad (2.21)$$

Da die Bördelnaht am Flanschanfang der I-Naht am Stumpfstoß sehr ähnelt, gelten die gleichen Bedingungen bezüglich des zulässigen Fügespalts. Durch einen vorhandenen Fügespalt kann die Laserstrahlung die Fügezone passieren, ohne ein entsprechendes

Schmelzbad zu erzeugen, sodass keine Schweißverbindung mehr möglich ist. Trotz dieser Ähnlichkeit können bei dieser Nahtgeometrie zur Abschätzung der Schweißgeschwindigkeit in einer Verfahrensentwicklungsphase Ergebnisse von Blindschweißungen nicht herangezogen werden, da die Wärmeleitung bei dieser Nahtform anders abläuft.

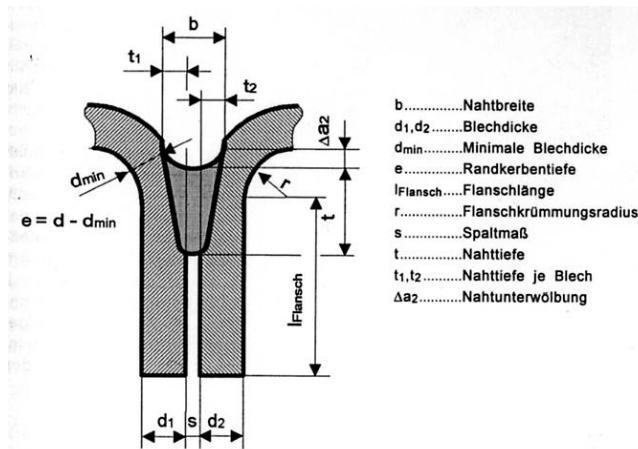


Bild 2.8: Geometrische Nahtkenngrößen bei der Bördelnaht am Flanschanfang einschließlich Spalt [31].

Ein Kantenversatz ist bei dieser Nahtform jedoch nicht kritisch, denn durch die Krümmung der beiden Bleche wird der Laserstrahl „selbst fokussiert“. Zudem läuft das von der Krümmung aufgeschmolzene Material automatisch in den Spalt zwischen den Blechen und verbindet sich mit dem Schmelzbad der entstehenden Schweißnaht. Wesentlich empfindlicher reagiert diese Nahtgeometrie auf zu großen Streckenenergien, da die Wärmeableitung aus dem Flansch verhindert ist. Zusätzlich führt das Aufschmelzen des Materials im Bereich der Flanschkrümmung zur Schwächung des tragenden Nahtquerschnittes.

Kehlnaht am T-Stoß

Die Kehlnaht am T-Stoß ist im Getriebebau eine im Dickblechbereich ($d > 2,5$ mm) oft eingesetzte Nahtgeometrie. In Bild 2.9 [31] sind anlehnend an [32] und [33] die geometrischen Nahtkenngrößen auch bei dieser Nahtgeometrie gezeigt.

Die dimensionslosen Kennzahlen können nach folgenden Formeln ermittelt werden.

$$DG = \frac{t_2}{d_2} \quad (2.22)$$

$$EG = \frac{t_1}{d_1} \quad (2.23)$$

$$VK = \frac{\min(b_v, d_v, t - \Delta a_2, t_2)}{\min(d_1, d_2)} \quad (2.24)$$

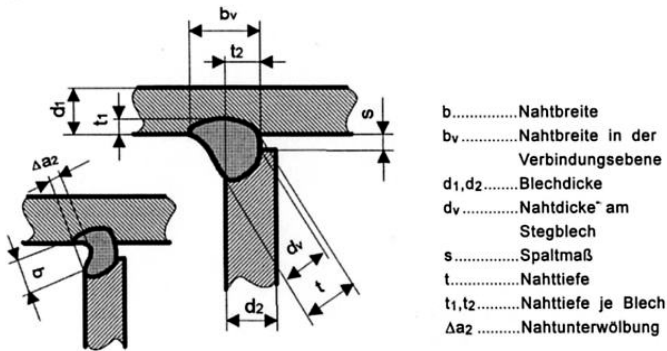


Bild 2.9: Geometrische Nahtkenngrößen bei der Kehlnaht am T-Stoß einschließlich Spalt [31].

Auch bei dieser Nahtgeometrie stellt der Fügespalt eine fertigungstechnische Problemgröße dar. Während bei relativ geraden Stoßkanten der Spalt noch mit Hilfe von Spannelementen minimierbar ist, wirken sich bei komplizierten Konturen kleine Unterschiede der Abweichungen von Geraden schon drastisch aus. Da die Spaltüberbrückbarkeit des Schmelzbades begrenzt ist, sind somit Schweißnahtfehler vorprogrammiert.

Bei dieser Nahtgeometrie kann das Laserstrahlschweißen nur durch einen großen Spannaufwand zur Beseitigung des Fügespalts realisiert werden. Gleichzeitig muss die exakte Position der Fügestelle sichergestellt werden.

2.3.2 Oberflächenreinheit und Beschichtungen

Da die Werkstückoberfläche in unmittelbarer Wechselwirkung mit dem Laserstrahl steht, hat sie einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Laserstrahlschweißung. Fett, Öl oder Waschmittelrückstände auf der zu schweißenden Nahtoberfläche können zu Poren und Auswürfen in der Schweißnaht führen. Aus diesem Grund ist es wichtig, dass die Bauteile vor dem Schweißprozess gewaschen und entfettet werden. Da Oberflächenbeschichtungen Absorptionsverhalten und Rissbildung beeinflussen können, sollten diese vor dem Schweißen bekannt sein, um den Einsatz entsprechender verfahrenstechnischer Maßnahmen, wie z. B. Aufwärmverfahren vor oder nach dem Schweißen, zu ermöglichen.

2.3.3 Spannvorrichtung

Da in den vorgestellten Nahtgeometrien die Größe des Fügespalts für die Nahtqualität entscheidend ist, muss zur Verminderung des Fügespalts eine Spannvorrichtung verwendet werden, wobei bei bestimmten Nahtgeometrien die zu verbindenden Bauteile wenn möglich auch gegeneinander gepresst werden sollten, insbesondere bei der Kehlnaht am T-Stoß.

Das Hauptziel einer Spannvorrichtung ist es, die zu schweißenden Bauteile zu fixieren, damit Verzug während des Schweißens vermindert wird und um die Fügestelle unter dem Laserstrahl zu positionieren. Hierbei muss auf die geforderte Genauigkeit und auf die Bauteiltoleranzen geachtet werden.

Bei der Konstruktion einer Spannvorrichtung sollte beachtet werden, dass während des Schweißens Spritzer entstehen, die die Spannvorrichtung verschmutzen und sogar die Fixierung der Bauteile behindern können. Außerdem sollte ausreichend Platz für Gasanschlüsse eingeplant werden.

2.3.4 Heften

Im heutigen Motoren- und Getriebebau der Automobilindustrie werden überwiegend rotationssymmetrische Bauteile geschweißt. Bei diesen Bauteilen kann in der Regel der durch Wärmeeinbringung entstandene Verzug nicht immer durch die Spannvorrichtung kompensiert werden. Deshalb ist ein Heftvorgang vor dem Schweißen sinnvoll und in vielen Fällen sogar notwendig. Im Normalfall wird hier ein voller Um-

fang mit Vorschubgeschwindigkeiten um das bis zu Vierfache der Schweißgeschwindigkeit geheftet. Eine zweite Möglichkeit, die Bauteile zu heften, sind Punktschweißungen, die in bestimmten Abständen auf dem Bauteil durchgeführt werden.

Der Verzug durch Wärmeerbringung und die daraus entstandenen Eigenspannungen wurden in [34] ausführlich diskutiert.

2.4 Produktionsanlagen

Die Komponenten einer Produktionsanlage sind in der Regel nach fünf Hauptgruppen gegliedert. Zur ersten Hauptgruppe gehört die Strahlquelle. Die zweite Hauptgruppe besteht aus den Strahlführung- und den Strahlformungskomponenten sowie den Komponenten des Prozessadapters. In der dritten Hauptgruppe sind die Komponenten der Werkstückhandhabung zusammengefasst. Die Hauptgruppen vier und fünf vereinen in sich Komponenten der Steuerung und der Sicherheit.

Hier wird nur auf die Komponenten der ersten drei Hauptgruppen einer Produktionsanlage eingegangen. Darüber hinaus wird in einem kleinen Beispiel das Konzept einer typischen Schweißanlage aus der heutigen Getriebefertigung erläutert und dabei Größen wie Taktzeit t_z , Lasernutzungsgrad und Durchlaufzeit (DLZ) diskutiert.

2.4.1 Komponenten der Hauptgruppen

Strahlquellen

Im Getriebebau werden zumeist CO₂-Laser als Strahlquellen zum Schweißen verwendet. Wegen der sehr guten Fokussierbarkeit bei gleichzeitig hohen Leistungen bieten diese Geräte eine gute Zugänglichkeit zu schwer erreichbaren Verbindungsstellen und erlauben dabei die von der Industrie geforderten Einschweißtiefen bzw. Verbindungsquerschnitte zu realisieren. Zurzeit werden im Getriebebau je nach Bauteilaufgabe CO₂-Laser zwischen 2 und 6 kW eingesetzt (Bild 2.10).

Konventionelle lampengepumpte Festkörperlaser (LFKL) sind für die Aufgaben im Getriebebau nicht geeignet, da sie kommerziell bis 4 kW bei einer nur geringen Fokussierbarkeit verfügbar sind. Damit können die im Getriebebau gewünschten schlanken und tiefen Nähte nicht erreicht werden.

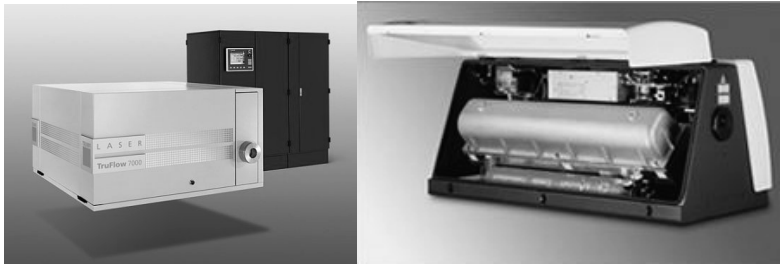


Bild 2.10: CO₂-Laserquellen TruFlow von Trumpf (links) und Slab von Rofin (rechts).

Strahlführung, Strahlformung und Prozessadapter

Der technische Aufbau der Strahlführung hängt von der Wellenlänge des Laserstrahls und somit von der Art der Laserquelle ab. Bei CO₂-Lasern wird der Laserstrahl durch Spiegel-Rohr-Systeme zum Werkstück geführt. Diese Systeme sind sehr aufwendig zu justieren, unflexibel und schmutzanfällig. Eine größere Flexibilität wird erreicht, wenn der Strahl mit Hilfe von Gelenkarmen geführt wird.

Der Laserstrahl der Festkörperlaser kann dagegen durch die Verwendung von Lichtleitfasern flexibel und ohne aufwendige Justierarbeit zum Werkstück gebracht werden. Typischerweise lassen sich bereits im Lasergerät ohne zusätzliche Justierarbeit mehrere Fasern gleichzeitig anschließen, die durch einen Schaltmechanismus den Laserstrahl an mehrere Bearbeitungsstationen hintereinander (Timesharing) oder parallel (Powersharing) zur Verfügung stellen.

Im Timesharing-Betrieb lässt sich die Strahlquelle in einer Station nutzen, während an einer anderen die Be- bzw. Entladungsphase vonstattengeht. Der Aufwand einen Timesharing-Betrieb zu realisieren ist bei der Strahlführung über Spiegelsystemen deutlich höher als bei der Strahlführung über Lichtleitfasern.

Die optische Strahlformung am Ende der Strahlführung erfolgt in der Regel beim CO₂-Laser durch Parabolspiegel und beim Festkörperlaser durch Linsen. Die Linsen sind in einer Bearbeitungsoptik eingebaut, in der der Strahl nach Austritt aus der Lichtleitfaser erst kollimiert und dann fokussiert wird. Die für den jeweiligen Schweißprozess gewünschten Fokusdurchmesser (bzw. Leistungsdichten) werden durch die Kombination unterschiedlicher Linsen bzw. Linsensysteme erreicht.

Wirtschaftlich gesehen sind die Linsen gegenüber den Spiegeln eine kostengünstigere Lösung der Strahlformung. Die Spiegel dagegen lassen sich besser kühlen und nach

einer Verschmutzung unkompliziert reinigen. Als Leistungsverlust ist sowohl bei den Spiegeln als auch bei den Linsen mit ca. 2 % pro Spiegel bzw. Linse zu rechnen.

Die Aufgabe des nach der Strahlformung eingebauten Prozessadapters ist die reproduzierbare Zuführung der Prozessmedien, wie Schutzgas und evtl. Zusatzwerkstoff sowie der effektive Schutz der Bearbeitungsoptik vor Schweißspritzern und Rauch.

Werkstückhandhabung

Neben der Strahlquelle, der Strahlführung, der Strahlformung und dem Prozessadapter stellt die Werkstückhandhabung, bestehend aus einer Be- und Entladungseinrichtung (1), einer Press- (2), einer Spann- (3) und einer Bewegungsvorrichtung (z. B. Drehachse) (4), eine weitere Hauptgruppe einer Produktionsanlage dar, siehe Bild 2.11. Zu dieser Gruppe können zusätzlich je nach Anlagenprinzip auch Transportbänder und Komponente zur Werkstückeinschleusung gehören.

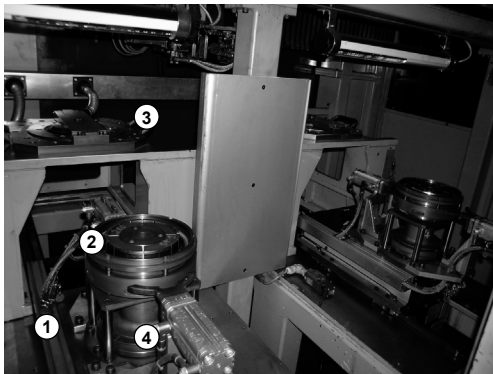


Bild 2.11: Beispiel einer Anlage zum Laserstrahlschweißen von Getriebeteilen mit zwei Be- und Entladungseinheiten [Quelle: Maschinenfabrik Arnold].

Die Bewegung des fokussierten Laserstrahls auf dem Werkstück kann grundsätzlich durch Bewegung der Strahlquelle, des Strahlführungsystems, des Werkstückes oder durch eine Kombination daraus erfolgen. Grundsätzlich hängt die tatsächliche Realisierung von der Schweißaufgabe ab. Im Getriebebau fallen zweidimensionale (2D) Schweißnahtbahnen an rotationssymmetrischen Teilen an. Das Werkstück wird durch eine Rotationsachse bewegt. Der fokussierte Laserstrahl hat auf dem Werkstück eine feste Position.

2.4.2 Typisches Beispiel einer Serienschweißanlage der Getriebefertigung

In Bild 2.12 ist die schematische Darstellung einer Schweißanlage der Maschinenfabrik Arnold aus der heutigen Getriebeserienfertigung zu sehen. Diese Anlage hat zwei Werkstückbearbeitungsstationen kombiniert mit zwei Be- und Entladungseinheiten, siehe auch Bild 2.11. In ihr werden zwei Einzelteile des Zusammenbaus (ZB) „Hohlrad“ zusammenschweißt. Die hier angenommenen Wirtschaftlichkeitsfaktoren und gemessenen Taktzeiten werden in Kapitel 6 als Grundlage für die neuen Anlagenkonzepte verwendet.

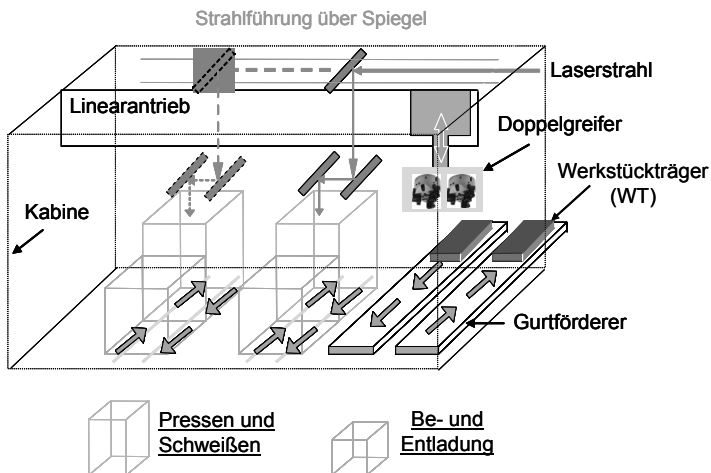


Bild 2.12: Schematische Darstellung einer Schweißanlage aus der heutigen Serienfertigung [35].

Die zu schweißenden Einzelteile des Zusammenbaus (ZB) „Hohlrad“, Hohlrad und Hohlradträger, gelangen mittels eines Gurtfördersystems zu den Be- und Entladungseinheiten. Dort werden sie von einer Linearachse mit einem Doppelgreifer, der in der Lage ist, beide Einzelteile gleichzeitig aufzunehmen, in die Schweißvorrichtung einer der beiden Be- bzw. Entladungsschlitten gelegt. Das Einlegen der Einzelteile in die Schweißvorrichtung geschieht in einer festgelegten Reihenfolge. Im Be- bzw. Entladungsschlitten werden die Einzelteile zunächst fixiert und dann in der Werkstückbearbeitungsstation zusammengepresst. Der Pressvorgang wird durch eine Spindel durchgeführt. Als Anschlag beim Pressvorgang dient dabei eine Schweißbrille, die

über dem Schlitten eingebaut ist. In der Werkstückbearbeitungsstation wird der Pressvorgang beendet und die Einzelteile zusammengeschweißt. Beim Schweißvorgang wird das Bauteil durch eine Rotationsachse gedreht, die Schweißoptik dagegen bleibt in fester Position. Während des Schweißvorgangs bestückt der Doppelgreifer den zweiten Be- bzw. Entladungsschlitten. Nach dem Schweißvorgang, der aus Heften und Schweißen besteht, wird einerseits das geschweißte Bauteil zurück zu dem Gurtfördersystem transportiert, andererseits der bewegliche Schweißkopf zu einer neuen Schweißposition über der zweiten Werkstückbearbeitungsstation befördert. Diese Beförderung findet mithilfe einer zweiten Linearachse statt. An dieser Linearachse ist die Strahlführung bestehend aus gekühlten, molybdänbeschichteten Kupferspiegeln und Rohren bzw. Teleskoprohren montiert.

Da die Wellenlänge des CO_2 -Lasers von Plexiglas absorbiert wird, reicht es für die Sicherheit aus, wenn die Anlagenkabine aus optisch transparenten Plexiglasscheiben gebaut wird. Somit können an der Anlage Einrichtarbeiten sehr leicht durchgeführt werden.

Alle Wirtschaftlichkeitsfaktoren einer Schweißanlage, außer dem Maschinenstundensatz (MSS), können mittels der Takt- und der Durchlaufzeit ermittelt werden. Nach [36] ist die Taktzeit t_Z die Zeit, bei der eine Mengeneinheit hergestellt wird, damit das Fließsystem die Sollmengenleistung erbringt. Ein weiterer Wirtschaftlichkeitsfaktor ist die Durchlaufzeit (DLZ), welche der Zeit entspricht, die ein Einzelteil benötigt, um die Schweißanlage zu durchlaufen [37].

Zunächst wurde bei dieser Schweißanlage der Maschinenfabrik Arnold die theoretische Taktzeit t_Z ermittelt. Dafür wurde der Gesamtprozess „Laserstrahlschweißen“ in Einzelprozesse aufgeteilt und die Zeiten dieser Einzelprozesse in der Produktion gemessen, sie sind in dem Taktzeitdiagramm in Bild 2.13 dargestellt. Da es zwischen dem Schweißprozess an der Station 1 und dem der Station 2 eine Wartezeit, während der die Schweißoptik von der einen zu der anderen Werkstückbearbeitungsstation bewegt wird, gab, konnte eine Diskrepanz zwischen den in Bild 2.12 dargestellten Taktzeiten festgestellt werden. Die theoretische Taktzeit der Schweißanlage wurde aus Mittelwert der Taktzeit beider Stationen ermittelt und lag bei 18,75 s.

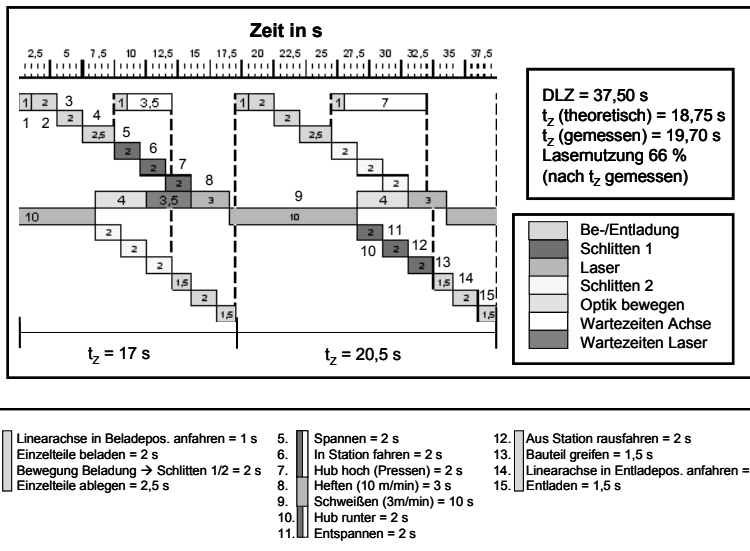


Bild 2.13: Taktzeitdiagramm einer Schweißanlage aus der heutigen Serienfertigung.

Danach wurde die tatsächliche Taktzeit ermittelt, in dem mithilfe einer Stoppuhr die Zeiten von zehn geschweißten Bauteilen gemessen wurden. Demnach lag die tatsächliche Taktzeit bei 19,7 s. Der Unterschied zwischen der theoretischen und der gemessenen Taktzeit ist darin begründet, dass bei der Ermittlung der theoretischen Taktzeit infolge der Aufteilung in Einzelprozesse die Kommunikationszeiten zwischen den einzelnen Maschinenkomponenten nicht berücksichtigt wurden.

Mittels der tatsächlichen Taktzeit t_z kann der Lasernutzungsgrad ermittelt werden. Bei einer gemessenen Taktzeit von 19,7 s wird für diese Schweißanlage unter Berücksichtigung der Schweißzeiten (insgesamt 13 s) ein Lasernutzungsgrad von ca. 66 % unter Vollauslastung berechnet. Anschließend wurde die Durchlaufzeit (DLZ) ermittelt. Sie betrug bei dieser Anlage ca. 37,5 s.

Als ein weiterer Wirtschaftlichkeitsfaktor gibt der Maschinenstundensatz (MSS) die Kosten an, die eine Maschine oder Anlage in einer Stunde verursacht. Dabei werden die sogenannten maschinenabhängigen Kosten ins Verhältnis zur Maschinenlaufzeit in Stunden gesetzt [38]. In dieser Arbeit wurden zur Erststellung von Wirtschaftlichkeitsberechnungen die maschinenabhängigen Kosten wie Abschreibung für Ab-

nutzung (AfA), kalkulatorische Zinsen, laufende Kosten (Strom, Wasser, Schutzgas), Personal-, Instandhaltungs- sowie Raumkosten verwendet.

2.5 Verfahren zur Beurteilung von Laserschweißnähten

Prinzipiell sind bei Laserschweißnähten alle zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfverfahren anwendbar. Bei der Anwendung dieser Prüfverfahren sollten jedoch die bauteil- und produktspezifischen Anforderungen beachtet werden.

Zerstörende Prüfung

Die zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen ist in verschiedenen DIN-Normen definiert. Mit dieser Prüfung werden die metallurgischen Eigenschaften der Schweißverbindung und der Wärmeeinflusszone aufgeschlüsselt. In der industriellen Fertigung werden Schweißnähte an tragenden und drehmomentübertragenden Verbindungen zumeist nach den Vorgaben des DIN EN 1321 [39] untersucht. Dabei werden die Schweißnähte quer zur Schweißrichtung geschnitten und die Querschliffe mikroskopisch beurteilt, indem die Nahttiefe, die Nahtbreite und der Verbindungsquerschnitt vermessen werden, siehe Bild 2.14. Sehr oft werden in der Praxis Vermessungen des Nahtversatzes in lateraler Richtung gemacht, indem die Schweißung mit geringer Leistung durchgeführt und anschließend auf dem Querschliff die Wurzelposition zur theoretischen Mitte der Schweißnaht vermessen wird.

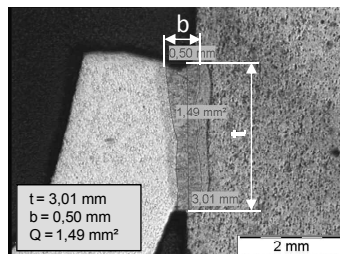


Bild 2.14: Beispiel einer metallografischen Untersuchung. Die Nahtgeometrie wird oft beim Schweißen von Teilen automatischer Getriebe verwendet.

Bei besonderen Werkstoffkombinationen wird zusätzlich eine Härteprüfung nach DIN EN 1043-2 [40] durchgeführt, indem innerhalb der Schweißnaht, in der Wärmeeinflusszone und im Grundwerkstoff die Härte vermessen wird. Dabei werden Rück-

schlüsse auf die Festigkeit der Schweißnaht und die Möglichkeit zur Entstehung von Kaltrissen in der Schweißverbindung gezogen.

Weitere zerstörende Prüfungen sind: Bruchprüfung, Zugversuch, technologischer Biegeversuch, Kerbschlagbiegeversuch, Tiefungsversuch usw., die im Rahmen dieser Arbeit aber nicht zum Einsatz kamen.

Zerstörungsfreie Prüfung

Der Nachteil der zerstörenden Prüfungen ist die Zerstörung der Schweißnaht und somit des Bauteils. Aus diesem Grund bemüht sich die Industrie um eine flächendeckende Durchführung der zerstörungsfreien Prüfung, zu der Verfahren wie Ultraschall oder Wirbelstrom gehören. Leider ist diese Prüfung, vor allem bei kleinen Nahtquerschnitten, sehr komplexen größeren Querschnitten oder komplizierten Nahtgeometrien, nur bedingt einsetzbar. Als Vorbereitung müssen auch bei manchen Anwendungen vor der Prüfung die Bauteile nachbearbeitet werden. Dies verschlechtert enorm die Ausbringung und somit die Wirtschaftlichkeit der Schweißanlage.

Prüfung durch Sichtkontrolle

Eine sehr verbreitete Prüfmethode ist die Bewertung des Nahtäußeren durch eine Sichtmethode. Die Sichtmethode ist die erste und in vielen Anwendungen die einzige Kontrollmaßnahme, die vom Hersteller durchgeführt wird, sofern zwischen dem Lieferanten und dem Käufer keine technischen Lieferbedingungen festgelegt sind. Durch die Sichtkontrolle können jedoch nur typische äußere Unregelmäßigkeiten, wie z. B. Randkerben, Schweißspritzer auf der Nahtoberfläche, starke Überhöhung und Unterwölbung an der Nahtoberseite, beurteilt werden.

Prozessüberwachung

Da die Sichtkontrolle eine subjektive und zeitaufwendige Prüfmethode mit personenabhängigen Ergebnissen und folglich enormem Bildungsaufwand des Schweißpersonals darstellt, sucht die Industrie nach neuen Ansätzen zur Kontrolle von laser-geschweißten Nähten. Ein neuer Ansatz zur objektiven Prozesskontrolle beim Laserstrahlschweißen ist die Prozessüberwachung durch fotodioden- und kamerabasierte Überwachungssysteme. Das Thema „Prozessüberwachung“ ist in [41], [42], [43], [44] und [45] ausführlich dokumentiert.

Diese Prüfkontrolle kann in zwei Gruppen unterteilt werden. Die erste Gruppe ist die sogenannte Online-Prozessüberwachung, die während des Schweißprozesses stattfindet und somit die Maschinenausbringung zeitlich nicht beeinflusst, siehe Bild 2.15. Die zweite Gruppe ist die Offline-Prozessüberwachung, die nach dem Schweißprozess stattfindet und für die Prozesse und Anwendungen interessant sind, in denen die Maschinenausbringung keine große Rolle spielt, aber das Feststellen der Schweißnahtqualität entscheidend ist.

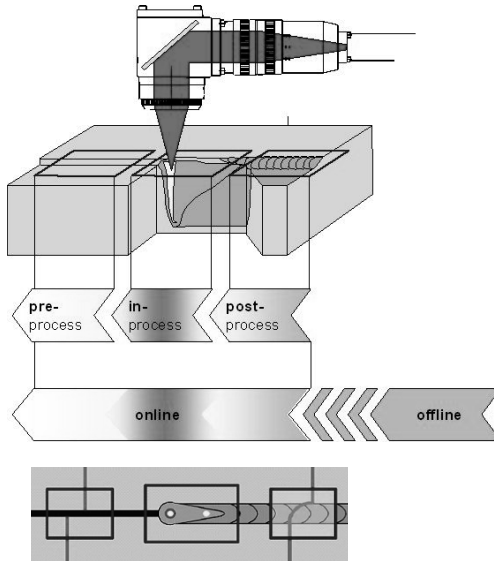


Bild 2.15: Schematische Darstellung einer Online-Prozessüberwachung.

Die On-Line-Prozessüberwachung kann ihrerseits in drei Abschnitte unterteilt werden, in die Pre-, In- und Postprozessüberwachung. Das Ziel der sogenannten Pre-Prozessüberwachung ist es, die Bearbeitungsoptik in die richtige Schweißposition zu führen und somit die Einhaltung der vorgegebenen Parameter Fokuslage und Lateralversatz sicherzustellen. Dies geschieht normalerweise durch ein Triangulationsverfahren. Die In-Prozessüberwachung detektiert Unterschiede im Schweißprozess selbst. Dafür gibt es unterschiedliche Methoden und Ansätze; hierzu gehören die Berechnung der geometrischen Eigenschaften des Schweißprozesses mittels Kamertechnik (Bildbearbeitung) und die Aufnahme von Prozessstrahlung in bestimmten Wellenlängenbereichen mittels Fotodioden. Die Postprozessüberwachung untersucht die Oberraupe

der Schweißnaht, üblicherweise mittels eines Triangulationsverfahrens oder einer Graubildauswertung. Sie kann auch offline erfolgen.

3 Systemtechnik, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel wird näher auf die verwendete Systemtechnik eingegangen. Die Komponenten des Versuchsaufbaus, wie z. B. Strahlquellen, Strahlführung und Strahlformung sowie Bearbeitungsstationen, werden beschrieben. Darüber hinaus werden die in dieser Arbeit verwendeten Werkstoffe und ihre chemische Zusammensetzung näher erläutert.

3.1 Strahlquellen

Dieser Abschnitt beschäftigt sich zuerst mit den Eigenschaften und dem mechanischen Aufbau der Festkörperlaser, deren Vertreter in dieser Arbeit der Scheiben- und der Faserlaser sind. Danach werden die Eigenschaften und der mechanische Aufbau der CO₂-Laser behandelt. Die meisten hier diskutierten Schweißversuche wurden mit dem Scheibenlaser durchgeführt. Nur in einigen Vergleichsversuchen wurden Faser- und CO₂-Laser verwendet.

Das Konzept des lampengepumpten Festkörperlasers (LPFKL) kann gleichermaßen als Grundlage für den mechanischen Aufbau und die Eigenschaften des Scheiben- und Faserlasers angesehen werden. Das laseraktive Medium (LAM) dieses Lasers besteht aus Kristallen, den sogenannten Wirtsmaterialien, die mit Metall-Ionen oder Ionen seltener Erden dotiert werden. Das Wirtskristall des lampengepumpten Festkörperlasers besteht aus Yttrium-Aluminium-Granat (YAG), bei dem im Kristallgitter Y³⁺-Ionen durch Nd³⁺-Ionen ersetzt sind (Nd:YAG) [3]. Das LAM, das bei diesem Laser die Form eines Stabes hat, wird optisch mittels Krypton- oder Xenon-Bogenlampen angeregt. Da diese Bogenlampen ein breitrandiges Licht erzeugen, wird nur ein Teil dieses Lichts zur Lasererzeugung genutzt. Somit beträgt der Gesamtwirkungsgrad η_L (elektrisch/optisch) des lampengepumpten Festkörperlasers nur 2 - 5 %. Da die Kühlung des Laserstabes durch seine Außenfläche erfolgt, entsteht im LAM ein radialer Temperaturgradient, der seinerseits zu einer ungleichförmigen Verteilung des Brechungsindex und somit zu dem sogenannten „thermischen Linseneffekt“ führt. Der

thermische Linseneffekt verschlechtert die Strahlqualität eines Lasers und somit seine Fokussierbarkeit (siehe auch Abschnitt 2.1.3).

Eine Verbesserung dieses Konzepts stellen die diodengepumpten Festkörperlaser (DPFKL) dar. Bei diesen Lasern wurden die chemische Zusammensetzung des LAM und seine bauübliche Form beibehalten. Es wurden lediglich die Bogenlampen durch Diodenlaser ersetzt. Aufgrund des im Vergleich zu den Bogenlampen wesentlich schmaleren Emissionsspektrums der eingesetzten Diodenlaser führte diese Maßnahme zur Verbesserung des Gesamtwirkungsgrads bis ca. 10 % [6]. Durch das Beibehalten der Form erfolgt die Kühlung des LAM bei diesen Systemen analog zu den lampengepumpten Festkörperlaser durch seine Außenfläche. Deshalb ist die Strahlqualität auch hier durch den thermischen Linseneffekt begrenzt.

Bei den diodengepumpten Festkörperlaser höchster Brillanz (Scheiben- und Faserlaser) wurde nicht nur die Anregungstechnik, sondern auch die Geometrie des Wirtskristalls des LAM und die Kühlung geändert. Ziel dieser Änderungen war es, den thermischen Linseneffekt zu reduzieren. Damit wurden diodengepumpte Festkörperlaser neuester Generation erhalten, die in sich die Vorzüge des CO₂-Lasers - hohe Strahlqualität und hoher Gesamtwirkungsgrad - und die Vorteile einer niedrigeren Wellenlänge der bisherigen Festkörperlaser vereinen.

Durch die prozess- und systemtechnischen Vorteile des Festkörperlaser und die neu gewonnenen Vorteile der hohen Strahlqualität und des hohen Gesamtwirkungsgrads eröffneten diese Systeme neue Anwendungsmöglichkeiten für die Lasertechnik. Weitere Entwicklungen bei den Laserdioden, die auch hier zur Anregung des LAM verwendet werden, erlauben in den heutigen diodengepumpten Festkörperlaser höchster Brillanz längere Betriebszeiten, als dies vor wenigen Jahren der Fall war. Nach Herstellerangaben müssen Diodenlaser heute erst nach ca. 100.000 Betriebsstunden ersetzt werden (Tendenz steigend). Infolgedessen sind die Betriebskosten dieser Strahlquellen entsprechend niedrig. Die Kombination aus einem hohen Gesamtwirkungsgrad und niedrigen Betriebskosten macht diese Strahlquellen aus wirtschaftlicher Sicht äußerst attraktiv.

Scheibenlaser

Der Wirtskristall des Scheibenlaser hat die Form einer dünnen Scheibe und besteht aus Yttrium-Aluminium-Granat, bei dem im Kristallgitter Y³⁺-Ionen durch Yb³⁺-Ionen (Yb:YAG) ersetzt wurden. Da die Dicke der Scheibe sehr viel geringer als ihr Durchmesser ist, kann sie nicht über ihren Umfang gekühlt werden. Stattdessen erfolgt die

Kühlung stirnseitig, siehe Bild 3.1. Dies führt zu einer Verminderung des radialen Temperaturgradienten und des damit verbundenen thermischen Linseneffekts [6].

Die Anregung der Scheibe erfolgt mittels Diodenlaser. Sie erzeugen eine Pumpstrahlung, die sehr schmalbandig und ideal für den Energieübergang abgestimmt ist. Mithilfe eines Parabolspiegels und verschiedenen Umlenkprismen wird die Pumpstrahlung immer versetzt mehrfach auf den Laserkristall fokussiert, sodass die Gesamtabsorption der Pumpstrahlung im Kristall gut 90 % betragen kann [6]. Die Auskopplung des erzeugten Laserstrahls, die eine Wellenlänge von 1030 nm hat, erfolgt durch den sogenannten Auskoppelspiegel.

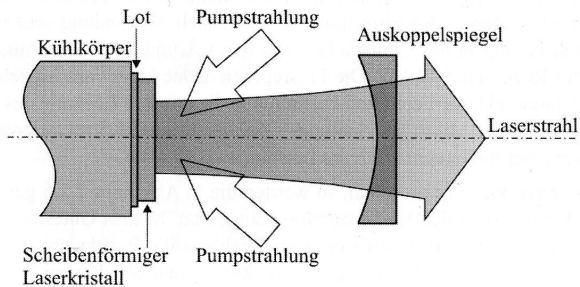


Bild 3.1: Schematischer Aufbau des Scheibenlasers [6].

In dieser Arbeit stehen drei Scheibenlaser mit einer Gesamtleistung P_L von 3, 4 und 6 kW zur Verfügung. Der 3kW-Scheibenlaser hat ein Strahlparameterprodukt $w_0\theta_0$ von 6 mm*mrad. Das Strahlparameterprodukt des 4kW-Scheibenlasers beträgt 8 mm*mrad. Die 6kW-Strahlquelle hat dagegen, laut Herstellerangaben, 10 mm*mrad. Der Gesamtwirkungsgrad dieser Strahlquellen wird mit 16 % angegeben. Als industrielles Beispiel ist in Bild 3.2 ein 6kW-Scheibenlaser der Fa. Trumpf gezeigt. Zurzeit sind kommerziell Scheibenlaser bis 16 kW bei einem Strahlparameterprodukt bis 12 mm*mrad erhältlich. Der Gesamtwirkungsgrad dieser Strahlwerkzeuge liegt, laut Hersteller, bei ca. 20 %.



Bild 3.2: 6kW-Scheibenlaser [Quelle: Trumpf].

Faserlaser

Der dotierte Kern einer Glasfaser bildet beim Faserlaser das laseraktive Medium (LAM). Das häufigste Dotierungselement für den laseraktiven Faserkern ist Erbium, gefolgt von Ytterbium, Neodym und Thulium. Für Leistungen größer 1 kW wird Ytterbium als Dotierungselement verwendet, was zu Laserwellenlängen zwischen 1070 und 1080 nm führt. Da die Glasfaser einen sehr kleinen Durchmesser - bei gleichzeitig großer Länge - hat, wird der thermische Linseneffekt bei diesem Laserkonzept durch die laterale geometrische Begrenzung deutlich reduziert. Für die Anregung werden auch hier Diodenlaser verwendet.

Die aktive Glasfaser und die Anregungstechnik stellen die wichtigsten Komponenten der in Bild 3.3 gezeigten Single-Mode (SM) Faserlasereinheit dar. Zurzeit werden kommerziell Single-Mode Faserlaser bis ca. 2 kW angeboten. Durch die Zusammenführung mehrerer Single-Mode Faserlaser kann die Laserleistung theoretisch beliebig gesteigert werden. Dadurch entsteht der sogenannte Multi-Mode (MM) Faserlaser, der eine äußerst kompakte Bauweise aufweist.

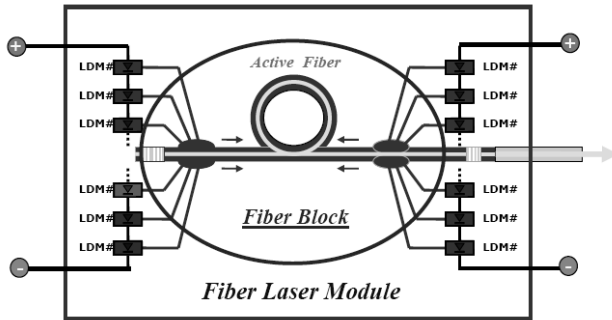


Bild 3.3: Schema eines Single-Mode Faserlasers [Quelle: IPG Photonics].

Die Leistung des in dieser Arbeit zur Verfügung stehenden Multi-Mode Faserlasers beträgt 10 kW bei einem Strahlparameterprodukt von 10 mm*mrad. Der Gesamtwirkungsgrad dieser Strahlquelle wird mit 27 % angegeben. Das Beispiel eines 6 bis 10 kW Multi-Mode Faserlasers ist in Bild 3.4 gezeigt. Zurzeit sind laut Fa. IPG Photonics Multi-Mode Faserlaser bis 30 kW kommerziell erhältlich.



Bild 3.4: 6 bis 10 kW Yb-Faserlaser (MM) von IPG Photonics.

CO₂-Laser

Der CO₂-Laser gehört zu der Gruppe der Gaslaser. Er ist in der Getriebeproduktion die am häufigsten eingesetzte Strahlquelle. Eigenschaften wie hohe Strahlqualität und niedrige Investitionskosten machen ihn, wie bereits in Kapitel 2.4.1 erwähnt, für die industrielle Materialbearbeitung aus wirtschaftlicher Sicht sehr interessant. Sein laseraktives Medium besteht aus einer Mischung der Gase: CO₂, N₂ und He. Das CO₂-Molekül besteht aus einem Kohlenstoffatom und zwei Sauerstoffatomen. Dieses Molekül wird durch Stöße mit den N₂-Molekülen angeregt, die wiederum ihre Energie von Elektronen einer elektrischen Gasentladung erhalten haben. Die Aussendung der Strahlung erfolgt durch die Übergänge zwischen zwei Vibrationsniveaus innerhalb des Elektronengrundzustandes. Da der Vibration diskrete Rotationsenergien überlagert sind, können verschiedene Wellenlängen erzeugt werden. Die in der industriellen Materialbearbeitung meist verwendete Wellenlänge dieses Lasers liegt bei 10.600 nm.

Von der Art der Kühlung wird bei dem CO₂-Laser zwischen diffusions- und konvektionsgekühlten Strahlquellen unterschieden. Bei den diffusionsgekühlten Geräten erfolgt der Wärmetransport infolge eines Temperaturgradienten vom Inneren des Mediums zu seinen gekühlten Wandungen hin. Bei der Konvektionskühlung sind Wärme- und Stofftransport inhärent miteinander gekoppelt [6]. Zurzeit sind CO₂-Laser bis 20 kW kommerziell erhältlich.

Bei einigen in dieser Arbeit durchgeführten Vergleichsversuchen wurde ein konvektionsgekühlter CO₂-Laser der Fa. Trumpf verwendet. Die Laserleistung dieses Geräts betrug 5 kW bei einer Beugungsmaßzahl M^2 von 1,82, die einem Strahlparameterprodukt von ca. 6 mm*mrad entspricht. Der Gesamtwirkungsgrad dieser Strahlquelle wurde vom Hersteller mit 10 - 12 % angegeben.

Die für den Vergleich in Kapitel 4.5 verwendeten Serienbauteile wurden in der Getriebeproduktion der Daimler AG hergestellt. Als Strahlquelle wurde dabei ein diffusionsgekühlter CO₂-Laser (Slab) der Fa. Rofin verwendet; siehe auch Bild 2.9 in Kapitel 2.4.1. Die Leistung dieser Strahlquelle betrug 3 kW bei einer Beugungsmaßzahl von 1,05, einem Strahlparameterprodukt von ca. 3,5 mm*mrad entsprechend. Der Gesamtwirkungsgrad dieses Lasers wurde vom Hersteller mit 15 % angegeben.

3.2 Strahlführung und Strahlformung

Die Grundlagen zur Strahlführung und Strahlformung wurden bereits in Kapiteln 2.1.3 und 2.4.1 beschrieben. Ziel dieses Abschnitts ist es, die in dieser Arbeit verwendeten Lichtleitfaser, Bearbeitungsoptiken sowie Umlenk- und Fokussierspiegel zu erläutern.

Optische Komponenten zur Strahlführung

Die Strahlführung erfolgt bei den Festkörperlasern mittels Glasfasern. Dabei wird die Laserstrahlung in der Faser nach dem Prinzip der Totalreflexion, die an der Grenzfläche zwischen einem optisch dichteren und einem optisch dünneren Medium stattfindet, nahezu verlustfrei geleitet. Lediglich bei der Ein- und Auskopplung in und aus der Glasfaser entstehen Verluste in der Größenordnung zwischen 2 und 4 %.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden mit dem Scheibenlaser Glasfasern, auch bekannt als Lichtleitkabel (LLK), mit einem Kerndurchmesser d_K von 150 μm , 200 μm , 400 μm und 600 μm verwendet. Bei den Vergleichsversuchen mit dem Faserlaser wurden Lichtleitkabel mit einem Kerndurchmesser von 200 μm eingesetzt.

Die Strahlführung bei den in dieser Arbeit eingesetzten CO₂-Lasern erfolgt, wie schon in Kapitel 2.4.1 beschrieben, mittels Spiegel-Rohr-Systemen.

Optische Komponenten zur Strahlformung

Nach dem Verlassen der Glasfaser wird der Laserstrahl der Festkörperlaser in einer Bearbeitungsoptik (BEO) zuerst kollimiert und dann fokussiert. Der Fokusdurchmesser d_f entspricht dabei der Abbildung des Faserkerndurchmessers d_K auf dem Werkstück. Durch unterschiedliche Linsensysteme werden bei gleicher Laserleistung unterschiedliche Fokusdurchmesser bzw. Leistungsdichten erzielt.

Für den Einsatz mit dem Scheibenlaser wurden zwei Bearbeitungsoptiken, D35 und D70, der Firma Trumpf verwendet. Der Durchmesser der in D35 eingebauten Linsen beträgt ein Zoll, die Brennweite der Kollimationslinse beträgt 100 mm. Mit Fokussierlinsen der Brennweiten $f = 100$ mm und $f = 140$ mm entsteht für die Kombination ein Abbildungsmaßstab f_f/f_K von 1:1 und 1:0,7. Bei der zwei Zoll Bearbeitungsoptik von Trumpf (D70) wurden Kollimationslinsen mit den Brennweiten $f_K = 150$ mm und 200 mm verwendet. Mit Fokussierlinsen der Brennweiten $f = 100$ mm, $f = 150$ mm und $f = 200$ mm resultieren für die Kombinationen Abbildungsmaßstäbe von 1:2, 1:1,5, 1:1,3, 1:1 und 1:0,75.

Die Bearbeitungsoptik der Firma Precitec wurde für die vergleichenden Versuche zwischen dem Scheiben- und dem Faserlaser eingesetzt. Die Brennweite der Kollimationslinse bei dieser Optik mit der Betriebsbezeichnung YW50 beträgt 125 mm. Mit Fokussierlinsen der Brennweite $f = 125$ mm, $f = 200$ mm und $f = 250$ mm entstehen die Abbildungsmaßstäbe 1:1, 1:0,65 sowie 1:0,5.

In der folgenden Tabelle 3.1 sind die Kenngrößen der eingesetzten Lichtleitkabel und Bearbeitungsoptiken aufgelistet:

BEO	Faserkern- durchmesser	Kollimations- brennweite	Fokussier- brennweite	F-Zahl	Fokusdurch- messer	Rayleigh- länge
D70	150 μm	100 mm	200 mm	10,0	0,3 mm	3,0 mm
D70	150 μm	150 mm	100 mm	3,33	0,1 mm	0,3 mm
D70	150 μm	200 mm	200 mm	5,0	0,15 mm	0,75 mm
D70	150 μm	200 mm	150 mm	3,75	0,113 mm	0,42 mm
D70	150 μm	200 mm	100 mm	2,5	0,075 mm	0,19 mm
D35	200 μm	100 mm	100 mm	5,0	0,2 mm	1,0 mm
D35	200 μm	100 mm	140 mm	7,0	0,28 mm	1,96 mm
YW50	200 μm	125 mm	125 mm	6,3	0,2 mm	1,26 mm
YW50	200 μm	125 mm	200 mm	10,08	0,32 mm	3,23 mm
YW50	200 μm	125 mm	250 mm	12,6	0,4 mm	5,04 mm
D70	200 μm	200 mm	100 mm	2,5	0,1 mm	0,25 mm
D70	200 μm	200 mm	200 mm	5,0	0,2 mm	1,0 mm
D70	400 μm	200 mm	100 mm	2,5	0,2 mm	0,5 mm
D70	600 μm	200 mm	100 mm	2,5	0,3 mm	0,75 mm

Tabelle 3.1: Übersicht der eingesetzten Faserkerndurchmesser und Bearbeitungsoptiken und daraus resultierenden Durchmesser, F-Zahlen und Rayleighlängen des fokussierten Strahls.

Die Bearbeitungsoptiken der eingesetzten CO₂-Laser hatten molybdenbeschichtete Parabolspiegel der Brennweite 200 und 250 mm.

3.3 Prozessadapter und Bearbeitungsstationen

Prozessadapter

Wie schon in Kapitel 2.4.1 erwähnt, ist die Aufgabe des Prozessadapters die reproduzierbare Zuführung der Prozessmedien, wie z. B. Schutzgas sowie der effektive Schutz der Bearbeitungsoptik vor Schweißspritzern und Rauch. In Bild 3.5 sind zwei Prozessadapter zum Laserstrahlschweißen mit Festkörperlaser als Beispiele gezeigt. Der Grundkörper (3) ist unterhalb der Fokussierlinse (1) eingebaut. Die Bearbeitungsoptik wird von Schweißspritzern und Rauch durch das Schutzglas (2), bestehend in der Regel aus beschichtetem Quarzglas und dem Crossjet (4) [46], [47], der eine quer zur Strahlachse strömende Luftströmung erzeugt, geschützt. Die Schutzgaszuführung (5) hat die Aufgabe, das Schutzgas in die Wechselwirkungszone hineinzubringen.

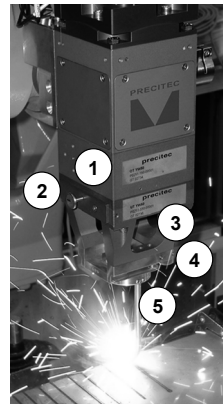
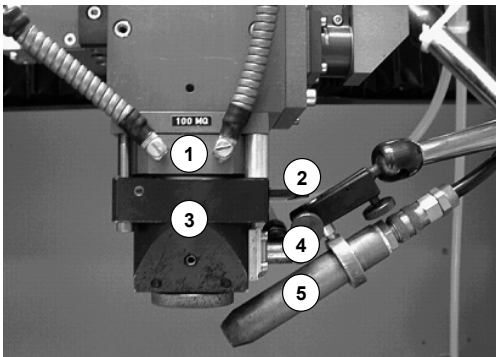


Bild 3.5: Prozessadapter zum Laserstrahlschweißen mit Festkörperlaser, eingebaut an BEO D70 (links) und YW50 (rechts), mit integrierter Schutzglaskassette, Crossjet und Schutzgaszufuhr.

Der in Bild 3.6 gezeigte Prozessadapter (2) zum Schweißen mit dem CO₂-Laser ist gleich nach dem Fokussierspiegel (1) angebracht und besteht aus einem Crossjet (3) und einer koaxialen Schutzgaszuführung (4).

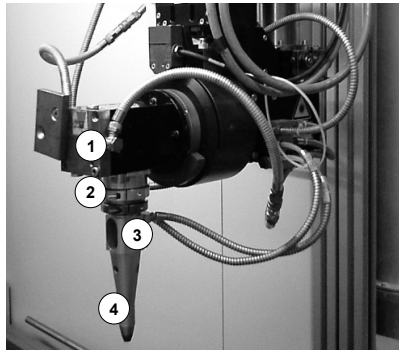


Bild 3.6: Prozessadapter zum Laserstrahlschweißen mit CO₂-Lasern mit integriertem Crossjet und Schutzgaszufuhr.

Bearbeitungsstationen

Die in Kapitel 4 diskutierten Grundlagenuntersuchungen und die Schweißungen an der Antriebswelle des neuen automatischen Getriebes (NAG) wurden am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) auf der LASMA-Station durchgeführt, siehe Bild 3.7. Sie hat eine Drehachse und drei Linearachsen. Die Achsen, die Laseranforderung und die Gasflüsse werden mittels einer NC-Steuerung gesteuert. Die maximale Vorschubgeschwindigkeit der Achsen beträgt 20 m/min. Mit einem maximalen Verfahrweg von 1000 mm ist die LASMA-Station für Bearbeitung kleiner Teile sehr gut geeignet. Diese Maschine kann mit einer Genauigkeit kleiner als $\pm 0,02$ mm positioniert werden.

Das Werkstück ist auf einem XY-Tisch mithilfe eines Spannmittels fixiert. Die relative Bewegung zwischen dem Laserstrahl und dem Werkstück wird bei dieser Maschine durch Bewegung des Werkstückes bzw. des Tisches geführt. Die Schweißoptik ist auf der z-Achse befestigt und bewegt sich nicht.

Die Grundlagenuntersuchungen wurden auf einer pneumatischen Spannvorrichtung durchgeführt. Bei den Schweißversuchen am Lamellenträger der Antriebswelle wurde eine Spannvorrichtung der Serienfertigung eingesetzt.

Zu der LASMA-Station gehört auch eine Absauganlage. Sie hat die Aufgabe, die während des Schweißens entstandenen schädlichen Stoffe aus der Bearbeitungsstation bzw. Versuchshalle hinauszuführen.

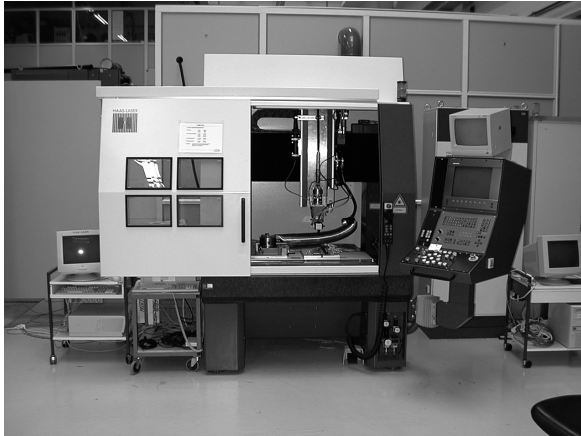


Bild 3.7: LASMA-Station [Quelle: IFSW-Stuttgart].

Die ebenfalls in Kapitel 4 ausgewerteten vergleichenden Untersuchungen mit dem Faserlaser wurden auf einer dafür umgebauten Trumpf-Laser-Cell (TLC) Portalanlage der Firma Trumpf (Bild 3.8) bei der schweißtechnischen Lehr- und Versuchsanstalt (SLV) in Rostock durchgeführt. Diese ursprünglich für den Einsatz eines CO₂-Lasers gebaute Anlage hat zwei Dreh- und drei Linearachsen, die eine maximale Vorschubgeschwindigkeit von 90 Umdrehungen pro Minute respektive 100 m/min erreichen können. Die Steuerung der Einzelanlagenkomponenten erfolgt über eine NC-Steuerung der Firma Siemens.

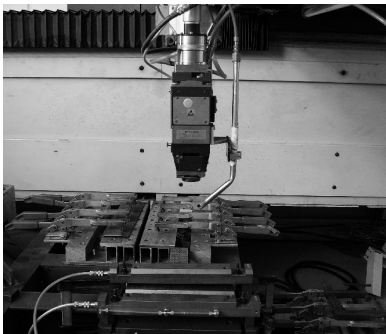


Bild 3.8: Versuchsaufbau für die Schweißuntersuchungen mit dem Faserlaser [Quelle: SLV-Rostock].

Die vergleichenden Versuche mit dem CO₂-Laser wurden ebenfalls auf einer TLC-Portal-Anlage der Firma Trumpf durchgeführt (Bild 3.9). Im Gegensatz zu der ersten Anlage sind sowohl der Arbeitsbereich als auch die Vorschubgeschwindigkeiten dieses in der Daimler AG aufgestellten TLC-Systems zum Schweißen von 2D-Bauteilen optimiert.



Bild 3.9: Versuchsaufbau für die Schweißuntersuchungen mit dem CO₂-Laser [Quelle: Daimler AG].

Die in Kapiteln 4.5.2 und 4.5.3 ausgewerteten Schweißversuche am ZB-Hohlrad und am Tellerrad eines Ausgleichsgetriebes wurden an der Leichter-Schweißanlage am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) durchgeführt. Das beim Schweißen des ZB-Hohlrad verwendete Spannwerkzeug wurde in der Verfahrensentwicklung der Daimler AG entwickelt. Es erfüllte die Spannvorschriften für dieses Bauteil, war jedoch anders als die Serienspannvorrichtung aufgebaut, vgl. Bild 3.10 und Bild 2.11 in Kapitel 2.4.1. Das Spannwerkzeug besteht aus einer Werkstückaufnahme und einem Spannring. Da an der Serienschweißanlage der Hohlradträger vor dem Schweißen in das Hohlrad gepresst wird, werden vor den Versuchen mit dem Scheibenlaser die beiden Bauteile an einer Presse zu einer Einheit vorgepresst. Diese vorgepresste Einheit wird in die Werkstückaufnahme des Spannwerkzeugs eingelegt und durch den Spannring fixiert.

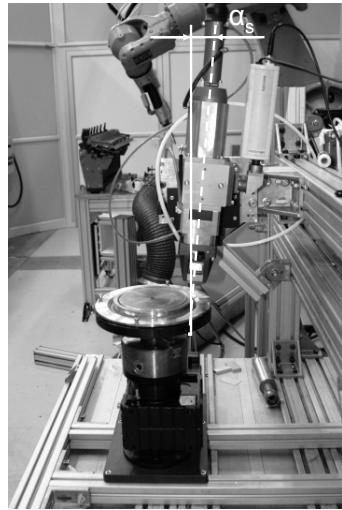
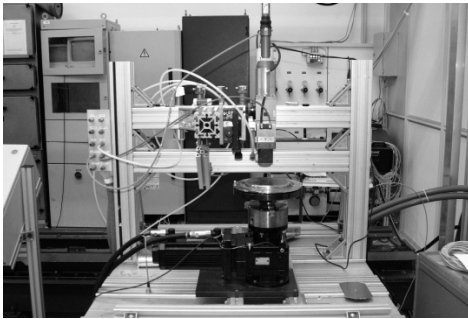


Bild 3.10: Versuchsaufbau und Anstellwinkel der Schweißoptik in radialer Richtung (rechts), die in der Schweißanlage Leichter integriert ist [Quelle: IFSW-Stuttgart].

3.4 Untersuchte Werkstoffe

Im Rahmen dieser Arbeit wurden aus der Gruppe der allgemeinen Baustähle die Werkstoffe St37-2 und St52-3 untersucht. Die Gruppe der Einsatzstähle ist in dieser Arbeit durch die Werkstoffe 20MoCr4 und 16MnCr5 vertreten, wobei die meisten Grundlagenuntersuchungen sowie diverse Vergleichsversuche in Kapitel 4 auf den Werkstoffen St37-2 und 16MnCr5 basieren. Im Rahmen der Versuche mit realen Bauteilen wurden zusätzlich die Werkstoffe St W 24, 27MnVS6 und Gusseisen mit Kugelgranit (GGG) verwendet. Die Eigenschaften dieser Werkstoffe und ihre Schweißbarkeit wurden bereits in Kapitel 2.2 erläutert. Die chemische Zusammensetzung dieser Werkstoffe ist in Tabelle 3.2 aufgeführt.

Kurzname	Werkstoff-Nr. (neu)	C	P	S	N	Si	Mn	Cr	V	Mo
St37-2	1.0036	0,17	0,050	0,050	0,009	--	--	--	--	--
St52-3	1.0570	0,20	0,040	0,040	--	--	--	--	--	--
16MnCr5	1.7131	0,14 – 0,19	--	--	--	0,15 – 0,40	1,00 – 1,30	0,80 – 1,00	--	--
20MoCr4	1.7321	0,17 – 0,22	--	--	--	0,15 – 0,40	0,60 – 0,90	0,30 – 0,50	--	0,40 – 0,50
StW24	1.0335	≤0,08	≤0,025	≤0,025	--	--	≤0,40	--	--	--
27MnSiVS6	1.5232	0,26 – 0,33	≤0,025	0,020 – 0,060	0,010 – 0,020	0,15 – 0,80	1,20 – 1,60	<0,30	0,08 – 0,20	<0,08
GGG	--	3,40 – 3,80	--	0,003 – 0,015	--	2,00 – 3,00	0,10 – 0,60	0,10	--	--

Tabelle 3.2: Chemische Zusammensetzung in Masse % der eingesetzten Stähle nach DIN 17100 [48] für die allgemeinen Baustähle, DIN EN 10277-4 [49] für die Einsatzstähle, DIN EN 10111 [50] für warmgewalztes Band und DIN EN 10267 [51] für die Vergütungsstähle.

4 Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebebau

Aufgrund ihrer guten Strahleigenschaften und dem hohen Gesamtwirkungsgrad sind die diodengepumpten Festkörperlaser höchster Brillanz interessant für den Einsatz im Getriebebau. In diesem Kapitel wird das Laserstrahlschweißen mit dem Scheibenlaser als Vertreter dieser Gruppe behandelt. Zuerst wird der Einfluss einiger prozess-relevanter Größen, wie z. B. des Fokusdurchmessers, der Laserleistung und der Fokuslage, auf das Schweißergebnis untersucht. Danach wird die mit dem Scheibenlaser erzielte Nahtqualität präsentiert. Als nächster Punkt dieses Kapitels wird im Rahmen von Vergleichsuntersuchungen, die bei möglichst ähnlichen Strahlgeometrien durchgeführt sind, der Einfluss der Wellenlänge und der Intensitätsverteilung sowie der Rayleighlänge im Fokus auf das Schweißergebnis diskutiert. Abschließend werden mit Prozessparametern basierend auf den Ergebnissen der Grundlagenuntersuchungen reale Bauteile der Serienfertigung geschweißt.

4.1 Besonderheiten beim Schweißen mit dem Scheibenlaser

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, gehört der Scheibenlaser zu der Gruppe der Festkörperlaser höchster Brillanz, also höchster Strahlqualität. Verglichen mit den anderen Vertretern der Festkörperlaser, haben die diodengepumpten Scheiben- und Faserlaser ein kleineres Strahlparameterprodukt und somit eine höhere Fokussierbarkeit, siehe Kapitel 2.1.3. Wie in Bild 4.1 ersichtlich, erlaubt ein besser fokussierbarer oder schlanker Strahl zum einen das Erzielen von kleineren Fokusdurchmessern beim gleichen Fokussier- bzw. Arbeitsabstand. Zum anderen erlaubt ein kleineres Strahlparameterprodukt, falls der Fokusdurchmesser gleich gehalten werden sollte, eine Vergrößerung des Fokussier- bzw. Arbeitsabstandes. Dieses wiederum hilft in der industriellen Anwendung bei der Vermeidung der Verschmutzung der Bearbeitungsoptik und erhöht somit die Lebensdauer und die Wirtschaftlichkeit der eingesetzten optischen Komponenten. Der dritte Vorteil ist, dass sich aus dem schlankeren Strahl bei vergleichbaren Fokusdurchmessern ein kleinerer Ausleuchtungsdurchmesser auf

der Kollimationslinse ergibt. Dies erlaubt eine Konstruktion von schlankeren Bearbeitungsoptiken mit geringeren Massen. Werden die Bearbeitungsoptiken durch Roboter getragen, so ermöglicht dies die Verwendung von genaueren Robotern, womit die Prozessgenauigkeit verbessert wird [52]. Als Nachteil muss hierbei die Erhöhung der Leistungsdichte (Intensität) auf der Linse erwähnt werden. In Verbindung mit einer insgesamt höher erreichbaren Laserleistung kann dies auch bei diesen Lasern durch die thermische Ausdehnung zu bis dato nicht bekannten optischen Fehlern der Linse führen [53], welche das Schweißergebnis wiederum negativ beeinflussen können.

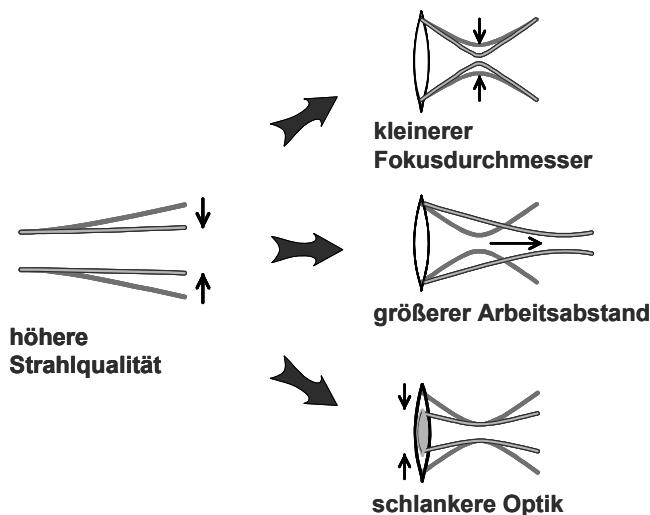


Bild 4.1: Vorteile der hohen Strahlqualität nach [3], [6], [52].

4.2 Grundlagenuntersuchungen

Aus fertigungstechnischer Sicht können die Größen, die den Schweißprozess und somit das Schweißergebnis beeinflussen, in fünf Gruppen unterteilt werden. In der ersten Gruppe befinden sich die Eigenschaften der Laserstrahlquelle wie Strahlqualität, Laserleistung, Polarisation und Wellenlänge. Die zweite Gruppe bilden die Parameter der Strahlfokussierung, wie Strahldurchmesser in der Schweißebene, Divergenz des fokussierten Strahls, Fokuslage und Einstrahlwinkel. Die dritte Gruppe erfasst die atmosphärischen Umgebungsbedingungen, wie Schutzgasart und -menge, unter welchen der Schweißprozess stattfindet. An vierter Stelle ist die Gruppe des Werk-

stoffes zu erwähnen, in welcher der Werkstofftyp oder die Werkstoffkombinationen und die unterschiedlichen Werkstoffchargen enthalten sind. In der fünften Gruppe sind die zahlreichen Parameter der Schweißanlage und der Bauteilgeometrie wie Schweißgeschwindigkeit, Anlagengenauigkeit, Anlagenverschmutzung und Bauteiltoleranzen zusammengefasst.

Im folgenden Abschnitt wird der Einfluss einiger dieser Parameter auf das Schweißergebnis diskutiert. Die dafür benötigten Untersuchungen wurden auf Basis von Blindeinschweißungen am Einsatz- und Baustahl durchgeführt. Der Werkstoff St37-2 (Baustahl) stand, soweit es keine Unterschiede zum Einsatzstahl gab, im Mittelpunkt der Auswertungen. Die Diskussion der einzelnen Parameter erfolgt abweichend von dem skizzierten Schema - sie folgt in wesentlichen Zügen der Reihenfolge der Untersuchungen, insbesondere deshalb, weil im Zusammenhang der zunächst beobachteten Phänomene der Einfluss des Schutzgases zuerst geklärt werden musste.

4.2.1 Einfluss des Fokusbereichs auf das Schweißergebnis

Aufgrund experimenteller Untersuchungen hat sich der Fokusbereich als zentrale Größe zur Bestimmung der Nahttiefe t und der Nahtbreite b bewährt. Dabei folgt aus der Energiebilanz für die Schweißnaht [3], [6]:

$$t \sim \frac{P}{d_f}, \quad (4.1)$$

wobei die Nahtbreite erfahrungsgemäß direkt proportional zu dem Fokusbereich (insbesondere bei schlanken Nähten gültig) gesetzt ist:

$$b \sim d_f, \quad (4.2)$$

Um den Einfluss des Fokusbereichs auf das Schweißergebnis in dieser Arbeit zu ermitteln, werden Größen wie die Einschweißtiefe und Nahtquerschnittsform untersucht.

In Bild 4.2 ist der Einfluss des Fokusbereichs im Wellenlängenbereich um $1 \mu\text{m}$ für Baustahl gezeigt. Der schlanke Strahl des Scheibenlasers erlaubt das Erzielen von Fokusbereichen kleiner als $0,3 \text{ mm}$ bei gleichzeitig großen Rayleighlängen. Die Fokusbereiche größer als $0,3 \text{ mm}$ wurden mit einem diodengepumpten Festkörperlaser (DPFKL) der Firma Rofin gemacht und aus früheren Untersuchungen zum Vergleich herausgezogen. Dieser Laser hatte ein Strahlparameterprodukt von

25 mm*mmrad und eine Gesamtleistung von 6 kW. Der Strahl wurde zu der Bearbeitungsoptik durch ein 600µm-Lichtleitkabel transportiert. Nach der Fokussierung wurden Fokusbereichen von 0,6 (F = 5) und 0,45 mm (F = 3,75) erzielt.

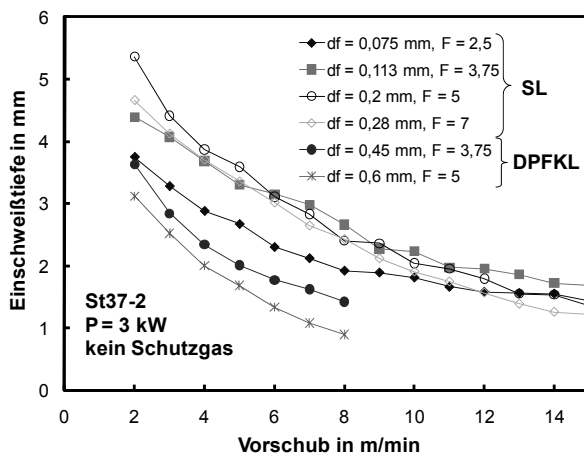


Bild 4.2: Einschweißtiefe in Abhängigkeit des Vorschubs bei St37-2 für Fokusbereichen kleiner als 0,6 mm.

Aus den Graphen in Bild 4.2 ist eindeutig zu sehen, dass die Beziehung (4.2) nur für Fokusbereichen größer als 0,2 mm gilt. Bei Fokusbereichen kleiner als 0,2 mm ist eine Umkehr der Proportionalität ersichtlich: Ab dieser Grenze verringert sich die Einschweißtiefe.

Werden für den Werkstoff St37-2 die Einschweißtiefen unterschiedlicher Fokusbereichen bei konstanter Vorschubgeschwindigkeit untersucht (Bild 4.3), wird zum einen der beschriebene Einfluss des Fokusbereichs auf die Einschweißtiefe bestätigt. Zum anderen wird festgestellt, dass die „Umkehrgrenze“ unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit ist und im Durchmesserbereich zwischen 0,15 und 0,2 mm liegt.

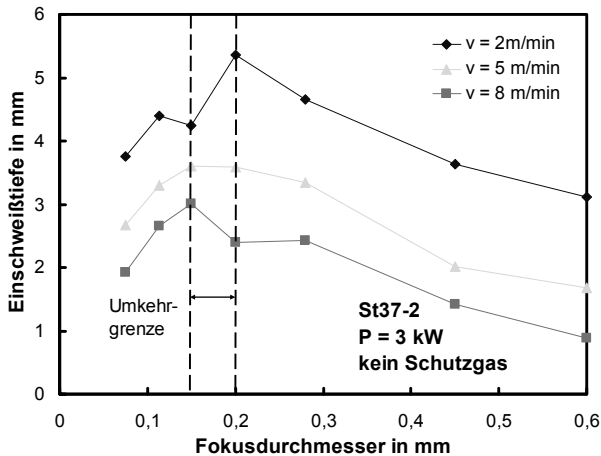


Bild 4.3: Einfluss des Fokussdurchmessers auf die Einschweißtiefe bei konstantem Vorschub für St37-2. Ermittlung der Einflussumkehrgrenze.

In genaueren Untersuchungen des Nahtquerschliffs bei Fokussdurchmessern kleiner als 0,2 mm ist ein starker Einfluss der Fokussierung auf die Querschnittsform der Schweißnaht zu beobachten, siehe Bild 4.4. Oberhalb einer Vorschubgeschwindigkeit von 6 m/min zeigt sich, dass sich die Nahtquerschnittsformen in Abhängigkeit der Fokussierungsbedingungen verändern und nach zwei Gruppen klassifizieren lassen: Nähte mit einer schlanken parallelen Form ($d_f = 0,15$ mm) und solche mit einer tropfen- oder amphorenartigen Form ($d_f = 0,075$ mm). Die Nähte mit der größten Einschweißtiefe ($d_f = 0,15$ mm) weisen eine schlanke parallele Form auf. Dies ist die Folge der verbesserten Fokussierbarkeit des Scheibenlasers und der Fokussierung mit größerer F-Zahl, was zum kleineren Divergenzwinkel des fokussierten Strahls θ_f führt (bei dem Fokussdurchmesser von 0,15 mm beträgt der Divergenzwinkel im Fokus $5,71^\circ$). Bei einer näheren Betrachtung der Querschnittsgeometrie für $d_f = 0,075$ mm und 0,113 mm ($\theta_f = 8,10^\circ$) bei $v = 9$ m/min kann festgestellt werden, dass die seitliche Neigung der Nahtflanken den gleichen Winkel wie der fokussierte Laserstrahl in freier Propagation aufweist. Offensichtlich spielt bei solch starken Fokussierungen neben dem Durchmesser auch der Divergenzwinkel θ_f des fokussierten Strahls eine entscheidende Rolle für die Energieeinkopplung und die dadurch resultierende Einschweißtiefe [6], [54], [55].

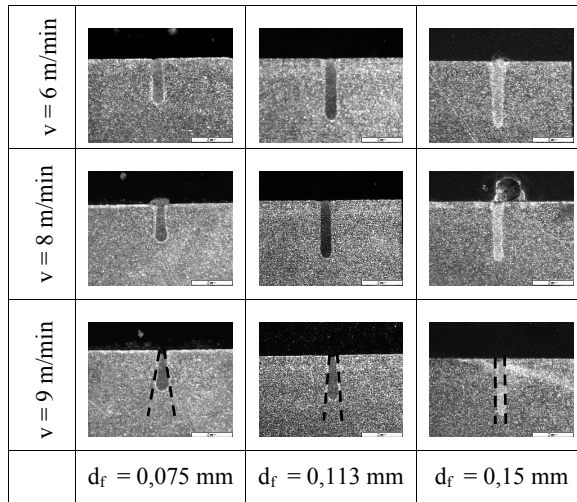


Bild 4.4: Nahtquerschnittsformen für Fokusbereich kleiner als 0,2 mm bei Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 6 und 9 m/min (Werkstoff St37-2).

Bei Vorschubgeschwindigkeiten kleiner als 6 m/min ist eine erneute Änderung der Nahtquerschnittsform, bei welcher die seitliche Neigung der Nahtflanken nicht mehr den Divergenzwinkel des Strahls aufweist, festzustellen. Die Schweißnaht bekommt eine sogenannte Nagelkopfform (Bild 4.5, z. B. $d_f = 0,15 \text{ mm}$). Grund dafür könnte zum einen die Oberflächenspannung der Schmelze sein, die in diesem Fall für das Auftreten thermokapillar induzierter Strömungen (Marangoni-Effekt) von Bedeutung ist [56]. Zum anderen könnte die nagelköpfige Nahtquerschnittsform, ähnlich wie bei den CO_2 -Lasern, durch ein laserinduziertes Plasma, das allerdings bislang bei Schweißungen mit Wellenlängen um $1 \mu\text{m}$ nicht beobachtet wurde, oder Streueffekte [6] entstanden sein. Ein solches Plasma könnte auch der Grund für die in Bild 4.2 gezeigte Reduktion der Einschweißtiefe bei Fokusbereich kleiner als 0,2 mm sein. Weitere Untersuchungen zum Einfluss des Schutzgases auf das Schweißergebnis, siehe Kapitel 4.2.2 sowie [57], zeigen jedoch, dass das laserinduzierte Plasma nicht der Grund für diese Reduktion ist.

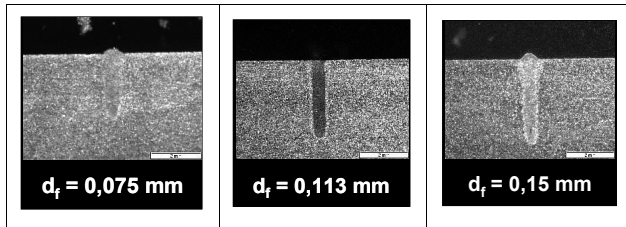


Bild 4.5: Nahtquerschnittsform des Werkstoffs St37-2 für Fokusbereich kleiner als 0,2 mm bei einem Vorschub von 5 m/min.

Marangoni-Effekt

Der Marangoni-Effekt ist eine Folge der temperaturabhängigen Oberflächenspannungskoeffizienten $\sigma(T)$ und der chemischen Aktivität oberflächenaktiver Legierungselemente wie Schwefel, Phosphor, Sauerstoff, Selen und Tellur. Bleibt die Oberflächenspannung beim Schweißen über der Temperatur konstant, tritt kein Marangoni-Effekt auf. Bei $\partial\sigma/\partial T = 0$ unterscheidet sich die Nahtquerschnittsform von der Kapillarform im Wesentlichen als Folge von Wärmeleitungseffekten, da die Kapillare mit geringer Geschwindigkeit umströmt wird, wodurch der konvektive Wärmetransport nur eine geringe Rolle spielt. Nimmt die Oberflächenspannung mit steigender Temperatur ab, bedeutet dies einen negativen Term $\partial\sigma/\partial T$, was dem Verhalten niedrig legierter Stähle entspricht. Bei niedrigen Schweißgeschwindigkeiten, gemäß den Versuchsergebnissen bei $v < 5$ m/min, und einem negativen Term $\partial\sigma/\partial T$ ist der konvektive Wärmetransport infolge des Marangoni-Effekts deutlich ausgeprägt. Dies kann in seitlicher Richtung zu einer nagelkopfförmigen Ausbildung der Nahtform führen [56], [58]. Die Nahtform des Werkstoffs St37-2 weist in Bild 4.6 Unterschiede in der Nahtquerschnittsform in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit und der Schutzgasauswahl auf, die mit dem oben erwähnten Konvektionsantrieb gedeutet werden können. Bei Helium ändert sich die Nahtgeometrie mit steigender Geschwindigkeit im Bereich um 5 m/min von einer bauchförmigen, fast parallelen, in eine tropfenartige Form. Eine Änderung kann auch bei Argon beobachten werden: ebenfalls im Bereich um 5 m/min wechselt die Querschnittsform der Schweißnaht bei den langsamen Vorschubgeschwindigkeiten vom „Nagelkopf“ auf „Parallel“. Es ist an dieser Stelle zu erwähnen, dass die Querschnittsformänderungen abhängig vom Werkstoff sind. Der Werkstoff 16MnCr5 (Einsatzstahl) hatte, verglichen mit dem Werkstoff St37-2, aufgrund seiner höheren Wärmeleitfähigkeit, eine etwas breitere aber parallele

Nahtquerschnittsform. Allerdings konnte auch hier bei Vorschubgeschwindigkeiten kleiner als 5 m/min eine nagelkopfähnliche Querschnittsform beobachtet werden.

Eine ungefähre Erklärung für den unterschiedlichen Einfluss des Schutzgases auf das Schweißergebnis kann durch seine physikalischen Eigenschaften gegeben werden. Argon ist wesentlich schwerer und hat eine schlechtere Temperaturleitfähigkeit als Helium, was beim Schweißen zu einer besseren Abschirmung der Schmelze vom Sauerstoff der Umgebungsluft führt. Aufgrund fehlender Oxidation ermöglicht dies ein besseres Zufließen der Schmelze in die Nahtländer infolge von $\partial\sigma/\partial T$ und die Bildung einer breiteren Schweißnaht.

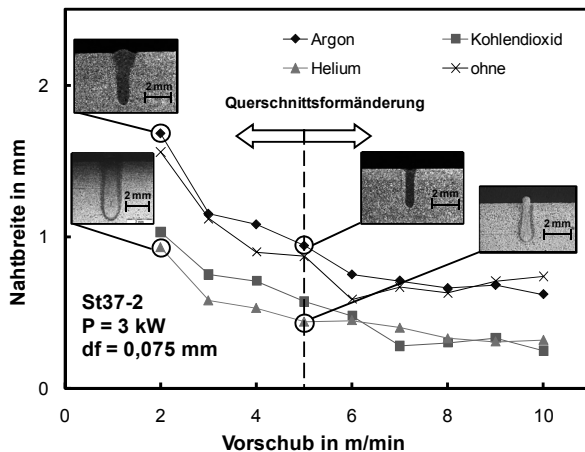


Bild 4.6: Nahtquerschnittsformen in Abhängigkeit des Vorschubs für den Werkstoff St37-2 bei einer Leistungsdichte um $6,8 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$.

4.2.2 Prozessgaseinfluss

Wie schon in Kapitel 2.1.1 erwähnt, sind mit der Verwendung kürzerer Wellenlängen und Schutzgase mit hohem Ionisationspotenzial zwei effiziente Maßnahmen zur Steuerung der Plasmaentstehung bekannt. Im nachfolgenden Abschnitt wird der Prozessgaseinfluss hinsichtlich dieses Effekts bei Fokusburchmessern kleiner als 0,2 mm untersucht.

Wird in Bild 4.7 (links) die Einschweißtiefe des Werkstoffs St37-2 bei einer Leistungsdichte um $6,8 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$ ($d_f = 0,075 \text{ mm}$) für unterschiedliche Schutzgase betrachtet, wird festgestellt, dass die Schutzgasauswahl nicht der Grund für eine Reduktion der Einschweißtiefe im betrachteten Bereich des Fokusbereichs sein kann, da die Einschweißtiefe keine Abhängigkeit vom Schutzgas aufweist.

Wäre das laserinduzierte Plasma die Ursache für die Entstehung der Nagelkopfform bei Vorschubgeschwindigkeiten kleiner als 6 m/min , würde sich vor allem auch der Einkoppelgrad und damit die Querschnittsfläche, ähnlich wie beim Schweißen mit CO_2 -Lasern, in Abhängigkeit vom jeweiligen Schutzgas ändern. Eine Änderung der Querschnittsfläche kann in Bild 4.7 (rechts) jedoch nicht beobachtet werden. Dieses Verhalten ist ein Indiz für einen fehlenden Einfluss des Schutzgases bzw. der Plasmabildung auf die Einschweißtiefe. Es kann also zusammengefasst werden, dass das laserinduzierte Plasma nicht der Grund für die Abnahme der Einschweißtiefe und für die Nagelkopfform der Schweißnaht ist.

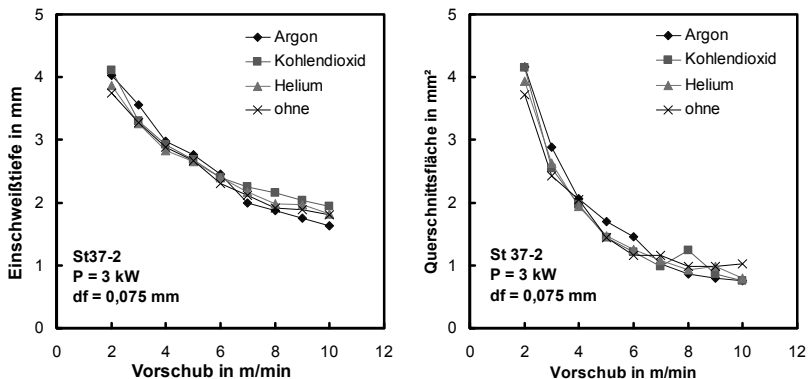


Bild 4.7: Abhängigkeit der Einschweißtiefe (links) und der Querschnittsfläche (rechts) von der Schutzgasauswahl für den Werkstoff St37-2 bei der Wellenlänge des Scheibenlasers und einer Leistungsdichte am Werkstück um $6,8 \cdot 10^7 \text{ W/cm}^2$.

Aufgrund der in Bild 4.7 gezeigten Unabhängigkeit der Querschnittsfläche von der Schutzgasauswahl kann die Annahme getroffen werden, dass der Einkoppel- und der Prozesswirkungsgrad dadurch nicht beeinflusst werden (siehe auch Gleichung (2.7)).

4.2.3 Einfluss des Divergenzwinkels auf das Schweißergebnis

Wie in Bild 4.4 und 4.5 gezeigt, beeinflusst der Divergenzwinkel, der sich ja mit der Fokussierung ändert (siehe Kapitel 2.1.3) bei Fokussurdurchmessern kleiner als 0,2 mm die Nahtquerschnittsform. Um die Einflüsse des Divergenzwinkels auf das Schweißergebnis bei Fokussurdurchmessern kleiner als 0,2 mm genauer zu untersuchen, müssen zwei Nähte, geschweißt mit unterschiedlichen Divergenzwinkeln aber dem gleichen Fokussurdurchmesser, verglichen werden. Dies kann entweder durch eine Änderung des Abbildungsmaßstabes der Bearbeitungsoptik und/oder durch ein Variieren des Kern-durchmessers der Glasfaser erzeugt werden.

Bild 4.8 (links) zeigt für den Werkstoff St37-2, dass bei Fokussurdurchmessern kleiner als 0,2 mm durch die Auswahl kleinerer Divergenzwinkel unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit eine Erhöhung der Einschweißtiefe erreicht werden kann. Die Querschnittsfläche, Bild 4.8 (rechts), zeigt dagegen nur bei Vorschubgeschwindigkeiten bis 4 m/min eine Abhängigkeit vom Divergenzwinkel. Dabei führt der kleinere Divergenzwinkel zu einer kleineren Querschnittsfläche. Da aber die Querschnittsfläche ein Maß für den Prozesswirkungsgrad ist, bedeutet in diesem Fall ihre Verkleinerung bei kleineren Divergenzwinkeln und langsamen Vorschubgeschwindigkeiten eine Verringerung des Prozesswirkungsgrads.

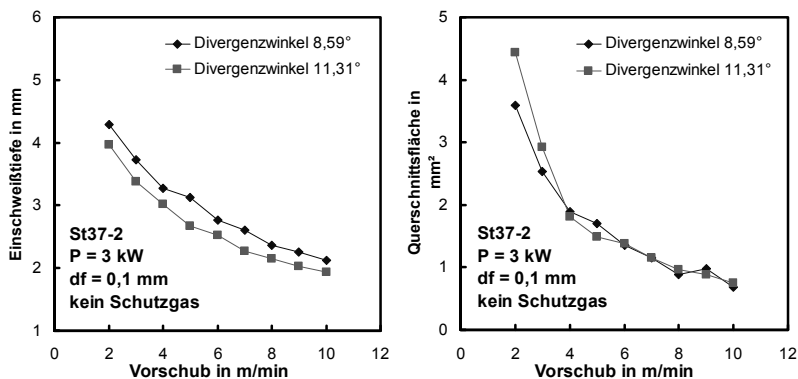


Bild 4.8: Abhängigkeit der Einschweißtiefe (links) und die Querschnittsfläche (rechts) vom Divergenzwinkel bei einem Fokussurdurchmesser von 0,1 mm.

Anhand von Schweißergebnissen bei konstant gehaltenem Divergenzwinkel für unterschiedliche Fokussurdurchmesser kann der Einfluss des Divergenzwinkels eliminiert

werden und das Hauptaugenmerk auf die Wirkung des Fokusedurchmessers allein gerichtet werden. Wird dabei für Fokusedurchmesser kleiner als 0,3 mm die Einschweißtiefe betrachtet, Bild 4.9 (links), wird festgestellt, dass bei Vorschubgeschwindigkeiten bis 4 /min die Einschweißtiefe unabhängig vom Fokusedurchmesser ist. Bei diesen langsamen Geschwindigkeiten verändert sich die Nahtquerschnittsform aufgrund des Marangoni-Effekts, was zu einer nagelkopfförmigen Naht und einer Verringerung der Einschweißtiefe führt. Wird die Vorschubgeschwindigkeit erhöht, gilt nach wie vor Gleichung (4.1), in der der Fokusedurchmesser indirekt proportional zu der Einschweißtiefe ist. Untersuchungen der Querschnittsfläche (Bild 4.9 rechts) zeigen bei diesem Divergenzwinkel, unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit, keinen Einfluss des Fokusedurchmessers an. Dies lässt den Schluss zu, dass erstens auch der Prozesswirkungsgrad in diesem Fall unabhängig vom Fokusedurchmesser ist. Zweitens ist die Unabhängigkeit der Querschnittsfläche vom Fokusedurchmesser beim gleichen Divergenzwinkel erneut ein Indiz, dass die Verringerung der Einschweißtiefe bei Fokusedurchmessern kleiner als 0,2 mm nicht durch eine mögliche Plasmabildung hervorgerufen wird.

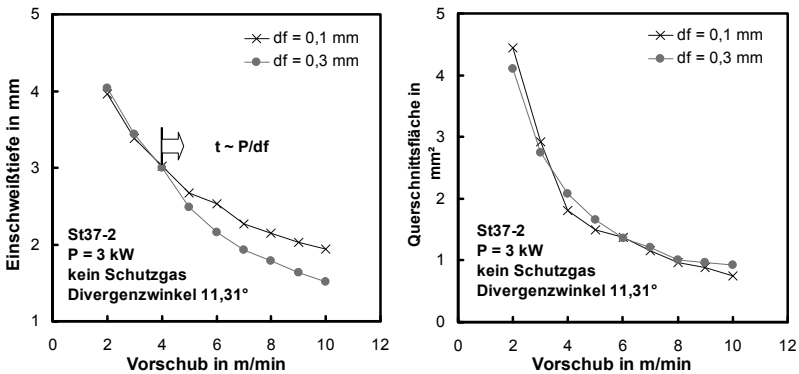


Bild 4.9: Einschweißtiefe (links) und Nahtquerschnitt (rechts) in Abhängigkeit des Fokusedurchmessers bei einem Divergenzwinkel von 11,31°.

4.2.4 Einfluss der Fokusslage auf das Schweißergebnis

Wird die vertikale Position der Bearbeitungsoptik geändert, ändern sich gleichzeitig der Fokusedurchmesser auf dem Werkstück und die Leistungsdichte.

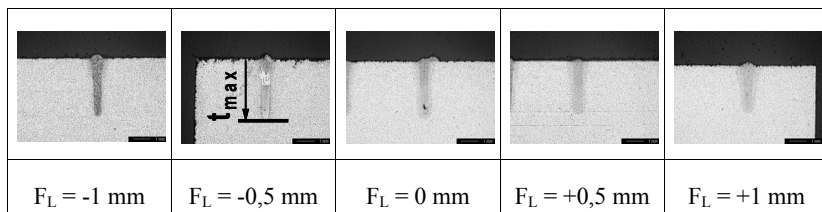


Bild 4.10: Einscheißtiefe in Abhängigkeit der Fokusslage (F_L). Bildhaftes Beispiel für den Werkstoff St37-2 bei einem Fokussdurchmesser von 0,15 mm erzielt mit einem 3kW-Scheibenlaser bei $v = 5 \text{ m/min}$.

Frühere Untersuchungen zur Abhängigkeit der Einscheißtiefe von der Fokusslage (der Wert 0 ist definiert als Position, bei der die Taille des fokussierten Strahls auf der Werkstückoberfläche liegt) und das bildhafte Beispiel in Bild 4.10 zeigen, dass die höchste Einscheißtiefe beim Schweißen mit konventionellen Strahlquellen im Fokusslagenbereich zwischen $F_L = 0$ und einem geringen Wert $F_L < 0$ (unterhalb der Werkstückoberfläche) erreicht wird, siehe t_{max} in Bild 4.10 bei $F_L = -0,5 \text{ mm}$.

Außerdem gilt generell, dass ein im Fokussbereich schlanker Strahl (größere F-Zahl und damit auch längere Rayleighlänge z_{Rf}) zu einer geringeren Änderung der Einscheißtiefe führt, wenn die Fokusslage variiert [6]. Dazu ist in Bild 4.11 (links) der Einfluss der Fokusslage für den Werkstoff St37-2 bei Fokussdurchmessern von 0,075 und 0,15 mm dargestellt. Die Ergebnisse zeigen zum einen, dass auch hier die höchste Einscheißtiefe in diesem Bereich, hier konkret zwischen 0 und -1 mm, erreicht wird. Zum anderen ist der Neigungswinkel γ der Kurven $t = f(F_L, F)$ bei der größeren F-Zahl viel kleiner. Dies ist eine Bestätigung dafür, dass die Einscheißtiefe eines im Fokussbereich schlankeren Strahls weniger empfindlich gegenüber Änderungen der Fokusslage ist.

Wird bei gleicher F-Zahl, Vorschubgeschwindigkeit und Laserleistung sowie unterschiedlicher Fokusslagen ein Einscheißtiefevergleich zwischen dem Scheiben- und dem diodengepumpten Festkörperlaser durchgeführt, wird ersichtlich, dass mit dem Scheibenlaser im gesamten untersuchten Bereich größere Einscheißtiefen erzielt werden, Bild 4.11 (rechts).

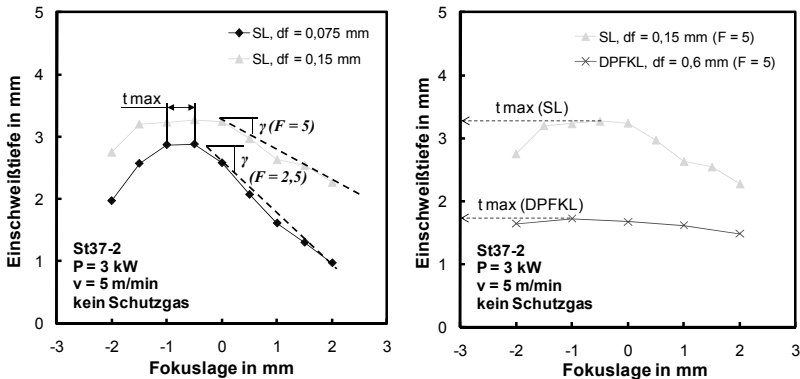


Bild 4.11: Einschweißtiefe in Abhängigkeit der Fokusslage und der F-Zahl bei Fokussdurchmessern kleiner als 0,2 mm (links). Einschweißtiefenvergleiche zwischen dem Scheiben- und dem diodengepumpten Festkörperlaser bei gleicher F-Zahl und unterschiedlicher Fokusslagen (rechts).

4.2.5 Einfluss des Strahlauftreffwinkels auf das Schweißergebnis

Beim Schweißen von realen Bauteilen wird aus Gründen der Zugänglichkeit sehr oft unter einem bestimmten Winkel (Auftrittswinkel des Strahls) geschweißt, der nicht genau der Senkrechten auf die Bahn entspricht.

Der Einfluss dieser Größe auf das Schweißergebnis für den Scheibenlaser und Fokussdurchmesser kleiner als 0,2 mm wurde in dieser Arbeit sowohl für Bau- (St37-2) als auch für Einsatzstahl (16MnCr5) genauer untersucht. Es wurden Schweißversuche ohne Schutzgas bei jeweils einem bestimmten Wert des Fokussdurchmessers und der Laserleistung durchgeführt. Dabei wurde die Bearbeitungsoptik mit bis zu 30° geneigt.

Wie in Bild 4.12 ersichtlich, wird bei dem Werkstoff St37-2 für den Fokussdurchmesser $d_f = 0,075$ mm und die Laserleistung 3 kW die aus dem Bild 4.4 bekannte Nahtquerschnittsform durch eine Neigung der Bearbeitungsoptik nicht verändert. Die Nahtgeometrie für diesen Fokussdurchmesser bleibt unabhängig vom Auftreffwinkel nach wie vor bei Vorschubgeschwindigkeiten oberhalb 6 m/min tropfenartig. Die Abhängigkeit der Einschweißtiefe von der Vorschubgeschwindigkeit bei unterschiedlicher Neigung der Bearbeitungsoptik zeigt eindeutig keinen Einfluss der Neigung auf die Einschweißtiefe, siehe Bild 4.13. Vergleichsuntersuchungen mit weiteren Fokuss-

durchmessern und mit der Laserleistung $P = 3 \text{ kW}$ zeigten bei diesen Werkstoffen die gleichen Ergebnisse. Es ist also festzuhalten, dass beim Scheibenlaser im unterschiedlichen Parameterbereich die charakteristische Nahtquerschnittsform unabhängig vom Auftreffwinkel des Strahls erhalten bleibt.

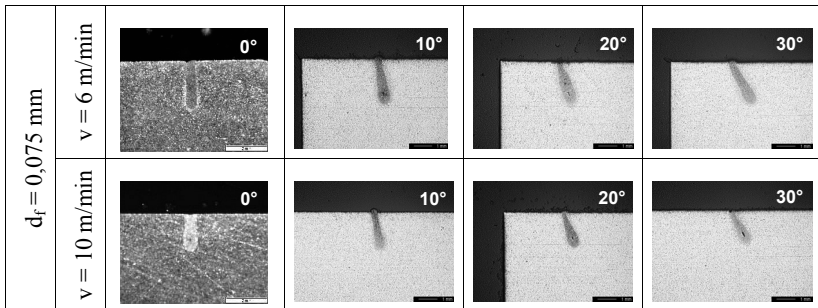


Bild 4.12: Nahtquerschnittsform in Abhängigkeit des Vorschubs und der Neigung der Bearbeitungsoptik für einen 0,075mm-Fokussdurchmesser (Werkstoff St37-2, $P = 3 \text{ kW}$).

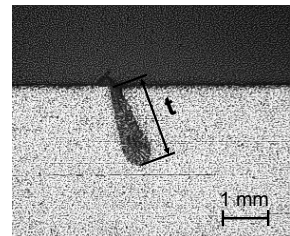
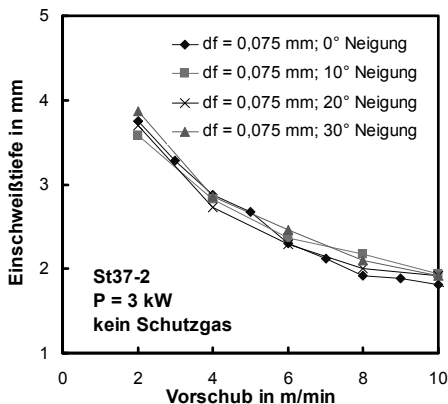


Bild 4.13: Einschweißtiefe in Abhängigkeit des Vorschubs bei unterschiedlicher Neigung der Bearbeitungsoptik für den Fokussdurchmesser $d_f = 0,075 \text{ mm}$ bei dem Werkstoff St37-2 (links) sowie eine Erläuterung des Prinzips zur Vermessung der Einschweißtiefe (rechts).

4.2.6 Einfluss der Laserleistung beim Schweißen von Getriebeteilen

Die derzeitige Motorenentwicklung führt zu immer weiter steigenden Drehmomenten. Da sie durch den gesamten Antriebsstrang zu den Fahrzeugrädern zuverlässig übertragen werden müssen, steigt die Belastung der einzelnen Elemente und somit der Bedarf nach höheren Einschweißstiefen bei ihrer Fertigung (z. B. Losräder, Festräder, Lamellenträger, Hohlräder, Zwischenwellen, An- und Abtriebswellen). Darüber hinaus muss der Laserstrahl die Bauteile sehr oft an schlecht zugänglichen Stellen effizient schweißen. Gleichzeitig muss die durch den Schweißprozess verursachte thermische Ausdehnung der Bauteile aus Komfort- und Toleranzgründen (ein schlechter Rundlauf der rotationssymmetrischen Antriebstrangelemente wird von den Autofahrern und den Fahrgästen als störend empfunden) sehr gering gehalten werden. Die Kombination aus allen diesen Anforderungen kann beim Schweißen nur durch Strahlquellen höherer Strahlqualität erreicht werden, die bei hohen Leistungen gleichzeitig einen guten Wirkungsgrad aufweisen, siehe Bild 4.14.

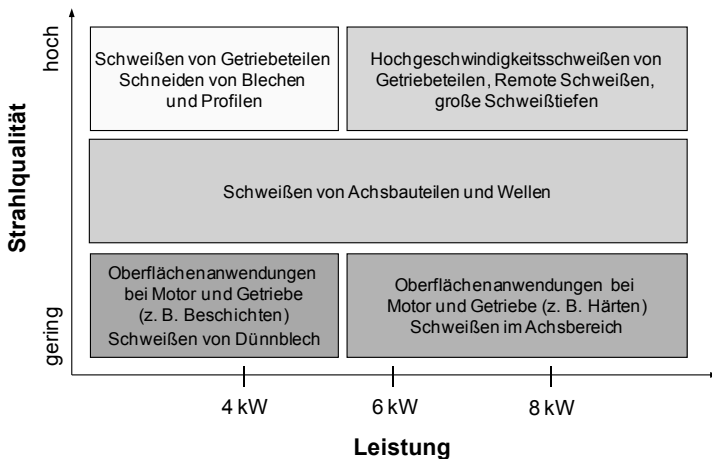


Bild 4.14: Übersicht der Anforderungen an die Strahlquellen. Verfahrensanwendungen im Automobilbereich.

Da Festkörperlaser mit solchen Eigenschaften bis vor Kurzem nicht vorhanden waren, war der CO₂-Laser mit seiner exzellenten Strahlqualität und Verfügbarkeit in höheren Leistungen für solche Schweißaufgaben am besten geeignet. Durch ihre gute Strahlqualität sind jedoch neuerdings sowohl die Scheiben- als auch die Faserlaser in der

Lage, diese Aufgaben zu übernehmen. Die Verfügbarkeit dieser neuen Strahlquellen im höheren Leistungsbereich erweist sich als eine der Hauptvoraussetzungen für deren Einsatz nicht nur im Powertrain-, sondern im gesamten Automobilbereich.

Wie bereits in Gleichung (4.1) dargestellt, spielt beim Laserstrahlschweißen für das Erreichen der gewünschten Einschweißtiefen neben dem Fokusdurchmesser die Laserleistung eine entscheidende Rolle. Typische Einschweißtiefen im Bereich der Pkw-Getriebeproduktion liegen je nach Anwendung zwischen 3 und 6 mm. Wie in Bild 4.2 gezeigt, kann dieser Einschweißtiefenbereich mit einer Laserleistung von 3 kW nicht abgedeckt werden. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Arbeit Untersuchungen mit einem 6kW-Scheibenlaser durchgeführt.

In Bild 4.15 ist der Einschweißtiefenvergleich für beide Laserleistungen für den Werkstoff St37-2 und den Fokusdurchmesser von 0,2 mm zu sehen. Die Schweißversuche zu diesem Bild wurden mit zwei unterschiedlichen Geräten durchgeführt. Der Kerndurchmesser der beiden Lichtleitkabel betrug 200 μm . Im Fokussierbereich wird bei beiden Scheibenlasern eine F-Zahl von 5 realisiert.

Durch die Erhöhung der Laserleistung erhöht sich über den untersuchten Geschwindigkeitsbereich die Einschweißtiefe. Bei 2 m/min wird eine Nahttiefe von etwa 6 mm erreicht, wodurch der Einschweißtiefenbereich der Pkw-Getriebeproduktion abgedeckt wird. Bei 6 m/min beträgt die Einschweißtiefe 4,5 mm. Im Vergleich zu dem 3kW-Scheibenlaser ist die mit dem 6kW-Laser erreichte Nahttiefe bei 6 m/min um 1,3 mm höher, siehe Differenz Δt in Bild 4.15. Für Vorschubgeschwindigkeiten größer als 6 m/min wird diese Differenz konstant gehalten, während sie für Vorschubgeschwindigkeiten kleiner als 6 m/min kontinuierlich sinkt, siehe in Bild 4.15 die Abweichung vom „idealisierten“ Kurvenverlauf. Als Grund dafür kann die durch die Erhöhung der Laserleistung verursachte starke Ausbreitung der Metaldampffackel genommen werden. Sie kann so hoch werden, wie die Brennweite der Fokussierlinse. Dies führt zu einer zur Erwärmung der Linse und somit zur Erhöhung der thermischen Zusatzbelastung der Bearbeitungsoptik, welche neben der Verkürzung der Brennweite (die eine unerwünschte Fokuslagenänderung $F_L > 0$ mit sich bringt) zu einer wesentlichen Verkürzung der Lebensdauer der optischen Elemente, wie Schutzglas und Fokussierlinse, führen können. Zum anderen kann die zwischen der Metaldampffackel und dem Laserstrahl entstehende Wechselwirkung zur Defokussierung führen, die das Schweißergebnis indirekt über eine weitere Fokuslagenänderung beeinflusst. Als Lösung für die Ausbreitung der Metaldampffackel kann das Einbauen einer zweiten etwas schwächeren

Crossjetströmung (wird zwischen der Bearbeitungsoptik und dem Schweißprozess eingebaut) genutzt werden, die diese Metaldampffackel von der zentrischen Schweißachse ablenkt. Die gleichzeitige Verwendung von Bearbeitungsoptiken mit längeren Brennweiten kann zusätzlich u. a. die Lebensdauer der optischen Komponente erhöhen.

Neben der starken Ausbreitung der Metaldampffackel führt bei den kleinsten Fokussdurchmessern ($d_f \leq 0,15 \text{ mm}$) die Erhöhung der Laserleistung zu einer verstärkten Bildung von Spritzern und Schmelzbadauswürfen. Sie wurden möglicherweise durch die Erhöhung der in [27] beschriebenen Wechselwirkung von an der Kapillarfront ausgehenden Dampf- und Schmelzeströmungen (es bilden sich in Strahlrichtung Stufen) verursacht, siehe auch Kapitel 2.1.4.

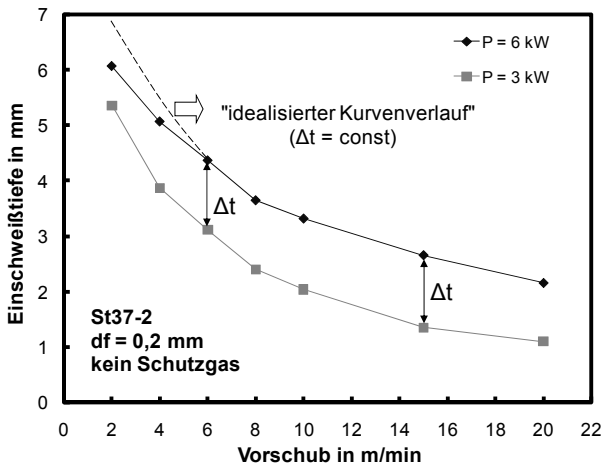


Bild 4.15: Einschweißtiefe in Abhängigkeit des Vorschubs bei dem Werkstoff St37-2. Einfluss der Laserleistung auf das Schweißergebnis.

Die in Bild 4.16 gezeigten Ergebnisse der Untersuchungen der Nahtbreite und der Querschnittsform für den gleichen Werkstoff und Fokussdurchmesser zeigen jedoch im Bereich unterhalb 6 m/min keine großen Differenzen dieser Werte an. Im Bereich oberhalb 6 m/min ist jedoch ein deutlicher Unterschied der Nahtgeometrie festzustellen. Während die Nahtquerschnittsform der 3kW-Schweißkurve keine Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit aufweist, ändert sich die Nahtquerschnittsform der 6kW-Schweißkurve unterhalb von 6 m/min von „schlank-parallel“, siehe in

Bild 4.16 die Nahtquerschnittsform bei $v = 8 \text{ m/min}$, auf „Nagelkopf“. Der Grund für diese Ergebnisse kann der schon am Anfang dieses Kapitels erwähnte Marangoni-Effekt sein.

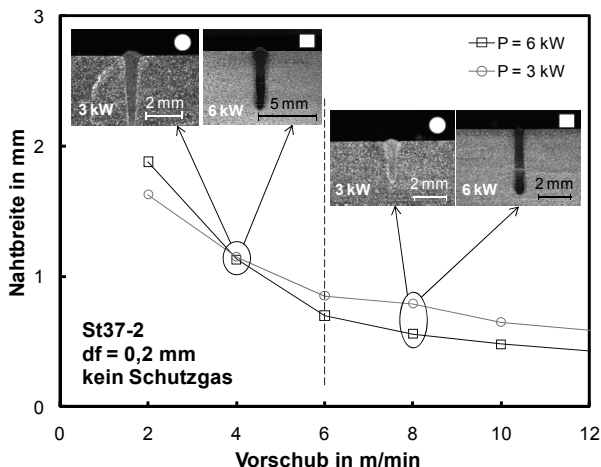


Bild 4.16: Nahtbreite und Nahtquerschnittsform in Abhängigkeit des Vorschubs für den Fokusbereich $d_f = 0,2 \text{ mm}$ und den Werkstoff St37-2.

4.3 Nahtqualität

Im Rahmen der Grundlagenuntersuchungen zum Schweißen mit den kleinsten Fokusbereichsdurchmessern ($d_f \leq 0,15 \text{ mm}$) wurden bei den untersuchten Werkstoffen sowohl geschlossene Prozesssporen als auch viele Schmelzbadauswürfe und Spritzer festgestellt, siehe Bild 4.17 und Bild 4.18. Diese Nahtfehler kennzeichnen einen sehr dynamischen Schweißprozess, in dem das Schmelzbad enormen Kräften und Spannungen ausgesetzt ist. Sie sind in der Serienproduktion aus Qualitäts- und Wirtschaftlichkeitsgründen, z. B. ein denkbarer Totalausfall der Getriebe aufgrund einer Beschädigung von Drehteilen durch sich von der Nahtoberfläche abgelöste Spritzer sowie Nacharbeit der geschweißten Bauteile nach dem Schweißprozess, nicht erlaubt.

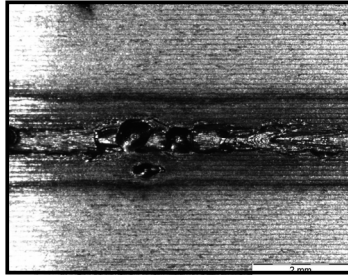


Bild 4.17: Nahtberraupe einer Blindschweißung: Werkstoff 20MoCr4, Fokusbereich $d_f = 0,075$ mm, Laserleistung $P = 3$ kW, Vorschubgeschwindigkeit $v = 6$ m/min, kein Schutzgas. Die Naht zeigt auf der Nahtoberfläche aufgrund Nahtauswürfe entstandene Löcher.

Werden die Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen bezüglich Nahtfehlerbildung zusammengefasst, wird schnell ersichtlich, dass die Entstehung dieser Prozessfehler von der Nahtquerschnittsform abhängig ist, und somit von der Wahl der Vorschubgeschwindigkeit, dem Fokusbereich, dem Divergenzwinkel, dem Prozessgas und der Laserleistung (bzw. der Leistungsdichte) beeinflusst wird. Der Laserauftreffwinkel spielt bei der Bildung von Prozesssporen, Spritzern und Schmelzbadauswürfen keine Rolle.

Bei einer näheren Betrachtung der drei Nahtquerschnittsformen (tropfenartig, schlank-parallel, nagelkopfförmig) ergibt sich aus den Grundlagenuntersuchungen, dass beim Schweißen mit dem Scheibenlaser die Wahrscheinlichkeit für eine Entstehung von Prozesssporen und Auswürfen bei Schweißnähten, die mit Parametern erzielt werden, die zu einer tropfenartigen Querschnittsform führen, am höchsten ist. Eine Nagelkopfform der Schweißnaht weist dagegen die geringste Wahrscheinlichkeit dieser Fehlerbildung auf. Das Gleiche gilt auch für die Qualität der Nahtberraupe.

Die in Bild 4.18 neben den Prozesssporen gezeigten Instabilitäten der Nahtberraupe, des Nahteinfalls (links) und der Nahtüberhöhung (rechts), könnten ein Indiz für Humping sein. Da sie jedoch nicht periodisch auftreten, sind sie ein Teil der hohen Schmelzbaddynamik, die insbesondere bei dieser Querschnittsform eine erhöhte Bildung von Schmelzbadauswürfen und Spritzern hervorruft.

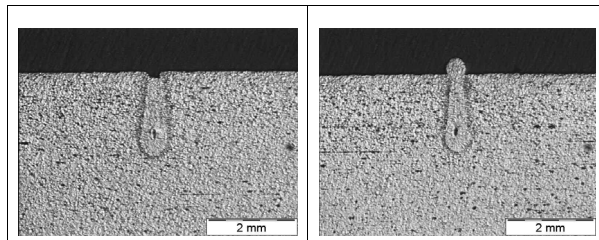


Bild 4.18: Nahtquerschnitt von zwei Blindschweißungen: Werkstoff St37-2, Fokusedurchmesser $d_f = 0,075$ mm, Laserleistung $P = 3$ kW, Vorschubgeschwindigkeit $v = 8$ m/min (links) und $v = 10$ m/min (rechts), Schutzgas Helium.

4.4 Vergleichende Untersuchungen zu anderen Lasertypen

Im Rahmen dieser Untersuchungen wird zuerst der Vergleich zwischen dem Scheiben- und dem CO_2 -Laser durchgeführt. Er basiert auf Blindschweißungen, die bei gleicher Laserleistung ($P = 3$ kW) und gleichem Fokusedurchmesser ($d_f = 0,28$ mm) für den Werkstoff 16MnCr5 gemacht wurden. Da sich beide Strahlquellen neben der Wellenlänge auch im Strahlparameterprodukt wie im Strahlprofil und in der Rayleighlänge des fokussierten Strahls unterscheiden, ist ein sich überlagernder Einfluss aller diesen Größen nicht auszuschließen. Trotz dieser Unterschiede sind die in Bild 4.19 wiedergegebenen Strahleigenschaften die noch am ähnlichsten, die im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung standen.

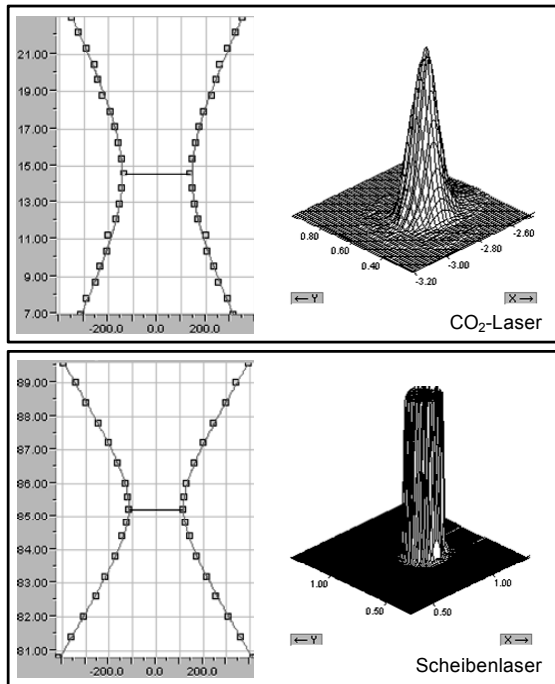


Bild 4.19: Kaustik des für die Vergleichsversuche verwendeten CO₂-Lasers (oben links; $d_f = 0,28$ mm) sowie des Scheibenlasers (unten links; $d_f = 0,2$ mm) bei 3 kW beinhaltend; Isometriemessungen des Strahlprofils in anderen Maßstäben (rechts).

Bei Betrachtung der Einschweißtiefe in Abhängigkeit des Vorschubs (Bild 4.20) kann im Vergleich festgestellt werden, dass mit dem Scheibenlaser bei $v = 6$ m/min eine Einschweißtiefe von ca. 3 mm, dagegen beim CO₂-Laser nur 1,5 mm, erreicht wird. Steigt die Vorschubgeschwindigkeit darüber an, bleibt diese Einschweißtiefedifferenz in etwa erhalten. Verringert sich jedoch die Vorschubgeschwindigkeit unter 6 m/min, holt der CO₂- den Scheibenlaser sehr schnell ein, schließlich wird bei 2 m/min die gleiche Einschweißtiefe erreicht.

Es kann also zusammengefasst werden, dass der höhere Absorptionsgrad und damit Einkoppelgrad bei $\lambda \approx 1 \mu\text{m}$ bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten zu tieferen Schweißnähten führt, als beim Schweißen mit dem CO₂-Laser. Die größere

Rayleighlänge des fokussierten Strahls z_{Rf} des CO₂-Lasers ist bei den niedrigeren Vorschubgeschwindigkeiten dagegen eindeutig im Vorteil.

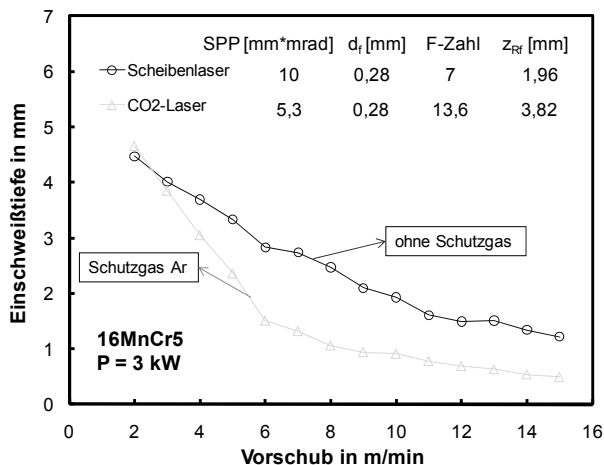


Bild 4.20: Einschweißtiefe in Abhängigkeit des Vorschubs bei dem Werkstoff 16MnCr5. Vergleich zwischen dem CO₂- und dem Scheibenlaser, P = 3 kW.

Dieses Beispiel zeigt, dass der Scheibenlaser bei der gleichen Schweißaufgabe, d. h. Erzielen einer vorgegebenen Einschweißtiefe, in dem hier gezeigten Bereich deutlich wirtschaftlicher ist, als der CO₂-Laser. Denn Einschweißtiefen z. B. kleiner als 2 mm werden mit dem Scheibenlaser bei fast doppelter Vorschubgeschwindigkeit erreicht (d. h. halber Streckenenergie P/v), als mit dem CO₂-Laser (Bild 4.21, links).

Untersuchungen des Prozesswirkungsgrads η_P , der in Gleichung (2.7) als Funktion der Querschnittsfläche Q und der Streckenenergie P/v beschrieben wurde, untermauern obige Aussage. Sie zeigen in Bild 4.21 (rechts) eine größere Neigung der Relation $Q \sim P/v$ und kennzeichnen somit einen höheren Prozesswirkungsgrad für den Scheibenlaser.

