

# **Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau**

Von Dr.-Ing. Cornelius M. Schinzel  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft  
München

D 93

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Konstruktions- und Fertigungstechnik  
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Engelbert Westkämper

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

Zugleich: Dissertation, Stuttgart, Univ., 2002

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch  
begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des  
Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wieder-  
gabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der  
Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei  
nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2002

ISBN 3-8316-0201-8

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

# Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	5
Inhaltsverzeichnis.....	7
Abkürzungen und Formelzeichen .....	11
Extended Abstract .....	13
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>17</b>
<b>2 Laserstrahlschweißen mit dem Nd:YAG-Laser: Stand der Technik.....</b>	<b>20</b>
2.1 Grundlagen zum Laserstrahlschweißen.....	20
2.1.1 Nd:YAG-Hochleistungsfestkörperlaser .....	21
2.1.1.1 Strahlquelle.....	21
2.1.1.2 Strahlpropagation: Strahlführung und -formung.....	22
2.1.2 Strahl-Stoff-Wechselwirkung .....	29
2.1.2.1 Energieeinkopplung .....	30
2.1.2.2 Fluidodynamik und Stabilität .....	34
2.1.2.3 Plasmaeinflüsse .....	37
2.1.3 Verfahrens- und werkstoffspezifische Besonderheiten beim Laserstrahlschweißen von Aluminium.....	38
2.1.3.1 Risse .....	40
2.1.3.2 Schweißspritzer und Schmelzbadauswürfe .....	44
2.1.3.3 Porenbildung .....	46
2.2 Laserstrahlschweißen im Karosserierohbau .....	48
2.2.1 Anwendungsbeispiele im Stahlkarosseriebau .....	48
2.2.2 Potentielle Anwendungsfelder im Aluminiumkarosseriebau.....	50
<b>3 Motivation, Ausgangsbasis, Zielsetzung und Vorgehensweise .....</b>	<b>54</b>
<b>4 Versuchseinrichtung (Systemtechnik) und Versuchsdurchführung .....</b>	<b>58</b>
4.1 Spanntechnik .....	59
4.2 Roboter .....	60

4.3 Strahlquelle und Bearbeitungsoptik.....	61
4.4 Integrierte Bearbeitungsköpfe .....	66
4.5 Zusatzwerkstoffzuführung.....	72
4.6 Versuchsparameter .....	77
4.6.1 Grund- und Zusatzwerkstoff.....	79
4.6.2 Fügegeometrien und zugehörige Versuchsgrößen.....	82
4.6.2.1 I-Naht am Überlappstoß .....	84
4.6.2.2 I-Naht am Stumpfstoß .....	86
4.6.3 Übersicht der konstanten und variierten Versuchsgrößen .....	87
<b>5 Ergebnisse zum Schweißen einer I-Naht am Überlappstoß .....</b>	<b>88</b>
5.1 Qualitätsaspekte.....	88
5.1.1 Einfluß von Schutzgas und Oberflächenbehandlungszustand .....	89
5.1.2 Überlegungen zur Abschätzung der Heißrißanfälligkeit .....	92
5.1.3 Festigkeitskriterium.....	97
5.2 Parameter und Toleranzfelder für den Serieneinsatz.....	100
5.2.1 Verwendung der Brennweite $f = 100$ mm.....	101
5.2.1.1 Fokusslage .....	101
5.2.1.2 Einfallswinkel des Laserstrahls.....	104
5.2.1.3 Spaltbreite.....	108
5.2.2 Zwischenergebnis.....	112
5.2.3 Verwendung der Brennweite $f = 150$ mm und Vergleich der mit $f = 100$ mm erzielten Ergebnisse .....	114
5.2.3.1 Fokusslage .....	114
5.2.3.2 Einfallswinkel des Laserstrahls.....	116
5.2.3.3 Spaltbreite.....	120
5.2.3.4 Bilanz des Vergleichs der eingesetzten Brennweiten .....	122
5.2.4 Laserstrahlschweißen in Zwangslage.....	122
5.2.4.1 Überkopfposition (PE) .....	123
5.2.4.2 Fallende, steigende und waagrechte Arbeitsposition .....	124

5.2.5 Zusammenfassung.....	128
<b>6 Ergebnisse zum Schweißen einer I-Naht am Stumpfstoß.....</b>	<b>130</b>
6.1 Qualitätskriterien .....	130
6.2 Toleranzfelder und Prozeßgrenzen .....	130
6.2.1 Spaltbreite .....	131
6.2.1.1 Risse und Poren .....	134
6.2.1.2 Oberrauenqualität .....	134
6.2.1.3 Seitlicher Strahlversatz.....	134
6.2.2 Zusammenfassung.....	136
<b>7 Weiterführende Entwicklungen .....</b>	<b>137</b>
7.1 Modifizierung der Zusatzwerkstoffzuführung .....	137
7.1.1 Variation der Anzahl und Anordnung des Zusatzdrahts .....	137
7.1.1.1 Auswirkung auf die Schweißnahtqualität, Energieeinkopplung, Prozeßeﬃzienz und Schmelzbaddynamik .....	140
7.1.1.2 Verbesserung der Spaltüberbrückbarkeit .....	145
7.1.2 Laser-Pulver-Schweißen .....	147
7.1.3 Zusammenfassung.....	151
7.2 Einsatz höherer Laserleistung.....	152
7.2.1 Vergleich von 3 kW und 4 kW Nd:YAG-Laser beim Schweißen einer I- Naht am Überlapstoß.....	153
7.2.2 Verwendung von Bifokal-Optiken zur Strahlteilung beim Schweißen einer I-Naht am Überlapstoß .....	155
7.2.3 Fazit.....	157
<b>8 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>158</b>
<b>9 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>161</b>

# 1 Einleitung

Der stets steigende Wunsch, Ressourcen zu schonen, wiederverwertbare Werkstoffe einzusetzen, Gewicht, aber auch Kosten zu reduzieren, erfordert nach wie vor neue Konstruktions- und Fertigungskonzepte sowohl im Straßen- und Schienenfahrzeug- als auch im Aggregatebau bzw. der gesamten Verkehrsmittelindustrie. Der Werkstoff Aluminium, welcher seit Jahren in der Luftfahrtindustrie eingesetzt wird, eröffnet durch sein geringes spezifisches Gewicht ein großes Leichtbaupotential. Aufgrund weiterer positiver Materialeigenschaften wie z. B. der guten Korrosionsbeständigkeit und der ausgezeichneten Recyclierbarkeit [1] und vor allem im Hinblick auf die aktuelle Forderung nach dem sogenannten „drei-Liter-Auto“ ist Aluminium derzeit insbesondere für die Fahrzeugproduktion höchst interessant geworden. Da hier Aluminiumbauteile nicht einfach bewährte Stahlkomponenten ersetzen können, wurden (und werden) in diesem Zusammenhang bereits mehrere neue Karosseriekonzepte in unterschiedlichen Versionen entwickelt [2].

Ein Beispiel einer solchen neuartigen, im Vergleich zur konventionellen Stahlkarosserie veränderten Aluminiumbauweise stellt der im AUDI A8 eingesetzte, sogenannte „Audi Space Frame, ASF<sup>®</sup>“ (s. Bild 1-1) dar [3, 4, 5]: Eine Kombination gerader und gebogener Strangpreßprofile – durch komplexe Gußelemente miteinander verbunden – bilden eine Tragrahmenstruktur. Das erstmals 1997 auf der Internationalen Automobilausstellung (IAA) in Frankfurt ebenfalls von der AUDI AG vorgestellte Konzeptfahrzeug Al<sub>2</sub> (s. Bild 1-2) stellt die konsequente Weiterentwicklung dieser Ganz-Aluminium-Technologie und deren Leichtbaupotential dar.



Bild 1-1: AUDI A8 Space Frame, ASF<sup>®</sup>.



Bild 1-2: Rahmen des Konzeptfahrzeugs Al<sub>2</sub>, Space Frame, ASF<sup>®</sup>.

Für die Umsetzung dieser, aber auch aller anderen recycling-, gewichts- und kostenoptimierten Leichtbaukonstruktionen [6, 7, 8, 9] in ein Serienprodukt, nimmt die Frage nach geeigneten Fügetechniken stets eine zentrale, vielleicht sogar eine Schlüsselrolle ein [10, 11, 12].

Gerade aufgrund von Schwierigkeiten beim Fügen der für ein Aluminium-Fahrzeugkonzept in Frage kommenden Legierungen bietet sich der Laser als ideales Schweißwerkzeug an. Im Vergleich zu den – nicht nur im Fahrzeugleichtbau – üblicherweise für Aluminium eingesetzten (konventionellen) Fügetechniken besitzt das hochflexible Strahlwerkzeug Laser neben seinen weithin bekannten allgemeinen verfahrensspezifischen Vorteilen, wie z. B. der konzentrierten und präzisen Energieeinbringung, der hohen Bearbeitungsqualität und der ausgezeichneten Automatisierbarkeit [13], eine Reihe von weiteren Eigenschaften, die ihn als geeignetes Fügeworkzeug insbesondere auch für den Fahrzeugleichtbau auszeichnen.

Theoretische und praktische Grundlagenuntersuchungen, die sich mit dem Thema Laserstrahlschweißen von Aluminium beschäftigen, haben bereits das notwendige allgemeine Prozeßverständnis geschaffen [14, 15, 16, 17, 18]. Erforderliche und geeignete Laserstrahlquellen sind ebenfalls verfügbar. Trotzdem ist der Laser bislang als Produktionswerkzeug zum Fügen von Aluminium im Fahrzeugbau nur selten zu finden und wenn, dann lediglich für einzelne Komponenten oder im Aggregatebau.

Um das Laserstrahlschweißen von Aluminium aus dem Laborbetrieb in eine Karosserieserienfertigung überführen zu können, muß auf den Erkenntnissen der Grundlagenuntersuchungen aufgebaut und, darüber hinaus, eine Reihe weiterer unterschiedlicher Randbedingungen beachtet und erfüllt werden. Eine ganzheitliche Vorgehens- und Betrachtungsweise über den gesamten Produktentstehungszyklus hinweg ist hierbei unabdingbar, so daß über die Demonstration der reinen Machbarkeit hinaus auch die Wirtschaftlichkeit des Laserstrahlverfahrens (trotz der vergleichsweise hohen Investitionskosten) nachgewiesen werden kann. Grundvoraussetzung für eine Umsetzung des Laserstrahlschweißens in eine Aluminiumfertigung ist zunächst ein unter Serienbedingungen sicherer, das heißt stabiler und reproduzierbarer Prozeß. Damit ein solcher prinzipiell überhaupt erreicht werden kann, ist bereits im Vorfeld auf eine entsprechend „lasergerechte“ und funktionsangepaßte Konstruktion zu achten. Hierzu existieren bereits zahlreiche Beiträge [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25], weshalb im Rahmen dieser Arbeit nicht vertiefend darauf eingegangen wird. Unter Kenntnis und im Bewußtsein dieser Voraussetzung ist es letztendlich aber von größter Bedeutung, die Möglichkeiten und Grenzen des Laserstrahlschweißverfahrens selbst zu kennen – eine lasergerechte Konstruktion bildet zwar die Basis, nicht jedoch die Garantie für einen in jeder

Situation stabilen Prozeß. Daher müssen weitere, offene Punkte geklärt und zusätzliche Fragen beantwortet werden:

Im Rahmen dieser Arbeit wird exemplarisch für den Einsatz im Karosseriebereich auf diese, in Kapitel 3 konkretisierten, offenen Punkte eingegangen, um die Basis für den Sprung der Lasertechnologie in die Serienfertigung auch in bezug auf den Werkstoff Aluminium zu schaffen. Neben der Entwicklung und Vorstellung einer adäquaten Systemtechnik und eines sogenannten integrierten Bearbeitungskopfs steht im Mittelpunkt praktischer Untersuchungen vor allem die Erarbeitung und Darstellung von geeigneten Parameterkombinationen und zugehörigen Toleranzfeldern für zwei unterschiedliche Fügegeometrien: die I-Naht am Stumpf- und am Überlappstoß. Der – wie sich herausstellen wird – stets erforderliche Einsatz von Zusatzwerkstoff findet dabei besondere Berücksichtigung. Darüber hinaus werden innerhalb weiterführender Untersuchungen Verfahrensvarianten vorgestellt, welche einerseits die Vergrößerung entsprechender Toleranzfelder ermöglichen und andererseits die Prozeßeffizienz und/oder -stabilität zusätzlich positiv beeinflussen.

Die folgenden Kapitel zeigen vor dem Hintergrund einer potentiellen Anwendung im Aluminium-Karosseriebau, für die das Laserstrahlschweißen qualifiziert werden soll, den derzeitigen Stand der Technik des Laserstrahlschweißens auf und führen damit auf die ganz konkrete Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit hin, bevor im Anschluß daran detailliert auf den Versuchsaufbau, die Versuchsdurchführung und die einzelnen Untersuchungsergebnisse eingegangen wird.