Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

W. Gref
Laserstrahlschweißen von Aluminium-
werkstoffen mit der Fokusmatrix-
technik

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.

Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen mit der Fokusmatrixtechnik

von Dr.-Ing. Wolfgang Gref
Universität Stuttgart

Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.- Ing. Helmut Hügel
Mitberichter: Prof. Dr. rer. nat. Siegfried Schmauder

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., 2005

D 93

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2005

ISBN 3-8316-0537-8

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089-277791-00 · www.utzverlag.de

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 ... 18

2 Grundlagen und Stand der Technik **20**

2.1 Laserstrahlschweißen ... 20

2.1.1 Wärmeleitungsschweißen ... 21

2.1.2 Tiefschweißen ... 21

2.1.3 Wirkungsgrade beim Tiefschweißen ... 24

2.2 Schweißbarkeit von Aluminium ... 25

2.2.1 Heißrisse ... 26

2.2.2 Wasserstoffporen ... 28

2.2.3 Prozessporen und Schmelzauswürfe ... 30

2.3 Doppelfokustechnik ... 33

3 Systemtechnik, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung **39**

3.1 Strahlquellen ... 39

3.1.1 Lampengepumpter Nd:YAG-Laser ... 39

3.1.2 Diodengepumpter Yb:YAG-Scheibenlaser ... 41

3.2 Optische Komponenten zur Strahlführung und Strahlformung ... 43

3.2.1 Lichtleitkabel ... 43

3.2.2 Standard- Bearbeitungsoptiken ... 44

3.2.3 Doppelfokusoptiken ... 45

3.2.4 Fokusmatrixoptik ... 50

3.3 Prozessadapter und Bearbeitungsstationen ... 51

3.4 Untersuchte Werkstoffe 54
3.4.1 Aluminium- Knetlegierungen 54
3.4.2 Aluminium- Druckguss 56

4 Laserstrahlschweißen mit dem lampengepumpten Nd:YAG-Laser 58
4.1 Schweißen mit dem Doppelfokus 58
4.1.1 Einfluss des Fokusabstandes 59
4.1.2 Einfluss der Leistungsverteilung 66
4.1.3 Änderung der Leistungsdichte 68
4.1.4 Verbesserungsmöglichkeiten durch Strahlpendeln 70
4.2 Fokusmatrix 73
4.3 Synopsis 75

5 Schweißen mit dem diodengepumpten Yb:YAG- Scheibenlaser 78
5.1 Besonderheiten beim Schweißen mit dem Yb:YAG- Scheibenlaser 78
5.1.1 System- und verfahrenstechnische Vorteile des Scheibenlasers 78
5.1.2 Einfluss der Fokussierbarkeit auf die Schweißnahtqualität 81
5.1.3 Fokusmatrix mit dem Scheibenlaser 87
5.2 Hohe Qualität und Effizienz gleichzeitig – Schweißen mit der Fokusmatrix 94
5.2.1 Schweißen von Aluminium Knetlegierungen 95
5.2.2 Schweißen von Aluminium Druckguss 99
5.3 Modifikation des Schweißens mit der Fokusmatrix 101
5.3.1 Nahtglättung 101
5.3.2 Zentrale Drahtzufuhr 105
5.4 Weiteres Einsatzpotential von Scheibenlaser und Multifokustechnik 109
5.4.1 Die simultane Vielpunkttechnik 110
5.4.2 Schweißen von beschichteten Stahlblechen 111
5.5 Synopsis 116

6 Zusammenfassung 121

7 Literatur- und Quellenverzeichnis 125

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

In der industriellen Fertigungstechnik gewinnt der Laser aufgrund der Vielzahl an technologischen Vorteilen zunehmend an Bedeutung. Diese technologischen Vorteile ergeben sich vor allem durch die gezielte, zeitlich und örtlich begrenzte Energieeinbringung in das Werkstück und der damit verbundenen hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit. Im Verkehrswesen, und hier besonders im Bereich des Karosserieleichtbaus, eröffnet sich dem Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen ein großes fertigungstechnisches Potential.

Die Doppelfokustechnik beim Laserstrahlschweißen, d.h. die Anwendung zweier räumlich getrennter Foki am Werkstück, ist eine Technik, die inzwischen den Sprung vom Labor in die Produktion geschafft hat. Der große Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Möglichkeit, die Leistungsverteilung an die Aufgabenstellung anzupassen und in Abhängigkeit der Prozessbedingungen, z.B. bei veränderten Fügegeometrien oder Spaltweiten, zu regeln. Dadurch wird ein hohes Maß an Flexibilität, vor allem aber eine hohe Prozessstabilität und Schweißnahtqualität erreicht. Untersuchungen haben dennoch gezeigt, dass das Schweißen mit der Doppelfokustechnik bei gleichem Leistungsniveau geringere Einschweißtiefen liefert als das Schweißen mit nur einem Laserstrahl. Aus fertigungstechnischer Sicht ist jedoch die Frage nach den optimalen Parametern für die Erzeugung der gewünschten Schweißnaht sehr eng mit den wirtschaftlichen Gesichtspunkten des Gesamtprozesses verknüpft. Leistungsfähigkeit, Effizienz und Qualität des Schweißergebnisses sind demnach die zentralen Merkmale des Fügeverfahrens.

