# 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.

# Absorption technischer Oberflächen in der Lasermaterialbearbeitung

von Dr.-Ing. Gabriele Seibold
Universität Stuttgart

Herbert Utz Verlag · Wissenschaft
München

Als Dissertation genehmigt
von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr. habil. Friedrich Dausinger
Mitberichter: Prof. Dr. Wolfgang Osten

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 3-8316-0618-8

Printed in Germany

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

# Inhaltsverzeichnis


**Kurzfassung** **1**

**Formelzeichen und Abkürzungen** **5**

**Abstract** **7**

**1 Einleitung und Zielsetzung** **11**

**2 Grundlagen der Absorption** **13**
2.1 Theoretische Beschreibung ... 13
2.1.1 Ausbreitung elektromagnetischer Wellen ... 13
2.1.2 Absorption, Reflexion, Transmission (Fresnel-Gleichungen) ... 15
2.1.3 Semiphänomenologische Theorien ... 19
2.2 Einflussgrössen im Hinblick auf die Materialbearbeitung ... 21
2.2.1 Eindringtiefe ... 21
2.2.2 Wellenlänge ... 22
2.2.3 Temperatur ... 26
2.2.4 Einfallswinkel ... 32
2.2.5 Oberfläche ... 34

**3 Methoden zur Bestimmung der Absorption** **40**
3.1 Kalorimetrie ... 40
3.1.1 Prinzip, Datenerfassung ... 41
3.2 Reflektometrie ... 46
3.2.1 Prinzip, Datenerfassung und -auswertung ... 46
3.3 Emissionsmessung ... 49
3.3.1 Prinzip, Datenerfassung und -auswertung ... 49
3.4 Ellipsometrie ... 50
3.4.1 Prinzip, Datenerfassung und -auswertung ... 50
3.5 Vor- und Nachteile der Methoden ... 52

**4 Kalorimetrische Messung bei niedrigen Temperaturen** **57**
4.1 Versuchsdurchführung ... 58
4.1.1 Kalorimetrischer Messaufbau ... 58
4.1.2 Probenherstellung ... 61
4.1.3 Probenmaterialien ... 62
4.2 Vergleich der beiden Wellenlängen ... 63
4.2.1 Polierte Oberflächen ... 63

4.2.2 Einfluss der Rauheit ..... 65
4.2.3 Diskussion ..... 73
4.3 Einfluss der Oxidation/ Alterung ..... 77
4.3.1 Ergebnisse für Nd:YAG- und Diodenlaser-Strahlung ..... 77
4.3.2 Diskussion ..... 77
4.4 Winkelabängigkeit bei linear polarisierter Diodenlaserstrahlung ..... 80
4.4.1 Ergebnisse für Diodenlaserstrahlung ..... 80
4.4.2 Diskussion ..... 89

**5 Reflektometrische Messungen bei hohen Temperaturen 94**
5.1 Versuchsdurchführung ..... 94
5.1.1 Reflektometrischer Messaufbau ..... 95
5.2 Messtechnische Aufgaben ..... 100
5.2.1 Temperaturmessung ..... 100
5.2.2 Interpretation Reflex-Signal ..... 105
5.2.3 Auswirkungen des Vakuums ..... 108
5.3 Temperaturabhängigkeit der Absorption ..... 108
5.3.1 Ergebnisse für polierte Eisen-Proben ..... 108
5.3.2 Vergleich der Ergebnisse für Eisen und Stahl ..... 110
5.3.3 Einfluss der Rauheit ..... 111
5.3.4 Diskussion ..... 114
5.4 Einfluss der Oxidation ..... 118
5.4.1 Diskussion ..... 119

**6 Zusammenfassung 121**

**7 Literaturverzeichnis 123**

**Anhang 129**

# 1 Einleitung und Zielsetzung

Mit zunehmender Verbreitung des Lasers als Werkzeug in der Materialbearbeitung gewinnt auch das Interesse an den grundlegenden Zusammenhängen und Vorgängen der Energieeinkopplung an Umfang. Hierbei besteht nicht nur ein rein akademisches Interesse an diesem Thema, auch wirtschaftliche Faktoren spielen eine Rolle. Führt man sich die Tatsache vor Augen, dass z.B. „Licht z.B. Stahl schneidet“, also hochenergetische Strahlung mit einer Leistungsdichte bis zu $10^8$W/cm$^2$ [1] erzeugt und effizient ins Werkstück eingebracht werden muss, so kann man ermessen, wie wichtig eine Optimierung der Energieeinbringung ist. Eine effiziente Einkopplung kann die zur Erzeugung der Strahlung notwendigen Energiekosten verringern, indem leistungsschwächere und zudem auch preisgünstigere Laser verwendet werden können, sie kann den Fokussierungsaufwand also den Einsatz von Optiken verringern, da geringere Leistungsdichten ausreichen können, kann Taktzeiten verkürzen, indem in kürzeren Zeit die Energieumsetzung im Werkstück erfolgt und zu grösserer Prozesssicherheit führen, indem man z.B. beim Schweissen auf Strahlung anderer Wellenlängen gehen kann. Die grundlegenden Einflussfaktoren auf die Einkopplung der Energie sind zum einen laserseitig die erzielbare Leistung, die Wellenlänge und Polarisationseigenschaften, auf der Seite des Werkstücks sind dies zum einen physikalische, sogenannte intrinsische Absorptionseigenschaften, aber auch die Oberflächenbeschaffenheit, insbesondere die Oberflächenstruktur und Oxidationsschichten.

Bislang eher grundlagenphysikalisch orientierte Untersuchungen, die die Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung mit Elektronen im Festkörper betrachteten, können Einflussfaktoren realer Oberflächen nicht ausreichend erklären. In zunehmendem Masse wurden demzufolge technische Materialien wie Legierungen untersucht, wobei allerdings noch der Einfluss der Oxidation die Interpretation der Messergebnisse verfälschte [2]. Was den Einfluss der Oberflächenrauheit anbelangt, so finden sich in der Literatur nur wenige systematische Untersuchungen wie z.B. [3]. In der Regel wurden solche Untersuchungen in Zusammenhang mit Emissivitätsmessungen durchgeführt, wobei der Gesamtemissionsgrad, also über einen grossen Spektralbereich integriert angegeben wird [4]. Daten, die Aufschluss über das Verhalten der Absorption beim Übergang zur flüssigen Phase also beim Aufschmelzen geben, finden sich ebenfalls insbesondere für Legierungen bei technischen Laserwellenlängen nur selten [5],[6].

Die Temperaturabhängigkeit der Absorption mit Einbeziehung des Einflusses der Oberflächenrauheit war bislang nur Gegenstand einer Veröffentlichung [7], wobei dort auf eine Erklärung des Verhaltens verzichtet wurde. Einen Überblick über die grundlegenden Absorptionsmechanismen und die gängigen Methoden zur Absorptionsmessung wird in Kapitel 3 gegeben.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Lücke der Absorptionsdaten für technisch relevante Materialien und Oberflächen und insbesondere deren Einfluss auf die Temperaturabhängigkeit der Absorption zu schliessen. Die Ergebnisse liefern zum einen Daten für Modellierungen von Materialbearbeitungsprozessen und tragen damit zu einem besseren Verständnis der Abläufe bei, zum anderen werden detaillierte Überlegungen zum Temperaturverhalten einer Rauheitstruktur durchgeführt, so dass auch dieser Einfluss berücksichtigt werden kann. Die Ergebnisse können auch ein hilfreiches Mittel sein, für spezielle Anwendungen den richtigen Laser zu finden, bzw. es dem Anwender ermöglichen, den Laser zu finden der das Spektrum seiner Einsatzmöglichkeiten am besten abdeckt. Als Beispiel sei hier das direkte Einfliessen der Ergebnisse in ein europäisches Forschungsprojekt genannt, bei dem zu klären war, ob ein Diodenlaser mit linear polarisierter Strahlung einem unpolarisierten Laser mit höherer Leistung vorzuziehen wäre.

# 2 Grundlagen der Absorption

Die Absorption elektromagnetischer Strahlung durch Materie ist eine grundlegende Voraussetzung für die Lasermaterialbearbeitung. Strahlung tritt in Wechselwirkung mit der Materie und erwärmt diese. Für die Beschreibung dieses Vorgangs kann zum einen die Eigenschaft des Lichts, sich wie Teilchen (Photonen) zu verhalten, herangezogen werden. Beispiele hierfür sind der Photo-Effekt und das Phänomen des Strahlungsdrucks. Zum Anderen kann Licht als eine sich ausbreitende elektromagnetischen Welle beschrieben werden. Die in der Materialbearbeitung relevanten Phänomene können mit Hilfe dieses Modells anschaulich beschreiben werden. Im folgenden Kapitel 2.1.1 wird zuerst näher auf die Grundlagen der Ausbreitung einer elektromagnetischer Welle eingegangen. Die Umsetzung der Energie der Strahlung in Wärmeenergie in der Materie wird mit Hilfe von semiphänomenologischen Elektronentheorien beschrieben. Eine Einleitung und ein Überblick über aktuelle Modelle zur Berechnung der Kopplungsvorgänge werden in Kapitel 2.1.3 gegeben. Aus diesen grundlegend physikalischen Zusammenhängen lassen sich dann Abhängigkeiten der Energieeinbringung insbesondere im Hinblick auf die Materialbearbeitung, wie sie in Kapitel 2.2 beschrieben werden, ableiten. Teile des hier vorliegende Kapitels und einige Tabellen aus dem Anhang wurden im Rahmen eines Beitrags des Instituts für Strahlwerkzeuge in [8] bereits veröffentlicht.

## 2.1 Theoretische Beschreibung

### 2.1.1 Ausbreitung elektromagnetischer Wellen

Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen wird aus den Maxwell-Gleichungen [9] abgeleitet. Eine allgemeine Lösung der Wellengleichung für die zeitabhängige elektrische Feldstärke $\boldsymbol{E}$ für eine ebene Welle, die sich entlang der z-Richtung ausbreitet ist gegeben durch:

$$\vec{E}(z,t) = \hat{E}_{\boldsymbol{0}} \cdot e^{i(\omega t - kz)}, \tag{2.1}$$

mit der Amplitude des elektrischen Feldstärkevektors $\hat{E}_0$, der Kreisfrequenz $\omega$ und der Wellenzahl $k$, die mit dem Brechungsindex $n$, der Wellenlänge $\lambda$ und der Lichtgeschwindigkeit $c$ folgendermassen zusammenhängt: