

# **Effiziente Lösung des inversen Problems beim Laserstrahlschweißen durch Simulation und Experiment**

Von Dr.-Ing. Armin Strauch  
Universität Stuttgart



Herbert Utz Verlag · München

D93

Als Dissertation genehmigt von der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Stuttgart

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Hügel  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Bernd Bertsche

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. 2004

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 2004

ISBN 3-8316-0425-8

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

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

# Inhalt

<b>Kurzfassung</b>	<b>5</b>
<b>Inhalt</b>	<b>7</b>
<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>11</b>
<b>Extended Abstract</b>	<b>17</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>21</b>
1.1 Problemstellung – inverse Fragestellung . . . . .	21
1.2 Phänomenologie des Laserstrahlschweißens . . . . .	23
1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit . . . . .	27
<b>2 Stand von Forschung und Technik</b>	<b>28</b>
2.1 Einleitung zu Stand von Forschung und Technik . . . . .	28
2.2 Methoden zur Lösung inverser Fragestellungen . . . . .	28
2.3 Elemente zur Lösung inverser Fragestellungen . . . . .	31
2.3.1 Einführung . . . . .	31
2.3.2 Prozessbeschreibende Formeln . . . . .	31
2.3.3 Prozessmodelle . . . . .	32
2.3.4 Versuch . . . . .	33
2.3.5 Datenbanken . . . . .	34
2.3.6 Optimierung . . . . .	34
2.3.7 Fuzzy-Technologie . . . . .	35
<b>3 Lösungskonzept</b>	<b>37</b>
3.1 Struktur - orientiert am intuitiv handelnden Experten . . . . .	37
3.2 Datenbank . . . . .	42
3.2.1 Aufgaben und Organisation . . . . .	42
3.2.2 Bewertung von Prozessergebnisgrößen . . . . .	43
3.2.3 Bewertung von Präferenzen . . . . .	44
3.2.4 Ähnlichkeit . . . . .	45
3.2.5 Auswahl von Startwerten . . . . .	46

3.3	Simulation und Versuch . . . . .	48
3.4	Regelkreis . . . . .	49
<b>4</b>	<b>Regelungskonzepte</b>	<b>52</b>
4.1	Systematische Vorgehensweise . . . . .	52
4.2	Wissensbasis – Prozessfunktion . . . . .	53
4.3	Modellierung einer Prozessfunktion . . . . .	55
4.4	Wissensbaustein – Welches Wissen ist einsetzbar? . . . . .	59
4.5	Konzept unter Anwendung von Expertenregeln . . . . .	60
4.5.1	Behandlung von Fuzzy-Regeln . . . . .	60
4.5.2	Adaptive Fuzzy-Regeln . . . . .	67
4.6	Konzept unter Anwendung von Kurven . . . . .	69
4.6.1	Behandlung von Kurven . . . . .	69
4.6.2	Optimierung . . . . .	80
4.6.2.1	Situationsanalyse . . . . .	80
4.6.2.2	Zielfunktion . . . . .	83
4.6.2.3	Serielltes Optimierungsverfahren – Serielles Nachstellen . . . . .	84
4.6.2.4	Paralleles Optimierungsverfahren – Paralleles Nachstellen . . . . .	86
4.6.3	Formeln zur Kurvengenerierung . . . . .	87
4.6.3.1	Relevante Formeln für das Laserstrahliefschweißen . . . . .	87
4.6.3.2	Grafische Zusammenhänge . . . . .	93
4.6.3.3	Experimentell abgegliche Formeln . . . . .	96
4.6.4	Regressionskurve mit vorgegebenen Funktionstypen zur Kennliniengenerierung . . . . .	98
4.6.4.1	Nicht-lineare Regression . . . . .	98
4.6.4.2	Ähnlichkeitsfunktion . . . . .	98
4.6.4.3	Robuste, nicht-lineare Datenregression . . . . .	102
4.6.5	Automatische Kurvengenerierung . . . . .	104
4.6.5.1	Abschnittsweise Regression . . . . .	104
4.6.5.2	Spline-Approximation . . . . .	110
4.7	Konzept mit nicht-linearem Gleichungssystem . . . . .	114
4.7.1	Herleitung eines Verhaltensmodells . . . . .	114
4.7.2	Prozessfunktion als direktes Modell . . . . .	118
4.7.3	Bildung der Umkehrfunktion . . . . .	123
<b>5</b>	<b>Anwendung</b>	<b>128</b>
5.1	Kapiteleinleitung . . . . .	128

---

5.2	Benutzeroberfläche . . . . .	129
5.3	Nutzung der einparametrischen Kurven . . . . .	135
5.4	Anwendung der Kurven-Regler . . . . .	139
5.5	Adaptiver Fuzzy-Regler . . . . .	144
5.6	Regler mit nicht-linearem Gleichungssystem . . . . .	148
5.7	Kapitelzusammenfassung . . . . .	149
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>153</b>
	<b>Anhang: Benutzeroberfläche</b>	<b>157</b>
	<b>Literatur- und Quellenverzeichnis</b>	<b>162</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung – inverse Fragestellung

Die Lasermaterialbearbeitung gehört heute zu den modernsten Technologien in der Fertigungstechnik, nachdem Anfang der 60er Jahre der erste Laborlaser realisiert werden konnte. Sie ist aufgrund vieler Vorteile und neuer Bearbeitungsmöglichkeiten trotz der hohen Kosten, die mit Beschaffung und Betrieb einer Laseranlage verbunden sind, aus den Produktionsstätten nicht mehr wegzudenken.

Begleitend zum Fortschritt in der Entwicklung von Strahlquellen mit höheren Leistungen und verbesserten Eigenschaften stieg der Anwendungsbedarf an Lasertechnik. Vielfältige Bearbeitungsanlagen und -verfahren wurden geschaffen und ständig verbessert. Aufgrund ihres hohen Innovationspotenzials hat sich die Lasermaterialbearbeitung inzwischen eine hohe Akzeptanz in sehr vielen Anwendungsbereichen erobert. Vor diesem Hintergrund gelang es dem Strahlwerkzeug Laser, sich beim Trennen, Bohren, Abtragen, Beschichten, Härten und Fügen in der industriellen Serienproduktion zu etablieren.

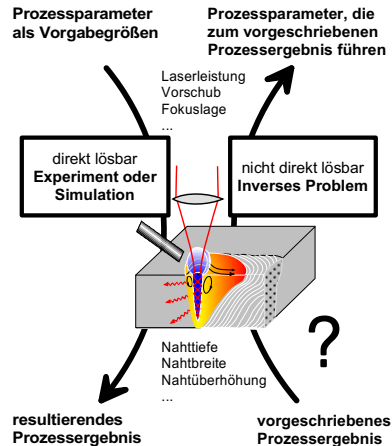
Das Laserstrahlschweißen zeichnet sich durch große Einschweißiefen bei gleichzeitig geringen Nahtbreiten aus, so dass sehr schlanke Verbindungsquerschnitte realisierbar sind. Diese Fügetechnik weckt das Interesse auch mittlerer und kleinerer Unternehmen durch ihre vergleichbar einfache Handhabung, gute Automatisierbarkeit, Kombinierbarkeit mit anderen Verfahren und großer Flexibilität insbesondere bei kleinen Stückzahlen. Insgesamt lässt sich das Laserstrahlschweißen in weiten Grenzen den Erfordernissen der gewünschten Verbindung und der Prozessführung anpassen. Neben einer im Vergleich zu konventionellen Schweißtechniken sehr viel höheren Schweißgeschwindigkeit und geringeren Bauteilbelastung bietet es noch technologische Vorzüge. Beispielsweise ist es möglich, Legierungen zu verbinden, die bisher mit herkömmlichen Verfahren als nicht schweißbar galten, und auch die gute (einseitige) Zugänglichkeit ist hier zu nennen.

