

Laser in der Materialbearbeitung
Forschungsberichte des IFSW

M. G. Müller
Prozessüberwachung beim Laser-
strahlschweißen durch Auswertung
der reflektierten Leistung

Laser in der Materialbearbeitung

Forschungsberichte des IFSW

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel, 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.

Prozessüberwachung beim Laser- strahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung

Von Dr.-Ing. Matthias G. Müller
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. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. Manfred Geiger

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist
bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich

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 Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2002

ISBN 3-8316-0144-5

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 – Fax: 089/277791-01

Kurzfassung

Die Qualitätssicherung beim Laserstrahlschweißen kann bisher nicht auf zerstörende Werkstoffprüfung verzichten, um verborgene Merkmale wie innere Nahtfehler aufzudecken. Kommerzielle Systeme zur Prozessüberwachung bieten für viele Applikationen keine ausreichende Zuverlässigkeit in der Fehlerdetektion. Es besteht daher Bedarf an aussagekräftigen, während des Schweißprozesses zu messenden Sensorsignalen, die eine zuverlässige Online-Beurteilung der Nahtqualität zulassen.

Für das Laserstrahl-tiefschweißen bietet ein physikalisch bedingter Zusammenhang zwischen Einkoppelgrad der Laserstrahlung und Schachtverhältnis der Dampfkapillare die Möglichkeit, Informationen hinsichtlich der Nahtqualität aus der Tiefe des zu bearbeiteten Werkstoffvolumens zu erhalten. Die durch Laserstrahlung erzeugte Dampfkapillare, die das Tiefschweißen ermöglicht, wird dabei als prägender Informationskanal für die aus der Kapillare reflektierte Laserstrahlung verwendet.

Eine Modellrechnung beschreibt diesen Zusammenhang zwischen reflektierter Laserleistung und Schachtverhältnis der Dampfkapillare. Der Reflexionsgrad gibt an, welcher Anteil der Laserleistung aus der Kapillare reflektiert wird; er weist dabei mit wachsendem Schachtverhältnis eine asymptotische Annäherung bis hin zu Null auf. Dies entspräche einer nahezu vollständigen Einkopplung infolge von Vielfachreflexion. Änderungen in der Geometrie der Dampfkapillare haben unmittelbaren Einfluss auf die reflektierte Laserstrahlung. Deren Leistungsdichteverteilung stellt dabei die Grundlage für die Realisierung der Messmethode dar.

Ein Versuchsaufbau zur Visualisierung der Kapillargeometrie während des Schweißens zeigt deren typische Geometrien und Abmessungen für unterschiedliche Prozessparameter. Durch die synchrone Erfassung der reflektierten Laserleistung werden typische Signalmuster deren entsprechenden Prozessereignissen zugeordnet. Auf diesen Informationen aufbauend können umgekehrt Unregelmäßigkeiten in der Kapillarausbildung, die zu Nahtdefekten führen, indiziert werden.

Anhand differenzierter Parameterstudien wird die Funktionalität des prototypischen Messaufbaus dem Prozess angepasst und weiterentwickelt. Diese grundlegenden Versuche werden für Nd:YAG- und CO₂-Laser durchgeführt. Die Arbeit schließt mit der Umsetzung des Messprinzips in ein praxistaugliches Funktionsmuster für Nd:YAG-Laser sowie dessen Evaluierung ab. Insbesondere die Kombination mehrerer Detektoren, der hohe Integrationsgrad und die Adaption an eine bestehende, kommerzielle Messdatenverarbeitung macht dieses System einsatzreif für die industrielle Anwendung.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis

Extended Abstract	13
1 Einführung	17
1.1 Ausgangssituation	17
1.2 Zielsetzung	18
1.3 Gliederung der Arbeit	19
2 Grundlagen.....	20
2.1 Laserstrahlschweißen	20
2.2 Ausbreitung und Fokussierung der Laserstrahlung	21
2.3 Absorption und Reflexion der Laserstrahlung.....	23
2.3.1 Absorption	23
2.3.2 Gesamtabsorption der Kapillare durch Mehrfachreflexion.....	25
2.3.3 Reflektierte Laserleistung	27
3 Stand der Technik: Indikatoren der In-Prozess-Überwachung.....	29
3.1 Metaldampf und laserinduziertes Plasma	29
3.1.1 Optische Emissionen	30
3.1.2 Akustische Emissionen.....	30
3.1.3 Dielektrizität	31
3.2 Kapillare, Schmelzbad und Schweißnaht.....	31
3.2.1 Optische Emissionen	31
3.2.2 Reflektivität	31
3.2.3 Akustische Emissionen.....	31
3.2.4 Permeabilität	32
3.3 Zusammenfassung zum Stand der Technik	32
4 Theoretische Grundlagen des methodischen Ansatzes	34
4.1 Ansatz.....	34
4.2 Geometrie der Dampfkapillare.....	34

4.2.1	Idealisierte Dampfkapillare	35
4.2.2	Kapillardynamik	38
4.2.3	Prozessporenformation	39
4.2.4	Schmelzauswurf.....	40
4.3	Simulationsrechnung.....	41
4.3.1	Netzdarstellung der Kapillaren	41
4.3.2	Darstellung des Laserstrahls	43
4.3.3	Strahlpropagation in der Kapillare.....	44
4.3.4	Darstellung der reflektierten Laserleistung	45
4.4	Ergebnisse der Simulationsrechnung	45
4.4.1	Störungsfrei ausgebildete Kapillare.....	45
4.4.2	Auswirkungen der Kapillardynamik	49
4.4.3	Prozessporenformation	51
4.4.4	Schmelzauswurf.....	53
4.5	Zusammenfassung der theoretischen Grundlagen	54
5	Visualisierung der Dampfkapillare	56
5.1	Einleitung	56
5.2	Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahmen	56
5.2.1	Versuchsaufbau Hochgeschwindigkeits-Kamera	56
5.2.2	Durchmesser der Kapillaröffnung	57
5.2.3	Prozessdynamik	59
5.2.4	Schmelzauswurf.....	60
5.3	Online Röntgendurchstrahlung	61
5.3.1	Versuchsaufbau Röntgendurchstrahlung	61
5.3.2	Ungestört ausgebildete Kapillare und Einfluss der Prozessparameter ...	63
5.3.3	Oszillation der Dampfkapillare im Werkstoff.....	66
5.3.4	Formation einer Prozesspore	68
5.3.5	Verlauf einer Schmelzbadhebung.....	70
5.3.6	Entstehung eines Schmelzauswurf	71
5.3.7	Quantifizierung der Phänomene nach deren Schachtverhältnis	72
5.4	Zusammenfassung zur Visualisierung	74
6	Experimentelle Verifizierung des Ansatzes	75
6.1	Reflektierte Laserleistung beim Schweißen mit Nd:YAG-Laser	75
6.1.1	Messaufbau	75
6.1.2	Methodik des Auswertens.....	77
6.1.3	Einfluss des Werkstoffs	78

6.1.4	Einfluss der Prozessparameter	81
6.1.4.1	Laserleistung	81
6.1.4.2	Vorschubgeschwindigkeit	82
6.1.4.3	Relative Fokuslage	84
6.1.4.4	Ein- und Durchschweißung	85
6.1.5	Vergleich der Parametereinflüsse	86
6.1.6	Nahtdefekte	87
6.1.6.1	Prozessporen	87
6.1.6.2	Schmelzbadhebung und Auswurf	90
6.2	Reflektierte Laserleistung beim Schweißen mit CO ₂ -Laser	93
6.2.1	Messaufbau	93
6.2.2	Einfluss der Prozessparameter	95
6.2.2.1	Laserleistung	95
6.2.2.2	Vorschubgeschwindigkeit	96
6.2.2.3	Fokuslage	96
6.2.3	Qualitätsrelevante Merkmale	97
6.3	Zusammenfassung zur experimentellen Evaluierung	98
7	Mehrdetektorensystem zur In-Prozess-Überwachung.....	100
7.1	Teilaspekte eines Mehrdetektorensystems	100
7.1.1	Anforderungen an die Funktionalität	100
7.1.2	Lösungsmatrix: Merkmal - Indikator - Messverfahren	101
7.1.3	Konstruktive Umsetzung der Teilaspekte	103
7.2	Realisierung des Mehrdetektorensystems	103
7.3	Evaluierung des Mehrdetektorensystems	106
7.3.1	Variation der Einschweißtiefe	106
7.3.2	Detektion von Schmelzauswürfen	108
7.3.3	Detektion von Anbindefehler	110
7.4	Zusammenfassung zum Mehrdetektorensystem	112
8	Zusammenfassung.....	113
9	Literaturverzeichnis.....	116

1 Einführung

1.1 Ausgangssituation

Das Strahlwerkzeug Laser zeichnet sich vor allem durch die hochpräzise, berührungslose Einbringung seiner Energie aus, die sowohl hohe Prozessgeschwindigkeiten als auch hohe Bearbeitungsqualität erlaubt. Gerade diesen Vorzügen muss in einer industriellen Anwendung Rechnung getragen werden, denn die Investitionskosten sind im Vergleich zu konventionellen Werkzeugen hoch. Hieraus lässt sich bereits ein charakteristisches Einsatzgebiet des Laserstrahlschweißens, die hochautomatisierte Serienfertigung, ableiten. Diese wiederum geht einher mit der Forderung nach einer ebenso automatisierten Qualitätssicherung, deren Kern in der Praxis durch eine zuverlässige Überwachung des Prozesses gebildet wird.

Betrachtet man die Entwicklung des Qualitätsmanagements, so lässt sich gerade in den letzten Jahren eine stetige Verbesserung erkennen. Am Beginn der industriellen Produktion von Wirtschaftsgütern wurde keine Qualität „produziert“, sondern am Ende des Produktionsprozesses durch Auslese von Ausschuss erzeugt. Dieses Prinzip wirkt jedoch erst, wenn ein Schaden bereits entstanden ist, die Wirtschaftlichkeit des Produktionsprozesses sinkt dadurch erheblich.

Durch Einführung statistischer Methoden, z. B. Stichprobenprüfungen in Zusammenhang mit Qualitätsregelkarten, werden Schwankungen von Qualitätsmerkmalen erkennbar, die durch zyklische Veränderungen (z. B. durch Bedienerinfluss) oder Drift des Merkmals (z. B. durch Werkzeugverschleiß) begründet sind. Kontrollierte Gegenmaßnahmen führen zu Qualitätsverbesserungen, so z.B. die Verbesserung von Produktionsbedingungen (Bedienung und Benutzung) oder das Implementieren von Regelkreisen (Werkzeugwechsel). Die Produktion von Ausschuss kann dadurch erheblich eingedämmt werden.

Stochastisch verteilte Produktionsfehler jedoch sind durch Stichprobenprüfungen nicht erfassbar. Aus diesem Grund besteht z.B. bei sicherheitsrelevanten Bauteilen die Pflicht einer 100%-Überprüfung der Qualitätsmerkmale und vollständigen Dokumentation. Derartige Maßnahmen sind Bestandteil von Qualitätssicherungssystemen nach DIN/ISO 9000 ff.

Die Wirtschaftlichkeit eines solchen Qualitätsüberwachungssystem zahlt sich insbesondere durch eine möglichst frühzeitige Fehlererkennung aus. An einem Produkt werden durchschnittlich 80 % der Fehler erst in der Phase der Prüfung und des Einsatzes behoben. Die Kosten der Fehlerbehebung entwickeln sich über der Zeitschiene

von der Fertigung bis zur Auslieferung jedoch exponentiell. Die hohen Stückzahlen einer automatisierten Serienfertigung liefern dazu den entsprechenden Kostenfaktor.

Vor diesem Hintergrund lässt sich die Bedeutung der Bereitstellung von Methoden zur Fehlerüberwachung ableiten. Werden in der Entwicklungsphase potenzielle Fehlerquellen aufgedeckt und diese durch Implementierung entsprechender Überwachungsmaßnahmen abgesichert, können die Produktionszeiten verkürzt und Kosten minimiert werden.

1.2 Zielsetzung

Die Prozesssicherung beim Laserstrahlschweißen basiert meist auf statistischen Methoden mit zerstörender Werkstoffprüfung, da derzeit bestehende In-Prozess-Überwachungssysteme in vielen Applikationen keine ausreichende Aussagekraft bzw. Zuverlässigkeit bieten. Dies gilt umso mehr, wenn verborgene Merkmale wie innere Nahtfehler oder die Einschweißtiefe dokumentiert werden müssen. Es besteht daher der Bedarf, aussagekräftige, während des Schweißprozesses zu messende Indikatoren zu erarbeiten, die eine zuverlässige Online-Beurteilung der Schweißnahtqualität zulassen.

Das Laserstrahliefschweißen bietet im Vergleich zu konventionellen Schweißverfahren zusätzliche Ansätze zur Prozessüberwachung. Das in dieser Arbeit behandelte Verfahren basiert auf einem Zusammenhang zwischen Einkoppelgrad der Laserstrahlung und Schachtverhältnis (Tiefe / Durchmesser) der Dampfkapillare. Dies bietet die Möglichkeit, Informationen hinsichtlich der Nahtqualität aus der Tiefe des bearbeiteten Werkstoffvolumens zu erhalten. Die durch Laserstrahlung erzeugte Dampfkapillare, die das Tiefschweißen ermöglicht, wird dabei als prägender Informationskanal für die aus der Kapillare rückreflektierte Laserstrahlleistung verwendet [1].

Ziel dieser Arbeit ist, den Indikator „Reflektierte Laserleistung“ in seiner Aussagekraft und seiner Zuverlässigkeit zu charakterisieren. Genaue Kenntnisse der Zusammenhänge zwischen Nahtigenschaften, Kapillargeometrie und reflektierter Laserleistung sind notwendig, um die Messmethode in rekursiven Schritten zu verbessern. Schließlich sollen die ausgearbeiteten Messprinzipien - und sofern notwendig, auch ergänzende Methoden - zu einem industriell einsetzbaren Prototypen zusammengeführt und evaluiert werden.

1.3 Gliederung der Arbeit

Hinsichtlich des Aufbaus eines aussagekräftigen und zuverlässigen Prozessüberwachungssystems für das Laserstrahlschweißen werden bestehende Systeme und wissenschaftliche Arbeiten recherchiert und deren physikalische Ansätze in Kapitel 3 grundlegend diskutiert.

Der völlig neuartige Ansatz der Rückreflexmessung wird in den nachfolgenden Kapiteln 4 bis 6 vorgestellt. In einem ersten, theoretischen Teil wird eine Simulationsrechnung entwickelt, um zu einer mathematischen Beschreibung des Zusammenhangs zwischen reflektierter Laserleistung und Geometrie der Dampfkapillare zu gelangen. Dabei werden auch Geometrien betrachtet, die für die Formation von Prozesssporen und Schmelzauswürfen typisch sind. Das Ergebnis dieser Simulationsrechnung ist die räumliche Leistungsdichteverteilung der reflektierten Laserstrahlung. Diese dient dazu, bevorzugte Detektorpositionen zu finden und die Grenzen der Funktionsfähigkeit des Systems abzuschätzen.

In einem zweiten, experimentellen Teil werden Messwerte der reflektierten Laserleistung mit den entsprechenden Kapillargeometrien korreliert. Zur Visualisierung der Kapillare werden in Kapitel 5 zwei diagnostische Methoden eingesetzt: Hochgeschwindigkeitsaufnahmen und Röntgendurchstrahlung der Wechselwirkungszone. Typische Phänomene des Laserschweißprozesses können anhand der Aufnahmen charakterisiert werden. Die zeitsynchrone Aufzeichnung der reflektierten Laserleistung und der ablaufenden Vorgänge in der Kapillaren gibt die Zusammenhänge zwischen Messsignal und Ereignis wieder. Diese werden in Kapitel 6 differenziert nach den Prozessparametern diskutiert. Unterschiedliche Messaufbauten tragen den Resultaten der vorhergehenden Simulation Rechnung und erfahren dabei eine rekursive Optimierung.

Die erarbeiteten Konzepte zur Messtechnik werden abschließend in einem dritten Teil zu einem industrietauglichen, integrierten Detektor vereint und mit flankierenden Verfahren ergänzt. Industrielle Anforderungen, insbesondere Funktionalität, Robustheit und Integrationsgrad führen dabei den Entwicklungsprozess. Eine experimentelle Evaluierung zeigt abschließend die Funktionalität des Gesamtsystems.

2 Grundlagen

Das Funktionsprinzip des hier vorgestellten Verfahrens zur Prozessüberwachung des Laserstrahlschweißens wird grundlegend durch die Ausbreitung der Laserstrahlung und deren Absorption beschrieben. Der Prozess des Laserstrahlschweißens ist dabei das Resultat aus der Wechselwirkung des propagierenden Strahls mit dem Werkstück durch die Absorptionsmechanismen.

2.1 Laserstrahlschweißen

Der Laserstrahl trifft auf die Werkstückoberfläche und wird dort gemäß der Fresnelabsorption teilweise absorbiert. Der absorbierte Anteil der Energie breitet sich im Werkstück in Form von Wärme aus. Ist die Intensität der Laserstrahlung groß genug, kann die Wärme gemäß dem naturgegebenen Wärmeleitkoeffizienten des bearbeiteten Materials nicht mehr in dem Maße abgeführt werden, wie sie freigesetzt wird. An der Werkstückoberfläche setzt Schmelzen und schließlich Verdampfen des Materials ein. Der abströmende Materialdampf verdrängt durch seinen Rückstoß die umgebende Schmelze und es entsteht ein Kanal, der als Dampfkapillare bezeichnet wird. Dessen Durchmesser ist in erster Näherung vergleichbar dem des Laserstrahls im Fokuspunkt.

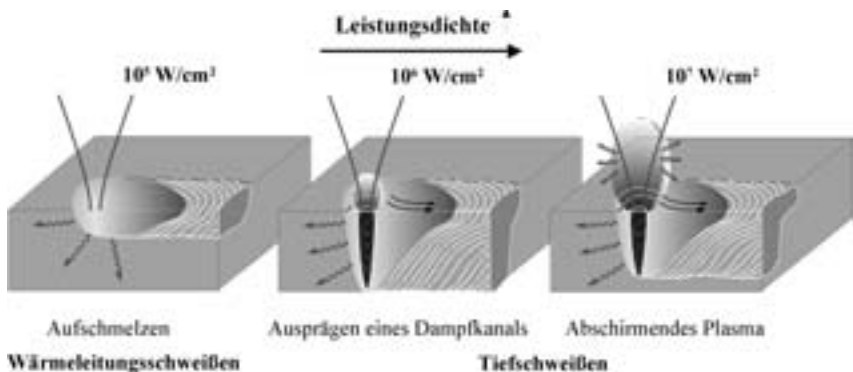


Bild 1: Wechselwirkungsprozesse beim Wärmeleitungs- und Tiefschweißen mit CO_2 -Laserstrahlung.

In dieser Dampfkapillare entsteht durch vielfache Reflexion an den Kapillarwänden eine erhöhte „integrale“ Absorption der Laserstrahlung. Man spricht nicht mehr von einem Absorptionsgrad, wie bei der Fresnelabsorption für einmaliges Auftreffen des Laserstrahls auf der Werkstückoberfläche, sondern vom Einkoppelgrad.