

Lehrstuhl für
Montagesystemtechnik und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

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

Bernhard Lenz

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen
Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. H. Hoffmann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
 2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. M. Geiger
- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Die Dissertation wurde am 29.06.01 bei der Technischen Universität
München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am
07.11.01 angenommen.

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



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)

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

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

Geleitwort des Herausgebers

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung. Denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren und Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsfeldern des *iwb*. Diese reichen von der Produktentwicklung über die Planung von Produktionssystemen hin zu den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb*-Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Es gilt daher mein besonderer Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Leiter dieses Instituts, für die vertrauensvolle und fruchtbare Zusammenarbeit, die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Manfred Geiger, dem Leiter des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen Nürnberg, bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen, danke ich für die Übernahme des Vorsitzes.

Ich bedanke mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts, von denen viele Freunde geworden sind, sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt und mit frischen Ideen versorgt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern für die stetige Unterstützung, die ich von Ihnen erfahre, sowie meinen Freundinnen und Freunden, die für geistige Frische und Rückhalt gesorgt haben und weiter sorgen.

München, im Dezember 2001

Bernhard Lenz

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 Laserstrahlschweißens.....	4
Abbildung 1.3	Gliederung der Arbeit.....	5
Abbildung 2.1	Prinzip des Laserstrahltiefschweißens.....	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 Laserstrahlschweißprozess.....	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 Prozesssimulation in der Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens	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

Formelzeichen

A	Querschnittsfläche [mm ²]
A	Absorptionsgrad [-]
E	Elastizitätsmodul [N/mm ²]
$f_{x,y,z}$	Koeffizienten der Energieeinbringung
I	Intensität des Lasers im Brennfleck [W/mm ²]
N_{IP}	Zahl der Integrationspunkte pro Element
P	Laserleistung [W]
$P_V(i)$	Leistung pro Integrationspunkt i, bezogen auf das zugeordnete Teilvolumen V_{IP} [W/mm ³]
r	Fokusradius [mm]
R_{eH}	Fließgrenze [N/mm ²]
S	Streckenenergie [J/m]
T	Temperatur [K]
T_0	Umgebungstemperatur [K]
T_V	Verdampfungstemperatur des Werkstoffs [K]
$V_{Element}$	Volumen pro Element [mm ³]
V_{IP}	Volumen pro Integrationspunkt [mm ³]
v	Vorschubgeschwindigkeit (üblichste Einheit in der Schweißtechnik [m/min])
α_T	Differentieller thermischer Ausdehnungskoeffizient [K ⁻¹]
ΔT	Temperaturdifferenz [K]
ε	Gesamtdehnung
η	Wirkungsgrad der Energieeinkopplung [-]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/mmK]

Abkürzungen

ν	Poissonzahl
σ_T	Thermische Spannung [N/mm ²]
σ_{VM}	von Mises-Vergleichsspannung [N/mm ²]
σ_W	Wahre Spannung [N/mm ²]
$\sigma_{x,y,z}$	Normalspannungen in x-, y- und z-Richtung [N/mm ²]
$\tau_{xy, xz, yz}$	Schubspannungen in xy-, xz- und yz-Ebene [N/mm ²]

Abkürzungen

CA	Computer Aided
CAD	Computer Aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMU	Digital Mock-Up
EN	Europäische Norm
FEM	Finite Elemente-Methode
FE-Modell	Finite Elemente-Modell
FE-System	Finite Elemente-System
Nd:YAG	Yttrium-Aluminium-Granat Kristall mit Neodym dotiert
PMU	Physical Mock-Up
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WIG-Schweißen	Wolfram-Inertgas-Schweißen
ZTU-Diagramm	Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm

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*.

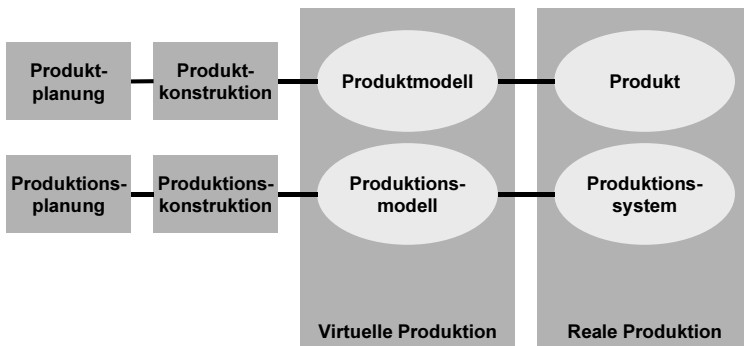


Abbildung 1.1: Parallele Entwicklung von Produkt und Produktion durch Simulationenwerkzeuge (nach Spur 2000)

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-

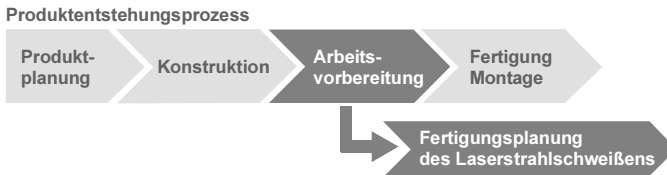


Abbildung 1.2: Abgrenzung der Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens

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.

2 Planung von Laserstrahlschweißprozessen

Das Laserstrahlschweißen ist ein hochkomplexer Prozess. Grundlage des Planungsvorgehens für den Einsatz des Laserstrahlschweißens in der Serienfertigung ist das Verständnis der physikalischen Wechselwirkungen. Daher werden sowohl der Prozess der Energieeinkopplung als auch die aus der eingebrachten Wärme resultierenden thermomechanischen Vorgänge im Bauteil erläutert. Die Planung von Laserstrahlschweißprozessen ist ein Teilbereich der Arbeitsvorbereitung. Der Produktentstehungsprozess wird dargelegt und daraus der Ausschnitt der Planung von Schweißprozessen abgegrenzt, der im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wird. In allen Phasen der Produktentstehung steht der verstärkte Einsatz von Rechnerwerkzeugen zur Absicherung von Planungsergebnissen im Vordergrund. Aus diesem Grund wird der Einsatz von Simulationswerkzeugen in der Produktentstehung beschrieben. Abschließend werden bestehende Modelle und Simulationswerkzeuge zur Abbildung des Laserstrahlschweißens veranschaulicht und nach ihrem Einsatzfeld charakterisiert.

2.1 Physikalische Vorgänge beim Laserstrahl-tiefschweißen

Ausgehend vom physikalischen Prinzip gehört das Laserstrahlschweißen in die Verfahrensgruppe Schmelzschweißen durch Strahl. Abschnitt 2.1.1 befasst sich mit der Physik der Einkopplung der Laserenergie in das Werkstück. Abschnitt 2.1.2 beschreibt die thermomechanischen Vorgänge im Werkstoff, die aus der thermischen Last des Lasers resultieren.

2.1.1 Physik der Energieeinkopplung

Der Laserstrahl wird in einer Strahlquelle erzeugt und mittels eines Strahlführungssystems und einer Fokussieroptik auf einer sehr kleinen Fläche, dem Fokus oder Brennfleck des Lasers, positioniert. Typische Fokusdurchmesser beim Laserstrahlschweißen sind 0,3 bis 0,6 mm. Bei ausreichend hoher Intensität wird der Werkstoff lokal so stark aufgeheizt, dass im Bereich der Fügezone eine Aufschmelzung des Materials

stattfindet (Dilthey 2000, S. 2). Dieser Prozess wird als Wärmeleitungsschweißen bezeichnet, typische Laserintensitäten sind 10^3 - 10^5 W/cm². Der Wirkungsgrad dieses Prozesses liegt bei ca. 15%.

Oberhalb einer werkstoffabhängigen Schwellintensität tritt der Tief-schweißeffekt auf (Abbildung 2.1). Diese Intensität liegt für Stahlwerkstoffe bei ca. 10^6 W/cm², für Aluminiumlegierungen ist sie ca. um den Faktor 1000 größer. Durch die hohe Intensität des Laserstrahls wird der Werkstoff so stark aufgeheizt, dass die Verdampfungstemperatur überschritten wird. Die Oberfläche der Schmelze wird deformiert, der Laserstrahl formt ein dünnes Loch in das Material (Beyer 1995, S. 15). Durch diese Effekte sowie durch den Druck des abströmenden Metall-dampfes entsteht eine Dampfkapillare (englisch „keyhole“). Der Durchmesser dieser Dampfkapillare liegt typischerweise in der Größenordnung des Brennfleckdurchmessers von ca. 0,1 - 1 mm (Hügel 1992, S. 286). Abhängig von der Wellenlänge des Lasers und der Lichtintensität im Brennfleck kann der Metaldampf in und oberhalb der Dampfkapillare

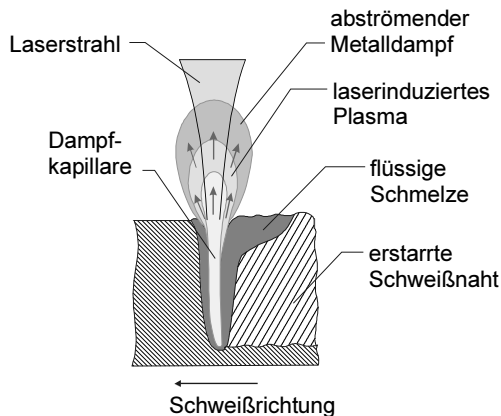


Abbildung 2.1: Prinzip des Laserstrahl-tiefschweißens (Nach Hügel 1992, S. 288)

ionisiert werden. Es bildet sich ein laserinduziertes Plasma.

Die zur Ausbildung einer Dampfkapillare notwendige Schwellintensität kann unter der Annahme abgeschätzt werden, dass die Temperatur an der Werkstückoberseite gleich der Verdampfungstemperatur sein muss. Nimmt man eine konstante räumliche Verteilung des Laserlichts über dem Brennfleckdurchmesser und ein unendlich ausgedehntes Werkstück an, ergibt sich für die Schwellintensität I (*Herziger 1993, S. 137f*):

$$I = \frac{T_V \cdot \lambda}{A \cdot r} \quad (\text{Gleichung 2.1})$$

T_V	Verdampfungstemperatur des Werkstoffs [K]
A	Absorptionsgrad an der Oberfläche ($0 < A < 1$)
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/mmK]
r	Fokusradius [mm]

Die Intensität wird in W/mm^2 angegeben.

Zweite wichtige Größe neben der Intensität ist die Streckenenergie S . Diese ist der Quotient aus Laserstrahlleistung P in Watt und Bahngeschwindigkeit v in m/sek:

$$S = P/v \quad (\text{Gleichung 2.2})$$

Die Streckenenergie S hat die Dimension Energie pro Längeneinheit (Einheit J/m) und ist ein in der Schweißtechnik sehr oft verwendetes Maß für den Energieeintrag in das Werkstück.

Die Absorption des Laserlichts erfolgt über die Fresnelabsorption an der Schmelzbadoberfläche sowie über Absorption im Plasma durch inverse Bremsstrahlung. Die Beiträge dieser Mechanismen zum Gesamteinkoppelwirkungsgrad hängen von der verwendeten Laserwellenlänge ab. Beim CO_2 -Laser mit einer Wellenlänge von $10,6 \mu\text{m}$ trägt die Plasmaabsorption deutlich zur Gesamtabsorption bei (*Beck 1996, S.88ff*). Beim Nd:YAG-Laser kann die Plasmaabsorption vernachlässigt werden (*Dausinger 1995, S. 84*). Der Prozesswirkungsgrad steigt durch diese Absorptionsmechanismen auf nahezu 100% an. Die Verluste hängen von der Prozessführung ab. Bei einer Durchschweißung können bis zu 50%

der Laserleistung durch die unten geöffnete Dampfkapillare entweichen (*Otto 1997, S. 16f*).

Die Dampfkapillare ermöglicht das tiefe Eindringen des Laserstrahls in den Werkstoff. Typisch für das Laserstrahl-tiefschweißen ist ein Verhältnis von Nahttiefe zu Nahtbreite von 2:1 bis 20:1. Durch die Vorschubbewegung des Laserstrahls wird das Keyhole durch das Material bewegt. Aufgrund der Bewegung der Wärmequelle sind die resultierenden Isothermen nicht mehr symmetrisch. Die Form des Schmelzbades wird zu einer Tropfenform verzerrt.

2.1.2 Thermomechanische Wechselwirkungen

Das Werkstoffverhalten beim Laserstrahlschweißen ist eine Folge thermodynamischer, mechanischer und metallurgischer Wechselwirkungen (*DebRoy und David 1995, Goldak u. a. 1992, Radaj 1992*). Die wichtigsten Vorgänge sind in Abbildung 2.2 dargestellt.

Ausgangspunkt ist die orts- und zeitabhängige Temperaturverteilung mit dem Laserstrahl als Wärmequelle. Der anisotrope Zeit-Temperatur-Verlauf verursacht Wärmedehnungen und -spannungen im Bauteil. Darüber hinaus wird über die Temperaturabhängigkeit der Werkstoffgrößen das mechanische Verhalten des Bauteils beeinflusst. Die Mikrostruktur ist bei vielen Werkstoffen über die Temperaturabhängigkeit der Gefügeanteile eine Funktion der Aufheiz- und Abkühlzyklen. Umgekehrt übt die Mikrostruktur durch die temperaturabhängige spezifische Wärme und latente Wärmen an den Phasenübergängen einen Einfluss auf den Zeit-Temperatur-Verlauf im Werkstoff aus. Rückwirkungen der Mechanik auf das thermische Verhalten und die Mikrostruktur können meistens vernachlässigt werden (*Radaj 1992, S. 4*).

Im Vergleich zu konventionellen Schweißverfahren ist der Wärmeeintrag beim Laserstrahlschweißen zwar sehr gering, aber nicht vernachlässigbar und beeinflusst merklich die Eigenschaften laserstrahlgeschweißter Werkstücke. Die wichtigsten Folgen sind die aus dem Prozess resultierenden Eigenspannungen sowie der Bauteilverzug, die im Folgenden näher erläutert werden.

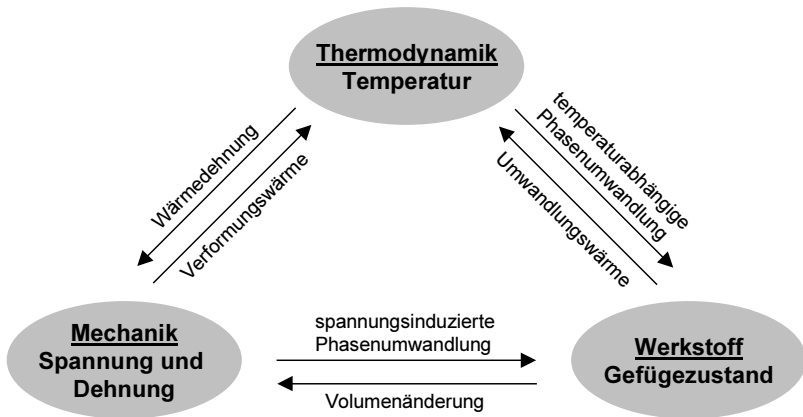


Abbildung 2.2: Wechselwirkung zwischen Temperaturfeld, Spannungs- und Dehnungszustand sowie dem Gefüge (nach Goldak u. a. 1992, S. 3)

Schweiß eigenspannungen

Eigenspannungen sind Spannungen, die im Bauteil nach Entfernen aller äußerer Lasten verbleiben (Radaj 1992, S. 5).

Sie stehen mit sich selbst im Gleichgewicht und werden nach ihrer Verteilung im Makro- und Mikrobereich in Spannungen erster, zweiter und dritter Art klassifiziert (Issler u. a. 1995, S. 9):

1. Art: Verteilung über große Querschnittsbereiche und eine Vielzahl von Körnern (Makro eigenspannung)
2. Art: Verteilung innerhalb von Kornbereichen (Mikro eigenspannung)
3. Art: Verteilung innerhalb kleinster Werkstoffbereiche (im atomaren Bereich)

Für technische Anwendungen wird ein Bauteil als spannungsfrei angesehen, wenn keine Eigenspannungen 1. Art nachweisbar sind (Dilthey 1995, S. 64). Aus diesem Grund werden im Rahmen dieser Arbeit unter dem Begriff Eigenspannungen immer solche 1. Art verstanden.

Die im Bauteil verbleibenden Eigenspannungen können eine Folge der Werkstoffherstellung, der Fertigung oder der Beanspruchung sein. Sie entstehen durch eine ungleichmäßige bleibende Formänderung, die sich in Volumen- und Gestaltänderung des betrachteten Werkstoffbereichs unterteilen lässt (Radaj 1992, S.6). Schweiß eigenspannungen entstehen durch die ungleichmäßige Wärmeeinbringung. In einem Festkörper ist eine Temperaturveränderung verbunden mit einer thermischen Dehnung ε_T :

$$\varepsilon_T = \alpha_T \cdot \Delta T \quad (\text{Gleichung 2.3})$$

α_T differentieller thermischer Ausdehnungskoeffizient [K^{-1}]
 ΔT Temperaturdifferenz [K]

Wird ein Festkörper als Ganzes erwärmt, bleibt die Ausdehnung spannungsfrei. Wärmespannungen entstehen erst, wenn die Wärmeausdehnung beispielsweise durch Einspannungen behindert wird oder die Temperaturänderung wie beim Schweißen anisotrop erfolgt. Im linear-elastischen Fall lassen sich die aus den thermischen Dehnungen resultierenden Spannungen analytisch angeben. Unter der Annahme einer vollständigen Dehnungsunterdrückung in allen drei Raumrichtungen sowie eines rein elastischen Spannungs-Dehnungs-Feldes ergibt sich als thermische Spannungsquelle σ_T (Radaj 1992, S. 130):

$$\sigma_T = \frac{-\alpha_T \Delta T E}{1 - 2\nu} \quad (\text{Gleichung 2.4})$$

ΔT aufgebrachte Temperaturänderung [K]
 E Elastizitätsmodul [N/mm^2]
 α_T differentieller thermischer Ausdehnungskoeffizient [K^{-1}]
 ν Poissonzahl [-]

σ_T ist die resultierende Spannung in [N/mm^2], die auf die elastische Struktur nach dem Lösen der Spannungsunterdrückung wirkt.

Der grundlegende Mechanismus für die Ausbildung von Schweiß eigenspannungen ist die plastische Werkstoffverformung im Bereich der Schweißnaht durch Dehnungsbehinderung (Dillthey 1995, S.64f). Aufgrund der höheren Temperatur dehnt sich der Bereich der Schweiß-

naht stärker aus als die benachbarten Bereiche. Es treten Wärmespannungen auf. Die Fließgrenze ist durch die erhöhte Temperatur abgesenkt. Sie wird daher leicht durch die Wärmespannungen überschritten und es treten plastische Verformungen im Nahtbereich auf. Der Bereich der Schweißnaht ist am Ende des Abkühlvorgangs plastisch gestaucht. Die bleibenden Formänderungen lassen sich als Eigenspannungsquellen (vgl. Kapitel 5.3) beschreiben, da sie die originäre Ursache der Eigenspannungsverteilung im Werkstück sind (Radaj 1992, S. 198ff).

Schweißereigenspannungen werden üblicherweise relativ zur Schweißnaht angegeben. Der Verlauf dieser Schrumpfeigenspannungen in Nahtlängsrichtung (σ_x) sowie quer zur Naht (σ_y) ist für einen Stumpfstoß in Abbildung 2.3 dargestellt. Im Schweißgut sind aufgrund der Schrumpfung des Werkstoffs Zugeigenspannungen in Längsrichtung vorhanden. Durch die Stützwirkung kälterer Bereiche in der Nachbarschaft wird die Schrumpfung behindert. Als Folge der Zugspannungen im Schweißgut entstehen Druckspannungen im nicht aufgeschmolzenen Grundwerkstoff. Für diese Eigenspannungsverteilung gilt, dass die Summe aller Kräfte und Momente Null ist (Dilthey 1995, S. 65ff). Die Spannungen in Dickenrichtung lassen sich im Dünoblechbereich vernachlässigen. Als

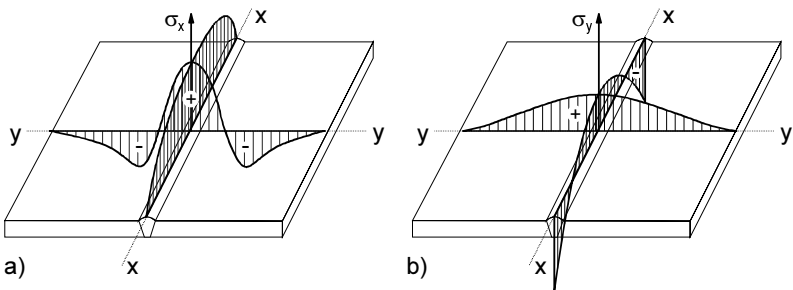


Abbildung 2.3: Qualitativer Verlauf der Eigenspannungen bei einem Stumpfstoß a) in Längsrichtung b) in Querrichtung zur Schweißnaht (Dilthey 1995, S. 65)

Näherung kann in diesem Zusammenhang angenommen werden, dass erst oberhalb einer Blechdicke von 25 mm die Spannungen in Dickenrichtung signifikante Werte annehmen (*Masubuchi 1976, S. 230*).

Um eine Verformung eines Werkstücks aufgrund eines mehrachsigen Spannungszustandes abzuschätzen, muss dieser mittels geeigneter Festigkeitshypothesen in eine Vergleichsspannung umgerechnet werden. Für metallische Werkstoffe wird üblicherweise die Hypothese der größten Gestaltänderungsenergie (Hypothese nach von Mises) verwendet.

Die Vergleichsspannung nach von Mises σ_{VM} berechnet sich als:

$$\sigma_{VM} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6 \cdot (\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2)}$$

(Gleichung 2.5)

σ_x , σ_y und σ_z sind die Normalspannungen, τ_{xy} , τ_{xz} und τ_{yz} die Schubspannungen im Werkstück (*Dubbel 1997, S. C6*). Damit nach dieser Festigkeitshypothese eine plastische Verformung des Werkstoffs stattfindet, muss die Vergleichsspannung die Fließgrenze R_{eH} überschreiten:

$$\sigma_{VM} \geq R_{eH}$$

(Gleichung 2.6)

Die Richtung der Verformung kann durch eine geometrische Addition der Spannungsvektoren abgeschätzt werden. Die Spannungen werden in N/mm^2 angegeben.

Der Verlauf der Schweißseigenspannungen in Abbildung 2.3 kann von anderen Effekten überlagert werden, die beispielsweise eine Folge von Gefügeumwandlungen sein können. Die Art und Weise, wie sich die Spannungen überlagern und eine resultierende Eigenspannungsverteilung ergeben, hängt stark vom verwendeten Werkstoff und anderen Parametern wie der Nahtform, der Art der Einspannung oder der Blechdicke ab (*Dilthey 1995, S. 69f*).

Während des Schweißprozesses liegt ein komplexer Spannungszustand im Material vor (Abbildung 2.4). Aufgrund der temperaturabhängigen Fließgrenze kann der Werkstoff oberhalb einer materialabhängigen Grenztemperatur als spannungsfrei angesehen werden. Sie beträgt bei einem einfachen, niedrig legierten Baustahl bei ca. 900 K (*Radaj 1992, S.*

134f). Die lokalen Temperaturmaxima senkrecht zur Schweißnaht liegen auf einer parabelförmigen Kurve. Diese trennt Bereiche, in den sich der Werkstoff erwärmt (positiver Temperaturgradient), von solchen, in denen eine Abkühlung stattfindet (negativer Temperaturgradient). Aufgrund der thermischen Ausdehnung beim Erwärmen entsteht in den Bereichen vor der Kurve eine Druckbelastung. Diese resultiert im Bereich der Schweißnaht in einer plastischen Druckzone. Dahinter bildet sich eine Zone mit plastischer Zugbelastung. Zwischen den beiden Bereichen befindet sich eine elastische Übergangszone, in die Entlastung vom Druck- in den Zugbereich stattfindet (Otto 1997, S. 22). Aus der plastischen Zugzone resultieren die Zugeigenspannungen im Nahtbereich, wie sie in Abbildung 2.3 dargestellt wurden.

Die Zusammenhänge im Bereich der Schweißnaht spielen sich beim Laserstrahlschweißen innerhalb weniger mm ab. Außerdem sind die Aufheiz- und Abkühlzyklen aufgrund der hohen Geschwindigkeiten sehr kurz, woraus sich sehr hohe Anforderungen an eine Modellierung der thermomechanischen Vorgänge ergeben (vgl. Kapitel 2.3 und Kapitel 5).

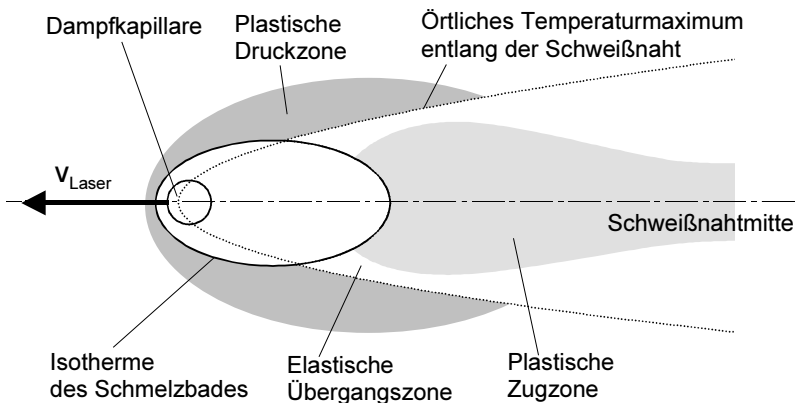


Abbildung 2.4: Spannungsfelder im quasistationären Temperaturfeld beim Schweißen (nach Radaj 1992, S. 134)

Wärmeverzug

„Wärmeverzug ist jede Maß- und Formänderung eines Werkstücks gegenüber dem Ausgangszustand infolge einer Wärmebehandlung“ (DIN EN 10052, 1994).

Er ist innerhalb der verschiedenen Wechselwirkungsmechanismen beim Schweißen zu sehen (Abbildung 2.2) und resultiert aus elastischen und plastischen Verformungen, die durch Schrumpfungsvorgänge im Nahtbereich hervorgerufen werden. Eigenspannungen und Verzug sind voneinander abhängig, die Verformungen müssen sich im Gleichgewicht mit den vorhandenen Eigenspannungen befinden.

Nach dem Schweißen lassen sich drei fundamentale Änderungen der Bauteilgeometrie unterscheiden (Masubuchi 1980, S. 235):

- ◆ Transversale Schrumpfung senkrecht zur Schweißnaht
- ◆ Longitudinale Schrumpfung parallel zur Schweißnaht
- ◆ Winkelverzug (Rotation um die Schweißnaht)

Daraus können verschiedene Verzugsformen abgeleitet werden (Masubuchi 1980, S. 235f; Zhang 1998, S. 9ff):

- ◆ Längsverformung
- ◆ Querverformung
- ◆ Verformung in Richtung der Bauteildicke (Dickenverformung)
- ◆ Winkelverzug
- ◆ Krümmung und Durchbiegung
- ◆ Nichtlineare Effekte (Beulen, Versetzen, Verdrillung)

Beispiele für die Verzugsformen sind in Abbildung 2.5 dargestellt. Nach Radaj (1992, S. 219f) hängt der Winkelverzug unter anderem von der Breite und Tiefe der Schmelzzone relativ zur Blechdicke, den thermomechanischen Werkstoffeigenschaften, der Streckenenergie (siehe Gleichung 2.2) sowie den geometrischen Verhältnissen ab. Zudem treten meistens Überlagerungen der verschiedenen Bauteilverformungen auf.

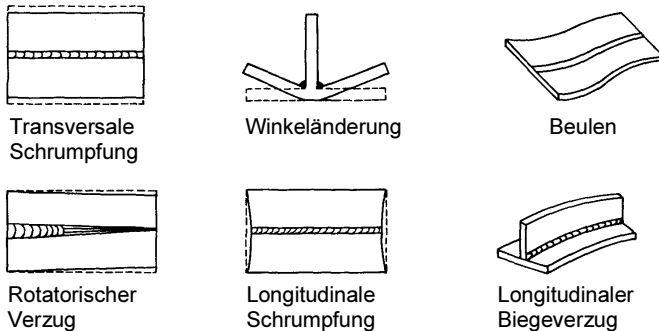


Abbildung 2.5: Formen des Bauteilverzugs (Masubuchi 1980, S. 236)

Die linearen Effekte der Längs-, Quer- und Winkelschrumpfung treten bei nahezu allen Bauteilen auf. Der Effekt der Schrumpfung in Dickenrichtung kann bei dünnen Bauteilen vernachlässigt werden. Dieser spielt erst bei wachsender Blechdicke eine zunehmende Rolle. Nichtlineare Effekte wie Ausbeulen oder Verdrillen sind bei dünnen Blechen relevant. Ausbeulen ist eine Form von Instabilität, die hauptsächlich durch thermisch induzierte Druckeigenspannungen auftritt (Masubuchi 1980, S. 235; Radaj 1992, S. 222).

Ritter u. a. (1999) haben Einflüsse auf den schweißbedingten Verzug systematisch untersucht (Tabelle 2.1). Betrachtet wurden sowohl konventionell (WIG) als auch mit Laser- und Elektronenstrahl geschweißte Bleche aus Stahl und Aluminium. Wichtigste Einflussgröße ist die beim Schweißen eingebrachte Wärme, die mittels der Streckenenergie beschrieben wird (Ritter u. a. 1999, S. 230).

Quer- und Längsschrumpfung nehmen mit zunehmender Streckenenergie zu. Der Winkelverzug ist eine Funktion des Temperaturgradienten in Blechdickenrichtung. Normalerweise werden Bauteile eingespannt, um den Bauteilverzug während des Schweißvorgangs zu behindern oder zu unterdrücken (vgl. Kapitel 2.2.3). Aus Tabelle 2.1 ist zu entnehmen, dass sich diese Form der Verformungsbehinderung ähnlich stark wie die Streckenenergie auswirkt. Daraus resultieren Spannkkräfte, die im Bereich einiger kN liegen können. Dahl u. a. (1999) haben die Spannkkräfte bei Mehrlagenschweißungen gemessen. Für den dort untersuchten

2 Planung von Laserstrahlschweißprozessen

Einflussgrößen	Verzugskenngrößen		
	Quer- schrumpfung	Längs- schrumpfung	Winkelverzug
Verfahrenseinflüsse			
Streckenenergie	++	++	++
Einspannung	++	++	++
Vorwärmen	o bis -	--	-
Kühlung	-	-	-
Geometrieinflüsse			
Nahtquerschnitt	++	++	o bis +
Blechdicke	k.A.	k.A.	o bis -
Werkstoffeinflüsse			
Thermischer Ausdehnungskoeffizient	++	++	++
Wärmeleitfähigkeit	k.A.	k.A.	-
Streckgrenze	-	-	-

Tabelle 2.1: Einflussfaktoren auf den schweißbedingten Verzug (nach Ritter u. a. 1999). Legende: +: verstärkend, -: reduzierend, k. A.: keine Angaben

Dickblechbereich erreichen die Spannkkräfte Werte bis zu 80 kN. Allerdings hängen diese Werte stark von der Probenform und der Lage der Messpunkte ab. Nach dem Ausspannen der Bauteile verbleiben durch die Verformungsbehinderung erhöhte Eigenspannungen im Bauteil.

Neben den grundsätzlichen Formen des Bauteilverzugs lassen sich schwer allgemeingültige Aussagen über den Verlauf des Wärmeverzugs als Funktion des Ortes und der Zeit machen. Beide Effekte hängen stark von den mechanischen und thermischen Randbedingungen ab, speziell von der Prozessführung und den Einspanbedingungen. *Vollertsen (1996, S. 132ff)* beschreibt den Verlauf der Bauteilverformung beim Laserstrahlbiegen, deren Ergebnisse allerdings nur bedingt auf das Laserstrahlschweißen übertragbar sind. *Zhang (1998)* und *Ritter (1999)* haben umfangreiche experimentelle Untersuchungen von Eigenspannungen und Verzug bei verschiedenen Schweißverfahren durchgeführt, jedoch keine Aussagen zum zeitlichen Verlauf getroffen.

2.2 Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens

Um das Laserstrahlschweißen produktiv in der Serienfertigung einsetzen zu können, sind umfangreiche Planungsschritte in verschiedenen Abteilungen des Unternehmens notwendig. Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die Vorgehensweise bei der Produktentstehung gegeben. Die Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens ist ein Teilbereich der Arbeitsvorbereitung innerhalb des gesamten Produktentstehungsprozesses. Es ist daher notwendig, diesen Bereich abzugrenzen und die wichtigsten Begriffe zu definieren. Anschließend wird die allgemeine Planung von Schweißprozessen beschrieben, bevor die speziellen Anforderungen des Lasers an die Fertigung erläutert werden.

2.2.1 Grundlagen der Produktentstehung

Der Produktentstehungsprozess umfasst alle Arbeitsschritte von der Produktidee bis zum marktreifen Produkt. Er untergliedert sich in die Bereiche Produktplanung, Entwicklung und Konstruktion, Arbeitsvorbereitung sowie Fertigung und Montage (*Ehrlenspiel 1995, S. 42*). Eine ganzheitliche Betrachtungsweise beinhaltet nicht nur den Produktentstehungsprozess, sondern die gesamten Lebensphasen eines Produkts und deren Einflussgrößen.

Über Jahrzehnte hinweg erfolgte die Produkterstellung sequentiell, die Abteilungen Konstruktion, Arbeitsplanung und Fertigung wurden nacheinander und arbeitsteilig durchlaufen. Die Folge waren eine Vielzahl von Iterationsschleifen, insbesondere an der Schnittstelle zwischen Konstruktion und Arbeitsvorbereitung. Im Zeitalter sich stark verändernder Wettbewerbssituationen und Märkte sind möglichst kurze Entwicklungszeiten gefordert. *Milberg und Taiber (1998)* sehen dabei die „Reaktionszeit auf Veränderungen“ als bestimmendes Maß, um als Unternehmen erfolgreich zu bestehen. Messgrößen sind die Zeit von der Vorentwicklung zum Produktkonzept (Time to Product) sowie vom Produktkonzept zum marktreifen Produkt (Time to Market).

Dieser Forderung tragen verschiedenste Konzepte Rechnung, die unter dem Begriff der integrierten Produktentwicklung zusammengefasst werden (*Ehrlenspiel 1995, S. 176ff*). Durch den Einsatz von Projektteams

aus allen beteiligten Unternehmensbereichen und eines straffen Projektmanagements werden die verschiedenen organisatorischen Schnittstellen reduziert und der ständige Abgleich der Informationsflüsse zwischen den Abteilungen sicher gestellt. Formen dieser Vorgehensweisen sind Simultaneous Engineering oder auch Concurrent Engineering. Letzteres bezeichnete eine computergestützte, gleichzeitige Konstruktion von Objekten (*Bullinger 1996*). Derzeit werden Concurrent und Simultaneous Engineering häufig synonym verwendet, eine inhaltliche Trennung dieser Begriffe ist folglich laut *Eversheim und Schuh (1999, S. 7-125)* nur mehr bedingt sinnvoll.

Moderne Ansätze zielen auf eine integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Um die Reaktionsfähigkeit der Unternehmen auf das turbulente Unternehmensumfeld sicherzustellen, müssen wandlungsfähige Engineeringprozesse gestaltet und im Unternehmen eingeführt werden. *Reinhart und Grunwald (2000)* zeigen auf, wie dies mit Hilfe von definierten Prozessbausteinen für die integrierte Produktentwicklung und Montageplanung getan werden kann. Ein weiterer Ansatz dehnt die klassischen Ansätze des Simultaneous Engineering in die Bereiche der strategischen Planung aus. Dieses *kooperative Produktengineering (KPE)* umschließt die Bereiche Strategische Geschäftsfeldplanung, Produktentwicklung und Prozessplanung (*Tönshoff u. a. 2000*). Basis dieser Vorgehensweise sind ein Referenzmodell sowie definierte Gestaltungsmittel, um Teilaufgaben nach strukturierten Handlungsanweisungen zu lösen. Ziel ist es, den Produktentwicklungsprozess dynamisch an branchen- und unternehmensspezifische Erfolgsfaktoren anzupassen. Neben den organisatorischen Aspekten bauen Entwicklungsstrategien der Zukunft verstärkt auf rechnerbasierte Methoden (vgl. Kapitel 1.1). Diese Aspekte werden im Kapitel 2.3.1 näher erläutert.

2.2.2 Begriffsdefinition und Abgrenzung der Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens

Die Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens ist ein kleiner Teilbereich des Produktentstehungsprozesses. Zur Einordnung der weiteren Vorgehensweise sollen im Folgenden die notwendigen Begriffe definiert und der Betrachtungshorizont der Arbeit abgegrenzt werden.

Die **Fertigung** ist der Oberbegriff für alle organisatorischen und technischen Maßnahmen zur Erstellung von Material oder Erzeugnissen (VDI 1978, S. 135). Material aus Sicht der Produktion ist der Sammelbegriff für Werkstoffe, Halbzeuge, Teile und Gruppen, die zur Fertigung eines Erzeugnisses erforderlich sind (VDI 1978, S. 157).

Die **Arbeitsvorbereitung** ist das systematische Suchen und Festlegen von Zielen für die Fertigung. Es geht darum, Fertigungsaufgaben vorzubereiten, deren Durchführung zum Erreichen der Ziele erforderlich ist (VDI 1978, S. 138). Sie folgt im Produktentstehungsprozess der Konstruktion und dient als Vorbereitung von Fertigung und Montage (Abbildung 2.6). Nach *Dubbel u. a. (1997, S. S99)* umfasst die Arbeitsvorbereitung folgende Aufgaben: Fertigungstechnische Beratung, Methodenplanung, Materialplanung, Ablauf- und Zeitplanung, Betriebsmittelplanung sowie Kostenplanung. Die Hauptaufgabe ist die Erstellung des Arbeitsplans, der als Arbeitsunterweisung für die Fertigung dient. Die Arbeitsvorbereitung wird in zwei Bereiche unterteilt. Die **Arbeitsplanung** umfasst alle einmalig zu treffenden Maßnahmen. Im Rahmen der Arbeitsplanung wird „... festgelegt, was, wie, womit hergestellt werden soll“ (*Eversheim 1997, S. 3*). Die **Arbeitssteuerung** umfasst alle Maßnahmen, die zur Durchführung des Auftrags notwendig sind, insbesondere die Disposition und Überwachung der Aufträge (*Dubbel u. a. 1997, S. S101ff*). I

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Arbeitsplanung des Fertigungsverfahrens Laserstrahlschweißen betrachtet (Abbildung 2.6). Ein **Fertigungsverfahren** ist ein Verfahren zur Herstellung eines geometrisch bestimmten Körpers im Sinne der *DIN 8580 (1985)*. Diese Norm klassifiziert Fertigungsverfahren in sechs Verfahrenshauptgruppen. Das **Laserstrahlschweißen** ist der Hauptgruppe Fügen zugeordnet. Die weitere Einordnung ist: Schweißen – Schmelzschweißen – Schmelzschweißen durch Strahl – Laserstrahlschweißen (*DIN 1910 Teil 2, 1983*).

