

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

A. Ruß
Schweißen mit dem Scheibenlaser -
Potentiale der guten Fokussierbarkeit

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 – Potentiale der guten Fokussierbarkeit

von Dr.-Ing. Andreas Ruß
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. 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., 2006

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 2006

ISBN 3-8316-0580-7

Printed in Germany

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

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung der Arbeit	5
Inhaltsverzeichnis	7
Formelzeichen und Abkürzungen	9
Extended Abstract	13
1 Einleitung	16
1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit	16
1.2 Aufbau der Arbeit	17
2 Grundlagen des Laserstrahlschweißens	19
2.1 Strahlqualität und Fokussierbarkeit	19
2.2 Fokussierung von Laserstrahlung	21
2.3 Absorption der Laserstrahlung	24
2.4 Verfahrensprinzip des Laserstrahlschweißens	26
2.4.1 Wärmeleitungsschweißen	27
2.4.2 Tiefschweißen	29
2.4.3 Erstarrung des Schweißgutes	32
2.5 Wirkungsgrade beim Laserstrahlschweißen	34
2.5.1 Einkoppelgrad	34
2.5.2 Thermischer Wirkungsgrad	36
2.5.3 Prozesswirkungsgrad	38
3 Systemtechnik, Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	39
3.1 Hochleistungs-Festkörperlaser	39
3.1.1 Lampengepumpte Stablasers	39
3.1.2 Diodengepumpter Scheibenlaser	40
3.2 Strahlführung und -formung	41
3.3 Prozessadapter	42
3.4 Versuchsaufbau und -durchführung	46
4 Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen: die Schwelle	48
4.1 Grundlagen	48
4.2 Schwelle bei Aluminiumlegierungen	52

4.2.1	Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit.....	57
4.2.2	Einfluss des Schutzgases.....	59
4.3	Schwelle bei Stahlwerkstoffen	59
4.3.1	Vertiefende Betrachtung zur Schwelle anhand von Edelstahl.....	61
4.3.2	Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit und deren Bedeutung für das Hochgeschwindigkeitsschweißen	64
4.3.3	Einfluss des Schutzgases.....	66
4.4	Vergleich der Werkstoffe	67
4.5	Synopsis.....	71
5	Schweißen mit dem Scheibenlaser	74
5.1	Einfluss der Fokussierbarkeit	74
5.1.1	Einleitende Betrachtungen zum Schweißen mit sehr kleinen Fokusdurchmessern.....	75
5.1.2	Variation des Fokusdurchmessers.....	76
5.1.3	Einfluss des Fokusdurchmessers auf die Nahtform	85
5.1.4	Variation des Divergenzwinkels	95
5.1.5	Potential guter Fokussierbarkeit.....	101
5.1.6	Variation der Fokuslage	102
5.1.7	Nahtqualität	108
5.1.8	Synopsis	109
5.2	Folienschweißen	111
5.2.1	Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit	112
5.2.2	Reduzierung der Foliendicke	118
5.2.3	Übertragung auf eine Überlappverbindung.....	121
5.2.4	Anhebung der Schmelze und Humping	123
5.2.5	Synopsis	127
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	129
7	Literaturverzeichnis	133

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung der Arbeit

In den vergangenen Jahren haben sich Hochleistungslaser zu einem für die industrielle Fertigungstechnik sehr wichtigen Werkzeug entwickelt. Obwohl die heutigen lampen-gepumpten Festkörperlaser im Vergleich zu CO₂-Lasern teurer sind, eine geringere Fokussierbarkeit und einen geringeren Wirkungsgrad aufweisen, wächst die Anzahl ihrer industriellen Anwendungen beständig. Ausschlaggebend hierfür ist die kurze Wellenlänge der Festkörperlaser: Der Laserstrahl kann mit Hilfe von Glasfasern zum Werkstück transportiert werden, was eine höhere Flexibilität und bessere Zugänglichkeit sowie geringere Kosten für die Handhabungstechnik mit sich bringt. Des Weiteren ergeben sich durch die im Vergleich zum CO₂-Laser kürzere Wellenlänge einige prozesstechnische Vorteile wie z.B. höherer Absorptionsgrad bei metallischen Werkstoffen und Unempfindlichkeit gegenüber laserinduziertem Plasma. Die Verfügbarkeit ausgereifter Hochleistungs-Festkörperlaser ist die wesentliche Voraussetzung für die Anwendung der Lasertechnologie in der industriellen Fertigung. Einige wichtige Anwendungsgebiete erfordern jedoch eine höhere Laserleistung und/oder eine bessere Fokussierbarkeit als diese Geräte sie heute bieten. So sind z.B. für die geforderten hohen Einschweißstiefen im Getriebe- und Aggregatebau eine höhere Laserleistung bzw. eine bessere Fokussierbarkeit für die Umsetzung des Remote-Schweißens mit Festkörperlasern wünschenswert.

Mit der Verfügbarkeit von Diodenlasern zum Pumpen der Festkörperlaser und getrieben durch Bedürfnisse des Marktes, zielen die neuesten Entwicklungen auf dem Gebiet der Hochleistungs-Festkörperlaser auf die Verringerung der oben erwähnten Nachteile geringe Fokussierbarkeit und schlechter Wirkungsgrad ab. Der aussichtsreichste Vertreter der Festkörperlaser neuester Generation, der auch bei hohen Laserleistungen die Realisierung bester Fokussierbarkeit prinzipiell erlaubt, ist der Scheibenlaser.

Die Vorteile besserer Fokussierbarkeit können auf verschiedene Weise genutzt werden. Eine bessere Fokussierbarkeit führt zu einem bei gleichbleibender Fokussierung zu einem kleineren Fokussdurchmesser oder zum anderen bei gleichbleibendem Fokussdurchmesser zu einer Vergrößerung des Arbeitsabstandes. Obwohl Scheibenlaser der

Multikilowatt-Klasse sich kurz vor der industriellen Einführung befinden, sind die Einflüsse kleiner Fokusburchmesser auf den Schweißprozess weitgehend unbekannt. Aber gerade ein vertieftes Prozessverständnis ist die Grundvoraussetzung für einen erfolgreichen, wirtschaftlichen Einsatz des Scheibenlasers in der industriellen Fertigungstechnik. Mit dieser Arbeit soll die Basis für das Prozessverständnis beim Laserstrahlschweißen mit kleinen Fokusburchmessern geschaffen werden, um die Erweiterung bestehender bzw. die Erschließung neuer Anwendungsgebiete zu ermöglichen.

1.2 Aufbau der Arbeit

Ausgehend von der Zielsetzung dieser Arbeit leitet sich das Vorgehen und der Aufbau ab. Zunächst werden in Kapitel 2 die für diese Arbeit wichtigen Grundlagen des Laserstrahlschweißens aufgeführt und die verschiedenen Verfahrensvarianten diskutiert. Allerdings kommt bei dieser Arbeit ausschließlich die sogenannte Einstrahltechnik zum Einsatz, bei der nur ein Laserstrahl zum Schweißen eingesetzt wird.

In Kapitel 3 werden die prinzipielle Funktionsweise von Hochleistungs-Festkörperlasern sowie die Unterschiede der verschiedenen Laserkonzepte erläutert und deren wichtigste Eigenschaften miteinander verglichen. Des Weiteren wird die speziell zum Laserstrahlschweißen erforderliche Systemtechnik (Bearbeitungsoptiken, Prozessadapter) kurz beschrieben.

Trotz langjähriger Forschung und vielfältiger Anwendungen ist der Einfluss der Fokussierbarkeit auf den Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen keineswegs Allgemeingut bei Prozessentwicklern. In Kapitel 4 werden deshalb zunächst die hierfür wichtigen Grundlagen erarbeitet und diese dann anhand experimenteller Untersuchungen an Aluminium und Stahl verifiziert und die Einflüsse der Fokussierbarkeit diskutiert.

Der Schwerpunkt dieser Arbeit bildet in Kapitel 5 das Schweißen mit dem Scheibenlaser. Es werden anhand von Blindschweißungen in verschiedene Stahlwerkstoffe sowie in eine Aluminiumlegierung die Einflüsse des Fokusburchmessers auf die Nahtkenngrößen Einschweißtiefe, Nahtbreite und -querschnittsfläche sowie Prozesswirkungsgrad und Nahtform diskutiert. Es wird aufgezeigt, wie mit Hilfe einer guten Fokussierbarkeit die Prozessgrenzen erweitert werden können.

Das Folienschweißen war aufgrund der bis dato geringen Fokussierbarkeit von cw-Festkörperlasern bisher gepulsten Lasersystemen bzw. anderen Schweißverfahren vor-

behalten. In Kapitel 5 wird aufgezeigt, wie die Vorteile der guten Fokussierbarkeit zum Hochgeschwindigkeitsschweißen dünner Folien genutzt werden können. Hiermit können neue Anwendungsgebiete für den Scheibenlaser erschlossen werden.

Zum Abschluss werden in Kapitel 6 die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst.