





# ***Forschungsberichte***



***Band 192***

*Florian Auer*

## ***Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen***

---

*herausgegeben von*  
*Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh*  
*Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart*

---

*Herbert Utz Verlag*



## **Forschungsberichte iwb**

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

herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh  
Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart  
Technische Universität München  
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

### **Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte  
bibliografische Daten sind im Internet über  
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2004

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 2005

ISBN 3-8316-0485-1

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München  
Tel.: 089/277791-00 – [www.utzverlag.de](http://www.utzverlag.de)

## **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 jedoch 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 Forschungsbereichen 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*

*Michael Zäh*



## **Vorwort**

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

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann, dem Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich.

München, im Dezember 2004

*Florian Auer*



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>i</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation .....	1
1.2 Zielsetzung .....	3
1.3 Vorgehensweise .....	4
<b>2 Grundlagen des Laserstrahlschweißens und der Blechumformung .....</b>	<b>7</b>
2.1 Physikalische Vorgänge beim Laserstrahlschweißen .....	7
2.1.1 Thermomechanische Wechselwirkungen .....	11
2.1.1.1 Schweißeigenspannungen .....	11
2.1.1.2 Schweißformänderungen .....	14
2.1.2 Einstellparameter und Zielgrößen beim Laserstrahlschweißen .....	16
2.2 Prinzip und physikalische Vorgänge des Umformens .....	17
2.2.1 Umformverfahren .....	18
2.2.1.1 Tiefziehen .....	19
2.2.1.2 Innenhochdruckumformen .....	20
2.2.2 Verfahrensgrenzen .....	22
2.2.3 Einstellparameter und Zielgrößen beim Umformen .....	23
<b>3 Stand der Technik .....</b>	<b>25</b>
3.1 Virtuelle Produktion .....	25
3.2 Simulation von Fertigungsverfahren .....	28
3.2.1 Methode der Finiten Elemente .....	29

3.2.2	Simulation des Laserstrahlschweißens .....	35
3.2.3	Modellbildung des Temperaturfeldes .....	41
3.2.4	Simulation von Umformprozessen.....	43
3.2.5	Durchgängige Simulation von Prozessketten mit Hilfe der FEM.....	46
3.3	Zusammenfassung und Ableitung des Handlungsbedarfs.....	48
<b>4</b>	<b>Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen .....</b>	<b>51</b>
4.1	Analyse der Fertigungsaufgabe .....	52
4.2	Ergebnisse aus der Umformsimulation .....	55
4.3	Erstellung des Finite-Elemente-Netzes.....	58
4.4	Modellierung der dynamischen Wärmequelle .....	65
4.4.1	Alternative Modellierung der Wärmequelle.....	71
4.4.2	Datenbanksystem LASdat.....	73
4.5	Kombination der Fertigungsprozesse .....	75
4.5.1	Modellvorstellung zur Übertragung von dauerhaften Spannungen und Dehnungen .....	75
4.5.2	Ambivalenz der Dimensionen.....	79
4.5.3	Lokale Netzverfeinerung .....	83
4.6	Thermische Berechnung .....	86
4.7	Thermomechanische Simulation.....	90
<b>5</b>	<b>Fehlerkriterien .....</b>	<b>92</b>
5.1	Ungenauigkeiten der Eingangsdaten.....	93

5.2 Ungenauigkeiten der Modellierung.....	95
<b>6 Verifikation und Anwendung .....</b>	<b>101</b>
6.1 Verifikation der Temperaturverteilung durch Schweißversuche .....	102
6.2 Tiefziehnapf.....	112
6.3 IHU-Längsträger.....	119
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>125</b>
<b>8 Literatur .....</b>	<b>128</b>

## Formelzeichen

$A$	Übergangsfläche [ $\text{m}^2$ ]
$A_b$	Absorptionskoeffizient [ $\text{cm}^{-1}$ ]
$A_Q$	Fläche des Querschnitts, durch den Wärmeleitung stattfindet [ $\text{m}^2$ ]
$a = \ddot{v} = \ddot{u}$	Beschleunigung [ $\text{m/s}^2$ ]
$b(\Theta)$	Term zur Berücksichtigung der Keimbildung und des Kornwachstums (empirisch) [ $\text{s}^{-1}$ ]
$c$	spezifische Wärmekapazität [ $\text{J/kgK}$ ]
$C_o$	Stefan-Boltzmann Konstante ( $C_o = 5,67 \cdot 10^{-14} \text{ W/mm}^2\text{K}^4$ )
$c_u$	Umwandlungskonstante als Funktion der Temperatur [ $\text{K}^{-1}$ ]
$d$	Dämpfung [ $\text{Ns/m}$ ]
$d\varepsilon$	Gesamtsumme der inkrementellen Dehnung [ ]
$d\varepsilon_{el}$	inkrementelle elastische Dehnung [ ]
$d\varepsilon_{kr}$	inkrementelle Kriechdehnung [ ]
$d\varepsilon_{pl}$	inkrementelle plastische Dehnung [ ]
$d\varepsilon_{th}$	inkrementelle thermische Dehnung [ ]
$d\varepsilon_{um}$	inkrementelle Umwandlungsdehnung [ ]
$dy, dx, dz$	Kantenlänge des betrachteten Körpers
$E$	Elastizitätsmodul [ $\text{N/mm}^2$ ]
$\varepsilon_T$	Wärmedehnung [ ]
$F$	Kraft [N]
$I_o$	eingestrahlte Intensität [ $\text{W/mm}^2$ ]
$I_{abs}$	absorbierte Intensität [ $\text{W/mm}^2$ ]
$\underline{K}$	Steifigkeitsmatrix

$K_{ij}, K'_{ij}$	Umwandlungskonstanten der Transformation i – j [ ]
$k$	Steifigkeit [N/m]
$l_0$	Bezugslänge [m]
$m$	Masse [kg]
$M_s$	Martensitstarttemperatur [K]
$n(\Theta)$	empirischer Exponent [ ]
$P_0$	Leistung [W]
$\bar{P}$	Phasenanteil bei vollständiger Umwandlung (wird meist mit 1 angenommen) [ ]
$\bar{P}(\Theta)$	Phasenanteil im Gleichgewichtszustand [ ]
$P_i(\Theta)$	Phasenanteil der Phase $i$ [ ]
$Q$	Wärmemenge [J]
$\dot{Q}$	volumenbezogener Wärmestrom [W/m <sup>3</sup> ]
$q$	flächenbezogener Wärmestrom [W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{q}_k$	Wärmestrom durch Konvektion [W]
$\dot{q}_l$	Wärmestrom durch Wärmeleitung [W]
$\dot{q}_s$	Wärmestrom durch Strahlung [W]
$r_\theta, r_i$	Radius [mm]
$t$	Zeit [s]
$T$	Temperatur [K]
$\dot{T}$	Temperaturgradient [ ]
$T_0$	Umgebungstemperatur [K]
$TR(\Theta)$	Verzögerungszeit [s]
$\Delta T$	Temperaturdifferenz [K]
$\nabla T = [T_x, T_y, T_z]^T$	Temperaturgradienten im Werkstück

## Verzeichnis der Abkürzungen

---

$u$	Verschiebung [m]
$x, y, z$	kartesische Koordinaten
$z_e, z_i$	Höhe [mm]
$\alpha_k$	Wärmeübergangskoeffizient [W/m <sup>2</sup> K]
$\alpha(\lambda)$	wellenlängenabhängiger Absorptionskoeffizient [cm <sup>-1</sup> ]
$\alpha_T$	differentieller thermischer Ausdehnungskoeffizient [K <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon$	Vektor der Dehnungen
$\varepsilon(T)$	Emissionsgrad des Körpers [ ]
$\lambda$	Wellenlänge [μm]
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]
$v = \dot{u}$	Geschwindigkeit [m/s]
$\vec{v} = [v_x, v_y, v_z]^T$	Geschwindigkeitsvektor der Wärmequelle
$\Theta$	Temperatur [K]
$\rho$	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_{VM}$	Vergleichsspannung (von Mises)
$\sigma_T$	resultierende Spannung [N/mm <sup>2</sup> ]
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	Normalspannungen
$\sigma$	Vektor der Spannungen
$\tau(\Theta, p)$	Zeit für die Ausscheidung eines Gefügeanteils $p$ bei einer bestimmten Temperatur [s]
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	Schubspannungen
$\nu$	Poissonzahl [ ]
$\varphi$	Auftreffwinkel [°]
$\nabla f = \left( \frac{\partial}{\partial x_1} f, \dots, \frac{\partial}{\partial x_n} f \right)$	Nabla-Operator für $f: R^n \rightarrow R$ .

## Verzeichnis der Abkürzungen

AIT	Advanced Information Technology in Design and Manufacture
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
Ar	Argon
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid
CORBA	Common Object Request Broker Architecture
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMU	Digital Mock-up
EN	Europäische Norm
FEM	Finite Elemente-Methode
FE-Modell	Finite Elemente-Modell
FE-Netz	Finite Elemente-Netz
FE-Program	Finite Elemente-Programm
FE-Solver	Finite Elemente-Solver
FE-System	Finite Elemente-System
HLDL	Hochleistungsdiodenlaser
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
IHU	Innen-Hochdruck-Umformen
IP	Integrationspunkt
ISO	International Organisation for Standardisation
iViP	integrierte Virtuelle Produktentstehung

## Verzeichnis der Abkürzungen

---

Nd:YAG	Yttrium-Aluminium-Grant Kristall mit Neodym dotiert
PMU	Physical Mock-up
RIP	Rechnerintegrierte Produktion
SPH	Schweißprobenhalter
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
STL	Standard Template Library
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WEZ	Wärmeeinflusszone
XPS	extrudierter Polystrol-Hartschaum
ZTA-Diagramm	Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Diagramm
ZTU-Diagramm	Zeit-Temperatur-Umwandlungs-Diagramm

## 1 Einleitung

### 1.1 Ausgangssituation

„Die Sicherung und Mehrung der Arbeitsplätze und des Wohlstandes der Menschen in der Bundesrepublik Deutschland hängt ganz entscheidend vom Wachstum unserer Volkswirtschaft ab. Ohne Wachstum führt der ständige Produktivitätsfortschritt dazu, dass die gleiche Menge an Gütern und Dienstleistungen mit immer weniger Arbeitskräften erstellt werden kann. Nur nachhaltiges Wachstum durch Innovation führt zu einer Vergrößerung des gesamten Marktvolumens (*Milberg 2003*)“. Aussagen wie diese beschreiben die aktuelle volkswirtschaftliche Situation bzw. Stimmung und unterlegen die allgegenwärtigen Forderungen nach Innovationen und Wachstum. Innovationen können dabei nach *Schumpeter (1997)* in fünf Bereiche unterteilt werden:

- Produktinnovation
- Prozessinnovation
- Zugang zu neuen Märkten
- Entdeckung von neuen Rohstoffen und neuen Technologien
- Einführung neuer Organisationsstrukturen

Nach *Spur (2003)* ist es unbestritten, dass insbesondere technische Innovationen, also Produkt- und Prozessinnovationen, den Kern des Fortschritts bilden.

Der Wettbewerb um Innovationen und insbesondere um technische Innovationen ist nach *Milberg (2003)* auch immer ein Zeitwettbewerb. Für ein erfolgreiches Unternehmen ist es nicht ausreichend innovativ zu sein, sondern vor allem auch schnell. Es müssen sowohl Produkt- als auch Prozessinnovationen auf schnellstem Wege umgesetzt werden und dem Markt zugänglich sein. Dabei stehen weder Zeit noch finanzielle Mittel zur Verfügung, langwierig in physischen Testreihen die Tauglichkeit und Zuverlässigkeit der gewählten Produkttechnologie und des dazugehörigen Fertigungsmittels zu erproben (*Bley 2003*).

Hieraus ergibt sich die Forderung diese Testreihen in einer anderen effizienteren Form zu realisieren als durch die Erstellung und Erprobung zahlreicher physischer Prototypen. Daher haben sich die Forschung wie auch die Unternehmen in den zurückliegenden Jahren intensiv mit der Verbesserung der Modellierung von Produkten, Produktionsabläufen und vor allem technologischen Prozessen auseinandergesetzt.

Digitale Werkzeuge leisten hier einen wichtigen Beitrag. Die Nutzung digitaler Prototypen zur Eigenschaftsfrüherkennung trägt dabei wesentlich zur Beherrschung der Planungsprozesse bei (*Gausemeier 2000*). Während die Produktentwicklung in hohem Maße von Software-Werkzeugen unterstützt wird, ist die Produktions- und Prozessplanung noch vergleichsweise wenig digitalisiert (*Zäh u. Wagner 2002*).

Dies führt häufig dazu, dass in den Unternehmen vorhandenes Innovationspotenzial nicht ausgeschöpft wird. Als Beispiel hierfür seien typische Automobilkomponenten aus dem Karosseriebau genannt. Diese werden in der Regel umgeformt und anschließend gefügt. Neben etablierten Verfahren wie dem Tiefziehen und dem Punktschweißen finden auch innovative Fertigungstechnologien, wie z.B. das wirkmedienbasierte Umformen oder das Laserstrahlschweißen, zunehmend Verwendung. Die Entwicklung und Erstellung von immer komplexeren Werkzeugen zur Blechumformung gestaltet sich jedoch sehr zeit- und kostenintensiv. Um unnötige Iterationsschleifen einzusparen, ist der konventionelle Werkzeugbau bestrebt, Prozesse bezüglich ihrer Fertigungssicherheit zu optimieren, auch wenn dies zu Lasten einer optimierten Bauweise, beispielsweise hinsichtlich Gewicht, gehen sollte. Bei der Planung des Laserstrahlschweißens besteht eine ähnliche Problematik, d.h. auch in diesem Bereich wird das Innovationspotenzial wissentlich nicht ausgeschöpft, da man zur Umsetzung der vorhandenen Möglichkeiten in einem hohen Maß auf zeit- und kostenintensive experimentelle Untersuchungen angewiesen ist.

In der konventionellen Entwicklungskette kann erst nach dem Fertigen eines Werkzeugs überprüft werden, ob die gewählte Methode geeignet ist, um das gewünschte Bauteil in der geforderten Qualität zu produzieren. Probleme während des Fügeprozesses werden erst im Anschluss an den Umformprozess erkannt. Insbesondere beim Einsatz neuartiger Werkstoffe und Verfahren versagt die konventionelle Vorgehensweise. Hier ist ein Hauptargument für den

schnellen Einzug der Computer Aided Engineering (CAE) Techniken in den Entwicklungsprozess zu sehen.

In der Umformtechnik hat sich inzwischen die Finite Elemente-Simulation zur detaillierten Untersuchung des Fertigungsprozesses in der Phase der Methodenplanung und -konstruktion etabliert. Derzeit ermöglichen diese Systeme den „virtuellen Try-Out“ einer Ziehanlage. Für das Laserstrahlschweißen stehen grundlegende Prozessmodelle zur Verfügung, die zum Teil bereits in kommerziellen Simulationswerkzeugen umgesetzt wurden. Erste Ansätze zur Nutzung der Prozesssimulation für die Konstruktion und Prozessplanung wurden erarbeitet. Eine Verknüpfung der vorhandenen Werkzeuge zur durchgängigen Simulation der Prozesskette Umformen – Laserstrahlschweißen sind derzeit nicht realisiert.

## 1.2 Zielsetzung

Innovative Umformverfahren ermöglichen eine funktional optimale Bauteilgestaltung bei geringem Gewicht. Für Fügeaufgaben von Strukturen aus Umformbauteilen oder Profilen ist das Laserstrahlschweißen ein ideales Werkzeug, da auch bei nur einseitiger Zugänglichkeit und ohne Flansch mit dem Laser gefügt werden kann.

In der Praxis treten immer wieder Probleme durch die Wärmeeinbringung beim Schweißen auf. Beobachtet wird ein Aufsprungverhalten während des Schweißprozesses, das aus dem Freiwerden der im umformenden Fertigungsprozess in das Bauteil eingebrachten Spannungen resultiert. Dieser Effekt ist bedingt durch den hohen Umformgrad bei innenhochdruckumgeformten Bauteilen besonders ausgeprägt.

Durch eine Optimierung der Prozesskette Umformen – Laserstrahlschweißen können die Potenziale dieser Fertigungstechnologien weiter erschlossen werden. Voraussetzung dafür ist ein tiefgehendes Verständnis der Wechselwirkungen zwischen Werkstoff, Struktur und Prozessfolge. Simulationen von Fertigungsprozessen können dazu beitragen, dieses Verständnis der Wechselwirkungen zu verbessern. Darauf aufbauend kann die Simulation in der Fertigungsplanung dazu eingesetzt werden, die Prozessfolge gezielt zu beeinflussen und das Produkt zu optimieren.

Eine durchgehende Betrachtung der Prozesskette – wie sie durch den Einsatz einer verknüpften Prozesssimulation erreicht werden kann – findet heute nicht statt. Derzeit stehen nur Prozesssimulationen für einzelne Teilschritte zur Verfügung. Dies verhindert eine Optimierung des Fertigungsprozesses hinsichtlich einer leichtbaugerechten Gestaltung, da Vorgängeroperationen nicht berücksichtigt werden. Die Integration der Simulation aller Prozessschritte in ein durchgängiges Modell führt neben einer verbesserten Abbildung der Realität auch zur Nutzung des vorhandenen Innovationspotenzials.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine durchgängige, rechnergestützte Methode zur Ermittlung mechanisch technologischer Eigenschaften von Bauteilen aus der Prozesskette umformende Fertigung (Tiefziehen und IHU) Laserstrahlschweißen auf Basis der Finiten Elemente-Methode (FEM) zu entwickeln.

### 1.3 Vorgehensweise

Die Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Ausgehend von wesentlichen Grundbegriffen und Definitionen zum Umform- und Laserstrahlschweißprozess in Kapitel 2 wird in Kapitel 3 die Virtuelle Produktion, die Digitale Fabrik und der Stand der Technik bei der Modellierung von Fertigungsverfahren beleuchtet. Dabei werden die unterschiedlichen Ansätze zur Simulation von Umformprozessen und des Laserstrahlschweißens diskutiert und vorhandene Mängel aufgezeigt. Aus den in Kapitel 3.5 formulierten Randbedingungen und Defiziten bei der Modellierung von Laserstrahlschweißprozessen werden die Anforderungen an eine Modellierung unter Berücksichtigung vorangegangener Umformprozesse als Initialzustand abgeleitet.

In Kapitel 4 wird die erarbeitete Methode mit den wesentlichen Bausteinen vorgestellt und eingehend beschrieben.

Die Analysephase der Fertigungsaufgabe wird in Abschnitt 4.1 veranschaulicht. Dabei wird die Zerlegung der komplexen Fertigungsaufgabe in einzelne Teilbereiche vorgestellt. Dies dient der Veranschaulichung und schafft über interdisziplinäre Teams und unterschiedliche Zuständigkeitsbereiche hinweg ein Verständnis für die Fertigungsaufgabe. Insbesondere der verwendete Werkstoff und die entsprechenden Werkstoffdaten stehen hier im Fokus des Interesses.

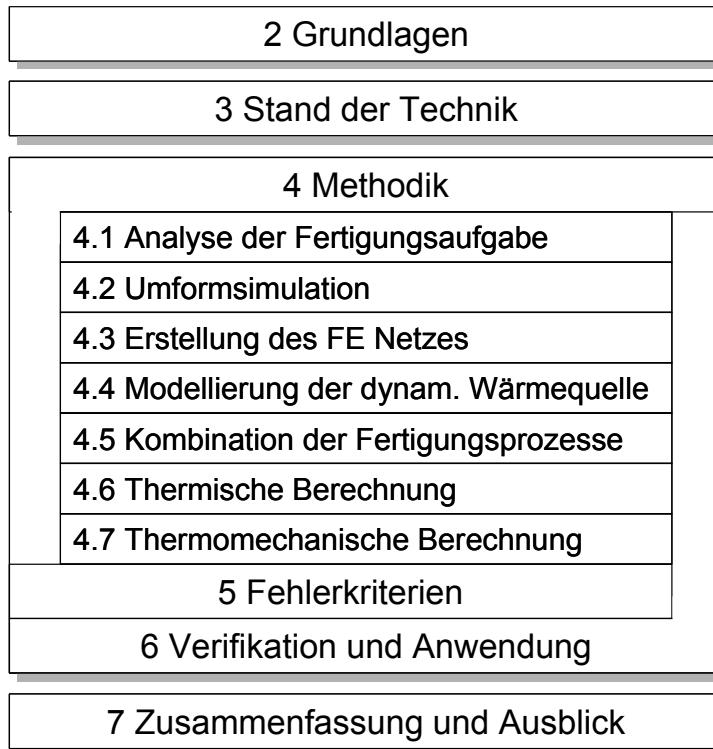


Abbildung 1.1: Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit

In Abschnitt 4.2 wird die Umformsimulation vereinfacht zusammengefasst, soweit sie für die folgende Simulation des Laserstrahlschweißens von Bedeutung ist. Als Resultat erhält der Anwender die wesentlichen Berechnungsergebnisse der Umformaufgabe.

In Kapitel 4.3 wird die nötige Diskretisierung der Bauteile intensiv diskutiert und unterschiedliche Strategien zur Vernetzung werden erläutert. Die Extrusion der Schalenelemente aus der Umformsimulation zu Hexaedervolumenelementen wird dargestellt.

In Kapitel 4.4 werden die Modellierung der Wärmequelle mit Hilfe eines mathematischen Ersatzmodells beschrieben und beispielhafte Ergebnisse dieser Vorgehensweise präsentiert. Ferner werden alternative Modellierungsmöglichkeiten aufgezeigt und die Bewegung der Wärmequelle durch das

Bauteil erläutert. Zur Vereinfachung der Modellierung wurde eine erfahrungsgebasierte Datenbank entwickelt, die an dieser Stelle vorgestellt wird.

In Abschnitt 4.5 wird der Schwerpunkt der Methode, die Kombination der Fertigungsprozesse Umformen - Laserstrahlschweißen in der Simulation, dargelegt. Ziel ist es dabei, die berechneten Ergebnisse aus der Umformsimulation als Initialzustand für die Simulation des Laserstrahlschweißens zu verwenden. Dazu werden einige grundsätzliche Modellvorstellungen diskutiert und die Herausforderung durch die Ambivalenz der Dimensionen zwischen der Umform- und der Schweißsimulation erörtert. Die Übertragung der Attribute wird dargelegt und nötige Modifikationen am Finite Elemente-Netz demonstriert.

Die thermische Berechnung, d.h. das eigentliche Laserstrahlschweißen, ist in Kapitel 4.6 detailliert dargelegt. Dazu werden die zu lösenden Gleichungssysteme und die entsprechenden Randbedingungen vorgestellt und verschiedene Lösungsalgorithmen diskutiert.

Den Abschluss der Methode bildet die thermomechanische Berechnung in Abschnitt 4.7. Hier wird die Berechnung des resultierenden Bauteilverzugs auf Basis der zuvor ermittelten Temperaturverteilung und der mechanischen Randbedingungen vorgenommen.

In Kapitel 5 werden sowohl mögliche Fehlerkriterien der entwickelten Methode als auch Ungenauigkeiten der Methode der Finiten Elemente diskutiert.

In Kapitel 6 werden die zuvor beschriebenen Simulationsmodelle an konkreten Anwendungsbeispielen illustriert und mit Ergebnissen physikalischer Experimente verglichen. Dabei werden einerseits die Vorgehensweise zur Modellierung der Wärmequelle mit Hilfe eines mathematischen Ersatzmodells, andererseits die Verbesserung der Simulationsergebnisse durch die Berücksichtigung vorangegangener Belastungen untersucht.

Abschnitt 7 fasst die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit abschließend zusammen und gibt einen Ausblick auf weiterführende Forschungsmöglichkeiten, die auf der entwickelten Methode aufbauen.

## 2 Grundlagen des Laserstrahlschweißens und der Blechumformung

### 2.1 Physikalische Vorgänge beim Laserstrahlschweißen

Das Schweißen von metallischen Werkstoffen mit Hochleistungslasern ist ein hochkomplexer physikalisch-chemischer Prozess, der in verschiedene Gebiete der Natur- und Ingenieurwissenschaften hineinreicht. Einige der dabei auftretenden Teilprozesse sind nach wie vor nicht völlig verstanden und Gegenstand intensiver Forschung, sowohl auf theoretischer als auch auf experimenteller Ebene.

Das Laserstrahlschweißen zählt, ausgehend vom physikalischen Prinzip nach (DIN 8593) „Fügen durch Schweißen“, zur Untergruppe 4.6.2.5 „Schmelzverbindungs-Schweißen durch Strahl“ (DIN 8593-6).

Eine Strahlquelle erzeugt dabei einen Laserstrahl, der über ein Strahlführungssystem und eine Fokussieroptik auf dem Bauteil positioniert wird. Der Fokus oder Brennfleck hat typischerweise einen Durchmesser von 0,3 – 0,6 mm. Abhängig von den Prozess-, Werkstoff- und Strahlparametern und den zahlreichen Randbedingungen (z. B. dem Prozessgas), treten dabei auf dem Bauteil unterschiedliche Strahl-Stoff-Wechselwirkungen auf (Ujihara 1972). Der Laserstrahl wird beim Auftreffen auf das Bauteil zum größten Teil reflektiert, nur ein geringer Teil der Energie wird absorbiert (siehe z.B. Dausinger 1995). Die absorbierte Energie der Strahlung wird an der Oberfläche des Materials in Wärme umgewandelt (Hügel 1992) und über Wärmeleitung in das Bauteil transportiert (Beyer 1995). Bei ausreichend hoher Intensität (ca.  $10^3$  –  $10^5$  W/mm<sup>2</sup> bei Stahlwerkstoffen) wird der Werkstoff lokal stark aufgeheizt und im Bereich der Fügezone aufgeschmolzen (Dilthey 2000). Dieses sog. Wärmeleitungsschweißen zeichnet sich durch ein geringes Aspektverhältnis, d.h. durch eine geringe Einschweißtiefe im Verhältnis zur Breite aus. Der Wirkungsgrad der Energieeinkopplung liegt bei etwa 15% (Otto 1997).

Überschreitet die Intensität eine werkstoffabhängige Schwellenintensität (z.B. Stahlwerkstoffe  $I_{\text{Laser}} > 10^6$  W/mm<sup>2</sup>), wird der Werkstoff lokal bis zur Verdampfung erwärmt. Der Druck des verdampfenden Metalls erzeugt einen

Dampfkanal oder Dampfkapillare, englisch „keyhole“ genannt (Beyer 1995, Prokhorov 1973). Das entstehende Gleichgewicht zwischen Dampfdruck einerseits, der Oberflächenspannung und dem hydrostatischen Druck andererseits hält die Dampfkapillare geöffnet und ermöglicht es dem Laserstrahl tief in das Werkstück einzudringen (siehe Abbildung 2.1). Der Durchmesser des Dampfkanals entspricht dabei in etwa dem Durchmesser des Laserstrahls von ca. 0,1 – 1,0 mm (Hügel 1992). Je nach Wellenlänge und Intensität der Strahlung wird der abströmende Metalldampf an der Oberfläche des Bauteils ionisiert. Dabei entsteht laserinduziertes Plasma über der Kapillare. Durch dieses Phänomen steigt der Absorptionskoeffizient bzw. der Prozesswirkungsgrad und damit die Einschweißtiefe sprunghaft an (Bimberg 1991).

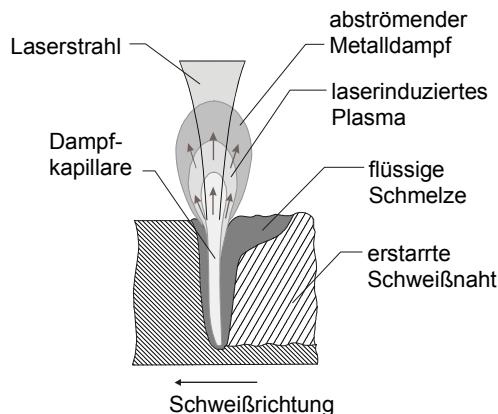


Abbildung 2.1: Prinzip des Laserstrahltiefschweißens

Dies lässt sich durch die Absorptionsmechanismen Fresnelabsorption an der Kapillaroberfläche und Plasmaabsorption nach dem Prinzip der inversen Bremsstrahlung erklären (siehe Abbildung 2.2, u.a. nach Beck 1996a, Beck 1996b, Beyer 1995, Kaplan 1994).

Bei der Fresnelabsorption trifft der Strahl unter schrägem Einfall auf die Phasengrenze zwischen Schmelzbad und Dampf und wird dort teilweise absorbiert. Dabei werden die quasifreien Elektronen der äußeren Grenzschicht der Materie durch das elektrische Feld des einfallenden Lichtes beschleunigt.

Anschließend geben sie diese Energie über Stöße an ihre Umgebung ab, d.h. elektromagnetische Energie wird in Wärmeenergie umgewandelt.

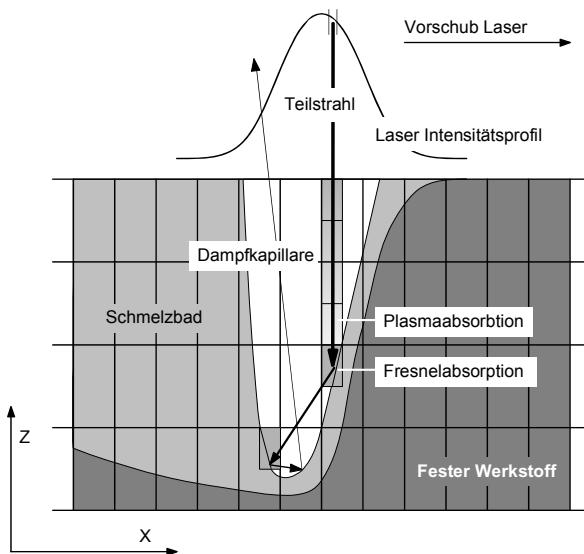


Abbildung 2.2: Prinzipien der Energiedissipation beim Tiefschweißen

Die absorbierte Leistung ergibt sich in Abhängigkeit von der Wellenlänge, dem Auftreffwinkel und der Temperatur aus der Formel:

$$I_{abs} = A_b(\varphi, \lambda_l, T) \cdot I_0$$

Gleichung 2.1

Neben der Absorption tritt eine teilweise Reflexion auf, die bewirkt, dass der reflektierte Teilstrahl an einer anderen Stelle der Dampfkapillare erneut Energie an das Material abgeben kann. Abhängig von der Form des Dampfkanals, können sich mehrere solcher Reflexionen ereignen, wodurch ein Großteil der Energie auf das Schmelzbad übertragen wird.

Der zweite bedeutende Mechanismus der Energiedissipation ist die Strahlungsabsorption im laserinduzierten Plasma. Die Absorption basiert dabei auf der Dissipation der Energie des Laserstrahls über Elektronen-Ionen-Stöße. Dabei geben die durch das elektrische Wechselfeld beschleunigten Elektronen Energie an das Plasma ab. Da dieser Prozess die Umkehrung der

Bremsstrahlemission eines Plasmas darstellt, wird dieser Vorgang auch als inverse Bremsstrahlung bezeichnet. Die absorbierte Leistung ergibt sich mit dem wellenlängenabhängigen Absorptionskoeffizienten  $\alpha(\lambda)$  über den Zusammenhang:

$$I_{abs} = I_0 \cdot e^{-\alpha(\lambda_l)}$$

Gleichung 2.2

Die Absorptionskoeffizienten der wichtigsten metallischen Werkstoffe können der Arbeit von *Dausinger (1995)* entnommen werden.

Ein weiteres in der Schweißtechnik sehr oft verwendetes Maß für den Energieeintrag in das Werkstück ist die Streckenenergie S [J/m] als Quotient der Laserstrahlleistung P [W] und der Vorschubgeschwindigkeit v [m/s]. Durch die Vorschubgeschwindigkeit wird die feine Röhre der Dampfkapillare durch das Bauteil bewegt und dadurch von der Schmelze umströmt. Auf Grund dieser Bewegung der Wärmequelle sind die resultierenden Isothermen nicht mehr symmetrisch. Die Form des Schmelzbades wird zu einer Tropfenform verzerrt.

Die konzentrierte Energieeinbringung in der Fügestelle beim Schweißen zwingt den angrenzenden Grundwerkstoff, der als Wärmeeinflusszone (WEZ) bezeichnet wird, zu einer inhomogenen und zeitlich veränderlichen Temperaturverteilung (*Wohlfahrt 1977*). Die WEZ ist den schweißtypischen Temperaturzyklen, mit einem sehr steilen Anstieg bis nahe der Schmelztemperatur und anschließendem flachem Abfall während der Auskühlphase, unterworfen. Damit werden in der Umgebung der Schmelzzone unterschiedliche Gefügezustände mit unterschiedlichen resultierenden mechanischen Eigenschaften erreicht. Der Zusammenhang zwischen diesen metallurgischen Vorgängen und dem Zeit-Temperatur-Verlauf wird mit sog. Umwandlungsschaubildern für die Austenitisierung (Zeit-Temperatur-Austenitisierungs-Diagramme, ZTA-Diagramme) und für die anschließende Phasenumwandlung während der Abkühlung mit Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagrammen (ZTU-Diagrammen) dargestellt. Für die extrem kurzen Zyklen, wie sie beim Laserstrahlschweißen auftreten, sind spezielle ZTU-Diagramme Gegenstand aktueller Werkstoffuntersuchungen, da Diagramme für konventionelle Schweißverfahren nur bedingt herangezogen werden dürfen (*Seyffarth 1999*).