Produktentstehungsprozess

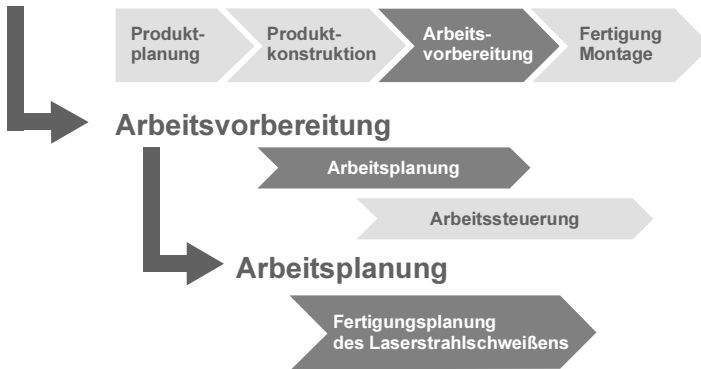


Abbildung 2.6: Abgrenzung des Themenfelds „Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens“

2.2.3 Planung von Schweißprozessen

Für den Einsatz des Laserstrahlschweißens in der Serienfertigung gibt es keine spezifische Vorgehensweise in der Fertigungsplanung. Aus diesem Grund wird zunächst die Planung konventioneller Schweißprozesse dargestellt. Anschließend werden im Abschnitt 2.2.4 die speziellen Anforderungen des Laserstrahlschweißens erläutert.

Ziel der Fertigungsplanung ist ein „technisch gut zu realisierender und gleichzeitig wirtschaftlicher Fertigungsablauf“ (Neumann und Kluge 1992, S. 4). Die Realisierbarkeit einer Schweißaufgabe wird durch die **Schweißbarkeit** eines Bauteils festgelegt. Sie ist gegeben, wenn „der Stoffschluss durch das vorgegebene Schweißverfahren bei Beachtung eines Fertigungsablaufs erreicht werden kann“ (Warnecke und Westkämper 1998, S. 170). Nach DIN 8528 Teil 1 (1973) tragen zur Schweißbarkeit Werkstoffauswahl, Konstruktion und Fertigung bei.

Regeln zur schweißgerechten **Konstruktion** finden sich in den einschlägigen Standardwerken, DVS-Merkblättern und Normen (vgl. z.B. Ruge 1985, Neumann 1996) sowie laserspezifisch bei Radaj u. a. (1994), Rick

(1998) und *Dilthey 2000* (S. 71ff). Der Laser bietet aufgrund seiner Eigenschaften eine Vielzahl an neuen konstruktiven Möglichkeiten, beispielsweise Schweißanschlüsse mit einer einseitigen Zugänglichkeit der Fügestelle. Der **Werkstoff** wird nach allgemeinen konstruktiven Richtlinien, nach Leichtbaukriterien sowie nach der Schweißbeignung ausgewählt. Die Schweißbeignung beinhaltet die resultierenden mechanisch-technologischen Eigenschaften der Schweißnaht, die vom Konstrukteur die aufgrund der vorgesehenen Lastfälle gestellten Anforderungen erfüllen müssen. Durch die **Fertigung** wird die Schweißmöglichkeit bestimmt. Diese ist dann gegeben, wenn „*die an einer Konstruktion aus gegebenem Werkstoff vorgesehenen Schweißverbindungen unter den gegebenen Fertigungsbedingungen fachgerecht ausgeführt werden können*“ (*Warnecke und Westkämper 1998, S. 172*). Die verschiedenen, in Abbildung 2.2 dargestellten Faktoren, die die Prozesseigenschaften und das resultierende Prozessergebnis beeinflussen, sind dabei weitere wichtige Randbedingungen.

Die Sicherstellung der Schweißbarkeit wird durch die Vorgabe eines **Arbeitsplans für die Fertigung** gewährleistet. Die Fertigungsplanung von Schweißprozessen ist ein Zusammenwirken der Bereiche Konstruktion, Berechnung, Fertigungsplanung, Schweißaufsicht, Fertigung und Qualitätssicherung (*Neumann und Kluge 1992, S. 9*). Ziel ist die Erstellung eines Arbeitsplans für die Fertigung, der alle zum Durchführen einer Fügeaufgabe notwendigen Angaben enthält. Diese *schweißtechnischen Fertigungsunterlagen* enthalten im Allgemeinen folgende Angaben (*Neumann und Kluge 1992, S. 64*):

- ◆ Schweißbeignung der Werkstoffe
- ◆ Geometrie der Schweißverbindungen (Baugruppen, Nahtanordnung, Nahtfolge)
- ◆ Qualitätskriterien für die Schweißverbindungen
- ◆ Schweißplan, der u. a. die zu verwendenden Schweißverfahren enthält
- ◆ Zusammenbauplan
- ◆ Vorrichtungen und Transportanlagen

◆ Maßnahmen zur Qualitätssicherung

Aufgrund der Besonderheiten des Laserstrahlschweißens, speziell des geringen Erfahrungswissens in den Planungsabteilungen, sind Iterationen im Planungsablauf zwischen Konstruktion und Fertigung notwendig. Die Konstruktion erstellt Zusammenbauplan und Stückliste, zudem werden die Schweißanschlüsse konstruktiv gestaltet und die dafür notwendigen Schweißverfahren festgelegt. Die Arbeitsvorbereitung erstellt den Arbeitsplan, insbesondere führt sie die Feinplanung der einzelnen Prozessschritte durch (*Neumann und Kluge 1992, S. 10ff*).

Außerdem werden in der Arbeitsvorbereitung die erforderlichen Handhabungs- und Transportvorrichtungen, insbesondere die Spannvorrichtungen, gestaltet. Anforderungen an eine Spannvorrichtung sind die Sicherstellung der räumlichen Lage eines Bauteils sowie die Aufnahme der beim Ausschweißen der Nähte auftretenden Kräfte. Diese Kräfte lassen sich mit analytischen Methoden nur in den seltensten Fällen berechnen und werden daher meistens basierend auf Erfahrungswerten angelegt (*Marfels und Schneider 1989, S. 6*).

In der Literatur sind nur wenige allgemeine Vorgehensweisen zur Auswahl von Spannvorrichtungen beim Schweißen zu finden. *Götz (1981, S. 89ff)* stellt eine Vorgehensweise für spanende Fertigungsverfahren vor, um Spannvorrichtungen aufgrund der Werkstückgeometrie, Bearbeitungsnotwendigkeit sowie Nutzungshäufigkeit auszuwählen. Für konventionelle Schweißverfahren kann sich der Fertigungsplaner auf eine Vielzahl an erfahrungsbasierten Regeln zur Auswahl von Spannsystemen stützen (vgl. *Neumann und Lübeck 1981, SME 1982, VDI-ADB 1992, Marfels und Schneider 1989*). Für das Laserstrahlschweißen fehlen bisher solche Erfahrungswerte.

2.2.4 Anforderungen des Laserstrahlschweißens an die Fertigung

Das Laserstrahlschweißen hat eine Reihe verfahrensspezifischer Vorteile. Der VDI-Leitfaden zur Lasermaterialbearbeitung (*VDI ADB 1990, S. 88*) nennt im Vergleich zu konventionellen Schweißverfahren als Vorteile eine schmale Nahtgeometrie, eine geringe Wärmeeinbringung,

geringen Verzug sowie eine hohe Bearbeitungsgeschwindigkeit. Weitere Vorteile sind die Vielzahl neuer Bauteilgestaltungsmöglichkeiten, die Anwendbarkeit auf verschiedenste Werkstoffe und die Möglichkeit des Fügens bei einseitiger Zugänglichkeit (*Dilthey 2000, S. 71*).

Diese Vorteile können nur dann produktiv genutzt werden, wenn eine Vielzahl von Einflussparametern aufeinander abgestimmt wird. *Hügel u. a. (2000, S. 71f)* beurteilen Laserstrahlschweißprozesse nach der erzielenden Prozessgeschwindigkeit und Produktqualität, die sich an der Funktion des Bauteils zu orientieren hat. Die Prozessgeschwindigkeit ist ein direktes Maß für den Wirkungsgrad des Prozesses. Unter Berücksichtigung dieser beiden Messgrößen können die verschiedenen Einflüsse in vier Gruppen gegliedert werden, die einerseits direkt die zu erzielenden Ergebnisse beeinflussen, andererseits untereinander wechselwirken (Abbildung 2.7).

Die **Laserquelle** bestimmt durch die Eigenschaften des erzeugten Strahls die Größe des Brennflecks an der Fügestelle und die dort herrschende Intensitätsverteilung. Die Laserquelle steht in Wechselbeziehung zu den weiteren Stellgrößen des Prozesses wie Zusatzwerkstoffe oder Schutzgas. Die Intensität im Brennfleck ist eine der bestimmenden Größen für das Laserstrahlschweißen (vgl. Kapitel 2.1.1). Die Auswahl der Laserquelle ist daher von strategischer Bedeutung. Bei der Feinplanung der Prozessparameter gewährleistet der Laser durch ausreichende Leistungsreserven sowie eine gute Fokussierbarkeit eine hohe Intensität im Fokus und eine große Prozesssicherheit.

Durch das **Bauteil** werden der Werkstoff und die zu realisierende Schweißnahtgeometrie festgelegt. Grundsätzlich ist ein mit konventionellen Verfahren schweißbarer Stahl auch mit dem Laser gut schweißbar (vgl. *Dilthey 2000, S. 51ff*). Für die Fertigungsplanung sind in diesem Zusammenhang die Nahtgeometrien von Interesse, die in der Fertigung mit den geforderten Qualitätsanforderungen realisiert werden müssen.

Aufbauend auf die gegebenen Strahleigenschaften und die geforderten Nahtgeometrien hat die Fertigungsplanung die Aufgabe, durch geeignete **Prozessgestaltung** sowie durch unterstützende Systemtechnik die geforderte Bauteilqualität prozesssicher darzustellen. Die Fertigungsplanung beeinflusst die Prozessgestaltung in der Regel durch die Feinpla-

nung der Vorschubgeschwindigkeiten und Intensitätsverteilungen an den einzelnen Fügestellen. Zusatzwerkstoff wird beim Laserschweißen wie bei konventionellen Schweißverfahren dazu verwendet, die Metallurgie des Schweißgutes und damit die Nahtform sowie die Festigkeitseigenschaften der Schweißnaht gezielt zu beeinflussen (*Dilthey 2000, S. 8; Petring u. a. 1999, S.29ff*). Darüber hinaus ist der Zusatzdraht eine qualitätssichernde Maßnahme, um toleranzbedingte Fügespalte zu überbrücken (*Dilthey 2000, S. 8; Reek 2000*).

Die **Systemtechnik** umfasst einerseits die Gestaltung der Spanntechnik. Andererseits ist sie eine weitere Möglichkeit der Fertigungsplanung, um den Fügeprozess prozesssicher zu realisieren. Der Laser stellt aufgrund des kleinen Brennfleckdurchmessers sehr hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Fokuspositionierung relativ zur Werkstückoberfläche. Der Fokus muss exakt an mit Toleranzen behafteten dreidimensionalen Konturen geführt werden (*vgl. Bauer 1999, Backes 1997*). Im Automobil-

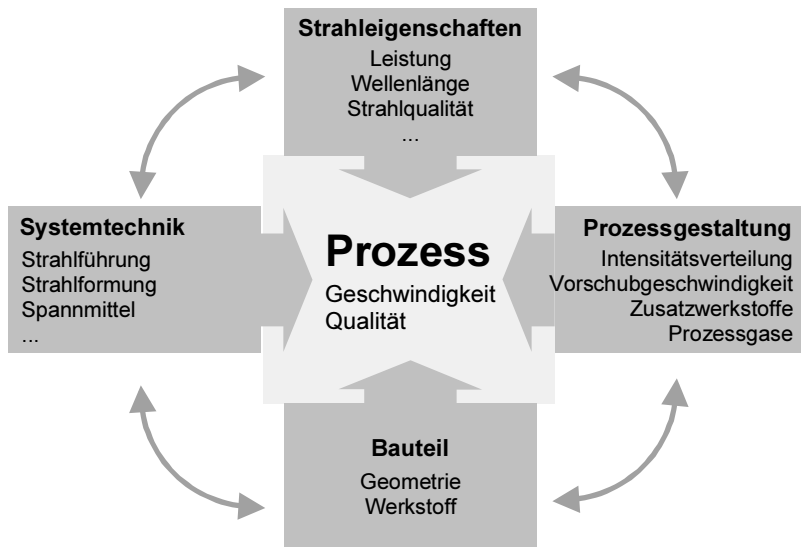


Abbildung 2.7: Einflussfaktoren auf den Laserstrahlschweißprozess (*Hügel u. a. 2000, S. 72f*)

rohbau bedeutet dieses eine deutliche Verkleinerung des Toleranzbereichs der Bauteile, meistens von einigen mm für das Punktschweißen in den Submillimeterbereich für das Laserstrahlschweißen. Es erfordert daher auf die spezifische Aufgabe abgestimmte Systemtecknelemente. Neben der Verwendung von Zusatzdraht können die tolerierbaren Abweichungen des Bauteils von der Sollgeometrie durch die Gestaltung der Spanntechnik reduziert werden, beispielsweise durch die Verwendung einer flexiblen Rollenführung (Rippl 1997, Larsson 1994).

Die Fertigungsplanung beeinflusst grundsätzlich die vier Komponenten Strahleigenschaften, Prozessgestaltung, Bauteilgestaltung und Systemtechnik. Aus diesem Prozess resultiert die Schweißanweisung für das Laserstrahlschweißen. Sie ist durch die *DIN EN ISO 9956-11 „Anforderung und Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe, Teil 11: Schweißanweisung für das Laserstrahlschweißen“* (1996) fixiert. Der technische Inhalt der Schweißanweisung umfasst insgesamt 15 Punkte, die von allgemeinen Angaben über Herstellerangaben bis hin zu spezifischen Prozessparametern reichen.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen folgende Fragestellungen näher beleuchtet werden:

- ◆ Nahtform (Abschnitt 4.5 der Schweißanweisung)
- ◆ Zusammenbau- und Schweißreihenfolge (4.8)
- ◆ Spannvorrichtungen (4.9)
- ◆ Schweißparameter (4.13)

Die Strahlquelle wird im Abschnitt 4.11 „Vorrichtungen“ festgelegt. Durch die maximale Ausgangsleistung bestimmt sie maßgeblich die wählbaren Prozessparameter in der Fertigungsplanung. Die Nahtform wird in der Konstruktion gestaltet. Die Fertigungsplanung hat im Anschluss daran die Aufgabe, die geforderte Geometrie prozesssicher zu realisieren. Zusammenbau- und Schweißreihenfolge, Spannvorrichtungen und Schweißparameter stehen in intensiver Wechselwirkung zueinander (vgl. Tabelle 2.1). Die Ermittlung der verschiedenen Angaben erfolgt derzeit mit Hilfe aufwändiger experimenteller Untersuchungen. Diese sind mit hohen Kosten verbunden, da entweder auf die Serienanlage selbst oder

zusätzliche, parallel zur Serie aufgebaute Anlagen zurückgriffen werden muss. Die Prozessentwicklung sowie die Qualifizierung der Prozesse für die Serie erfolgt auf „empirischer Basis unterstützt von Versuchen“ (Radaj 1999, S. 1). Aus diesem Grund ist die Untersuchung dieser Wechselwirkungen ein wesentlicher Fokus dieser Arbeit.

Die Fragestellung des Zusatzwerkstoffs wird im Rahmen der Arbeit ausgeklammert. Dieser dient der Verbesserung der metallurgischen Nahteigenschaften und steht im engen Zusammenhang mit den konstruktiven Aspekten der belastungsgerechten Auslegung und Gestaltung von Bauteilen. Außerdem dient der Zusatzdraht dem Ausgleich von Toleranzen. Aufgrund des damit zusammenhängenden hochkomplexen Themenfelds der Toleranzanalyse und -synthese soll dies im Folgenden nicht weiter behandelt werden.

2.3 Simulationseinsatz für das Laserstrahlschweißen

In Kapitel 1.1 wurde die Vision eines durchgängigen Simulationseinsatzes auf verschiedenen Planungsebenen dargelegt, von der Untersuchung der Produkteigenschaften bis hin zu experimentellen Studien an virtuellen Produktionsprozessen. Derzeit werden für die Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens die Abläufe in den Produktionsanlagen simuliert, nicht aber die Fertigungsverfahren selbst. Dennoch steht eine Vielzahl an Modellen für die Simulation des Laserstrahlschweißens zur Verfügung, die nur selten industriell eingesetzt werden. Aufbauend auf einer Darstellung des Rechnereinsatzes im Produktentstehungsprozess sollen daher im Folgenden der Rechnereinsatz in der Fertigungsplanung sowie die verschiedenen Modelle für das Laserstrahlschweißen beschrieben werden.

2.3.1 Simulation im Produktentstehungsprozess

Die CA-Technologien sind ein Erfolgsfaktor für die Produktentstehung (vgl. Kapitel 1). Abbildung 2.8 stellt die zeitliche Entwicklung des CA-Einsatzes in den Unternehmen dar. Aufgetragen ist das Potenzial der eingesetzten Methoden zur virtuellen Absicherung von Produkt und Produktion über der Zeit. Grundlage ist der zu Anfang der 90er Jahre

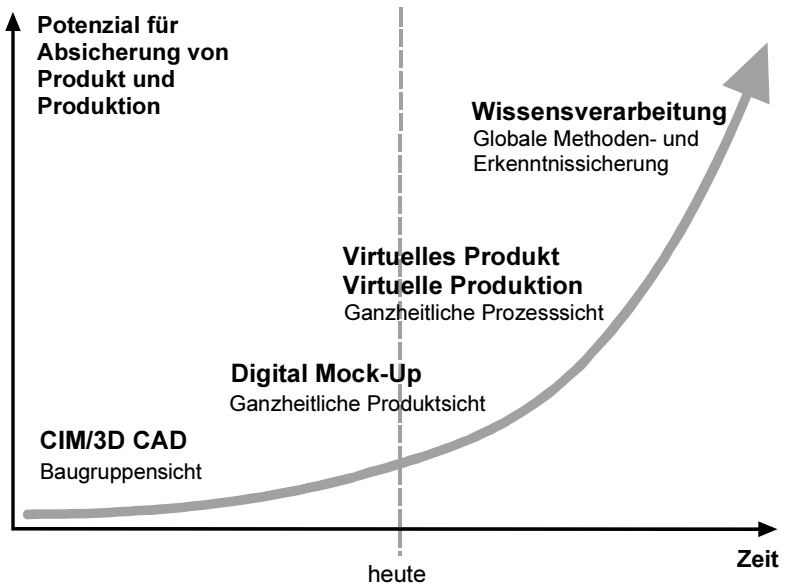


Abbildung 2.8: CA-Einsatz im Unternehmen (nach Storath u. a. 1998)

entwickelte Gedanke der rechnerintegrierten Produktion (RIP) bzw. des Computer Integrated Manufacturing (CIM). Wichtigste Innovation des CIM-Gedankens war die „Realisierung einer funktionalen Gesamtintegration mit Hilfe von Informationstechnologie“ (VDI-CIM 1990, S. 3). Der Einsatz von 3D-CAD stand im Zusammenhang mit den verschiedenen Strategien. Produkteigenschaften konnten auf Basis von 3D-Zeichnungen zumindest in Ansätzen überprüft werden, die Kopplung zwischen CAD und der NC-Programmierung stellte einen ersten Schritt zur Einbindung der Produktion in die Produktentwicklung dar.

Die Weiterentwicklung davon sind virtuelle Montage- und Einbauuntersuchungen, die unter dem Begriff des Digital Mock-up (Reinhart und Praun 1999, Müller und Reindl 1999, Koytek und Gaube 1999) in der Industrie Einzug halten. Derzeit sind verschiedenste Untersuchungen an digitalen Modellen zwar fester Bestandteil des Produktentstehungsprozesses, die Anzahl notwendiger Hardwareprototypen konnte jedoch noch nicht grundlegend reduziert werden. Die Vision ist ein einziger Hardwareproto-

typ am Ende der verschiedenen Entwicklungsprozesse, der als Produkt an den Kunden ausgeliefert werden kann (*Storath u. a. 1998*).

Konzepte wie das „Virtuelle Produkt“ (*Spur & Krause 1997*) oder die Idee des „Digital Car“ (*Milberg und Taiber 1998*) sind Beispiele für die Integrationskonzepte der Softwarewerkzeuge, die in den Unternehmen verfolgt werden, um der Vision der hardwarelosen Absicherung von Produkt und Produktion ein Stück näher zu kommen. Sie stellen eine Weiterentwicklung der CIM- und DMU-Gedanken dar und haben die Vision des rein virtuellen Produktentstehungsprozesses. *Reinhart u. a. (1999)* definieren die Virtuelle Produktion als die Planung, Evaluierung und Steuerung von Produktionsprozessen und -anlagen mit Hilfe digitaler Modelle. Ziel ist es, Simulationstechnologien auf allen Ebenen der Produktion einzusetzen, von der Planung der Abläufe über die Maschinen und Anlagen bis hin zu den technologischen Fertigungsprozessen. Entlang der Prozessketten reicht die Virtuelle Produktion von ur- und umformenden Fertigungsverfahren zur Herstellung einzelner Bauteile bis hin zu Füge- und Montageprozessen für das Gesamtprodukt. Diese Schritte werden durch Rechnerwerkzeuge entwickelt und abgesichert. Die Virtuelle Produktion basiert auf einem durchgängigen Datenaustausch zwischen den verschiedenen Werkzeugen und Betrachtungsebenen von der Fabrik und ihren Abläufen, den einzelnen Produktionszellen und -anlagen bis hin zu den eingesetzten Fertigungsverfahren.

2.3.2 Simulationseinsatz in der Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens

Vision der Unternehmen ist die Absicherung aller in der Produktion eingesetzten Fertigungsverfahren durch Simulation. Ziel ist es, umfangreiche experimentelle Untersuchungen zu reduzieren und durch schnelle, kostengünstigere Studien mit Hilfe von Computersimulationen zu ersetzen (*Thomke 2001, S. 69*). Von dieser Vision des umfassenden Einsatzes von Rechnerwerkzeugen zur Absicherung des Laserstrahlschweißens ist der derzeitige Stand der Technik weit entfernt. Simulationswerkzeuge werden überwiegend für die Überprüfung der Durchführbarkeit von Schweißprozessen, insbesondere von automatisierten Schweißverfahren, eingesetzt.

Als Modellierungsmethode kommt die 3D-Bewegungssimulation zum Einsatz. Basierend auf 3D-CAD-Daten von Produkt und Produktionsanlage werden in der 3D-Simulation kinematische Zusammenhänge und Wechselwirkungen in der betreffenden Produktionsanlage oder -zelle überprüft (Geyer 1997, Kugelmann 1999). Für die Lasermaterialbearbeitung wurde von verschiedenen Autoren aufgezeigt, wie die 3D-Simulation zur Roboterbahnplanung für das Laserstrahlschneiden verwendet werden kann. Ziel ist es, die gesamte Roboterbewegung offline, außerhalb des Fertigungsbetriebs, zu programmieren und zu testen (vgl. u. a. Backes 1997, Bauer 1999).

Abbildung 2.9 zeigt einen derzeit üblichen Ablauf für die Fertigungsplanung von automatisierten Laserstrahlschweißprozessen in der Serienproduktion. Die Fertigungsplanung erhält die Bauteilgeometrien aus der Konstruktion und entwickelt mit ihr gemeinsam einen Zusammenbauplan. Anschließend wird die 3D-Simulation eingesetzt, um die Laserstrahlschweißanlage zu prüfen. Dafür nimmt sie eine zentrale Stellung ein, um Zugänglichkeit und Kollisionen zu überprüfen. Die Simulation ist in diesem Zusammenhang in der Planung von Schweißaufgaben der „unabdingbare erste Schritt“ (Hornig 2000, S. 30).



Abbildung 2.9: Ist-Ablauf in der Fertigungsplanung von automatisierten Schweißprozessen

2.3.3 Simulation von Schweißprozessen

Für die Untersuchung von Fertigungsverfahren steht eine Vielzahl verschiedenster Modellierungsmethoden und Simulationswerkzeuge zur Verfügung. Im Folgenden wird daher eine kurze Übersicht über die verschiedenen Modelle gegeben. Daran anschließend wird der Stand der Technik in der Schweißsimulation dargestellt und aufgezeigt, welche der relevanten Größen für die Fertigungsplanung mit Hilfe von Simulationsmodellen ermittelt werden können.

Modellierung von Fertigungsverfahren

Modellierungsmethoden für Fertigungsverfahren lassen sich nach der Art der Modellbildung in vier Gruppen aufteilen (*Vollertsen 1996, S. 89ff*):

- ◆ **Qualitative Modelle:** Qualitative Beschreibung der Abhängigkeiten eines Systems oder des Prozessablaufs.
- ◆ **Physikalische Modelle:** Reale Nachbildung des Gesamtsystems oder von Teilbereichen des Systems, beispielsweise mit Hilfe der Ähnlichkeitstheorie. Aussagen werden mit Hilfe real durchgeführter Experimente gewonnen.
- ◆ **Analytische Prozessmodelle:** Exakte mathematische Beschreibung des Prozesses in Form geschlossener mathematischer Gleichungen.
- ◆ **Numerische Prozessmodelle:** Analytische Beschreibung des Prozesses. Iterative numerische Lösung der Gleichungen durch Diskretisierung der zeitlichen und räumlichen Vorgänge.

Wichtigstes Werkzeug für die Modellierung von Fertigungsverfahren sind numerische Verfahren, insbesondere die Methode der Finiten Elemente (FEM). Die FEM ist ein numerisches Näherungsverfahren zur Lösung mathematischer Gleichungen, die die Reaktion eines physikalischen Systems auf externe Lasten vorhersagen (nach *Burnet 1987, S. 3*).

Um mit Hilfe der FEM eine Aufgabenstellung zu lösen, sind die drei Schritte Modellbildung (Preprocessing), Berechnung (Solving) und Auswertung (Postprocessing) durchzuführen (*Fröhlich 1995, S. 36*). Im Preprocessing wird die zu untersuchende Geometrie diskretisiert, d.h. das Werkstoffkontinuum wird in einzelne Elemente aufgeteilt, die durch

Knoten verbunden sind. Die zu untersuchende Fragestellung wird durch die Idealisierung von Randbedingungen und Belastungen sowie die Angabe der Werkstoffkennwerte auf das Modell aufgebracht. Beim Solving (Gleichungslösung) wird auf Basis der Diskretisierung und der Randbedingungen eine Gleichungsmatrix aufgestellt und iterativ numerisch gelöst. Abschließend werden im Postprocessing die Ergebnisse ausgewertet und grafisch aufbereitet.

Die Finite Elemente-Simulation ist für viele Anwendungsfelder seit vielen Jahren Stand der Technik. Beispiele sind strukturmechanische Festigkeits- und Steifigkeitsberechnungen, Crashuntersuchungen oder Schwingungsanalysen (vgl. *Zmazal und Meinschmidt 1999*). In den meisten Fällen dient die FE-Simulation dazu, die Eigenschaften der Produkte vorab zu untersuchen, um experimentelle Versuche an realen Bauteilen zu reduzieren. Für Fertigungsverfahren wird die FE-Simulation erst in Teilbereichen industriell eingesetzt. Wichtigstes Anwendungsfeld ist die Simulation von Umformprozessen, insbesondere des Schmiedens und des Tiefziehens. *Tekkaya (1998, S. 53)* hält fest, dass die Umformsimulation im Blechbereich keine „*akademische Übung*“ mehr ist. Für den Karosseriebau wird die Umformsimulation zunehmend zu einem entwicklungsbegleitenden Werkzeug in Planung und Konstruktion (*Doege und Dohrmann 1998; Hoffmann u. a. 1998*).

Modellierung des Laserstrahlschweißens

Wie in Kapitel 2.1 beschrieben ist das Laserstrahlschweißen ein hochkomplexer Prozess. Er ist gekennzeichnet durch die Wechselwirkung unterschiedlicher physikalischer Vorgänge aus den Bereichen der Thermodynamik, Mechanik sowie der Werkstoffkunde. Folglich existiert eine Vielzahl von Modellen, um die verschiedenen Teilaspekte abzubilden. Diese Modelle verfolgen unterschiedliche Zielrichtungen.

Radaj (1999, S. 2f) klassifiziert die Schweißprozesssimulation in die Simulation des Fertigungsverfahrens, die Simulation der Vorgänge im Werkstoff sowie in die Berechnung der aus dem Prozess resultierenden konstruktiven Eigenschaften des Produkts. *Rother (1997)* gibt einen Überblick über die Simulation von Schweißverbindungen bei mechanischer Belastung. Die Modelle, die für die Simulation von Schweißprozes-

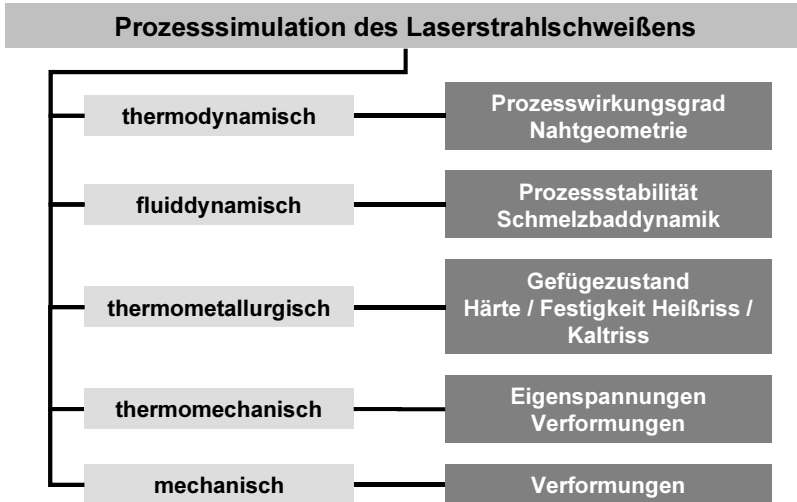


Abbildung 2.10: Ansätze zur Simulation von Schweißprozessen (nach Rick 2001, S. 39ff)

sen entwickelt wurden, behandeln zumeist einzelne Teilaspekte. Rick (2001, S. 39ff) klassifiziert diese Modelle nach ihrem Betrachtungshorizont in thermische, fluiddynamische, thermometallurgische, thermomechanische und mechanische Ansätze (Abbildung 2.10). Eine umfassende Bibliographie sowie eine kurze Beschreibung der verschiedenen Modelle gibt Mackerle (1996). Hügel u. a. (1998) stellen die Bedeutung der verschiedenen Modellierungsverfahren für die Prozessentwicklung dar.

Bezüglich der Fragestellungen beim Laserstrahlschweißen lassen sich die Modelle charakterisieren in

- ◆ Prozessmodelle der Energieeinkopplung, der Dampfkapillare und der damit zusammenhängenden thermophysikalischen Vorgänge,
- ◆ thermomechanische Modelle für die Berechnung von Eigenspannungen und Verzug sowie die
- ◆ Modellierung resultierender mechanischer Eigenschaften des Bauteils.

Für die Fertigungsplanung sollte die Simulation, aufbauend auf der Schweißanweisung für das Laserstrahlschweißen nach *DIN EN ISO 9956-11 (1996)*, bei der Festlegung folgender Größen eine Unterstützung bieten:

- ◆ Schweißparameter und Nahtform,
- ◆ Zusammenbau- und Schweißreihenfolge sowie
- ◆ Spannvorrichtungen.

Verglichen mit dieser Zielsetzung zeigt sich ein sehr heterogenes Bild der derzeit vorhandenen Ansätze.

Am weitesten ausgereift sind Modelle, die die **Prozessparameter** sowie die daraus **resultierende Nahtgeometrie** berechnen können. Diese haben auf der Basis analytischer Modelle stark zur Erweiterung des Prozessverständnisses beigetragen. *Beck (1996)* konnte mit mehreren analytischen Ansätzen die Mechanismen der Energieeinkopplung aufzeigen. Weitere Ansätze mit ähnlicher Zielrichtung stammen von *Kaplan (1994)*, *Lampa u. a. (1997)* sowie insbesondere von der Forschergruppe um *Sudnik* (vgl. *Sudnik u. a. 1996*, *Sudnik u. a. 1998*, *Sudnik u. a. 2000*). *Mohanty und Mazumder (1997)* beschreiben ein mathematisches Modell für die Keyholeausbildung sowie die Umsetzung in einen Arbeitsplatz mit graphischer Benutzeroberfläche.

Aufbauend auf eine Modelloptimierung durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen ermittelt der Ansatz von *Sudnik* sehr exakt die Geometrie des Schmelzbades unter Berücksichtigung der Energieabsorption sowie der Schmelzbaddynamik. *Radaj u. a. (1998)* stellen exemplarisch eine industrielle Anwendung für dieses Modell dar, in der auf Basis des analytischen Modells eine Wärmequelle für anschließende thermomechanische Berechnungen ermittelt wird. Weitere Anwendungen finden sich in *Radaj (1999, S. 88ff)*, u. a. analytisch berechnete Schmelzbadquerschnitte für verschiedene Anwendungsfelder, die sehr gut mit experimentellen Daten übereinstimmen. In verschiedensten Anwendungsfällen wurde das von *Sudnik* entwickelte Modell für die Praxis eingesetzt. Beispielsweise zeigen *Beck und Breitschwert (1997)* auf, wie die Prozesssimulation für die Qualifizierung des Laserstrahlschweißens von Getriebebauteilen verwendet werden kann.

Neben den analytischen Ansätzen gibt es eine Vielzahl von Modellen, basierend auf der Finite Elemente-Methode, um Prozessparameter zu untersuchen. *Rick (2001)* stellt ein selbstkonsistentes Modell zur Ermittlung von Nahtgeometrie und Prozesswirkungsgrad vor. *Pitscheneder u. a. (1996)* untersuchen die Schmelzbadeigenschaften mit Hilfe der numerischen Simulation der Fluidodynamik. Ziel ist es, die Nahtqualität durch die Prozessführung zu verbessern.

Weitere in der Forschung entwickelte Modelle für die Schmelzbaddynamik können die Genauigkeit der in der Simulation erzielten Ergebnisse deutlich steigern, Beispielsweise für die Berechnung der Schmelzbadgeometrie oder die Untersuchung der durch die Schmelzbaddynamik bedingten Nahtfehler (*Fuhrich u. a. 1999, Kern u. a. 1998*). Aufgrund der hohen Komplexität der Modelle ist eine Anwendung in der industriellen Praxis nur sehr bedingt möglich.

Mit Hilfe berechneter Zeit-Temperaturverläufe im Werkstück können die metallurgischen Eigenschaften von Naht und Wärmeeinflusszone ermittelt werden. Wichtige Ergebnisse sind die Gefügebestandteile sowie die daraus resultierenden Härte- und Festigkeitskennwerte. Für konventionelle Schweißprozesse geben *Bhadeshia und Svensson (1993)* einen Überblick über die vorhandenen Modelle. *Buchmayr (1991, S. 5-1ff)* beschreibt die Einbindung dieser metallurgischen Modelle in Computersimulationen. Das Modell von *Leblond und Devaux (1984)* basiert auf einem semiempirischen Ansatz und wurde zur Berechnung der verschiedenen metallurgischen Phasen in ein FE-System eingebunden. *Rick (2001, S. 80f)* wendet dieses Modell für das Laserstrahlschweißen an, allerdings werden deutlich vom Experiment abweichende Härtewerte ermittelt. Bessere Werte sind zu erwarten, wenn basierend auf speziellen Schweiß-ZTU-Diagrammen (vgl. *Dilthey 2000, S. 23ff, Seyffarth und Hoffmann 1999*) mathematische Modelle für die beim Laserstrahlschweißen auftretende Kurzzeitmetallurgie entwickelt werden. Einen ähnlichen mathematischen Ansatz für die temperaturabhängige Ausbildung der metallurgischen Phasen bei Aluminiumlegierungen entwickelten *Myhr und Grong (1991)*. *Häuser u. a. (1999)* beschreiben die Anwendung dieses Modells bei der thermomechanischen Simulation des Laserstrahlschweißens. Dieses Modell liefert zufriedenstellende Ergebnisse, ohne jedoch laserspezifische Besonderheiten bei der Metallurgie zu berücksichtigen.

Ansätze zur Nutzung der Simulation für die **Erstellung des Schweißplans** sowie zur **Gestaltung der Spanntechnik** werden derzeit nicht oder nur in Teilaspekten behandelt. Mit Hilfe thermomechanischer Modelle können Eigenspannungen und Bauteilverzug beim Schweißen auf Basis der Laserparameter ermittelt werden. *Otto (1997)* nutzt sowohl thermomechanische als auch rein thermische Modelle, um die Vorgänge am Beginn und Ende einer Schweißnaht, so genannte „*transiente Prozesse*“ (*Otto 1997, S.11f*), zu untersuchen. Mit der gleichen Art der Modellierung wurde das Laserstrahlschweißen an einer einfachen 3D-Kontur abgebildet, um die Prozessführung zu verbessern (*Geiger und Otto 1996*). Andere thermomechanische Simulationsmodelle beschränken sich auf Bauteilausschnitte (*Ahmanache u. a. 1996*) oder einfache Bauteilgeometrien mit relativ kurzen Schweißnahtlängen (*Hillebrand u. a. 1995, Hillebrand 1997, Carmingani u. a. 1999, Kaßner und Wohlfahrt 1999*). *Bergmann und Hilbinger (1998)* berechnen das thermomechanische Verhalten von Aluminiumblechen, insbesondere die Ausbildung von Heißrissen beim Schweißen in Randlage. Zugrunde liegt ein Werkstoffmodell, das die Rissbildung über eine Anpassung des E-Moduls in das Modell integriert. Die Prozesssicherheit konnte mit Hilfe dieses Modells durch eine Anpassung der Wärmeleitung verbessert werden. Beispielsweise beschreiben *Haferkamp u. a. (1997)* die Qualifizierung des Laserstrahlschweißens mit Hilfe von Grundlagenuntersuchungen, die sich auf die Berechnung der mechanisch-technologischen Schweißnahteigenschaften stützen. Darüber hinaus wird das Crashverhalten als Sonderfall der dynamischen Belastung untersucht.

Mit der thermomechanischen Simulation größerer Strukturen haben sich *Radaj u. a. (1998)* beschäftigt. Das Schmelzbad wird mit Hilfe des analytischen Modells von *Sudnik u. a. (1998)* berechnet und in Form einer Solidusfläche vorgegeben. Anschließend findet eine thermomechanische Simulation des Gesamtbauteils statt, wobei die Form des Schmelzbades aufgrund der festen Vorgabe der Solidusfläche unverändert bleibt. Diese Methode liefert gute Ergebnisse, solange die Nahtgeometrie konstant bleibt, berechnet aber zu hohe Eigenspannungen, sobald im Nahtbereich Stege oder andere geometrische Abweichungen auftreten. Ebenfalls mit der thermomechanischen Simulation komplexer Strukturen beschäftigt sich die Forschergruppe um *Goldak* (vgl. *Goldak u. a. 2000*). Verschiedene, komplexe Strukturen werden aufbauend auf

eigenentwickelten FE-Verfahren berechnet, um die Mikrostruktur und die thermischen Spannungen zu ermitteln. Zudem beschäftigen sich die Autoren mit der Real Time Computational Weld Mechanics. Vorgestellt werden verschiedene Verfahren, die auf einer Kombination unterschiedlich detaillierter FE-Netze aufsetzen (Goldak u. a. 1999). Die vorgestellten Methoden sind sehr ausgereift, benutzen jedoch keine kommerziell verfügbare FE-Systeme. Voss u. a. (1998) sowie Kaßner und Wohlfahrt (1998) haben verschiedene Modellierungstechnologien in kommerziellen Systemen verwendet, um die Rechenzeit zu reduzieren. Erreicht wurde eine Verringerung um den Faktor 3 bis 4 (Kaßner und Wohlfahrt 1998, S. 33).

Die thermomechanische Berechnung bildet die Vorgänge im Werkstück sehr genau ab. Allerdings ist der Bedarf an Rechenzeit und Speicherplatz sehr hoch. Für große Strukturen, beispielsweise Elemente einer Fahrzeugkarosserie, werden daher Ersatzmodelle eingesetzt, um den Verzug oder die Eigenspannungen qualitativ aufzuzeigen. Radaj (1992, S. 198ff) bezeichnet diese Methode als Eigenspannungsquellmodell, bezugnehmend auf die Definition der Schrumpfung im Nahtbereich als Eigenspannungsquellen (vgl. Kapitel 2.1.2.1). Murakawa u. a. (1998, S. 598ff) nennen eine ähnliche Methode „conceptual modelling“, mit der verschiedene Erkenntnisse zum Bauteilverhalten beim Schweißen erlangt werden können.

Die Anwendung der verschiedenen Modelle für Planungs- und andere übergreifende Aspekte haben nur wenige Autoren dargestellt. Für die Prozesssimulation stellen Decker u. a. (1997) den Nutzen der Simulation für reale Schweißprozesse am Beispiel des Laserstrahl- und des WIG-Schweißens dar. Die Autoren sehen bereits großen Nutzen in der Simulation, bemerken allerdings auch den stets vorhandenen Aufwand an Parameteranpassungen. Kadivar u. a. (2000) beschreiben, wie für eine spezifische Schweißnaht die Schweißfolge mit Hilfe der Finite Elemente-Methode optimiert werden kann. Die Autoren zeigen aufbauend auf verschiedenen, die Einsatzmöglichkeiten des Modells stark einschränkenden Annahmen auf, wie mit Hilfe dieses Modells der Verzug durch eine Veränderung der Schweißfolge minimiert werden kann.

3 Defizite und Anforderungen

Die Schweißprozesssimulation steht noch an der Schwelle zur industriellen Nutzung (Radaj 1999, S. 165). Dies hat verschiedene Gründe. In diesem Kapitel werden daher allgemeine Anforderungen der Produktionstechnik an ein Prozessmodell definiert (Kapitel 3.1). Darauf aufbauend werden in Kapitel 3.2 die Defizite vorhandener Ansätze formuliert, um in Kapitel 3.3 die konkreten Anforderungen aus dem Einsatz für die Fertigungsplanung abzuleiten.

3.1 Anforderungen an ein Prozessmodell für den Einsatz in der Produktionstechnik

„An object A is a model of an object B for an observer C if the observer can use A to answer questions that interest him about B“ (Minsky 1965).

Die Definition von Minsky beinhaltet zwei grundlegende Aspekte eines Modells (Boehmer 1997, S. 5): Ein Modell besitzt **Abbildungsfunktionalität**. Der Originalsachverhalt wird durch bestimmte Annahmen basierend auf Fachkenntnissen im Modell abgebildet. Die Gestaltung des Modells hängt entscheidend davon ab, für welche Anwendung das Modell erarbeitet werden soll (**Zweckgebundenheit**).

„Ein Modell ist ein bewusst konstruiertes Abbild der Wirklichkeit, das auf der Grundlage einer Struktur-, Funktions- oder Verhaltensanalogie zu einem entsprechenden Original eingesetzt bzw. genutzt wird, um eine bestimmte Aufgabe zu lösen, deren Durchführung am Original nicht oder zunächst nicht möglich oder zweckmäßig ist“ (Klaus und Buhr 1975).

Diese „pragmatische Definition“ (Dangelmaier 1999, S. 11) des Modellbegriffs beschreibt ein weiteres, wichtiges Ziel für ein Prozessmodell. Ein Modell muss in der Lage sein, experimentelle Untersuchungen am Originalprozess und den Originalanlagen zu ersetzen, wenn diese Studien aufgrund des Zeit- und Kostenaufwandes oder auch aufgrund der fehlenden Beobachtbarkeit des Fertigungsverfahrens nicht möglich sind. Ein Ersatz von Experimenten im Originalsystem ist nur dann möglich, wenn alle relevanten physikalischen Vorgänge im Prozessmodell in angemessener **Detailtreue** abgebildet werden (Trossin 1999, S. 116f).

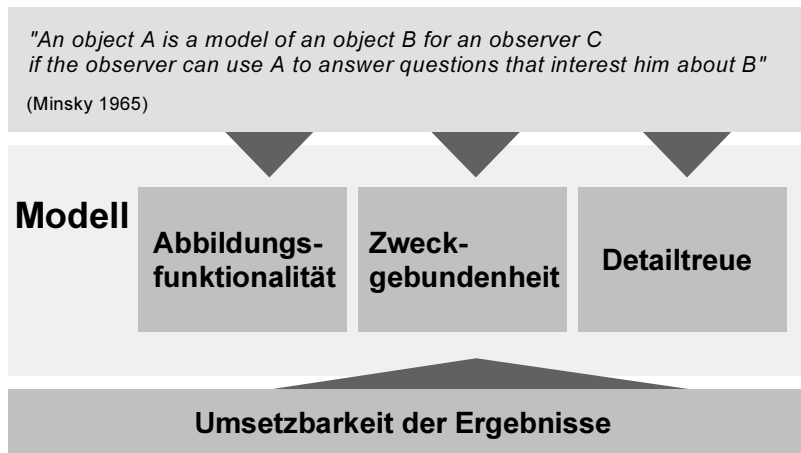


Abbildung 3.1: Anforderungen an ein Prozessmodell

„Simulation ist Nachbildung eines dynamischen Prozesses in einem Modell zum Sammeln von Erkenntnissen, die dann in der Realität umgesetzt werden können“ (VDI 3633 1993).

Eine Anforderung an das Prozessmodell ist daher die **Umsetzbarkeit der Ergebnisse** in die produktionstechnische Praxis. Für den Einsatz in der Produktionstechnik konkretisiert Trossin (1999, S. 122) die Anforderungen an ein Modell eines Fertigungsverfahrens als

- ◆ Experimentierfähigkeit,
- ◆ Erkenntnisgewinn abseits der Serienfertigung,
- ◆ Untersuchung des Prozesses auf der Ebene der physikalischen Wechselwirkungen,
- ◆ quantitative Bestimmung aller prozessrelevanten physikalischen Größen,
- ◆ Erfassung möglichst aller relevanten Prozesseigenschaften sowie
- ◆ kein Expertenwissen für die Versuchsdurchführung notwendig.

Von besonderer Bedeutung ist die Experimentierfähigkeit, also die Fähigkeit des Modells, durch Variation verschiedener Eingangs- und Randbedingungen Parameterstudien zu betreiben. Ein Modell, das diese Kriterien erfüllt, wird als Prozessprototyp bezeichnet. Expertenwissen ist in diesem Zusammenhang als Detailwissen zur Funktionsweise des Simulationssystems zu sehen. Die Simulation soll für die Experten der Planungs- und Entwicklungsabteilungen einsetzbar sein, die kein detailliertes Wissen über die verwendete Simulationstechnologie verfügen.

3.2 Bewertung des Standes der Technik

Kapitel 2 erläutert den derzeitigen zugänglichen Stand der Technik innerhalb der für diese Arbeit wichtigen Themenfelder. Aufbauend auf dem Planungsvorgehen von Schweißprozessen und den spezifischen Anforderungen des Laserstrahlschweißens an die Fertigung wurden die für den Simulationseinsatz relevanten Fragestellungen untersucht.

Das Laserstrahlschweißen ist ein hochkomplexes Fertigungsverfahren. Es kann nur dann erfolgreich in der Serienfertigung eingesetzt werden, wenn Produkt, Fertigungsverfahren und Fertigungsmittel konsequent aufeinander abgestimmt werden. Dies erfolgt derzeit normalerweise unter großem experimentellem Aufwand und daraus resultierenden hohen Kosten.

Die vorhandenen Ansätze der Simulation weisen nach, dass die FE-Methode für die Abbildung des Laserstrahlschweißens ein geeignetes experimentierfähiges Werkzeug ist. Für den Einsatz in der Produktionstechnik erfüllen die FE-Modelle die Anforderungen weitestgehend. Der Prozess wird auf der physikalischen Ebene untersucht, die Methode ist geeignet um Parameterstudien zu betreiben. Die vorhandenen Lösungen beschränken sich aber auf einzelne, spezifische Fragestellungen. Fertigungstechnische Aspekte, beispielsweise die Auslegung von Fertigungsmitteln oder die Betrachtung der Wechselwirkung großer Strukturen mit der Spanntechnik, werden in den vorhandenen Simulationsmodellen nicht oder nur in Ausschnitten betrachtet.

→ Defizit:

Eingeschränkte Einsatzmöglichkeiten der Simulation zur Untersu-

chung der relevanten Fragestellungen in der Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens

Unter Berücksichtigung dieser Fragestellungen müssen die vorhandenen Simulationsmodelle qualifiziert und gezielt zu einem Modellierungskonzept weiterentwickelt werden, um die Aufgaben der Fertigungsplanung mit Hilfe der Simulation zu lösen.

→ Defizit:

Fehlende Methode zur Lösung der Aufgaben in der Fertigungsplanung mit Hilfe von Simulationsmodellen

3.3 Anforderungen der Fertigungsplanung an die Simulation des Laserstrahlschweißens

Aufbauend auf allgemeinen Anforderungen an ein Prozessmodell zum Einsatz in der Produktionstechnik wird in diesem Abschnitt dargelegt, welche Fragestellungen sich an die Simulation durch die Fertigungsplanung ergeben. Dabei werden folgende Ziele verfolgt:

- ◆ Verkürzung der Time to Market eines neuen Produkts durch die Verbesserung des Kernprozesses Produktentstehung (vgl. Kapitel 1)
- ◆ Reduktion des experimentellen Aufwands in der Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens
- ◆ Frühzeitige Bereitstellung von Fertigungswissen durch Simulation in den verschiedenen Phasen der Produktentstehung (Frontloading von Information)

Ziel der Fertigungsplanung ist die Vorbereitung der Aufgaben in Fertigung und Montage, um Produkte optimaler Qualität herstellen zu können. Bei laserstrahlgeschweißten Bauteilen wird die Produktqualität von den vier Parametern Produktgestaltung, Prozessgestaltung, Strahleigenschaften und Systemtechnik bestimmt (vgl. Abbildung 2.6, nach *Hügel u. a. 2000*). Die Fertigungsplanung greift durch die Erstellung des Arbeitsplans auf diese Parameter gestaltend ein. Der Einsatz der Simulation des Laserstrahlschweißens verfolgt das Ziel, durch Betrachtung der grundlegenden Wechselwirkungen die Planungsvorgaben der Fertigungsplanung zu be-

einflussen und abzusichern. Diese Planungsvorgaben werden in der Schweißanweisung für das Laserstrahlschweißen (*DIN EN ISO 9956-11 1996*) festgehalten.

Im Rahmen dieser Arbeit soll ein Simulationskonzept für das Laserstrahlschweißens entwickelt werden, um

- ◆ die Ermittlung der Schweißparameter,
- ◆ die Festlegung der Schweiß- und Zusammenbaureihenfolge sowie
- ◆ die Gestaltung der Spannvorrichtungen

durch den Einsatz von Simulationsmodellen zu vereinfachen und zu beschleunigen.

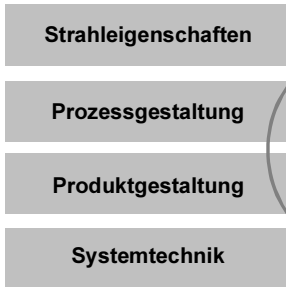
Um dieses Ziel zu erreichen, werden zwei Handlungsfelder definiert (Abbildung 3.2).

Handlungsfeld 1: Ermittlung der Einsatzfelder der FE-Simulation für die Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens

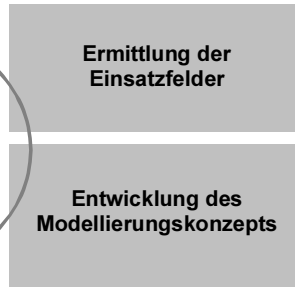
Handlungsfeld 2: Entwicklung eines Modellierungskonzepts des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung

Die Planung des Fertigungsverfahrens Laserstrahlschweißen wird im gesamten Produktentstehungsprozess durchleuchtet. Daraus wird der Informationsbedarf ermittelt und Anforderungen an ein zu diesem Zeitpunkt eingesetztes Simulationsmodell definiert (Kapitel 4). Aufbauend auf den Anforderungen aus den verschiedenen Einsatzfeldern wird ein Simulationskonzept entwickelt, mit dessen Hilfe der auftretende Informationsbedarf der verschiedenen Planungsschritte beantwortet werden kann (Kapitel 5).

Einflussgrößen auf die Bauteilqualität



Handlungsfelder



(nach Hügél u.a. 2000)

Abbildung 3.2: Handlungsfelder für die Qualifizierung der Prozesssimulation in der Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens

4 Simulationsunterstützte Fertigungsplanung von Laserstrahlschweißprozessen

Für die Ermittlung der Einsatzfelder der Simulation in der Fertigungsplanung werden alle Planungsphasen für das Laserstrahlschweißen durchleuchtet. Durch die Simulation kann sowohl die Planung als auch die Nutzung des Laserstrahlschweißens in der Serienfertigung unterstützt werden (Abbildung 4.1). Die Planungsphasen reichen von der strategischen Technologieplanung über die konstruktive Gestaltung der Schweißnähte und die Erstellung der Schweißanweisung bis zur Nutzung des Laserstrahlschweißens in Fertigung und Montage.

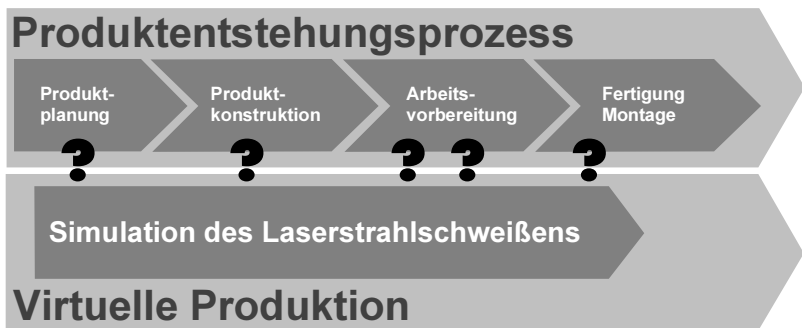


Abbildung 4.1: Simulation des Laserstrahlschweißens als begleitendes Werkzeug im Produktentstehungsprozess

4.1 Vorausbildung und Produktplanung

Dem Beschluss, das Laserstrahlschweißen als innovatives Fertigungsverfahren einzusetzen, liegt häufig eine Unternehmensstrategie zugrunde, um das Unternehmen durch Technologieentwicklungen zu differenzieren (Klocke 1998). Hinzu kommen wirtschaftliche und produktbezogene Gründe, um die Kosten für Betriebsmittel, Personal

oder Material zu verringern (vgl. *Warnecke und Westkämper 1998, S. 15*). In der frühen Phase der Technologieplanung steht daher weniger die Ermittlung spezifischer Planungsdaten im Vordergrund, sondern eine **Bewertung des Einsatzpotenzials des Laserstrahlschweißens** für die zu lösenden Aufgaben in der Fertigung.

Kriterien für den Einsatz der Lasertechnologie in der Produktion sind die Zeit- und Kostenersparnisse, die das Laserstrahlschweißen aufgrund der Automatisierbarkeit und der hohen Prozessgeschwindigkeiten gegenüber anderen Fügeverfahren ermöglichen kann (vgl. Kapitel 2.2.4). Da in diesem Stadium der Produktentwicklung keine detaillierte Produktgeometrie und somit keine für den Aufbau von FE-Modellen geeigneten CAD-Daten erstellt wurden, ist der Simulationseinsatz beschränkt auf grundlegende Studien möglicher Fügegeometrien und der daraus resultierenden Schweißgeschwindigkeiten. Zur Ermittlung dieser Informationen sind einfache Simulationsmodelle ausreichend, beispielsweise analytische Verfahren zur Abschätzung von Nahtgeometrie, Vorschubgeschwindigkeiten und der notwendigen Laserleistung. Auf diesen Studien basierende Schweißzeiten können Grundlage sein für weitere Potenzialbewertungen innerhalb der virtuellen Produktion (vgl. Kapitel 2.3.1). Denkbar ist beispielsweise die Abschätzung der Schweißzeiten für eine robotergestützte Schweißanlage. Die Simulation des Fertigungsverfahrens liefert die Dauer der Schweißung, andere Simulationswerkzeuge die Nebenzeiten, z. B. die 3D-Kinematiksimulation den Zeitbedarf der Roboterbewegungen.

4.2 Konstruktion

Im Gegensatz zu den qualitativen Ergebnissen für die Produktplanung sind in der Konstruktion quantitative simulationsbasierte Bewertungen notwendig. Verschiedene Entscheidungen für die technologische Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens finden in der Konstruktion statt.

Zum einen ist die Konstruktion für die **Gestaltung der Schweißnahtgeometrie** und die Festlegung der Bauteiltoleranzen verantwortlich. In diesem Fall muss die Simulation möglichst exakte Werte liefern. Für die Ermittlung der Nahtgeometrie genügen thermodynamische Prozessmo-

delle (vgl. Kapitel 2.3.3). Zur Abschätzung der **Realisierbarkeit von Prozessparametern** und Toleranzanforderungen müssen die Vorgänge beim Schweißen thermomechanisch abgebildet werden. Einschränkend ist an dieser Stelle festzuhalten, dass der derzeitige Stand der Simulationsmodelle zwar die resultierenden Toleranzen aus dem Laserstrahlschweißprozess liefern kann, aber die Einflüsse vorangegangener Fertigungsschritte unberücksichtigt bleiben.

Zum anderen nimmt die Konstruktion die **Festlegung der Zusammenbaureihenfolge** vor, die entscheidend die Gestaltung des Schweißfolgeplans für die Fertigung beeinflusst. Betroffen ist darüber hinaus die Gestaltung der Fertigungs- und Spannmittel. Um dem Konstrukteur Hinweise zur fertigungsgerechten Gestaltung zu geben, sind zunächst qualitative Aussagen ausreichend, beispielsweise über die globalen Richtungen des Bauteilverzugs. Für diesen Fall kann auf vorhandene Modelldaten anderer Berechnungen, beispielsweise der aus Crashesimulation, zurückgegriffen werden. Im Sinne des Simultaneous Engineering wird durch den Simulationseinsatz die Planung weiterer Schritte, beispielsweise der Fertigungsmittel, in dieser frühen Phase vorbereitet.

4.3 Arbeitsvorbereitung

Der Simulation von Fertigungsprozessen kommt in der Fertigungsplanung zunächst grundlegende Bedeutung zu. Untersuchungen haben gezeigt, dass der Aufwand pro gefertigtem Stück durch Lerneffekte mit zunehmendem Betrieb des Produktionssystems sinkt. Der frühzeitige Einsatz von Simulation in der Planungsphase von Fertigungsverfahren und zugehörigem Produktionssystem verlagert dieses Lernen in die Virtuelle Welt. Dadurch können Trainings- und Anlaufeffekte in der Fertigung als „*Virtuelles Lernen*“ in der Phase der Fertigungsplanung vorweggenommen werden (*Westkämper 2000, S. 94*).

Das wichtigste Ergebnis der Fertigungsplanung ist die Erstellung des Schweißplans (vgl. Kapitel 2.3). Die darin festzulegenden Größen werden durch die Schweißanweisung nach *DIN EN ISO 9956-11 (1996)* definiert. Für den Simulationseinsatz in der Arbeitsvorbereitung sind folgende Aufgaben von Interesse (vgl. Kapitel 3.3):

- ◆ Feinplanung der Prozessparameter
- ◆ Festlegung von Zusammenbau und Schweißfolge
- ◆ Gestaltung der Spannvorrichtungen

Die Prozessparameter (u. a. Laserleistung, Vorschubgeschwindigkeit, Fokusposition) sind aufwandsintensive Vorgaben des Schweißplans. Sie können teilweise durch die 3D-Kinematiksimulation ermittelt und gestaltet werden, beispielsweise indem die dynamischen Eigenschaften der Handhabungsgeräte untersucht und optimiert (vgl. *Bauer 1998*). Für die Detailplanung der Parameter ist eine thermodynamische Simulation notwendig, um die exakten Nahtgeometrien auf Basis der gewählten Laserparameter zu berechnen.

Die Reihenfolge des Zusammenbaus sowie die Auswahl und Gestaltung der Spannvorrichtungen basieren auf den mechanischen Vorgängen im Bauteil. Diese sind ein Resultat der Wechselwirkung zwischen den induzierten Wärmedehnungen und -spannungen sowie den mechanischen Randbedingungen. Aus der Reihenfolge des Zusammenbaus wird anschließend die Schweißfolge entwickelt. Eine thermomechanische Berechnung der Wärmeverteilung bei verschiedenen Schweißfolgen liefert in diesem Zusammenhang wertvolle Hinweise. Thermomechanische Verzugsberechnungen, aufbauend auf den Temperaturfeldberechnungen, schließen den Kreis zur Verzugsminimierung durch geschickte Wahl der Schweißfolge. Bereits vorhandenes und dokumentiertes Fachwissen zur Verzugsminimierung in der Schweißtechnik (vgl. *Malisius 1969*) wird durch die Simulation sinnvoll ergänzt.

Durch gezielte Betrachtung der bestimmenden Einflussgrößen unterstützt die Simulation die Fertigungsplanung in diesen Iterationsschleifen. Dabei sind sowohl qualitative Aussagen über Verzugsrichtungen und -einflussgrößen hilfreich, aber auch Eigenspannungen und Verformungen als Funktion von Ort und Zeit (Abbildung 4.2). Je nach zu lösender Fragestellung können an dieser Stelle des Planungsablaufs qualitative und quantitative Aussagen der Simulation ineinander greifend eingesetzt werden.

Die Spannmittel werden in ihrer Form durch die Konstruktion des Bauteils bestimmt. Sind ebene Spannstellen vom Konstrukteur vorgesehen, können in der Regel Standardspannmittel verwendet werden (vgl. VDI-ADB 1992, S. 159). Zum Spannen von Freiformflächen müssen Spannmittel speziell an die Kontur angepasst werden. Die aus einer Schweißaufgabe resultierende Produktqualität ist ein Ergebnis der Wechselwirkung zwischen Schweißprozess, Bauteil und Spanntechnik. Hierfür sind qualitative Simulationsergebnisse ausreichend, um Spannstellen zu bewerten und zu verbessern. Die thermomechanische Simulation liefert durch die Berechnung des quantitativen Bauteilverzugs als Funktion von Ort und Zeit sowie der auftretenden Spannkkräfte Hinweise zur Dimensionierung sowie zur Feinplanung von Lage und Auflagefläche der Spanner.

Die Auslegung und Optimierung von Größe, Form und Lage der Spannelemente muss aufgrund der Komplexität in Verbindung mit dem Fachwissen des Fertigungsplaners erfolgen. Optimierungsalgorithmen auf der Basis mathematischer Verfahren sind wünschenswert, kommen aber aufgrund des Rechenzeitbedarfs der Simulationsläufe in der Regel nicht zum Einsatz.

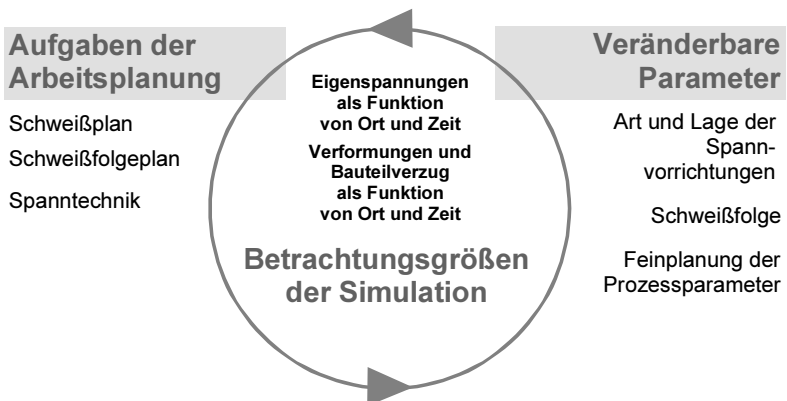


Abbildung 4.2: Simulation als aufgabenorientiertes Werkzeug in der Arbeitsplanerstellung für das Laserstrahlschweißen

4.4 Fertigung und Montage

Fertigung und Montage sind für die Durchführung der geplanten Schweißaufgaben verantwortlich. Sie bekommen aus Konstruktion und Arbeitsvorbereitung die Konstruktionszeichnungen, die Stückliste sowie den vollständigen Arbeitsplan. Der Einsatz des Laserstrahlschweißens in der Fertigung ist hoch komplex. Hinzu kommen die aufgrund der intensiven, aber unsichtbaren Laserstrahlung notwendigen Sicherheitsvorkehrungen, die eine unmittelbare Beobachtung des Prozesses stark einschränken. Der Simulationseinsatz unterstützt die Fertigung bei der Vermittlung von Praxiswissen durch die **Visualisierung** der Vorgänge beim Schweißen. Stichworte sind Computer Based Training oder auch **Virtuelles Training**.

Aufbauend auf Simulationsrechnungen und daraus erstellten Animationen, die in den vorangegangenen Planungsschritten durchgeführten werden, kann mit Hilfe der Simulationsergebnisse das Prozessverständnis in der Fertigung stark verbessert werden. Ausgewählte Ausschnitte und Blickwinkel ermöglichen die Betrachtung und **Optimierung** im Experiment nicht zugänglicher Bereiche. Der Werker wird auf diese Weise mit seinem Erfahrungswissen aus der Praxis in die Planung eingebunden. Häufig erst in der Serienfertigung auftretende Fragestellungen können so schon in der Planungsphase gelöst werden.

4.5 Zusammenfassung der relevanten Fragestellungen

In Abschnitt 4.1 bis 4.4 wurden die verschiedenen Einsatzfelder der Simulation durchleuchtet und aufgezeigt, an welchen Stellen sinnvolle Ergebnisse für die Planung des Laserstrahlschweißens geliefert werden können. Diese sind in Abbildung 4.3 zusammenfassend dargestellt. Das Spektrum des Simulationseinsatzes reicht von Potenzialbewertungen, aufbauend auf qualitativen Aussagen des Simulationsmodells, bis hin zu detaillierten Parameterstudien zur Feinplanung der einzelnen Verfahren, für die eine möglichst exakte Betrachtung der thermomechanischen Wechselwirkungen notwendig ist.

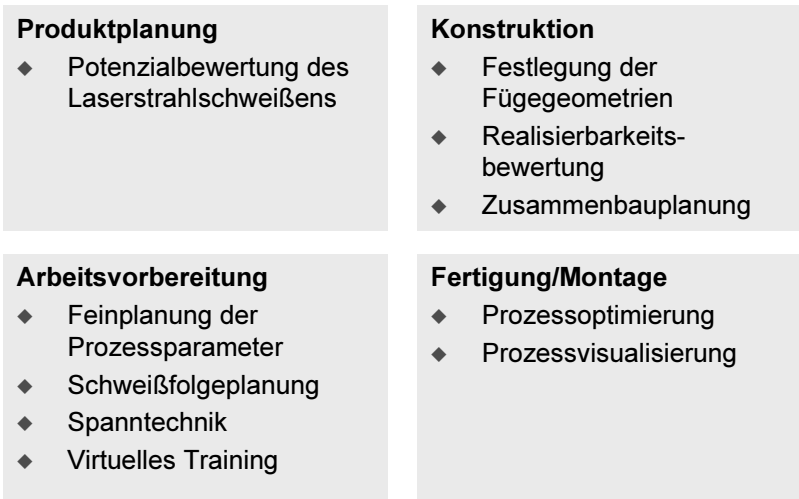


Abbildung 4.3: Einsatzszenario für die Simulation in der Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens

Aufbauend auf dieses Einsatzszenario lassen sich für ein Modellierungskonzept des Laserstrahlschweißens folgende Anforderungen formulieren (Abbildung 4.4)

- ➔ Für die Ermittlung der notwendigen Laserleistung und der realisierbaren Vorschubgeschwindigkeiten muss ein **Modell der thermischen Vorgänge** vorhanden sein.
- ➔ Es ist eine Methode notwendig, um die thermomechanischen **Wechselwirkungen (WW) zwischen Prozess, Bauteil und Spanntechnik** zu untersuchen.
- ➔ Die Ermittlung der Zusammenbau- und Schweißreihenfolge erfordert die Betrachtung des Bauteils als Ganzes. Das Simulationsmodell muss folglich für die **Berechnung großer komplexer Strukturen**, beispielsweise Elementen einer Karosseriestruktur, geeignet sein
- ➔ Zur Eigenschaftsfrüherkennung sind **qualitative und quantitative Aussagen hilfreich**.

4 Simulationsunterstützte Fertigungsplanung von Laserstrahlschweißprozessen

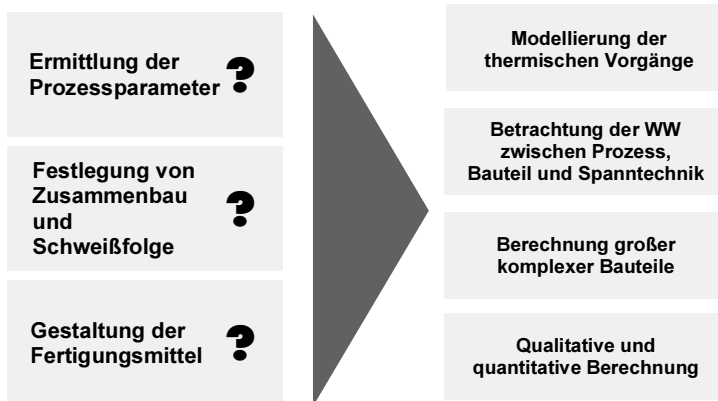


Abbildung 4.4: Fragestellungen der Fertigungsplanung und daraus abgeleitete Anforderungen an ein Simulationsmodell

Im folgenden Kapitel 5 werden diese Anforderungen in ein Modellierungskonzept umgesetzt.

5 Modellierungskonzept für das Laserstrahlschweißen

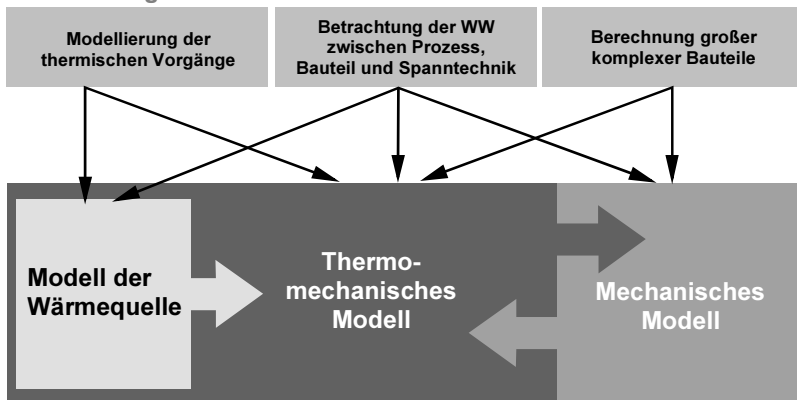
In diesem Kapitel wird das Modellierungskonzept auf Basis der Finite Elemente-Methode beschrieben. Ziel ist die virtuelle Absicherung des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der in Kapitel 3 dargestellten Anforderungen. Nach der allgemeinen Beschreibung der Vorgehensweise werden die verschiedenen Bausteine erläutert, um die in Kapitel 4 erarbeiteten Fragestellungen zu beantworten. Die Modellbausteine werden durch experimentelle Untersuchungen abgesichert. Abschließend wird die Frage der Modellvalidierung beleuchtet.

5.1 Allgemeine Vorgehensweise

Das Bauteilverhalten beim Laserstrahlschweißen ist eine Wechselwirkung thermodynamischer, thermomechanischer und metallurgischer Vorgänge (vgl. Abbildung 2.2). Bestimmendes Element für den Zeit-Temperatur-Verlauf im Bauteil ist der Laser als bewegte zeit- und ortsabhängige Volumenwärmequelle. Das Modellierungskonzept besteht aus einem thermomechanischen Baustein verbunden mit der Ermittlung der Wärmequelle und einem mechanischen Baustein (Abbildung 5.1).

Das **thermomechanische Modell** steht im Mittelpunkt der Modellierung (Kapitel 5.2). Es liefert die Temperaturen, Eigenspannungen und Verformungen als Funktion von Ort und Zeit. Diese sind die für die Fertigungsplanung notwendigen Ergebnisgrößen, um die Wechselwirkung zwischen Prozess, Bauteil und Spanntechnik zu untersuchen. Aufgrund der Betrachtungsebene der thermomechanischen Berechnungen ist eine exakte Ermittlung der Energieeinkopplung auf Basis der Laserkennwerte innerhalb dieser Modellierung nicht möglich. Die Wärmequelle muss vorher ermittelt und im thermomechanischen Modell fest vorgegeben werden. **Modelle zur Ermittlung der Wärmequelle** werden aus diesem Grund innerhalb der Beschreibung der Energieeinkopplung erläutert (Kapitel 5.2.4).

Anforderungen an die Simulation



Simulationsmodelle

Abbildung 5.1: Modellierungskonzept für das Bauteilverhalten beim Laserstrahlschweißen

Die **mechanische Modellierung** (Kapitel 5.3) dient der Untersuchung grundlegender qualitativer Eigenschaften und Auswirkungen der Laserstrahlschweißprozesse. Einzelne Effekte werden herausgegriffen und mit Hilfe rein elastischer Berechnungen auf ihre Wechselwirkungen untersucht. Das Modell bietet die Möglichkeit, große Bauteile mit im Vergleich zu thermomechanischen Berechnungen geringem Modellierungs- und Berechnungsaufwand zu untersuchen. Es kann auf bereits vorhandene Finite Elemente-Netze zurückgegriffen werden.

Die vorgestellte Methode wurde im Simulationssystem MSC.MARC Version k7.3 umgesetzt (*MSC.MARC 2000*). Grundsätzlich ist das Konzept übertragbar auf alle nichtlinearen Finite Elemente-Systeme, die die Einbindung von benutzerdefinierten Unterroutrinen erlauben.

5.2 Thermomechanische Modellierung

Ein thermomechanisches Modell berechnet die mechanische Reaktion des Werkstoffs auf die eingebrachten thermischen und mechanischen Lasten. Das Werkstück wird als homogenes Kontinuum angenommen. Die thermischen und elasto-plastischen Materialeigenschaften sind eine Funktion der Temperatur. Fragestellungen, die mit Hilfe der thermomechanischen Modelle zu beantworten sind, stellen die Planung von Zusammenbau- und Schweißreihenfolge sowie die Gestaltung der Spanntechnik dar (vgl. Abbildung 4.4).

Die Eignung der thermomechanischen Simulation für die Modellierung des Laserstrahlschweißens wurde grundsätzlich nachgewiesen (vgl. Kapitel 2.3.3). Es fehlt die Anpassung und Qualifizierung der Modelle für die Untersuchung planungsrelevanter Fragestellungen. Aus diesem Grund werden alle Schritte der Modellierung, die verschiedenen Stellgrößen und deren Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse sowie notwendige benutzerdefinierte Unterroutrinen beschrieben.

Die punktuelle, auf eine sehr dünne Linie beschränkte Einbringung der Laserleistung in das Werkstück und die daraus resultierenden Temperatur-, Spannungs- und Verformungsgradienten stellen hohe Anforderungen an die **Vernetzung** des Bauteils (Kapitel 5.2.1).

Die Reaktion des Werkstoffs auf die eingebrachte Wärme hängt von den temperaturabhängigen **Werkstoffkennwerten** ab (Kapitel 5.2.2).

Die zu lösenden Fragestellungen werden mit Hilfe von **Randbedingungen** in das Modell eingebracht (Kapitel 5.2.3 bis 5.2.6). Der Laser stellt eine zeit- und ortsabhängige thermische Randbedingung dar. Diese wird mit Hilfe verschiedener Unterroutrinen in das Simulationsmodell integriert. Für komplexe dreidimensionale Nahtgeometrien wurde ein Modell der Wärmequelle entwickelt, das im Simulationssystem beliebige Nahtverläufe ähnlich einer Bahnsteuerung realisieren kann. Spannvorrichtungen dienen zum einen als thermische Randbedingung, da insbesondere metallische Kontaktflächen den Wärmehaushalt beeinflussen. Zum anderen stellen die Spannvorrichtungen die wichtigste mechanische Randbedingung dar, da sie je nach Art der Einspannung verschiedene Freiheitsgrade des Bauteils beeinflussen.

Vernetzung	
– Modellierung des Nahtbereichs	
– Kontaktformulierung	
Werkstoffkennwerte	
– Sensitivität	
Randbedingungen	Benutzerdefinierte Unterroutinen
– Thermisch	– Wärmequelle
• Laser als Wärmequelle	– Koordinatentransformation
• Kühlung	
– Mechanisch	
• Spanntechnik	
Reduzierung der Rechenzeit	
– Parallelisierung	
– Adaptive Vernetzung	

Abbildung 5.2: Modellierungsschritte und eigenentwickelte Unterroutinen zur thermomechanischen Simulation des Laserstrahlschweißens

Für die Berechnung großer Bauteile spielt die **Rechenzeit** eine entscheidende Rolle. Sie wird von der Art der Modellierung beeinflusst, insbesondere der Vernetzung und den Randbedingungen. Moderne Simulationssysteme bieten verschiedene Möglichkeiten an, die Rechenzeit durch sowohl software- als auch hardwareseitige Methoden zu reduzieren (Kapitel 5.2.7).

5.2.1 Erstellung des Finite Elemente-Netzes

Die Informationen über die Bauteilgeometrie werden normalerweise aus einem CAD-System übernommen. Nur in einfachen Fällen, beispielsweise bei ebenen Blechen, kann die Geometrie mit vertretbarem Aufwand im FEM-Preprozessor nachmodelliert werden. Die Übertragung der Geometrie aus dem CAD- in das FEM-System ist mit verschiedenen Hindernissen verbunden (vgl. *Fröhlich 1995, S. 139ff*). Zu nennen sind beispielsweise zu kleine Radien oder für die Vernetzung untaugliche, mit Spalten versehene Flächenverbände im CAD-Modell. Eine genauere Erläuterung der damit verbundenen Fragestellungen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Es soll deshalb im folgenden ausschließlich auf

die Besonderheiten bei der geometrischen Modellierung von Bauteilen für die Simulation des Laserstrahlschweißens eingegangen werden.

