

Forschungsberichte

iwb

Band 158

Bernhard Lenz

***Finite Elemente-Modellierung des
Laserstrahlschweißens für den
Einsatz in der Fertigungsplanung***

***herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart***

Herbert Utz Verlag

UTZ

Forschungsberichte iwfb

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
Technische Universität München
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwfb)

<p>Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme Ein Titeldatensatz für diese Publikation ist bei Der Deutschen Bibliothek erhältlich</p>

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2001

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 2001

ISBN 3-8316-0094-5

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089/277791-00 · Fax: 089/277791-01

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Motivation.....	1
1.2	Zielsetzung.....	3
1.3	Vorgehensweise	4
2	Planung von Laserstrahlschweißprozessen.....	7
2.1	Physikalische Vorgänge beim Laserstrahl­tiefschweißen.....	7
2.1.1	Physik der Energieeinkopplung.....	7
2.1.2	Thermomechanische Wechselwirkungen	11
2.2	Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens.....	19
2.2.1	Grundlagen der Produktentstehung	19
2.2.2	Begriffsdefinition und Abgrenzung	20
2.2.3	Planung von Schweißprozessen.....	22
2.2.4	Anforderungen des Laserstrahlschweißens an die Fertigung	24
2.3	Simulationseinsatz für das Laserstrahlschweißen	28
2.3.1	Simulation im Produktentstehungsprozess	28
2.3.2	Simulationseinsatz in der Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens.....	30
2.3.3	Simulation von Schweißprozessen	32
3	Defizite und Anforderungen.....	39
3.1	Anforderungen an ein Prozessmodell für den Einsatz in der Produktionstechnik	39
3.2	Bewertung des Standes der Technik	41
3.3	Anforderungen der Fertigungsplanung an die Simulation des Laserstrahlschweißens	42

4	Simulationsunterstützte Fertigungsplanung von Laserstrahlschweißprozessen	45
4.1	Vorausentwicklung und Produktplanung	45
4.2	Konstruktion	46
4.3	Arbeitsvorbereitung	47
4.4	Fertigung und Montage	50
4.5	Zusammenfassung der relevanten Fragestellungen	50
5	Modellierungskonzept für das Laserstrahlschweißen	53
5.1	Allgemeine Vorgehensweise	53
5.2	Thermomechanische Modellierung	55
5.2.1	Erstellung des Finite Elemente-Netzes	56
5.2.2	Werkstoff	64
5.2.3	Allgemeine Bemerkungen zu den Randbedingungen..	68
5.2.4	Der Laser als thermische Randbedingung	69
5.2.5	Sonstige thermische Randbedingungen	79
5.2.6	Mechanische Randbedingungen	81
5.2.7	Maßnahmen zur Reduzierung der Rechenzeit	89
5.3	Mechanische Modellierung	96
5.4	Modellvalidierung	101
6	Anwendungsbeispiel	105
6.1	Fertigung von Ladebordwänden	105
6.2	Laserstrahlschweißen eines Karosserieelements	109
6.2.1	Mechanische Modellierung	110
6.2.2	Thermomechanische Modellierung	115
6.3	Bewertung	121
7	Zusammenfassung und Ausblick	125
8	Literatur	127

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 1.1	Von der virtuellen zur realen Produktion	2
Abbildung 1.2	Abgrenzung der Fertigungsplanung des Laserstrahl- schweißens.....	4
Abbildung 1.3	Gliederung der Arbeit.....	5
Abbildung 2.1	Prinzip des Laserstrahl-tiefschweißens.....	8
Abbildung 2.2	Wechselwirkung zwischen Temperaturfeld, Spannungs- und Dehnungszustand sowie dem Gefüge.....	11
Abbildung 2.3	Qualitativer Verlauf der Eigenspannungen bei einem Stumpfstoß.....	13
Abbildung 2.4	Spannungsfelder im quasistationären Temperaturfeld beim Laserstrahlschweißen.....	15
Abbildung 2.5	Formen des Bauteilverzugs.....	17
Abbildung 2.6	Abgrenzung des Themenfelds „Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens“.....	22
Abbildung 2.7	Einflussfaktoren auf den Laserstrahlschweiß- prozess.....	25
Abbildung 2.8	CA-Einsatz im Unternehmen.....	29
Abbildung 2.9	Ist-Ablauf in der Fertigungsplanung von automatisierten Schweißprozessen.....	31
Abbildung 2.10	Ansätze zur Simulation von Schweißprozessen.....	34
Abbildung 3.1	Anforderungen an ein Prozessmodell.....	40
Abbildung 3.2	Handlungsfelder für die Qualifizierung der Prozess- simulation in der Fertigungsplanung des Laserstrahl- schweißens	44

Abbildung 4.1	Simulation des Laserstrahlschweißens als begleitendes Werkzeug im Produktentstehungsprozess.....	45
Abbildung 4.2	Simulation als aufgabenorientiertes Werkzeug in der Arbeitsplanerstellung.....	49
Abbildung 4.3	Einsatzszenario für die Simulation in der Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens.....	51
Abbildung 4.4	Fragestellungen der Fertigungsplanung und daraus abgeleitete Anforderungen an das Simulationsmodell	52
Abbildung 5.1	Modellierungskonzept für das Bauteilverhalten beim Laserstrahlschweißen.....	54
Abbildung 5.2	Modellierungsschritte und eigenentwickelte Unterroutinen zur thermomechanischen Simulation.....	56
Abbildung 5.3	Verschiedene Bereiche eines FE-Netzes.....	58
Abbildung 5.4	Strategien zur Netzverfeinerung.....	59
Abbildung 5.5	Simulation der Spaltöffnung beim Laserstrahlschweißen eines Stumpfstoßes.....	62
Abbildung 5.6	Beispiel für eine Kontaktmodellierung.....	64
Abbildung 5.7	Definition der Geometrie bei der Modellierung der Wärmequelle.....	70
Abbildung 5.8	Näherung der Schmelzbadgeometrie im thermomechanischen Finite-Elemente-Modell.....	73
Abbildung 5.9	Vergleich des Schmelzbads von Simulation und Experiment an einer Blindschweißung.....	74
Abbildung 5.10	Vergleich des resultierenden Bauteilverzugs einer Blindschweißung in ebenes Stahlblech.....	75
Abbildung 5.11	Koordinatentransformation zur Berechnung der Wärmequelle.....	77

Abbildung 5.12	Abbildung einer dreidimensionalen Schweißnaht durch eine Bahnkurve.....	78
Abbildung 5.13	Schmelzbad beim Laserstrahlschweißen eines dreidimensionalen Aluminiumbauteils.....	79
Abbildung 5.14	Experimentell ermittelte Maximalkraft an einem Spannelement.....	84
Abbildung 5.15	Vorgehensweise zur Verbesserung der Lage von Spannungspunkten.....	85
Abbildung 5.16	Modell eines Kniehebelspanners mit Elastomerabdeckung.....	87
Abbildung 5.17	Prinzipieller Ablauf beim Laserstrahlschweißen mit einer flexiblen Rollenführung.....	89
Abbildung 5.18	Konzepte zur adaptiven Vernetzung.....	91
Abbildung 5.19	Von Mises-Vergleichsspannung für verschiedene Strategien zur adaptiven Vernetzung.....	92
Abbildung 5.20	Schematische Darstellung der Parallelisierung der Schweißsimulation.....	94
Abbildung 5.21	Vernetzung des Nahtbereichs in der mechanischen Simulation.....	99
Abbildung 5.22	Funktionsweise des mechanischen Ersatzmodells...	100
Abbildung 6.1	Laserstrahlschweißen von Ladebordwänden – Skizze von Fügegeometrie und Laseranordnung.....	106
Abbildung 6.2	Laserstrahlschweißen von Ladebordwänden – Untersuchungen am iwB.....	108
Abbildung 6.3	Simulation einer Karosseriestruktur – Skizze des Anwendungsbeispiels.....	109
Abbildung 6.4	Mechanisches Modell der Karosseriestruktur.....	111
Abbildung 6.5	Ergebnisse des mechanischen Modells.....	112
Abbildung 6.6	Vergleichende experimentelle Untersuchungen.....	114

Abbildung 6.7	Vernetzung der Gesamtstruktur mit Volumenelementen.....	116
Abbildung 6.8	Ergebnisse der thermomechanischen Simulation....	118
Abbildung 6.9	Untersuchung möglicher Schweißfolgen.....	120

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 2.1	Einflussfaktoren auf den schweißbedingten Verzug.....	18
Tabelle 5.1	Einfluss der Werkstoffparameter auf die Bauteileigenschaften.....	67
Tabelle 5.2	Klassifizierung industriell eingesetzter Spanntechnik.....	82
Tabelle 5.3	Abschätzung des Rechenzeitgewinns durch Parallelisierung.....	95
Tabelle 6.1	Nutzenbewertung des Simulationseinsatzes.....	122

1 Einleitung

1.1 Motivation

Innovationen sind Zukunftssicherung. Innerhalb sich verändernder Märkte und Wettbewerbssituationen sind sie eine Stellgröße, um den Unternehmenserfolg langfristig zu sichern (*Eversheim u. a. 1999, Milberg und Taiber 1998, Peters 1997*). Innovationen führen nur dann zum Unternehmenserfolg am Markt, wenn sie schnell und kundenorientiert umgesetzt werden. Innovationswettbewerb bedeutet deshalb auch Zeitwettbewerb (*Little 1997, Milberg und Taiber 1998, Reinhart 2000*).

Ein Kriterium des Zeitwettbewerbs ist die Dauer des Produktentstehungsprozesses. Dieser Prozess von der innovativen Produktidee bis zum fertigen, marktfähigen Produkt kann durch verschiedene Maßnahmen verbessert werden. Ziele sind sowohl die Verkürzung der Entwicklungszeit als auch eine Reduzierung des insgesamt notwendigen Aufwands an Personal und Ressourcen. Der Einsatz von Softwarewerkzeugen ist dafür einer der wichtigsten Erfolgsfaktoren (*Milberg und Taiber 1998, Ruffles 2000*). Sie realisieren zum einen die transparente Kommunikation der beteiligten Bereiche, die in der Regel über verschiedene Standorte verteilt sind. Zum anderen unterstützen sie die unterschiedlichen Prozesse durch virtuelle, computerbasierte Prototypen, um den Produktentstehungsprozess weitestgehend im Rechner stattfinden zu lassen. Vision ist das „*front loaded development*“ (*Thomke 2001, S. 73*). Durch virtuelle Prototypen sollen in frühen Phasen der Produktentwicklung optische und funktionale Eigenschaften des Produkts verbessert sowie in besonderem Maß die Produktionsqualität der Produkte in der Anlaufphase der Produktion erhöht werden (*Müller und Reindl 1999, Shaw 1999, Wiesmüller 2000, Balasubramanian und Katzenbach 1995*). Die Vision ist die Auslieferung des ersten Hardwareprototypen als hochwertiges Produkt an den Kunden im Anschluss an verschiedene, rein digitale Prototypen (*Coates 2000, Storath 1998*).

Innovationen sind nicht auf Produkte beschränkt. Sie umfassen auch die Produktionsprozesse in Form von Prozessinnovationen (*Milberg und Taiber 1998, S. 212*). Die virtuelle Absicherung des Produktentstehungs-

prozesses darf nicht nur das Produkt beinhalten, sondern muss folglich genauso die Produktionsprozesse betrachten, die zur Herstellung des Produkts notwendig sind. Ziel der Prozesssimulation ist die virtuelle Absicherung der Produktion parallel zur zunehmend virtualisierten Produktentstehung (Abbildung 1.1). *Spur (2000)* verwendet in diesem Zusammenhang den Begriff *Produktionskonstruktion*, um die Gemeinsamkeit des Planungsvorgehens als Zielvorstellung zu betonen. Gebräuchlicher ist in diesem Zusammenhang der Begriff *Arbeitsvorbereitung*.

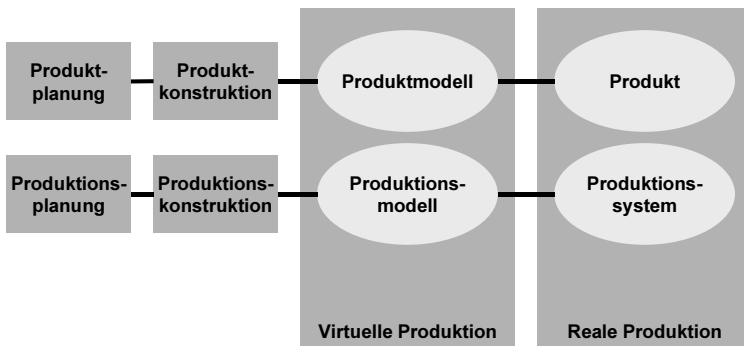


Abbildung 1.1: Parallele Entwicklung von Produkt und Produktion durch Simulationenwerkzeuge (nach Spur 2000)

Die virtuelle Untersuchung der Fertigungsverfahren ermöglicht eine weitgehende Planung der Fertigung parallel zum Produkt, ohne auf teure und zeitaufwändige experimentelle Untersuchungen zurückzugreifen. Auf diese Weise dienen die Computersimulationen nicht nur dazu, Experimente zur Überprüfung der Planungsergebnisse einfacher und schneller durchzuführen, sondern versetzen das Unternehmen insgesamt in die Lage, innovativer zu sein (*Thomke 2001*).

Innerhalb der verschiedenen Fertigungsverfahren, die zur Herstellung von Produkten notwendig sind, nehmen die Schweißprozesse eine Sonderstellung ein. Technisch zuverlässige und wirtschaftlich produzierbare

Bauteile lassen sich häufig nur als Schweißkonstruktion realisieren (*Fritz und Schulze 1985, S. 91*). Besonders im Automobilbau stellen Schweißverfahren eines der wichtigsten Fügeverfahren in der Serienproduktion dar. Neben klassischen Verfahren wie dem Punktschweißen kommt aus Zeit- und Kostenaspekten zunehmend das Laserstrahlschweißen zum Einsatz. Das Laserstrahlschweißen ist ein hochflexibles und zudem äußerst schnelles Fügeverfahren, das sich zudem für verschiedenste Werkstoffe eignet. Die Potenziale des Lasers können nur dann ausgeschöpft werden, wenn Produktkonstruktion, Prozesseigenschaften und Fertigungsmittel optimal aufeinander abgestimmt werden. Dafür fehlt bei „jungen“ Verfahren wie dem Laserstrahlschweißen in vielen Fällen Anwenderwissen, um den Lasereinsatz optimal zu planen (*VDI nachrichten 2000, S. 19*). Die Laserstrahlschweißaufgaben werden aus diesen Gründen mit Hilfe aufwändiger Schweißversuche für den Serieneinsatz qualifiziert. Im Sinne der virtuellen Produktionsabsicherung kann die Qualifizierung für den Serieneinsatz mit Hilfe der Simulation verbessert und beschleunigt werden. Ziel der Unternehmen ist es, Fügeverfahren nur dann in der Serienproduktion einzusetzen, wenn eine geeignete Simulationsumgebung zur Verfügung steht, um die Prozesse virtuell abzusichern (*Flegel 1999*).

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist ein Modellierungskonzept, um die Planung des Laserstrahlschweißens durch Simulationsmodelle zu unterstützen. Als Untersuchungsfeld greift sich die Arbeit aus dem Produktentstehungsprozess den Teilbereich der Arbeitsvorbereitung heraus, der die Planung des Fertigungsverfahrens Laserstrahlschweißen umfasst (Abbildung 1.2). Durch eine Untersuchung des vollständigen Produktentstehungsprozesses wird herausgearbeitet, an welchen Stellen die Simulation planungsunterstützend eingesetzt werden kann und welche Fragen dort zu lösen sind. Darauf aufbauend wird ein Modellierungskonzept entwickelt, um die Fragestellungen mit Hilfe von Simulationsmodellen zu beantworten. Ziel ist die Qualifikation der Simulation des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung, um in frühen Phasen der Produktent-

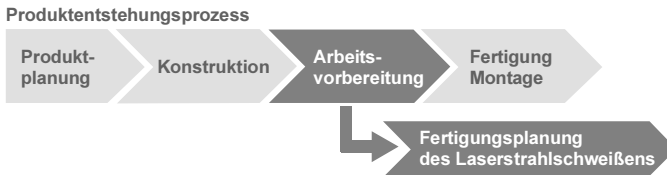


Abbildung 1.2: Abgrenzung der Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens

stehung die Produzierbarkeit der Produkte abzusichern und den experimentellen Aufwand in der Fertigungsplanung zu reduzieren.

1.3 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise der Arbeit ist in Abbildung 1.3 dargestellt.

Kapitel 2 befasst sich mit dem für diese Arbeit relevanten Stand der Technik. Kapitel 2.1 erläutert die physikalischen Grundlagen des Laserstrahlschweißens und die dabei auftretenden thermomechanischen Wechselwirkungen. Aufbauend auf den Grundlagen der Produktentstehung sowie einer Abgrenzung des Themenfeldes und der relevanten Begriffe wird in Kapitel 2.2 die Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens dargestellt. Kapitel 2.3 erklärt die rechnerbasierte Vorgehensweise in der Produktentstehung sowie in der Fertigungsplanung. Vorhandene Simulationsmodelle für Fertigungsverfahren im Allgemeinen und für Schweißprozesse im Besonderen werden beschrieben und im Hinblick auf die Zielrichtung der Arbeit diskutiert.

Aufbauend auf grundlegenden Anforderungen der Produktionstechnik an ein Modell werden in **Kapitel 3** Defizite der vorhandenen Ansätze aufgezeigt und ein Handlungsbedarf abgeleitet.

Die Vorgehensweise zur simulationsgestützten Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens wird in **Kapitel 4** entwickelt. Aus einer Ermittlung der vorhandenen Eingangsdaten und zu lösenden Aufgaben werden

1	Einleitung
2	Planung von Laserstrahlschweißprozessen
3	Defizite und Handlungsbedarf
4	Simulationsgestützte Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens
5	Modellierungskonzept für das Laserstrahlschweißen
6	Anwendungsbeispiele
7	Zusammenfassung und Ausblick

Abbildung 1.3: Gliederung der Arbeit

Vorschläge abgeleitet, um die Bereiche Produktplanung, Konstruktion, Arbeitsvorbereitung sowie Fertigung und Montage durch die Simulation sinnvoll zu unterstützen.

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 3 dargestellten Defizite sowie der in Kapitel 4 aufgezeigten Einsatzmöglichkeiten wird in **Kapitel 5** ein Modellierungskonzept vorgestellt, das auf verschiedenen Bausteinen beruht. Diese bestehen aus thermodynamischen, thermomechanischen und rein mechanischen Ansätzen. Diese werden in einem kommerziellen FEM-System realisiert und soweit notwendig experimentell abgesichert. Am Ende des Kapitels werden Möglichkeiten aufgezeigt, um die Modelle zu validieren.

Die Anwendung der Simulationsmodelle an Beispielen aus der Praxis zeigt **Kapitel 6**. Für die Fertigung von Ladebordwänden wird beschrieben, wie mit Hilfe der Simulation eine Verbesserung der Prozessführung erreicht werden kann. Am Einsatz des Laserstrahlschweißens an einer PKW-Karosseriestruktur wird die Realisierbarkeit großer Simulationsmo-

delle erläutert. Anschließend wird mit Hilfe der Simulation die Wechselwirkung zwischen Bauteil, Schweißprozess und Spanntechnik untersucht.

Kapitel 7 fasst die wesentlichen Aussagen der Arbeit zusammen und wagt einen Blick in die Zukunft.