Unter diesen Gesichtspunkten soll im Rahmen dieser Arbeit das Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen genau untersucht werden, wobei es gilt, die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Parametern zu verstehen und daraus neue Strategien abzuleiten, die ein effizientes Schweißen bei bester Schweißnahtqualität ermöglichen. Dabei wird der Schwerpunkt der Untersuchungen auf die Reduzierung der Poren in der Schweißnaht gelegt. Um den reinen Einfluss der eingesetzten Fügevariante – ohne Einwirkung von weiteren „Störgrößen“ – auf das Schweißergebnis zu untersuchen, wird in den meisten Fällen bewusst auf die Verwendung von Zusatzwerkstoff verzichtet.

Vor dem Hintergrund einer potentiellen Anwendung im Automobilbau orientieren sich die Versuche bezüglich Werkstoff, Einschweißtiefen und Bearbeitungsgeschwindigkeiten an den dort gestellten Anforderungen. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen das Prozessverständnis erleichtern und dem Anwender eine präzise Abschätzung der Vor- und Nachteile der einzelnen Verfahrensvarianten ermöglichen.

Ausgangspunkt der Untersuchungen ist das Schweißen mit der Doppelfokustechnik unter Verwendung lampengepumpter Nd:YAG-Laser. Ein breit angelegtes Versuchsprogramm soll die Zusammenhänge zwischen Schweißnahtqualität und Prozesswirkungsgrad klären. Als Weiterentwicklung wird das Schweißen mit mehr als zwei Laserstrahlen, der sogenannten Fokusmatrix, hinsichtlich ihres Leistungspotentials untersucht.

Im Mittelpunkt der Arbeit steht jedoch das Schweißen mit dem diodengepumpten Scheibenlaser. Betrachtet werden dabei unterschiedlichste Verfahrensvarianten, beginnend mit nur einem Laserstrahl bis hin zum Schweißen mit vier Laserstrahlen gleichzeitig. Ziel ist es, beim Schweißen mit der Fokusmatrixtechnik eine Steigerung der Prozesseffizienz zu erreichen und gleichzeitig zu untersuchen, inwieweit diese Technik einen Einfluss auf die Schweißnahtqualität hat. Dabei soll die Fokusmatrixtechnik im Vergleich zu anderen Laserschweißtechniken, wie z.B. Einzelfokus- und Doppelfokustechnik, geprüft und bewertet werden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Ausgehend von dem Stand der Technik und basierend auf der Zielsetzung leitet sich das Vorgehen und der Aufbau dieser Arbeit ab. Zunächst wird im Kapitel 2 auf den bisherigen Stand der Kenntnisse zum Laserstrahlschweißen eingegangen. Dabei werden auch die Grundlagen dieser Fertigungstechnologie, die für das weitere Verständnis sowie für die Erklärung bestimmter Phänomene notwendig sind, erläutert. In Kapitel 3 wird die verwendete Systemtechnik, beginnend von den Strahlquellen, über die optischen Komponenten bis hin zu den untersuchten Werkstoffen, beschrieben. Dabei liegt der Schwerpunkt beim Schweißen von Aluminiumwerkstoffen mit dem lampengepumpten Nd:YAG- beziehungsweise dem diodengepumpten Yb:YAG-Scheibenlaser.

Als Basis und Ausgangspunkt für weitere Entwicklungen wird in Kapitel 4 das Schweißen von Aluminiumlegierungen mit Hilfe der Doppelfokustechnik genau untersucht. Diesem Abschnitt liegen nur Arbeiten mit lampengepumpten Nd:YAG- Lasern zugrunde. Ziel ist es, die genauen Zusammenhänge und die Abhängigkeiten einzelner

Parameter zu verstehen und daraus Wege abzuleiten, die eine hohe Effizienz bei gleichzeitig bester Schweißnahtqualität ermöglichen.

Das Schweißen mit dem diodengepumpten Scheibenlaser zu untersuchen ist ein zentrales Anliegen dieser Arbeit. Dabei werden im Kapitel 5 die Vorteile, die sich durch den Einsatz des Scheibenlasers ergeben, ausführlich beschrieben. Als wichtiger Aspekt bleibt die Qualität der Schweißergebnisse im Vordergrund. Um den möglichen Anwendungen Rechnung zu tragen und um die dort geforderten Einschweißtiefen und Schweißgeschwindigkeiten umsetzen zu können, wird auch die Addition mehrerer Laserstrahlen untersucht. Die Ergebnisse der Fokusmatrixtechnik werden dabei in einem direkten Vergleich mit der Einzelfokustechnik beziehungsweise der Doppelfokustechnik bewertet. Überdies wird in diesem Kapitel das weitere Einsatzpotential der Fokusmatrix in Verbindung mit dem Scheibenlaser beim Schweißen von Aluminiumwerkstoffen untersucht.

Als Ausblick wird im Abschnitt 5.4 auf mögliche Einsatzgebiete der Scheibenlaser bei Stahlwerkstoffen eingegangen. Das vorteilhafte Schweißen von dünnsten Blechfolien bei höchsten Vorschubgeschwindigkeiten, der Einsatz der Vielpunkttechnik beim Schweißen von rotationssymmetrischen Bauteilen und das Schweißen von beschichteten Blechen unterstreicht das hohe Potential der Scheibenlaser. Zum Abschluss werden in Kapitel 6 die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.