Die Vernetzung einer Geometrie ist ein Kompromiss zwischen notwendiger Genauigkeit und akzeptabler Modellgröße. Beim Laserstrahlschweißen treten die höchsten Gradienten der Temperaturen und Spannungen im Bereich der Schweißnaht auf. Die thermomechanische Berechnung erfordert daher in diesem Bereich die feinste Vernetzung. Eine Vernetzung mit Volumenelementen ist erforderlich, da die Wärmeeinbringung in Dickenrichtung nicht symmetrisch erfolgt und ein Temperaturgradient in Blechdickenrichtung vorliegt. Die Auswahl des Elementtyps erfolgt zunächst nach der Grundregel, für komplexe, nichtlineare Fragestellungen möglichst einfache Elementtypen zu wählen. Weiterhin sind Elementtypen zu wählen, die mit den thermomechanischen Lösungsverfahren kompatibel sind. Verwendet werden aus diesen Gründen isoparametrische Hexaederelemente mit linearer Interpolation (MSC.MARC Element Typ 7, vgl. *MSC.MARC 1999b*, S. 3-26ff). Element-Konzepte mit komplexeren Ansatzfunktionen, beispielsweise p-Elemente, wurden nicht weiter untersucht, da sie derzeit nur für lineare Analysen zur Verfügung stehen (vgl. *Fröhlich 1995*, S. 88ff). Der Einfluss der Vernetzung auf die Rechenzeit wird in Kapitel 5.2.7 beleuchtet.

Um die Modellgröße klein zu halten, werden Bereiche mit nur kleinen Gradienten möglichst grob vernetzt. Es ergeben sich somit drei verschiedene Bereiche des FE-Netzes: Der Nahtbereich mit feinsten Vernetzung, ein Übergangsbereich sowie die Bereiche mit grober Vernetzung (Abbildung 5.3).

Im **Bereich A** findet die Energieeinbringung statt. Daher treten dort die höchsten Temperatur- und Spannungsgradienten auf. Um den Verlauf von Eigenspannungen und Verformungen mit ihren räumlichen und zeitlichen Gradienten zumindest näherungsweise abzubilden, sollten für Bauteile im Dünnblechbereich zwei bis vier Elemente in Dickenrichtung verwendet werden. Dies resultiert in minimalen Elementkantenlängen von ein bis zwei mm. Diese Elementgröße erfordert eine Näherung der Energieeinkopplung. Bei einem Fokussdurchmesser des Lasers von 0,3 bis 0,6 mm sind die Elemente zu groß, um die Einkopplung der Laserenergie in das Werkstück mit Hilfe eines detaillierten Prozessmodells abzubilden.

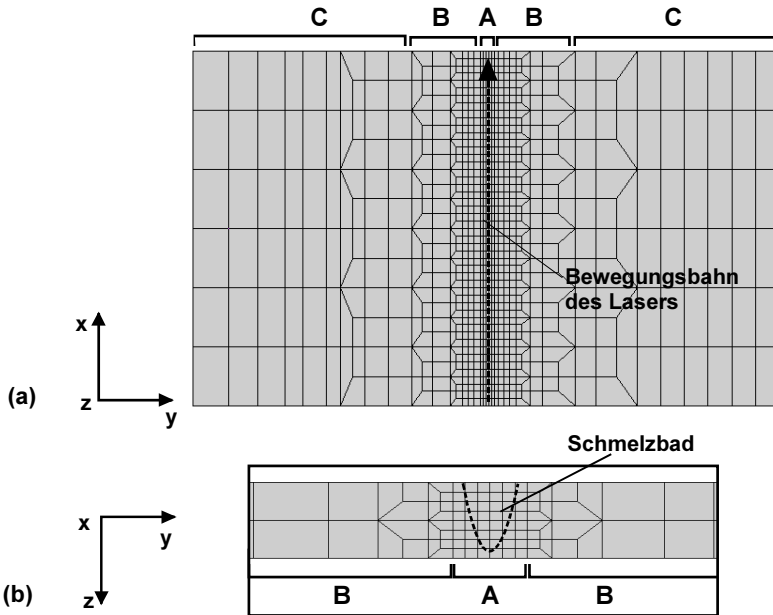


Abbildung 5.3: Verschiedene Bereiche eines Finite Elemente-Netzes (schematisch): a) Draufsicht b) Ausschnitt des Bauteilquerschnitts mit angedeutetem Schmelzbad

Die für die Energieeinbringung erforderliche Näherung wird in Kapitel 5.2.4 erläutert. Für die Modellierung der Energieeinbringung müssen die Elemente in diesem Bereich parallel und symmetrisch entlang der Schweißrichtung ausgerichtet sein. Die Breite des Bereichs feinsten Vernetzung quer zur Schweißrichtung sollte sich an der Breite der Schweißnaht orientieren. Das Schmelzbad sowie der Schmelzbadquerschnitt sollten vollständig mit Elementen der kleinsten Kantenlänge vernetzt sein (Abbildung 5.3b).

Bereich B stellt den Übergangsbereich zwischen feiner und grober Vernetzung dar. Eine Verfeinerung des Netzes (Refinement) findet sowohl in der Ebene als auch in Dickenrichtung des Bauteils statt. Es sind dafür zwei Methoden möglich: die Verwendung von verzerrten Hexaederelementen und die Vernetzung mit Zwischenknoten (Abbildung

5.4). Je nach Elementgröße im Nahtbereich sind zwei bis drei solcher Refinements notwendig. Der Unterschied beider Methoden ist hauptsächlich im Aufwand zur Modellgenerierung zu sehen, der von den Funktionalitäten des verwendeten FE-Systems abhängt. Die Vernetzung einer Struktur mit Zwischenknoten ist in den meisten Fällen automatisiert möglich. Allerdings verlangen viele FE-Systeme eine Kopplung der Knotenfreiheitsgrade auf den Elementkanten. Verzerrte Hexaederelemente können nur bedingt automatisiert erstellt werden, dafür entfällt der Aufwand der Kopplung von Knotenfreiheitsgraden. Wird beachtet, dass der Übergangsbereich nicht im Bereich hoher Gradienten liegt, beispielsweise am Rand des Schmelzbades, so ist die Qualität der Ergebnisse für beide Konzepte vergleichbar. In MSC.MARC wurde auf verzerrte Hexaederelemente zurückgegriffen.

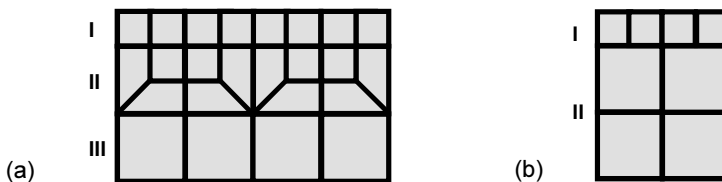


Abbildung 5.4: Strategien zur Netzverfeinerung: (a) Verwendung von verzerrten Hexaederelementen (b) Verwendung von Zwischenknoten

Bereich C ist der unkritische Bereich des Finite Elemente-Netzes. Eine feine Vernetzung ist nur erforderlich, wenn sie aufgrund komplexer Geometrielemente oder der Abbildung der Spanntechnik notwendig ist (vgl. Kapitel 5.2.6). Normalerweise wird im Dünnblechbereich ein Element in Bauteildickenrichtung verwendet. Je nach Bauteilgeometrie können hier automatisierte Vernetzungsalgorithmen zum Einsatz kommen, die die Vernetzung kann nach den gängigen Regeln zur Gestaltung von Finite Elemente-Netzen erfolgen (vgl. Fröhlich 1995, S. 81f, Heckmann 1992, S. 7ff).

Neben dieser allgemeinen Vorgehensweise bei der Vernetzung ist die Abbildung der Schweißnaht von besonderem Interesse. Das Laserstrahlschweißen ist das Verbinden zweier vorher getrennter Fügepartner. Ein

exaktes Modell des Fügeprozesses sollte folglich zwei getrennte Bauteile betrachten, die durch Wärmeeinbringung gefügt werden. Daraus lassen sich zwei Fragestellungen ableiten:

- ◆ Das Verbinden zweier getrennter FE-Netze im Nahtbereich als Funktion der Wärmeeinbringung und/oder der Zeit
- ◆ Die Übertragung von Kräften an sich berührenden Flächen zweier Bauteile

Die Verbindung zweier getrennter Netze lässt sich grundsätzlich in der FE-Technologie nur schwer realisieren. Kräfte und Verschiebungen können nur über Knoten übertragen werden, die zu Beginn der Modellierung festgelegt werden und während der Berechnung nur unter hohem Aufwand zu ändern sind. Das Verknüpfen von Knoten ist über Zwangsbedingungen, so genannter Constraints, möglich, die die Beeinflussung mechanischer und thermischer Freiheitsgrade erlauben. Eine Veränderung der Zwangsbedingungen als Funktion der Zeit, wie es für das Laserstrahlschweißen erforderlich wäre, ist in den verfügbaren Systemen jedoch nicht standardmäßig möglich.

Eine andere Möglichkeit stellt das Einfügen einer Grenzschicht aus sehr dünnen Elementen zwischen den Fügepartnern dar. Diese Elemente sind zunächst deaktiviert. An den das Element aufspannenden Knoten werden keine Kräfte übertragen und es findet keine Wärmeleitung im Element statt. Während der Modellierung des Schweißprozesses werden diese Elemente als Funktion der Laserposition aktiviert. Hierfür wird eine benutzerdefinierte Unterroutine verwendet, die die Knotenpunkte ermittelt, die von der Laserquelle überstrichen wurden. Die Elemente erhalten durch das Aktivieren mechanische und thermische Eigenschaften. Durch ihr geringes Volumen beeinflussen sie den Wärmehaushalt in diesem Bereich nur unwesentlich.

Abbildung 5.5a und b zeigen die Modellierung der Schweißnaht mit der dünnen Grenzschicht an einem ebenen Stumpfstoß. Abbildung 5.5c stellt die Temperaturverteilung und die Deformation des Bauteils nach 0,24 Sekunden dar. Verschweißt wurden zwei Aluminiumbleche aus AlMg-Si0,5 ($P=2\text{kW}$, $v=3,5\text{m/min}$, $r=0,3\text{mm}$). Die Deformation ist um den Faktor 10 vergrößert dargestellt. Auf diese Weise ist eine realistische Abbildung

der Spaltöffnung darstellbar, das Verfahren ist aber mit hohem Modellierungsaufwand verbunden.

Die Art und Weise der Ausbildung eines Fügespalts ist stark von den mechanischen Randbedingungen abhängig. In diesem Fall wurde eines der Bleche in der Richtung quer zur Schweißnaht beweglich gelagert. In dem realistischeren Fall der festen Einspannung beider Bleche ist die Spaltöffnung größtenteils unterdrückt. Die Elementknoten im Bereich der Schweißnaht werden deshalb in den meisten Fällen von Anfang an verbunden. Durch die wandernde Wärmequelle (vgl. Kapitel 5.2.4) werden während der Berechnung die Wärmedehnungen und -spannungen induziert. In Verbindung mit den temperaturabhängigen Werkstoffkennwerten (vgl. Kapitel 5.2.2) werden die resultierenden Eigenspannungen im Nahtbereich eingebracht. Grundsätzlich findet der dominierende Teil der Deformation im Nahtbereich während des Abkühlvorgangs statt, wie beispielsweise durch das einfache Dreistabmodell für die Entstehung von Eigenspannungen und Verformungen gezeigt werden kann (vgl. *Dillthey 1995, S. 65ff*). Der Fehler durch diese Art der Modellierung kann im Normalfall als gering angesehen werden. Die Art und Weise der Verformung hängt von den geometrischen Verhältnissen der Fügezone ab, so dass die Modellierung des Nahtbereichs für jede spezifische Nahtgeometrie genau geprüft werden muss.

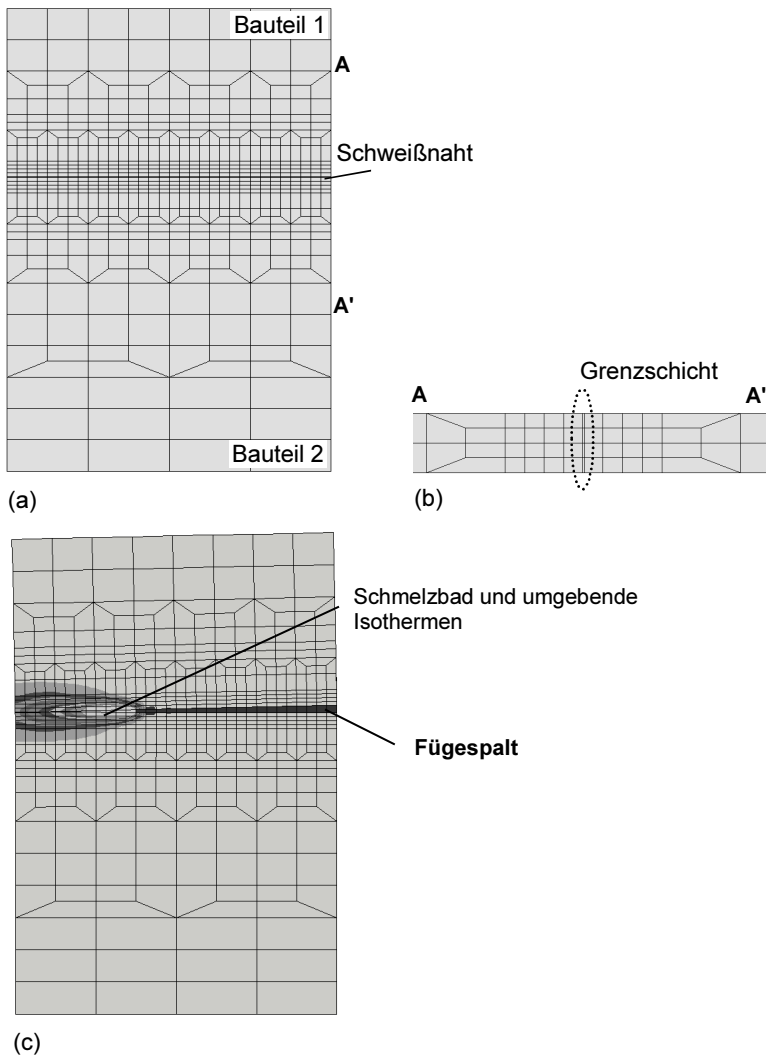


Abbildung 5.5: Simulation der Spaltöffnung beim Laserstrahlschweißen eines Stumpfstoßes. a) Draufsicht auf das Modell b) Querschnitt des Nahtbereichs c) Temperaturverteilung und Deformation des Bauteils während des Schweißens

Die Fragestellung der Übertragung von Kräften an sich berührenden Bauteilflächen wird in der FEM-Technologie unter dem Stichwort *Kontaktformulierung* behandelt (vgl. *MSC.MARC 1999a*, S.8-3 – 8-54). Sind Elemente an ihren Knoten nicht verbunden, so werden keine Kräfte übertragen. Eine Durchdringung der Elementvolumina ist möglich und hat keine mechanischen Spannungen oder Verformungen zur Folge. Dagegen bewirkt eine Kontaktformulierung zwischen verschiedenen Elementen mechanische Spannungen und Verformungen bei Berühren oder Durchdringen der Elementvolumina (vgl. *Fröhlich 1995*, S. 20).

Abbildung 5.6 zeigt ein Beispiel für diese Fragestellung. Es werden zwei Aluminiumprofile mit einer Kehlnaht am Überlappstoß verschweißt (Abbildung 5.6a und b). Bei der vorliegenden Geometrie der Fügezone werden durch die eingebrachten Spannungen im Nahtbereich Kräfte und Momente über die Berührflächen der Bauteile übertragen. Eine Vernachlässigung des Kontakts führt zu einem Durchdringen der Bauteile, da über nicht verbundene Knoten keine Kräfte übertragen werden (Abbildung 5.6c). Die Formulierung als Kontaktflächen führt zu einem Abgleiten der Bauteile an den Flächen (Abbildung 5.6d). Die Deformation ist in beiden Abbildungen um den Faktor 20 vergrößert dargestellt.

Im Programmpaket MSC.MARC beeinflusst die Definition von Kontaktflächen das grundsätzliche Konvergenzverhalten des Modells nicht, erhöht aber die Rechenzeit erheblich. Verfahren zur Rechenzeitreduktion (vgl. Kapitel 5.2.7) in Verbindung mit dieser Technologie sind noch nicht einsetzbar. Es ist empfehlenswert, auf die Kontaktformulierung zu verzichten. Eine Ersatzmöglichkeit ist beispielsweise das Verbinden ausgewählter Knoten entlang der Grenzfläche zwischen den Bauteilen. Eine grundsätzliche Vorgehensweise kann aufgrund der Abhängigkeit von den spezifischen geometrischen Verhältnissen an der Fügestelle nicht vorgeschlagen werden.

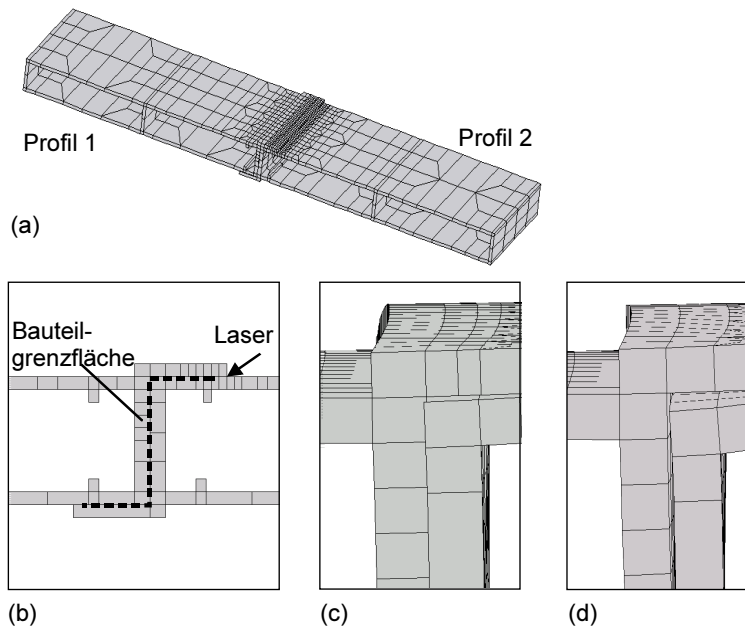


Abbildung 5.6: Beispiel für eine Kontaktmodellierung: a) Gesamtmodell b) Darstellung der Fügegeometrie c) Darstellung der Bauteildeformation durch die Wärmeinbringung ohne Kontaktformulierung d) mit Kontaktformulierung

5.2.2 Werkstoff

Ziel eines thermomechanischen Modells ist die Berechnung der mechanischen Reaktion des Werkstoffs auf die eingebrachten thermischen und mechanischen Lasten. Für die Ermittlung von Eigenspannungen und Verzug sind die Werkstoffkennwerte von entscheidender Bedeutung. Diese müssen sowohl bei Raumtemperatur als auch in ihrer Temperaturabhängigkeit bekannt sein.

Für die Simulation des Schweißvorgangs ist die Kenntnis folgender Kennwerte notwendig (Hillebrand 1997, S. 49):

◆ **Thermophysikalische Kennwerte:**

Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Umwandlungsenthalpien

◆ **Thermomechanische Kennwerte:**

Elastizitätsmodul, Wärmeausdehnungskoeffizient, Fließspannung und Verfestigungsverhalten, Querkontraktionszahl

◆ **Zeit-Temperatur-Umwandlungsverhalten**

Die grundlegenden Daten bei Raumtemperatur, insbesondere das Verfestigungsverhalten, können experimentellen Versuchen, beispielsweise dem Zugversuch (siehe z.B. *Dubbel u. a. 1997, S. E25f*), dem Datenblatt des Werkstoffherstellers sowie Tabellenwerken entnommen werden. Schwieriger ist die Ermittlung der Temperaturabhängigkeit der Kennwerte. Für die wichtigsten Stahlwerkstoffe bietet *Richter (1973)* eine umfangreiche Sammlung thermophysikalischer und -mechanischer Kenndaten. Weitere Quellen sind physikalisch-chemische Tabellenwerke (z.B. *Landolt und Bömstein 1963, Touloukian 1967*) sowie Quellen der verschiedenen Werkstoffinstitutionen (*Aluminiumzentrale 1998, The British Iron and Steel Research Association 1953, American Society of Metals 1961*). Für viele Werkstoffe sind die temperaturabhängigen Kennwerte, insbesondere nahe der Schmelztemperatur, nicht in Tabellenwerken zugänglich. Nach *Radaj (1999, S. 150)* kann in vielen Fällen eine Extrapolation oder Abschätzung der fehlenden Werte ausreichend sein. Für genauere Berechnungen müssen die Werte im Versuch ermittelt werden. *Bergmann und Hilbinger (1998)* stellen eine Methode zur Ermittlung der notwendigen Werkstoffdaten mit Hilfe von Hochtemperatur-Zugversuchen vor, die an typische Verhältnisse von Laserbearbeitungen angelehnt sind.

Innerhalb eines spezifischen Werkstoffs können die Werkstoffeigenschaften aufgrund der unterschiedlichen Liefer- und Lagerzustände schwanken. Die Verwendung von Werkstoffen mit Prüfzeugnis kann die Schwankungen reduzieren, aber nicht ausschließen. Der Einfluss der daraus resultierenden Schwankungen der Werkstoffparameter auf die Ergebnisse wurde mit Hilfe einer thermomechanischen Simulation untersucht. Als Werkstoff wurde der niedriglegierter Baustahl DC04 (St 14) herausgegriffen. Für diesen wurde angenommen, dass der Einfluss

der Kennwertschwankungen auf die Ergebnisse linear ist. Diese Annahme ist für den betrachteten niedriglegierten Baustahl zulässig, da die mechanischen Kennwerte innerhalb der Gruppe niedrig legierter Baustähle durch ein gemeinsames Streuband beschrieben werden können (Richter 1973, S. 12ff).

Als Anwendungsbeispiel wurde eine Blindschweißung an einem ebenen Blech abgebildet (Blechformat $100 \times 100 \times 1,5 \text{ mm}^3$, $P=2 \text{ kW}$, $v=2 \text{ m/min}$, Fokusdurchmesser $0,6 \text{ mm}$). Der Einfluss der verschiedenen Werkstoffparameter auf das Ergebnis wurden an ausgewählten Knotenpfaden im Finite Elemente-Netz mittels der Maximaltemperatur, der von Mises-Vergleichsspannung sowie der plastische Vergleichsdehnung als Referenzwerte untersucht. Unter Berücksichtigung der oben getroffenen Annahmen wurde jeweils für einen Rechenlauf ein Werkstoffkennwert um $\pm 20\%$ verändert und die relative Veränderung der resultierenden absoluten Werte der drei Referenzgrößen mit den Ergebnissen einer Referenzrechnung verglichen.

Tabelle 5.1 zeigt die Ergebnisse. Da Spannungen und Dehnungen voneinander abhängig sind, wurden sie in der Tabelle unter dem Begriff mechanisches Verhalten zusammengefasst. Es zeigt sich zunächst ein sehr geringer Einfluss der Dichte auf die Ergebnisse. Aus diesem Grund wird sie in den meisten FE-Programmen nicht temperaturabhängig angegeben. Überraschen mag zunächst der starke Einfluss der spezifischen Wärmekapazität auf das mechanische Verhalten. Dies ist einfach zu erklären, da die spezifische Wärmekapazität die Maximaltemperatur verändert. Beispielsweise bewirkt eine Erhöhung der spezifischen Wärmekapazität eine niedrigere Maximaltemperatur und somit niedrigere Wärmedehnungen. Eine Veränderung der Wärmeleitfähigkeit wirkt sich erst bei starken Abweichungen aus (größer ca. 20%). Räumlicher und zeitlicher Temperaturverlauf hängen hauptsächlich von den thermischen Werkstoffkennwerten ab, die mechanischen Kennwerte haben nur sehr geringen Einfluss.

Als Fazit bleibt festzuhalten, dass für die thermomechanische Berechnung E-Modul, Fließspannung sowie differentieller thermischer Ausdehnungskoeffizient als Funktion der Temperatur genau ermittelt werden müssen. Diese Kennwerte beeinflussen zum einen die mechanischen Referenzgrößen deutlich, zum anderen variieren sie stark zwischen

Variierter Kennwert	Einfluss auf Maximaltemperatur	Einfluss auf mechanisches Verhalten	Bemerkung
Dichte	Keiner	Sehr gering	
Spezifische Wärmekapazität	Groß	Groß	Veränderung wirkt sich auf Temperaturverteilung aus und beeinflusst so Wärme-dehnungen
Wärmeleitfähigkeit	Mittel	Keiner	Starker Einfluss bei Veränderung um mehr als 20%
Differentieller Wärmeausdehnungskoeffizient	Sehr gering	Groß	
E-Modul	Keiner	Groß	
Fließspannung	Keiner	Groß	
Poissonzahl	Keiner	Gering bis Mittel	Einfluss hauptsächlich auf plastische Dehnung

Tabelle 5.1: Einfluss der Werkstoffparameter auf die Bauteileigenschaften

verschiedenen Werkstoffen. Der Einfluss der spezifischen Wärmekapazität ist ebenfalls erheblich, bleibt aber innerhalb einer Werkstoffgruppe relativ konstant. Es kann deshalb auf Tabellenwerke zurückgegriffen werden.

In dieser Betrachtung wurde eine wichtige Komponente noch nicht erwähnt: die Metallurgie. *Seyffarth und Hoffmann (1999, S. 9)* sprechen von der „Wirkungskette Energieeinkopplung – Thermomechanischer Zyklus – Thermokinetische Gefügeänderung – mechanischer Kennwert“. Die Autoren haben Schweiß-ZTU-Diagramme für das Laserstrahlschwei-

ßen für verschiedene Stahlwerkstoffe ermittelt und dargelegt, dass sich diese ZTU-Diagramme grundlegend von Diagrammen für herkömmliche Schweißverfahren unterscheiden. Die Vielzahl vorhandener mathematischer Modelle zur Beschreibung des Umwandlungsverhaltens bei konventionellen Schweißverfahren sind deshalb nur bedingt auf das Laserstrahl übertragbar (vgl. *Rick 2001, S. 102ff*). Mathematische Beschreibungen der ZTU-Diagramme für das Laserstrahlschweißen liegen noch nicht vor.

Eine Möglichkeit, diese Schwierigkeiten zu umgehen, ist die Ermittlung der mechanischen Kenngrößen in Kurzzeit-Warmzugversuchen. In diesen Versuchen werden auf das Material dem Laserstrahlschweißen entsprechende Aufheiz- und Abkühlkurven aufgebracht und die Werkstoffkennwerte zu verschiedenen Temperaturen ermittelt (vgl. *Bergmann und Hilbinger 1998*). Auf diese Weise können die mechanischen Eigenschaften der verschiedenen temperaturabhängigen Kenngrößen direkt ermittelt werden, ohne die metallurgischen Phasen explizit zu kennen. Jedoch sind diese Versuche experimentell sehr aufwändig und mit hohen Kosten verbunden.

5.2.3 Allgemeine Bemerkungen zu den Randbedingungen

Die thermomechanischen Vorgänge während des Laserstrahlschweißens sind eine Reaktion des Bauteils auf die aufgebrachte thermische Last (vgl. Kapitel 2.2.2). In der thermomechanischen Analyse mit einem Netz aus linearen, isoparametrischen Volumenelementen hat das Modell vier Freiheitsgrade: die Temperatur und die drei translatorischen Freiheitsgrade, aus denen über die räumliche Beziehung der acht Knoten eines Elements die rotatorischen Freiheitsgrade abgeleitet werden können. Die spezifischen Fragestellungen des Laserstrahlschweißens werden in Form von Randbedingungen in das Modell integriert.

Thermische Randbedingungen

- ◆ Der **Laser** stellt eine zeit- und ortsabhängige thermische Randbedingung dar. Aufgrund der besonderen Bedeutung der Modellierung werden diese Aspekte in einem eigenen Kapitel betrachtet (Kapitel 5.2.4).

- ◆ Der Wärmehaushalt des Bauteils wird neben der Energieeinbringung durch verschiedene **Kühlmechanismen** beeinflusst. Diese werden in Kapitel 5.2.5 beschrieben.

Mechanische Randbedingungen

- ◆ Die Reaktion des Bauteils auf die orts- und zeitabhängige thermische Last ist abhängig von Einschränkungen der mechanischen Freiheitsgrade. Diese werden insbesondere von der Spanntechnik beeinflusst (Kapitel 5.2.6).

5.2.4 Der Laser als thermische Randbedingung

Die Basis der Berechnung thermomechanischer Vorgänge ist die Temperaturverteilung. Verknüpft über die Wärmeausdehnung (vgl. Gleichung 2.2) und die temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte stellen Eigenspannung und Verzug eine Reaktion des Werkstoffs auf die durch den Laser erzeugte räumlich inhomogene Temperaturverteilung dar. Eine möglichst exakte, den Anforderungen angepasste Modellierung des Lasers als Wärmequelle kommt daher entscheidende Bedeutung zu.

Allgemeine Vorgehensweise

Der Laser wird als bewegte volumenbezogene Wärmequelle mit festem Wirkungsgrad abgebildet, die in die Elemente einen Wärmefluss als Funktion von Ort und Zeit einbringt. Da in den Standardrandbedingungen gängiger FE-Systeme nur feste Wärmequellen definiert werden können, geschieht die Energieeinkopplung in Form einer benutzerdefinierten Unterroutine. Die Wärmequelle wird so definiert, dass sie sich in einem rechtwinkligen Koordinatensystem bewegt. Für diese Methode müssen die Elemente im Nahtbereich parallel zur Schweißnahtmitte ausgerichtet sein und entlang der Naht gleiche Abmessungen haben. Die Bewegung des Lasers erfolgt entlang der x-Achse, quer zur Schweißnaht ist die y-Achse, in Tiefenrichtung und somit in Einfallrichtung des Lasers die z-Achse (Abbildung 5.7).

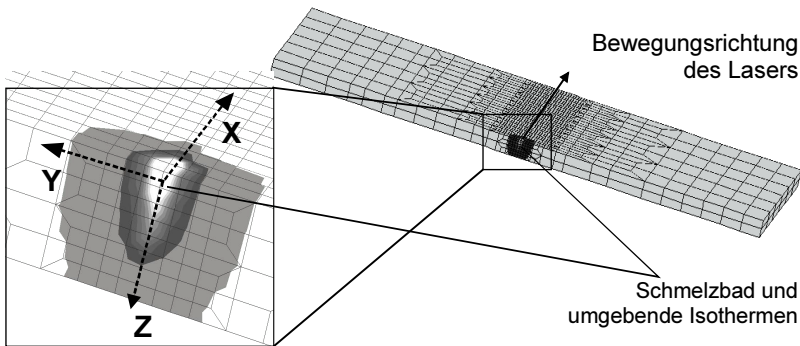


Abbildung 5.7: Definition der Geometrie bei der Modellierung der Wärmequelle

Die volumenbezogene Wärmequelle wird mit Hilfe von drei unabhängigen dimensionslosen Koeffizienten beschrieben. Jeder Koeffizient beschreibt die Lage der Wärmequelle relativ zu den Elementkanten. Die in diesem Fall verwendeten isoparametrischen Hexaederelemente bestehen aus 8 Knoten und 8 ihnen zugeordneten Integrationspunkten. Der Wärmefluss für jedes Element wird pro Integrationspunkt eingebracht, bezogen auf das dem Punkt zugeordnete Teilvolumen V_{IP} .

Für einen Integrationspunkt i ergibt sich folgende volumenbezogene Wärmeleistung $P_V(i)$:

$$P_V(i) = \frac{P_{\text{Laser}}}{V_{IP}} \cdot f_x(i) \cdot f_y(i) \cdot f_z(i) \cdot \eta \quad (\text{Gleichung 5.1})$$

Die Leistung pro Integrationspunkt hängt neben den ortsabhängigen Koeffizienten von der Gesamtlaserleistung P_{Laser} sowie dem Gesamtwirkungsgrad der Energieeinkopplung η ab. Die Leistung P_V wird in W/mm^3 angegeben.

Das Volumen V_{IP} ist bei isoparametrischen Hexaederelementen gleich dem Elementvolumen V_{Element} geteilt durch die Zahl der Integrationspunkte pro Element N_{IP} :

$$V_{IP} = \frac{V_{\text{Element}}}{N_{IP}} \quad (\text{Gleichung 5.2})$$

Aus Gründen der Lesbarkeit wird V_{IP} für alle Integrationspunkte und Elemente als gleich angenommen. Diese Annahme ist aufgrund der Forderung nach einem symmetrischen Aufbau des FE-Netzes im Nahtbereich gerechtfertigt. Einheit des Volumens V_{IP} ist mm^3 .

Die Summe der einzelnen Wärmeflüsse über die Menge aller Integrationspunkte N muss die effektive Gesamtleistung des Lasers ergeben, die sich aus dem Produkt aus Laserleistung und Wirkungsgrad ergibt:

$$\sum_{i=1}^N P_T(i) = \frac{P_{\text{Laser}}}{V_{IP}} \cdot \eta \quad (\text{Gleichung 5.3})$$

Aus den Gleichung 5.1 und 5.3 ergibt sich als Bedingung für die Koeffizienten:

$$\sum_{i=1}^N f_x(i) \cdot f_y(i) \cdot f_z(i) = 1 \quad (\text{Gleichung 5.4})$$

Die Faktoren f_x , f_y und f_z haben folgende Bedeutung:

- ◆ $f_x(i)$ ist der Faktor der Energieeinbringung in Vorschubrichtung x . Dieser ist eine Funktion der Lage des Laserbrennflecks relativ zu den Elementkanten. $f_x(i)$ wird so variiert, dass Gleichung 5-4 für jedes Inkrement erfüllt ist.
- ◆ $f_y(i)$ ist der Faktor in der Richtung y quer zum Vorschub. Dieser bleibt über die gesamte Nahtlänge aufgrund der parallelen Ausrichtung der Elemente konstant.
- ◆ $f_z(i)$ beschreibt die Energieeinkopplung in Dickenrichtung z für den Integrationspunkt i . Dieser Faktor bestimmt den Nahtquerschnitt. Da die Elemente parallel zur Schweißnaht ausgerichtet sind, bleibt f_z über die gesamte Nahtlänge konstant.

Die Schwierigkeit dieser Vorgehensweise ist die Übertragung der Energieeinkopplung von einem Kontinuum oder einem sehr fein detaillierten Netz in das grobe Finite Elemente-Netz des thermomechanischen Modells, das eine Diskretisierung des Kontinuums darstellt. Die exakte Schmelzbadgeometrie wird auf diese Weise durch Vorgabe der Laserleistung P , des Einkoppelwirkungsgrads η sowie des Faktors f_z angenähert. Der Faktor wird als Funktion des Abstands des Integrationspunktes von der Bauteiloberfläche angegeben. Die Modellierung des Schmelz-

badquerschnitts muss sehr sorgfältig erfolgen, da Tiefe und Form der Querschnittsfläche des Schmelzbads den Temperaturgradienten in Bauteildickenrichtung bestimmen. Kräfte, Momente und resultierende Verformungen im Bauteil sind über die temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte eine Funktion dieses Temperaturgradienten. Beispielsweise tritt bei einer Einschweißung bis zur Hälfte der Blechdicke ein starker Winkerverzug auf, während dieser bei einer Durchschweißung vernachlässigt werden kann.

Das Vorgehen ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Einkoppelwirkungsgrad und resultierende Schmelzbadgeometrie können mit Hilfe verschiedener Verfahren ermittelt werden, die auf analytischen oder FE-Methoden beruhen. Analytische Modelle wie beispielsweise die Modelle von *Sudnik u. a. (2000)* sowie von *Mohanty und Mazumder (1997)* haben einen hohen Reifegrad erreicht (vgl. Kapitel 2.3.3). *Rick (2001, S. 76ff)* stellt eine Integration der physikalischen Modelle in ein FE-System vor, um auf diese Weise die Wärmequelle für nachfolgende Berechnungsschritte zu ermitteln. Die Energieeinkopplung beruht auf den Modellen zur Energieeinkopplung nach *Beck (1996)*. Ergebnisse des Modells sind die Nahtgeometrie, der Wirkungsgrad der Energieeinkopplung sowie eine Abschätzung der Metallurgie im Nahtbereich. Von den genannten Autoren wurde die Eignung der Systeme für die Ermittlung des Nahtquerschnitts dargestellt sowie Hinweise zur Modellvalidierung gegeben (*Sudnik u. a. 1998*). Im folgenden sollen deshalb die Modelle zur Bestimmung der Prozessparameter nicht weiter behandelt werden. Neben dem modellbasierten Vorgehen kann auf Erfahrungswissen zurückgegriffen werden, das auf experimentellen Daten oder auch bereits vorhandenen Simulationsrechnungen an ähnlichen Fügegeometrien beruht.

Die Ermittlung von f_z erfolgt iterativ durch Anpassung der Koeffizienten. Zusätzliche Informationen können durch einfache Überschlagsrechnungen gewonnen werden. Für den Fall einer sich nicht verändernden Geometrie des Schmelzbades, beispielsweise in der Mitte des Bauteils, kann angenommen werden, dass die durch den Laserleistung und den Wirkungsgrad eingebrachte Leistung in das Schmelzbad gleich der über die Schmelzwände abgeführten Leistung sein muss. Weitere mögliche Annahmen sind die Zusammensetzung des Schmelzbads aus einzelnen

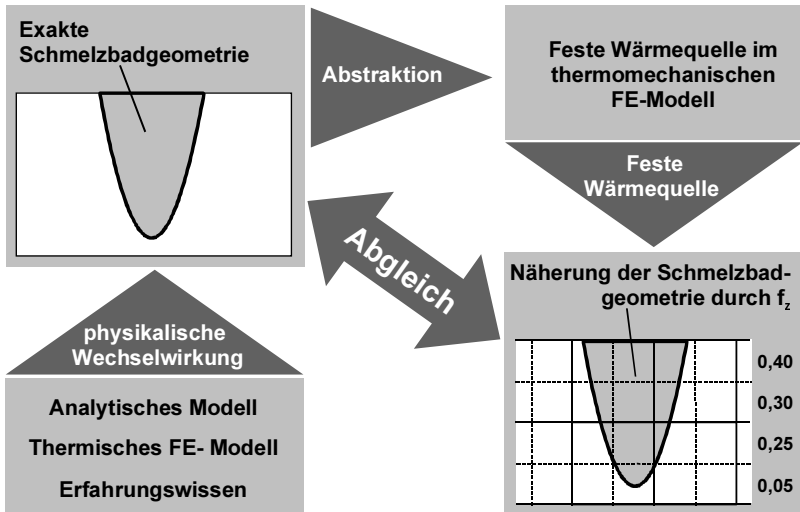


Abbildung 5.8: Näherung der Schmelzbadgeometrie im thermomechanischen Finite Elemente-Modell auf Basis verschiedener Eingangsdaten

Scheiben normal zur Einfallrichtung des Lasers (Rotationssymmetrie). Die Dicke der Scheiben entspricht den Elementabmessungen in z-Richtung, so dass auf diese Weise für jedes Element der zugehörige Faktor berechnet werden kann.

Für das Funktionieren dieser Vorgehensweise darf die Elementgröße im Nahtbereich nicht zu groß gewählt werden. Da die eingebrachte Energie auf das Element bzw. Integrationspunktvolumen bezogen wird, kann bei zu großen Elementen die Schmelztemperatur aufgrund der zu großen Wärmekapazität pro Element nicht erreicht werden. Dies führt zu einer insgesamt zu niedrigen Temperaturverteilung und einer fehlerhaften Abbildung der Temperaturgradienten, die das thermomechanische Verhalten grundlegend beeinflussen.