## 2.1.1 Thermomechanische Wechselwirkungen

Der Vorteil des Laserstrahlschweißens gegenüber herkömmlichen Schweißverfahren liegt im geringen und lokal stark begrenzten Wärmeeintrag in das Bauteil. Dennoch verursacht diese lokale Aufheizung durch ihren anisotropen Zeit-Temperaturverlauf thermodynamische Wechselwirkungen. Die Folge sind metallurgische Übergänge, Schweißeigenspannungen und daraus resultierende Formänderungen der Bauteile.

### 2.1.1.1 Schweißeigenspannungen

Nach *Macherauch u. Hauck (1983)* sind Eigenspannungen im allgemeinen Sinn Spannungen in einem abgeschlossenen System, auf das keine äußeren Kräfte und Momente wirken. Diese können sowohl durch thermische (z.B. Schweißen) als auch durch mechanische Belastung des Werkstoffs (z.B. Umformen) entstehen. Sie stehen mit sich selbst und der resultierenden Verschiebung im Gleichgewicht und können je nach Größe des betrachteten Bereichs in Spannungen erster, zweiter und dritter Art klassifiziert werden (*Issler u.a. 1995*):

#### Eigenspannungen erster Art:

Verteilung der Spannungen über ein makroskopisches Gebiet und eine Vielzahl von Korngrenzen.

#### Eigenspannungen zweiter Art:

Wirkungsbereich der Spannungen liegt innerhalb der Korngröße (ca. 0,01 mm bis 0,1 mm).

#### Eigenspannungen dritter Art:

Störungen im Gitteraufbau, der Wirkungsbereich liegt im atomaren Bereich.

Auf Grund ihrer makroskopischen Auswirkungen sind zur Bewertung technischer Anwendungen Eigenspannungen erster Art maßgeblich (*Dilthey 1995*). Deshalb wird im Folgenden der Begriff Eigenspannung als Synonym für Eigenspannungen erster Art verwendet.

Für die Entstehung von Schweißeigenspannungen sind die plastischen Formänderungen des Werkstoffs, im Wesentlichen die thermische Wärmeausdehnung und die umwandlungsbedingte Volumenänderung verantwortlich:

$$d\varepsilon = d\varepsilon_{el} + d\varepsilon_{pl} + d\varepsilon_{th} + d\varepsilon_{um} + d\varepsilon_{kr} \quad \text{Gleichung 2.3}$$

Die Umwandlungs- und Kriechdehnung können nach *Radaj* (1992) vernachlässigt werden, so dass die inkrementelle thermische Dehnung  $d\varepsilon_{th}$  als einzige nicht mechanisch verursachte Größe für die Dehnung verantwortlich ist.

Wärmespannungen entstehen, wenn die Wärmeausdehnung beispielsweise durch Einspannungen behindert wird oder die Temperaturänderung anisotrop erfolgt. Für kleine Temperaturänderungen  $\Delta T$  kann die Wärmedehnung  $\varepsilon_T$  durch folgende Beziehung beschrieben werden:

$$\varepsilon_T = \alpha_T \cdot \Delta T \quad \text{Gleichung 2.4}$$

Diese Wärmedehnung führt in einem rein elastischen Spannungs-Dehnungsfeld zu folgender thermischen Spannungsquelle  $\sigma_T$  (*Radaj* 1992):

$$\sigma_T = \frac{-\alpha_T \Delta T \cdot E}{1-2\nu} \quad \text{Gleichung 2.5}$$

Während des Schweißvorgangs wird der Nahtbereich im Vergleich zum Grundwerkstoff stark erwärmt und lokal aufgeschmolzen. Dadurch wird in der Schmelze die temperaturabhängige Fließgrenze stark herabgesetzt, so dass man ab einer werkstoffabhängigen Grenztemperatur in diesem Bereich von einem spannungsfreien Zustand ausgehen kann (*Radaj* 1992). Das lokale Temperaturmaximum liegt senkrecht zur Schweißnaht auf einer parabelförmigen Kurve (siehe Abbildung 2.3).

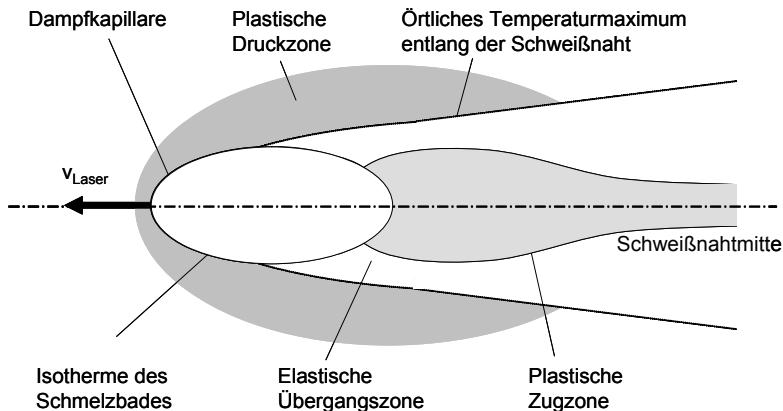


Abbildung 2.3: Spannungsfelder im quasistationären Temperaturfeld beim Schweißen nach Radaj (1992)

Der Bereich vor dieser Kurve dehnt sich unter dem Einfluss des hohen Temperaturgradienten in der Fügezone aus und führt zu einer Druckbelastung. Diese Dehnung wird durch den kälteren, nahtfernen Bereich behindert, so dass dort Wärmespannungen entstehen. Da die Fließspannung mit steigender Temperatur stark abnimmt, überschreiten die in diesen Bereichen auftretenden Wärmespannungen die Fließgrenze. Bei der Abkühlung des Systems werden die elastischen Anteile der Deformationen abgebaut und zurück bleibt eine plastische Verformung des Nahtbereichs gegenüber den Randbereichen. Dadurch entstehen in der Naht Zugspannungen, die durch Druckspannungen der äußeren Gebiete ausgeglichen werden. Die qualitative Spannungsverteilung, die sich aus diesem Prozess ohne Berücksichtigung der metallurgischen Einflüsse ergibt, ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Abbildung 2.4 a) zeigt dabei den Verlauf der Schrumpfegenspannungen für einen Stumpfstoß in Nahtlängsrichtung ( $\sigma_y$ ), Abbildung 2.4 b) den Verlauf quer zur Naht ( $\sigma_x$ ).

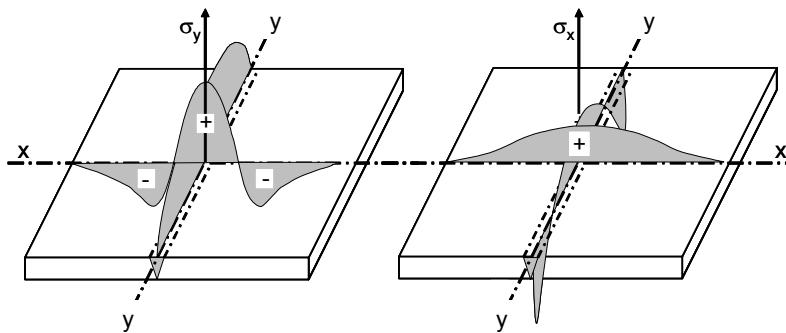


Abbildung 2.4: Qualitativer Verlauf a) der Längs- ( $\sigma_y$ ) und b) Quereigenspannungen ( $\sigma_x$ ) an einem Stumpfstoß (Dilthey 1995)

Treten bei der Abkühlung einer Schweißverbindung in den nahen Bereich Phasenumwandlungen des Metalls auf, die mit Volumenänderungen verbunden sind, führen diese zu zusätzlichen Eigenspannungen, die als Umwandlungseigenspannungen bezeichnet werden. Im Vergleich zu den Längsspannungen weisen im Dünnblechbereich (Dicke  $d < 25$  mm) die Spannungen in Dickenrichtung in der Regel geringe Werte auf (Masubuchi 1976).

### 2.1.1.2 Schweißformänderungen

Mit den Schweißeigenspannungen treten Schweißformänderungen im Bauteil auf, die auch als Wärmeverzug bezeichnet werden. Gemäß DIN EN 10052 ist Wärmeverzug jede Maß- und Formänderung eines Werkstücks gegenüber dem Ausgangszustand in Folge einer Wärmebehandlung. Der Wärmeverzug ist über die Werkstoffkennwerte direkt mit den Eigenspannungen verbunden und befindet sich zu jeder Zeit im Gleichgewicht mit diesen. Bei eingeschränkter Formänderung treten somit hohe Spannungen und bei unbehinderter Formänderung niedrige Spannungen auf.

Nach Masubuchi (1980) lassen sich sechs verschiedene Verzugsformen unterscheiden (siehe Abbildung 2.5):

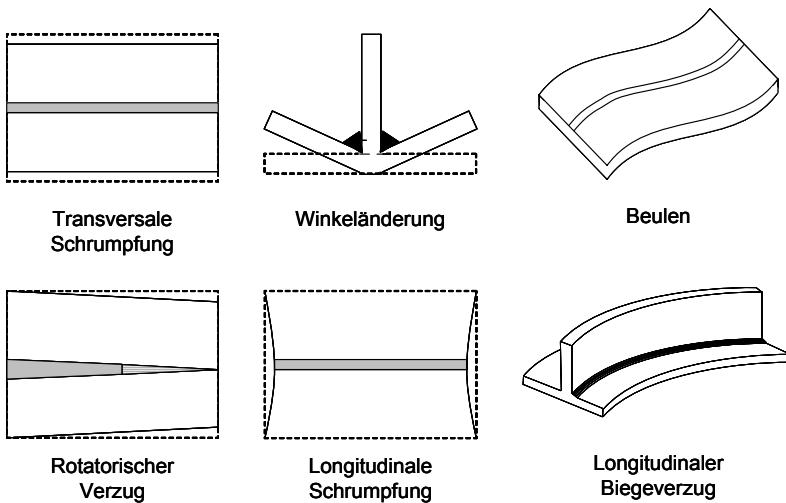


Abbildung 2.5: Formen des Bauteilverzugs nach (Masubuchi 1980)

Bei komplexen Bauteilen ist der resultierende Schweißverzug selten auf einzelne Phänomene zurückzuführen, sondern ergibt sich aus einer Überlagerung der verschiedenen Bauteilverformungen. Nichtlineare Effekte, wie z.B. Beulung, treten meist nur bei sehr dünnen Bauteilen in Folge der hohen Druckspannungen auf.

Nach *Radaj* (1988) und *Ritter u.a.* (1999) lassen sich die Einflussgrößen auf Schweißeigenspannungen und Schweißformänderungen folgendermaßen zuordnen:

**Werkstoffbedingte Einflussgrößen:** Der Einfluss der thermophysikalischen Werkstoffdaten und das Gefüge des Grund- und Zusatzwerkstoffes wird von *Malisius* (1977) näher betrachtet. Je größer beispielsweise die spezifische Wärme eines Werkstoffs ist, desto mehr Wärme muss für den Schweißprozess zugeführt werden und umso stärker treten Eigenspannungen und Verzug auf.

**Konstruktionsbedingte Einflussgrößen:** Unter diesen Faktoren ist nach *Ritter u.a.* (1999) die Lage der Naht relativ zur neutralen Faser des Bauteils und die Größe des Nahtquerschnitts maßgeblich für den resultierenden Bauteilverzug verantwortlich.

**Fertigungsbedingte Einflussgrößen:** Eine hohe Streckenenergie und ein damit verbundene hoher Wärmeeintrag in das Bauteil erhöhen die auftretenden Wärmespannungen. Abhilfe schafft hier eine geeignete Einspannung der Bauteile. Durch die hohen Fügekräfte im Bereich von mehreren kN (Dahl u.a. 1999) werden plastische Formänderungen verhindert, bedingen jedoch sehr hohe Eigenspannungen.

## 2.1.2 Einstellparameter und Zielgrößen beim Laserstrahlschweißen

Das Bearbeitungsergebnis beim Laserstrahlschweißen ist von einer Vielzahl von Einflussgrößen abhängig. In Anlehnung an (Beske 1992) können die Einflussgrößen in drei Hauptgruppen eingeteilt werden:

- Strahl- und Prozessparameter
- Werkstückparameter
- Werkstoffparameter

Die **Strahl- und Prozessparameter** charakterisieren die zum Einsatz kommenden Laserquellen, die Strahlführungseinheit und die Einkopplung der Strahlung in das Bauteil. Wichtige Größen sind hierbei u.a. die Wellenlänge des verwendeten Lasers, die Strahlleistung am Werkstück, die Strahlqualität (vereinfacht auf das Strahlparameterprodukt), die Relativgeschwindigkeit zwischen Strahl und Werkstück, die Spann- und Maschinentechnik, der Strahleinfallsinkel und die Prozessgasparameter (Art, Menge, Zuführrichtung).

Die **Werkstückparameter** beschreiben die Beschaffenheit der Werkstücke und die Lage der Schweißnaht. Als Einstellgrößen gelten z.B. der Nahttyp und die Stossart, die Werkstückdicke, die Nahtlage, die Nahtvorbereitung, sowie die Form- und Lagetoleranzen.

Die **Werkstoffparameter** bestimmen die physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs, z.B. den Gefügezustand. Insbesondere die spezifische Wärmekapazität, die Wärmeleitfähigkeit, das Elastizitätsmodul und die Fließspannung haben auf die Maximaltemperatur und das resultierende mechanische Verhalten sehr großen Einfluss (Lenz 2001). Werkstoffmodifikationen aus vorangegangenen Prozessen (z.B. Kaltverfestigung)

beeinflussen den Fügeprozess maßgeblich, finden jedoch bisher kaum Beachtung.

Aus *DIN EN ISO 11145* sowie *DIN EN ISO 9956-11* können die Definitionen und Beschreibungen der Einflussgrößen beim Laserstrahlschweißen entnommen werden.

Als wichtigste Zielgröße für alle Schweißanwendungen ist die statische bzw. dynamische Festigkeit der Verbindung zu betrachten. Nach *Niemann (1980)* ist es möglich, die statische Festigkeit über werkstoffspezifische Kennwerte in eine dynamische Festigkeit, wie z.B. die Schwellfestigkeit, umzurechnen. Ein zweiter wichtiger Aspekt zur Beurteilung einer Schweißaufgabe ist die erzielte Nahtgeometrie. Aus der Breite, Tiefe und Form der Naht lassen sich Rückschlüsse auf die erreichte Energieeinkopplung und auf den resultierenden tragenden Querschnitt ziehen.

Eine dritte Zielgröße beim Laserstrahlschweißen sind die durch den unterschiedlichen Temperatur-Zeitverlauf im Bauteil induzierten Eigenspannungen bzw. der daraus resultierende Verzug. Im Normalfall ist beim Schweißen immer mit einem gewissen Verzug zu rechnen, der umso größer wird, je geringer die Schrumpfungsbehinderung der zu fügenden Teile ist. Neben dem Verzug resultieren nach *Macherauch u. Hauck (1983)* noch weitere gravierende Nebenbedingungen aus den Eigenspannungen. Besonders hervorzuheben ist hierbei die Kaltrissbildung und die örtliche Veränderung der Härtewerte.

## 2.2 Prinzip und physikalische Vorgänge des Umformens

Umformen ist nach *DIN 8580* das Fertigen durch bildsames bzw. plastisches Ändern der Form eines festen Körpers unter Beibehaltung seiner Masse und seines Stoffzusammenhangs. Umformen ist, im Gegensatz zum Verformen, das Ändern einer Form unter Beherrschung der Geometrie. Die Umformverfahren gehören zu den spanlosen Fertigungsverfahren.

Beim Umformen wird eine Struktur durch eine Kraft belastet, so dass daraus unter Berücksichtigung der kraftbeaufschlagten Fläche ein Spannungszustand resultiert. In Abhängigkeit vom Werkstoff, der Geometrie, der Reibung, der

Prozessparameter und der Temperatur findet zunächst eine elastische Verformung statt. Überschreitet der Spannungszustand einen für den Werkstoff charakteristischen Wert, beginnt sich dieser plastisch zu verformen. Diese Grenze, bei der der Werkstoff zu fließen beginnt, bezeichnet man als Fließgrenze. Durch Verfestigung in Folge von plastischen Dehnungen erhöht sich die Fließgrenze während des Prozesses (Kaltverfestigung). Wird die externe Kraft aufgehoben und die Einspannungen des Bauteils aufgelöst, relaxieren die elastischen Verformungen und die plastischen Dehnungen beschreiben eine dauerhafte, definierte Geometrieveränderung.

Das Umformen wird fast immer mit weiteren Fertigungsschritten kombiniert. So wird z.B. die Platine für ein Blechteil vor dem Umformen aus dem Coil geschnitten. Nach dem Umformen erfolgt das Beschneiden der Ränder, das Lochen oder das Ausschneiden der Werkstücke. Häufig wird das Bauteil anschließend abgekantet oder gefalzt. Diese Schritte bezeichnet man als Folgeoperationen. Die Herausforderung in der Auslegung der Umformprozesse ist die Gewährleistung der Soll-Geometrie innerhalb der vorgegebenen Toleranzen nach einer Vielzahl von struktur- und geometrieverändernden Prozessen.

### 2.2.1 Umformverfahren

Die Einteilung der Umformverfahren erfolgt gemäß *DIN 8582* nach Art der vorherrschenden Spannungen während des Umformvorgangs (vgl. *DIN 8583 bis 8587*) in:

- Druckumformen
- Zugdruckumformen
- Zugumformen
- Biegeumformen
- Schubumformen

In *DIN 8582* werden nach den Kriterien der Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück, der Werkzeuggeometrie und der Werkstückgeometrie 17 Verfahrensgruppen unterschieden.

### 2.2.1.1 Tiefziehen

In dieser Arbeit findet das derzeit wirtschaftlich bedeutendste Umformverfahren in der Blechumformung, das Tief- und Streckziehen, Verwendung. Nach DIN 8584 wird beim Tiefziehen ein ebener Blechzuschnitt in einem schalenförmigen Körper umgeformt, ohne dass eine beabsichtigte Blechdickenänderung stattfindet. Das Werkstückspektrum reicht dabei von vergleichsweise einfachen rotationssymmetrischen Blechformteilen, z.B. aus dem Bereich der Haushaltswaren, bis hin zu Ziehteilen aus Freiformflächen (z.B. Karosseriebauteile) (Homberg 2001). In Abbildung 2.6 ist beispielhaft die Werkzeugeanordnung beim Tiefziehen dargestellt.

Während des Tiefziehprozesses wird die notwendige Ziehkraft vom Stempel in den Ziehteilboden eingeleitet und von dort über die Zarge in die Umformzone im Flansch übertragen. In Abhängigkeit von der Geometrie und der eingesetzten Verfahrensvariante treten während der Umformung Zug-Druck, Zug- und Biegebeanspruchungen und daraus zusammengesetzte Beanspruchungen auf (siehe Abbildung 2.7). Der Prozess beginnt mit einem Streckziehen, bei dem der Boden unter Zug-Zug-Belastung geformt wird und dem anschließenden Tiefziehprozess, bei dem der Flansch unter Zug-Druck-Beanspruchung umgeformt wird.

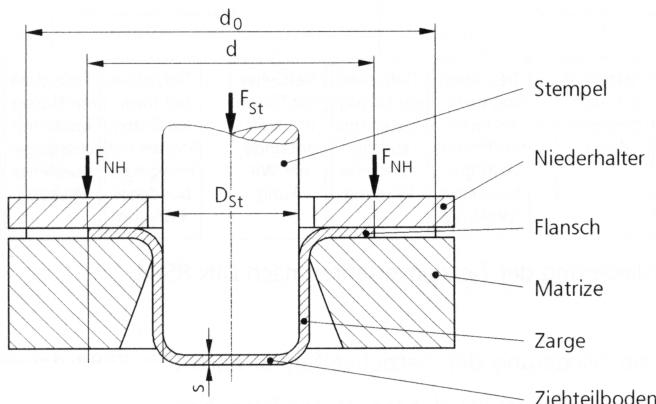


Abbildung 2.6: Werkzeugeanordnung beim Tiefziehen nach Lange 1990

Der Prozess Tiefziehen ist somit eine Kombination aus Streckziehen und Tiefziehen (Lange 1990). Durch die Umformarbeit im Flansch, die aufzubringenden Biegearbeit und den Reibungseinflüssen zwischen Niederhalter und Matrize wird durch Ausstrecken des Blechs zunächst der Boden ausgeformt (Hallfeldt 2002). Auf Grund der Kaltverfestigung des Blechwerkstoffes sind stetig steigende Kräfte notwendig, um die Plastifizierung im Streckziehbereich aufrecht zu erhalten (Doege 1976). Beginnt sich nun der Flansch zu verformen, wird dieser im Verlauf des eigentlichen Tiefziehvorgangs über die Matrize in Form gezogen.

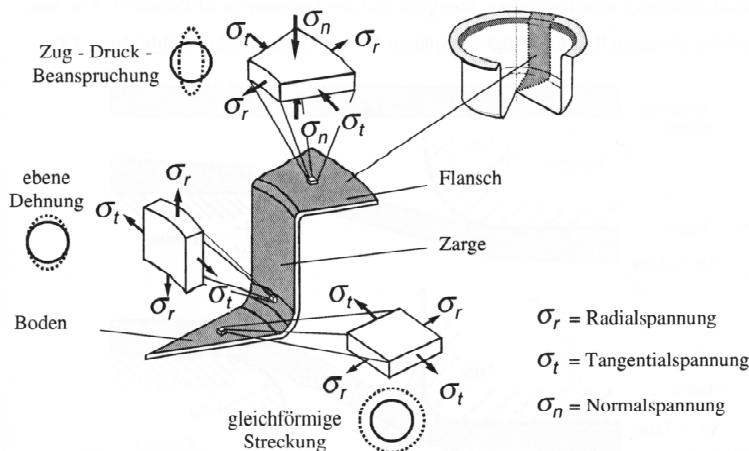


Abbildung 2.7: Auftretende Zug - Druck, Zug- und Biegebeanspruchungen bei einem Ziehteil nach Hallfeldt 2002

### 2.2.1.2 Innenhochdruckumformen

Ein weiteres Verfahren, das in dieser Arbeit betrachtet wird, ist das Innenhochdruckumformen (IHU), das in den letzten Jahren mit zunehmender Forderung nach gewichtsoptimierten Leichtbau besondere Bedeutung gewonnen hat. Das Verfahrensprinzip besteht darin, dass ein Hohlkörper, welcher gegebenenfalls mechanisch vorgeformt ist, unter hydrostatischem Druck an die Innenfläche eines formgebenden Werkzeuges angepasst wird.

Oftmals wird dieses Verfahren in Kombination mit mechanischen Lasten, dem sog. Nachschieben, durchgeführt (siehe Abbildung 2.8). Auf diese Weise können äußerst komplexe und an die Betriebsbelastung angepasste Bauteile hergestellt werden.

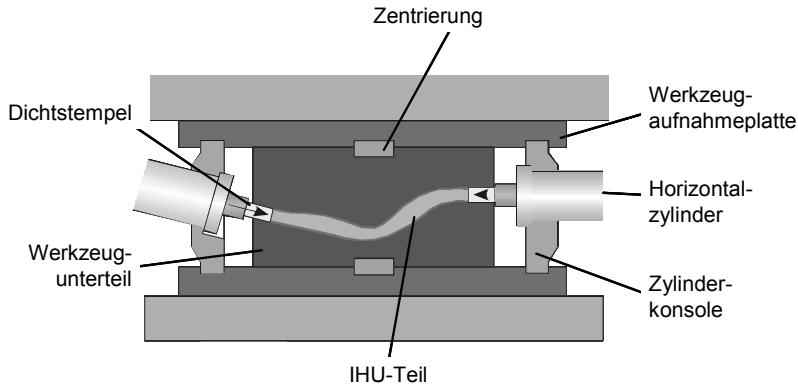


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung eines IHU-Werkzeuges nach Schuler 1996

Auf Grund der vielfältigen Möglichkeiten der Prozessführung und der Werkzeuggestaltung wurden unterschiedliche Verfahrensvarianten entwickelt. Da hierbei die Spannungszustände während des Umformvorgangs von reinen Zugumformen über Zugdruckumformen bis hin zum reinen Druckumformen reichen (Hessler 1991), kann das Verfahren entsprechend DIN 8582 nicht eindeutig zugeordnet werden. Aus diesem Grund wurde die Einteilung der Verfahren gemäß der VDI-Richtlinie 3147 definiert (siehe Abbildung 2.9). Einen Überblick über den Stand der Technik des IHU ist in Lichtenberg u. Hoff (1996), Lichtenberg (1996) und Engel (1996) zu finden.

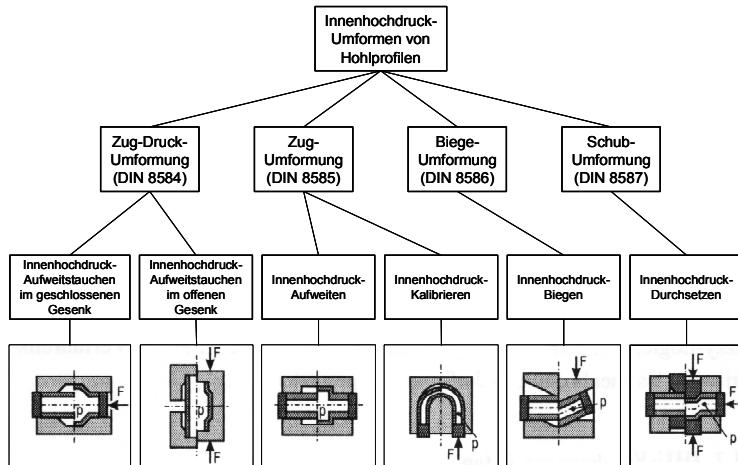


Abbildung 2.9: Innenhochdruckumformverfahren gemäß VDI-Richtlinie 3147

## 2.2.2 Verfahrensgrenzen

Zur fehlerfreien Herstellung eines Bauteils mit den gewünschten technologischen Eigenschaften sind die Prozessparameter so aufeinander abzustimmen, dass sie innerhalb des Prozessfensters liegen.

Bei Überschreiten der Verfahrensgrenzen treten folgende typische Versagensfälle auf (Dudziak 1996):

- Rissbildung bzw. Bersten
- Falten und Knicke

**Risse** treten beim IHU vorzugsweise in Aufweitzonen (Engel 1996) und beim Tiefziehen häufig in den Bodenbereichen des Hohlkörpers auf. Sie sind die Folge von unzureichendem Werkstofffluss in Axialrichtung. Dadurch entsteht ein zweiachsiger Spannungszustand, der zu einer starken Ausdünnung führt. Bei Überschreiten einer kritischen Spannung schnürt das Bauteil an seiner dünnsten Stelle ein und ein Riss entsteht. Beim IHU ist auf Grund des hohen Innendrucks zusätzlich ein **Bersten** der Hohlstruktur die Folge.

Ein Riss bzw. Bersten kann beim Umformen auch durch ungünstige Konstruktionen auftreten. So verhindern z.B. scharfkantige Übergänge und kleine Radien das Nachfließen und führen damit zu einem Abstrecken des Werkstoffs.

**Falten und Knicke** sind eine Folge zu hoher Axialkräfte (Keeler 1965). Übersteigt die Druckspannung in Axialrichtung das Formänderungsvermögen des Werkstoffs, weicht dieser seitlich aus. Zu unterscheiden sind dabei Falten bei Tiefziehteilen von kurzen, dünnwandigen IHU-Bauteilen und einer Euler'schen Knickung von langen (im Vergleich zum Durchmesser) Zylindern beim IHU.

Häufig entstehen zu Beginn des Umformprozesses Ringfalten im Einlaufbereich des Werkstoffs, welche aber im weiteren Verlauf reversibel sind. Bei einer Knickung, die durch eine Belastung oberhalb einer kritischen Last hervorgerufen wurde, liegt das Bauteil im Laufe des Umformprozesses asymmetrisch im Werkzeug an, so dass häufig eine ungleichmäßige Wandstärkenverteilung die Folge ist. Bauteile mit Falten, Knicken und Rissen sind in der Regel Ausschussteile.

### 2.2.3 Einstellparameter und Zielgrößen beim Umformen

Das Umformen ist ein sehr komplexer Prozess und zahlreiche Anwendungen werden nahe den Versagungsgrenzen durchgeführt. Häufig wird dabei das Umformvermögen des verwendeten Werkstoffs bzw. der Geometrie nahezu ausgeschöpft. Aus diesem Grund sind die Anforderungen an eine genaue Prozessauslegung und eine zuverlässige Prozesssteuerung sehr hoch. In Anlehnung an Kapitel 2.1.2 werden die Einstellparameter für den Umformprozess in drei Hauptgruppen unterteilt:

- Prozessparameter,
- Werkstück- und Werkzeugparameter und
- Werkstoffparameter

Unter **Prozessparametern** versteht man dabei sämtliche einstellbaren Kräfte während des Prozesses, wie die Axialkraft, den Innendruck, die Gegenhalterkraft, die Niederhalterkraft, die Stempelkraft etc. Diese sind über die Prozesszeit variabel und werden einzeln geregelt.

Weitere Prozessparameter sind die Anzahl der Umformschritte (Prozessstufen) und die vorherrschende Reibung. Die Reibung bzw. die entsprechenden Schmierstoffe haben einen sehr großen Einfluss auf das Gesamtergebnis des Umformprozesses. Ein weiterer Aspekt, den man den Prozessparametern zuordnet, sind die Verfahrensgrenzen. Das Knicken, Falten, Reißen und Bersten stellen die groben Randbedingungen für den Prozess dar und schränken das Prozessfenster drastisch ein.

Die **Werkstückparameter** beinhalten vor allem geometrische Informationen, wie die Abmessungen des Werkstücks (sowohl des Rohlings als auch des umgeformten Zustandes), die Radien, die Wandstärke (vor und nach dem Umformprozess) etc. Die **Werkzeugparameter** sind ebenfalls geometrische Informationen, aber auch die Teilungsebenen des Werkzeugs und die Form und Position der Auswerfer. Zusätzlich sind hier mechanische Einrichtungen, z.B. Treiber-Schieberkombinationen oder Zuhalteinrichtungen, von Bedeutung.

Eine weitere Gruppe der Einstellgrößen sind die **Werkstoffparameter**, welche sehr aufwändig zu bestimmen und unter Umständen stark schwankend sind. Sehr wichtige Größen sind dabei die Streckgrenze, die Gleichmaßdehnung, die Fließkurve und das Formänderungsvermögen des Werkstoffs. Weitere Aspekte sind der Gefügezustand (z.B. nach dem Weichglühen), die Anisotropie und das Kaltverfestigungsverhalten.

Die Zielgröße bei allen Umformprozessen ist die Formgenauigkeit nach dem Rücksprung. Nach dem Öffnen der Werkzeuge und dem Herausnehmen muss das Bauteil innerhalb der gegebenen Toleranzen die gewünschten Abmessungen vorweisen. Diese Geometrie sollte zudem annähernd 100%ig reproduzierbar sein. In engem Zusammenhang mit den Toleranzen steht die Oberflächengüte. Ansätze von Falten oder Knicken etc. sind in den Umformbauteilen, insbesondere nach dem Lackieren, deutlich sichtbar und führen schnell zu fehlerhaften Bauteilen. Ein sehr bedeutender Indikator der Güte des Prozesses ist die Blechausdünnung. Dieser ungewünschte Nebeneffekt beeinflusst die Festigkeit der Komponenten sehr und ist deshalb eine maßgebliche Zielgröße des Umformprozesses.

## 3 Stand der Technik

### 3.1 Virtuelle Produktion

Anfang der 90er Jahre wurde der Gedanke der rechnerintegrierten Produktion (RIP) bzw. des Computer Integrated Manufacturing (CIM) entwickelt. Wichtigste Innovation des CIM-Gedankens war die funktionale Gesamtintegration industrieller Prozesse mit Hilfe von Informationstechnologie (VDI CIM 1990). Diese Strategie war eng mit dem Einsatz erster 3D-CAD-Systeme verknüpft. Auf Basis dieser Entwicklung wurde 1993 der Begriff *Digital Mock-up* von der europäischen Forschungsinitiative **AIT** (Advanced Information Technology in Design and Manufacture), einem Zusammenschluss der bedeutendsten europäischen Automobilhersteller, Luft- und Raumfahrtunternehmen und deren Zulieferer, gegründet (Praun 2001). AIT definiert *Digital Mock-up* als Entwicklungsstrategie folgendermaßen:

*Digital Mock-up* stellt die realistische Computersimulation eines Produktes dar und dient als Plattform zur Produkt- und Prozessentwicklung, zur Kommunikation und zur Entscheidungsfindung vom ersten Produktkonzept bis hin zu Kundendienst- und Recyclinguntersuchungen (AIT 1996).

Die industrielle Vorgehensweise zur Absicherung der Produkteigenschaften wie auch der Fertigungs- und Montageprozesse basiert auf physischen Modellen. Im Laufe der Produktentwicklung werden in der Regel mehrere Prototypen unterschiedlichen Reifegrades angefertigt, um den Stand der Entwicklung zu verifizieren. Obwohl Rapid-Prototyping-Verfahren eingesetzt werden, ist die Modellbildung technisch sehr aufwändig, zeit- und kostenintensiv. Die Tatsache, dass für zahlreiche Komponenten noch keine oder unzureichende Werkzeuge und Betriebsmittel zur Verfügung stehen, verzögert den Prototypenbau und damit die Absicherung der Eigenschaften erheblich. Zudem schreitet die Produkt- und Prozessentwicklung in der Zwischenzeit voran, so dass die realen Modelle bei Fertigstellung bereits veraltet sind. Die Erkennung von Fehlern an physischen Modellen verursacht damit erhebliche Änderungskosten sowie Folgekosten für Modifikationen an Nachbarteilen oder u.U. am ganzen Konzept. Nur mit Hilfe der Überprüfung durch digitale Modelle zu einem sehr frühen Zeitpunkt in der Konstruktion kann eine hohe Entwicklungsqualität

und eine rechtzeitige Absicherung des Entwicklungsstandes erreicht werden. Abbildung 3.1 zeigt den Zeit-, Qualitäts- und Kostenvorteil, der durch digitale Absicherung erreicht werden soll.

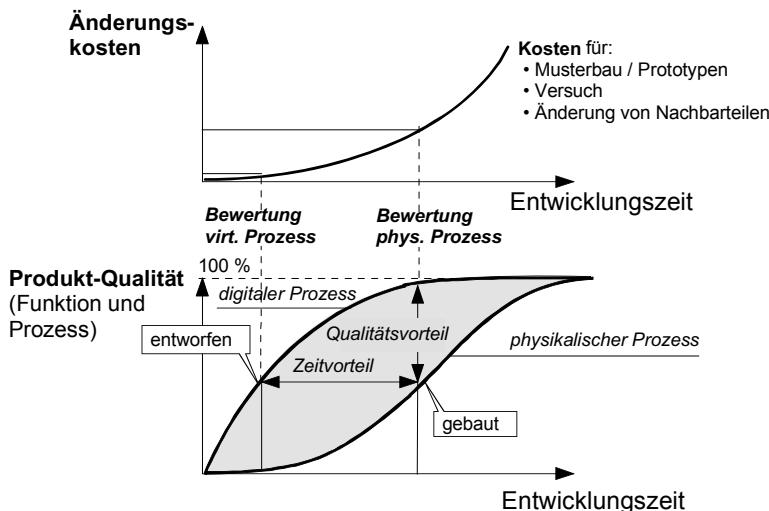


Abbildung 3.1: Die Zeit-, Qualitäts- und Kostenvorteil durch eine digitale Absicherung der Produktentwicklung (Reinhart u. Praun 1999)

Seit der Einführung des DMU-Gedankens sind zahlreiche neue Begriffe und Definitionen, wie z.B. *Digitale Fabrik*, *Virtuelles Produkt* oder *Virtuelle Produktion*, mit z.T. sehr ähnlichen Zielen, geschaffen worden. Besonders die *Digitale Fabrik* ist seit einigen Jahren ein feststehender Begriff, allerdings ohne eine eindeutige Definition (Zäh u.a. 2003). Einerseits wird die *Digitale Fabrik* als Abbild der realen, existierenden Fabrik in einem digitalen Modell angesehen (Westkämper u.a. 2003, Wiehndal u.a. 2002, Dombrowski u.a. 2001), andererseits wird sie als Werkzeug verstanden, diese digitalen Modelle zu erzeugen (Linner u.a. 1999, Bracht 2002, Bley u. Franke 2001, Gerhardt u. Lanza 2001).

Alternativ zur *Digitalen Fabrik* definiert Reinhart u.a. (1999) die *Virtuelle Produktion* als durchgängige, experimentierfähige Planung, Evaluierung und Steuerung von Produktionsprozessen und -anlagen mit Hilfe digitaler Modelle. Die *Virtuelle Produktion* ist die Zielvision eines experimentierfähigen Modells,

welches das Produkt in seiner Produktionsumgebung abbildet und über den gesamten Lebenszyklus genutzt werden kann. Horizontal reicht die *Virtuelle Produktion* auf der Ebene der Fabrikstruktur von der Fertigung der Einzelteile bis zur Montage des Gesamtproduktes, gegebenenfalls auch bis zur Demontage und dem Recycling. Vertikal müssen die einzelnen Teilprozesse von der Fabrikstrukturebene, der Anlagen- und Zellenebene, über die Maschinenebene, bis hin zum technologischen Prozess in der relevanten Tiefe betrachtet und durch Simulation abgesichert werden. (siehe Abbildung 3.2). Die *Digitale Fabrik* ist für Reinhart u.a. (2002) dabei die Gesamtheit der Ressourcen, die zur Erstellung der virtuellen und realen Produktion nötig sind.

### Simulations- werkzeug

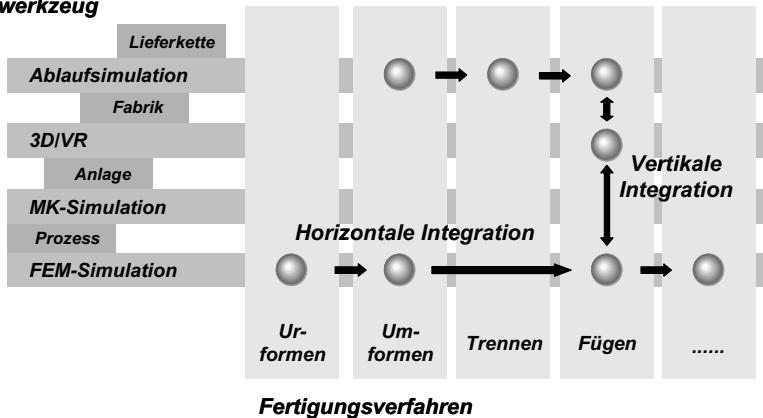


Abbildung 3.2: Ebenen und Handlungsfelder der Virtuellen Produktion

Wesentliche Bausteine für die Realisierung der *Virtuellen Produktion* sind die Bereiche „Werkzeuge der Digitalen Fabrik“, „Human System Interfaces“ und „Methoden“ (Zäh u.a. 2003). Zentrale Produktdatenmanagement- und Prozessplanungssysteme bilden dabei die Grundlage für die Integration der im Produktlebenszyklus eingesetzten Softwarewerkzeuge und der generierten Information. Ziel ist es, die einzelnen Teilprozesse auf den verschiedenen Ebenen miteinander zu vernetzen.

Derzeit ist allerdings eine durchgängige Abbildung realer Prozesse wie in der *Virtuellen Produktion* gefordert, noch nicht möglich. In der industriellen Umsetzung bzw. der Anwendung der Werkzeuge bestehen zahlreiche prozess-,

produkt- oder branchenspezifische Insellösungen ohne einen Austausch der Informationen untereinander. Für den Transfer von Geometrieinformationen zwischen verschiedenen CAD-Systemen wurde deshalb der **Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP)** entwickelt. Im Bereich der Prozesssimulation auf Basis der FEM bieten CAD-Systeme weitere Schnittstellenformate (IGES, STL), um Geometrie und Vernetzungsinformationen zu übertragen (*Oertli 2001*). In dem Projekt integrierte **Virtuelle Produktentstehung (iViP)** wurde eine Integration aller an der virtuellen Produktentstehung beteiligten Systeme angestrebt (*Krause u.a. 2000*). Ein webbasiert Client (iViP-Client) ermöglicht über eine CORBA-Schnittstelle (**Common Object Request Broker Architecture**) den transparenten Zugriff auf Produktdaten aus unterschiedlichen Systemen.

Für den systemübergreifenden Austausch von Berechnungsergebnissen, auf Basis der FEM, existieren keine standardisierten Schnittstellen. Vorhandene Verknüpfungen beschränken sich auf den Transfer der Geometrieinformation.

## 3.2 Simulation von Fertigungsverfahren

Im Zuge des Kernbereichs „Werkzeuge“ der *Virtuellen Produktion* stellt die Simulation von Fertigungsverfahren einen grundlegenden Aspekt dar. Aufgabe der Simulation auf Prozessebene ist einerseits die Analyse und Optimierung der Fertigungsprozesse, andererseits die Vorhersage der resultierenden Bauteileigenschaften mit Hilfe digitaler Modelle. In Folge dessen herrscht eine sehr große Varianz in der Detaillierung der Betrachtung. Analysen physikalisch komplexer Fertigungsverfahren und die Bestimmung der Prozessparameter durch Simulation bedingen sehr aufwändige, detaillierte und umfangreiche Modelle. Die Untersuchung von Bauteileigenschaften komplexer Strukturen hingegen erfordert auf Grund der Modellgröße und der damit verbundenen Rechenzeit zahlreiche Vereinfachungen.

Aus diesem Grund existieren für die Untersuchung von Fertigungsverfahren zahlreiche Modellierungsmethoden und Simulationswerkzeuge. Nach *Vollertsen (1996)* lassen sich diese in vier Gruppen unterteilen:

- **Qualitative Modelle:** Qualitative Beschreibung von Abhängigkeiten eines Systems oder Prozessablaufs.

- **Physikalische Modelle:** Reale Abbildungen des Gesamtsystems oder von Teilbereichen des Systems. Aussagen werden durch real durchgeführte physikalische Experimente gewonnen.
- **Analytische Prozessmodelle:** Exakte mathematische Beschreibung des Prozesses in Form geschlossener, lösbarer mathematischer Gleichungen.
- **Numerische Prozessmodelle:** Analytische Beschreibung des Prozesses. Iterative numerische Lösung der Gleichungen durch Diskretisierung der zeitlichen und örtlichen Vorgänge.

Die numerische Modellierung mit dem Werkzeug der FEM ist das am häufigsten eingesetzte Hilfsmittel zur Berechnung von komplexen Vorgängen und Prozessen im Maschinenbau (*Knothe u. Wessels 1992, Spur u. Krause 1997*).

### 3.2.1 Methode der Finiten Elemente

In vielen Bereichen des Produktentstehungsprozesses ist die FEM Stand der Technik. Als Beispiel seien hier strukturmechanische Untersuchungen (siehe z.B. *Haffner 2002*) oder Crash-Berechnungen (*Blumhardt 2001*) genannt. All diese Anwendungen beschäftigen sich mit der Vorhersage von Produkteigenschaften lange bevor das reale Bauteil existiert. Für die Modellierung von Fertigungsprozessen hingegen wird die FEM erst in Teilbereichen industriell eingesetzt. Eine Ausnahme stellen hier ur- und umformende Verfahren da. Die Simulation des Schneidens, des Schmiedens und des Tiefziehens im Blechbereich sind Beispiele hierfür und stellen ein immer bedeutenderes Werkzeug im industriellen Entwicklungsprozess dar (*Doege u. Dohrmann 1998, Hoffmann u.a. 1998*).

Die FEM lässt sich auf alle Probleme anwenden, die durch orts- und zeitabhängige Differentialgleichungen beschrieben werden können. Sind die Gleichungssysteme zu komplex, um sie für die gesamte zu untersuchende Struktur zu lösen, wird das Bauteil in sehr kleine Einzelbereiche, sog. Finite Elemente, untergliedert. Für diese Einzelbereiche kann unter Berücksichtigung der angrenzenden Elemente eine Näherungslösung der Differentialgleichungen gefunden werden. Um eine derartige Aufgabenstellung zu lösen, sind die Schritte *Preprocessing*, *Solving* und *Postprocessing* durchzuführen (*Fröhlich 1995*).

Im *Preprocessing* erfolgt eine Diskretisierung der Geometrie in einzelne Teilbereiche, d.h. die Struktur wird mit Finiten Elementen vernetzt. Dazu stehen je nach Aufgabe unterschiedliche Elementtypen zur Verfügung. Man unterscheidet die Hauptgruppen der eindimensionalen Stab-, der zweidimensionalen Schalen- und der dreidimensionalen Volumenelemente. Der Aufbau von Finiten Elementen besteht aus dem Element selbst, das an den Ecken durch sog. Knoten begrenzt ist. Diese Knoten werden mit den Knoten der anliegenden Elemente verknüpft, so dass durch diskrete Einzelbereiche die gesamte Bauteilstruktur dargestellt werden kann. Zusätzlich besitzt ein Element eine gewisse Anzahl von Integrations- oder Gaußpunkten. Diese Punkte liegen etwas innerhalb der Knotenpunkte im Element und sind die Bezugspunkte der Berechnung. Alle zu lösenden Differentialgleichungen werden in diesen Punkten gelöst und das Ergebnis auf die Knoten projiziert. Die Anzahl der Integrationspunkte variiert je nach Typ und Modell der verwendeten Elemente. In FE-Programmen ist in der Regel eine Elementbibliothek hinterlegt, die unterschiedliche Elementtypen beinhaltet. Schalenelemente sind zweidimensionale Flächenelemente, die eine bestimmte Anzahl von Integrationspunkten in der Mitte des Elementes über eine virtuelle Dicke aufweisen (in der Regel drei bis neun Integrationspunkte). Sie finden insbesondere in mechanischen Berechnungen, bei denen große Verzerrungen zu erwarten sind, Verwendung (z.B. in der Umformsimulation). Volumenelemente z.B. in Hexaederform besitzen je einen Integrationspunkt in jeder Ecke des Elementes (siehe Abbildung 3.3) und werden verwendet, wenn dickenabhängige Informationen (z.B. die Temperaturverteilung beim Laserstrahlschweißen) berechnet werden.

Die Elemente unterscheiden sich jedoch nicht nur in ihrer geometrischen Form sondern auch in der Funktionalität. So können beispielsweise metallische Phasenübergänge des Werkstoffs nur mit Volumenelementen berechnet werden, Schalenelemente bieten diese Funktionalität nicht.

Diesen Elementen werden in der Berechnung die Werkstoffdaten zugewiesen und die Anfangs- und Randbedingungen definiert.

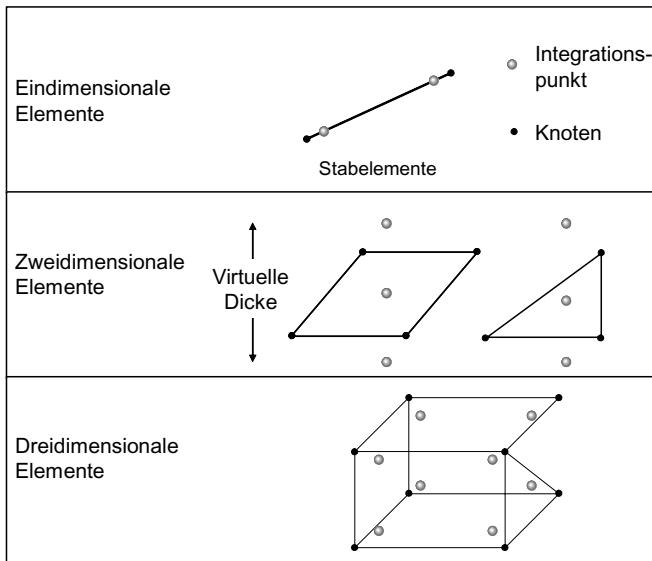


Abbildung 3.3: Aufbau und Form diverser Elementtypen

Beim *Solving* wird eine Gesamtlösung erreicht, indem für jedes einzelne Element eine Lösung errechnet wird, wobei die umliegenden Elemente über Knotenverbindung berücksichtigt werden. Durch numerische Verfahren werden die Differentialgleichungen der jeweiligen Problemstellung gelöst. Im Fall des Laserstrahlschweißens wird die Temperatur als gesuchte Größe über eine Variationsformulierung berechnet. Durch Multiplikation der Gleichung mit einer Testfunktion und anschließender Integration über die Bauteilfläche, unter Berücksichtigung der Randbedingungen, kann das Gleichungssystem linearisiert und somit berechnet werden. Die Testfunktion wird dabei iterativ für diskrete Flächen, die den Elementen entsprechen, ermittelt.

Ein ähnlicher Ansatz wird zur thermomechanischen Untersuchung verwendet. Die allgemeine Grundgleichung zur Beschreibung des mechanischen Verhaltens eines Körpers lautet:

$$m \cdot a + d \cdot v + k \cdot u = F$$

Gleichung 3.1

Bringt man diese Gleichung in eine Matrixform mit  $M$  als Massen-,  $D$  als Dämpfungs- und  $K$  als Steifigkeitsmatrix erhält man

$$M\ddot{\vec{u}} + D\dot{\vec{u}} + K\vec{u} = \vec{F}$$

*Gleichung 3.2*

Für die Berechnung der mechanischen Größen wie z.B. des Verzugs wird häufig ein Variationsansatz zur Minimierung der potentiellen Energie verwendet. Die potentielle Gesamtenergie  $\pi$ , die sich aus den Beiträgen der einzelnen Elemente  $\pi_e$  zusammensetzt, ist eine Funktion von Knotenverschiebungen (siehe Gleichung 3.3). Hieraus lässt sich Gleichung 3.4 zur Bestimmung der unbekannten Knotenverschiebung ableiten (Zienkiewicz 1984). In diesen Gleichungen stellt  $K$  die Steifigkeitsmatrix der Struktur,  $\vec{u}$  den Verschiebungsvektor der Knoten und  $\vec{F}$  einen Vektor der aufgeprägten Lasten dar.

$$\frac{\partial \pi \vec{u}}{\partial \vec{u}} = 0$$

*Gleichung 3.3*

$$K\vec{u} = \vec{F}$$

*Gleichung 3.4*

Dieses Gleichungssystem ist für linear-elastisches Werkstoffverhalten direkt zu lösen, da die Steifigkeitsmatrix  $K$  unabhängig vom unbekannten Vektor  $\vec{u}$  ist. Dies gilt nur für kleine Belastungen, d.h. die resultierenden Verschiebungen sind im elastischen Bereich und federn nach Entlastung des Werkstoffs zurück. Bei größeren Belastungen wird das Spannungs-Dehnungsverhalten nichtlinear und weist Belastungsgrenzen auf. Überschreitet die auftretende Spannung  $\sigma$  die Fließgrenze  $\sigma_F$ , werden die Spannungen durch Auftreten einer plastischen Verformung vermindert. Nach Entlastung der Struktur werden die elastischen Verschiebungen  $\Delta\epsilon_{elast}$  aufgelöst und zurück bleiben dauerhafte plastische Verformungen  $\Delta\epsilon_{plast}$ . Dieses Verhalten wird in den zugewiesenen Materialmodellen definiert. Abbildung 3.4 zeigt einige gängige Materialmodelle.

In der Realität liegen allerdings meist mehrachsige Spannungszustände vor, welche durch die Normalspannungen  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  und die Schubspannungen  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$ ,  $\tau_{xz}$  im x-y-z-Koordinatensystem oder durch die drei Hauptspannungen  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  im Elementkoordinatensystem beschrieben sind (siehe Abbildung 3.5).

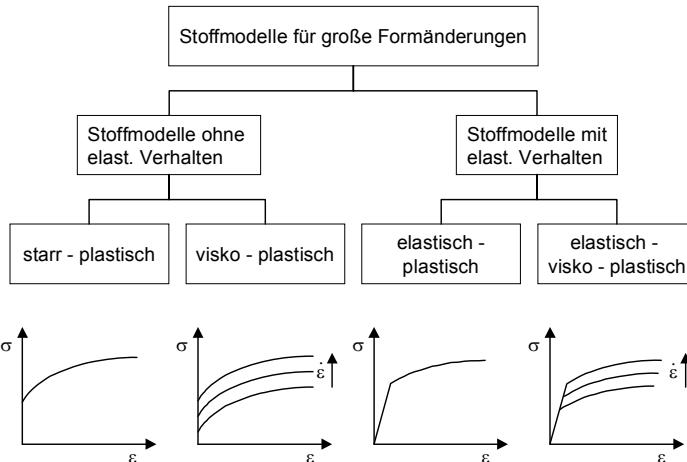


Abbildung 3.4: Stoffmodell für große Formänderungen

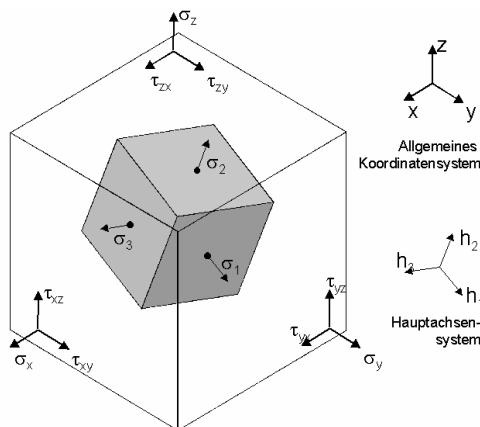


Abbildung 3.5: Spannungszustand an einem Volumenelement im allgemeinen Weltkoordinatensystem und im Elementkoordinatensystem

Um einen mehrachsigen Spannungszustand eines Werkstücks hinsichtlich der Fließgrenze abzuschätzen, ist es nötig, geeignete Übertragungsfunktionen zu formulieren, die den mehrachsigen Zustand in einen äquivalenten einachsigen Zustand transformieren. Dazu werden Festigkeitshypothesen verwendet, die eine Vergleichsspannung definieren. Die wichtigsten Festigkeitshypothesen sind dabei die Normalspannungshypothese nach Rankine, die Schubspannungshypothese nach Tresca und die Gestaltänderungshypothese nach von Mises (Hill 1971). Für metallische Werkstoffe ist die Hypothese der größten Gestaltänderungsenergie (Hypothese nach von Mises) gebräuchlich (Niemann 1980) und berechnet sich als:

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

Gleichung 3.5

Das Fließkriterium dieser Festigkeitshypothese entspricht geometrisch einem Zylinder entlang der Raumdiagonalen. Liegt die Vergleichsspannung  $\sigma_{VM}$  auf der Zylinderoberfläche, wird der Werkstoff plastisch verformt. Liegen die Spannungen innerhalb des Zylinders, reagiert der Werkstoff elastisch. Durch diese Modellvorstellung ist es möglich, die Verfestigung des Werkstoffs bei wiederholter Belastung zu berücksichtigen. Bei einer isotropen Werkstoffmodellierung wird durch die erhöhte Fließspannung  $\sigma_F$  der Fließzylinder geometrisch gleichmäßig aufgeweitet, so dass der elastische Bereich vergrößert wird. Eine weitere Modellierungsvariante ist die kinematische Verfestigung. Hier wird der Fließzylinder im Raum verschoben, so dass der elastische Bereich unverändert bleibt (siehe Abbildung 3.6).

Während des thermomechanischen Solvings wird zuerst der Aufbau der Steifigkeitsmatrizen vorgenommen. Anschließend wird der Lastvektor aus den Anfangs- und Randbedingungen bestimmt und das Gleichungssystem aufgebaut und iterativ gelöst. Da die Steifigkeitsmatrix  $K$  bei plastischen Werkstoffverhalten von den unbekannten Verschiebungen  $\bar{u}$  abhängig ist, müssen die Lösungen der Differentialgleichung durch Iterationsprozesse (z.B. Newton-Raphson-Iterationsschema) gefunden werden. Aus diesen Ergebnissen werden die Verschiebungen, die Dehnungen und die auftretenden Spannungen der Elemente berechnet. Dabei werden die Ergebnisse bereits abgearbeiteter Elemente als Randbedingungen für die weiteren Elemente berücksichtigt.

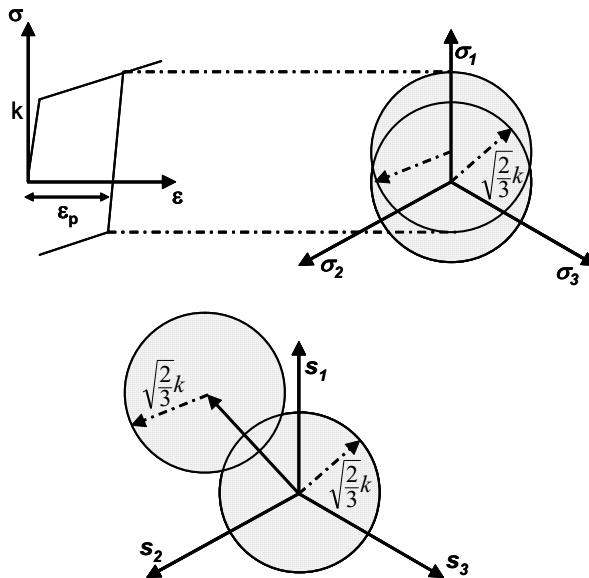


Abbildung 3.6: Kinematische Kaltverfestigung

Im abschließenden *Postprocessing* werden diese Ergebnisse ausgewertet und graphisch aufbereitet.

### 3.2.2 Simulation des Laserstrahlschweißens

Die Simulation von Schweißverfahren steht erst am Anfang der industriellen Anwendung (Radaj 1999). Auf Grund der hohen Komplexität, verursacht durch die Wechselwirkungen der physikalischen Vorgänge beim Schweißen, existieren zahlreiche Modelle, die jeweils Teilespekte des Prozesses abbilden. Diese Modelle sind sowohl analytische als auch numerische Prozessmodelle. Rick (2001) unterscheidet diese Modelle nach ihrem Betrachtungshorizont in thermodynamische, flüssigkeitsdynamische, thermometallurgische, thermomechanische und mechanische Ansätze (siehe Abbildung 3.7). Radaj (1999) gibt einen umfassenden Überblick über die Grundlagen und den aktuellen Stand in der Simulation des Laserstrahlschweißens.

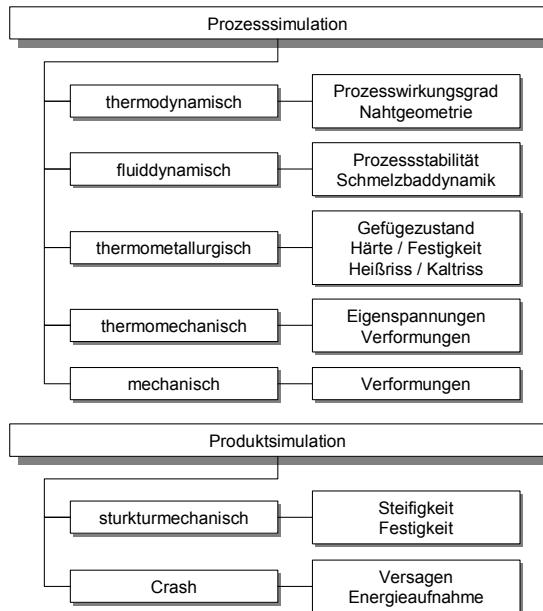


Abbildung 3.7: Numerische Modelle der Prozesssimulation nach ihrem Betrachtungshorizont nach Rick (2001)

Im Folgenden wird der Stand der Technik in den unterschiedlichen Bereichen der numerischen Prozesssimulation erläutert.

#### Thermo- und fluidynamische Modelle

Ziel der thermischen oder thermodynamischen Modellierung des Laserstrahlschweißens ist die Bestimmung der Prozessparameter, des Wirkungsgrades des Prozesses und der resultierenden Nahtgeometrie. Beck (1996b) ist es gelungen, die maßgeblichen Mechanismen der Energieeinkopplung - die Vielfachreflexion und die Plasmaabsorption - in seinem analytischen Ersatzmodell abzubilden. Ähnliche Ansätze verfolgen z.B. Kaplan (1994), Lampa u.a. (1997). Sudnik u.a. (1996, 2000) ermitteln die Geometrie des Schmelzbades durch Energieabsorption unter Berücksichtigung der Schmelzbaddynamik und zeigt in einer Studie den Einfluss der verschiedenen Prozessparameter auf die Nahtgeometrie auf. Radaj (1999) vergleicht analytisch ermittelte Schmelzbadquerschnitte mit realen Experimenten und erreicht dabei eine sehr gute Übereinstimmung. Unter Berücksichtigung der

Marangoniströmung zeigen *Beyer u.a. (2001)* eine Methode auf, die die Temperaturverteilung und Schmelzbadform durch eine numerische Simulation ermittelt. *Rick (2001)* stellt ein Modell, basierend auf der FEM, vor, um den Prozesswirkungsgrad und die Schmelzbad-eigenschaften zu berechnen.

Ein weiterer Schwerpunkt der Simulation des Laserstrahlschweißens ist die fluidodynamische Betrachtung. Hier werden Aspekte der Konvektion im Schmelzbad und somit der Wärmeleitung sowie der Schmelzbad-geometrie betrachtet. Ferner wird die Schmelzbad-dynamik, welche die Stabilität des Prozesses maßgeblich beeinflusst, näher untersucht. *Pitscheneder u.a. (1996)*, *Dilthey u. Pavlyk (1998)*, *Berger (1993)*, *Dowden u.a. (1995)*, *Matsunawa u.a. (1998)* beispielsweise ermitteln mit Hilfe der numerischen Simulation über die Fluidodynamik im Schmelzbad die Schmelzbad-geometrie. *Kern u.a. (1999)* leiten über die Schmelzbadströmung die Ausbildung der Dampfkapillare ab und *Debroy (2001)* zeigt den resultierenden Energietransport im Schmelzbad auf. *Fuhrich u.a. (1999)* und *Kern u.a. (1998)* simulieren die Strömungsvorgänge in der Schmelze und stellen Methoden vor, um Nahtfehler durch die Schmelzbad-dynamik zu ermitteln. Die Entstehung und Folgen des sog. „Humping Effektes“ konnten *Beck u.a. (1992)* aufzeigen.

### **Thermometallurgische Modelle**

Mit Hilfe der thermometallurgischen Simulation werden anhand des Zeit-Temperaturverlaufes die Eigenschaften der Schweißnaht in der Wärme-einflusszone bestimmt. Dabei stehen vor allem die erwarteten Härte- und Festigkeitskennwerte sowie die resultierende Gefügestruktur im Mittelpunkt des Interesses. Das entstehende Gefüge ist dabei sowohl vom Werkstoff und seiner chemischen Zusammensetzung, als auch vom Abkühlverhalten abhängig. In der Simulation finden fast ausschließlich empirische bzw. semiempirische Modelle Verwendung, da nur diese das stark werkstoff-spezifische Verhalten hinreichend genau abbilden können. Man unterscheidet dabei zwei Klassen von Modellen. Bei der einen Gruppe wird die kontinuierliche Umwandlung des Metalls in isotherme Zeitschritte zerlegt. Im zweiten Fall werden die Ergebnisse direkt aus kontinuierlichen Schweiß-ZTU-Diagrammen implementiert.

Das Ersetzen kontinuierlicher Vorgänge durch stückweise, isotherme Schritte ist ein sehr verbreitetes Vorgehen und wird in der numerischen Schweißsimulation häufig angewandt. Für diffusionsgesteuerte, isotherme

Umwandlungen bei Stahlwerkstoffen wird die Gleichung von Johnson-Mehl-Avrami (JMAF, siehe Gleichung 3.6) (Avrami 1939, 1940, 1941) verwendet, die den zeitlichen Verlauf der Phasenanteile beschreibt:

$$P(\Theta) = 1 - e^{-b(\Theta)t^{n(\Theta)}} \quad \text{Gleichung 3.6}$$

Für die Simulation von Schweißverbindungen ist die Gleichung insofern zu modifizieren, als dass der Einfluss der transienten Größen, insbesondere der Temperatur als Funktion der Zeit, berücksichtigt wird. Anschaulich bedeutet dies, dass eine Annäherung von einem isothermen Umwandlungsverhalten zu einem kontinuierlichen Verhalten angestrebt werden muss. Hierzu entwickelte Scheil (1935) die Darstellung einer Treppenfunktion. Diese setzt sich aus Anteilen mit kurzzeitigen isothermen Umwandlungen und Anteilen mit rascher Abkühlung ohne Umwandlung zusammen. Die Anwendung dieser sog. „additivity rule“ (siehe Gleichung 3.7) auf das Modell von Johnson-Mehl-Avrami, erreicht eine sehr gute Annäherung an gemessene ZTU-Diagramme.

$$\int_0^t \frac{d\xi}{\tau(\Theta, p(t))} = 1 \quad \text{Gleichung 3.7}$$

Eine weitere Ergänzung stellt das Gesetz von Koistinen und Marburger (1959) dar. Dies beschreibt die Umwandlung in Martensit, welche durch einen Umklappvorgang beschrieben ist und durch die bisherigen Modelle nicht ausreichend erfasst ist. Dieses Modell stellt den hauptsächlich von der Temperatur abhängigen Mechanismus formell wie folgt dar:

$$P(\Theta) = \bar{P}(1 - e^{-c_u(M_s - \Theta)}) \quad \text{mit } \Theta \leq M_s \quad \text{Gleichung 3.8}$$

Das Modell von Leblond (1986) bzw. (1989) stellt einen halbempirischen, mathematischen Ansatz zur Beschreibung des diffusionsgesteuerten Umwandlungsverhaltens von Stählen dar. Das Modell basiert auf der JMAF und beschreibt die zeitliche Änderung des Phasenanteils, in Abhängigkeit von den temperaturabhängigen Parametern.

$$\frac{dP(\Theta)}{dt} = n \left( \frac{\bar{P}(\Theta) - P_i(\Theta)}{TR(\Theta)} \right) \left( \ln \left( \frac{\bar{P}(\Theta)}{\bar{P}(\Theta) - P_i(\Theta)} \right) \right)^{\left( \frac{n(\Theta)-1}{n(\Theta)} \right)} \quad \text{Gleichung 3.9}$$

Durch Definition weiterer Variablen und durch Umwandlung der Gleichung erhält man das sog. verallgemeinerte Leblond Modell:

$$\frac{dP_i}{dt} = n_{ij} \cdot \left( \frac{K_{ij} P_{ij} - K'_{ij} P_{ij}}{TR(\Theta)} \right) \left( \ln \left( \frac{K_{ij} (P_i - P_j)}{K_{ij} P_{ij} - K'_{ij} P_{ij}} \right) \right)^{\left( \frac{n-1}{n} \right)} \quad \text{Gleichung 3.10}$$

Die Ermittlung von  $dP_i/dt$  erfolgt durch Bestimmung der Werte  $K$ ,  $K'$ ,  $TR$  und  $n$  aus einem experimentell ermittelten, kontinuierlichen ZTU-Diagramm.

Mit Hilfe dieses Modells ist es also möglich basierend auf empirischen Ergebnissen die Phasenübergänge mathematisch zu beschreiben. Die Einbindung der metallurgischen Vorgänge beim Laserstrahlschweißen in ein Simulationsmodell mit Hilfe des Modells von Leblond zeigt *Buchmayr (1991)* auf.

Einen vergleichbaren Ansatz für die temperaturabhängigen Ausbildungen für Aluminium entwickelten *Myhr und Grong (1991)*. Eine Implementierung der Gefügeumwandlung in ein kommerzielles FE-System wird von *Schweiger (1992)* erläutert.