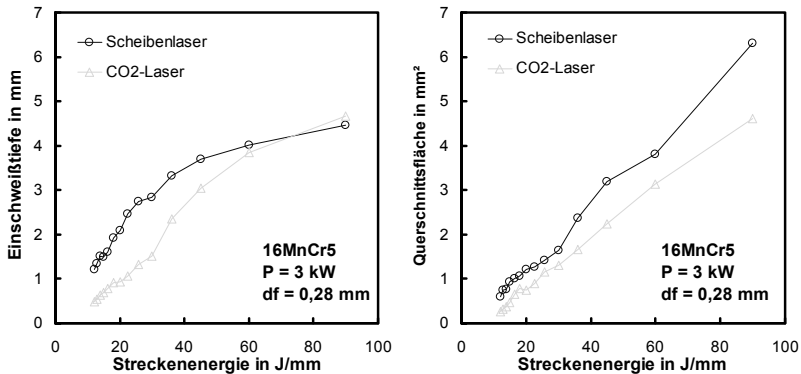


Bild 4.21: Einschweißtiefe in Abhängigkeit der Streckenenergie P/v für den Werkstoff 16MnCr5 (links). Einfluss der Wellenlänge auf die Neigung $Q = f(P/v)$ und damit auf den Prozesswirkungsgrad (rechts).

Als zweiter Punkt dieser Untersuchungen gilt der Vergleich zwischen dem Scheiben- und dem Faserlaser. Dafür wurden mit beiden Laserquellen für den Werkstoff 16MnCr5 und den Fokussdurchmesser $d_f = 0,2$ mm Blindschweißungen mit unterschiedlichen Laserleistungen durchgeführt.

Beide Strahlquellen unterscheiden sich im Intensitätsprofil des fokussierten Strahls, im Strahlparameterprodukt (der Scheibenlaser hat ein Strahlparameterprodukt von $9,5 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$; beim Faserlaser beträgt es dagegen $10 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$) sowie in der Rayleighlänge. Wie in Bild 4.22 dargestellt, endet das Tophat-Strahlprofil des Faserlasers im unteren Bereich mit einem Radius in der Ebene (Bild 4.22 unten rechts), während das Profil des Scheibenlasers mit der Ebene in diesem Bereich einen nahezu rechten Winkel bildet (Bild 4.22 unten links). Dies führt am Rande des Isometrieprofils zu einer unterschiedlichen Intensitätsverteilung, die im Übrigen auch für den Vergleich zwischen dem CO₂- und dem Scheibenlaser gilt, vgl. die Isometrieprofile in Bild 4.19. Die Wellenlänge des Scheibenlasers beträgt 1030 nm und ist mit 40 nm nur wenig kürzer als die des Faserlasers. Als weitere Differenz, die aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Fokussierbrennweiten die Auswahl der Rayleighlänge beeinflusst und sich über das experimentelle Ergebnis der Schweißnaht bemerkbar machen könnte, sollten die verschiedenen Hersteller der Bearbeitungsoptiken erwähnt werden. Die Versuche mit dem Faserlaser wurden mit

der YW50-Bearbeitungsoptik der Fa. Precitec durchgeführt. Bei dem Scheibenlaser dagegen kamen die D70- und D35-Bearbeitungsoptiken der Fa. Trumpf zum Einsatz.

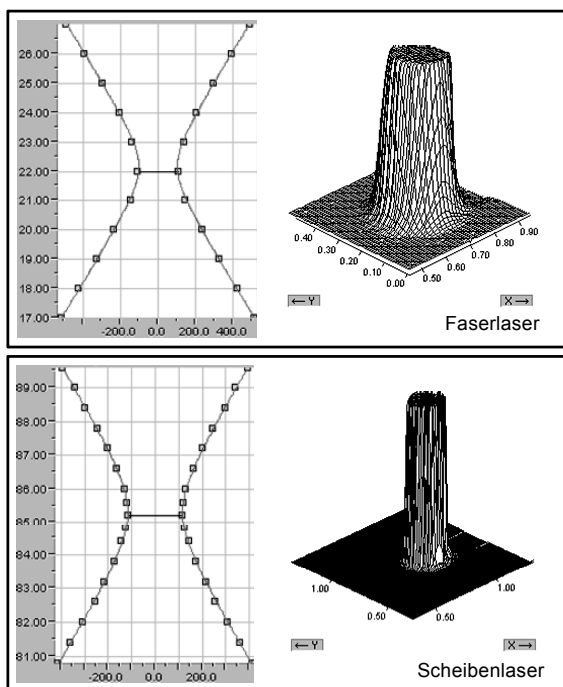


Bild 4.22: Kaustik der für die Vergleichsversuche verwendeten Faser- (oben; $d_f = 0,2$ mm) und Scheibenlaser (unten; $d_f = 0,2$ mm) bei 3 kW beinhaltend zusätzliche Iso-metriemessungen des Strahlprofils in unterschiedlichen Maßstäben.

Wird bei Laserleistungen von 3 und 6 kW für den Werkstoff 16MnCr5 die Einschweißtiefe als Funktion des Vorschubs untersucht (Bild 4.23), lässt sich feststellen, dass im Geschwindigkeitsbereich unterhalb von 6 m/min mit dem Faserlaser eine bis zu ca. 20%-ige Erhöhung der Einschweißtiefe gegenüber dem Scheibenlaser erreicht wird, siehe Δt in Bild 4.23 bei $v = 1$ m/min, und das obwohl der fokussierte Strahl des Scheibenlasers eine längere Rayleighlänge hat. Der Grund für diese Verbesserung kann durch den genannten Unterschied in der Intensitätsverteilung im Strahlprofil erklärt werden, welcher im Vergleich zu dem Scheibenlaser zu einer im unteren Bereich etwas schlankeren Nahtquerschnittsform führt. Eine mit dem Scheibenlaser bei hohen Geschwindigkeiten ($v \geq 6$ m/min) erzeugte Schweißnaht hat im Vergleich

zum Faserlaser bei gleicher Einschweißtiefe eine geringere Nahtbreite (vgl. in Bild 4.23 Nahtquerschnitte bei $v = 8 \text{ m/min}$). Bei geringen Vorschubgeschwindigkeiten dagegen wird die mit dem Scheibenlaser erzeugte Schweißnaht immer breiter, während die Naht des Faserlasers ihre Breite beibehält. Die Gründe für dieses Verhalten der Nahtbreite bei dem Scheibenlaser können unterschiedliche optische Effekte in der Fokussierlinse sein, die aufgrund der Wechselwirkung zwischen der Metaldampffackel und dem Laserstrahl entstehen (z. B. Brennweitenverkürzung aufgrund Erwärmung der Fokussierlinse).

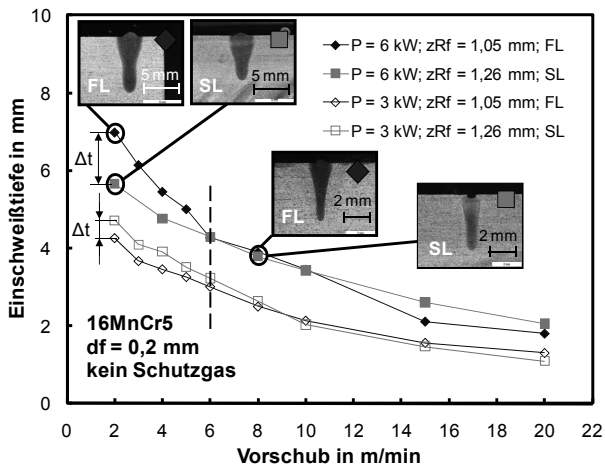


Bild 4.23: Einschweißtiefe in Abhängigkeit des Vorschubs für den Werkstoff 16MnCr5 bei Laserleistungen von 3 und 6 kW, kein Schutzgas. Direkter Vergleich zwischen dem Scheiben- und dem Faserlaser beim Fokusedurchmesser $df = 0,2 \text{ mm}$.

Wenn, wie in Kapitel 4.2.6 (Bild 4.15) gezeigt, für den Werkstoff 16MnCr5 und den Faserlaser die Verbesserung in der Einschweißtiefe durch die Erhöhung der Laserleistung untersucht wird, wird ersichtlich, dass für den Vorschub $v = 6 \text{ m/min}$ eine Erhöhung der Einschweißtiefe von 3,01 auf 4,09 mm um 1,08 mm (Differenz Δt) erreicht wird. Diese Verbesserung der Einschweißtiefe liegt bei dieser Vorschubgeschwindigkeit sehr nahe an der Verbesserung des Scheibenlasers. Bei Geschwindigkeiten kleiner als 6 m/min wird die Differenz Δt sogar größer als die des Scheibenlasers.

Die Neigungsunterschiede der Relation $Q = f(P/v)$ zeigen in Bild 4.24 bei dem Werkstoff 16MnCr5 für die Leistung $P = 6 \text{ kW}$ geräteabhängige Unterschiede im Bereich der hohen Streckenenergie. Die größere Neigung der Faserlaser-Kennlinie charakteri-

siert einen höheren Prozesswirkungsgrad im Streckenenergiebereich größer als 60 J/mm. Im Bereich kleiner als 60 J/mm (entspricht hohen Vorschubgeschwindigkeiten) können dagegen keine Unterschiede in der Kurvenneigung festgestellt werden.

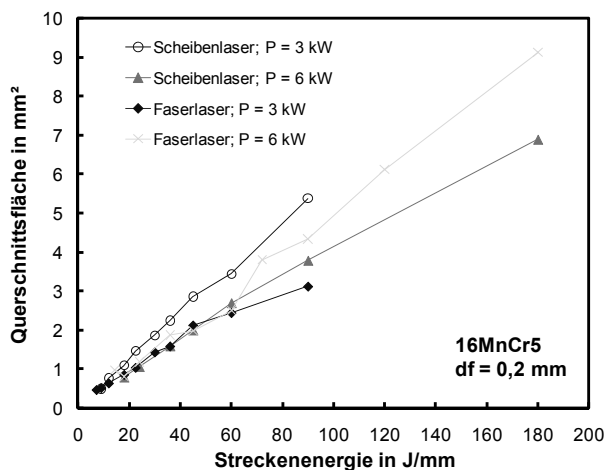


Bild 4.24: Querschnittsfläche in Abhängigkeit von der Streckenenergie für den Werkstoff 16MnCr5. Vergleich der Neigung $Q = f(P/v)$ und somit des Prozesswirkungsgrads bei Scheiben- und Faserlaser, $P = 3$ und 6 kW.

Die Ergebnisse der vergleichenden Untersuchungen zeigen also, dass beide dioden-gepumpten Laser höchster Brillanz für vergleichbare Schweißaufgaben gleichermaßen geeignet sind. Es konnten jedoch in Abhängigkeit der Vorschubgeschwindigkeit Unterschiede in der Einschweißtiefe, der Nahtbreite und der Nahtquerschnittsform festgestellt werden, deren letztendliche Deutung weiterer Untersuchungen bedarf.

4.5 Schweißen von realen Bauteilen mit dem Scheibenlaser

Basierend auf den in Kapitel 4.2 und 4.4 gewonnenen Erkenntnissen wurden im Rahmen dieser Arbeit Schweißuntersuchungen mit dem Scheibenlaser an realen Bauteilen aus dem Getriebereich der Pkw-Produktion der Daimler AG durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war die mögliche Übertragbarkeit dieser Erkenntnisse in die Getriebefertigung dieses Unternehmens. Als Versuchsbauteile standen die An-

triebswelle und der Zusammenbau „Hohlrad“ (ZB-Hohlrad) des neuen automatischen Getriebes (NAG) sowie das Gehäuse und das Tellerrad eines Pkw-Ausgleichsgetriebes zur Verfügung.

4.5.1 Schweißen der Antriebswelle des NAG

In der Serienproduktion erfolgt der Schweißvorgang für die Antriebswelle an einer Anlage der Maschinenfabrik Arnold, siehe in Bild 2.11 in Kapitel 2.4.1. Dort werden an diesem Bauteil mit einem CO₂-Laser eine axiale Schweißung und zwei radialen Schweißungen durchgeführt. Bei der axialen Schweißung, siehe Bild 4.25, werden nach dem Spannvorgang die Welle (1) und der Lamellenträger (2) zuerst bei 10 m/min geheftet und danach mit 3 m/min geschweißt. Dabei beträgt die Laserleistung ca. 3 kW. Als Schutzgas, zur Reduktion der Plasmabildung, wird CO₂ eingesetzt.

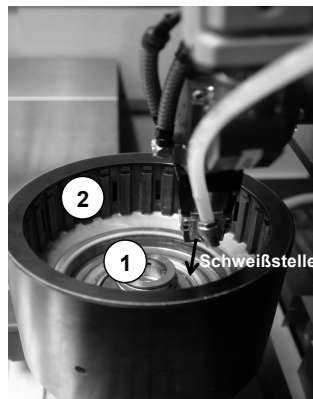


Bild 4.25: Lamellenträger der Antriebswelle des neuen automatischen Getriebes (NAG) in der Spannvorrichtung.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde in einem ersten Versuch, als Vergleich zu der Serienfertigung, die axiale Schweißung der Antriebswelle mit einem 3kW-Scheibenlaser realisiert. Die Nahtgeometrie und die Einschweißtiefe der Serienschweißung konnten mit dem Scheibenlaser bei einer ca. 1,5-mal höheren Vorschubgeschwindigkeit, als in der derzeitigen Serienanlage, erreicht werden. Außerdem konnten die Welle und der Lamellenträger aufgrund der in Kapitel 4.2 diskutierten Grundlagenuntersuchungen ohne Schutzgas zusammengeschweißt werden.

Dieses Ergebnis zeigte zum ersten Mal auf einem realen Bauteil das hohe wirtschaftliche Potenzial des Scheibenlasers.

4.5.2 Tellerradschweißen

Im Getriebebau wird das Grundgehäuse der Ausgleichsgetriebe meistens aus Guss-eisen mit Kugelgrafit, das Tellerrad dagegen aus Einsatzstahl gefertigt. Bei einem PKW mit klassischem Antriebskonzept (Frontmotor und Heckantrieb) ist das Grundgehäuse des Ausgleichsgetriebes fest mit dem Tellerrad verbunden, was die Längsrotation der Kardanwelle in eine Querrotation umwandelt. In diesem Gehäuse sitzen vier identische, ineinandergreifende Kegelräder aus Einsatzstahl.

Es gibt zwei Verfahren, die die Verbindung zwischen dem Gehäuse des Ausgleichsgetriebes und dem Tellerrad ermöglichen:

- Mechanische Fügetechnik → Verschrauben;
- Thermische Fügetechnik → Verschweißen.

Da die Gusseisenwerkstoffe im Allgemeinen nur bei Beachtung bestimmter Bedingungen schweißgeeignet sind, wurde in der Vergangenheit das Verschrauben beider Teile bevorzugt, siehe Bild 4.26. Allerdings führten die Bemühungen der Automobilindustrie, das Gewicht einzelner Bauteile und somit des Gesamtfahrzeuges zu reduzieren, zu ersten Versuchen zum Verschweißen dieser beiden Bauteile. Mit konventionellen Schweißverfahren hat sich dies aber als sehr schwer und nicht wirtschaftlich erwiesen. Erst die Anwendung des berührungslosen Strahlwerkzeugs Laser hat in den letzten Jahren die wirtschaftliche thermische Anbindung zwischen dem Gehäuse des Ausgleichsgetriebes und dem Tellerrad ermöglicht. Eine beispielhafte Schweißung ist in Bild 4.27 zu sehen.



Bild 4.26: Verschraubung des Ausgleichsgetriebegehäuses mit dem Tellerrad [59].

In der heutigen Serienproduktion wird das Tellerrad mit dem Gehäuse des Ausgleichsgetriebes mithilfe eines Nickel-Zusatzwerkstoffes zusammengeschweißt. Da dieser die Duktilität der Schmelze erhöht, reduziert er die Ledeburitbildung und somit die Wahrscheinlichkeit für Heißrissbildung.

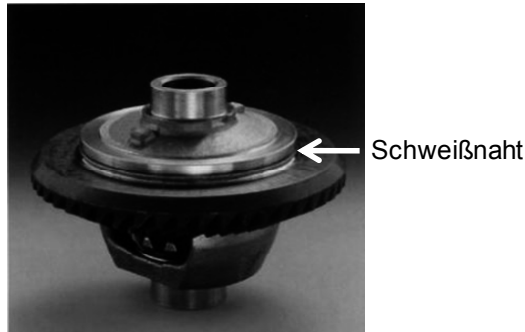


Bild 4.27: Verschweißung des Ausgleichsgetriebegehäuses mit dem Tellerrad [60].

Der zweite Versuch, ein reales Bauteil mit dem Scheibenlaser zu schweißen, wurde bei der Verbindung Tellerrad/Grundgehäuse eines Ausgleichsgetriebes der aktuellen Pkw-Fahrzeugproduktion von Daimler AG durchgeführt. Dabei wurde bei einer Leistung von 6 kW und einem Fokusbereich von 0,2 mm kein Zusatzwerkstoff eingesetzt. Die Schweißversuche wurden bei einer für diese Anwendung sehr hohen Vorschubgeschwindigkeit von 4 m/min durchgeführt. Die Kombination aus einem Fokusbereich, der kleiner als 0,3 mm ist, und einer Schweißgeschwindigkeit, die im Vergleich mit der Serienfertigung um das ca. 2-fache höher ist, führte bei diesem Bauteil zu einer extrem hohen Wärmeableitung, welche die Ledeburitbildung im Schweißgut und somit die Heißrisse stark reduzierte. Wie in Bild 4.28 dargestellt, wird eine ca. 6 mm tiefe und 0,5 bis 0,7 mm breite Schweißnaht erzielt, die keine Heißrisse aufweist. Aufgrund seiner Vorteile wurde dieses Verfahren im deutschen Patentamt mit der Nummer DE102005057317 angemeldet.

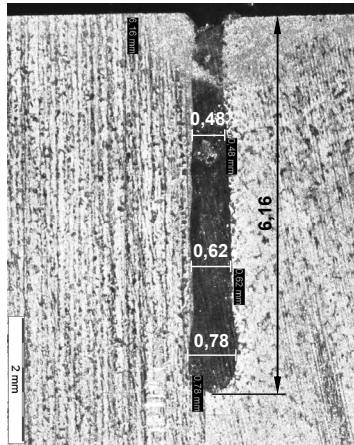


Bild 4.28: Metallografischer Querschliff der Schweißnahtverbindung.

Durch die sehr schmale Schweißnaht wird einerseits die Wärmebelastung des Bauteils enorm reduziert, andererseits ist aber, um ein gutes Schweißergebnis zu erzielen, eine sehr hohe Positionierungsgenauigkeit erforderlich, sodass der Erfolg dieser Versuche nur durch den Einsatz entsprechender Überwachungssysteme (z. B. Nahtverfolgungssysteme sowie In- und Postprozessüberwachungen) gesichert werden kann. Zusätzlich bilden sich bei diesem Schweißprozess aufgrund der hohen Vorschubgeschwindigkeit, die ihrerseits zu hoher Dynamik des Schmelzbads führt, enorm viele Schweißspritzer. Dies hat eine sehr raue und für den Produktionseinsatz nicht akzeptable Nahtoberfläche zur Folge. Um diese Bauteile mit dem Scheibenlaser in der Serienfertigung zu verschweißen, benötigt es weitere Verbesserungen der Nahtqualität.

4.5.3 Schweißen des Hohlrads mit dem Hohlradträger

Aufgrund der positiven Ergebnisse des Schweißens der NAG-Antriebswelle und des Ausgleichsgetriebes wird die Schweißung zwischen dem Hohlrad und dem Hohlradträger, hier als Zusammenbau (ZB) „Hohlrad“ bezeichnet, nach ähnlichen Gesichtspunkten durchgeführt. Dabei wird das Bauteil etwas genauer sowohl zerstörungsfrei als auch zerstörend geprüft, denn trotz erreichter Einschweißtiefe und Nahtquerschnittsform bei den ersten Versuchen muss für den Serieneinsatz sichergestellt

werden, dass ein Getriebebauteil während seiner Lebensdauer die vorgegebenen Drehmomente problemlos überträgt.

Ermittlung der Schweißparameter

Der ZB-Hohlrad besteht aus einem Hohlrad und dessen Träger (Hohlradträger), siehe Bild 4.29. Das Hohlrad ist innen schräg verzahnt (die Zähne sind gehärtet) und besteht aus dem Vergütungsstahl 27MnSiVS6. Dieser Stahl, der mikrolegiert und hochfest ist, wird auch für viele andere Schmiedeteile im Fahrzeugbau, wie z. B. Pleuel, Motorträger und dem Querlenker, verwendet. Der Hohlradträger besteht aus einem weichen, unlegierten Stahl StW24, der eine sehr gute Kaltumformbarkeit hat.

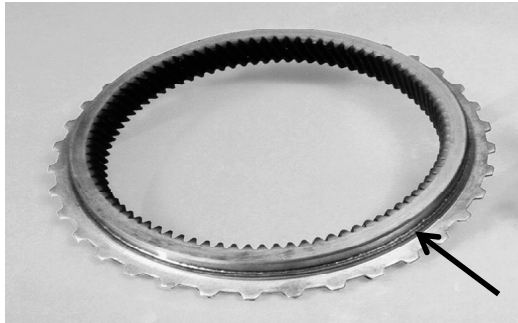


Bild 4.29: Hohlrad und Hohlradträger des neuen automatischen Getriebes (NAG) zusammengeschweißt mit einer radialen Schweißnaht [Quelle: Daimler AG], siehe Pfeil.

Die Schweißparameter werden entsprechend den Ergebnissen der Grundlagenuntersuchungen und der geforderten Nahtgeometriegrößen ermittelt. Als Grundlage für Letztere gilt die in Bild 4.30 dargestellte Schweißnaht eines bisherigen Serienbauteils. Der Fügeprozess findet unter einem Schweißwinkel α_s zur Vertikalen statt. Die Nahtbreite b wird an der Oberkante gemessen; sie bleibt über die Einschweißtiefe nahezu konstant, was zu einer nur leicht V-förmigen Schweißnaht führt.

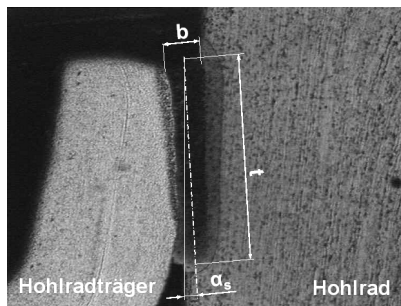


Bild 4.30: Nahtgeometrie eines Serienbauteils geschweißt mit einem CO₂-Laser.

Der Hohlradträger liegt in der Spannvorrichtung auf dem Hohlrad, kann aber durch seine Biegung die Entstehung eines Spalts im unteren Teil der Fügestelle während des azimuthalen Schweißvorschubs nicht verhindern. Somit muss die Schweißnaht im unteren Teil der Fügestelle so gestaltet werden, dass sie immer noch eine ausreichende Breite aufweist und sichergestellt ist, dass der Spalt überbrückt wird. Darüber hinaus müssen durch die Nahtbreite gewisse Fertigungstoleranzen, der Wärmeverzug und diverse Ungenauigkeiten der Drehachse bzw. der Spannvorrichtung ausgeglichen werden.

Die geforderte Nahtgeometrie wird bei diesen Schweißversuchen für zwei Fokusdurchmesser ($d_f = 0,15 \text{ mm}$ und $d_f = 0,2 \text{ mm}$) durch eine Variation der Heft- (v_H) und der Schweißgeschwindigkeit (v_S), des Schweißwinkels α_S und der Fokusslage F_L erzeugt. Die Laserleistung bleibt dabei konstant und hat mit 2,6 kW den Wert der Serienschweißanlage. Die Schweißparameter dieser Versuche sind vergleichend in Tabelle 4.1 dargestellt.

Für beide Fokusdurchmesser wurden die entsprechenden Schweißparameter gefunden, die zu einer mit den Serienteilen vergleichbaren Nahtquerschnittsform und Nahtober-
raupe führten, siehe Tabelle 4.2. Die mit diesen Schweißparametern erreichten Naht-
geometriegrößen waren demzufolge vergleichbar mit denen der Serienteile. Als
zusätzliches Kriterium zur Bewertung von Schweißnähten gilt neben der Naht-
geometrie und Nahtquerschnittsform die Nahtoberraupe, denn durch den Scheibenlaser
sollte keine erhöhte Spritzerbildung hervorgerufen werden. Um Abweichungen dieser
zwei Bewertungskriterien in die Versuche einfließen zu lassen, wurden pro Versuchs-
reihe mindestens zehn Bauteile geschweißt. Die Nahtgeometrieparameter wurden
somit in Tabelle 4.2 mit ihren Durchschnittswerten (Index „D“) bewertet.

Die Nahtgeometrieparameter Nahtbreite, Einschweißtiefe und Querschnittsfläche der Serienteile wurden durch metallografische Untersuchungen an mehreren Bauteilen ermittelt. Bei diesen Untersuchungen betrug die Nahtbreite $b = 0,40$ bis $0,65$ mm, die Einschweißtiefe $t = 2,5$ bis $3,5$ mm und die Querschnittsfläche $Q = 1,3$ bis $1,7$ mm².

Schweißparameter	Schweißparameter der Serie ($z_{Rf} = 3,82$ mm)	Schweißparameter für $d_f = 0,2$ mm ($z_{Rf} = 1$ mm)	Schweißparameter für $d_f = 0,15$ mm ($z_{Rf} = 0,75$ mm)
d_f in mm	200	200	150
v_H in m/min	10	25	25
v_S in m/min	3	5	5
α_S in °	6	6	7
F_L in mm	-1	-1	0,5
P in kW	2,6	2,6	2,6
Prozessgas	CO ₂	Druckluft	Druckluft

Tabelle 4.1: Vergleiche der Schweißparameter.

Aufgrund des größeren Absorptionsgrads bei $\lambda \approx 1$ µm wird das Tiefschweißen mit dem Scheibenlaser, verglichen mit dem CO₂-Laser, bei einem niedrigeren Strahlparameterquotient P/df erreicht [61], siehe Schwelle in Bild 2.3. Dies ermöglichte gegenüber der Serienanlage eine Erhöhung der Heftgeschwindigkeit v_H von 10 auf 25 m/min.

Mit dem Fokusbereich $d_f = 0,2$ mm wird bei diesen Versuchen eine Nahtgeometrie erreicht, die nahezu identisch mit der Nahtgeometrie des bisherigen Serienbauteils ist. Darüber hinaus ähnelt auch die Nahtoberraupe des Bauteils sehr stark jener des Serienbauteils, vgl. das Schliffbild und die Nahtoberraupe in Tabelle 4.2.

Mit dem Fokusbereich von 0,15 mm konnte hingegen die gewünschte Nahtgeometrie nicht erreicht werden. Die durchschnittliche Einschweißtiefe dieser Schweißnaht liegt sogar mit 2,13 mm unter dem zulässigen Grenzwert von 2,5 mm. Eine Reduzierung der Schweißgeschwindigkeit war bei diesem Fokusbereich nicht zielführend, denn, wie schon in Kapitel 4.4 erwähnt, verliert der Scheibenlaser

bei geringeren Vorschubgeschwindigkeiten seine Vorteile gegenüber dem CO₂-Laser in der Einschweißtiefenbildung.

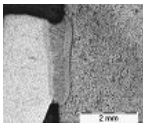
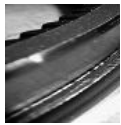
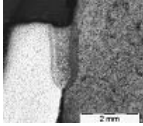

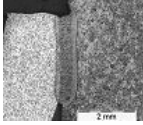

Parameter	Schliffbild	Nahtgeometrie	Querschnittsform	Nahtoberraupe
Serienbauteil		$b_D = 0,52 \text{ mm}$ $t_D = 3,22 \text{ mm}$ $Q_D = 1,62 \text{ mm}^2$	Gut	
Bauteil geschweißt mit $d_f = 0,15 \text{ mm}$		$b_D = 0,67 \text{ mm}$ $t_D = 2,13 \text{ mm}$ $Q_D = 1,35 \text{ mm}^2$	Gut	
Bauteil geschweißt mit $d_f = 0,2 \text{ mm}$		$b_D = 0,50 \text{ mm}$ $t_D = 3,23 \text{ mm}$ $Q_D = 1,52 \text{ mm}^2$	Gut	

Tabelle 4.2: Ergebnisse der Schweißversuche des ZB-Hohlrads.

Die weiteren Untersuchungen bestanden darin, dass die geschweißten Bauteile, auch die mit $d_f = 0,15 \text{ mm}$ gefügten, mittels unterschiedlicher Schweißnahtprüfungen verglichen wurden. Es sollte herausgefunden werden, ob die Bauteile, die mit dem Scheibenlaser geschweißt wurden, ähnliche Prüfungswerte aufzeigen, wie die der Serienbauteile.

Schweißnahtprüfung

Bei der Schweißnahtprüfung wurden die bekannten zerstörungsfreien und zerstörenden Methoden angewandt. Um das bei diesen Bauteilen wichtige Qualitätskriterium des Wärmeverzugs beurteilen zu können, wurde für zehn Bauteile eine zusätzliche Härteprüfung vorgenommen. Sie wurde im Bereich „Materialprüfung“ der Daimler AG durchgeführt.