Das Zusammenwirken zwischen der Vernetzung und der Abbildung der Wärmequelle wurde beispielhaft mit Hilfe experimenteller Daten untersucht. Für diese Studie wurde auf Stahlbleche aus St 14 (DC04) mit den Abmessungen 80 mm x 40 mm x 1,5 mm eine Blindnaht aufgebracht. Verwendet wurde ein Nd:YAG-Laser mit 2kW und 0,6mm Fokusbereich.

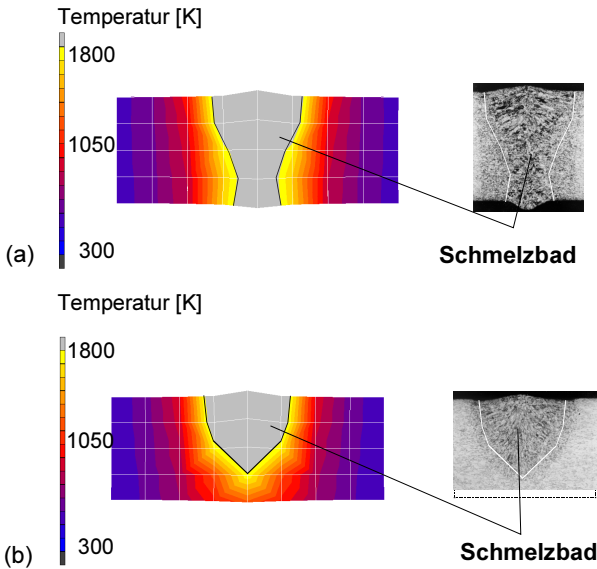


Abbildung 5.9: Vergleich des Schmelzbads von Simulation und Experiment an einer Blindschweißung in ebenes Stahlblech: a) Durchschweißung ($P=2\text{kW}$, $v=2,4\text{m/min}$) b) Einschweißung ($P=2\text{kW}$, $v=3,4\text{m/min}$)

messer. Abbildung 5.9a und b zeigen einen Vergleich der Schmelzbäder im Experiment und in der Simulation. Die Beispiele beweisen, dass mit Hilfe der Anpassung der Energieeinkopplung in Tiefenrichtung (Koeffizient f_2) eine sehr gute Übereinstimmung zwischen gemessenem und berechneten Schmelzbad erreicht werden kann.

Abbildung 5.10 zeigt einen Vergleich des resultierenden Verzugswinkels der Blechoberfläche quer zur Naht als Funktion der Streckenenergie. Die Vorschubgeschwindigkeit wurde zwischen 2 und 6 m/min variiert. Die Ausgleichskurven sind Funktionen dritter Ordnung, die mit minimalem Fehlerquadrat an die Mess- bzw. berechneten Punkte angepasst sind. Für die Ermittlung des Verzugswinkels wurden die Bleche im Experiment nach dem Schweißen mit einem Moire-Sensor vermessen. Anschließend kann der Verzugswinkel mit Hilfe von Ausgleichsebenen zwischen den beiden Blechhälften bestimmt werden. Die Fehlerbalken entsprechen jeweils 5 Schweißungen pro Streckenenergie sowie drei Messungen pro geschweißtem Blech. Im Simulationsmodell wurden verschiedene

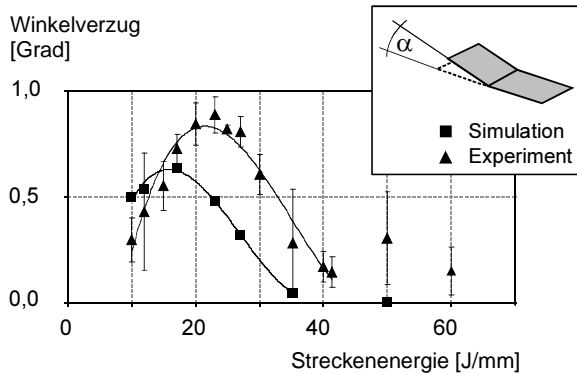


Abbildung 5.10: Vergleich des resultierenden Bauteilverzugs einer Blindschweißung in ebenes Stahlblech

Elementgrößen untersucht, dargestellt ist das Ergebnis für 4 Elemente in Dickenrichtung.

Das Ergebnis zeigt ein qualitativ richtiges Verhalten und eine quantitativ richtige Größenordnung. Die Unterschiede in der Höhe der absoluten Werte ergeben sich aus dem unbekanntem und auch äußerst schwer messbarem Lieferzustand des Ausgangsmaterials DC04 (St 14). Dieser Effekt wird durch die Tatsache verstärkt, dass die Bauteilverformung bei einfachen Proben vom lokalen Werkstoffzustand abhängt und die Ergebnisse damit häufig eine große Streuung aufweisen. Im Gegensatz dazu ist bei größeren Bauteilen eine deutlich bessere experimentelle Reproduzierbarkeit festzustellen. Die Ursache ist in der größeren Steifigkeit der komplexeren Bauteile zu vermuten, wodurch das Verhalten stärker durch die mechanischen Randbedingungen determiniert ist (vgl. Rick u. a. 1998).

Die Verschiebung des Maximums ist weniger ein Problem der Werkstoffdaten, sondern liegt an der relativ groben Vernetzung. Die vier Elemente ermöglichen zwar eine relativ exakte Abbildung des Schmelzbades. Für eine genauere Abbildung des mechanischen Verhaltens müsste das Modell so fein vernetzt sein, dass für verschiedene Streckenenergien die Grenzfläche flüssig - fest mit den Grenzflächen der Elemente zusam-

menfällt. Dies wäre aus Sicht einer möglichst kurzen Rechenzeit nicht akzeptabel. Die qualitativ richtige Abbildung des Bauteilverhaltens sowie die erzielte Genauigkeit ist für die meisten Anwendungsfälle der Fertigungsplanung ausreichend, um Aussagen über Fertigungsmittel oder Prozessfolgen zu treffen.

Erweiterung für dreidimensionale Nahtverläufe

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebene Vorgehensweise bildet eine ebene und unidirektionale Schweißnaht ab. Im Normalfall verlaufen Laserstrahlschweißnähte dreidimensional im Raum. Aufbauend auf einer Vernetzung des Nahtbereichs mit parallel in Schweißrichtung ausgerichteten Elementen sowie der Faktorisierung der Energieeinkopplung (Gleichung 5.4) können grundsätzlich beliebige Nahtverläufe abgebildet werden, wenn die Schweißnaht analytisch in Form einer Bahnkurve darstellbar ist. Dies ist mit sehr hohem, für jede Schweißnahtform neu zu erbringenden Modellierungsaufwand verbunden.

Aus diesem Grund wurde eine Methode entwickelt, die beliebige Nahtverläufe abbilden kann. Ähnlich der Parametrisierung einer Roboterbahn wird der räumliche Verlauf der Schweißnaht durch stückweise lineare Abschnitte angenähert. Diese werden durch einen Anfangs- und einen Endpunkt sowie einen Punkt zur Definition der Normalenrichtung festgelegt. Der fehlende dritte Vektor des Koordinatensystems wird durch das Vektorprodukt der beiden definierenden Vektoren berechnet. Die Punkte können durch Angabe der Koordinaten definiert werden. Eleganter ist die Verwendung von Knoten des FE-Netzes, da die Knotenkoordinaten dem FE-System vorliegen. Notwendige Bedingung für diese Vorgehensweise ist die Möglichkeit, in den Unterrouتين zur Definition der Wärmequelle auf die Knotenkoordinaten zugreifen zu können. Die Punkte werden im Eingabefile der Rechnung festgelegt und über eine benutzerdefinierte Unteroutine ausgelesen.

Mit Hilfe dieser drei Punkte wird ein Koordinatensystem für die Laserbewegung definiert, in dem sich die Wärmequelle entlang gerader Achsen bewegt. Da bei komplexen Bauteilen die Elemente der Schweißnaht beliebig im Raum orientiert sein können, werden die Integrationspunktkoordination in das neue Koordinatensystem transformiert (Abbildung 5.11).

Die Transformation der Koordinaten erfolgt durch eine Verschiebung des Ursprungs von O zu O' sowie durch eine Drehung der Koordinatenachsen xyz in die Richtungen $x'y'z'$ (siehe *Bronstein und Semendjajew 1989, S. 215ff*). Die positive x' -Achse des neuen Koordinatensystems verläuft in Richtung des Vorschubvektors, die $y'z'$ -Ebene ist normal dazu. Auf diese Weise „sieht“ die Wärmequelle Integrationspunkte von Elementen, die entlang der neuen Koordinatenachsen x' , y' und z' ausgerichtet sind.

Eine räumlich gekrümmte Schweißnaht wird durch die stückweise

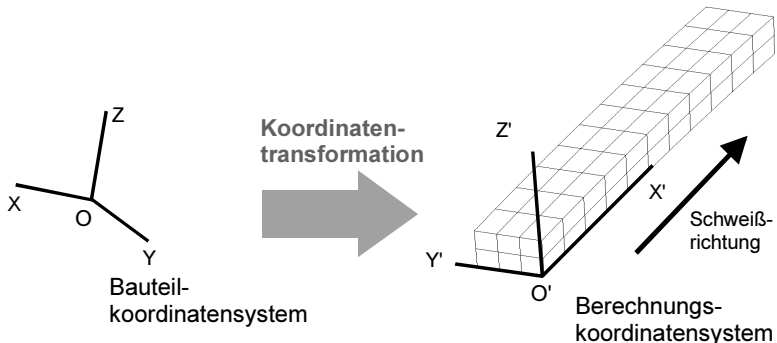


Abbildung 5.11: Koordinatentransformation zur Berechnung der Wärmequelle

Definition und Aneinanderreihung einzelner Koordinatensysteme angenähert, in denen sich die Wärmequelle bewegt. Kriterium für die Anzahl an Geradenstücken ist eine konstante Wärmeeinbringung entlang der Schweißnahtgeometrie. Darüber hinaus können für jedes dieser Teilstücke Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit angegeben werden, um eine Variation der Laserparameter zu berücksichtigen.

Abbildung 5.12 beschreibt die Vorgehensweise an einem Praxisbeispiel. Abbildung 5.12a zeigt das Finite Elemente-Modell zweier Segmente eines Lampenschirms, der die Form eines Rotationsellipsoids hat. Die Schweißnaht hat einen stark gekrümmten Verlauf, der in Abbildung 5.12b im Querschnitt dargestellt ist. Abbildung 5.12c stellt exemplarisch die Definition der einzelnen Koordinatensysteme dar.

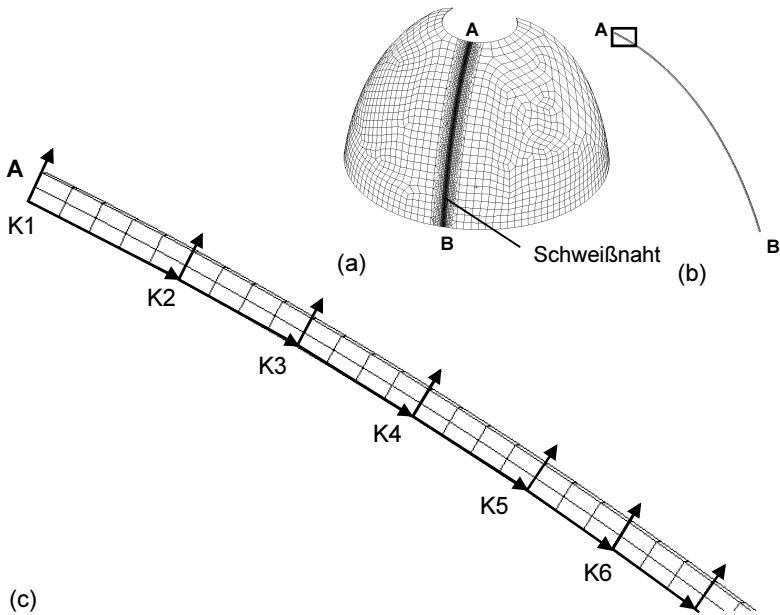


Abbildung 5.12: Abbildung einer dreidimensionalen Schweißnaht durch eine Bahnkurve a) Gesamtmodell b) Querschnitt der Schweißnaht c) Ausschnitt der Schweißnaht mit der Definition der Koordinatensysteme

Die dargelegte Vorgehensweise kann die Energieeinkopplung entlang dreidimensionaler Konturen modellieren (Abbildung 5.13). Für das Anwendungsbeispiel der Lampenschirmsegmente wird durch die Vorgabe von ca. 60 stückweise linearen Abschnitten eine konstante Energieeinbringung über den gesamten Nahtverlauf erreicht. Allgemeine Hinweise zur Wahl der Länge der linearen Abschnitte können nicht angegeben werden, die Modellierung muss für jede Geometrie neu konzipiert werden.

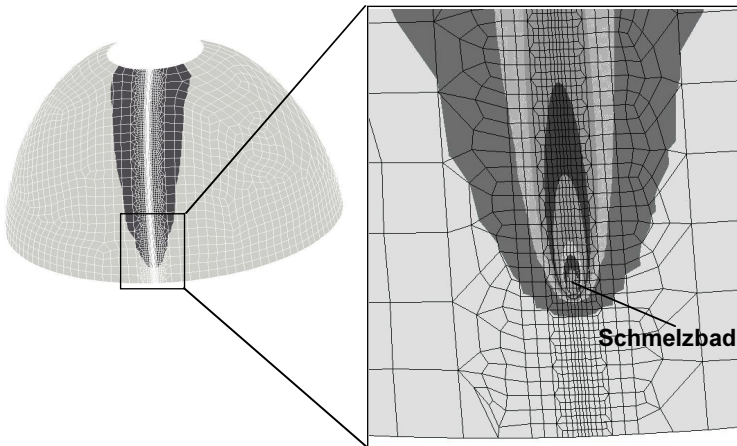


Abbildung 5.13: Schmelzbad beim Laserstrahlschweißens eines dreidimensionalen Aluminiumbauteils

5.2.5 Sonstige thermische Randbedingungen

Neben der Wärmequelle als wichtigste thermische Randbedingung spielt die Abbildung der Kühlmechanismen eine wichtige Rolle, um die Zeit-Temperatur-Zyklen im Bauteil richtig zu modellieren. Wärmeenergie kann durch Leitung, Konvektion oder Strahlung transportiert werden (*Gerthsen und Vogel 1995, S. 232ff*).

Die Konvektion ist immer mit einem Materialtransport verbunden. Sie kann vernachlässigt werden, solange keine Kühlung durch erzeugte Luftströme oder ähnliche Mechanismen vorliegt. Die Kühlwirkung des Schutzgases kann vernachlässigt werden, da die Zufuhr zeitlich und räumlich begrenzt während des Schweißvorgangs erfolgt. Zudem ist die Wirkung des Schutzgases in der Näherung der Energieeinkopplung berücksichtigt.

Der dominierende Kühlmechanismus bei metallischen Bauteilen ist die Wärmeleitung. Diese Kühlung findet einerseits durch Wärmeleitung im Bauteil als auch vom Bauteil zu den Flächen der Einspannvorrichtung statt. Für eine flächige metallische Einspannung kann die Kühlung durch

eine eindimensionale Wärmeleitung in das Spannelement dargestellt werden.

$$P_{\text{Kühlung}} = \frac{A}{l_0} \cdot \lambda \cdot (T - T_0) \quad (\text{Gleichung 5.5})$$

A	Fläche des Querschnitts, durch den die Wärmeleitung stattfindet [m ²]
λ	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
T	Temperatur des Integrationspunktes [K]
T ₀	Umgebungstemperatur [K]
l ₀	Bezugslänge [m]

Die Bezugslänge ist der Abstand zwischen dem aktuellen Integrationspunkt und dem Ort, an dem Raumtemperatur angenommen wird. Die Fläche A wird bestimmt durch die Querschnittsflächen der Spannelemente sowie der Begrenzungsflächen der modellierten Struktur zu anderen, nicht abgebildeten Bauteilen. Da die Kühlleistung wie die Energie des Lasers pro Integrationspunkt abgeleitet wird, muss die Gesamtleistung auf die Leistung pro Integrationspunkt umgerechnet werden (Einheit W/mm³).

Weiterer nicht zu vernachlässigender Kühlmechanismus ist der Wärmeübergang zwischen dem Bauteil und den angrenzenden Luftschichten. Dieser ist ein Sonderfall der Strahlung und kann phänomenologisch analog zu Gleichung 5.5 beschrieben werden (*Gerthsen und Vogel 1995, S. 236f*). Die Kühlleistung ist ebenfalls eine Funktion der Temperaturdifferenz zwischen Bauteiloberfläche und umgebenden Luftschichten. Schwieriger ist die Ermittlung des Wärmeübergangs zwischen Bauteil und Luft, er wird in der Regel mit Hilfe von Tabellenwerken abgeschätzt (vgl. *Stöcker 1994, Tabelle 23.4*).

Aufbauend auf die beschriebenen Mechanismen wird die Kühlung des Bauteils durch folgende Ansätze abgebildet:

- ◆ Wärmeleitung im Bauteil: Diese wird durch die Wärmeleitungsgleichung sowie die temperaturabhängigen Wärmeleitungskoeffizienten beschrieben. Die Lösung dieser Gleichung ist als Kernfunktionalität im FE-System enthalten.

- ◆ Wärmeleitung in die Spannelemente: Die Beschreibung erfolgt durch die Vorgabe eines Wärmeflusses, der eine Funktion der Temperaturdifferenz und der Fläche der Spannelemente ist.
- ◆ Wärmeübergang in die Umgebung: Die Modellierung wird durch die Vorgabe eines temperaturabhängigen Wärmeflusses aus den Elementen der Oberfläche des Bauteils durchgeführt. Der Wärmeübergangskoeffizient sowie die Oberfläche des Bauteils werden abgeschätzt.

Im Hinblick auf die Komplexität des Gesamtmodells sollte die Kühlung des Bauteils so einfach wie möglich abgebildet werden. Beurteilungskriterium für die Qualität der Modellierung ist der Zeit-Temperatur-Verlauf im Bauteil.

5.2.6 Mechanische Randbedingungen

Das mechanische Verhalten des Bauteils stellt einerseits eine Reaktion auf die thermische Last dar, andererseits ist es abhängig von den mechanischen Randbedingungen. Diese können aufgebrachte Kräfte, Spannungen, Verformungen oder die Beeinflussung von Freiheitsgraden des Modells sein. Ziel des Simulationseinsatz ist die Ermittlung der Wechselwirkungen zwischen Bauteil, Schweißprozess und Fertigungsmittel. Daher ist aus Sicht der Fertigungsplanung die wichtigste mechanische Randbedingung die Abbildung der Spannvorrichtungen, die das Bauteil im Raum fixieren.

In der industriellen Praxis sind verschiedenste Arten von Spannvorrichtungen verfügbar. Diese werden nach der spezifischen Fragestellung ausgewählt und mit Hilfe des Erfahrungswissens der Planer in ihrer Art und Lage gestaltet (vgl. Kapitel 2.3.2). Im Folgenden wird eine Möglichkeit aufgezeigt, wie ein großer Teil der in der Serienfertigung verwendeten Spannsysteme klassifiziert werden kann. Kriterien sind die Art der Kontaktfläche zwischen Spannelement und Bauteil (unnachgiebig, nachgiebig) und die Lage der Spannelemente im Raum (fest, variabel). Nach dieser Klassifizierung ergeben sich verschiedene Spannsituationen (Tabelle 5.2), die im Folgenden näher erläutert werden.

Lage des Spannelements im Raum	Beschaffenheit der Kontaktfläche	
	Unnachgiebig	Nachgiebig
Fest	Situation 1 Klassische Spannbacken mit metallischer Auflagefläche	Situation 2 Kniehebelspanner mit Elastomerabdeckung
Variabel	Situation 3 Metallische Rollenspanntechnik	

Tabelle 5.2: Klassifizierung industriell eingesetzter Spanntechnik

Situation 1 (räumlich fest, unnachgiebige Kontaktfläche)

Diese Spannmethode verwendet hydraulische oder mechanische Spannbacken mit metallischen Auflagepunkten, die punktförmig oder flächig gestaltet sein können. Die Spannelemente befinden sich fest im Raum. Die Fläche zwischen Bauteil und Spannelement ist nicht nachgiebig. Bei optimalen Bedingungen wird das Bauteil starr an einer Position gehalten, allerdings können auch nur ein oder zwei Freiheitsgrade auf diese Weise fixiert werden. In der Simulation wird das FE-Netz so gestaltet, dass an den geometrischen Orten der Spannstellen passende Knoten vorhanden sind. Diese werden in den entsprechenden Freiheitsgraden eingefroren. Voraussetzung für diese einfache Art der Modellierung bei einer nicht vollständigen Fixierung der Bauteile ist eine näherungsweise reibungslose Bewegung der Bauteile im Sinne eines Loslagers (vgl. Anwendungsbeispiel Ladebordwand, Kapitel 6.1). Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt, so muss die Reibung dieser Spannsituation durch Kontaktflächen modelliert werden, die einen erheblichen Bedarf an Modellierungs- und Rechenaufwand erzeugen (vgl. Abschnitt 5.2.1). Dieser Fall wird aufgrund der Komplexität der auftretenden Reibverhältnisse nicht weiter behandelt. Durch das Einfrieren von Freiheitsgraden allein wird die Rechenzeit kaum beeinflusst.

Zur Überprüfung dieser Modellierung wurden experimentelle Untersuchungen an Stahlblechen durchgeführt (St12, $100 \times 60 \times 3 \text{ mm}^3$). Auf die Bleche wurden Blindschweißungen mit einem Nd:YAG-Laser aufgebracht ($P = 3 \text{ kW}$, $r = 0,3 \text{ mm}$), die Vorschubgeschwindigkeit wurde bei sonst gleichen Schweißparametern zwischen 3 und 10 m/min variiert. Abbildung 5.14a zeigt die gewählte Versuchsanordnung. Das Bauteil wurde auf der einen Seite fest fixiert. Auf der anderen Seite erfolgte die Kraftmessung. Die Kräfte wurden auf der Bauteiloberfläche abgegriffen und über einen verwindungssteif gestalteten Hebel im Verhältnis 1:1 auf eine Kraftmessdose übertragen. Die Bauteile wurden durch die Vorspannkraft des Hebels (ca. 10 N) auf eine starre Unterlage gedrückt. Dadurch bewirkt diese Versuchsanordnung eine Fixierung der Bauteile in Normalenrichtung zur Oberfläche. Auf eine weitere Einspannung der Bauteile wurde verzichtet, um keine weiteren Effekte durch Verspannungen oder Beulen zu erzeugen. Die Einspannung bildet auf diese Weise ein Festlager in z-Richtung sowie ein Loslager in x- und y-Richtung.

Mit dieser Anordnung wird die durch den Bauteilverzug entstehende Kraft senkrecht zur Oberfläche gemessen. Der Abstand des Messpunktes zur Naht wurde variiert. In Abbildung 5.14b stellt Reihe 1 die Kraft im Abstand von 45 mm von der Schweißnaht, Reihe 2 die Kraft gemessen im Abstand von 20 mm dar. Der Spannungspunkt befand sich in beiden Fällen in der Blechmitte, es wurde ein quadratisches Spannelement mit einer Fläche von $6 \times 6 \text{ mm}^2$ verwendet. Für jeden Punkt der Kurve wurden drei Messkurven erstellt. Dargestellt ist der Maximalwert der aus den drei Kurven gemittelten Kraft, reduziert um die aufgebrachte Vorspannkraft.

Die Kurven sind Ausgleichspolynome dritter Ordnung. Die maximale Kraft liegt bei beiden Kurven im Bereich zwischen 6 und 8 m/min Vorschubgeschwindigkeit vor. Die Kräfte sind abhängig vom auftretenden Winkelverzug des Bauteils. Bei beiden Versuchsreihen beträgt die Einschweißtiefe bei der maximalen Kraft ungefähr die Hälfte der Blechdicke. In diesem Fall tritt ein maximaler Temperaturgradient in Blechdickenrichtung auf, der maximale Momente in der Bauteilmitte und somit maximale Kräfte an den Messpunkten zur Folge hat. An den Grenzwerten *Geschwindigkeit gegen 0* und *Geschwindigkeit gegen Unendlich* gehen die Kräfte gegen 0, da sowohl im Fall Durchschweißung als auch im Fall keine Schweißung

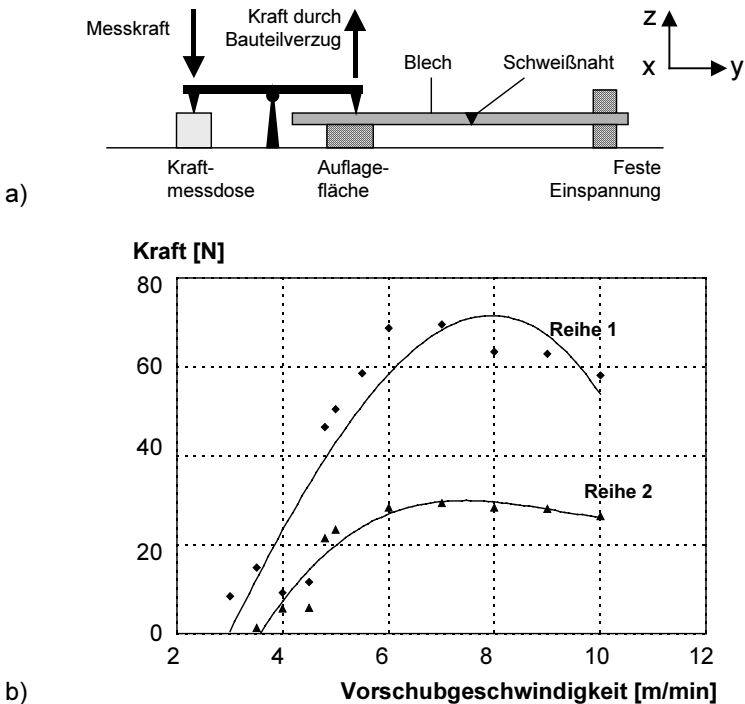


Abbildung 5.14: Experimentell ermittelte Maximalkraft an einem Spannelement: a) Messaufbau b) Ergebnisse (**Reihe 1**: Spannkraft im Abstand von 45 mm von der Schweißnahtmitte; **Reihe 2**: Spannkraft im Abstand von 20 mm von der Schweißnahtmitte)

kein Temperaturgradient in Dickenrichtung und daher kein Winkelverzug auftritt.

Zur Überprüfung im Simulationssystem wurde das Bauteil an den der Spannstelle entsprechenden Knoten in z-Richtung fixiert (Festlager), die anderen Raumrichtungen wurden frei gelassen. Dies entspricht der Versuchsanordnung in Abbildung 5.14. Die auftretenden Reaktionskräfte stimmen in der Größenordnung sehr gut mit den tatsächlichen Kräften überein. Abweichung zwischen Simulation und Experiment sind einerseits durch elastische Nachgiebigkeiten der Spanner bedingt. Thermische

Verlagerungen können aufgrund der geringen thermischen Belastung der Spanner vernachlässigt werden. Andererseits hängt der zeitliche Verlauf der Kräfte von den spezifischen Eigenschaften der untersuchten Probe ab, insbesondere vom Verfestigungsverhalten. Für den Einsatz der Simulation in Planungsszenarien der Fertigungsplanung bleibt es aufgrund des mit der Ermittlung von Werkstoffdaten verbundenen Aufwands Aufgabe der Werkstoffhersteller, für die gelieferten Werkstoffe simulationsgerechte Werkstoffdaten von Anfang an mitzuliefern.

Die mit Hilfe der Simulationsrechnungen bestimmten Kräfte an den Spannungspunkte können verwendet werden, um die einzusetzenden Spannelemente zu dimensionieren und in ihrer Anordnung durch iteratives Vorgehen zu optimieren (Abbildung 5.15). Ein solches Vorgehen bietet auf diese Weise die Chance der Kostenreduktion durch umfangreiche experimentelle Untersuchungen innerhalb des Simulations-systems. Andere Fragestellungen, bspw. der Zugänglichkeit, bleiben unberücksichtigt. Hierfür muss beispielsweise auf die 3D-Kinematiksimulation zurückgegriffen werden (vgl. Kapitel 2.3.2).

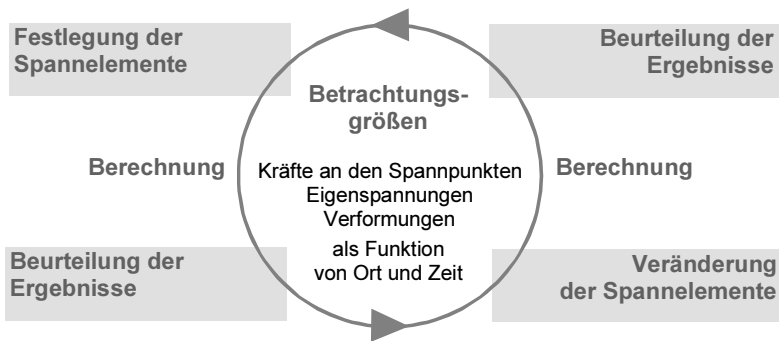


Abbildung 5.15: Vorgehensweise zur Verbesserung der Lage von Spannungspunkten

Spannsituation 2 (räumlich fest, nachgiebige Kontaktfläche)

Verschiedene Spannsysteme sind zwar in ihrer Lage im Raum fest, beinhalten aber eine Nachgiebigkeit an der Fläche zwischen Bauteil und Spannelement. Sie fixieren das Bauteil nur teilweise in seiner räumlichen Lage. In der Simulation ist die Abbildung der Nachgiebigkeit von Spannelementen in der Regel mit Mehraufwand an Modellierung verbunden. Sehr komplex ist die Abbildung von Kniehebelspannern mit Elastomer-Abdeckungen (vgl. *VDI-ADB 1992, S. 125ff*). Der Elastomer erlaubt durch seine elastischen Eigenschaften ein Ausweichen des Bauteils, das von der Härte des verwendeten Materials sowie den Hebelverhältnissen zwischen Bauteil und Spanner abhängt. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass diese Bauteilbewegung bei größeren Bauteilen durchaus erheblich sein kann (*Rick u.a. 1998*).

Die Nachgiebigkeit von Spannelementen mit einer Elastomer-Abdeckung wurde an einer einfache Blindschweißung an einem Stahlblech aus DC04 (St 14) modelliert. Dieses wurde auf einer Seite fest eingespannt (Spannsituation 1). Auf der gegenüberliegenden Seite wurde das Modell von einem Kniehebelspanner gehalten, der das Bauteil gegen eine unbewegliche Spannfläche drückt (Abbildung 5.16). Gegenüber einem Standardmodell der Einspannung mit eingefrorenen Freiheitsgraden (vgl. Spannsituation 1) ist eine feinere Vernetzung im Bereich des Spannelements notwendig (Abbildung 5.16a). Zudem beinhaltet diese Fragestellung eine komplexe Kontaktmodellierung. Sowohl zwischen Bauteil und Elastomer als auch zwischen Bauteil und Spannfläche wurden Kontaktflächen modelliert (Abbildung 5.16b und c). Die durch die thermische Last und die resultierende Verteilung der Wärmedehnungen auftretenden Kräfte drücken das Bauteil gegen die Einspannung, was in einer Deformation des Elastomers resultiert. Der Elastomer wurde basierend auf der vom Hersteller angegebenen Shore-Härte als rein elastischer Körper modelliert. Eine Nachgiebigkeit des Kniehebelspanners selbst wurde im Modell nicht berücksichtigt. Elastizitäts- und Schubmodul wurden aus der Shore-Härte des Elastomers abgeschätzt (*Dubbel u.a. 1997, S. G60*).

Abbildung 5.16d zeigt die resultierende Deformation von Bauteil und Spannelement zu Beginn des Abkühlvorgangs. Die Verformung ist 30fach vergrößert. Es zeigt sich, dass das Elastomer-Spannelement verformt wird und für eine exakte Berechnung im Modell berücksichtigt werden müsste. Andererseits führt diese Art der Modellierung zu einer Erhöhung der Rechenzeit gegenüber der einfachen Modellierung (Spannsituation 1) um mindestens den Faktor 4. Diese Zahl wird größer, je mehr Spannelemente berücksichtigt werden.

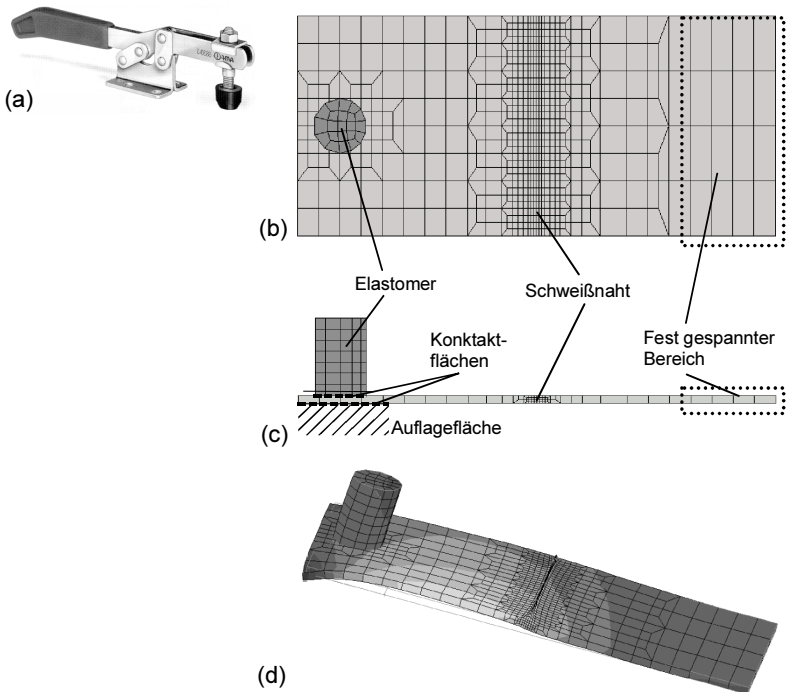


Abbildung 5.16: Modell eines Kniehebelspanners mit Elastomerabdeckung. (a) Kniehebelspanner (Bildquelle: AMF), (b) Draufsicht und (c) Querschnitt des FE-Modells, (d) Verformung von Blech und Elastomer zu Beginn des Abkühlvorgangs (Vergrößerungsfaktor 30)

Für der Berechnung praxisrelevanter Fragestellungen sollte deshalb auf diese Art der Modellierung verzichtet und der Einfluss der Spannelemente bei der Beurteilung der Ergebnisse berücksichtigt werden. Eine Ersatzlösung stellt möglicherweise die Verwendung von linear-elastischen Federn dar. Federn haben normalerweise eine Kennlinie, die für Zug- und Druckspannungen gleiches Verhalten aufweist. Ein Elastomer-Spannelement hat auf Druckbelastung eine sehr steil ansteigende Kennlinie, bei Zugbelastung löst sich das Bauteil vom Spanner und es wirken keine weiteren Kräfte. Solche nichtlinearen Federkennlinien sind in den gängigen FE-Systemen noch nicht standardmäßig verfügbar.

Spannsituation 3 (Räumlich variabel, unnachgiebige Kontaktfläche)

Diese Art der Spanntechnik wird überwiegend im Flugzeugbau sowie für Überlappschweißverbindungen im Karosserierohbau eingesetzt. Üblicherweise wird der Bearbeitungskopf mit einer flexiblen Rollenführung verbunden, die den Laser relativ zu den Fügepartnern positioniert und durch eine frei programmierbare Anpresskraft mögliche Fügespalte auf einen tolerierbares Maß reduziert (*Heider 1994, Rippl 1997, Larsson 1994*).

Die FEM-Analyse dieser flexiblen Rollenführung konnte bisher nicht zufriedenstellend gelöst werden. In diesem Fall sind die Anforderungen an die Modellierung zu komplex, da verschiedene Vereinfachungen nicht beibehalten werden können. Abbildung 5.17 veranschaulicht die verschiedenen Vorgänge. Beide Fügepartner werden zunächst als getrennte FE-Netze modelliert. Durch die Anpresskraft der Rollenführung werden die beiden Bauteile aufeinander gedrückt. Zur Übertragung der Kräfte müssen zwischen den Bauteilen Kontaktflächen definiert werden. Nach dem Wärmeeintrag müssen die beiden getrennten FE-Netze verbunden werden (vgl. Kapitel 5.2.1).

Diese verschiedenen Vorgänge sind jeder für sich sehr komplex zu modellieren. Teilweise schließen sich die zu verwendenden Modelloptionen gegenseitig aus. Beispielsweise ist die Verwendung von Kontaktflächen sehr rechenzeitintensiv und erlaubt keine Parallelisierung der Berechnung (siehe Kapitel 5.2.7). Genauso ist die Verbindung von

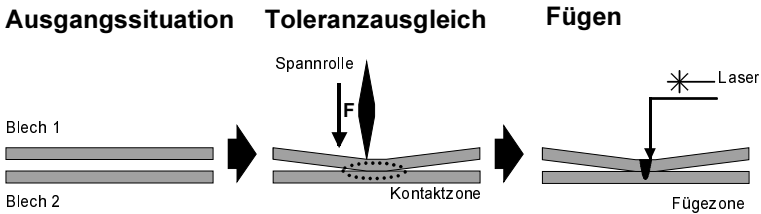


Abbildung 5.17: Prinzipieller Ablauf beim Laserstrahlschweißen mit einer flexiblen Rollenführung

getrennten FE-Netzen nur sehr aufwändig zu realisieren. Eine Abbildung der Spannsituation 3 ist daher noch nicht möglich.

Die beschriebene Vorgehensweise gibt Hinweise zur Modellierung verschiedener, industriell eingesetzter Arten der Spanntechnik. Es empfiehlt sich grundsätzlich, durch Abstraktion die Spanntechnik so einfach wie möglich abzubilden. Beispiele sind die Vernachlässigung kleiner Nachgiebigkeiten an der Spannstelle oder die Modellierung eines Reibkontakts durch ein Loslager. Allerdings sind die Ergebnisse sehr sorgfältig unter Berücksichtigung dieser Annahmen zu begutachten.

5.2.7 Maßnahmen zur Reduzierung der Rechenzeit

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die verschiedenen Bausteine erläutert, aus denen ein thermomechanisches Modell des Laserstrahlschweißens zusammengesetzt ist. Aufgrund der Komplexität der Modelle ist die Berechnung sehr rechenintensiv. Im Folgenden soll untersucht werden, mit welchen Methoden die Rechenzeit reduziert werden kann, ohne die Komplexität des Modells zu reduzieren. Gängige Simulationssysteme bieten verschiedene Möglichkeiten an, um die Rechenzeit für ein gegebenes Modell zu reduzieren. Sie reichen von der Verwendung von Superelementen oder Substrukturen (siehe z.B. Zienkiewicz 1984, S. 164ff) bis hin zu adaptiven Vernetzungsverfahren sowie der Parallelisierung der Berechnung.

Des Weiteren kann die Genauigkeit der Rechnung durch die Veränderung der Elementansatzfunktion erhöht werden. Dieses Verfahren kommt bei der sog. p-Methode zum Einsatz. Bei Standardelementen ist der Grad p des Polynoms der Elementansatzfunktion festgelegt. Eine Genauigkeitssteigerung erfolgt durch eine Anpassung der Elementgröße. Bei der p-Methode bleibt die Vernetzung konstant. Die Genauigkeit wird über eine Anpassung des Polynomgrades der Ansatzfunktion als Funktion eines vorbestimmten Parameters gesteigert, beispielsweise der Spannungen oder Dehnungen (*Fröhlich S. 88ff*).

Bei genauerer Betrachtung scheidet der Großteil der Modelle aus, weil eine oder mehrere der notwendigen Funktionalitäten in Verbindung mit der Modellierungsart nicht eingesetzt werden können. Beispielsweise sind Superelemente oder Substrukturen häufig beschränkt auf rein elastische Fragestellungen. Das gleiche gilt derzeit für p-Elemente (vgl. Kapitel 5.2.1). Für gekoppelte thermomechanische Analysen sind im FE-System MSC.MARC zwei Methoden verfügbar: die adaptive Vernetzung sowie die Parallelisierung. Beide Methoden sollen in den nächsten beiden Abschnitten näher dargelegt werden.

Adaptive Vernetzung

Die Verwendung von adaptiven Netzen bietet die Möglichkeit, die Zahl der Elemente deutlich zu verringern. Die Struktur wird in ihrem Grundzustand zunächst grob vernetzt. Während der Berechnung werden Kriterien definiert, nach denen das Netz automatisch verfeinert wird, um die Genauigkeit der Berechnung zu erhöhen. Diese Kriterien können beispielsweise das Überschreiten von vorher definierten Temperatur- oder Spannungsgradienten, maximale Dehnungen, Konvergenzkriterien oder weitere, auf der FE-Technologie basierende Größen sein (vgl. *MSC:MARC 1999a, S. 4-37ff*).

Für das Laserstrahlschweißen bietet sich das sogenannte „Box“-Kriterium an. Der Ort der neu erzeugten Elemente wird mit Hilfe eines benutzerdefinierbaren Volumenbereichs (Box) festgelegt. Elemente innerhalb des Volumens werden verfeinert, in dem die Elementkanten halbiert werden. Die Box kann im Raum verschoben werden, so dass neue Elemente erzeugt und Elemente außerhalb des Volumens wieder zusammengefügt

werden. Es können eine einzelne Box oder auch ineinander geschachtelte Boxen verwendet werden. Auf diese Weise kann mit dem die Wärmequelle umgebenden Bereich hoher Temperatur- und Spannungsgradienten (vgl. Abbildung 2.4) ein sehr feines Netz mitbewegt werden, das nach Abschalten des Lasers aus dem Bauteil herausbewegt wird. Der sehr lange dauernde Abkühlvorgang kann so mit einer deutlich reduzierten Zahl an Elementen berechnet werden.

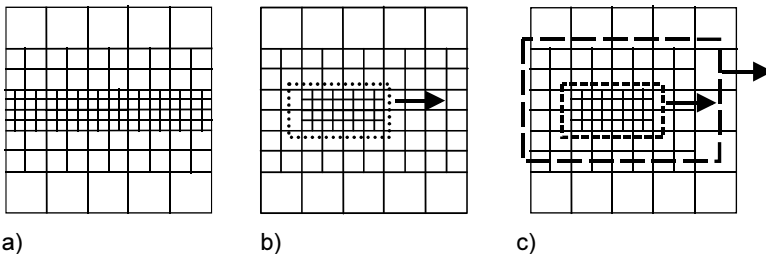


Abbildung 5.18: Konzepte zur adaptiven Vernetzung: a) konventionell b) eine Box c) zwei geschachtelte Boxen (Erläuterung siehe Text)

Um den Einfluss der adaptiven Vernetzung auf die Qualität der Ergebnisse zu untersuchen wurden Versuche an einer einfachen Blindschweißung durchgeführt. Abbildung 5.18 zeigt eine Gegenüberstellung verschiedener Methoden. Untersucht wurden

- (a) Konventionelle Vernetzung mit festen Refinements (Abbildung 5.18a),
- (b) Vernetzung mit einer Refinementstufe und Erzeugung des zweiten Refinements durch die adaptive Vernetzung (Abbildung 5.18b) sowie
- (c) Vernetzung des Bauteils mit Elementen gleicher Größe und Refinement durch zwei synchron bewegten, ineinander geschachtelte Boxen (Abbildung 5.18c)

Bei diesen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass die Kompromisslösung b) bezogen auf die Rechenzeit den größten Nutzen hat. Mehrere ineinander geschachtelte Boxen erhöhen den Aufwand an notwendiger Rechenleistung, so dass dadurch der durch die geringere Elementzahl

erzielte Gewinn an Rechenzeit wieder kompensiert wird. Für dieses einfache Beispiel ist der Gewinn an Rechenzeit um so größer, je länger die zu berechnende Schweißnaht ist. Diese erfordert die feinste Vernetzung (vgl. Kapitel 5.2.1) und bietet das größte Einsparpotenzial.

Die adaptive Vernetzung kann zwar die Rechenzeit reduzieren, bewirkt aber einen Verlust an Ergebnisqualität. Ergebnisse werden an den Knoten angegeben. Nach Entfernen des Refinements werden die an den Knoten vorliegenden Ergebnisse auf die verbleibenden Knoten interpoliert. In Abbildung 5.19 ist die von Mises-Vergleichsspannung quer zur Naht am Ende des Abkühlvorgangs dargestellt. Das Spannungsniveau des rein adaptiven Netzes (Fall c) liegt im Bereich der Schweißnaht deutlich niedriger, da durch das Zusammenfassen der Elemente nach dem Schweißen eine Mittelung der an den Knoten vorliegenden Werte stattfindet. Auf diese Weise bleibt zwar die Spannungsverteilung im Nahtbereich qualitativ richtig erhalten, die plastische Verformung dieses Bereichs ist durch diese Mittelung deutlich zu klein. Die Methode der hybriden Vernetzung (Fall b) und das konventionelle Netz (Fall a) zeigen

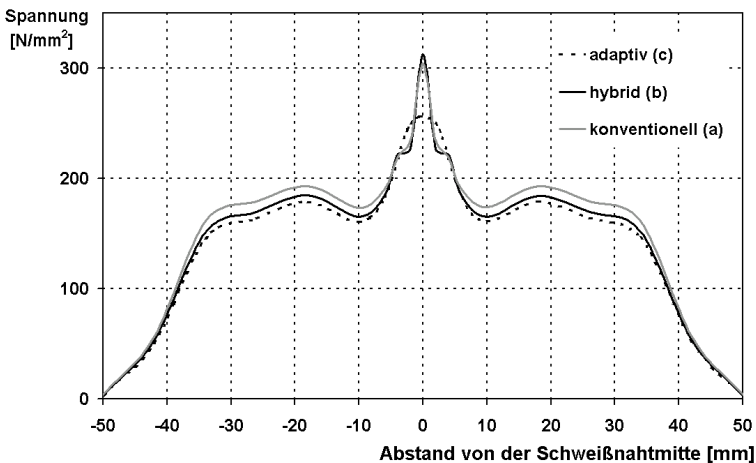


Abbildung 5.19: Von Mises – Vergleichsspannung auf einer Linie quer zur Schweißnaht für verschiedene Strategien der adaptiven Vernetzung

einen nahezu gleichen Verlauf der Spannungen. Die geringfügig höheren Spannungen der hybriden Vernetzung in der Mitte der Schweißnaht ist eine Folge der Interpolation der Werte.

Eine Vernetzung, bestehend aus einem festen Refinement im Grundnetz und einem temporären durch das adaptive Netz, kann die konventionelle ersetzen. Auf diese Weise reduziert sich der Aufwand im Preprocessing. Die Rechenzeit kann durch den Einsatz eines adaptiven Netzes erst bei sehr großen Modellen mit einer entsprechend großen Anzahl an Elementen im Nahtbereich signifikant verkürzt werden. Es muss ein Verlust an Ergebnisgenauigkeit in Kauf genommen werden.

Parallelisierung

Das FE-System MSC.MARC bietet die Möglichkeit, eine Simulationsrechnung auf mehrere Prozessoren zu verteilen (Parallelisierung). Diese können sich entweder in einem Mehrprozessorrechner befinden oder auf mehrere Prozessoren im Netzwerk verteilen. Zu diesem Zweck wird das Finite Elemente-Netz in verschiedene Elementbereiche, sog. Domains, aufgeteilt, die auf die einzelnen Prozessoren verteilt und parallel berechnet werden. Die thermische und mechanische Kopplung der Vorgänge in beiden Bereichen wird vom Finite Elemente-System durchgeführt. Im Postprocessing werden diese automatisch in ein großes File zusammengefügt. Es ist möglich und sinnvoll den Nahtbereich auf verschiedene Domains aufzuteilen, um die Zahl an Elementen pro Domain in etwa gleich groß zu halten.

Zur Abschätzung des Potenzials dieser Berechnungsmethode wurde eine einfache Blindschweißung untersucht. Abbildung 5.20 zeigt den grundsätzlichen Verlauf der Berechnung. In diesem Beispiel wurden die Domains parallel zur Naht so geteilt, dass jede Domain die Hälfte der Schweißnaht enthält. Dieses Beispiel wurde auf zwei Domains verteilt. In der Auswertung in der prinzipielle Verlauf der Temperaturverteilung dargestellt. Die Asymmetrie zwischen den Domains ist in der unterschiedlichen Einspannung der Bauteilhälften begründet, die den Wärmefluss beeinflussen.

Verschiedene Studien haben gezeigt, dass die Verteilung der Elemente der Schweißnaht auf die Domains nur geringen Einfluss auf die Rechenzeit hat, solange beide Domains in etwa gleich viele Elemente enthalten.

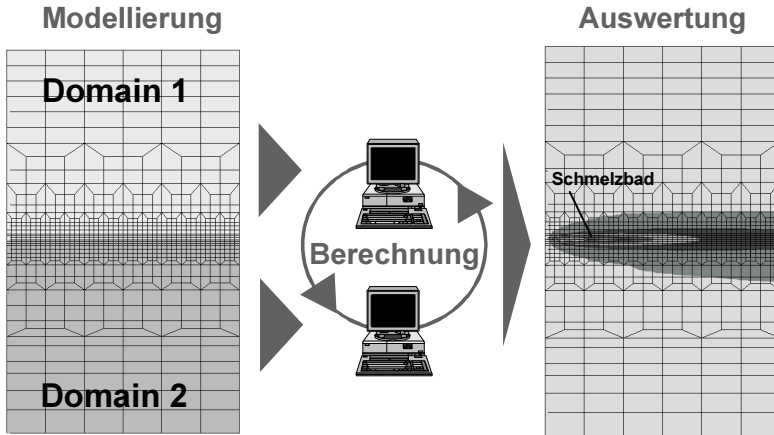


Abbildung 5.20: Schematische Darstellung der Parallelisierung der Schweißsimulation

Weiterhin wurde gezeigt, dass die Aufteilung in Domains keinen Einfluss auf das Konvergenzverhalten hatte. Gegenüber der Berechnung ohne Parallelisierung mussten keinerlei Änderungen an der Modellierung vorgenommen werden. Die Berechnungen lieferten qualitative und quantitativ gleiche Ergebnisse.

Um den Performancegewinn abzuschätzen, wurden folgende Varianten untersucht:

- ◆ **konventionell:** Berechnung auf einem Prozessor (SGI ONYX 2, R10000 Prozessor, 250 MHz Taktfrequenz, 2GB Hauptspeicher)
- ◆ **parallel, 1 Rechner:** Berechnung auf 2 Prozessoren in einem Rechner (SGI ONYX2, 2 R10000 Prozessoren, 250 MHz Taktfrequenz, 2 GB Hauptspeicher)
- ◆ **parallel im Netzwerk:** Berechnung auf 2 Prozessoren verteilt auf zwei Rechner, verbunden durch ein Fast Ethernet mit 100Mbit/s (geschwitcht). Verwendete Rechner: SGI ONYX2 (R10000 Prozessor, 250 MHz, 2GB Hauptspeicher) SGI Octane (R10000 Prozessor, 195 MHz, 250 MB Hauptspeicher)

Die resultierenden Rechenzeiten sind in Tabelle 5.3 dargestellt. Da die Berechnung im Netzwerk nachts durchgeführt wurde, kann von einer geringen Netzlast ausgegangen werden. Die Parallelisierung der Berechnung ist auf diese Weise eine sehr gute Möglichkeit, die Rechenzeiten ohne größeren Mehraufwand deutlich zu reduzieren. Insbesondere das Verteilen einer Rechnung im Netz ist für Anwender interessant, die beispielsweise nachts ungenutzte Rechenkapazitäten in CAD-Clustern zur Verfügung haben. Weitere Potenziale sind in LINUX-Clustern zu sehen, die im Vergleich zu UNIX-basierten Systemen mit deutlich geringeren Kosten verbunden sind.

Berechnungsmethode	CPU-Zeit [%]
1 Rechner, 1 Prozessor	100
1 Rechner, 2 Prozessoren	35
2 Rechner, je 1 Prozessor, über Fast Ethernet verbunden	51

Tabelle 5.3: Abschätzung des Rechenzeitgewinns durch Parallelisierung

Aufgrund der zu erwartenden Ergebnisqualität und des Einsparpotenzials an Rechenzeit ist die Parallelisierung zu bevorzugen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte dargestellt werden, dass diese auch in Verbindung mit den notwendigen Unterroutrinen (vgl. Kapitel 5.3.4) lauffähig sind. Hindernisse beim Einsatz der Parallelisierung sind in den Kosten für die Rechenkapazitäten sowie den notwendigen Softwarelizenzen zu sehen, die gegebenenfalls pro eingesetztem Prozessor anfallen. Die adaptive Vernetzung stellt grundsätzlich eine Alternative dar. Allerdings ist das Einsparpotenzial an Rechenzeit deutlich geringer, zudem ist die Methode mit einem Verlust an Ergebnisqualität verbunden.

5.3 Mechanische Modellierung

In Kapitel 5.3 wurde das Potenzial thermomechanische Modelle für die Modellierung des Laserstrahlschweißens aufgezeigt. Sie sind in der Lage, einen Großteil der in Kapitel 4 aufgezeigten Fragestellungen abzubilden und verschiedene Größen in quantitativen Zusammenhängen zu ermitteln. Sie erfordern eine hohes Maß an Modellierungsaufwand und haben einen großen Bedarf an Rechenleistung. Für verschiedene in der Fertigungsplanung auftretende Fragestellungen sind zunächst qualitative Aussagen ausreichend. Daher können vereinfachte Modelle hilfreiche Dienste leisten, um schnelle, qualitative Abschätzungen für ausgewählte Fragestellungen zu bekommen.

Die hier vorgestellte mechanische Modellierung basiert auf dem Konzept der Eigenspannungsquellen. Dieser Begriff wurde schon Anfang des Jahrhunderts beispielsweise von *Reißner (1931)* im Aufsatz „*Eigenspannungen und Eigenspannungsquellen*“ eingeführt. Der Autor zeigt für einfache Fälle auf, wie aus einem gegebenen Eigenspannungsfeld das zugehörige Quellenfeld ermittelt werden kann. *Radaj (1992, S. 7f sowie S. 198ff)* greift diesen Begriff im Zusammenhang der Entstehungsursachen von Eigenspannungen auf. Für eine gleichförmig bewegte Linien-spannungsquelle sowie im Falle linear-elastischen Materialverhaltens lassen sich die Normalspannungen σ_x und σ_y sowie die Schubspannung τ_{xy} auf Basis von Besselfunktionen angeben (*Radaj 1992, S. 130ff*). Die Eigenspannungen in Dickenrichtung sowie die zugehörigen Schubspannungskomponenten wurden in dem betrachteten Fall im Dünnschichtbereich vernachlässigen (vgl. Kapitel 2.1.2.1). Aufbauend auf diese mathematischen Lösungen können die Eigenspannungen für einfache Geometrien ermittelt und als Randbedingung in mechanischen Modellen vorgegeben werden. Diese Methode ist nur bedingt anwendbar bei beliebigen dreidimensionalen Geometrien. Zudem sind die Modelle auf linearelastische Fälle beschränkt, die eine sehr grobe Näherung des tatsächlichen Materialverhaltens darstellen. Für nichtlineares elastoplastisches Materialverhalten fehlen diese Berechnungsmodelle völlig (*Radaj 1992, S. 133ff*).

Einen über diese einfachen Annahmen hinausgehenden Ansatz zeigen eine Reihe japanischer Arbeiten auf (*Ueda und Yuan 1991, Yuan*

und Ueda 1993, Chen u. a. 2000), den die Autoren unter dem Begriff des „*Inherent Strain*“ einführen, der sich am ehesten mit „systemimmanenten Dehnungen“ übersetzen lässt. Nach diesem Konzept wird ein Dehnungsfeld mit Hilfe einfacher Abschätzungen errechnet. Dieses wird als Eigenspannungsquelle im Sinne von *Reißner* und *Radaj* verwendet, um Spannungsverteilungen in geschweißten Bauteilen vorherzusagen. Die Form der Eigenspannungsquellen wird mathematisch sehr einfach, hingegen geht dieser Form eine komplexe analytische Ableitung der zugrunde liegenden Gleichungen zur Ermittlung der richtigen Größenordnung der Dehnungsverteilung voraus, die sehr viel Erfahrung im Umgang mit den zugrundeliegenden Modellen erfordert.

Im folgenden soll eine weitere Methode vorgestellt werden, die mit Hilfe sehr einfacher Annahmen planungsrelevante Ergebnisse liefern kann. Die Methode basiert auf Ansätzen von *Lindl* (*Reinhart und Lindl 1998*). Der Ansatz beruht auf der Eigenschaft geschweißter Bauteile, dass sich der Bereich plastischer Verformung auf die Schweißnaht und die Wärmeeinflusszone beschränkt (vgl. Kapitel 2.1.2). Der Rest einer geschweißten Struktur reagiert rein elastisch auf die eingebrachten Spannungen. Aus diesem Grund wird ein Modell aufgebaut, in dem die rein elastische Reaktion eines Bauteils auf die im Bereich der Schweißnaht eingebrachten mechanischen Lasten berechnet wird.

Dem Modell liegen folgende Annahmen zu Grunde:

- ◆ Die Bauteilabmessungen sind groß gegenüber den Schweißnahtabmessungen.
- ◆ Die Bauteildicke ist so dünn, dass von einem ebenem Spannungszustand ausgegangen werden kann (< 25 mm, siehe Kapitel 2.1.2.1).
- ◆ Der Gesamtverzug des Bauteils wird dominiert von der Steifigkeit des Bauteils aufgrund seiner dreidimensionalen Struktur.

Auf Basis dieser Annahmen können qualitative Ergebnisse ermittelt werden, ohne aufwändige Modellierungen der Schweißnaht vorzunehmen. Aufgrund der Beschränkung auf ebene Spannungszustände kann im Gegensatz zu thermomechanischen Modellen ein Modell aus Schalenelementen verwendet werden. Dies reduziert den Vernetzungsaufwand, da zum einen automatisierte Vernetzungsalgorithmen sehr gute

Ergebnisse liefern und zudem auf bereits vorhandene Netze, beispielsweise aus der Crashesimulation, zurückgegriffen werden kann.

Bei der Abbildung des Nahtbereichs können verschiedene Varianten gewählt werden (Abbildung 5.21, nach *Rick 2001, S. 89f*). Notwendige Voraussetzung für die Modellierung ist Übertragbarkeit von Kräften zwischen den Fügepartnern. Die Verwendung von Volumenelementen (Abbildung 5.21b und c) bietet die Möglichkeit, spezifische Eigenschaften der Schweißnaht, beispielsweise mechanisch-technologische wie Eigenspannungen oder plastische Dehnungen in das mechanische Modell zu übertragen. Diese Möglichkeit wird in dem hier vorgestellten Ersatzmodell außer Acht gelassen. Während für andere Anwendungsfelder, beispielsweise in der Konstruktion, diese Produkteigenschaften von hoher Wichtigkeit sind, wird für die Fertigungsplanung das Bauteilverhalten während des Prozesses untersucht. Es erfolgt eine Beschränkung auf Schalenelemente. Welche der bleibenden Möglichkeiten verwendet wird, um die Verbindung zwischen den Fügepartnern abzubilden, hängt von der spezifischen Fragestellung ab.

Bei dünnen Blechen besteht nach dem Schweißen ein vorwiegend zweiachsiger Spannungszustand in der Blechebene (vgl. Kapitel 2.1.2). Dieser ist ein Ergebnis der komplexen Wechselwirkungen aus den induzierten Wärmedehnungen, der Reaktion des Gesamtbauteils sowie der mechanischen Randbedingungen. Ein vereinfachtes Modell wird durch die Reduktion der komplexen Vorgänge beim Laserschweißen auf eine Komponente erreicht. Angestrebt ist die Berechnung der elastischen Reaktion der Struktur auf die Schrumpfungen im Nahtbereich.

Aus diesem Grund wird die Modellierung der Vorgänge beim Laserstrahlschweißprozess auf folgende Annahmen reduziert:

- ◆ Die Simulation erfasst nur den Abkühlvorgang (Schrumpfung) der Schweißnaht.
- ◆ Es wird ausschließlich ein Effekt während des Abkühlvorgangs betrachtet. Bei kurzen Schweißnähten kann dies die Querschrumpfung sein, bei sehr langen Schweißnähten die Längsschrumpfung.

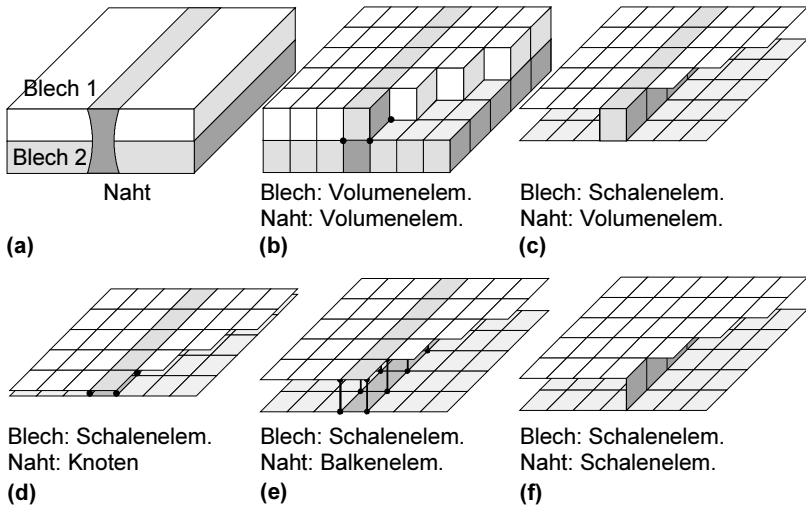


Abbildung 5.21: Vernetzung des Nahtbereichs in der mechanischen Simulation (vgl. Rick 2001, S. 89, Abb. 4-12)

- ◆ Die Berechnung des Bauteilverzugs erfolgt rein mechanisch, die Wärmeeinwirkung des Schweißens wird durch mechanische Zwangsbedingungen eingebracht.
- ◆ Es treten nur elastische Bauteilverformungen auf.

Die Beschränkung auf die Schrumpfung der Naht während des Abkühlvorgangs ist dadurch begründet, dass während des Abkühlens die dominierenden thermomechanischen Vorgänge stattfinden. Radaj (1992, S. 150) schlägt beispielsweise zur Ermittlung von Eigenspannungen vor, die Eigenspannungsbildung als reinen Abkühlvorgang zu modellieren. Zudem bestätigen Zeit-Verformungs-Kurven, dass ein Großteil der Verformung während des Abkühlens stattfindet (vgl. Kapitel 6.1, Abbildung 6.2c und z. B. Reinhart u. a. 1998, S. 271f).

Ausgangsbasis für die Umsetzung des Ersatzmodells ist eine mit Viereck-Schalenelementen vernetzte Struktur. Die Schweißnähte werden durch Stabelemente modelliert, die Länge der Nähte und deren Abstände entsprechen denen des Originalbauteils. In dem mechanischen Ersatz-

modell werden die Zugeigenspannungen durch sogenannte Aktuatoren, d.h. Beam-Elemente, deren Länge vom Benutzer vorgegeben werden kann, in die Struktur eingebracht (MSC.MARC-Element-Typ 9, vgl. *MSC.MARC 1999b*, S.3-40f). In einer rein mechanischen Rechnung wird die elastische Reaktion der Struktur auf diesen Lastfall berechnet.

Abbildung 5.22 stellt die Funktionsweise des Modells am Beispiel einer einfachen Blindschweißung dar. Die Beamelemente werden an den Knoten der Schalenelemente aufgebracht (Abbildung 5.22a). Die Schrumpfung der Elemente in ihrer Längsachse sorgt für einen Verzug in Richtung der Schweißnaht (longitudinaler Verzug, vgl. Abbildung 2.5). Eine Schrumpfung quer zur Schweißnaht hat eine transversale Schrumpfung des Gesamtbauteils zur Folge. In beiden Fällen bewirkt die Verformung der Nahtelemente eine elastische Reaktion der Gesamtstruktur. Auf diese Weise liefert das Modell qualitative Aussagen über die Richtung des Schweißverzugs durch die eingebrachte Schrumpfung der Nähte. Bei mehreren Nähten sind Aussagen über den relativen Verzug

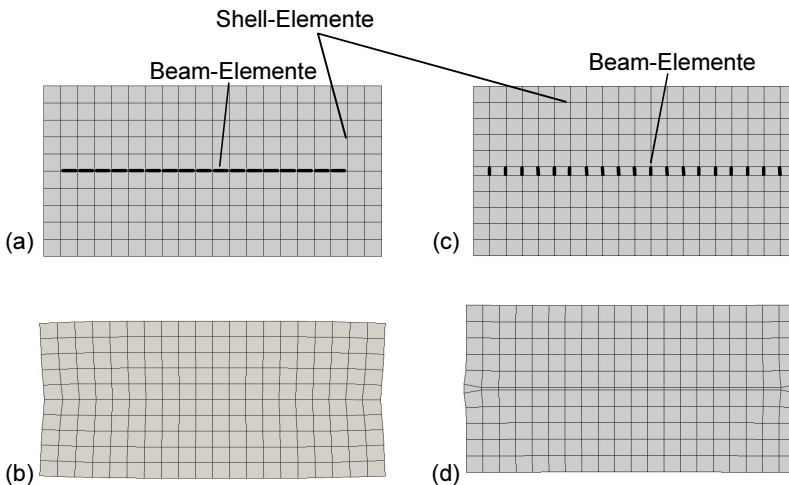


Abbildung 5.22: Funktionsweise des mechanischen Ersatzmodells für die Betrachtung der Längsschrumpfung (a und b) sowie der Querschrumpfung (c und d)

möglich. Das Modell erlaubt keine Aussagen über den zeitlichen Verlauf oder die absolute Höhe des Verzugs.

Die Vorzüge dieser Art der Modellierung kommen besonders bei der Untersuchung großer Bauteile zu tragen. Bezugnehmend auf die in Kapitel 4 formulierten Fragestellungen steht für dieses Modell die Ermittlung qualitativer Verläufe im Vordergrund. Diese sind sowohl eine Hilfe in der Planung der Spannstellen als auch für die Festlegung von Zusammenbau- und Schweißfolge. Aufgrund der Modellierung durch Schalenelemente kann auf bestehende Modelle, beispielsweise aus der Crashesimulation, zurückgegriffen werden. Auch für diese Art der Modellierung ist eine parallele Ausrichtung der Elemente in Schweißrichtung erforderlich. Der Modellierungsaufwand wird durch die Verwendung größerer Elemente und die Betrachtung rein ebener, mit Schalen modellierter Bauteile reduziert. Einzelheiten dieser Modellierung werden an einem konkreten Beispiel in Kapitel 6.2 beschrieben.

5.4 Modellvalidierung

Die vorgestellte Methodik unterstützt den Fertigungsplaner in seiner Arbeitsweise und hat zum Ziel, die für die Planung des Laserstrahlschweißens notwendigen experimentellen Untersuchungen zu reduzieren. Grundlage ist ein Modellierungskonzept für das Laserstrahlschweißen, das auf der Finiten Elemente-Methode beruht. Losgelöst von der Auswahl der Modellbausteine für eine spezifische Fragestellung steht die Frage der Modellvalidierung. Sie ist *„eine der schwierigsten, aber auch wichtigsten Aufgaben bei der Simulation“* (VDI 3633-1 1993, S. 17) und stellt die Prüfung der hinreichenden Übereinstimmung zwischen Simulation und Realität dar.

Die Zuverlässigkeit der FE-Methode ist unstrittig, wenn bei der Ergebnisbewertung die *„Natur der Methode als Näherungsverfahren“* nicht aus den Augen verloren wird (Fröhlich 1995, S. 44). Weiterhin setzt das vorgestellte Modellierungskonzept auf abgesicherten Modellen für das Laserstrahlschweißen auf, insbesondere auf die Modelle für die Energieeinkopplung und auf die verschiedenen Verfahren zur Berechnungen der thermomechanischen Vorgänge im Werkstoff (vgl. Kapitel

2.3.3). Ergänzend wurden vergleichende Untersuchungen zur Absicherung durchgeführt, beispielsweise für die Sensitivität bezüglich der Werkstoffkennwerte (Abschnitt 5.2.2), für die Form des Schmelzbadquerschnitts (Abschnitt 5.2.4), den Verlauf des Verzugswinkels (Abschnitt 5.2.4) sowie der Spannkkräfte (Abschnitt 5.2.6). Weitere vergleichende Untersuchungen folgen in Kapitel 6. *Rick* hat zudem auf der gleichen thermomechanischen Berechnungsmethode basierend die Eigenspannungsverteilung für eine Blindschweißung in ebenes Stahlblech (DC04) in Simulation und Experiment ermittelt, die eine recht gute Übereinstimmung aufweisen (*Rick 2001, S. 106*).

Die Qualität der Ergebnisse ist nur so gut wie die Qualität der Eingangsgrößen. Nach der Systemtheorie stehen der Mensch, das zu betrachtende reale System und das Modell des Systems in enger Beziehung zueinander (*Krallmann 1996, S. 17*). Das Modell entsteht aus dem realen System durch Abstraktion und Abbildung. Der Mensch interpretiert das Modell und beobachtet Aussagen des Modells, um daraus Rückschlüsse auf das reale System zu ziehen. Der Benutzer steht mit seinem Fachwissen in wichtiger Beziehung zu dem Modell. Für die beschriebene Form des „*Virtual Engineering*“ ist stets produkt- und produktionsbezogenes Sachwissen zur Problemlösung unerlässlich (*Spur 1999, S. 372*).

Allgemein gibt es für die Überprüfung von FEM-Ergebnissen verschiedene Möglichkeiten (*Fröhlich 1995, S. 50ff*):

- ◆ Plausibilitätskontrolle nach Erfahrung
- ◆ Fehlerkontrolle mit Hilfe des FE-Programms
- ◆ Überprüfung der FE-Ergebnisse durch Nachrechnen von Hand
- ◆ Unterschiedliche Modellierung für die gleiche Fragestellung
- ◆ Rechenläufe mit anderen FE-Programmen
- ◆ Praktische Messungen

Die VDI-Richtlinie 3633 schlägt für simulationsbasierte Neuplanungen vor, auf Erfahrungswerte und eine entsprechende Qualifizierung des Anwenders zurückzugreifen (*VDI 3633-1 1993, S. 18*). Für die Berechnung von Laserstrahlschweißverbindungen stellt deshalb die **Plausibilitätskontrolle** die wichtigste Möglichkeit der Fehlerkontrolle dar.

Ansatzpunkte sind Form und zeitliche Entwicklung des Schmelzbades, das Niveau der resultierenden Eigenspannungen sowie die Größe und Richtung des Bauteilverzugs.

Das **Finite Elemente-System** stellt über das Konvergenzverhalten der Rechnung eine weitere wichtige Möglichkeit für Fehlerüberprüfung der Modellierung dar. Aufgrund der Qualität der kommerziell verfügbaren Lösungsalgorithmen ist eine divergentes Verhalten eines Rechenlaufs in vielen Fällen auf Modellierungsfehler zurückzuführen, beispielsweise Inkonsistenzen im Werkstoffmodell oder in den mechanischen Randbedingungen. Der Umkehrschluss ist dagegen nur bedingt richtig: eine konvergierende Rechnung liefert nicht zwangsläufig richtige Ergebnisse. Darüber hinaus liegt ein Vorteil der hier vorgestellten Methode in der **Kombination verschiedener Modelle** und Modellierungsansätze, die einen unterschiedlichen Detaillierungsgrad aufweisen. Auf diese Weise können systematische Fehler durch den Vergleich mit den anderen Modellen vermieden werden.

Praktische Messungen bleiben grundsätzlich eine weitere, äußerst wichtige Methode zur Überprüfung der FE-Ergebnisse. Ziel aller virtuellen Methoden ist der weitgehende Verzicht auf experimentelle Untersuchungen, dem Wissensmanagement vorhandener Erfahrungen und experimenteller Ergebnisse wird in Zukunft entscheidende Bedeutung zukommen.

6 Anwendung

Im folgenden Kapitel wird der Einsatz des Modellierungskonzepts bei Beispielen aus der Praxis dargestellt. Die Möglichkeiten und derzeitigen Grenzen des Konzepts werden erläutert und diskutiert. Beispiele sind zum einen die Fertigung von Ladebordwänden aus Aluminium. Dort wurden mit Hilfe des Simulationssystems prozessverbessernde Maßnahmen auf ihr Einsatzpotenzial in der Serienfertigung überprüft. Das zweite Anwendungsbeispiel ist aus der Karosseriefertigung gewählt. In diesem Fall wurde die Wechselwirkung zwischen Bauteil, Prozess und Spanntechnik untersucht.

6.1 Fertigung von Ladebordwänden

Für die Fertigung von Ladebordwänden für LKWs werden Aluminiumprofile in Nut- und Feder-Technik mit einem Hybrid-Plasma-Laserschweißverfahren beidseitig verschweißt (Abbildung 6.1a). Dieses Schweißverfahren kombiniert das konventionelle Laserstrahlschweißen mit einem Lichtbogen, der durch Metallschutzgas-, Wolfram-Inertgas- oder Plasmaschweißen eingebracht wird (vgl. *Burzer u. a. 1998, Biffin und Blundell 1997*). Der Laser erzeugt das Schmelzbad, die durch das Plasma eingebrachte zusätzliche Wärme wird zur Stabilisierung des Prozesses und zum Ausgleich von Bauteiltoleranzen verwendet.

Derzeit sind die Bauteile nur mit Hilfe dieses Hybridverfahrens schweißbar. Toleranzen der stranggepressten Profile (Werkstoff AlMgSi0,5) führen zu einem Fügespalt von bis zu 2 mm Breite. Die durch das Plasma eingebrachte Wärme induziert eine Wärmeausdehnung an den Blechkanten. Auf diese Weise kann der Fügespalt soweit reduziert werden, dass die Bauteile unter Verwendung von Zusatzdraht mit dem Laserstrahl verschweißt werden können. In der Praxis werden die Bauteile in senkrechter Lage verschweißt (Abbildung 6.1b). Zur Vermessung des Fügespaltens wird ein vorlaufend zur Bearbeitungsstelle montierter Nahtfolgesensor eingesetzt. Dieser vermisst den aktuellen Fügespalt und steuert Zusatzdrahtmenge und Schweißgeschwindigkeit.

Mit Hilfe der Schweißsimulation sollte die Frage geklärt werden, ob ein Fügespalt durch eine Veränderung der Prozessführung verkleinert

werden kann. Im speziellen wurde untersucht, wie durch zeitlich versetztes Schweißen die plastische Schrumpfung im Nahtbereich zur Verkleinerung des Fügepalts ausgenutzt werden kann.

Im Experiment wurden Abschnitte der Profile einseitig mit einer Nahtlänge von 180 mm mit einem Nd:YAG-Laser ohne Zusatzdraht verschweißt. Durch Abfräsen der Fügekante wurde auf der zweiten Seite ein definierter Fügepalts hergestellt. Auf den Zusatzdraht wurde bewusst verzichtet, um reproduzierbare Versuchsbedingungen herzustellen. Die Spannsituation an der Serienanlage wurde im Modell so abgebildet, dass eines der Profile im Freiheitsgrad quer zur Naht frei beweglich ist, die anderen beiden Freiheitsgrade jedoch fest fixiert sind. Das zweite Profil ist in allen drei Freiheitsgraden fest fixiert. Diese Einspannung wurde in Diskussion mit dem Industriepartner erarbeitet und stellt eine modellhafte Abbildung der realen Spannsituation dar (Abbildung 6.2a und b). Die Bauteilbewegung quer zur Naht aufgrund der plastischen Schrumpfungen im Nahtbereich wurde mit Hilfe von taktilen Wegaufnehmern als Zeit-Auslenkungssignal aufgezeichnet, die hintereinander in Nahrichtung an

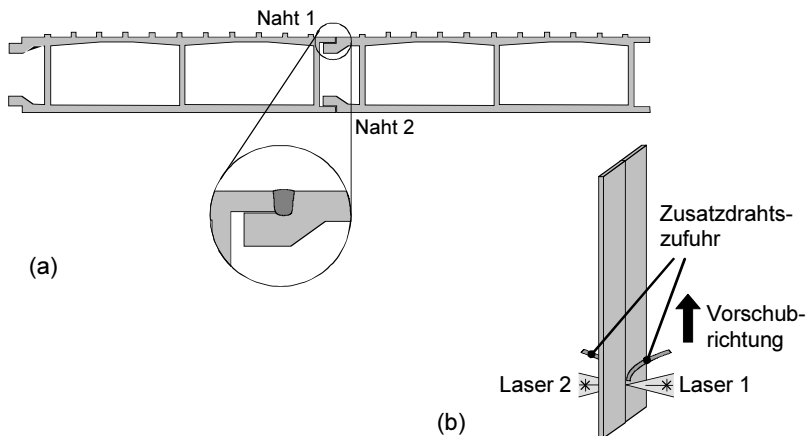
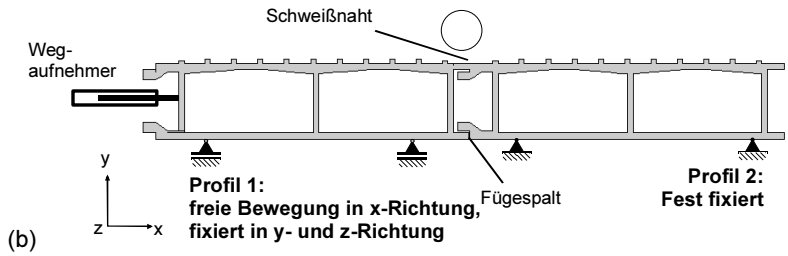
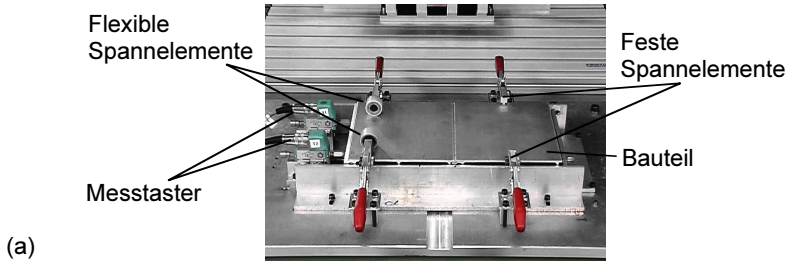


Abbildung 6.1: Laserstrahlschweißen von Ladebordwänden aus Aluminium: a) Skizze der Fügegeometrie b) Skizze der Laseranordnung

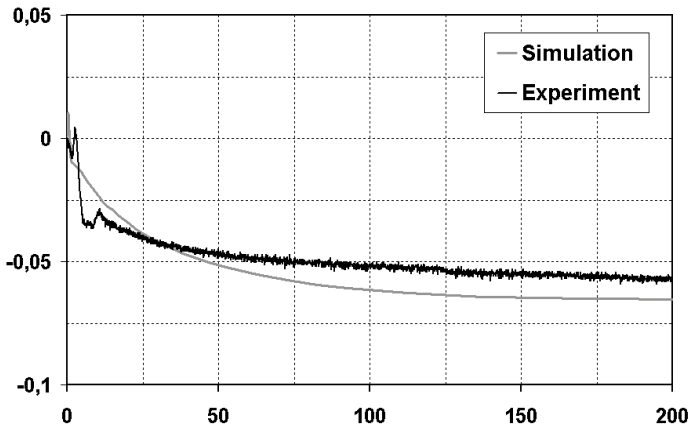
der Bauteilrückseite angeordnet waren (Abbildung 6.2a).

Abbildung 6.2c zeigt einen Vergleich zwischen Versuch und Experiment der Bauteilbewegung. Die Bauteile wurden mit $P=3\text{kW}$ und $v=2\text{m/min}$ verschweißt, der Brennfleckdurchmesser betrug $0,3\text{mm}$. Ein positives Signal der Wegaufnehmer bedeutet eine Bauteilbewegung in negative x-Richtung, d.h. eine Ausdehnung im Nahtbereich. Simulation und Experiment zeigen eine gute Übereinstimmung im Verlauf des Signals. Während des Schweißvorgangs dehnt sich der Nahtbereich aus, was eine Vergrößerung des Spalts zur Folge hat. Während des Abkühlvorgangs stellen die plastischen Verformungen im Nahtbereich eine resultierende Schrumpfung dar. Experimentell wurde eine leichte Drehung des Bauteils gemessen, da die Freiheitsgrade in y-Richtung im Gegensatz zur Simulation nicht vollständig eingefroren werden konnten. Das experimentelle Signal stellt daher den Mittelwert der beiden Taster.

Aus Sicht der Fertigungsplanung kann festgestellt werden, dass die induzierte Schrumpfung des Bauteils den Fügespalt nur um ca. $0,2\text{mm}$ reduzieren konnte. Bei Spaltmaßen von bis zu 2mm stellt dies nur eine marginale Reduzierung dar. Eine Berücksichtigung der durch die Plasmafackel zusätzlich eingebrachten Wärme konnte die Schrumpfung um ca. 50% vergrößern. Die anfangs formulierte Fragestellung konnte mit Hilfe der Simulation geklärt werden.



Auslenkung [mm]



(c)

Zeit [s]

Abbildung 6.2: Laserstrahlschweißen an Ladebordwänden – Untersuchungen am iw. a) Photo des Versuchsaufbaus b) Skizze der experimentellen Anordnung c) Vergleich zwischen Simulation und Experiment (siehe Text)

6.2 Laserstrahlschweißen an einer Karosseriestruktur

Bei einem Automobilhersteller wurden Studien mit Stahl als Leichtbauwerkstoff durchgeführt. Als Anwendungsbeispiel für die Simulation wurde die A-Säule der Karosserie herausgegriffen. Diese setzt sich zusammen aus der Außenhaut, einem IHU-umgeformten Grundträger sowie einem Verstärkungsblech (Abbildung 6.3).

Beim Zusammenbau dieser Struktur werden für die Verbindung Außenhaut - Grundträger mit Verstärkungsblech Laserstrahlschweißnähte eingesetzt (Abbildung 6.3b). Für die Schweißverbindungen sind jeweils ebene Flächen vorgesehen, auf denen Außenhaut und IHU-Struktur

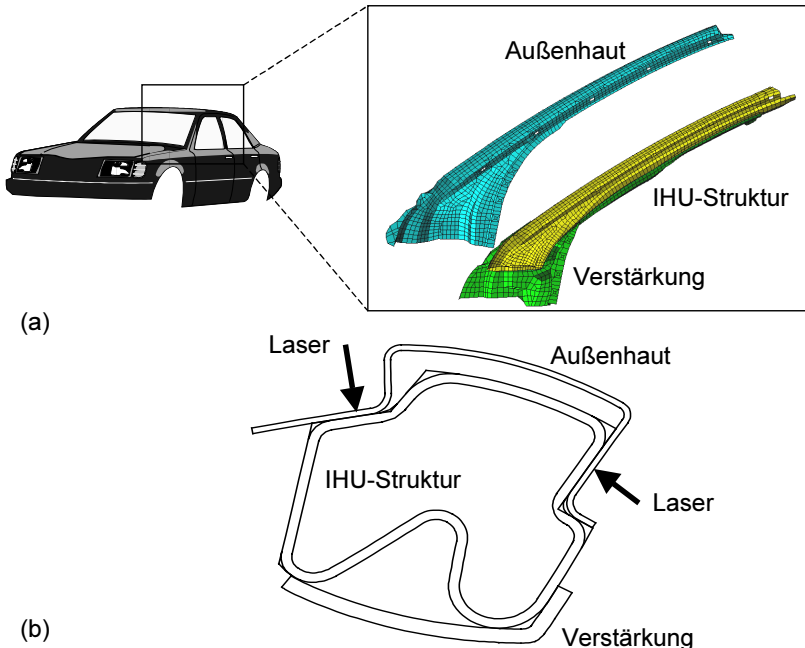


Abbildung 6.3: Simulation einer Karosseriestruktur – Skizze des Anwendungsbeispiels (a) Gesamtstruktur als FE-Modell b) Querschnitt der Struktur mit der Darstellung der Laserschweißnähte

direkt in Berührung sind. Die in Abbildung 6.3b linke Naht wird als durchgehende Naht ausgeführt, die rechte Naht als Steгнаht, bestehend aus vier Abschnitten. Dies war notwendig, da auf dieser Seite der Struktur Löcher zur Aufnahme des Fenstergummis vorgesehen sind. Zur Planung der Schweißanwendung wurden beim Automobilherstellers Schweißversuche durchgeführt und durch Simulationsuntersuchungen begleitet. Für die Schweißung kam ein CO₂-Laser in Verbindung mit einer Portalanlage zum Einsatz. Zusätzlich wurde eine Zusatzachse mit einer Andruckrolle verwendet, die durch das Aufbringen einer Andruckkraft den Fügespalt zwischen Außenhaut und Grundstruktur reduziert (vgl. Kapitel 5.2.6, S. 101f). Im Unterschied zur Serienanlage wurde das Bauteil für diese Versuche in einen einfachen Spannrahmen eingelegt. Das Bauteil war auf diese Weise nicht fest fixiert, sondern wurde durch die Andruckrolle gegen die Anschläge des Rahmens gedrückt.

Im Rahmen der Simulation wurden verschiedene Ziele verfolgt. Hauptziel war es, für die Fertigungsplanung die Wechselwirkung zwischen Prozess, Bauteil und Spanntechnik zum einen grundsätzlich zu untersuchen. Zum anderen sollten die Auswirkungen des Schweißprozesses auf die resultierende Form der Außenhaut beleuchtet werden. Aufgrund der Größe der Struktur wurde zunächst auf eine mechanische Modellierung zurückgegriffen (vgl. Kapitel 5.3). Anschließend wurde die Struktur thermomechanisch abgebildet, um Bauteilverzug und Eigenspannungen zu ermitteln. Begleitet wurde die Simulation durch Verzugsmessungen während des Schweißprozesses, zudem wurde der resultierende Verzug der Außenhaut bei Bauteilen aus dem Versuchsbetrieb mit einer Koordinatenmessmaschine vermessen.

6.2.1 Mechanische Modellierung

Zur Untersuchung grundlegender Auswirkungen des Schweißprozesses auf das Bauteil wurde die in Kapitel 5.3 vorgestellte mechanische Modellierung verwendet. Bei dieser Struktur konnte aufbauend auf vorhandene Daten der Crashsimulation ein FE-Schalenmodell generiert werden. Modifikationen waren im Bereich der Schweißnähte erforderlich, da die mechanische Modellierung Elemente benötigt, die parallel zur Schweißrichtung ausgerichtet sind.

Die durch die Laserschweißnähte in die Struktur eingebrachten Zugspannungen in Längsrichtung werden durch Beamelemente als Aktuatoren der Struktur als Zwangsbedingung vorgegeben und die elastische Reaktion der Struktur auf diesen Lastfall berechnet. Die Modellierung der Andruckrolle wurde aus den in Kapitel 5.2.6 dargestellten Gründen nicht berücksichtigt. Das Verstärkungsblech wurde als mit der IHU-Struktur fest verbunden angenommen, der Einfluss der MIG-Schweißnähte vernachlässigt.

Die Struktur wurde als dreidimensionales Modell aus Schalenelementen aufgebaut. Abbildung 6.4 zeigt den Aufbau des Schalenmodells. Das Verstärkungsblech wird im folgenden nicht weiter erwähnt, da es fest mit der IHU-Struktur verbunden ist und somit zusammen mit der Struktur als ein Bauteil gesehen werden kann. Die Verbindung Schalenelemente von Außenhaut und IHU-Struktur wurde vollständig mit Schalenelementen vorgenommen. Die Schweißnähte wurden durch jeweils zwei Ketten an Beamelementen abgebildet, die an den Knoten der Schalenelemente von Außenhaut und IHU-Bauteil aufgespannt wurden.

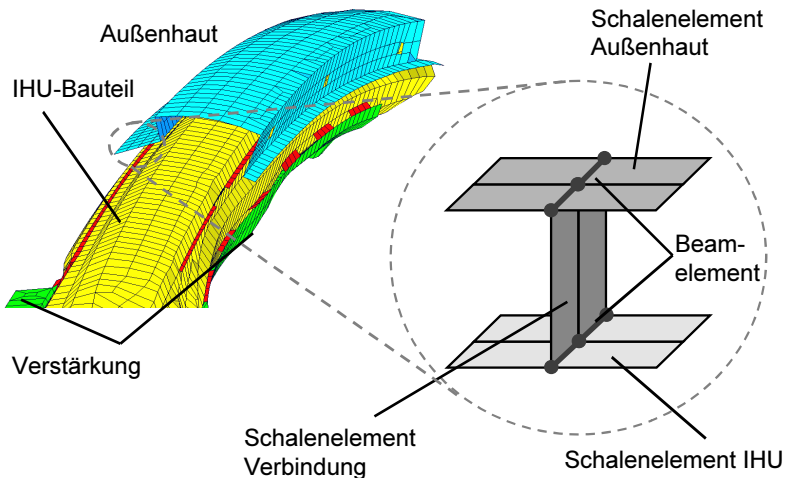


Abbildung 6.4: Mechanisches Modell der Karosseriestruktur

Abbildung 6.5 zeigt das Ergebnis dieses mechanischen Ersatzmodells. Die freie Verformung durch die eingebrachte Schrumpfung der Schweißnähte resultiert in einem Verzug des Gesamtbauteils nach links (Abbildung 6.5a). Abbildung 6.5b vergleicht Ausgangslage und Verformung des Querschnitts. Dabei zeigt sich, dass der Querschnitt gegenüber der Ausgangslage des Bauteils nicht deformiert, sondern verschoben wurde.

Der eingesetzte Spannrahmen gibt eine einseitige Zwangsbedingung vor, die im Finite Elemente - System durch Kontaktflächen modelliert wurde. Abbildung 6.5c und d zeigen die Auswirkungen der Berücksichtigung der

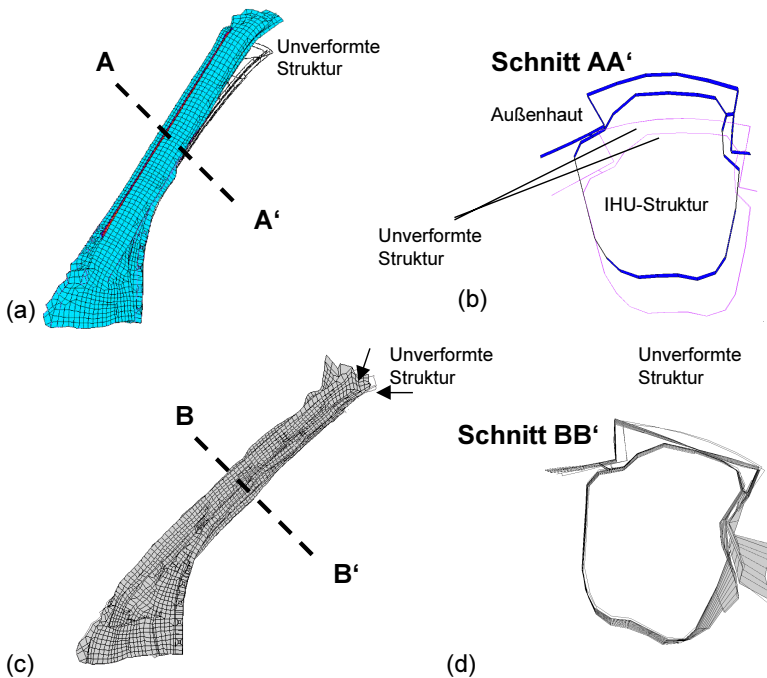


Abbildung 6.5: Ergebnisse des mechanischen Modells ohne Berücksichtigung der Einspannung (Abbildung a und b) sowie mit Berücksichtigung der Einspannung (Abbildung c und d)

Einspannung auf die Verformung der Struktur. Die Deformation der Gesamtstruktur ist im Überblick kaum erkennbar, im Gegensatz zu Abbildung 6.5b wurde der Querschnitt deutlich deformiert. Kontaktflächen wurden dabei nicht nur zur Abbildung der Spanntechnik definiert, sondern auch zwischen den beiden zu verschweißenden Bauteilen, um ein Durchdringen der Fügepartner zu vermeiden.

Zur Überprüfung dieser qualitativen Aussagen über die Verzugsrichtung wurden begleitend zu der Simulation experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Dazu wurden am Spannrahmen Messtaster angebracht, die die Bauteilverformung normal zur Bauteiloberfläche aufzeichnen (Abbildung 6.6a). Abbildung 6.6b zeigt das Ergebnis der experimentellen Untersuchungen. Am Taster M1 erfährt die Struktur zunächst durch die Wärmeeinbringung eine deutliche Ablenkung in positive Richtung, d.h. weg von den Auflageflächen des Spannrahmens. Während des Abkühlens bewegt sich die Struktur zurück in den Spannrahmen, das Signal zeigt eine deutliche Verformung in negative Richtung. Diese Bewegung war möglich aufgrund des Spiels der Karosseriestruktur in dem Rahmen. Taster M2 und M3 erfahren ausschließlich eine leichte Ablenkung aus dem Spannrahmen heraus in positive Richtung.

Die mechanische Simulation liefert aufgrund ihres Modellierungskonzepts ausschließlich qualitative Aussagen über den Verzug am Ende des Abkühlvorgangs. Aus diesem Grund darf beim Taster M1 die starke Auslenkung zu Beginn der Messzeit, zu dem sich die Struktur durch den Laser erwärmt und ausdehnt, nicht berücksichtigt werden. Bei Betrachtung des Verhaltens der Struktur am Ende der Messzeit (siehe Kasten in Abbildung 6.6c) kann eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment festgestellt werden. Beide Verfahren ergeben eine Verzugsrichtung in negative Richtung (Abbildung 6.6c). Aufgrund der höheren Steifigkeit der Struktur findet an den unteren Tastern (M2 und M3) nur eine geringe Verformung statt.

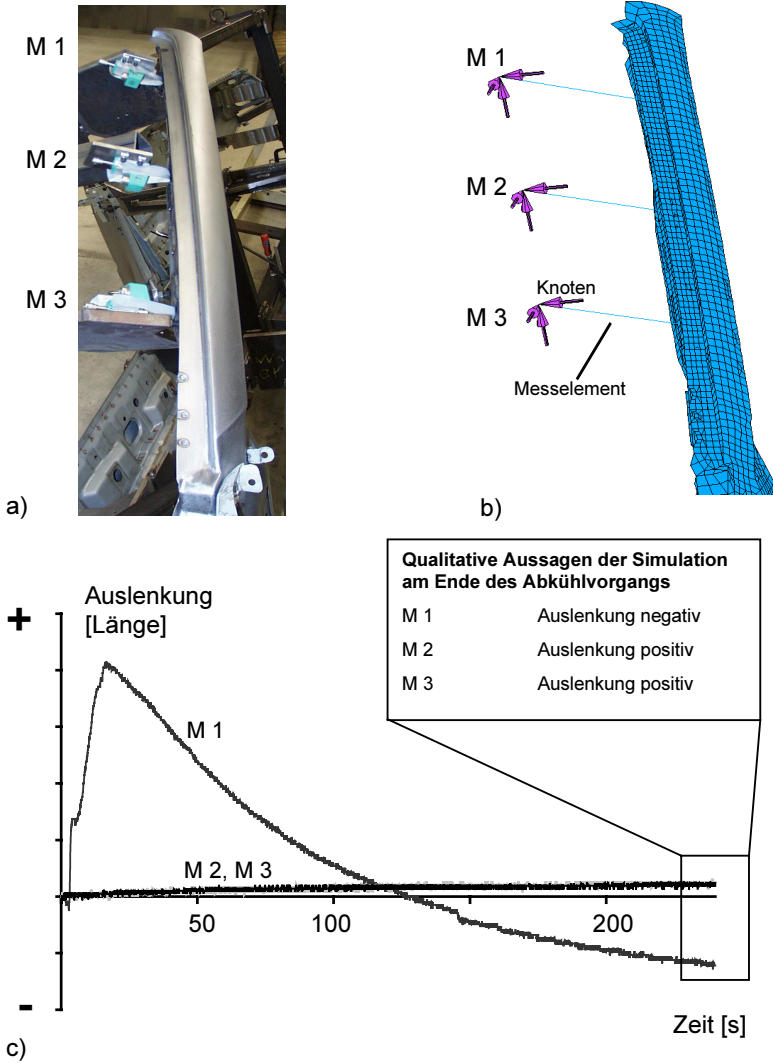


Abbildung 6.6: Vergleichende experimentelle Untersuchungen: a) Anordnung der Messtaster am Spanrahmen b) Simulationsmodell (die Linien stellen die Messelemente dar, Erläuterung siehe Text) c) Vergleich von Simulation und Experiment

6.2.2 Thermomechanische Modellierung

Mit der thermomechanischen Analyse wurden der Verzug der Struktur als Funktion der Wärmeleitung sowie die Wechselwirkung zwischen Bauteil und Spanntechnik untersucht. Abbildung 6.7a zeigt die mit Volumenelementen vernetzte Gesamtstruktur. Aufgrund der unterschiedlichen Dicken wurde die Außenhaut im Nahtbereich mit einem Element, die IHU-Struktur mit zwei Elementen in Dickenrichtung vernetzt. Dies resultierte in einem Gesamtmodell mit ca. 9500 Elementen und 15000 Knoten.

Aufgrund der Größe der Struktur wurde auf die Methode der Parallelisierung zurückgegriffen (vgl. Kapitel 5.4). Zur Abschätzung der notwendigen Rechenzeit wurden drei verschiedene Fälle untersucht: keine Parallelisierung, Einteilung in zwei Domains, von denen eine Domain die Elemente der Schweißnähte und die andere Domain den Rest des Bauteils enthielt, sowie Einteilung in drei Domains. Die letzte Variante ist in Abbildung 6.8a und b dargestellt. Für diese Variante wurden die Elemente der Schweißnaht in zwei verschiedene Domains verteilt, die jeweils die Hälfte der Elemente der Schweißnähte enthalten. Der Rest der Struktur bildet die dritte Domain. In der Abbildung wurden die Domains durch verschiedene Graustufen kenntlich gemacht. Die Parallelisierung brachte eine Reduktion der Rechenzeit auf ca. 30% der nichtparallelen Berechnung. Die absolute Rechenzeit betrug auf einer SGI Onyx 2 mit 3 R10000 Prozessoren, 250 MHz Taktfrequenz sowie 2GB Hauptspeicher ca. 4 Tage. Zur Modellierung der Wärmeeinbringung an den dreidimensional im Raum verlaufenden Schweißnähten wurde die in Kapitel 5.3.4 erläuterte Vorgehensweise der Näherung des Schweißnahtverlaufs verwendet. Durch ca. 170 Geradenstücke konnte auf einfache Art eine konstante Energieeinbringung über die gesamte Länge der Schweißnähte realisiert werden.

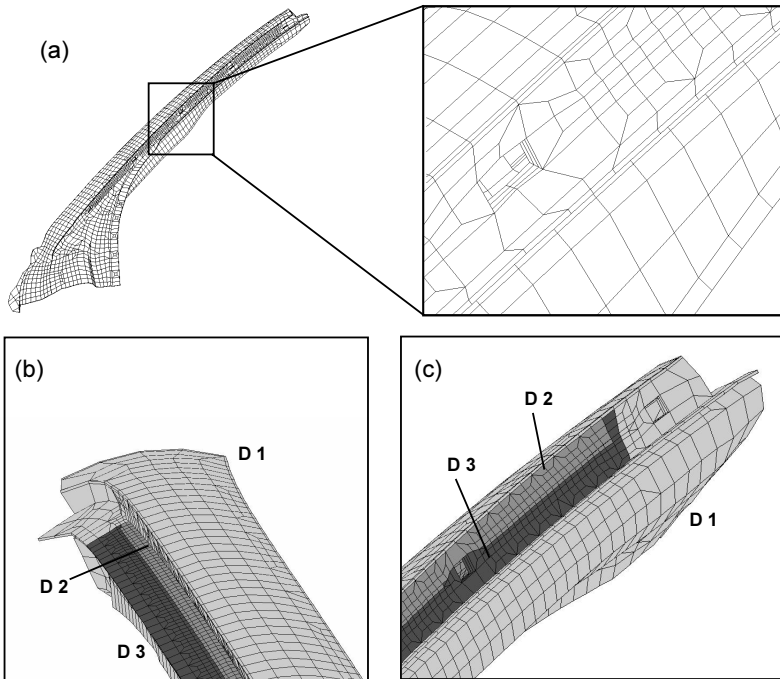


Abbildung 6.7: Vernetzung der Gesamtstruktur mit Volumenelementen: a) Gesamtbauteil und Ausschnitt b) und c) Einteilung von Bauteil und Nahtbereich in Domains (siehe Text)

Abbildung 6.8a zeigt die Temperaturverteilung während des Verschweißens des 4. Steps sowie die daraus resultierende Verformung der Struktur (Vergrößerungsfaktor 30). Abbildung 6.8b stellt die Verformung der Struktur nach ca. 50 Sekunden dar. Ein Großteil der Struktur hat sich deutlich erwärmt, aus der Asymmetrie resultiert eine Verformung nach rechts. In der dargestellten Rechnung wurde der Verzug der Struktur ohne Berücksichtigung der Einspannung berechnet. Am Ende der thermomechanischen Berechnung, wenn das Gesamtbauteil wieder Raumtemperatur erreicht hat, dominiert die starke Schrumpfung der durchgehenden Schweißnaht gegenüber den gesteppten Nähten, so dass sich in Übereinstimmung mit Abbildung 6.5b die Gesamtstruktur in der Zeichenebene nach links verzieht.

Auf Basis dieses Modells der Energieeinbringung wurde der Bauteilverzug in der Simulation ermittelt und mit dem resultierenden Verzug der Struktur aus experimentellen Versuchen verglichen. Bezugsgröße war die schweißbedingte Aufwölbung des Bauteils am Flansch im Bereich der Lasernähte (Abbildung 6.8c). Experimentell wurden die Ergebnisse von 4 Bauteilen gemittelt. Geschweißt wurde mit einem CO₂-Laser mit 8 kW und einer Vorschubgeschwindigkeit je nach Nahtlage zwischen 2 und 4 m/min ($r=0,3$ mm). Die Größenordnung und der Verlauf der Bauteilverformung stimmen in diesem Fall gut überein (Abbildung 6.8d).

Die fehlende Abbildung der Spannrolle wirkt sich in diesem Fall nicht aus, da der Verzug erst während des Abkühlvorgangs stattfindet. Für die Abbildung der real verwendeten Spanntechnik (Rollenspanntechnik) ist der Einsatz der thermomechanischen Simulation nur eingeschränkt möglich. Wie in Kapitel 5.2.6 beschrieben, bieten die derzeit verfügbaren Simulationssysteme keine befriedigende Lösung um Fragestellungen abzubilden, für die eine Kontaktformulierung zwischen Bauteilflächen notwendig ist. Standardmäßige Berechnungen sind auf sehr kleine Modellgrößen beschränkt, da sonst die Rechenzeit zu groß werden würde. Maßnahmen zur Reduktion der Rechenzeit, insbesondere die Parallelisierung können in Verbindung mit der Kontaktformulierung nicht verwendet werden.

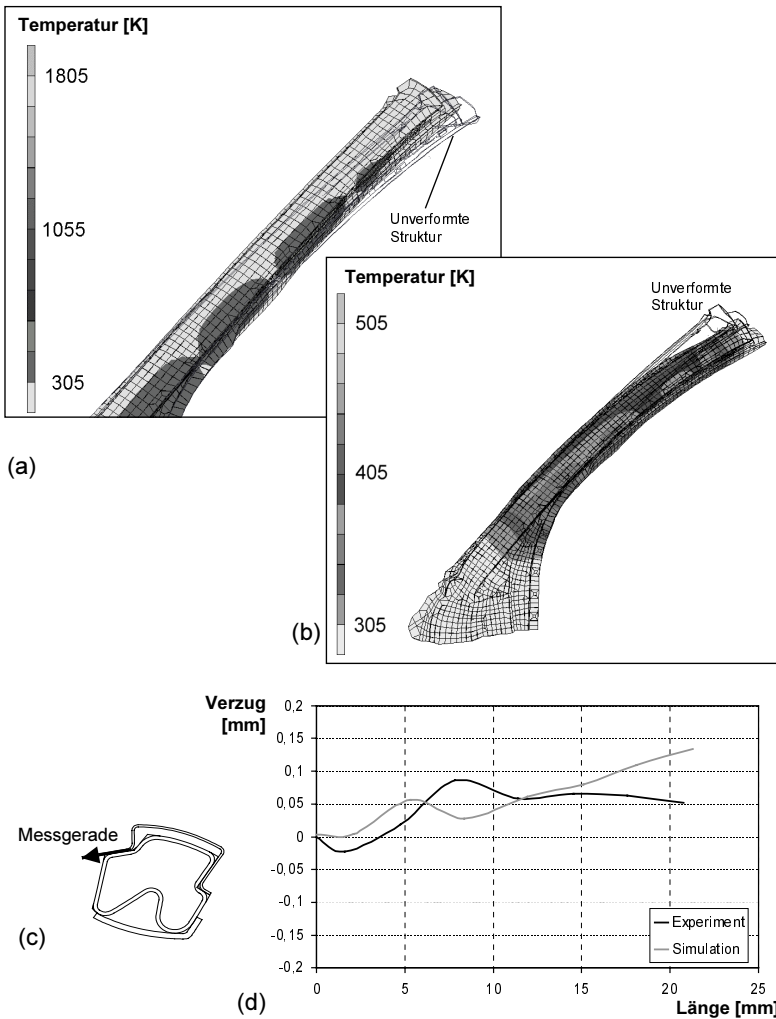


Abbildung 6.8: Ergebnisse der thermomechanischen Simulation.
 a) Temperaturverteilung (in K) und Verformung während des Schweißens
 b) Temperaturverteilung (in K) und Verformung nach 50 Sekunden
 c) und d) Vergleich von berechnetem und gemessenen Bauteilverzug am Flansch

Aus diesem Grund wurde das vorliegende Beispiel verwendet, um aufbauend auf eine konventionelle Spanntechnik (Abschnitt 5.2.6, Spannsituation 1) zu untersuchen, welche Auswirkungen die Schweißfolge auf die Höhe und den zeitlichen Verlauf der Spannkkräfte hat. Bei der vorliegenden Schweißaufgabe wurde der Bereich der Stepnähte herausgegriffen. Die Struktur wurde an den Knoten A bis D eingespannt. Die Nahtfolge wurde sowohl als Folge hintereinanderliegender Steps (ABCD) als auch als Folge ACBD untersucht (Abbildung 6.9a).

In Abschnitt 5.2.6 wurde nachgewiesen, dass die Simulation die Kräfte für diesen einfachen Fall der Spanntechnik richtig abbildet. Zum Vergleich der verschiedenen Schweißfolgen wurden sowohl der zeitliche Verlauf der Kräfte (Abbildung 6.9b) als auch die maximal auftretenden Kräfte untersucht (Abbildung 6.9c), die Maßstab für die Dimensionierung der Spannelemente sind. Die höchsten Kräfte treten mit ca. 10 bis 12kN am Knoten 3 im oberen Bereich der Struktur auf. Die Untersuchungen ergeben, dass eine nicht sequentielle Verschweißung der Steps (Schweißfolge B) um ca. 2kN höhere Spannkkräfte zur Folge hat. Durch die längeren Wege zwischen den Anfängen der einzelnen Steps verteilt sich die Energieeinbringung auf einen größeren Zeitraum. Zudem hat die veränderte Reihenfolge der Energieeinbringung eine deutlich inhomogenere Temperaturverteilung zur Folge, was in höheren Momenten und Kräften im Bauteil resultiert. Interessant ist in diesem Zusammenhang die Tatsache, dass sich im Temperaturverlauf an den Spannstellen selbst durch die geänderte Schweißfolge kaum Änderungen auftreten. Maßgeblich für die dort auftretenden Kräfte sind die Temperaturverläufe in den Schweißnähten.

In diesem Fall zeigt sich sehr deutlich der Einfluss der Temperaturverteilung auf die mechanischen Verhältnisse im Bauteil. Die Simulation bietet in verschiedenste Möglichkeiten, um die Schweißfolge so zu optimieren, dass ein möglichst gutes Zusammenspiel zwischen Wärmeeinbringung und verwendeten Fertigungsmitteln erreicht wird. Als Hinweis für die Fertigungsplanung ergeben die Berechnungen, dass die Energieeinbringung zwischen bereits bestehenden Schweißnähten vermieden werden sollte.

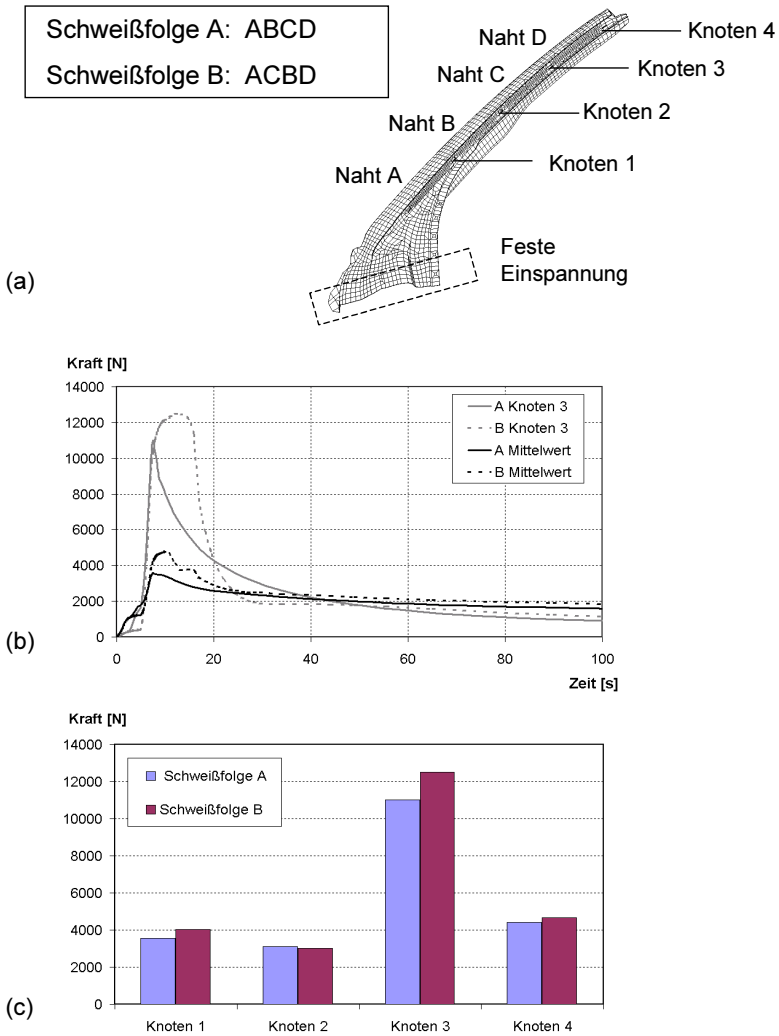


Abbildung 6.9: Untersuchung möglicher Schweißfolgen. (a) Nahtfolgen und Spannungspunkte (b) Kraftverlauf am Knoten 3 und Mittelwerte als Funktion der Zeit (c) Maxima der Kräfte an den Knoten

6.3 Bewertung

Das in Kapitel 5 vorgestellte Modellierungskonzept wurde an zwei Beispielen aus der Praxis überprüft, um die Fertigungsplanung in der Gestaltung der Prozessparameter und der Einspannung zu unterstützen.

Im ersten Anwendungsfall, der Absicherung von prozessverbessernden Maßnahmen beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumprofilen, hat die Simulation sehr gute Ergebnisse gezeigt. Das Konzept konnte angewandt werden, um die zu untersuchende Fragestellung durch Simulationsstudien zu klären. Allerdings wurde festgestellt, dass die plastischen Verformungen zu klein sind, um sie zur Reduktion eines Fügespalts produktiv zu nutzen.

Das zweite Anwendungsbeispiel war die Planung einer Laserstrahlschweißanwendung im Karosserierohbau. Das mechanische Modell wurde in diesem Zusammenhang eingesetzt, um qualitative Vorhersagen zu treffen. Diese ermöglichten hilfreiche Aussagen über die grundsätzliche Verformung der Struktur. Durch thermomechanische Studien im Simulationssystem konnte der experimentelle Aufwand zur Untersuchung verschiedener Schweißfolgen reduziert werden. Durch die Bauteilgröße und die äußerst komplexen mechanischen Randbedingungen wurden die Grenzen der Simulationsmodelle aufgezeigt. Insbesondere die Abbildung flexibler Spannsysteme, die derzeit aufgrund der engen Toleranzanforderungen des Laserstrahlschweißens häufig eingesetzt werden, ist nur sehr eingeschränkt möglich.

Eine Bewertung des vorgestellten Simulationskonzepts lässt sich nach dem konkreten Nutzen für die Fertigungsplanung sowie nach dem allgemeinen Nutzen für die Erreichung der Unternehmensziele gliedern (Tabelle 6.1).

Viele Unternehmen verfolgen das Ziel, den experimentellen Aufwand in der Produktentstehung durch virtuelle Prototypen zu reduzieren. Hierfür ist eine Abbildung der Fertigungsverfahren zwingend notwendig. Zudem unterstützt die Simulation die verschiedenen Abteilungen durch frühzeitige Informationen über die geplanten Fertigungsverfahren. Die Time to Market kann jedoch nur dann verkürzt werden, wenn die Simulation in die verschiedenen Entwicklungsprozesse organisatorisch und datentechnisch

Nutzen der Simulation des Laserstrahlschweißens	
Genereller Nutzen der Simulation	
Reduktion des experimentellen Aufwands	+ + +
Frontloading von Information	+ + +
Verkürzung der Time to Market	+
Nutzen für die Fertigungsplanung	
Feinplanung der Schweißparameter	+ + +
Festlegung von Schweiß- und Zusammenbaureihenfolge	+ +
Gestaltung von Spannvorrichtungen	+

Tabelle 6.1: Nutzenbewertung des Simulationseinsatzes

eingebunden ist. Beispielsweise müssen bereits in frühen Phasen zur FE-Modellerzeugung geeignete CAD-Daten zur Verfügung stehen.

In der Fertigungsplanung stellt die Simulation bei der Feinplanung der Schweißparameter sowie bei der Festlegung der Schweißfolge eine deutliche Unterstützung dar. Bei der Schweißfolge sowie besonders bei der Gestaltung der Spannvorrichtungen ist sie nur dann ein nützliches Werkzeug, wenn die geplanten Vorrichtungen als Simulationsmodell abbildbar sind (vgl. Abschnitt 5.2.6).

Eine monetäre Abschätzung von Aufwand und Nutzen des Simulationseinsatzes im Unternehmen ist nur eingeschränkt möglich. Die reinen Softwarekosten für ein nichtlineares Finite Elemente-Paket mit dem notwendigen Funktionsumfang betragen ca. 30.000 € für die Lizenz sowie ca. 15 bis 20% des Anschaffungspreises an jährlichen Wartungskosten. Eine Bewertung der Simulation nach den reinen Anschaffungskosten ist nicht gerechtfertigt, auch wenn für kleine und mittlere Unternehmen diese

häufig eine hohe Einstiegshürde darstellen. Hauptkostenfaktor beim Simulationseinsatz sind die notwendigen Mitarbeiter, die Simulationskompetenz aufbauen sowie im Anschluss die Modelle erstellen und die Simulationsstudien durchführen. Weitere mit der FE-Simulation verbundene Kosten sind die Beschaffung und Nutzung der Hardware, der Einführungsaufwand im Unternehmen und Personalkosten für Schulungen und Weiterbildungen. Es stellt sich somit auch die Frage, in wie fern eigene Simulationskompetenz im Unternehmen aufgebaut werden soll oder auf Fremddienstleistungen zurückgegriffen wird. Diese Frage kann nur unternehmensspezifisch beantwortet werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Innovationen dürfen nicht auf die Produkte beschränkt bleiben, sondern müssen auch Prozesse umfassen (Milberg und Taiber 1998). Der Begriff *Prozesse* kann sich sowohl auf Produktions- als auch auf Geschäftsprozesse beziehen. Durch das Ziel, die Finite Elemente-Simulation zur Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens einzusetzen, hat diese Arbeit zu beiden Fragestellungen einen Beitrag geleistet.

Die Simulation des Laserstrahlschweißens ist ein Baustein, um die rechnergestützten Produktentstehungsprozesse über die Grenzen des heutigen Stands der Technik hinaus zu entwickeln und einzusetzen. Ein Simulationswerkzeug ist nur dann wertvoll, wenn es auch in der Praxis eingesetzt wird. Daher sind Hinweise für die Fertigungsplanung notwendig, an welchen Stellen im Produktentstehungsprozess im allgemeinen sowie im komplexen Spannungsfeld der Fertigungsplanung des Laserstrahlschweißens die Simulation Beiträge liefern kann. Aufbauend auf den in der Schweißanweisung für das Laserstrahlschweißen festzulegenden Daten wurden die relevanten Fragestellungen ermittelt, für die ein Simulationseinsatz notwendig ist. Die wichtigsten von ihnen sind

- ◆ die Feinplanung der Prozessparameter,
- ◆ die Festlegung der Zusammenbau- und Schweißreihenfolge sowie
- ◆ die Gestaltung der Spanntechnik.