Allgemein ist festzustellen, dass die Vorhersage der zu erwartenden Härte- und Festigkeitskennwerte nur mit Schweiß-ZTU-Diagrammen, welche die Kurzzeitmetallurgie beim Laserstrahlschweißen berücksichtigen, in hinreichender Genauigkeit realisiert werden kann (*Dilthey 2000, Seyffart u. Hoffmann 1999*).

### Thermomechanische und mechanische Modelle

Weiterhin existieren zahlreiche Ansätze, die unter Berücksichtigung der metallurgischen Veränderungen die thermomechanischen Eigenschaften der geschweißten Bauteile ermitteln. In diesem Zusammenhang werden die resultierenden Eigenspannungen und Bauteilverformungen analysiert. Der Ansatz von *Myhr u. Grong (1991)* wird beispielsweise von *Häuser u.a. (1999)* verwendet, um den Bauteilverzug zu berechnen. Auch *Goldak u.a. (1992)* oder *Schweiger (1992)* ermitteln die resultierenden Eigenspannungen und den Werkstückverzug unter Berücksichtigungen der Gefügeumwandlung. *Hilbinger und Bergmann (1997)* verwenden dazu ein Werkstoffmodell, das die Gefügeumwandlung über eine Anpassung des E-Moduls berücksichtigt und bestimmen so die resultierenden Eigenspannungen.

Durch die Verknüpfung von rein thermischen und thermomechanischen Modellen zeigt Otto (1997) die Vorgänge am Beginn und am Ende der Schweißnaht, sog. transiente Prozesse, auf.

Ferner existieren in der Literatur zahlreiche Hinweise auf Untersuchungen der Eigenspannungen und Bauteilverformungen, hauptsächlich für Bauteilausschnitte bzw. kleine Bauteile mit entsprechend kurzen Schweißnähten (Ahamanache u.a. 1996, Hillebrand 1997, Carmignani u.a. 1999, Kaßner u. Wohlfahrt 1997, Kaßner u. Wohlfahrt 1999).

Die Simulation komplexer Strukturen mittels eines entwickelten FE-Verfahrens zur Abbildung der mikrostrukturellen Eigenschaften und der thermischen Spannungen zeigt Goldack u.a. (2000) auf. Dabei finden Verfahren, die auf einer Kombination unterschiedlich detaillierter FE-Netze aufsetzen, Verwendung.

Die vorgestellten Lösungen verwenden bei der thermomechanischen Simulation fast ausschließlich eigene FE-Software, einzig Kaßner u. Wohlfahrt (1999) und Voß u.a. (1998) greifen auf kommerzielle Simulationssysteme modifiziert durch eigene Modellierungsmethoden zurück. Der Stand der Technik der thermomechanischen Simulation bildet die mechanischen Vorgänge im Werkstück sehr exakt ab. Allerdings ist auf Grund der ausgeprägten Nichtlinearitäten der Bedarf an Rechenzeit und Speicherplatz sehr hoch. Hier eignen sich mechanische Ersatzmodelle, die die elastische Reaktion des Bauteils auf die Schrumpfung der Schweißnaht abbilden, um qualitative Aussagen zum Wärmeverzug treffen zu können (Lenz u.a. 1999).

Übergreifende, planerische Vorgehensweisen haben nur sehr wenige Autoren dargestellt. Kadivar u.a. (2000) beschreibt, wie die Schweißfolge für eine spezifische Naht mit Hilfe der FEM hinsichtlich Verzug optimiert werden kann. Rick (2001) entwickelte eine Methode zur simulationsgestützten Gestaltung von Produkt und Prozess beim Laserstrahlschweißen.

Das physikalisch sehr komplexe Laserstrahlschweißen ist Inhalt vieler Forschungsprojekte. Die Mehrzahl davon untersucht einzelne Teilbereiche sehr intensiv, einige wenige beschäftigen sich mit übergeordneten Ersatzmodellen, um die Prozess- und die Produkteigenschaften ganzheitlich zu betrachten. Von der Vision im Bereich des Laserstrahlschweißens umfangreiche experimentelle Untersuchungen zu reduzieren und durch schnelle, kostengünstige Studien mit Hilfe von Computersimulationen zu ersetzen, ist der derzeitige Stand der

Technik noch weit entfernt. Simulationswerkzeuge werden in der Industrie überwiegend für die Überprüfung der Durchführbarkeit von Schweißprozessen, insbesondere von automatisierten Schweißverfahren, eingesetzt. Als Modellierungsmethode kommt die 3D-Bewegungssimulation basierend auf 3D-CAD-Daten zum Einsatz. Die Abbildung von Produkt- und Prozesseigenschaften mit Hilfe der FEM steht derzeit noch an der Schwelle der industriellen Nutzbarkeit.

### 3.2.3 Modellbildung des Temperaturfeldes

Der Schwerpunkt der Simulation des Laserstrahlschweißens ist die Berechnung des Temperaturfeldes im Bauteil. Die Grundlage hierzu ist die Wärmeleitungsgleichung. Diese lässt sich durch die Betrachtung der Energiebilanz an einem infinitesimalen Volumenelement mit den Kantenlängen  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  über die Zeit  $dt$  herleiten (siehe Abbildung 3.8).

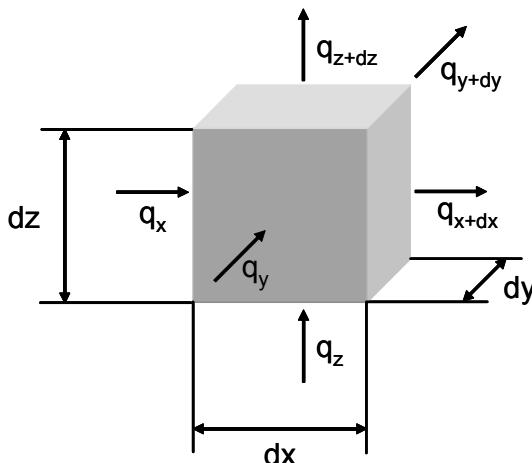


Abbildung 3.8: Wärmeflüsse an einem infinitesimalen, dreidimensionalen Körper

An den Außenflächen des Körpers werden durch die Temperaturdifferenz mit der Umgebung flächenbezogene Wärmeströme  $q$  [ $\text{W/m}^2$ ] induziert. Die Änderung der Wärmemenge  $Q[\text{J}]$  in  $x$ -Richtung beträgt dabei unter Vernachlässigung der quadratischen Terme:

$$dQ_x = q_x dydz dt - q_{x+dx} dydz dt = -\frac{\partial}{\partial_x} q_x dx dy dz dt \quad \text{Gleichung 3.11}$$

Analog dazu wird die Wärmemenge  $Q[J]$  in y- und z-Richtung berechnet. Die Gesamtänderung der Wärmemenge ergibt sich damit zu

$$dQ = dQ_x + dQ_y + dQ_z \quad \text{bzw.}$$

$$dQ = -\left[ \frac{\partial}{\partial_x} q_x + \frac{\partial}{\partial_y} q_y + \frac{\partial}{\partial_z} q_z \right] dx dy dz dt \quad \text{Gleichung 3.12}$$

Über den zeitlichen Temperaturgradienten  $\dot{T} = \partial/\partial_t T$  in Verbindung mit der Dichte  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] und der spezifischen Wärmekapazität  $c$  [J/kgK] ergibt sich:

$$dQ = c\rho\dot{T} dx dy dz dt$$

$$c\rho\dot{T} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad \text{Gleichung 3.13}$$

Mit Gleichung 3.13 sind Wärmeänderungen durch eine Temperaturdifferenz beschrieben. Für die Schweißsimulation wird dieser Ansatz um bewegte Wärmequellen erweitert. Deshalb wird der zusätzliche volumenbezogene Wärmestrom  $\dot{Q}$  [W/m<sup>3</sup>] hinzugefügt und der zusätzliche translatorische Term  $-c\rho \cdot \vec{v} \cdot \nabla T$  ergänzt, der einen Geschwindigkeitsvektor  $\vec{v} = [v_x, v_y, v_z]^T$  der Wärmequelle mit dem Temperaturgradienten  $\nabla T = [T_x, T_y, T_z]^T$  im Werkstück verbindet. Das negative Vorzeichen entspricht der Modellvorstellung eines bewegten Bauteils und einer feststehenden Wärmequelle, da die Wärme durch den Massentransport des Werkstücks entgegengesetzt der relativen Wärmequellenbewegung abgeführt wird. Mit diesen Erweiterungen ergibt sich die verallgemeinerte Wärmeleitungsgleichung nach *Fourier und Kirchhoff*.

$$\dot{T} = \frac{1}{c\rho} \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \frac{\dot{Q}}{c\rho} - \vec{v} \cdot \nabla T \quad \text{Gleichung 3.14}$$

Hierbei handelt es sich um eine quasi stationäre partielle Differentialgleichung 2. Ordnung, die bei Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischer Wärmekapazität nichtlinear wird.

Zur Lösung dieser Gleichung muss deshalb eine eindeutige Anfangsbedingung definiert werden. Zusätzlich können weitere Randbedingungen angegeben werden.

Die nötige Anfangsbedingung wird durch das räumliche Temperaturfeld  $T(x,y,z)$  zur Zeit  $t_0=0$  definiert. Meist wird ein konstantes Temperaturfeld bei Raum- oder Vorwärmtemperatur angenommen. Es ist auch möglich ein ortsabhängiges Feld, wie es sich z.B. beim Schweißen mehrerer Nähte ergibt, zu verwenden.

Als Randbedingung 1. Art wird die Temperaturvorgabe auf einem Teil der Randoberfläche bezeichnet. Diese ist in der Regel konstant, um z.B. Unendlichkeitsverhalten zu beschreiben. Eine Randbedingung 2. Art umfasst vorgegebene Wärmeströme  $q_r$  [ $\text{W/m}^2$ ] auf der Oberfläche, die z.B. zur Modellierung von Wärmequellen meist einen positiven Wärmestrom in das Bauteil leiten. Bei der Modellierung des Laserstrahlschweißens wird deshalb die Energieeinbringung durch den Laser in der Regel als Randbedingung 2. Art definiert. Randbedingungen 3. Art beschreiben Wärmeaustauschvorgänge über die Oberfläche, die von der Temperaturdifferenz abhängen. Damit wird die Wärmeabgabe durch Konvektion und Strahlung mit der Wärmeübergangszahl  $\alpha$  [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ] definiert.

Diese Gleichung kann analytisch nur mit zahlreichen Vereinfachungen hinsichtlich Geometrie, Wärmequellen, Werkstoffeigenschaften und Randbedingungen gelöst werden. Diese Nachteile können durch den Einsatz numerischer Methoden überwunden werden, die eine wesentlich größere Flexibilität im Hinblick auf die Aufgabenstellung und ihre Lösung ermöglichen.

#### 3.2.4 Simulation von Umformprozessen

Die Modellierung von Umformprozessen hat die Bestimmung der Prozessparameter und die Optimierung der Werkzeuggeometrie sowie der resultierenden Bauteileigenschaften zum Ziel. Dazu muss der reale Umformvorgang in ein idealisiertes physikalisches Ersatzmodell überführt werden und dieses vor der realen Fertigung untersucht werden. Auch in diesem Bereich existieren abhängig von der Komplexität des betrachteten Umformvorganges unterschiedliche Methoden der Modellierung. Diese werden in analytische, halbanalytische und numerische Verfahren eingeteilt.

**Analytische Methoden** beinhalten Ansätze der elementaren Theorie der Plastomechanik und dienen der groben Abschätzung des Umformprozesses. Dabei wird bei der Modellierung von einer vereinfachten Formänderungs-kinematik ausgegangen.

**Halbanalytische Methoden** weisen vor allem im Bereich der Biegeumformprozesse eine sehr große Bedeutung für die Simulation auf. Die realen geometrischen Verhältnisse werden vereinfacht und idealisiert abgebildet.

**Numerische Modelle** gewinnen durch die Einführung leistungsstarker Rechner immer mehr an Bedeutung. Diese Verfahren werden in die Finite-Differenzen-Methode, die Boundary-Element-Methode und die FEM unterteilt. Für zahlreiche Umformverfahren, z.B. die Ziehsimulation, hat sich auf Grund der Komplexität des Prozesses und der hohen Flexibilität der Modellierungsmöglichkeiten die FEM durchgesetzt (*Roll u. Tekkaya 1993*). In dieser Arbeit werden die Simulation von Tiefziehprozessen und die FEM-Simulation des wirkmedienbasierten Umformens näher betrachtet.

Auf Grund der speziellen Anforderungen an die Softwareumgebung existieren zahlreiche kommerzielle FE-Systeme. Dies hat dazu geführt, dass sich in den letzten Jahren die Simulation von Umformprozessen als integraler Bestandteil der Produktentwicklung in der Automobilindustrie etabliert hat (*Kirmße u. Wesselmann 1998*). Im Folgenden seien die grundlegenden Anforderungen an die Modellierung, die zum Verständnis dieser Arbeit nötig sind, zusammengefasst.

Die Modellbildung erfolgt mit Hilfe einer Diskretisierung in Finite Elemente. Bei Umformkomponenten handelt es sich in der Regel um mehrfach gekrümmte flächige Bauteile, so dass eine Beschreibung durch Flächen-Elemente unumgänglich ist. Da sowohl Biegeeffekte in Dickenrichtung als auch der Kontakt zum Werkzeug hinreichend genau abgebildet werden müssen, finden auf Grund der großen auftretenden Verzerrungen Schalen- bzw. Membranelemente Verwendung (*Bathe 1990*). Neben den Bauteilen müssen auch die Werkzeuge, die die Abformung der Bauteilgeometrie gewährleisten und für die Übertragung der Umformkräfte sorgen, modelliert werden. Die massiven Werkzeuge weisen im Vergleich zu den Blechbauteilen eine sehr hohe Steifigkeit auf, so dass in Anbetracht der Rechenzeiten nur deren Oberflächen abgebildet werden (*Nagtegaal u.a. 1998*). Dazu wird die CAD-Geometrie der Werkzeuge z.B. durch Dreieckselemente approximiert.

Ein wichtiger Aspekt bei der Modellierung der Werkzeuge ist die Beschreibung des Kontaktes zum Bauteil, der mit Reibungsmodellen abgebildet werden muss. Die Oberfläche bei Blechbauteilen ist im Verhältnis zum Volumen sehr groß, d.h. der Kontakt zu den umliegenden Flächen ist sehr groß. Das hat zur Folge, dass die Güte einer FE-Berechnung sehr stark von der richtigen Annahme der Reibwerte bestimmt wird (*Pier 1999*).

Ebenfalls entscheidend für die Qualität der Berechnung des Eigenspannungszustandes, der Instabilitäten und der Rückfederung, ist eine gewissenhafte Werkstoffbeschreibung. Dies erfordert eine ständige Entwicklung neuer bzw. die Verbesserung bestehender Materialmodelle (*Kolleck 1999*). Derzeit unterscheidet man nach Abbildung 3.4 Materialmodelle für große Formänderungen grundsätzlich in Stoffmodelle ohne elastisches Verhalten (z.B. starr-plastisch oder visko-plastisch) und Modelle mit elastischem Verhalten (z.B. elastisch-plastisch). Zur Beschreibung der Blechumformung werden hauptsächlich elastische Modelle eingesetzt, da diese die Ermittlung des Fließbeginns, die Eigenspannungen und die Rückfederung berücksichtigen (*Pier 1999*).

Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt durch eine explizite oder implizite Zeitintegration (*Tekkaya 1998*). Bei der impliziten Berechnung wird der Umformprozess als statischer Vorgang abgebildet, d.h. dynamische Kräfte werden nicht berücksichtigt. Das Gleichgewicht zur Lösung wird durch den Einsatz von Iterationsverfahren gefunden. Dies hat zur Folge, dass große Gleichungssysteme und eine komplexe Steifigkeitsmatrix für jeden Zeitschritt aufgestellt werden müssen. Dies bedingt einen hohen Bedarf an Speicherplatz und Rechenzeit, sichert jedoch ein hohes Maß an Genauigkeit (*Lange u.a. 1993*).

Die explizite Betrachtung beschreibt den Prozess als dynamisches Problem, d.h. es werden Bewegungsgleichungen formuliert, die über ein Differenzenschema gelöst werden. Somit werden große Matrizen in der Berechnung vermieden, jedoch können auf Grund der eingeschränkten Stabilität nur begrenzte Zeitschritte betrachtet werden.

Der Einsatz beider Verfahren, sowie die Vor- und Nachteile werden häufig kontrovers diskutiert (*Nagtegaal u.a. 1998*).