Das geschweißte Bauteil wurde zuerst zerstörungsfrei mittels eines Ultraschallverfahrens überprüft, wofür das Reflexionsschallverfahren zum Einsatz kam. Dabei

wurden alle Bauteile über den kompletten Umfang untersucht. Die Ergebnisse dieser Prüfung von jeweils einem Bauteil sind in Bild 4.31 beispielhaft dargestellt. Durch die vielen starken Reflexionen (helle Bereiche) ist in diesem Bild ersichtlich, dass die Schweißnaht mit dem Fokusdurchmesser von 0,15 mm (2) fast über die ganze Länge keine ausreichende Einschweißtiefe aufweist. Selbst bei dem Serienbauteil (1) sind die hellen Bereiche ab der Mitte der Schweißnaht ein Indiz für Anbindungsfehler. Sie vermindern zwar die Festigkeit der Schweißverbindung, sind allerdings nach [35] bis zu einem gewissen Grad zulässig. Die Schweißnaht mit dem Fokusdurchmesser $d_f = 0,2$ mm (3) weist dagegen die geringsten Fehler auf. Hier sind nur kleine Unregelmäßigkeiten bei ca. 1/3 des Schweißumfangs zu erkennen, die von den Schliffbildern als geringer Nahtefall bestätigt werden, siehe Schliffbild bei ca. 340° .

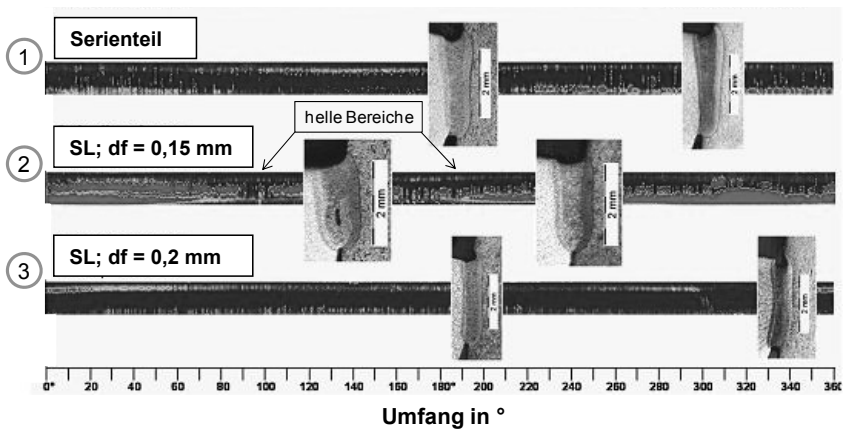


Bild 4.31: Vergleiche der Ultraschallergebnisse (Reflexion des Ultraschalls) beinhaltend Schliffbilder. Die hellen Bereiche sind ein Indiz für fehlende Anbindung.

In einer zweiten Prüfung wurde zerstörend (nach DIN EN 1320 [62]) in einem Auspressversuch die Festigkeit der unterschiedlichen Schweißverbindungen verglichen. In Bild 4.32 ist eine schematische Skizze dieser Prüfung dargestellt. Dabei wird der Hohlradträger auf einer speziellen Auflage fixiert, während auf das Hohlrad über eine Hydraulikpresse eine Auspresskraft einwirkt. Diese Auspresskraft wird solange erhöht, bis das Bauteil zerstört wird.

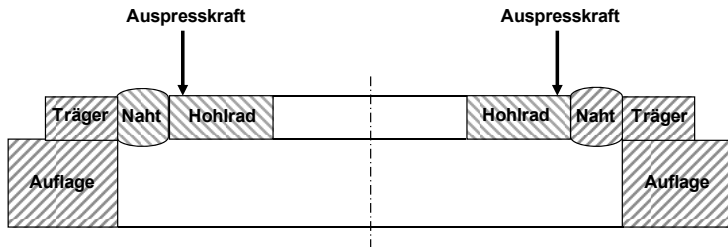


Bild 4.32: Schematische Darstellung des Auspressversuchs.

Bei diesem Versuch wurden die Serienteile durchschnittlich bei 600 kN zerstört. Erwartungsgemäß konnten die Bauteile, die mit einem Fokusbereich von 0,15 mm geschweißt wurden, diese Werte nicht erreichen, sondern wurden schon mit 300 kN zerstört (Bild 4.33). Aufgrund dieser schlechten Ergebnisse wurden diese Bauteile in der anschließenden Härtemessung nicht berücksichtigt. Ähnlich wie bei den Ultraschalluntersuchungen konnte auch hier das beste Ergebnis wieder bei den mit dem Scheibenlaser und 0,2mm-Fokusbereich geschweißten Bauteilen bestätigt werden: Diese Bauteile wurden erst mit einer durchschnittlichen Auspresskraft von 650 kN zerstört.

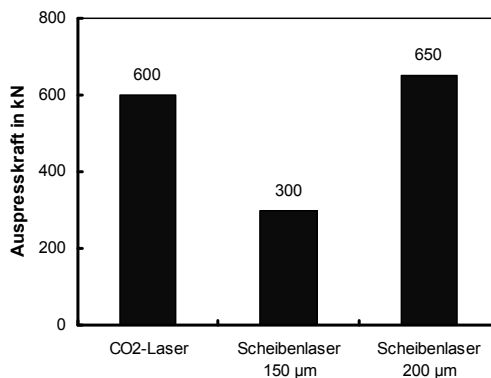


Bild 4.33: Ergebnisse des Auspressversuchs.

Als Letztes wurde der Einfluss der Streckenenergie P/v – also der Erwärmung – auf das ZB-Hohlrad mithilfe entsprechender Härtemessungen untersucht. Sie wurden nach

dem in DIN EN ISO 6507-1 [63] beschriebenen Verfahren „Härteprüfung nach Vickers“ ausgerichtet.

Die Härtemessungen wurden an denselben Querschliffen durchgeführt, mit denen die Werte der Nahtgeometrie ermittelt wurden. In Bild 4.34 sind die Bereiche dargestellt, in denen die Härte gemessen wurde. Neben der Härte in der Schweißnaht und in der Wärmeeinflusszone (WEZ) ist die Härte der Zahnflanke sehr wichtig, die durch den Schweißprozess nicht beeinflusst werden und immer konstant bleiben sollte.

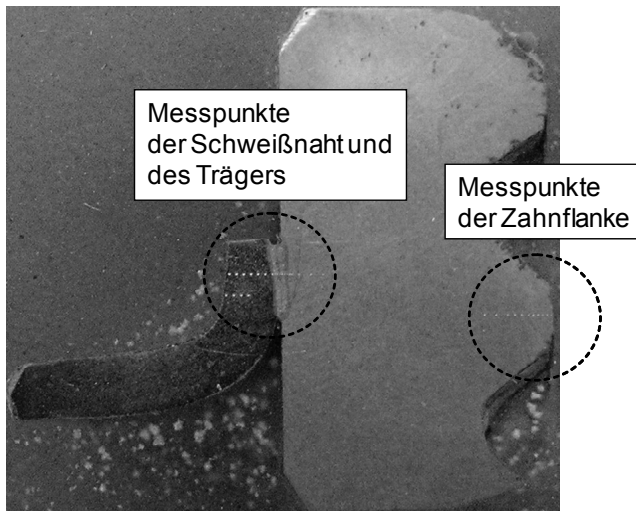


Bild 4.34: Bereiche der Härtemessung.

Die Ergebnisse der Härtemessung sind in Bild 4.35 dargestellt, in dem von links nach rechts der Hohlradträger, die Schweißnaht (einschließlich der WEZ) und das Hohlrad mit der Verzahnung abgebildet sind.

Als Erstes wurde der Härteverlauf im noch nicht geschweißten Hohlrad und Hohlradträger aufgenommen, der klar zeigt, dass der Hohlradträger eine etwas niedrigere Härte als das Hohlrad hat. Dies ist mit den unterschiedlichen Werkstoffen beider Teile zu erklären. Danach wurden der Härteverlauf eines Serienbauteils und der Verlauf eines mit dem Scheibenlaser geschweißten Bauteils erstellt. Als Folge des Schweißverfahrens entstehen dann Spitzenhärtewerte in der WEZ des Hohlrads von ca. 580 HV (Bild 4.35). Trotz unterschiedlicher Streckenenergien sind keine großen

Unterschiede im Härteverlauf zwischen den Serienteilen und den mit dem Scheibenlaser geschweißten Bauteilen zu sehen. Festzuhalten gilt, dass der Schweißprozess den Härteverlauf der Zahnflanke nicht beeinflusst, wie aus dem Kurvenverlauf im Zahnbereich in Bild 4.35 (rechts) ersichtlich.

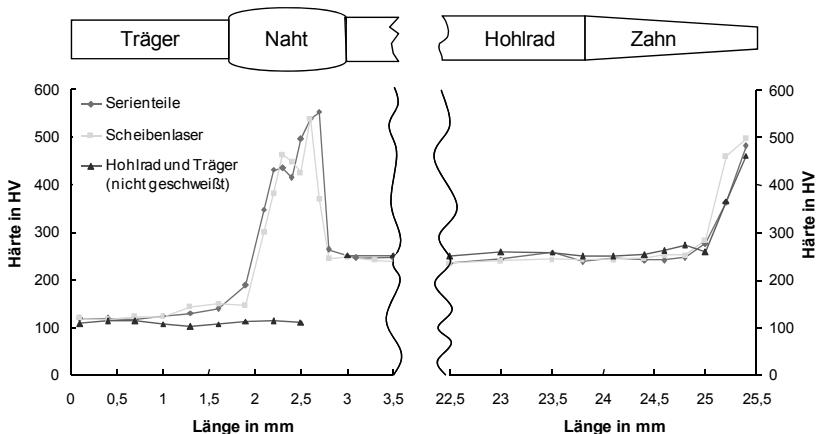


Bild 4.35: Vergleich der Härteverläufe über die Querschnittsfläche des ZB-Hohlrad.

4.6 Synopsis

Die hohe Fokussierbarkeit des Scheibenlasers erlaubt das Erzielen von Fokusdurchmessern kleiner als 0,3 mm bei gleichzeitig großen Rayleighlängen des fokussierten Strahls. Der Einfluss der prozessrelevanten Größen auf das Schweißergebnis ist für diese Strahlquelle wie folgt:

- Die indirekte Proportionalität der Einschweißtiefe zum Fokusdurchmesser, $t \sim 1/d_f$, gilt für Stahllegierungen bei der Laserleistung von 3 kW nur bis zu der Untergrenze $d_f = 0,2$ mm. Diese Untergrenze ist unabhängig von der Vorschubgeschwindigkeit.
- Bei Fokusdurchmessern kleiner als 0,2 mm bilden sich in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit und dem Fokusdurchmesser unterschiedliche Nahtquerschnittsformen (tropfenartig, schlank-parallel, nagelkopfförmig) aus.

- Durch die Verringerung des Divergenzwinkels kann bei den Fokusburchmessern kleiner als 0,2 mm eine Erhöhung der Einschweißtiefe erreicht werden.
- Die Querschnittsfläche ist bei Vorschubgeschwindigkeiten größer als 4 m/min unabhängig von der Gestaltung des Divergenzwinkels, was ein Indiz für einen konstanten Prozesswirkungsgrad ist. Bei Vorschubgeschwindigkeiten kleiner als 4 m/min führen kleine Divergenzwinkel zu geringen Querschnittsflächen und somit zu einem geringen Prozesswirkungsgrad.
- Die Einschweißtiefe wird durch die Schutzgasauswahl nicht beeinflusst. Das Schutzgas beeinflusst jedoch die Nahtbreite und die Nahtquerschnittsform.
- Damit die gute Fokussierbarkeit des Scheibenlasers für das Erreichen hoher Einschweißtiefen genutzt werden kann, muss der Laserstrahl im Fokusbereich mit großen F-Zahlen bei Fokuslagen von -1 bis +1 mm eingesetzt werden, wobei die höchsten Einschweißtiefen zwischen -1 und 0 mm erreicht werden.
- Die Neigung der Bearbeitungsoptik im Bereich von 0 bis 30° zeigt bei Fokusburchmessern kleiner als 0,2 mm keinen Einfluss auf das Schweißergebnis.
- Die Erhöhung der Laserleistung führt generell zur Erhöhung der Einschweißtiefe. Die Nahtquerschnittsform zeigt bei der Leistungserhöhung eine Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit. Die Nahtqualität wird durch die Leistungserhöhung verschlechtert.
- Aufgrund des dynamischen Schweißprozesses führt das Schweißen mit Fokusburchmessern kleiner als 0,2 mm zur Entstehung von vielen Schweißfehlern wie z. B. Spritzern, Auswürfen und geschlossenen Prozessporen.

Die vergleichenden Untersuchungen stellen folgende Erkenntnisse dar:

- Im Vergleich zwischen dem Scheiben- und dem CO₂-Laser führt der höhere Absorptionsgrad bei der Wellenlänge des Scheibenlasers bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten zu höheren Einschweißtiefen. Die größere Rayleighlänge im fokussierten Strahl des bei diesen Untersuchungen eingesetzten CO₂-Lasers ist dagegen bei den niedrigeren Vorschubgeschwindigkeiten bezüglich der erreichten Einschweißtiefe im Vorteil.

- Eine unterschiedliche Neigung der Abhängigkeit des Nahtquerschnittes von der Streckenenergie, $Q \sim P/\nu$, zeigt verglichen mit dem CO₂-Laser einen höheren Prozesswirkungsgrad für die Wellenlänge des Scheibenlasers.
- Beim Vergleich zwischen dem Scheiben- und dem Faserlaser zeigen beide diodengepumpten Laser höchster Brillanz, dass sie für vergleichbare Schweißaufgaben gleichermaßen geeignet sind. Der Faserlaser ist für Applikationen, bei denen sehr große Einschweißiefen benötigt werden, besser geeignet als der Scheibenlaser.

Der Einsatz des Scheibenlasers bringt für die Getriebefertigung folgende Vorteile:

- Verglichen mit anderen Strahlquellen kann das Schweißen mit dem Scheibenlaser bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten durchgeführt werden. Dadurch entstehen weitere Vorteile, die das Verschweißen unterschiedlicher Werkstoffe, wie z. B. GGG mit Einsatzstahl, ohne Zusatzwerkstoff ermöglichen.
- Bei der Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit ist nicht mit einer Verschlechterung der Nahteigenschaften zu rechnen.

5 Modifizierte Bearbeitungsoptik

Neben den prozesstechnischen Ergebnissen, die in Kapitel 4 dargestellt wurden, haben die Untersuchungen auch eine Reihe systemtechnischer Erkenntnisse erbracht. Zwei für die Praxis unmittelbar relevante Aspekte werden in diesem und dem nächsten Kapitel behandelt.

Um die Bearbeitungsoptik vor Spritzern und der in Kapitel 4.2.6 erwähnten Metaldampffackel zu schützen, wurde in dieser Arbeit auf Basis der Bearbeitungsoptik D70 der Fa. Trumpf und anlehnend an [64] eine modifizierte Bearbeitungsoptik (3L-Modul) zur Erhöhung des Arbeitsabstandes, hier als Abstand zwischen dem Schutzglas und der Werkstückebene bezeichnet, entwickelt. Eingebaut in einer D70-Optik ermöglicht sie bei vorgegebener 220mm-Kollimationslinse und dem Abbildungsmaßstab 1:1 (also keine Änderung der geometrischen Strahleigenschaften durch Strahlformung) einen Arbeitsabstand von 295 mm, siehe Bild 5.1. Sie wurde als Erfindungsmeldung im deutschen Patentamt mit der Nummer DE10200711902 erfasst.

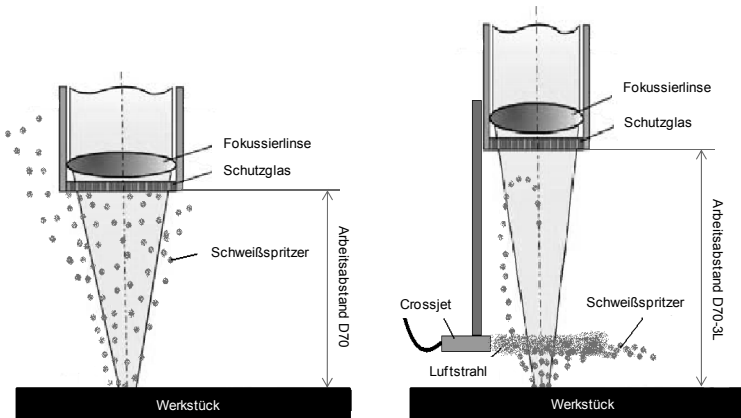


Bild 5.1: Vergleich der Arbeitsabstände der D70- (links) und der D70-3L-Bearbeitungsoptiken (rechts).

5.1 Komponenten

Die optischen Komponenten des 3L-Moduls wurden mit der Software „ZEMAX“ berechnet. Sie bestehen aus einer 220mm-Meniskus-, einer bikonvexen Fokussierlinse der Brennweite 220 mm und einem Schutzglas. Diese Komponenten werden in ein Linsengehäuse eingebaut, siehe Bild 5.2. Die Meniskuslinse hat bei einer Mittendicke von 3 mm einen Durchmesser von 52 mm. Ihre zwei positive Radien, d. h. die Linsenkrümmungen, sind in Richtung des ankommenden Strahls ausgeprägt; sie bilden die Oberflächen zur Strahlaufweitung. Für die Fokussierlinse wurden mit ZEMAX zwei Oberflächenradien mit unterschiedlichem Vorzeichen berechnet. Dabei hat die Oberfläche, bei der der Laserstrahl die Linse verlässt, ein negatives Vorzeichen, d. h., die Krümmung ist in Richtung des Strahls gerichtet. Der Durchmesser dieser Linse beträgt 74 mm, ihre Mittendicke ist 13 mm. In einer Distanz von 8 mm von der Oberfläche mit dem negativen Radius der Fokussierlinse folgen die zwei parallelen Oberflächen des Schutzglases mit einem Abstand von 2 mm zueinander.

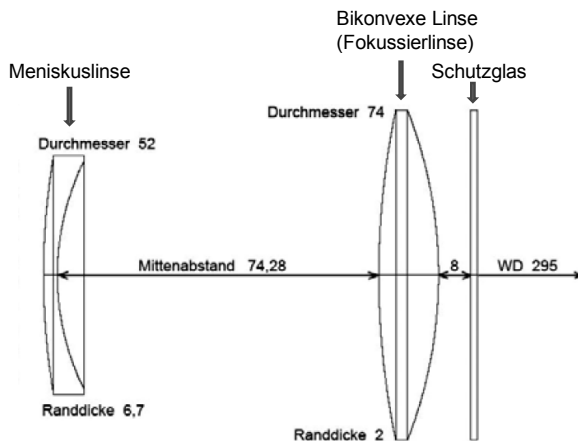


Bild 5.2: Berechnung der optischen Komponenten des 3L-Moduls mit der Software „ZEMAX“.

Die mechanischen Komponenten des 3L-Moduls (Gehäuse, Linsenfassungen, Linsenfeststellringe, Schutzglas- und Crossjethalter, Kühlring sowie Adapterplatten für Maschinenanbringung) wurden mit einer CAD-Software konstruiert und in der Werkstatt im Bereich der Produktions- und Werkstofftechnik (PWT) der Daimler AG

gefertigt. Alle Bauteile, die aus Aluminiumlegierung bestanden, wurden nach vollendeter Fertigung mit dem Hart-Coat-Beschichtungsverfahren eloxiert. Auf die Linsenfassungen wurde eine 6 µm dicke Nickelschicht zum Schutz vor Korrosion aufgetragen.

Das 3L-Modul entstand, indem die optischen Komponenten in die vorgesehenen Fassungen und Halter, die bereits im Gehäuse eingebaut wurden, gesetzt und mit den entsprechenden Feststellringen fixiert wurden. Abschließend wurden der Kührling, der Crossjet und der Crossjethalter eingebaut.

5.2 Zusammenbau der D70-3L-Bearbeitungsoptik

Die D70-3L-Bearbeitungsoptik wird aus einer herkömmlichen D70-Optik (bestehend aus einem 220mm-Kollimator, einem 45°-Umlenker mit Kamerabeobachtung) und dem 3L-Modul zusammengebaut. Die Fokussierlinse, das Schutzglas und das Schutzglashalter der herkömmlichen D70-Optik werden dafür abgebaut. Das 3L-Modul (2) wird über vier Schrauben, ähnlich wie bei dem in Bild 3.5 (links) gezeigten Prozessadapter, an der D70-Bearbeitungsoptik (1) montiert, und ist somit fester Bestandteil des Gesamtsystems „D70-3L“.

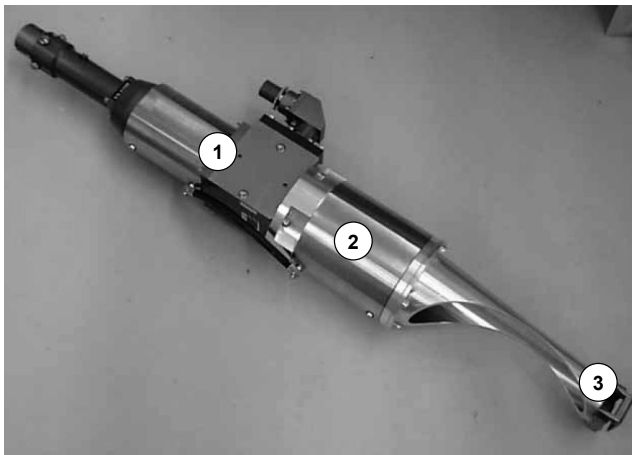


Bild 5.3: Zusammenbau des D70-3L-Gesamtsystems bestehend aus D70-Bearbeitungsoptik (1), 3L-Modul (2) und Crossjet (3).

5.3 Funktionsweise und Strahldiagnostik

Durch das 3L-Modul wird der kollimierte Laserstrahl zuerst aufgeweitet, wodurch der Strahldurchmesser auf der Fokussierlinse vergrößert wird, und dann fokussiert. Die Fokussierbrennweite des Gesamtsystems (D70-3L) liegt bei 304 mm und ist größer als die der herkömmlichen D70-Bearbeitungsoptik. Die durch die Strahlaufweitung entstandene Erhöhung des Arbeitsabstandes führt erstens zu einer Verbesserung der Zugänglichkeit der Bearbeitungsoptik in der Schweißanlage und zweitens zu einer Verringerung der Schutzglasverschmutzung, wodurch im Produktionsablauf geringere Maschinenstillzeiten realisiert werden können. Eine weitere Verbesserung, die durch die Erhöhung des Arbeitsabstandes entsteht, ist die Verringerung der durch die Wechselwirkung zwischen der Metaldampffackel und dem Laserstrahl verursachten thermischen Belastung der optischen Komponenten. Ein nahe dem Prozessgeschehen eingebauter Crossjet, siehe Bild 5.1 (rechts), führt zu einer frühzeitigen Ablenkung der Metaldampffackel von der Schweißachse.

Um die Einflüsse des Gesamtsystems „D70-3L“ auf die Strahlformung zu untersuchen wurde die Kaustik des Laserstrahls für D70 und D70-3L vermessen und miteinander verglichen, siehe Bild 5.4 und Tabelle 5.1. Als Strahlquelle wurde ein 4kW-Scheibenlaser mit einem angegebenen Strahlparameterprodukt von 8 mm*mrad der Fa. Trumpf verwendet. Der Durchmesser der Lichtleitfaser betrug 200 µm.

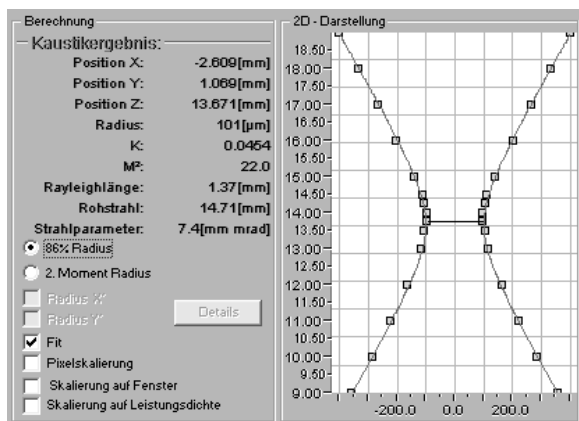


Bild 5.4: Gemessene Strahlkaustik für die D70-3L-Bearbeitungsoptik bei 4kW-Laserleistung.

In den in Tabelle 5.1 gezeigten Ergebnissen der Vergleichsuntersuchungen sind für die Größen des fokussierten Laserstrahls Rayleighlänge, Strahlparameterprodukt, Strahlqualitätszahl und Beugungsmaßzahl keine Unterschiede zu sehen. Es kann deshalb angenommen werden, dass die Schweißergebnisse der D70-3L-Bearbeitungsoptik bezüglich Nahttiefe, Nahtqualität und Nahtquerschnittsform gegenüber der herkömmlichen D70-Optik keine Unterschiede aufweisen werden.

Strahlparameter	D70	D70-3L
Arbeitsabstand in mm	181	295
d_f in mm	0,200	0,202
z_{Rf} in mm	1,37	1,37
SPP in mm*mrad	7,4	7,4
K-Zahl	0,0454	0,0454
M^2	22	22

Tabelle 5.1: Vergleich gemessener Werte der Strahlparameter für die D70 und D70-3L

5.4 Synopsis

Durch die im 3L-Modul stattfindende Aufweitung des kollimierten Laserstrahls wird mit der D70-3L-Bearbeitungsoptik im Vergleich zu der herkömmlichen D70 ein größerer Arbeitsabstand erzielt. Dadurch entstehen folgende Vorteile:

- Die Zugänglichkeit der Bearbeitungsoptik in der Schweißanlage wird verbessert.
- Die Schutzglasverschmutzung wird verringert, wodurch im Produktionsablauf geringere Maschinenstillzeiten realisiert werden können.
- Die durch die Wechselwirkung zwischen der Metaldampffackel und dem Laserstrahl verursachten thermischen Belastung der optischen Komponenten wird reduziert.

6 Anlagenkonzepte mit dem Scheibenlaser als Strahlquelle

Beim Schweißen von realen Bauteilen der Getriebefertigung (Kapitel 4.5) wurde gezeigt, dass mit dem Scheibenlaser als Strahlquelle eine Erhöhung der Heft- und Schweißgeschwindigkeit um ca. Faktor zwei erreicht werden kann. Die dadurch mögliche Erhöhung der Takt- und Durchlaufzeit führt zum Überdenken der existierenden Anlagenkonzepte: Während in den heutigen Schweißanlagen der Schweißprozess selbst die meiste Zeit für sich beansprucht, wird die Schweißzeit durch den Einsatz des Scheibenlasers enorm reduziert, was zu einer Verringerung der Laserauslastung führt. Um eine hohe Auslastung wieder zu gewährleisten, müssen neue Anlagenkonzepte entwickelt werden. Zum anderen soll in den zukünftigen Anlagen die Qualität der Bauteile nicht unter der verbesserten Wirtschaftlichkeit leiden, sondern ebenfalls verbessert werden. Dies setzt eine verstärkte Integration von zerstörungsfreien Prüfverfahren und Prozessüberwachungssystemen voraus.

In diesem Kapitel werden zwei mögliche Anlagenkonzepte vorgestellt, die auf Basis der bestehenden ZB-Hohlrad-Serienanlage erstellt wurden.

6.1 Konzept 1: Ersatz der Strahlquelle

In diesem Konzept wird die heutige Serienanlage mit ihren Be- und Entladungsvorgängen und Fördermitteln nicht geändert, sondern nur die bisherige Strahlquelle, ein CO₂-Laser, durch einen Scheibenlaser ersetzt; dies ist die einfachste Methode eine neue Strahlquelle in einer Serienproduktion einzuführen. Hier bleibt die nach diesem Konzept entwickelte neue Anlage, siehe Bild 6.1, bis auf die Strahlführung, die Strahlformung und den Prozessadapter sowie die Sicherheitstechnik identisch mit der in Kapitel 2.4.2 gezeigten Serienanlage. Dabei müssen die ersten drei Komponenten an den Einsatz eines Festkörperlaser angepasst werden, siehe Kapitel 2.4.2 sowie Kapitel 3.2. Die Absicherung gegen Laserstrahlung kann bei dieser Strahlquelle nicht mithilfe optisch transparenter Plexiglasscheiben erfolgen, wie dies bei CO₂-Laseranlagen möglich ist. Große Sichtscheiben, die für die Wellenlänge des Scheibenlasers ($\lambda = 1030 \text{ nm}$) „undurchlässig“ sind, lassen sich in der Praxis aus Kostengründen nicht

realisieren. Einrichtarbeiten müssen deshalb mittels eines Kameraüberwachungssystems, gezeigt in Bild 6.1 als Kamera (der auf Höhe der Schweißoptiken angebrachte kleine Würfel in der Anlagenmitte), durchgeführt werden.

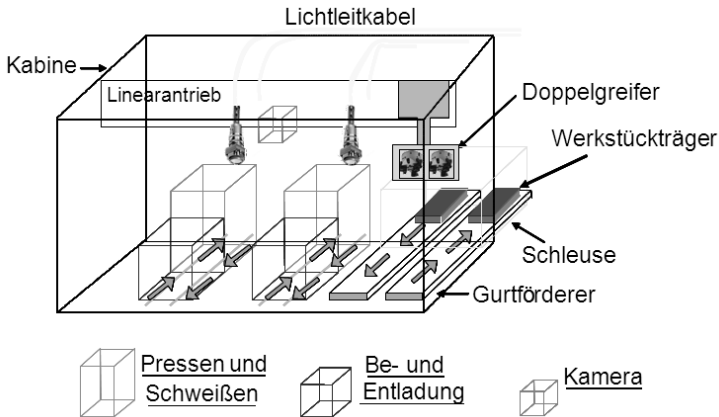


Bild 6.1: Schematische Darstellung des Anlagenkonzepts, bei dem der CO₂-Laser durch einen Scheibenlaser ersetzt ist.

Werden die in Bild 2.13 und 6.2 gezeigten Taktzeitdiagramme betrachtet, kann zusammengefasst werden, dass allein das Ersetzen der Strahlquelle zu einer deutlichen Verbesserung der theoretischen Taktzeit von 18,75 auf 16,25 s führt. Die Durchlaufzeit wird sogar von 37,5 auf 32,5 s reduziert. Aufgrund der kürzeren Schweißzeiten bei dem Scheibenlaser wird jedoch der Lasernutzungsgrad von 66 % (Serienanlage) auf 49,23 % (Konzept 1) reduziert, siehe Bild 6.2.

Der Lasernutzungsgrad bei einer solchen Maßnahme (Konzept 1) kann gegenüber der Serienanlage nur dadurch verbessert werden, dass die Strahlquelle während der Be- und Entladungsphase zum Schweißen an einer zweiten Anlage verwendet wird. Durch die flexible Strahlführung und die Möglichkeit am Scheibenlaser bis zu sechs Lichtleitkabel am Laserausgang anzuschließen können bei diesem Konzept für die Produktion des ZB-Hohlrads mithilfe zweier Serienschweißanlagen, die aus jeweils zwei Stationen, einem Scheibenlaser und vier Lichtleitkabeln bestehen, verwendet werden. Dazu können im Falle eines Defekts bis zu zwei Lichtleitkabeln als Ersatz eingesetzt werden. Verglichen mit dem ersten Anlagenkonzept wird somit durch das Ersetzen der Strahlquelle in Kombination mit Timesharing bei der gleichen Teileausbringung eine bessere Redundanz erzielt.

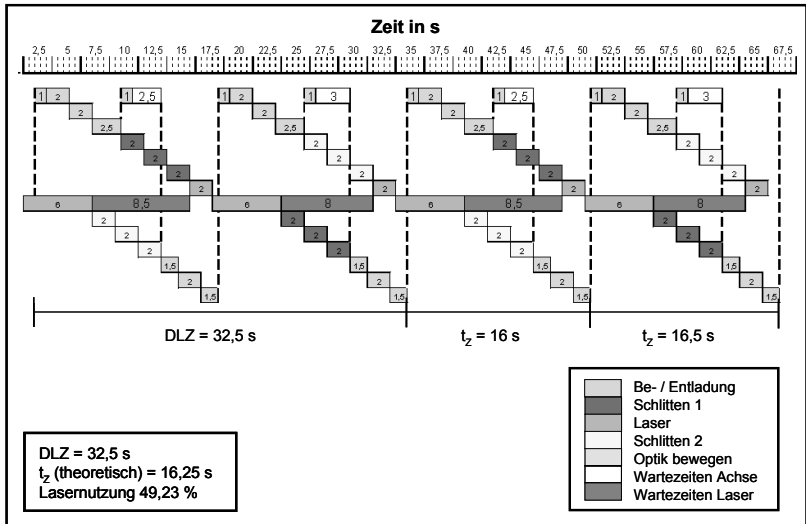


Bild 6.2: Taktzeitdiagramm des ersten Konzepts.

6.2 Konzept 2: Be- und Entladung mittels Roboter

Bei diesem Konzept werden gegenüber der heutigen ZB-Hohlrad-Serienanlage nicht nur die Strahlquelle mit den dazu gehörigen Komponenten der Strahlführung, Strahlformung und Sicherheitstechnik ersetzt, sondern es werden auch die Be- und Entladungskomponenten geändert: Ziel dieses Konzepts ist es, die Handhabungszeiten zu reduzieren.

Die Be- und Entladungskomponenten transportieren die zu schweißenden Bauteile vom Werkstückträger (WT) entweder direkt in die Werkstückbearbeitungsstation oder in ein weiteres Transportsystem, welches die Schweißteile in die Schweißposition befördert. Diese Aufgaben werden bei der ZB-Hohlrad-Serienanlage durch Linearachsen erfüllt. In hier vorgeschlagenem Konzept werden statt Linearachsen flexible Vertikal-Knickarmroboter eingesetzt. Außer den Transportbändern, die an das neue Be- und Entladungssystem angepasst werden müssen, werden keine weiteren Komponenten der Hauptgruppe „Werkstückhandhabung“ geändert.

Zusammengefasst beinhaltet dieses Konzept, wie in Bild 6.3 schematisch dargestellt, zwei Werkstückbearbeitungsstationen, die über einen Vertikal-Knickarmroboter von der einen Seite beladen und von einem zweiten Vertikal-Knickarmroboter von der anderen Seite entladen werden. Zu den Werkstückbearbeitungsstationen gehört hier eine Hubspindel, um das Hohlrad und seinen Träger zu verpressen, eine Drehachse, die den Vorschub regelt, und eine Spannvorrichtung mit entsprechender Schweißbrille, um beide Einzelteile während der Schweißung zu spannen. Die Schweißbrille dient auch als Anschlag für den Pressvorgang und verhindert zusätzlich, dass während des Schweißens Schweißspritzer auf das Hohlrad gelangen.

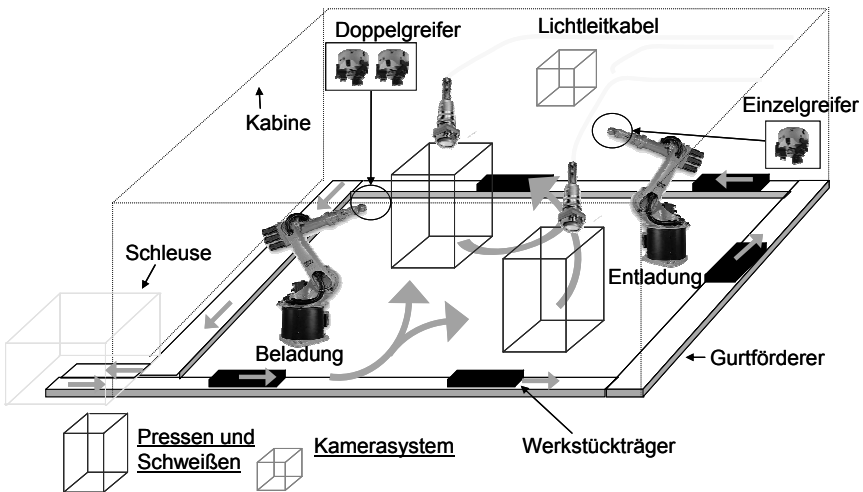


Bild 6.3: Schematische Darstellung des zweiten Konzepts.

Die Werkstückbearbeitungsstationen besitzen seitlich je zwei Öffnungen, eine für die Beladung und eine für die Entladung. Diese Stationen sind in der Schweißanlage versetzt angeordnet, damit sie von den beiden Robotern erreicht werden. Als Ersatz wird in diesem Konzept eine dritte Lichtleitfaser eingeplant. Aus Sicherheitsgründen ist auch dieses Konzept komplett eingehaust, weshalb die Werkstücke zu der Schweißanlage über eine Schleuse gelangen und innerhalb von ihr mithilfe eines Gurtfördersystems transportiert werden.

Der zeitliche Ablauf der einzelnen Schritte, die zum Durchlauf eines Bauteils führen, ist in Bild 6.4 dargestellt. Die Durchlaufzeit liegt bei diesem Konzept bei 29 s. Dabei wird eine theoretische Taktzeit t_Z von 10 s bei einem Lasernutzungsgrad von 80 %

erreicht. Alle Werte stellen eine Verbesserung gegenüber der in Kapitel 2.4.2 dargestellte Serienanlage dar. Trotz dieser Verbesserung sind die Prozesse der Be- und Entladung weiterhin die Engpässe der Prozesskette.

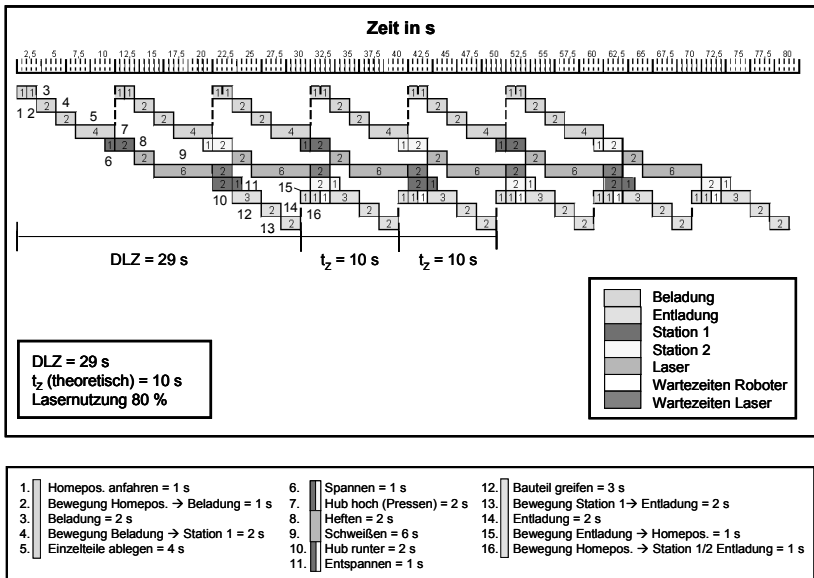


Bild 6.4: Taktzeitdiagramm des zweiten Konzepts.

In einer mit der Firma EDAG durchgeführten Computersimulation wurden für dieses Konzept die Werte der theoretischen Taktzeit, der Durchlaufzeit und der Lasernutzung bestätigt. Eine weitere Verbesserung der Be- und Entladung wurde bei der Simulation durch den Einsatz von Doppelgreifern erzielt. Mithilfe der in Bild 6.5 dargestellten Doppelgreifer, (3) und (4), konnten die Be- (1) und Entladungsroboter (2) beide Stationen bedienen, ohne zweimal auf den Werkstückträger greifen zu müssen. Dies führte zur Verbesserung der Durchlaufzeit von 29 auf 21,9 s.

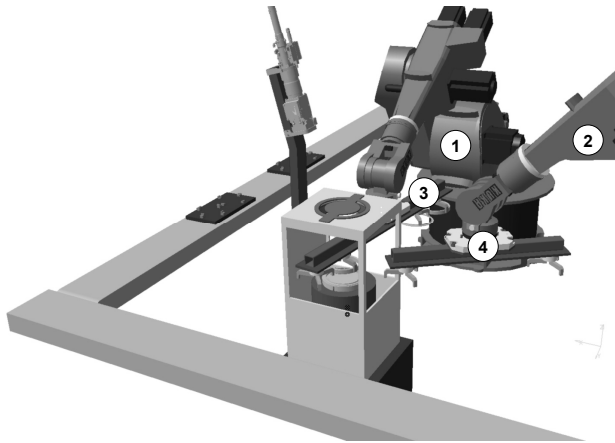


Bild 6.5: Be- (1) und Entladungsroboter (2) mit Doppelgreifer (3) und (4). Bildschirmabzug aus der Computersimulation [Quelle: EDAG].

6.3 Wirtschaftlichkeitsberechnung

In der Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde in einem dynamischen Verfahren, unter Berücksichtigung der zeitlichen Unterschiede beim Anfall der Kosten und Leistungen, die Schweißanlage der Serienfertigung mit den neuen auf Basis des Scheibenlasers entwickelten Anlagenkonzepten verglichen. Dafür wurden mithilfe entsprechender theoretischen Wirtschaftsfaktoren für beide Konzepte die Anzahl der Bauteile, die pro Stunde hergestellt werden können, der Maschinenstundensatz, die Kosten für ein geschweißtes Bauteil (Stückkosten) sowie die Jahresstückzahl ermittelt.

Die Anzahl der Bauteile (Stückzahl), die pro Stunde hergestellt werden können, ergibt sich aus der Taktzeit t_z . Mit einer theoretischen Taktzeit von 18,75 s werden mit der Schweißanlage der heutigen Serienfertigung 182,7 Bauteile pro Stunde produziert. Die Konzepte 1 und 2 dagegen haben, dank der kürzeren Taktzeit, eine theoretische Ausbringung von 221,5 bzw. 360 Bauteilen pro Stunde [35].

Der Maschinenstundensatz wird nach den in Kapitel 2.4.2 beschriebenen Grundlagen berechnet. Um die AfA-Kosten (geben den Werteverzehr an, der durch die Maschinenabnutzung entsteht) zu berechnen, müssen die Investitionskosten bekannt sein. Da die Investitionskosten der Serienanlage bekannt sind, werden die der neuen

Konzepte über entsprechende neue Angebote ermittelt. Die Abschreibung der Investitionsgüter (Maschinenkomponenten) wird in dieser Wirtschaftlichkeitsberechnung linear, mit konstanten Absolutbeträgen über die Nutzungsdauer, durchgeführt. Als kalkulatorische Zinsen wird ein Satz von 3,75 % gewählt. Die laufenden Kosten werden einerseits aus den laufenden Rechnungen, andererseits mit Hilfe von theoretischen Werten ermittelt. Die Personalkosten werden pro Anlage und Schicht mit 1/3 Mann berechnet. Dies ergibt bei drei Schichten am Tag Personalkosten von 1 Mann pro Schweißanlage und Tag. Die Instandhaltungskosten werden über Erfahrungswerte aus der laufenden Serienproduktion und die Raumkosten über die Anlagenfläche bei vorgegebenen Preisen für 1 m² ermittelt.

Mit den ermittelten Werten dieser Einzelfaktoren ergibt sich für die Schweißanlage der heutigen Produktion ein Maschinenstundensatz von 90,88 € pro Stunde. Für die Konzepte mit dem Scheibenlaser dagegen wird der Satz von 113,3 bzw. 104,13 € pro Stunde berechnet. Der Grund hierfür sind die höheren Investitions- und Instandhaltungskosten des Scheibenlasers.

Nach diesem Kriterium allein wären die neuen Anlagenkonzepte als nicht wirtschaftlich zu bewerten. Um die Wirtschaftlichkeitsberechnung zu vervollständigen, müssen jedoch noch die Kosten für ein geschweißtes Bauteil (Stückkosten) und die theoretische Jahresstückzahl ermittelt werden.

Die Stückkosten werden bei Vollauslastung über das Verhältnis vom Maschinenstundensatz zur Anzahl der pro Stunde hergestellten Bauteile berechnet, und sind nur die durch die Schweißanlage anfallenden Stückkosten. Für die Schweißanlage der Serienfertigung ergeben sich in diesem Falle, bei einem Maschinenstundensatz von 90,88 €/Stunde und 182,7 produzierte Bauteile pro Stunde, die Stückkosten von 0,497 €/Stück. Aufgrund des hohen Maschinenstundensatzes liegen die Stückkosten des ersten Konzepts über jenen der Serienanlage und betragen 0,511 €/Stück. Die Stückkosten des zweiten Konzepts liegen dagegen, dank der sehr hohen Anzahl der Bauteile pro Stunde, bei 0,289 €/Stück.

Als letzter Faktor wird im Rahmen dieser Wirtschaftlichkeitsberechnung die Jahresstückzahl ermittelt. Sie wird über die Taktzeit t_z der Schweißanlage, t_z (*gemessen*) für die Serienanlage und t_z (*theoretisch*) für die Scheibenlaser-Konzepte, und die Anzahl der praktisch verfügbaren Stunden im Jahr berechnet. Die praktisch verfügbaren Stunden im Jahr ergeben sich aus der Multiplikation der theoretisch verfügbaren Stunden im Jahr mit der tatsächlichen Anlagenverfügbarkeit. Dabei werden für beide Konzepte die Anlagenverfügbarkeitswerte aus der Serienfertigung verwendet. Die

theoretisch verfügbaren Stunden im Jahr ergeben sich aus den Arbeitsstunden pro Schicht, der Anzahl der Schichten am Tag und den Arbeitstagen im Jahr. Die berechnete Jahresstückzahl für die Serienanlage beträgt 756 548 Bauteile im Jahr. Die Konzepte mit dem Scheibenlaser weisen dagegen, aufgrund der kürzeren Taktzeit, eine viel höhere Ausbringung auf. Die Jahresstückzahl des ersten Konzepts beträgt 917.169 Bauteile im Jahr, während mit dem zweiten Konzept die Herstellung von 1 490 400 Bauteile im Jahr möglich ist.

In Tabelle 6.1 sind die Wirtschaftlichkeitsfaktoren der in dieser Arbeit diskutierten Anlagenkonzepte vergleichend aufgeführt. Daran kann zusammengefasst und festgestellt werden, dass das erste Anlagenkonzept verglichen mit dem Konzept der Serienfertigung (aufgrund des höheren Stückpreises) nicht wirtschaftlicher ist. Das zweite Konzept dagegen rechnet sich für Fertigungen mit einer höheren Bauteilausbringung, für kleine Serien ist es nicht geeignet.

Kenngrößen	Serienanlage	Konzept 1	Konzept 2
t_z in s	19,7	16,25	10
Stückzahl/h	182,7	221,5	360
Stückzahl/Jahr	756.548	917.169	1.490.400
MSS in €/h	90,88	113,3	104,13
Stückkosten in €/Stück	0,497	0,511	0,289

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung.

6.4 Synopsis

Die Anlagenkonzepte mit Scheibenlaser als Strahlquelle erbringen gegenüber der in Kapitel 2.4.2 gezeigten Serienanlage folgende Aspekte:

- Konzept 1: Das Ersetzen der Strahlquelle führt zu einer Verbesserung der theoretischen Taktzeit und der Durchlaufzeit. Der Lasernutzungsgrad wird bei diesem Konzept jedoch reduziert, denn im Vergleich zu der Serienanlage

werden sowohl die Be- und Entladungsvorgänge als auch die Fördermittel nicht geändert.

- Konzept 2: Die Anpassung der einzelnen Anlagenkomponenten an die Strahlquelleneigenschaften führt sowohl zu einer weiteren Verbesserung der theoretischen Taktzeit und der Durchlaufzeit als auch zu einer Erhöhung des Lasernutzungsgrads.

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung sind wie folgt:

- Verglichen mit der Serienanlage ist das erste Konzept aufgrund der höheren Stückkosten nicht wirtschaftlicher. Eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit dieses Konzepts kann nur durch Timesharing erzielt werden.
- Aufgrund der hohen Investitions- und Instandhaltungskosten des Scheibenlasers ist das zweite Konzept nur für große Stückzahlen geeignet.

7 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, das Potenzial des Scheibenlasers für das Laserstrahlschweißen von Stahllegierungen im Getriebebau zu untersuchen. Es galt, die Zusammenhänge zwischen den einzelnen prozessrelevanten Größen zu verstehen und daraus beispielhafte Anlagenkonzepte zu entwickeln, die im Vergleich zur heutigen Getriebefertigung ein wirtschaftliches Schweißverfahren bei hoher Schweißnahtqualität ermöglichen. Vor dem Hintergrund der Praxisorientierung dieser Arbeit sollten die Schweißversuche sämtlichen Anforderungen des genannten Bereichs des Automobilbaus hinsichtlich der Werkstoffe sowie der Prozessdurchführung genügen.

Die Untersuchungen zum Einfluss der Prozess bestimmenden Größen auf das Schweißergebnis definierten den Anfangspunkt dieser Arbeit. Das mit dem Scheibenlaser mögliche Erzielen von Fokusedurchmessern auch kleiner als 0,3 mm bei gleichzeitig großen Rayleighlängen des fokussierten Strahls führte für Stahllegierungen und eine als Richtgröße vorgeschriebene Laserleistung von 3 kW zu einer Umkehrung der indirekten Proportionalität der Einschweißtiefe vom Fokusedurchmesser unterhalb von 0,2 mm. Auf Erfahrungen mit dem bisherigen CO₂-Laser basierende Vermutungen, dass diese Umkehr der Abhängigkeit durch eine mögliche Plasmabildung entstanden sein könnte, fand im Rahmen der Arbeit aufgrund der Unabhängigkeit der Einschweißtiefe vom Schutzgas keinerlei Bestätigung. Die gleichzeitige Änderung der Nahtquerschnittsform für Vorschubgeschwindigkeiten kleiner als 6 m/min deutet auf einen möglichen Einfluss des Marangoni-Effekts auf das Schweißergebnis hin.

Untersuchungen mit unterschiedlichen Divergenzwinkeln des fokussierten Strahls zeigten bei dem Fokusedurchmesser $d_f = 0,1$ mm zum einen, dass kleinere Divergenzwinkel zu einer Erhöhung der Einschweißtiefe führen. Zum anderen reduzieren sie bei Vorschubgeschwindigkeiten kleiner als 4 m/min die erreichte Querschnittsfläche und somit den Prozesswirkungsgrad.

Weitere Untersuchungen zum Einfluss der Fokussierbedingungen auf das Schweißergebnis zeigten, dass für das Erreichen hoher Einschweißtiefen der Laserstrahl des Scheibenlasers mit großen F-Zahlen bei Fokuslagen von -1 bis +1 verwendet werden sollte. Eine Neigung der Bearbeitungsoptik im Bereich von 0 bis 30° hatte bei der

untersuchten Laserleistung und Fokusburchmessern kleiner als 0,2 mm keinen Einfluss auf das Schweißergebnis.

Die Nahtqualität und die Einschweißtiefe zeigten bei einer Leistungserhöhung um den Faktor 2 neben einem Zugewinn der Tiefe gleichzeitig auch eine Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit. Bei $d_f = 0,2$ mm und $v = 6$ m/min erhöhte sich die Einschweißtiefe um den Faktor 1,4 (bei höheren Geschwindigkeiten ist dieser Faktor gleich oder größer, bei niedrigeren kleiner). Einhergehend mit der Leistungserhöhung wurde eine Verschlechterung der Nahtqualität und eine Vergrößerung der Metaldampffackel beobachtet. Ersteres bezieht sich auf die erhöhte Bildung von Nahtauswürfen und geschlossenen Prozesssporen, Letzteres zeigt eine indirekte Wirkung auf das Schweißergebnis, da die Fackel eine zusätzliche thermische Belastung auf die optischen Komponenten der Bearbeitungsoptik ausübt und deren Fokussierbedingungen verändert.

Vergleichende Untersuchungen zwischen unterschiedlichen Strahlquellen zeigten die Einflüsse des wellenlängenabhängigen Absorption- bzw. Einkoppelgrads, des Intensitätsprofils des fokussierten Strahls und die unterschiedlichen Bearbeitungsoptiken (Rayleighlängen) auf das Schweißergebnis. Aufgrund der kürzeren Wellenlänge und somit des höheren Absorptionsgrads konnten mit dem Scheibenlaser im Vergleich zu dem CO₂-Laser bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten tiefere Schweißnähte erreicht werden. Zusätzlich ergab sich für den Scheibenlaser ein höherer Prozesswirkungsgrad. Die größere Rayleighlänge des bei diesen Untersuchungen eingesetzten CO₂-Lasers war dagegen bei niedrigeren Vorschubgeschwindigkeiten bezüglich der erreichten Einschweißtiefe im Vorteil. Beim Vergleich zwischen Scheiben- und Faserlaser zeigten beide diodengepumpten Laser höchster Brillanz, dass sie für die hier interessierenden Schweißaufgaben gleichermaßen geeignet sind.

Die Erkenntnisse der Grundlagenuntersuchungen konnten auf reale Bauteile der Getriebefertigung übertragen werden. Sie führten beim Schweißen mit dem Scheibenlaser insgesamt zu einer Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit um Faktor 1,5. Dadurch konnte die Applikation Tellerradschweißen des Ausgleichsgetriebes, bei der es sich um das Verschweißen unterschiedlicher Werkstoffe (GGG mit Einsatzstahl) handelt, ohne Zusatzwerkstoff geschweißt werden. Des Weiteren konnten für den Zusammenbau „Hohlrad“ im Vergleich zum Serienprozess bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten Schweißparameter gefunden werden, bei denen bezüglich der Nahtqualität, der Querschnittsgeometrie, der Einschweißtiefe, der Auspresskraft, des

Bauteilverzugs und des Härteverlaufs ähnliche Ergebnisse wie in der bisherigen Serienfertigung erzielt wurden.

Um die Bearbeitungsoptik vor Spritzern und Metaldampffackel zu schützen, wurde auf Basis der Bearbeitungsoptik D70 der Fa. Trumpf eine modifizierte Bearbeitungsoptik (3L-Modul) zur Erhöhung des Arbeitsabstandes entwickelt. Die aus dem 3L-Modul und der D70 entstandene Bearbeitungsoptik (D70-3L) hat, dank einer im 3L-Modul stattfindenden Aufweitung des kollimierten Strahls, im Vergleich zu der herkömmlichen D70-Optik einen größeren Arbeitsabstand. Er verbessert die Zugänglichkeit der Bearbeitungsoptik, verringert die Schutzglasverschmutzung und reduziert die durch die Wechselwirkung zwischen der Metaldampffackel und dem Laserstrahl verursachte Belastung der optischen Komponenten.

Die bei den realen Bauteilen mithilfe des Scheibenlasers erreichte Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit führte zur Reduktion der Schweißzeiten, was ein Überdenken der existierenden Serienanlagenkonzepte nahe legte. Das alleinige Ersetzen des CO₂-Lasers durch einen Scheibenlaser führte in einem ersten von zwei vorgeschlagenen Konzepten zur Reduktion der theoretischen Taktzeit und der Durchlaufzeit. Im Vergleich zu den Werten der Serienanlage verringerte sich dabei, aufgrund der wie bisher langsamen Be- und Entladungsvorgänge, der Lasernutzungsgrad. Die Anpassung der einzelnen Be- und Entladungskomponenten in Kombination mit dem Scheibenlaser trug indessen in einem zweiten Konzept zur weiteren Abnahme der theoretischen Taktzeit, der Durchlaufzeit und gleichzeitigen Erhöhung des Lasernutzungsgrads bei.

Ziel der Wirtschaftlichkeitsberechnung war es, anhand relevanter Kriterien eine Bewertung der neuen Anlagenkonzepte zu bekommen. Durch den Vergleich mit der bestehenden Serienanlage zeigte sich, dass die Stückkosten des ersten Konzepts am höchsten sind. Das zweite Konzept ermöglichte dagegen die höchste Teileausbringung und führte bei großen Stückzahlen zu den niedrigsten Stückkosten.

Insgesamt konnten die Ergebnisse dieser Arbeit zu einem besseren Prozessverständnis beim Laserstrahlschweißen von typischen Werkstoffen des Getriebebaus beitragen. Die umfassenden Grundlagenuntersuchungen machten in Kombination mit den Versuchen an drei realen Bauteilen der heutigen Getriebefertigung die Vor- und Nachteile des Scheibenlasers deutlich. Mithilfe der mit dem Scheibenlaser als Strahlquelle erstellten neuen Anlagenkonzepte wurde die Verbindung von einer technologischen Neuerung und bereits üblicher industrieller Praxis aufgebaut und die wirtschaftlichen Potenziale dieses Strahlwerkzeugs gezeigt.

8 Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] DIN 8593: *Fertigungsverfahren Fügen. Fügen durch Schweißen- Einordnung / Unterteilung*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [2] Dausinger, F.: *Laser in der Feinwerktechnik*. Universität Stuttgart, Skript zur Vorlesung, 2001.
- [3] Hügel, H.: *Strahlwerkzeug Laser: Eine Einführung*. Teubner Verlag, Stuttgart, 1992.
- [4] Beck, M.: *Modellierung des Lasertiefschweißens*. Universität Stuttgart, Dissertation, Teubner Verlag, Stuttgart, 1996 (Laser in der Materialbearbeitung Forschungsberichte des IFSW).
- [5] Landort-Börnstein: *Numerical data and functional relationship in science and technology*; New Series. Editor in Chief: W. Martienssen. Group VIII, Volume 1: Laser physics and applications. Subvolume C: Laserapplications Edited by R. Poprawe, H. Weber, G. Herzinger. Springer-Verlag, Berlin, 2004.
- [6] Hügel, H.; Graf, T.: *Laser in der Fertigung*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009.
- [7] Dausinger, F.; Hügel, H.: *Prozessadequate Systemtechnik als Schlüssel für das Aluminiumschweißen*. Proc. Laser 1995, S. 211.
- [8] Dausinger, F.: *Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität*. Universität Stuttgart, Habilitationsschrift 1995. Teubner Verlag, Stuttgart, 1995.
- [9] Swift-Hook, D. T.; Gick, A. E. F.: *Penetration welding with lasers*. Welding Research Supplement 493-s (1973), S. 492.
- [10] Matthes, K. J.; Richter, E.: *Schweißtechnik. Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen*. Hanser Verlag, München, 2008.

- [11] DIN EN 25817: *Lichtbogenschweißverbindungen an Stahl. Richtlinie für die Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten*. Normenausschuss Materialprüfung im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [12] DIN 8524 Teil 3 08.75: *Fehler an Schweißverbindungen aus metallischen Werkstoffen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [13] Klein, T.: *Oszillation of the keyhole in penetration laser beam welding*. J. Phys. D: Applied Physics **27** (1994), S. 2023.
- [14] Klein, T.: *Freie und erzwungene Dynamik der Dampfkapillare beim Laserstrahlschweißen von Metallen*. Dissertation, TU Braunschweig, Aachen: Shaker Verlag, 1997.
- [15] Rapp, J.: *Laserschweißung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau*. Universität Stuttgart, Dissertation, 1996. Stuttgart: Teubner, 1996 (Laser in der Materialbearbeitung, Forschungsberichte des IFSW).
- [16] Heimerdinger C.: *Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen für die Luftfahrt*. Dissertation, Universität Stuttgart, Herbert Utz Verlag, München, 2003.
- [17] Gref, W.: *Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Foksmatrixtechnik*. Dissertation, Universität Stuttgart, Herbert Utz Verlag, München, 2005.
- [18] Avilov, V., V.; Vicane, M.; Simon, G.: *Thermal diffusion in laser beam welding of metals*. J. Phys. D: Applied Physics **27** (1995) S. 2284.
- [19] Thier, H.: *Ursachen der Porenbildung beim Schutzgasschweißen von Aluminium und Aluminiumlegierungen*. Schweißen und Schneiden 25 (11), 1973, S.491.
- [20] Lutze, P.: *Gasgehalt und Schweißung von Aluminiumdruckguß*. Technische Universität Braunschweig, FB Maschinenbau und Elektrotechnik, Dissertation, 1990.
- [21] Nörenberg, K.; Rüge, J.: *Wasserstoffporosität beim Schmelzschweißen von Aluminiumwerkstoffen, Teil II*. Aluminium 68 (1992), Nr. 5, S. 406.

- [22] Fabbro, R.; Coste, F.; Goebels, D.; Kielwasser M.: *Study of Nd:YAG laser welding Zn coated steel thin sheets*. 6th international workshop in Hirschegg, 2005.
- [23] Fahrenwaldt, H. J.; Schuler, V.: *Praxiswissen Schweißtechnik- Werkstoffe, Verfahren, Fertigung*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2003.
- [24] Beyer, E.: *Schweißen mit Laser*. Springer-Verlag, 1995.
- [25] Matsunawa, A; Semak, V.: *The simulation of frant keyhole wall dynamics during laser welding*. J. Phys. D: Applied Physics **30** (1997) S. 798.
- [26] Kawahito, Y.; Mitzutami, M.; Katayama, S.: *Investigation of high power fiber laser welding phenomena on stainless steel*. Trans. JWRI 36, 2007, S. 11
- [27] Berger, P.; Schuster, R.; Zvyagolskaya, M.; Schäfer, P.; Hügel, H.: *Zur Bedeutung von gleitenden Stufen an der Kapillarfront beim Schweißen und Schneiden mit Laserstrahlen*. Universität Stuttgart, 2010 (Forschungsbericht des IFSW).
- [28] DIN 1693: *Gießereiwesen – Guseisen mit Kugelgraphit*. Normenausschuss Materialprüfung im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [29] Felsch, C.: *Stahl*. BDS Fachbuch Reihe, Band 9, Düsseldorf, Bundesverband Deutscher Stahlhandel, 1990.
- [30] DIN EN 29692: *Schweißnahtvorbereitung*. Normenausschuss Materialprüfung im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [31] Zopf, P.: *Bauteilgestaltung für das Schweißen mit Festkörperlaser*. Technische Universität Berlin, Dissertation, Hanser Verlag, München, 1995.
- [32] DIN 8563, Teil 3: *Schmelzschweißverbindungen an Stahl (ausgenommen Strahlschweißen). Anforderungen, Bewertungsgruppen*. Beuth Verlag, Berlin, 1989.
- [33] EN ISO 13919-1: *Elektronen- und Laserstrahl-Schweißverbindungen; Leitfaden für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten – Teil 1 Stahl*. 1996.
- [34] Anrich, D.; Kloos, K-H.; Lange, G.; Macherauch, E.: *Eigenspannungen und Verzug durch Wärmeeinbringungen*. Deutsche Forschungsgemeinschaft, Forschungsbericht, 1999.

- [35] Köhler, H.: *Einsatzpotentiale des Scheibenlasers im Getriebebau*. Fachhochschule Pforzheim, Diplomarbeit, September 2005.
- [36] REFA Verband für Arbeitsgestaltung und Betriebsorganisation e.V.: *Methodenlehre des Arbeitsstudiums: Teil 3 Kostenrechnung, Arbeitsgestaltung*. Hanser Verlag, München, 1985, S. 282.
- [37] Käschel, J.; Teich, T.: *Produktionswirtschaft*. GUC Verlag, 2004.
- [38] Schnell, H.: *Skript zur Vorlesung BWL 3 und 4*. FH Pforzheim, University of Applied Science, 2004.
- [39] DIN EN 1321: *Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Makroskopische und mikroskopische Untersuchungen von Schweißnähten*. Normenausschuss Materialprüfung im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Dezember 1996.
- [40] DIN EN 1043-2: *Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen- Härteprüfung, Teil 2: Mikrohärteprüfung an Schweißverbindungen*. Normenausschuss Materialprüfung im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., November 1996.
- [41] Möbius, J.; Czarske, J.; Günster, S.; Ostendorf, A.; Müller-Wirts, T.; Kinder, T.: *Laserabstandssensor zur Online-Überwachung von Lasermaterialbearbeitungsprozessen*. Laser Magazin 6/2004, S. 10 - 14.
- [42] Behr, F.: *Qualitätskontrollsysteme für das Laserstrahlschweißen*. Aachener Kolloquium für Lasertechnik, 2000.
- [43] Müller, M.: *Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung*. Dissertation, Universität Stuttgart, Herbert Utz Verlag, München, 2002.
- [44] Müller-Borhanian, J.: *Integration optische Messmethoden zur Prozesskontrolle beim Laserstrahlschweißen (INESS)*. Abschlussbericht zum Verbundprojekt. Herbert Utz Verlag, München, 2005.
- [45] Kogel-Hollacher, M.: *Methoden der Prozessüberwachung und Qualitätssicherung beim Laserstrahlfügen: Vorteile der Kombination verschiedener Sensortechniken*. Lasermagazin 5/2006, S. 6 - 8.

- [46] Kern, M.; Berger, P.; Hügel, H.: *Querjetkonzept mit minimierter Sorgwirkung und optimiertem Spritzerschutz*. 6th European Conference on Laser Treatment of Materials (ECLAT), Stuttgart, 1996, S. 227 - 234.
- [47] Berger, P.: *Gasdynamische Komponenten für die Materialbearbeitung*. Lasermagazin 2/2004, S. 27.
- [48] DIN 17100: *Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen*. Normenausschuss Materialprüfung im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [49] DIN EN 10277-4: *Blankstahlerzeugnisse - Technische Lieferbedingungen - Teil 4: Einsatzstähle*. Normenausschuss Materialprüfung im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2008.
- [50] DIN EN 10111: *Kontinuierlich warmgewalztes Band und Blech aus weichen Stählen zum Kaltumformen - Technische Lieferbedingungen*. Normenausschuss Materialprüfung im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2008.
- [51] DIN EN 10267: *Von Warmumgebungstemperatur ausscheidungshärtende ferritisch-perlitische Stähle*. Normenausschuss Materialprüfung im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 1998.
- [52] Weberpals, J.; Deininger, C.; Dausinger, F.: *Anwendungspotential stark fokussierender Laser*. Tagungsband Stuttgarter Lasertage, 2005, S. 13 - 18.
- [53] Reitemeyer, D.; Seefeld, T.; Vollertsen, F.; Bergman, J. P.: *Laserinduzierter Fokus Shift beim Schweißen mit Hochleistungsfaserlasern*. Lasermagazin 2/2010, S. 8 - 10.
- [54] Ruß, A.: *Schweißen mit dem Scheibenlaser- Potentiale der guten Fokussierbarkeit*. Dissertation, Universität Stuttgart, Herbert Utz Verlag, München, 2006.
- [55] Weberpals, J.: *Role of strong focusability on the welding process*. J. Laser Appl. **19**,4 (2007), S.252.
- [56] Fuhrich, T.: *Marangoni-Effekt beim Laserstrahl-tiefschweißen von Stahl*. Universität Stuttgart, Dissertation, Herbert Utz Verlag, München, 2005.
- [57] Danzer, W.; Dausinger, F.: *Gaseinfluss beim Schweißen mit Scheibenlaser und Faserlaser*. Tagungsband Stuttgarter Lasertage, 2003, S. 193 - 196.

- [58] Fuhrich, T.; Berger, P.; Hügel, H.: *Marangony Effect in Deep Penetration Laser Welding of Steel*. In: Proceeding of ICALEO 1999, Orlando (FL): Laser Institute of America (LIA), 2000, Section E, S. 166 (LIA Vol. 87).
- [59] <http://www.mercedesclubs.de> [Stand 2007].
- [60] Wildmann, D.; Mootz, A.: *Neue Prüfungssysteme ersetzen die Sichtprüfung. Qualitätsüberwachung von Getriebeteilen*. Laser-Journal 4, 2006, S. 42 - 45.
- [61] Dausinger, F.; Gref, W.: *Braucht man zum Schweißen starke Fokussierbarkeit*. Tagungsband Stuttgarter Lasertage, 2001, S. 22.
- [62] DIN EN 1320: *Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen – Bruchprüfung*. Normenausschuss Materialprüfung im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Dezember 1996.
- [63] DIN EN ISO 6507-1: *Härteprüfung nach Vickers, Teil 1: Prüfverfahren*. Normenausschuss Materialprüfung im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Januar 1998.
- [64] Tiziani, H. J.: *Skript zur Vorlesung Optische Grundgesetze*. Universität Stuttgart, 2002 (Institut für Technische Optik).

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung PWT/VUF (Produktions- und Werkstofftechnik / Verfahrensentwicklung Füge- und Umformtechnik) der Daimler AG in Stuttgart-Untertürkheim.

Herzlich möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, für seine Vorlesungsart, Unterstützung, Förderung und Vertrauen bedanken. Außerdem möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Friedrich Dausinger bedanken, der mir im Jahr 2004 das Projekt „Scheibenlaser höchster Brillanz“ vorgestellt hatte und somit diese Arbeit ermöglichte.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. mult. Engelbert Westkämper möchte ich mich für die Übernahme des Mitberichts bedanken.

Bei allen Kollegen und Mitarbeitern am Institut für Strahlwerkzeuge (IFSW) möchte ich mich für die angenehme und erfolgreiche Zusammenarbeit herzlich bedanken. Hervorheben möchte ich das Engagement und Unterstützung von Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Gref, der mein Interesse für die Lasermaterialbearbeitung geweckt hatte, Herrn Dr.-Ing. Jan-Philipp Weberpals und Herrn Dr. Andreas Voss.

Weiterhin möchte ich mich bei den Kollegen der Abteilung PWT/VUF der Daimler AG und bei den Mitarbeitern in der Produktionsplanung Werk Untertürkheim/Werkteil Hedelfingen (PPA/G) und in der Produktion (PGE/GTF sowie PAC/SWP) für die gute Zusammenarbeit bedanken.

Schließlich möchte ich an dieser Stelle meiner ganzen Familie in Bulgarien sowie meiner Freundin Silvie Hluckova meinen herzlichen Dank aussprechen. Denn ohne ihre langjährige Unterstützung wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.

Gaggenau, im Mai 2011

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW von 1992 bis 1999 erschienen im Teubner Verlag, Stuttgart

Zoske, Uwe

Modell zur rechnerischen Simulation von Laserresonatoren und Strahlführungssystemen
1992, 186 Seiten, ISBN 3-519-06205-4

Gorritz, Michael

Adaptive Optik und Sensorik im Strahlführungssystem von Laserbearbeitungsanlagen
1992, vergriffen, ISBN 3-519-06206-2

Mohr, Ursula

Geschwindigkeitsbestimmende Strahleigenschaften und Einkoppelmechanismen beim CO₂-Laserschneiden von Metallen
1993, 130 Seiten, ISBN 3-519-06207-0

Rudlaff, Thomas

Arbeiten zur Optimierung des Umwandlungshärrens mit Laserstrahlen
1993, 152 Seiten, ISBN 3-519-06208-9

Borik, Stefan

Einfluß optischer Komponenten auf die Strahlqualität von Hochleistungslasern
1993, 200 Seiten, ISBN 3-519-06209-7

Paul, Rüdiger

Optimierung von HF-Gasentladungen für schnell längsgeströmte CO₂-Laser
1994, 149 Seiten, ISBN 3-519-06210-0

Wahl, Roland

Robotergeführtes Laserstrahlschweißen mit Steuerung der Polarisationsrichtung
1994, 150 Seiten, ISBN 3-519-06211-9

Frederking, Klaus-Dieter

Laserlöten kleiner Kupferbauteile mit geregelter Lotdrahtzufuhr
1994, 139 Seiten, ISBN 3-519-06212-7

Grünwald, Karin M.

Modellierung der Energietransferprozesse in längsgeströmten CO₂-Lasern
1994, 158 Seiten, ISBN 3-519-06213-5

Shen, Jialin

Optimierung von Verfahren der Laseroberflächenbehandlung mit gleichzeitiger Pulverzufuhr
1994, 160 Seiten, ISBN 3-519-06214-3

Arnold, Johannes M.

Abtragen metallischer und keramischer Werkstoffe mit Excimerlasern
1994, 192 Seiten, ISBN 3-519-06215-1

Holzwarth, Achim

Ausbreitung und Dämpfung von Stoßwellen in Excimerlasern
1994, 153 Seiten, ISBN 3-519-06216-X

Dausinger, Friedrich

Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität
1995, 143 Seiten, ISBN 3-519-06217-8

Meiners, Eckhard

Abtragende Bearbeitung von Keramiken und Metallen mit gepulstem Nd:YAG-Laser als zweistufiger Prozeß
1995, 120 Seiten, ISBN 3-519-06222-4

Beck, Markus

Modellierung des Lasertiefschweißens
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06218-6

Breining, Klaus

Auslegung und Vermessung von Gasentladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1996, 131 Seiten, ISBN 3-519-06219-4

Griebsch, Jürgen

Grundlagenuntersuchungen zur Qualitätssicherung beim gepulsten Lasertiefschweißen
1996, 133 Seiten, ISBN 3-519-06220-8

Krepulat, Walter

Aerodynamische Fenster für industrielle Hochleistungslaser
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06221-6

Xiao, Min

Vergleichende Untersuchungen zum Schneiden dünner Bleche mit CO₂- und Nd:YAG-Lasern
1996, 118 Seiten, ISBN 3-519-06223-2

Glumann, Christiane

Verbesserte Prozeßsicherheit und Qualität durch Strahlkombination beim Laserschweißen
1996, 143 Seiten, ISBN 3-519-06224-0

Gross, Herbert

Propagation höhermodiger Laserstrahlung und deren Wechselwirkung mit optischen Systemen
1996, 191 Seiten, ISBN 3-519-06225-9

Rapp, Jürgen

Laserschweißignung von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Leichtbau
1996, 202 Seiten, ISBN 3-519-06226-7

Wittig, Klaus

Theoretische Methoden und experimentelle Verfahren zur Charakterisierung von Hochleistungslaserstrahlung
1996, 198 Seiten, ISBN 3-519-06227-5

Grünenwald, Bernd

Verfahrensoptimierung und Schichtcharakterisierung beim einstufigen Cermet-Beschichten mittels CO₂-Hochleistungslaser
1996, 160 Seiten, ISBN 3-519-06229-1

Lee, Jae-Hoon

Laserverfahren zur strukturierten Metallisierung
1996, 154 Seiten, ISBN 3-519-06232-1

Albinus, Uwe N. W.

Metallisches Beschichten mittels PLD-Verfahren
1996, 144 Seiten, ISBN 3-519-06233-X

Wiedmaier, Matthias

Konstruktive und verfahrenstechnische Entwicklungen zur Komplettbearbeitung in Drehzentren mit integrierten Laserverfahren
1997, 129 Seiten, ISBN 3-519-06228-3

Bloehs, Wolfgang

Laserstrahlhärten mit angepassten Strahlformungssystemen
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06230-5

Bea, Martin

Adaptive Optik für die Materialbearbeitung mit CO₂-Laserstrahlung
1997, 143 Seiten, ISBN 3-519-06231-3

Stöhr, Michael

Beeinflussung der Lichtemission bei mikrokanalgekühlten Laserdioden
1997, 147 Seiten, ISBN 3-519-06234-8

Plaß, Wilfried

Zerstörschwellen und Degradation von CO₂-Laseroptiken
1998, 158 Seiten, ISBN 3-519-06235-6

Schaller, Markus K. R.

Lasergestützte Abscheidung dünner Edelmetallschichten zum Heißgaskorrosionsschutz für Mo-lybdän
1998, 163 Seiten, ISBN 3-519-06236-4

Hack, Rüdiger

System- und verfahrenstechnischer Vergleich von Nd:YAG- und CO₂-Lasern im Leistungsbereich bis 5 kW
1998, 165 Seiten, ISBN 3-519-06237-2

Krupka, René

Photothermische Charakterisierung optischer Komponenten für Hochleistungslaser
1998, 139 Seiten, ISBN 3-519-06238-0

Pfeiffer, Wolfgang

Fluiddynamische und elektrophysikalisch optimierte Entladungsstrecken für CO₂-Hochleistungslaser
1998, 152 Seiten, ISBN 3-519-06239-9

Volz, Robert

Optimiertes Beschichten von Gußeisen-, Aluminium- und Kupfergrundwerkstoffen mit Lasern
1998, 133 Seiten, ISBN 3-519-06240-2

Bartelt-Berger, Lars

Lasersystem aus kohärent gekoppelten Grundmode-Diodenlasern
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06241-0

Müller-Hummel, Peter

Entwicklung einer Inprozeßtemperaturmeßvorrichtung zur Optimierung der laserunterstützten Zerspänung
1999, 139 Seiten, ISBN 3-519-06242-9

Rohde, Hansjörg

Qualitätsbestimmende Prozeßparameter beim Einzelpulsbohren mit einem Nd:YAG-Slablaser
1999, 171 Seiten, ISBN 3-519-06243-7

Huonker, Martin

Strahlführung in CO₂-Hochleistungslasersystemen zur Materialbearbeitung
1999, 121 Seiten, ISBN 3-519-06244-5

Callies, Gert

Modellierung von qualitäts- und effektivitätsbestimmenden Mechanismen beim Laserabtragen
1999, 119 Seiten, ISBN 3-519-06245-3

Schubert, Michael E.

Leistungsskalierbares Lasersystem aus fasergekoppelten Singlemode-Diodenlasern
1999, 105 Seiten, ISBN 3-519-06246-1

Kern, Markus

Gas- und magnetofluiddynamische Maßnahmen zur Beeinflussung der Nahtqualität beim Laserstrahlschweißen
1999, 132 Seiten, ISBN 3-519-06247-X

Raiber, Armin

Grundlagen und Prozeßtechnik für das Lasermikrobohren technischer Keramiken
1999, 135 Seiten, ISBN 3-519-06248-8

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2000 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Schittenhelm, Henrik

Diagnostik des laserinduzierten Plasmas
beim Abtragen und Schweißen

2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-712-1

Stewen, Christian

Scheibenlaser mit Kilowatt-Dauerstrichleistung

2000, 145 Seiten, ISBN 3-89675-763-6

Schmitz, Christian

Gaselektronische Analysemethoden zur Optimierung von Lasergasentladungen

2000, 107 Seiten, ISBN 3-89675-773-3

Karszewski, Martin

Scheibenlaser höchster Strahlqualität

2000, 132 Seiten, ISBN 3-89675-785-7

Chang, Chin-Lung

Berechnung der Schmelzbadgeometrie beim Laserstrahlschweißen mit Mehrfokustechnik

2000, 141 Seiten, ISBN 3-89675-825-X

Haag, Matthias

Systemtechnische Optimierungen der Strahlqualität von Hochleistungsdiodenlasern

2000, 166 Seiten, ISBN 3-89675-840-3

Bahn Müller, Jochen

Charakterisierung gepulster Laserstrahlung zur

Qualitätssteigerung beim Laserbohren

2000, 138 Seiten, ISBN 3-89675-811-9

Schellhorn, Martin Carl Johannes

CO-Hochleistungslaser: Charakteristika und Einsatzmöglichkeiten beim Schweißen

2000, 142 Seiten, ISBN 3-89675-849-7

Angstenberger, Birgit

Fliehkraftunterstütztes Laserbeschichten

2000, 153 Seiten, ISBN 3-89675-861-6

Bachhofer, Andreas

Schneiden und Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit Festkörperlasern für den Karoseriebau

2001, 194 Seiten, ISBN 3-89675-881-0

Breitschwerdt, Sven

Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen

2001, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0032-5

Mochmann, Gunter

Laserkristallisation von Siliziumschichten auf Glas- und Kunststoffsubstraten für die Herstellung verbesserter Dünnschichttransistoren

2001, 170 Seiten, ISBN 3-89675-811-X

Herrmann, Andreas

Fertigungsorientierte Verfahrensentwicklung des Weichlötens mit Diodenlasern

2002, 133 Seiten, ISBN 3-8316-0086-4

Mästle, Rüdiger

Bestimmung der Propagationseigenschaften von Laserstrahlung

2002, 147 Seiten, ISBN 3-8316-0113-5

Voß, Andreas

Der Scheibenlaser: Theoretische Grundlagen des Dauerstrichbetriebs und erste experimentelle Ergebnisse anhand von Yb:YAG

2002, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0121-6

Müller, Matthias G.

Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung

2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0144-5

Abeln, Tobias

Grundlagen und Verfahrenstechnik des reaktiven Laserpräzisionsabtrags von Stahl

2002, 138 Seiten, ISBN 3-8316-0137-2

Erhard, Steffen

Pumpoptiken und Resonatoren für den Scheibenlaser

2002, 184 Seiten, ISBN 3-8316-0173-9

Contag, Karsten

Modellierung und numerische Auslegung des

Yb:YAG-Scheibenlasers

2002, 155 Seiten, ISBN 3-8316-0172-0

Krastel, Klaus

Konzepte und Konstruktionen zur laserintegrierten Komplettbearbeitung in Werkzeugmaschinen

2002, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0176-3

Staud, Jürgen

Sensitive Werkzeuge für ein neues Montagekonzept in der Mikrosystemtechnik

2002, 122 Seiten, ISBN 3-8316-0175-5

Schinzl, Cornelius M.

Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau

2002, 177 Seiten, ISBN 3-8316-0201-8

Sebastian, Michael

Grundlagenuntersuchungen zur Laser-Plasma-CVD Synthese von Diamant und amorphen Kohlenstoffen

2002, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0200-X

Lücke, Bernd

Kohärente Kopplung von Vertikalemitter-Arrays
2003, 120 Seiten, ISBN 3-8316-0224-7

Hohenberger, Bernd

Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Doppelfokus-
technik – Steigerung von Prozeßsicherheit, Fle-
xibilität und verfügbarer Strahlleistung
2003, 128 Seiten, ISBN 3-8316-0223-9

Jasper, Knut

Neue Konzepte der Laserstrahlformung und
-führung für die Mikrotechnik
2003, 152 Seiten, ISBN 3-8316-0205-0

Heimerdinger, Christoph

Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen
für die Luftfahrt
2003, 112 Seiten, ISBN 3-8316-0256-5

Christoph Fleig

Evaluierung eines Messverfahrens zur genauen
Bestimmung des Reflexionsgrades optischer
Komponenten
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0274-3

Joachim Radtke

Herstellung von Präzisionsdurchbrüchen in ke-
ramischen Werkstoffen mittels repetierender
Laserbearbeitung
2003, 150 Seiten, ISBN 3-8316-0285-9

Michael Brandner

Steigerung der Prozesseffizienz beim Löten und
Kleben mit Hochleistungsdiodelnlasern
2003, 195 Seiten, ISBN 3-8316-0288-3

Reinhard Winkler

Porenbildung beim Laserstrahlschweißen von
Aluminium-Druckguss
2004, 153 Seiten, ISBN 3-8316-0313-8

Helmut Kindler

Optische und gerätetechnische Entwicklungen
zum Laserstrahlspritzen
2004, 117 Seiten, ISBN 3-8316-0315-4

Andreas Ruf

Modellierung des Perkussionsbohrens von Metal-
len mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern
2004, 140 Seiten, ISBN 3-8316-0372-3

Guido Hergenhan

Kohärente Kopplung von Vertikalemittern – Sys-
temkonzept und experimentelle Verifizierung
2004, 115 Seiten, ISBN 3-8316-0376-6

Klaus Goth

Schweißen von Mischverbindungen aus Alumi-
numguß- und Knetlegierungen mit CO₂-Laser
unter besonderer Berücksichtigung der Nahtart
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0427-4

Armin Strauch

Effiziente Lösung des inversen Problems beim
Laserstrahlschweißen durch Simulation und
Experiment
2004, 169 Seiten, ISBN 3-8316-0425-8

Thomas Wawra

Verfahrensstrategien für Bohrungen hoher Präzi-
sion mittels Laserstrahlung
2004, 162 Seiten, ISBN 3-8316-0453-3

Michael Honer

Prozesssicherungsmaßnahmen beim Bohren
metallischer Werkstoffe mittels Laserstrahlung
2004, 113 Seiten, ISBN 3-8316-0441-x

Thomas Herzinger

Prozessüberwachung beim Laserbohren von
Turbinenschaufeln
2004, 143 Seiten, ISBN 3-8316-0443-8

Reiner Heigl

Herstellung von Randschichten auf Aluminium-
gusslegierungen mittels Laserstrahlung
2004, 173 Seiten, ISBN 3-8316-0460-6

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW (Institut für Strahlwerkzeuge)

Herausgegeben von

Prof. Dr. phil. nat. habil. Thomas Graf, Universität Stuttgart

Forschungsberichte des IFSW ab 2005 erschienen im Herbert Utz Verlag, München

Thomas Fuhrich

Marangoni-effekt beim Laserstrahltiefschweißen von Stahl

2005, 163 Seiten, ISBN 3-8316-0493-2

Daniel Müller

Pulsenergiestabilität bei regenerativen Kurzpuls-verstärkern im Scheibenlaserdesign

2005, 172 Seiten, ISBN 3-8316-0508-4

Jiancun Gao

Neodym-dotierte Quasi-Drei-Niveau-Scheiben-laser: Hohe Ausgangsleistung und Frequenzver-dopplung

2005, 148 Seiten, ISBN 3-8316-0521-1

Wolfgang Gref

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik

2005, 136 Seiten, ISBN 3-8316-0537-8

Michael Weikert

Oberflächenstrukturieren mit ultrakurzen Laser-pulsen

2005, 116 Seiten, ISBN 3-8316-0573-4

Julian Sigel

Lasergenerieren metallischer Bauteile mit variab-lem Laserstrahldurchmesser in modularen Ferti-gungssystemen

2006, 132 Seiten, ISBN 3-8316-0572-6

Andreas Ruß

Schweißen mit dem Scheibenlaser-Potentiale der guten Fokussierbarkeit

2006, 142 Seiten, ISBN 3-8316-0580-7

Gabriele Seibold

Absorption technischer Oberflächen in der La-sermaterialbearbeitung

2006, 156 Seiten, ISBN 3-8316-0618-8

Dirk Lindenau

Magnetisch beeinflusstes Laserstrahlschweißen

2007, 180 Seiten, ISBN 978-3-8316-0687-0

Jens Walter

Gesetzmäßigkeiten beim Lasergenerieren als Basis für die Prozesssteuerung und -regelung

2008, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-0770-9

Heiko Ridderbusch

Longitudinal angeregte passiv gütegeschaltete Laserzündkerze

2008, 175 Seiten, ISBN 978-3-8316-0840-9

Markus Leimser

Strömungsinduzierte Einflüsse auf die Nahteig-enschaften beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen

2009, 150 Seiten, ISBN 978-3-8316-0854-6

Mikhail Larionov

Kontakterung und Charakterisierung von Kristal-len für Scheibenlaser

2009, 186 Seiten, ISBN 978-3-8316-0855-3

Jürgen Müller-Borhanian

Kamerabasierte In-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

2009, 162 Seiten, ISBN 978-3-8316-0890-4

Andreas Letsch

Charakterisierung allgemein astigmatischer La-serstrahlung mit der Methode der zweiten Mo-mente

2009, 176 Seiten, ISBN 978-3-8316-0896-6

Thomas Kübler

Modellierung und Simulation des Halbleiterschei-benlasers

2009, 152 Seiten, ISBN 978-3-8316-0918-5

Günter Ambrosy

Nutzung elektromagnetischer Volumenkräfte beim Laserstrahlschweißen

2009, 170 Seiten, ISBN 978-3-8316-0925-3

Agnes Ott

Oberflächenmodifikation von Aluminiumlegierun-gen mit Laserstrahlung: Prozessverständnis und Schichtcharakterisierung

2010, 226 Seiten, ISBN 978-3-8316-0959-8

Detlef Breitting

Gasphaseneinflüsse beim Abtragen und Bohren mit ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 200 Seiten, ISBN 978-3-8316-0960-4

Dmitrij Walter

Online-Qualitätssicherung beim Bohren mittels ultrakurz gepulster Laserstrahlung

2010, 156 Seiten, ISBN 978-3-8316-0968-0

Jan-Philipp Weberpals

Nutzen und Grenzen guter Fokussierbarkeit beim Laserstrahlschweißen

2010, 154 Seiten, ISBN 978-3-8316-0995-6

Angelika Beyertt

Yb:KYW regenerativer Verstärker für ultrakurze Pulse

2010, 166 Seiten, ISBN 978-3-8316-4002-7

Christian Stolzenburg

Hochrepetierende Kurzpuls-Scheibenlaser im
infraroten und grünen Spektralbereich
2011, 184 Seiten, ISBN 978-3-8316-4041-6

Svent-Simon Beyertt

Quantenfilm-Pumpen zur Leistungsskalierung
von Halbleiter-Scheibenlasern
2011, 130 Seiten, ISBN 978-3-8316-4051-5

Sonja Kittel

Verzugsarmes Laserstrahlschweißen an axial-
symmetrischen Bauteilen
2011, 160 Seiten, ISBN 978-3-8316-4088-1

Andrey Andreev

Schweißen mit dem Scheibenlaser im Getriebe-
bau – Prozessmerkmale und Anlagenkonzepte
2011, 140 Seiten, ISBN 978-3-8316-4103-1