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurde ein Modellierungskonzept entwickelt, das die thermomechanischen Simulation des Laserstrahlschweißens als Basis verwendet. Ergänzt wird diese Simulation auf der einen Seite durch Modelle der Energieeinkopplung zur Ermittlung der Prozessparameter. Auf der anderen Seite wird ein mechanisches Ersatzmodell vorgestellt, um der Fertigungsplanung eine Methode zum schnellen Erwerb qualitativer Aussagen zur Hand zu geben.

Die Arbeit an den Simulationswerkzeugen ist noch nicht abgeschlossen. Es ist ein weiter Weg bis zum Erreichen der Vision, dass durch virtuelle Produktionsabsicherung der erste in „*Stahl und Eisen*“ gebaute Prototyp eines Produkts direkt an den Kunden ausgeliefert werden kann. Arbeit ist sowohl auf Seiten der Forschung als bei den Softwareherstellern zu leis-

ten, um die Anwendung der Simulationssysteme sowohl von der Bedienbarkeit als auch von den Rechenzeiten her zu verbessern und auf diese Weise die Grenzen des Simulationseinsatzes auszudehnen.

Weitere wichtige Fragestellungen zur Weiterentwicklung der Simulation als Werkzeug für die Fertigungsplanung sind die dringend notwendigen Integrationen der Werkzeuge. Integration einerseits von der Welt der CAD-Daten zu den Simulationswerkzeugen, um die Modellerstellung zu vereinfachen. Integration andererseits als Verknüpfung der Simulationswerkzeuge. Mit der Simulation eines einzelnen Fertigungsverfahrens ist nur ein Teil der Fragestellungen beantwortet. Häufig liegen Anlaufprobleme in der Serienfertigung nicht am einzelnen Prozess, sondern an Eigenschaften der Prozesskette. Diese reicht von ur- und umformenden Verfahren der Einzelteilerfertigung über die verschiedensten Fügeverfahren bis hin zur Montage und weiter führenden Schritten. Aufgrund des Fortschritts der Simulationswerkzeuge ist eine Verkettung der Umformsimulation naheliegend, beispielsweise des Innenhochdruckumformens (IHU) mit der Schweißsimulation. Denkbar ist außerdem eine Verknüpfung der Schweißsimulation mit Werkzeugen zur umfassenden Abbildung toleranzbehafteter Bauteile.

8 Literatur

Ahamanache u. a. 1996

Ahamanache, A.; Amara, E. H.; El Khelfaoui, Y.: Finite Elemente Simulation of Laser Material Welding. Lasers in Engineering 5 (1996) S. 217-226

Altenbach und Sacharov 1982

Altenbach, J. ;Sacharov, A.S.: Die Methode der finiten Elemente in der Festkörpermechanik. München: Hanser 1982

Aluminiumzentrale 1998

Aluminium-Zentrale (Hrsg.): Aluminiumtaschenbuch. Band 1: Grundlagen und Werkstoffe. Düsseldorf: Aluminium-Verlag 1998

American Society of Metals 1961

American Society of Metals (Hrsg.): Metals Handbook. Novelty: American Society of Metals 1961

Backes 1997

Backes, F.: Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung. Bamberg: Meisenbach, 1997 (Fertigungstechnik Erlangen; 68)

Balasubramanian und Katzenbach 1995

Balasubramanian, B.; Katzenbach, A.: Simulation im Automobilbau - von der Idee bis zum Kundenfahrzeug In: Simulation in der Praxis - neue Produkte effizient entwickeln. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1995 S. 1-17 (VDI-Bericht 1215)

Bauer 1999

Bauer, L.: Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen. Berlin: Springer 1999 (Forschungsberichte iw; 122)

Beck 1996

Beck, M.: Modellierung des Laserstrahl-tiefschweißens. Stuttgart: Teubner 1996 (Laser in der Materialbearbeitung)

Beck und Breitschwert 1997

Beck, M.; Breitschwert, S.: Qualifizierung des Laserstrahlschweißens für Getriebebauteile In: Jüptner, W., Sepold, G.: Lasermaterialbearbeitung im Transportwesen. Bremen: Idee & Druck 1997, S. 181-189

Bergmann und Hilbinger 1998

Bergmann, H.W.; Hilbinger R. M.: Numerical Simulation of centre line hot cracks in laser beam welding of aluminium close to the sheet edge In: Cerjak, H. (Hrsg.): Mathematical modelling of weld phenomena 4. London: The Institute of Materials, 1998, S. 658 - 668

Beyer 1995

Beyer, E.: Schweißen mit Laser. Berlin: Springer 1995

Bhadeshia und Svensson 1993

Badeshia, H.; Svensson, L.-E.: Modelling the evolution of microstructure in steel weld metal. In: Cerjak, H; Easterling, K. (Hrsg.): Mathematical Modelling of Weld Phenomena. London: The Institute of Materials 1993, S. 141-180

Biffin und Blundell 1997

Biffin, J.; Blundell, N.: Plasma Augmented Laser Welding – Autobody Applications. In: Proc. Inter. Konferenz Schweißtechnik, Werkstoffe und Werkstoffprüfung, Bruchmechanik. Qualitätsmanagement. Wien: TU 1997 (Schriftenreihe der Technischen Universität Wien)

Boehmer 1997

Boehmer, J. R.: Methodik computergestützter Prozessmodellierung. München: Oldenburg 1997

Boothroyd u. a. 1994

Boothroyd, G.; Dewhurst, P.; Knight, W.: Product design for manufacture and assembly. New York: Dekker 1994

Buchmayr 1991

Buchmayr, B.: Computer in der Werkstoff- und Schweißtechnik. Düsseldorf: DVS-Verlag 1991

Bullinger 1996

Bullinger, H.-J.: Concurrent Simultaneous Engineering Systems. Berlin: Springer 1996

Burnet 1987

Burnet, D. A.: Finite Element Analysis. Reading: Addison-Wesley 1987.

Burzer u. a. 1998

Burzer, J.; Waldmann, H.; Bergmann, H. W.: Plasma augmented laser welding of Aluminium. In: Mordike (Hrsg.): Proc. European Conference on Laser Treatment of Materials – ECLAT, Sept. 1998, Hannover. Frankfurt: Werkstoff-Informationsgesellschaft 1998

Carmignani u. a. 1999

Carmignani C.; Mares, R.; Toselli, G.: Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a singlepass butt-welded thick steel plate. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 179 (1999),S. 197-214

Chen u. a. 2000

Chen, J.; Terasaki, T.; Akiyama, T.; Kishitake, K.: New Concept of Equivalent Inherent Strain for Measuring Axisymmetric Residual Stresses. Jour. Manuf. Science and Engineering 122 (2000) 5, S. 304-309

Coates 2000

Coates, J. F.: Manufacturing in the 21st Century. Int. J. Manufacturing Technology and Management 1 (2000) 1, S. 42-59.

Dahl u. a. 1999

Dahl, W.; Diltthey, U.; Weirich, P.; de Payrebrune, J.: Eigenspannungen und Verzug beim Schweißen dicker Bleche. In: Aurich, D. (Hrsg.): Eigenspannungen und Verzug durch Wärmewirkung. Weinheim: Wiley-VCH 1999, S. 175 - 201

Dangelmaier 1999

Dangelmaier, W.: Fertigungsplanung. Berlin: Springer 1999

Dausinger 1995

Dausinger, F.: Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität. Stuttgart: Teubner 1995

DebRoy und David 1995

DebRoy, T.; David, S. A.: Physical Processes in Fusion Welding. Reviews of Modern Physics 67 (1995) 1, S. 85 - 112

Decker u. a. 1997

Decker, I.; Voß, O.; Wendelstorf, J.; Wohlfahrt, H.: Nutzen numerischer Simulation für den Einsatz realer Schweißprozesse. In: Schweißen und Schneiden '97. Düsseldorf: DVS-Verlag 1997, S. 34 - 38 (DVS-Berichte 186)

Deinzer und Vollertsen 1994

Deinzer, G. und Vollertsen, F.: Laserstrahlschweißen und -richten Laser und Optoelektronik, 26 (1994) 3, S. 48-53

Dilthey 1995

Dilthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren Bd. 2: Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995

Dilthey 2000

Dilthey, U. (Hrsg.): Laserstrahlschweißen - Prozesse, Werkstoffe, Fertigung und Prüfung. Düsseldorf: DVS-Verlag 2000

DIN 1910 (1983)

DIN 1910: Schweißen - Begriffe, Einteilung der Schweißverfahren. Berlin: Beuth 1983

DIN 6300 (1970)

DIN 6300: Vorrichtungen. Berlin: Beuth 1970

DIN 66201 Teil 1 (1981)

DIN 66301: Prozessrechensysteme. Teil 1: Begriffe. Berlin: Beuth 1981

DIN 8528 (1973)

DIN 8528: Schweißbarkeit. Berlin: Beuth 1973

DIN 8563 Teil 122 (1994)

DIN 8563 Teil 122: Sicherung der Güte von Schweißarbeiten (Anforderungen und Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe; Schweißanweisung für das Laserstrahlschweißen). Berlin: Beuth 1994

DIN 8580 (1985)

DIN 8580: Fertigungsverfahren: Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth 1985

DIN EN 10052 (1994)

DIN EN 10052: Begriffe der Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen. Berlin: Beuth 1994

DIN EN ISO 9956-11 (1996)

DIN EN ISO 9956-11: Anforderung und Anerkennung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe, Teil 11: Schweißanweisung für das Laserstrahlschweißen. Berlin: Beuth 1996

Doege und Dohrmann 1998

Doege, E.; Dohrmann, H.: Numerical Simulation of the Deep Drawing Process of Tailored Blanks. Production Engineering V/2 (1998), S. 139 – 142.

Dubbel u. a. 1997

Dubbel, H. (Begr.); Beitz, W.; Grote, K.-H. (Hrsg.): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau, 19. Auflage. Berlin: Springer 1997

Ehrlenspiel 1995

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung. München: Hanser 1995

Eversheim 1989

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik, Band 4: Fertigung und Montage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989

Eversheim 1997

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik, Band 3: Arbeitsvorbereitung. Berlin: Springer 1997

Eversheim u. a. 1999

Eversheim, W.; Klocke, F.; Pfeifer, T.; Weck, M. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik: Aachener Perspektiven/Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium 1999. Aachen: Shaker 1999

Eversheim und Klocke 1998

Eversheim, W. und Klocke, F.: Werkzeugbau mit Zukunft. Berlin: Springer 1998

Eversheim und Schuh 1999a

Eversheim, W. und Schuh, G.: Produktion und Management, Band 1: Integriertes Management. Berlin: Springer 1999

Eversheim und Schuh 1999b

Eversheim, W. und Schuh, G.: Produktion und Management, Band 2: Produktmanagement. Berlin: Springer 1999

Feldmann und Reinhart 1999

Feldmann, K. und Reinhart, G.: Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion. Berlin: Springer 1999

Flegel 1999

Flegel, H.: Gut gefügt, sicher gefahren - Was das Auto der Zukunft zusammenhält. Schweißen und Schneiden 51 (1999) 12, S. 766-771

Fritz und Schulze 1985

Fritz, A.H. und Schulze, G.: Fertigungstechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1985

Geiger und Otto 1996

Geiger, M. und Otto, A.: FEM Simulation of Transient Processes during Laser Beam Welding. Production Engineering III (1996) 2, S. 97-100

Gerthsen und Vogel 1995

Gerthsen, C. (Begründer), Vogel, H. (Hrsg.): Physik, 18. Auflage. Berlin, Springer 1995

Geyer 1997

Geyer, M.: Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung. Berlin: Springer 1997 (iwb Forschungsbericht Band 112)

Goldak u. a. 1992

Goldak, J.; Oddy, A.; Gu, M.; Mashaie, A.; Hughes, E.: Coupling Heat Transfer, Microstructure Evolution and Thermal Stress Analysis in Weld Mechanics. In: Karlsson, E. (Hrsg.): Mechanical Effects of Welding. Berlin: Springer 1992, S. 1 – 30.

Goldak u. a. 2000

Goldak, J.; Mocanita, M.; Aldea, V.; Zhou, J.; Downey, D.; Doring, D.: Predicting Burn Through When Welding on Pressurized Pipelines. In: Proc. ASME Pressure Vessels and Piping Conference 2000 (PVP 2000), 23.-27-07.2000, Seattle, Washington, USA.

Goldak u. a. 2001

Goldak, J.; Mocanita, M.; Aldea, V.; Zhou, J.; Downey, D.; Zypchen, A.: Computational Weld Mechanics: Is Real Time CWM Feasible? Recent Progress in CWM. In: Cerjak, H. (Hrsg.): Mathematical Modelling of Weld phenomena 5. London: The Institute of Materials 2001, S. 421-430.

Götz 1981

Götz, E.: Flexible Spannvorrichtungen. Stuttgart: Technischer Verlag Günter Grossmann 1981.

Haferkamp u. a. 1997

Haferkamp, H.; Bach, F.-W.; von Alvensleben, F.; Burmester, I.; Schmid, C.: Grundlagenuntersuchungen geben Hinweise für die Praxis: Qualifizierung des Laserstrahlschweißens - Probleme und Lösungswege für die Praxis. wt Werkstatttechnik 87 (1997), S. 294 - 298.

Häuser u. a. 1999

Häuser, H.; Braun, S.; Reitsam, R.: Finite-Elemente-Simulation von Schweißprozessen mit AlMg- und AlMgSi-Legierungen unter Berücksichtigung von Rekristallisation, Ausscheidungsrickbildung und natürlichem Altern. In: Schweißtechnische Software in der Praxis. Düsseldorf: DVS-Verlag 1999, S. 47 - 51 (DVS-Berichte 194)

Heckmann 1992

Heckmann, A.: Zerlegungs- und Vernetzungsverfahren für die automatische Finite Elemente-Modellierung. Aachen: Shaker 1992

Heider 1994

Heider, P.: Lasergerechte Konstruktion und lasergerechte Fertigungsmittel zum Schweißen großformatiger Aluminiumstrukturbauteile. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994

Hilbinger 1995

Hilbinger, R.M.: Eigenspannungen beim Laserstrahlschweißen verschiedener Baustähle. Härtereitechnische Mitteilungen 50 (1995) 6, S. 380-386

Hillebrand 1997

Hillebrand, A.: Numerische Simulation des Laserstrahlschneid- und Schneidprozesses durch Finite Elemente-Simulation. Aachen: Shaker 1997

Hillebrand u. a. 1995

Hillebrand, A.; Decker, I.; Wohlfahrt, H.: Abschätzung von Verzug und/oder Eigenspannungen an strahlgeschweißten Werkstücken durch FEM-Berechnungen als konstruktions- und planungsbegleitende Aufgabe In: Schweißen und Schneiden 1995. Düsseldorf: DVS-Verlag 1995, S. 28-32

Hoffmann u. a. 1998

Hoffmann, H.; Kohnhäuser, M.; Schweitzer, M.: Umformsimulation im Karosseriebau. In: Krause, F., Uhlmann, E. (Hrsg.): Innovative Produktionstechnik. München: Hanser 1998, S. 366-379

Hohenberger und Faißt 2000

Hohenberger, B. und Faißt, F.: Laserstrahlschweißen in Doppelfokustechnik - Grundlagen und industrielle Anwendung In: Gesellschaft für Fertigungstechnik (Hrsg.): Stuttgarter Impulse: Technologien für die Zukunft / FTK 2000. Berlin: Springer 2000, S. 63-95

Hornig 1996

Hornig, J.: Laser - strahlende Zukunftsaussichten beim Schweißen im Karosseriebau. In.: VDI-Gesellschaft Fahrzeug und Verkehrstechnik (Hrsg.): Entwicklungen im Karosseriebau. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996, S. 149-178 (VDI Berichte 1264)

Hornig 2000

Hornig, J.: Auch BMW schweißt Aluminium in der Serie. Euro Laser (2000) 4, S. 28-32

Hügel u. a. 1998

Hügel, H.; Berger, P.; Dausinger, F.: Modelling of Laser Treatment Processes – A Versatile Development Tool. In: Proc. Of the 17th International Conference on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO 1998), Orlando, FL 1998, S. 141 - 150

Hügel u. a. 2000

Hügel, H.; Seiler, P.; Wollermann-Windgasse, R.: Neue Hochleistungslaser - Entwicklungstendenzen und fertigungstechnische Potenziale. In: Gesellschaft für Fertigungstechnik (Hrsg.): Stuttgarter Impulse: Technologien für die Zukunft / FTK 2000. Berlin: Springer 2000, S. 63-95

Issler u. a. 1995

Issler, L.; Ruoß, H.; Häfele, P.: Festigkeitslehre Grundlagen. Berlin: Springer 1995

Kadivar u. a. 2000

Kadivar, M. H.; Jafarpur, K.; Baradaran, G. H.: Optimizing Welding Sequence with Genetic Algorithm. Computational Mechanics 26 (2000), S. 514-519

Kaplan 1994

Kaplan, A.: A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile J. Phys. D: Appl. Phys. 27 (1994), S. 1805-1814

Kaßner und Wohlfahrt 1999

Kaßner, M. und Wohlfahrt, H.: Verzugs- und Eigenspannungsberechnung an geschweißten Bauteilstrukturen mit der Methode der Finiten Elemente. In: Schweißtechnische Software in der Praxis. Düsseldorf: DVS-Verlag 1999, S. 27-34 (DVS-Berichte 194)

Kern u. a. 1998

Kern, M.; Fuhrich, T.; Berger, P.; Hügel, H.: Dreidimensionale Simulation der Kapillarausbildung und der Schmelzbadströmung beim Laserstrahlschweißen. In: Sepold, G.; Geiger, M. (Hrsg.): Strahl-Stoff-Wechselwirkungen bei der Laserstrahlbearbeitung. Bremen: BIAS-Verlag 1998 (Strahltechnik Bd. 6)

Klaus und Buhr 1975

Klaus, G.; Buhr, M. (Hrsg.): Philosophisches Wörterbuch, Band 11. Leipzig: Verlag Enzyklopädie 1975

Klein u. a. 1994

Klein T., Vicanek, M.; Kroos, J.; Decker, I.; Simon, G.: Oszillations of the keyhole in penetration laser beam welding. J. Phys. D: Appl. Phys. 27 (1994), S. 2023-2030

Klemens 1976

Klemens, P. G.: Heat balance and flow conditions for electron beam and laser welding. Jour. Appl. Phys. 47 (1976) 5

Klocke 1998

Klocke, F.: Neue Technologien - Marktvorsprung durch Technologievorsprung In: Krause, F., Uhlmann, E. (Hrsg.): Innovative Produktionstechnik. München: Hanser 1998, S. 426-436

Kluth u. a. 2000

Kluth, R.; Lüttke, H.; Kern, M; Schmid, C.: Aufgaben und Perspektiven der Lasermaterialbearbeitung in der Aggregatefertigung der DaimlerChrysler AG. In: Gesellschaft für Fertigungstechnik (Hrsg.): Stuttgarter Impulse: Technologien für die Zukunft / FTK 2000. Berlin: Springer 2000, S. 228-241

Kou 1982

Kou, S.: Welding, Glazing and Heat Treating - A Dimensional Analysis of Heat Flow. Metallurgical Transactions 13A (1982) 3, S. 363-371

Koytek und Gaube 1999

Koytek, G. und Gaube, O.: Digital Mockup im weltweiten Entwicklungsverbund zwischen Zulieferer und Hersteller. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.): Virtuelle Produktentstehung in der Fahrzeugtechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999, S.149 - 152 (VDI-Bericht 1489)

Krallmann 1996

Krallmann, H.: Systemanalyse im Unternehmen. Geschäftsprozessoptimierung, Partizipative Vorgehensmodelle, Objektorientierte Analyse. München: Oldenbourg 1996

Kugelmann 1999

Kugelmann, D.: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern. München: Utz 1999 (iwb Forschungsbericht 127)

Lampa u. a. 1997

Lampa, C.; Kaplan, A.; Powell, J.; Magnusson, C.: An analytical thermodynamic model of laser welding. J. Phys. D: Appl. Phys., 30 (1997), S. 1293-1299

Lancaster 1986

Lancaster, J. K.: The physics of welding. Oxford: Pergamon 1986

Landolt und Börnstein 1963

Landolt, H.; Börnstein, R. (Hrsg.): Physikalisch-chemische Tabellen: Zahlenwerte aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik, Bd. 4. Berlin: Springer 1963

Larsson 1994

Larsson, J.K.: The Introduction of Roof Laser Welding in Car Production and the Development of a New Fixation Technique. In: Geiger, M., Vollertsen, F. (Hrsg.): Laser Assisted Net Shape Engineering - Proc. of the LANE'94, Vol. I. Bamberg: Meisenbach 1994, S. 115 – 123

Leitermann 2000

Leitermann, W.: Neue Technologien - eine Fabrik im Wandel. In.: Reinhart, G.; Hoffmann, H. (Hrsg.): ... nur der Wandel bleibt. Wege jenseits der Flexibilität. München: Utz 2000, S. 74- 90

Leblond und Devaux 1984

Leblond, J. B.; Devaux, J.: A new kinetic model for anisothermal metallurgical transformations in steels including effect of austenite grain size. Acta metall. 32 (1984) 6, S. 137 – 146.

Liebelt 1998

Liebelt, S.: Analyse und Simulation des Laserstrahlschneidens von Faserverbundkunststoffen. Berlin: IPK 1998 (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin)

Little 1997

Little, A. D. (Hrsg.): Management von Innovation und Wachstum. Wiesbaden: Gabler 1997

Mackerle 1998

Mackerle, J.: Finite Element Analysis and Simulation of Welding: A Bibliography (1976-1996). Modelling Simul. Mater. Sci. Eng. 4 (1996) 501 – 533.

Malisius 1969

Malisius, R.: Schrumpfungen, Spannungen und Risse beim Schweißen. Düsseldorf: DVS-Verlag 1969 (Fachbuchreihe Schweißtechnik Band 10)

Marfels und Schneider 1989

Marfels, W.; Schneider, A.: Vorrichtungen in der Schweißtechnik. Düsseldorf: DVS-Verlag 1989

Masubuchi 1976

Masubuchi K.: Residual Stresses and Distortion. In: Weisman, C. (Ed.): The Welding Handbook, Vol. I. Miami: American Welding Society 1976, S. 221-277

Masubuchi 1980

Masubuchi K.: Analysis of welded structures. Oxford: Pergamon Press 1980

Milberg und Taiber 1998

Milberg, J.; Taiber, J.: Agilität durch Vernetzung von Produkt- und Prozessinnovation. In: Krause, F., Uhlmann, E. (Hrsg.): Innovative Produktionstechnik. München: Hanser 1998, S.211-222

Minsky 1965

Minsky, M. L.: Matter, Mind and Models. In: Kalenich, W. A. (Hrsg.): Information Processing. Proceedings of IFIP Congress, New York City, May 1965, Vol. 1. Washington: Spartan Books 1965, S. 45-49

MSC.MARC 2000

MSC Software GmbH: MSC.MARC Finite Elemente Code. www.mscsoftware.com

MSC.MARC 1999a

MSC.MARC Analysis Research Corporation (Hrsg.): User Manual Vol. A – Theory and User Information Version K7.3. Palo Alto: MARC Analysis Research Corporation 1999

MSC.MARC 1999b

MSC.MARC Analysis Research Corporation (Hrsg.): User Manual Vol. B – Element Library Version K7.3. Palo Alto: MARC Analysis Research Corporation 1999

Mohanty und Mazumder 1997

Mohanty, P. S.; Mazumder, J.: Workbench for keyhole laser welding. Science and Technology of Welding and Joining 2 (1997) 3, S. 133 - 138

Müller und Reindl 1999

Müller, G.; Reindl, P.: Der BMW DMU-Prozess mit Entwicklungspartnern In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.): Virtuelle Produktentstehung in der Fahrzeugtechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999, S. 135-149 (VDI-Bericht 1489)

Myhr und Grong 1991

Myhr, O. R.; Grong, O.: Process Modelling Applied to 6082-T6 Aluminum Weldments. Acta Metall. Mater. 39 (1991) 11, S. 2693 – 2708.

Nethe und Stahlmann 1999

Nethe, A.; Stahlmann, H.-D.: Survey of a General Theory of Process Modelling. In: Scholz-Reiter, B.; Stahlmann, H.-D.; Nethe, A. (Hrsg.): Process Modelling. Springer: Berlin 1999

Neumann und Kluge 1992

Neumann, A.; Kluge, D.: Fertigungsplanung in der Schweißtechnik . Düsseldorf: VDI-Verlag 1992

Neumann und Lübeck 1982

Neumann, A.; Lübeck, F.: Konstruktive und technologische Richtlinien zum verformungsarmen Schweißen. Wissenschaftliche Schriftenreihe der TH Karl-Marx-Stadt 4/1982, Teil II: Technologische Richtlinien. Karl Marx Stadt: TH 1982

Otto 1997

Otto, A.: Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen. Bamberg: Meisenbach 1997

Pahl und Peitz 1993

Pahl, G. und Peitz, W.: Konstruktionslehre. Berlin: Springer 1993

Peters 1997

Peters, T.: The Circle of Innovation. New York: Knopf 1997

Petring u. a. 1999

Petring, D.; Höppe, N.; Poprawe, R.: Beeinflussung der Nahtmetallurgie und -eigenschaften beim Laserstrahlschweißen von höherfesten Stählen mit Zusatzwerkstoff In: DVS - Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren (Hrsg.): Abschlußpräsentation des Projektverbandes Qualifizierung von Laserverfahren, Weimar. Düsseldorf: DVS-Verlag 1999, S. 29-34 (DVS-Bericht 205)

Pitscheneder u. a. 1996

Pitscheneder, W.; Ebner, R.; Leoben, K.; Mundra, K.; DebRoy, T.: Untersuchung von Laser-Schweißbädern durch numerische Simulation und Experimente. In: Schweißtechnische Software in der Praxis. Düsseldorf: DVS-Verlag 1996, S. 68-74 (DVS-Bericht 179)

Radaj 1992

Radaj, D.: Heat Effects of Welding. Berlin: Springer 1992

Radaj 1995

Radaj, D.: Potential of Numerical Analysis of Weldability in the Design Process In.: Cerjak, H. (Hrsg.): Mathematical Modelling of Weld Phenomena. London: The Institute of Materials 1995, S. 245-262

Radaj 1999

Radaj, D.: Schweißprozesssimulation: Grundlagen und Anwendungen. Düsseldorf: DVS-Verlag 1999

Radaj u. a. 1998

Radaj, D., Häuser, H.; Braun, S.: Numerische Simulation von Eigenspannungen und Verzug bei Schweißverbindungen aus AlMgSi-Verbindungen. Konstruktion 50 (1998) 7-8, S. 31-38

Reek 2000

Reek, A.: Strategie zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen. München: Utz 2000 (iwb Forschungsbericht 138)

Reinhart 2000

Reinhart, G.: Im Denken Handeln und Wandeln. In: Reinhart, G.; Hoffmann, H. (Hrsg.): ... nur der Wandel bleibt. Wege jenseits der Flexibilität. München: Utz 2000, S. 17-40

Reinhart u. a. 1998

Reinhart, G.; Rick, F.; Lenz, B.: FEM-Simulation of Laser Welding in Production Planning and Product Design. In: Kals, H.J.J. (Hrsg.): Proc. Of the 6th intern. Conference on Sheet Metal (SheMet98). Enschede: Twente University Printers 1998, S. 267 - 274

Reinhart u. a. 1999

Reinhart, G.; Grunwald, S.; Rick, F.: Virtuelle Produktion - Technologie für die Zukunft. VDI-Z Integrierte Produktion, Spezial C-Techniken 141 (1999) 10, S. S.26-29

Reinhart und Grunwald 2000

Einführung wandlungsfähiger Prozesse im Engineering. ZWF 95 (2000) 7-8, S. 351-355

Reinhart und Lindl 1998

Reinhart, G.; Lindl, H.: Numerical Simulation of the Laser Welding Process and Resulting Workpiece Properties. Production Engineering V/2 (1998), S. 143-146

Reißner 1932

Reißner, H.: Eigenspannungen und Eigenspannungsquellen. Zeitschrift für angewandte Mathematik und Mechanik 11 (1931) 1, S. 1-8

Richter 1973

Richter, F.: Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von 52 Eisenwerkstoffen. Stahleisen-Sonderbereiche Nr. 8. Düsseldorf: Verlag Stahleisen 1973

Rick 1998

Rick, F.: Lasergerechte Konstruktion. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Laser in der Produktion – Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz. München: Utz 1998 (iwb Seminarberichte 34)

Rick 2001

Rick, F.: Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen. München: Technische Universität, Diss. 2001

Rick u. a. 1998

Rick, F., Reinhart, G., Lenz, B.: Process Prototyping for Laser Material Processing - Advanced Finite Element Models for the Simulation of Laser Welding. In: Proc. 17th Intern. Congress on Applications of Lasers and Electro Optics (ICALEO 1998), Orlando, FL 1998

Rippl 1997

Rippl, P.: Fertigungssysteme zum Laserstrahlschweißen mit Industrierobotern im Karosserie-Rohbau. In: Jüptner, W., Sepold, G.: Lasermaterialbearbeitung im Transportwesen. Bremen: Idee & Druck 1997, S. 31 – 43

Ritter u. a. 1999

Ritter, R.; Wohlfahrt, H.; Zhang, F.: Werkstoff-, Verfahrens- und Geometrieinflüsse auf den schweißbedingten Verzug. In: Aurich, D. (Hrsg.): Eigenspannungen und Verzug durch Wärmewirkung. Weinheim: Wiley-VCH 1999, S. 202 - 231

Rother 1997

Rother, K.: Software zur Simulation schweißtechnischer Anwendungen. In: Fortschritte bei der Konstruktion und Berechnung geschweißter Bauteile. Düsseldorf: DVS-Verlag 1997, S. 178 - 181 (DVS-Berichte 1987)

Ruffles 2000

Ruffles, P. C.: Improving the new product introduction process in manufacturing companies. Int. J. Manufacturing Technology and Management 1 (2000) 1, S. 1-19

Seyffarth und Hoffmann 1999

Seyffarth, P. und Hoffmann, J.: Umwandlungsverhalten un- und niedriglegierter Stähle unter besonderer Berücksichtigung der für das Laserstrahlschweißen typischen Zeit-Temperatur-Zyklen. In: Qualifizierung von Laserverfahren: Abschlusspräsentation des gleichnamigen Projektverbandes im Rahmen von Laser 2000 am 14. und 15.09.1999 in Weimar. Düsseldorf: DVS-Verlag 1999, S. 9-15 (DVS-Berichte 205)

Shaw 1999

Shaw, A. L.: Virtual Product Development in Aerospace Industry. In: VDI-Gesellschaft Fahrzeug- und Verkehrstechnik (Hrsg.): Virtuelle Produktentstehung in der Fahrzeugtechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag 1999, S.37-49 (VDI-Bericht 1489)

SME 1982

The Society of Manufacturing Engineers (SME) (Hrsg.): Jigs and Fixtures. Dearborn/MI: The Society of Manufacturing Engineers 1982

Spur 1999

Das digitale Produktmodell als virtueller Prototyp. ZWF 94 (1999) 7-8, S. 370-375

Spur 2000

Spur, G.: Einführungsvortrag WGP-Workshop Virtuelle Produktionstechnik - e-Manufacturing. Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb, Berlin, 18.10.2000

Stöcker 1994

Stöcker, H.: Taschenbuch der Physik, 2. Auflage. Thun: Harry Deutsch 1994

Storath u. a. 1998

Storath, E.; Hagemann, F.-M.; Schmädeke, W.; Weißberger, G.: Das virtuelle Produkt im Prozessnetz - mehr als nur die Anwendung von Systemen entlang der Prozessketten. In: VDI-Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (VDI-EKV) (Hrsg.): Prozessketten für die virtuelle Produktentwicklung in verteilter Umgebung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1998 (VDI-Berichte 1435)

Sudnik u. a. 1996

Sudnik, W.; Radaj, D.; Erofeew, W.: Computerized Simulation of Laser Beam Welding, Modelling and Verification. J. Phys. D: Appl. Phys. 29 (1996) 2811 – 2817.

Sudnik u. a. 1998

Sudnik, W.; Radaj, D.; Erofeew, W.: Validation of Computerised Simulation of Welding Processes. In: Cerjak, H. (Hrsg.): Mathematical modelling of weld phenomena 4. London: The Institute of Materials 1998, S. 477 – 492

Sudnik u. a. 2000

Sudnik, W.; Radaj, D.; Breitschwerdt, S.; Erofeew, W.: Numerical Simulation of Weld Pool Geometry in Laser Beam Welding. J. Phys. D: Appl. Phys. 33 (2000) 662 – 671.

Tekkaya 1998

Tekkaya, E.: State of the Art of Simulation of Sheet Metal Forming. In: Kals, H.J.J. (Hrsg.): Proc. Of the 6th intern. Conference on Sheet Metal (SheMet98). Enschede: Twente University Printers 1998, S. 53-66

The British Iron and Steel Research Association 1953

The British Iron and Steel Research Association (Hrsg.): Physical constants of some commercial steels at elevated temperatures. London: Butterworths 1953

Thomke 2001

Thomke, S.: Enlightened Experimentation - The New Imperative for Innovation. Harvard Business Review (2001) 2, S. 66-75

Tönshoff u. a. 2000

Tönshoff, H. K.; Schmidt, C.; Seidemann, H.: Cooperative Product Engineering (CPE) – A New Approach to Simultaneous Engineering. In: Teti, R. (Hrsg.): Proc. 2nd CIRP International Seminar on Intelligence Computation in Manufacturing (ICME 2000), 21. – 23.06.2000, Capri, Italien, S. 63 – 68.

Touloukian 1967

Touloukian, Y. S.: Thermophysical Properties of High Temperature Solid Materials. New York: Macmillan 1967

Trossin 1999

Trossin, H. J.: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik. München: Utz 1999 (Forschungsberichte iwv 126)

Ueda und Yuan 1991

Ueda, Y.; Yuan, M.G.: The Characteristics of the Source of Welding Residual Stresses (Inherent Strain) and its Application to Measurement and Prediction. In: Karlsson, E. (Hrsg.): Mechanical Effects of Welding. Berlin: Springer 1991, S. 105-121

VDI 1978

VDI (Hrsg.): Elektronische Datenverarbeitung bei der Produktionsplanung und -steuerung VI.: Begriffszusammenhänge, Begriffsdefinitionen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1978

VDI 2221 1993

VDI Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993

VDI 3633 1993

VDI (Hrsg.): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993

VDI ADB 1990

VDI Gesellschaft Produktionstechnik (ADB) (Hrsg.): Materialbearbeitung mit dem Laserstrahl im Geräte und Maschinenbau. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990

VDI ADB 1992

VDI Gesellschaft Produktionstechnik (ADB) (Hrsg.): Vorrichtungen. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992

VDI CIM 1990

VDI Gemeinschaftsausschuss CIM; VDI Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (VDI-EKV) (Hrsg.): Rechnerintegrierte Konstruktion und Produktion. Band 1: CIM Management. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990

VDI EKV 1983

VDI Gesellschaft Entwicklung Konstruktion Vertrieb (VDI-EKV) (Hrsg.): Systematische Produktplanung. Düsseldorf: VDI-Verlag 1983

VDI nachrichten 2000

Vollrath, K.: Dienstleister bringen Laser in Hochform. VDI Nachrichten 54 (2000) 41, S. 19

Vollertsen 1996

Vollertsen, F.: Laserstrahlumformen, lasergestützte Formgebung: Verfahren, Mechanismen, Modellierung. Bamberg: Meisenbach 1996

Voss u. a. 1998

Voss, O.; Decker, I.; Wohlfahrt, H.: Consideration of microstructural transformations in the calculation of residual stresses and distortions of larger weldments. In: Cerjak, H. (Hrsg.): Mathematical Modelling of Weld Phenomena 4. Cambridge: The Institute of Materials 1998

Warnecke und Westkämper 1998

Warnecke, H.-J. und Westkämper, E.: Einführung in die Fertigungstechnik. Stuttgart: Teubner 1998

Westkämper 2000

Westkämper, E.: Kontinuierliche und partizipative Fabrikplanung. wt Werkstatttechnik 90 (2000) 3, S. 92- 95

Wiesmüller 2000

Wiesmüller, J.: Von der Idee zur Serie - Virtuelle Produkte und Virtuelle Produktion. Reinhart, G. (Hrsg.): Virtuelle Produktion. München: Utz 2000, S. 2-1 - 2-21 (iwb Seminarbericht 54)

Yuan und Ueda 1993

Yuan, M.G.; Ueda, Y.: Prediction of Residual Stresses in Welded T- and I-Joints Using Inherent Strains. Jour. Eng. Materials and Technology 118 (1996) 4, S. 229-235

Zamazal und Meinschmidt 1999

Zamazal, K.; Meinschmidt, J.: Werkzeuge zur FEM-Analyse. In: Reinhart, G.; Milberg, J. (Hrsg.): Virtuelle Produktion Prozeß- und Produktsimulation. München: Utz Wissenschaft 1999, S. 17 - 33. (iwb-Seminarberichte 47).

iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*
Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reikhofer, N.*
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Groha, A.*
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*
Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wirba, P.*
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelschäuser, P.*
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*
Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*
Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung · ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabkastens für robotergeführte Klebprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*
Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schrüfer, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wisbacher, J.*
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandesregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helml, H.J.*
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayr, R.*
Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringeinrichtungen
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware
1993 · 80 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*
Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*
Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummetsteiner, G.*
3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*
Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionssystemen
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
Rechnergestütztes Projektinformations- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*
Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*
Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
Das integrierte Betriebsmittelwesen - Baustein einer flexiblen Fertigung
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Raith, P.*
Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*
Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifbearbeitung
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58663-2
- 81 *Romanow, P.*
Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflußsteuerungen
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*
Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in Montageanlagen
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutsche, U.*
Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen · Gestellstrukturen
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*
Autonome Fertigungszellen · Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*
Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischelsrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krönert, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung · ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindnermaier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehrer, J.*
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Plöb, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, utz@utzverlag.com

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**
86 Seiten · ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-07-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**
130 Seiten · ISBN 3-931327-08-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten · ISBN 3-931327-09-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 15 **Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen**
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1
- 47 **Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation**
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 **Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen**
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 **Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung**
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6

- 50 **Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion**
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 **Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle**
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien**
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 **Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung**
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 **Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation**
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 **e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele**
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 **Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug**
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 **Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen**
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 **Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien**
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 **Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik**
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3

Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, utz@utzverlag.com

- 122 Schneider, Burghard
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößner, Helmut E.
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris
Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf
Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.
Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto
Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael
Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.
Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut
Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can
Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan
Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
 2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.
Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
 2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra
Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
 2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander
Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
 2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.
Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
 2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprenzell, Andreas
Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
 2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas
Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
 2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
 2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0 · lieferbar ab ca. 02/01
- 144 Schneider, Christian
Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
 2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian
Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
 2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich
Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
 2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof
Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
 2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank
Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
 2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael
Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
 2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn
Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
 2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert
Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
 2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
 lieferbar ab ca. 09/01
- 152 Stephan Dürrschmidt
Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
 2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6

- 153 Bernhard Eich
Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7
- 154 Wolfgang Rudorfer
Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier
Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner
Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz
Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner
Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller
Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3