Damit das Potenzial des Laserstrahlschweißens ausgeschöpft werden kann, bedarf es eines fundierten Prozessverständnisses sowie umfangreicher Erfahrung im Umgang mit der Lasertechnik. Grund dafür ist die Vielzahl der vorzugebenden Prozessstellgrößen. Für jeden Anwendungsfall einer Schweißung muss eine große Zahl von Stellgrößen

gefunden werden. Die Vielzahl und Komplexität der beteiligten Wechselwirkungsmechanismen (Vielfachparameterproblem) sind Ursache dafür, dass die technologisch interessierende Fragestellung, welche Prozessstellgrößen für ein gewünschtes Bearbeitungsergebnis erforderlich sind, nicht einfach zu beantworten ist.

Funktion und konstruktive Gestaltung eines Bauteils legen die Anforderungen an die Schweißnaht fest und bestimmen auf diese Weise das geforderte Bearbeitungsergebnis. Um den Festigkeitsbedingungen gerecht zu werden, ist der notwendige Anbindequerschnitt sicherzustellen. Je nach Stoßart und Nahtform stehen dabei die Einschweißtiefe und/oder Nahtbreite am Fügequerschnitt im Vordergrund. Zugleich sind je nach Bauteilfunktion immer Qualitätsansprüche zu erfüllen. Sie richten sich nach der Weiterverarbeitung, dem Belastungsfall, konstruktiven Gegebenheiten und auch nach ästhetischen Gesichtspunkten, wenn es sich um eine Sichtnaht handelt. Daran werden z.B. Nahtüberhöhung, Kerbradius, Poren und Spritzer beurteilt. Damit diese und andere Nahtmerkmale anforderungsgerecht umsetzbar sind, müssen jene geeigneten Prozessgrößen mit wenig Aufwand gefunden und an der Schweißanlage und deren Peripherie eingestellt werden, die schnell und wirtschaftlich das geforderte Resultat liefern.

Der Schweißprozess selbst als auch bisher entwickelte Prozessmodelle für Simulationsrechnungen eignen sich nur, die direkte Aufgabe zu lösen, Bild 1.1, d.h. es entsteht nach Vorgabe von Prozessstellgrößen wie Laserleistung oder Vorschub ein Prozessergebnis anhand einer konkreten Naht. Der umgekehrte Weg, von einem konkreten Bearbeitungsergebnis direkt auf die dafür benötigten Prozessgrößen zu schließen, gelingt mit bisherigen Prozessmodellen nicht: der simulierte Versuch müsste dafür gewissermaßen rückwärts ausführbar sein. Diese methodische Umkehrung definiert das inverse Problem, nämlich die Aufgabe, für ein Prozessfenster, das durch Toleranzen der Ergebnisgrößen aufgespannt wird, geeignete Prozesseingangsgrößen zu finden. Dies ist für das Laserschweißen nicht unmittelbar lösbar, Bild 1.1.



**Bild 1.1:** Das inverse Problem, von einem vorgegebenen Prozessergebnis auf die notwendigen Prozessparameter zu schließen, ist nicht direkt lösbar.

Unter wiederholter Anwendung der direkten Methode, Experiment oder Simulation mittels Prozessmodell, stehen allerdings zwei Lösungswege zur Verfügung: Einerseits gibt es die Vorgehensweise eines Experten, der intuitiv aufgrund seines reichen Erfahrungsschatzes iterativ von Versuch zu Versuch die Stellgrößen geschickt verbessert und damit das Ziel erreicht. Andererseits wird ein Anfänger, mit mehr oder minder systematischen Versuchsreihen das Feld erforderlicher Prozessparameter ermitteln, um daraus einen günstigen Parametersatz auszuwählen; das entspricht dem Prinzip Versuch und Irrtum. Die Anzahl auszuführender Versuche steigt dabei schnell mit der Zahl festzulegender Prozessparameter an.

Erfahrung und Systematik bilden hier einen Gegensatz: Die Systematik benötigt viele Versuche, ist entsprechend zeit- und materialintensiv. Folglich verursacht sie hohe Kosten. Andererseits ist die Expertenerfahrung meist schon in allgemeiner Form vorhanden. Sie müsste nur noch auf den konkreten Fall angewendet werden. Aufgrund der zahlreichen komplexen Zusammenhänge fällt es jedoch selbst dem Experten schwer, den Überblick zu behalten.

Im Sinne zu verkürzender Einrichtzeiten ist es somit notwendig, beim Erwerb einer Anlage auch das notwendige Fachwissen beizusteuern. Der Nutzen ist dann um so größer, je mehr Fachwissen verfügbar ist. Wenn es gelingt, dieses Wissen – z.T. auch firmenspezifisches – zu fassen und mit einer neuen Methode gezielt bereitzustellen, dann bestehen weitere Chancen darin, das Vorgehen auch auf andere Verfahren und technischen Probleme zu übertragen. Über den werkstattnahen Einsatz hinaus wäre eine solche Methode auch in der Konstruktion als Hilfsmittel einsetzbar. Dort könnten sie dann zu Machbarkeitsstudien und schnellen Abschätzungen bei der Auslegung von Konstruktionen dienen. Entwürfe wären auf diesem Weg rasch und effizient änderbar und könnten so auch besser auf die verfügbaren Fertigungsmöglichkeiten abgestimmt werden. Ebenso wäre denkbar, Prozesszeiten und -aufwand genauer abschätzen zu können und so Herstellkosten voraus präziser kalkulierbar zu machen. Insgesamt also würde die Verfügbarkeit einer Methode zur Lösung des inversen Problems einen erheblichen Beitrag zur Wirtschaftlichkeitssteigerung laserbasierter Fertigungsprozesse beitragen.

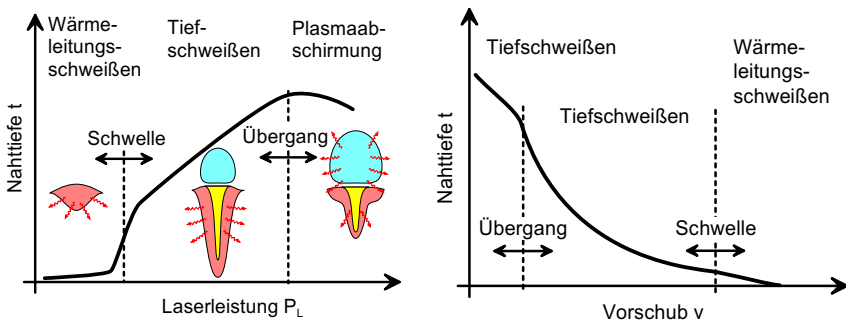
## 1.2 Phänomenologie des Laserstrahlschweißens

Anhand der Phänomene des Lasertiefschweißens soll die Situation beleuchtet werden, mit der ein Spezialist bei der Lösung einer Fügeaufgabe konfrontiert wird. Zunächst betrachtet man die verfügbare Laserschweißanlage von der Strahlquelle über die Strahl-



führung bis zur -formung, die Handhabung von Werkstück und Zusatzstoffen, die Bauteilgeometrie sowie die beteiligten Fügwerkstoffe. Das lässt die Vielzahl der beteiligten Prozessgrößen erahnen, die in einem solchen interdisziplinären Zusammenspiel unterschiedlicher, verketteter technisch-physikalischer Effekte auftreten. Dazu zählen beispielsweise Ausbreitung und Absorption elektromagnetischer Wellen, Wärmeleitung, Konvektion sowie Verdampfung und Plasmabildung. Hinzu kommt, dass der Prozess teilweise sensibel auf veränderte Prozessparameter reagiert und damit störanfällig ist.

Der hohe Grad an Komplexität eines solchen Fertigungsprozesses verdeutlicht, dass ein bekannter, beherrschter Schweißprozess praktisch immer anders ist als ein neuer hinsichtlich Werkstoff, Geometrie und auch des Anlagenzustands selbst. Der Anwender wird damit konfrontiert, dass zur Auffindung der gesuchten Maschineneinstellparameter viele Versuche notwendig sind. Dabei ist es unwahrscheinlich, dass die aktuell gestellte Aufgabe bereits in seiner individuellen Dokumentation aufgelistet ist. Eine solche Versuchsdatensammlung bleibt somit immer lückenhaft, liefert aber oft schon ähnliche, für einen Startparametersatz günstige Werte. Um den Prozess jetzt richtig zu korrigieren, damit er sich dem vorgegebenen Ziel nähert, ist der Experte auf seine Erfahrung über die einzelnen Schweißphänomene angewiesen. Er kennt deren gegenseitigen Abhängigkeiten qualitativ oder sogar mehr oder weniger quantitativ. Was der Spezialist intuitiv vollzieht, beruht auf zahlreichen Messungen, die anhand von Kurven darstellbar sind.



**Bild 1.2:** Grundlegende Zusammenhänge beim Laserstrahlschweißen mit unscharfen Übergängen zwischen einzelnen funktionellen Abhängigkeiten: Nahttiefe über der Laserleistung sowie Nahttiefe über dem Vorschub, qualitative Abhängigkeiten nach [1, 2, 3].

Am Beispiel der Nahttiefe  $t$ , die im Wesentlichen durch eine bestimmte Laserleistung  $P_L$  und Vorschubgeschwindigkeit  $v$  des Laserstrahls gezielt erreicht werden kann, wird die Phänomenologie des Laserstrahlschweißens umrissen, Bild 1.2 [1, 2, 3]. Zur Ableitung von Korrekturmaßnahmen, die die Nahttiefe steuern, ist es von Bedeutung, zu wissen

oder abzuschätzen, in welchem Abschnitt der Kennlinie sich der Prozess befindet. Ganz links im Bild mit  $t = f(P_L)$  wirkt der Laserstrahl nur als Oberflächenwärmequelle mit flachem Schmelzbad und geringer Einschweißtiefe (Wärmeleitungsschweißen). Ab einem bestimmten Verhältnis von Laserleistung zu Brennfleckausdehnung auf dem Werkstück steigt die eingekoppelte Laserleistung und damit die Einschweißtiefe sprunghaft an. Ausgelöst wird dieser Vorgang durch Verdampfungsvorgänge an der Schmelzbadoberfläche. Im Schmelzbad bildet sich eine Kapillare aus, die durch die Vorschubbewegung wie eine Röhre durch das umgebende, flüssige Metall gezogen wird (Tiefschweißen). Der auf die Kapillarwand wirkende Metaldampfstrom wirkt dabei den hydrostatischen Kräften sowie Kräften aus Oberflächenspannungen entgegen. Dadurch bleibt die Kapillare geöffnet, so dass sie von der Schmelze umströmt werden muss. Dieser Strömung überlagert sich die Marangonikonvektion, die aufgrund von Oberflächenspannungsgradienten entsteht. Zudem bewirkt der Metaldampfstrom aus der Kapillare eine zusätzliche Beschleunigung der sie umgebenden Schmelze.

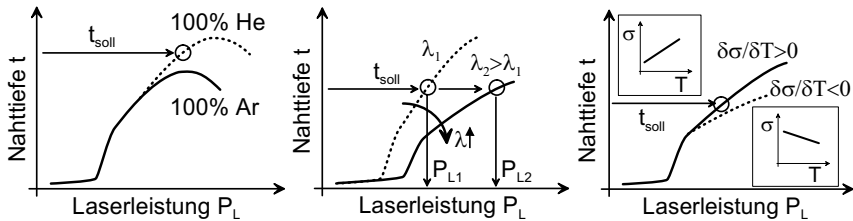
Im Tiefschweißbereich entstehen schlanke, tiefe Nähte. Schweißtiefe und Laserleistung skalieren näherungsweise linear, so dass sich zusammen mit Vorschub und Nahtbreite nach dem hyperbolischen Gesetz

$$b \cdot v \sim \frac{P_L}{t} \quad (1.1)$$

eine quantitative Prozessabschätzung vornehmen lässt. Bei weiterer Steigerung der Leistungsdichte schließt sich der Bereich der Plasmaabschirmung an. Hier wird der aus der Kapillare ausströmende Metaldampf zunehmend ionisiert, so dass ein immer größer werdender Anteil des Laserstrahls absorbiert und gebrochen wird. Die entstandene Plasmawolke strahlt einen Teil der Energie auf die Nahtoberfläche ab. Zusammen mit einer möglichen Defokussierung kann eine breitere Naht erzeugt werden, gleichzeitig nimmt die Tiefe jedoch ab; eine Erhöhung der Leistung ist nicht mehr sinnvoll, ohne das Schutzgas anzupassen.

Der Experte ist sich der physikalischen – und damit der funktionellen – Dreiteilung dieser Kurve bewusst und kann zur Korrektur der aktuellen Schweißnaht entsprechende Maßnahmen ergreifen. Dazu gehört auch, gegebenenfalls alternative Parameter in Betracht zu ziehen. Sollte die maximale Strahlleistung erreicht sein, lässt sich eine tiefere Naht auch mit geringerem Vorschub erzielen, Bild 1.2. Beschränkt die Plasmaabschirmung die gewünschte Tiefe, so kann der Helium-Anteil im Schutzgas erhöht werden, alternativ oder zusätzlich aber auch der Gasvolumenstrom, sofern damit die Schmelze nicht weggeblasen wird, Bild 1.3.

Auch wenn die prinzipielle Gültigkeit der Kennlinien in Bild 1.2 erhalten bleibt, so sieht



**Bild 1.3:** Schematischer Verlauf der Kennlinie  $t = f(P_L)$  abhängig vom Schutzgas [1], der werkstoffspezifischen Wärmeleitung [4] und in Folge des temperaturabhängigen Oberflächenspannungsgradienten [5] aufgrund von Veränderungen der elementaren Legierungskonzentration.

deren absoluter Verlauf je nach Schutzgas und Legierung und den damit veränderten Werkstoffkennwerten anders aus. Bei steigender Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  setzt der Tieferschweißeffekt erst bei höheren Leistungen  $P_L$  ein und der lineare Kennlinienabschnitt verläuft flacher. Für die gleiche Einschweißtiefe  $t$  wird eine deutlich höhere Leistung notwendig, Bild 1.3. Gleichermäßen bewirkt eine Legierungszusammensetzung Veränderungen. Obwohl deren Element-Konzentration insbesondere von Schwefel, Sauerstoff und Phosphor noch innerhalb der herstellertolerierten Werte einer Werkstoffcharge liegt, kann sich das Strömungsfeld im Schmelzbad völlig anders ausprägen [5]. Damit ändert sich die Wärmeverteilung, was zu anderen, gelegentlich überraschenden Schweißnahtabmessungen führen kann, Bild 1.3.

Die Darstellung der erwähnten Schwellen, Grenzen, Sensitivität, alternativen Handlungsmöglichkeiten und daraus zu akzeptierenden Konsequenzen verdeutlicht die komplexen, insbesondere für den unerfahrenen Anwender schwer überschaubaren Zusammenhänge beim Laserstrahlschweißen. Es wird deutlich, dass nicht nur der Kennlinienverlauf an sich mit einem hohen Maß an Unschärfe verbunden ist, Bild 1.3, sondern auch die Lage und Ausdehnung der Bereichsübergänge unscharf zu bewerten ist, Bild 1.2. Konkrete Vorhersagen werden auch deshalb erschwert, weil in jedem Bereich andere physikalisch funktionelle Gesetzmäßigkeiten wesentlich sind.

Aus den wenigen benannten Teilaspekten und den innovativen Chancen bei der Lösung inverser Aufgaben ist ersichtlich, dass die Lösung inverser Fragestellungen technologisch von größerer Bedeutung ist, als allein die Machbarkeit und sichere Reproduktion komplexer Prozesse sicher zu stellen. Die Begründung für die Schwierigkeiten liegt darin, dass die Umkehrung des Experiments – vom Versuchsergebnis auf die Vorgabewerte des Prozesses zu schließen – auf einfachem Weg ohne umfangreiches Prozessverständnis praktisch nicht möglich ist.