Nach dem Öffnen der Werkzeuge und dem Herausnehmen des Bauteils erfolgt ein sog. Rücksprung, der möglichst gering sein sollte (*Doege u.a. 1998*). Nach

dem Rücksprung befindet sich die Geometrie mit den vorhandenen Eigenspannungen im Gleichgewicht. Durch Folgeoperationen wird nun das Gleichgewicht im Bauteil gestört und die bisher eingefrorenen elastischen Dehnungskomponenten werden frei. Die Rückfederung wird im Wesentlichen durch das elastische Verhalten des Werkstoffs bestimmt. Dieses Verhalten wird in den meisten Simulationsprogrammen durch einen konstanten Elastizitätsmodul (E-Modul) berücksichtigt. Untersuchungen haben ergeben, dass der E-Modul nicht für alle Werkstoffe als konstanter Wert angenommen werden kann (*Kolleck 1999*). Vielmehr ist der E-Modul werkstoff- und belastungsabhängig. Die Rückfederung ist zudem eine Funktion der Bauteilgeometrie und des Umformprozesses, die derzeit mit Hilfe der FEM nicht immer ausreichend genau vorherzusagen ist (*Wagon 1996*). Das Auflösen der elastischen Dehnungen und die Einstellung eines neuen Gleichgewichtes sind in der Modellierung sehr komplex und stehen erst am Anfang der industriellen Nutzung

Ein weiterer Teilaспект der Umformsimulation ist die Modellierung der Niederhalterkraft. Angestrebt ist eine Ermittlung des idealen Zeit-Kraft-Verlaufs zur Vermeidung von Falten und Rissen im Bauteil (*Neugebauer u. Bräunlich 1997*). Hierzu wurden Faltenbildungskriterien mathematisch beschrieben (*Doege u.a. 1996*) und daraus die optimale Niederhalterkraft geregelt. Ferner existieren weitere Ansätze zur Abbildung elastischer Niederhalter.

Die FEM Simulation des Tiefziehens ist industrieller Stand der Technik, dennoch sind zahlreiche Teilapects zur Vorhersage der resultierenden Bauteileigenschaften und der Ermittlung der idealen Prozessparameter Inhalt aktueller Forschungsarbeiten. Insbesondere im Bereich des Leichtbaus, wo verbesserte Bauteileigenschaften mit einer drastischen Reduktion des Gewichtes einhergehen, leistet die FEM der Umformprozesse wichtige Dienste (*Hoffmann u. Kohnhäuser 1999*).

#### **3.2.5 Durchgängige Simulation von Prozessketten mit Hilfe der FEM**

Die Betrachtung des Tiefzieh-, IHU- und Laserstrahlschweißprozesses zeigt, dass in der Simulation der einzelnen Teilbereiche ein umfangreiches Wissen vorliegt. Der Schwerpunkt bisheriger Forschungsarbeiten lag in der hinreichend genauen Abbildung der komplexen physikalischen Phänomene. Mit

zunehmender Rechnerleistung konnten immer komplexere und sehr detaillierte Modelle der einzelnen Prozesse berechnet werden. Zahlreiche Untersuchungen haben dabei gezeigt, dass in Teilbereichen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen digitalen und physikalischen Versuchen erreicht werden konnte. Allerdings wurde beobachtet, dass insbesondere im Bereich des Laserstrahlschweißens Belastungen aus vorangegangenen Prozessen die Ergebnisgenauigkeit maßgeblich beeinflussen. Diese Verknüpfung der Prozesse auf Basis der FEM fand bisher keine Beachtung und ist erst seit einiger Zeit im Fokus des Interesses. Auf Grund der heterogenen Systemlandschaft in der FE-Simulation und den unterschiedlichen Betrachtungsweisen der Fertigungsprozesse existieren noch keinerlei Standards und Vorgehensweisen zur Übertragung von Ergebnissen aus der Umformsimulation in eine nachfolgende Fügesimulation. In diesem Bereich sind nur sehr wenige, teilweise unveröffentlichte Arbeiten bekannt.

*Martin u. Dölle (2000)* stellen einen Modellaufbau vor, der das Clinchen und die anschließende Verbindungsbelastung miteinander verknüpft. Dabei wird der Prozess des Clinchens mit Hilfe der Umformsimulation in einem zweidimensionalen Halbmodell abgebildet. Die anschließende Belastung der Verbindung wurde ebenfalls mit diesem Umformprogramm und dem bereits vorhandenen Modell berechnet. Dabei wurde die Belastung als äußere Randbedingung in einem zweiten Berechnungsschritt ermittelt. So war es möglich, die Ergebnisse der Umformsimulation und somit des Clinchens in der Belastungssimulation direkt zu berücksichtigen.

Der Softwarehersteller ESI Group hat in jüngster Zeit erste Voruntersuchungen zur Kopplung der Ergebnisse der Umformsimulation mit der Simulation des Laserstrahlschweißens durchgeführt. Die Bemühungen beschränken sich auf zwei bisher unveröffentlichte, vereinfachte Sonderfälle. Die betrachteten Geometrien wurden mit ca. 600 Elementen diskretisiert. Die Lage der Schweißnaht befindet sich in diesen internen Beispielen nicht auf der umgeformten Struktur, sondern auf einem zusätzlichen Bauteil. Das zusätzliche Bauteil wird dabei mit Volumenelementen modelliert, für die Übertragung der Informationen aus der Umformsimulation werden dabei Schalenelemente verwendet. Diese Schalenelemente können jedoch das thermomechanische Verhalten des Bauteils nicht hinreichend genau abbilden (*Faure u.a. 2003*).

### 3.3 Zusammenfassung und Ableitung des Handlungsbedarfs

Der Stand der Technik hat gezeigt, dass das Potenzial für eine digitale Absicherung von Produkt- und Prozesseigenschaften auf der Ebene der technologischen Prozesse sehr groß ist. Bisher scheitert der industrielle Einsatz der Simulation des Laserstrahlschweißens aus unterschiedlichen, bereits dargelegten Gründen.

Kapitel 3 erläutert den derzeitig zugänglichen Stand der Technik innerhalb der für diese Arbeit wichtigen Themenfelder. Aufbauend auf der CIM-Vorgehensweise wurden die Entwicklungen und Grundgedanken der *Virtuellen Produktion* und der *Digitalen Fabrik* aufgezeigt. Aus diesen Strategien lässt sich das Bestreben nach einer durchgängigen, digitalen Abbildung aller realen Prozesse in der Produktentstehung ableiten. Nur mit Hilfe einer ganzheitlichen Absicherung durch digitale Modelle ist es möglich die Anzahl der realen Prototypen und die damit einhergehenden Entwicklungskosten drastisch zu reduzieren. Derzeit ist eine Durchgängigkeit in der Simulation nur ansatzweise hinsichtlich der Geometrieinformation realisiert. Ergebnisse von Berechnungen auf Basis der FEM werden nicht ausgetauscht. Es existieren zahlreiche, teilweise qualifizierte Berechnungsmodelle für einzelne Prozessschritte, die nur singulär betrachtet werden. Es ist offensichtlich und in der Praxis vielfach bestätigt, dass vorangegangene Fertigungsprozesse durch resultierende Spannungen oder auf Grund der Kaltverfestigung nachfolgende Prozesse maßgeblich beeinflussen. Diese Informationen werden bisher in der Simulation des Laserstrahlschweißens nicht berücksichtigt.

Die Modellierung von Tiefzieh- und IHU-Prozessen hat bereits einen erheblichen industriellen Reifegrad erreicht und findet vielfache Anwendung. Der Stand der Technik weist ferner nach, dass die FE-Methode ein geeignetes experimentierfähiges Werkzeug ist, um das Laserstrahlschweißen abzubilden. Der Prozess wird in zahlreichen Anwendungen auf physikalischer Ebene eingehend untersucht, wobei sich die vorhandenen Lösungen auf einzelne spezifische Fragestellungen beschränken. Nur wenige Anwendungen setzen sich mit dem übergeordneten Einsatz von Simulationsmodellen zu Untersuchungen des resultierenden Bauteilverzugs in der Fertigungsplanung auseinander.

Durch die Anwendung der FE-Simulation auf Prozessebene soll die Time to Market durch die Optimierung der Produktentstehung verkürzt werden. Die Reduktion des experimentellen, physikalischen Aufwands und die frühzeitige Bereitstellung von Prozesswissen über mehrere Prozessschritte hinweg können in verschiedenen Phasen der Produktentwicklung die Kosten drastisch senken.

Im Rahmen dieser Arbeit soll deshalb eine Simulationsmethode für das Laserstrahlschweißen entwickelt werden, die folgende Anforderungen erfüllen kann:

- Modellierung unterschiedlicher Bauteile industrieller Relevanz
- Abbildung diverser Laserschweißnähte, unabhängig von Art und Lage
- Genaue Abbildung der Wärmeeinbringung durch den Laser inklusive aller relevanten Einflussgrößen (z.B. Prozessgas) durch ein verifiziertes Ersatzmodell
- Hinreichend genaue Repräsentation aller wichtigen thermischen und mechanischen Randbedingungen
- **Berücksichtigung der Belastungen durch vorangegangene Umformprozesse (Tiefziehen und IHU)**
- **Verwendung eines neutralen, softwareunabhängigen Dateiformates zur Übertragung der Vorbelastung**
- **Diskretisierung der Bauteile durch Volumenelemente zur exakten Abbildung von metallurgischen Phänomenen und des resultierenden Verzugs**
- Berechnung des resultierenden Bauteilverzugs nach dem Umformen und Laserstrahlschweißen
- Experimentelle Verifikation der Ergebnisse

Der Kern der Arbeit, die Verwendung der Ergebnisse der Umformsimulation als Ausgangszustand für die Simulation des Laserstrahlschweißens mit Hilfe der FEM, ist in Abbildung 3.9 visualisiert.

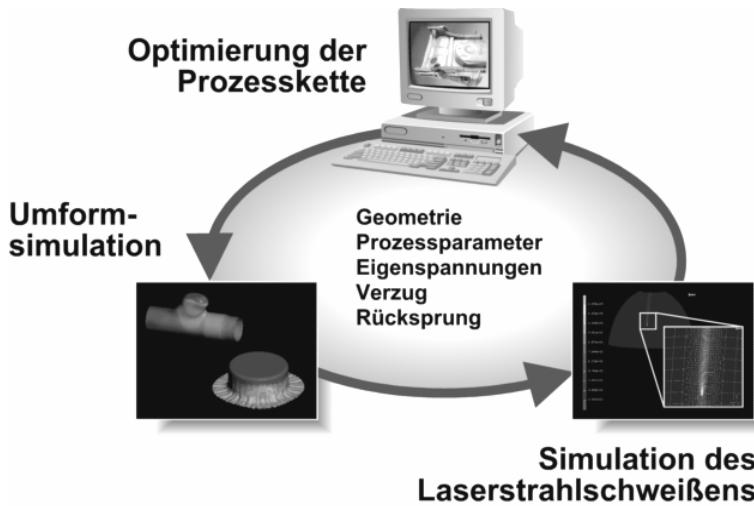


Abbildung 3.9: Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung vorangegangener Umformprozesse

---

## 4 Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen

In diesem Kapitel wird eine grundsätzliche Methode zur Verknüpfung der Ergebnisse der Umformsimulation mit der Simulation des Laserstrahlschweißens diskutiert. Dabei wird der Schwerpunkt auf eine durchgängige Betrachtungsweise der Modellierung des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Umformsimulation gelegt. Zur Umsetzung wurden die kommerziellen, nichtlinearen FE-Programme *PamStamp* (Umformsimulation) und *Sysweld* (Schweißsimulation) der Firma *ESI Group* verwendet. Alle Unterroutinen wurden in der Programmiersprache *Fortran* gestaltet, so dass prinzipiell jedes nichtlineare FE-Programm für die Kopplung verwendet werden kann.

Die entwickelte Methode unterteilt sich in sieben Schritte (siehe Abbildung 4.1), die in den einzelnen Unterkapiteln ausführlich dargestellt sind. Die Kapitel 4.3 – 4.5 (dunkel hinterlegt) stellen den Kern der Arbeit dar.

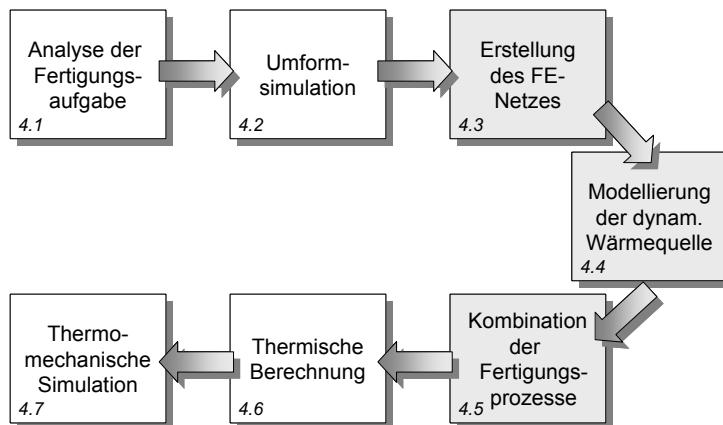


Abbildung 4.1: Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen

## 4.1 Analyse der Fertigungsaufgabe

Analyse (*griechisch = Auflösung*) bedeutet die Zersetzung eines zusammenhängenden Sachverhalts in seine Einzelteile (Brockhaus 2003). Die Analyse eines technischen Systems oder Prozesses dient der Veranschaulichung und der Verständnisgewinnung.

Ziel der Analyse der Fertigungsaufgabe ist es die Bauteilgestaltung, die Konstruktion der Umformwerkzeuge, die Lage und Art der Schweißnähte sowie die Werkstoffauswahl so aufeinander abzustimmen, dass die funktionalen Anforderungen an das Bauteil erfüllt wird und der Fertigungsprozess durchgeführt werden kann. Die Wechselwirkungen zwischen Konstruktion, Werkstoff und Fertigungsprozess werden dabei unter dem Begriff „Schweißbarkeit“ zusammengefasst. Unter Schweißbarkeit versteht man nach DIN 8528-1 die Schweißeignung des Werkstoffs, die Schweißsicherheit der Konstruktion und die Schweißmöglichkeit der Fertigung.

Aus diesen Anforderungen ergeben sich zahlreiche Randbedingungen für den Umform- und Schweißprozess. Die wichtigsten sind dabei der Werkstoff und die Fertigungstechnik.

### Werkstoff

Das herzustellende Bauteil muss einerseits im Umformprozess mit einem schweißbaren Werkstoff dargestellt werden können. Andererseits müssen bereits frühzeitig der auftretende Gefügezustand, Beschichtungen, Vorbehandlungen etc. bezüglich ihres Einflusses auf den Schweißprozess berücksichtigt werden. Der Schweißprozess muss hinsichtlich Laserleistung, Fokusdurchmesser, Zusatzwerkstoff und Prozessgas an diesen Werkstoff angepasst werden. Für die Anwendungsbeispiele in Kapitel 6 fanden weiche Tiefziehstähle Verwendung. Nach DIN EN 10130 umfasst diese Stahlgruppe die unlegierten, konventionellen Ziehgüten, die ein rein ferritisches Gefüge aufweisen und gute Tief- und Streckzieheigenschaften besitzen. Im Zuge des Leichtbaus mit Stahl wird diese Werkstoffgruppe immer stärker durch höher- und hochfeste Stähle substituiert. In den Untersuchungen dienen die weichen Tiefziehstähle auf Grund ihrer weitreichenden Einsatzbereiche und der Verfügbarkeit der Werkstoffkennwerte als Referenzwerkstoffe.

Bereits zu einem sehr frühen Zeitpunkt ist der Bedarf an genauen Werkstoffdaten sowohl für die Umformsimulation als auch für die Simulation des Laserstrahlschweißens zu klären. Für gängige Werkstoffe liegen die benötigten Werkstoffdaten meist in ausreichender Genauigkeit vor, für weniger verbreitete Werkstoffe müssen die Daten sehr zeit- und kostenintensiv ermittelt werden.

Für die Simulation des Umformvorgangs sind insbesondere die elastisch-plastischen Werkstoffkennwerte Streckgrenze, Fließkurve, Anisotropie, Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl von Bedeutung (*Hoffmann u.a. 2001*). Der elastische Bereich des Werkstoffs wird durch das Elastizitätsmodul und die Querkontraktionszahl beschrieben, der plastische Bereich durch die Fließkurve. Für das Ergebnis der Berechnung von Stahlwerkstoffen ist die Anisotropie von besonderer Bedeutung. Bei der Herstellung von Stahl liegt ein polykristalliner Werkstoff vor, d.h. die Kristalle sind zueinander unterschiedlich orientiert. Diese Orientierungen ergeben in ihrer Gesamtheit eine sog. Textur. Polykristalle mit Textur weisen in der Regel anisotropes, also richtungs-abhängiges, Werkstoffverhalten auf (*Hallfeldt 2002*). Die Bestimmung der senkrechten und ebenen Anisotropie erfolgt im Zugversuch, mit dessen Hilfe an einer Flachzugprobe die Änderung der Probenbreite zur Probendicke ermittelt wird. Bei dieser Prüfung fließt das Material je nach Verhalten des Werkstoffes aus der Blechebene oder -dicke. Dies wird mathematisch durch den r-Wert definiert, der das Verhältnis der logarithmischen Formänderung beschreibt. Je höher die senkrechte Anisotropie ist, desto höher ist das Vermögen des Werkstoffs aus der Blechebene zu fließen. Der überwiegend aus der Dicke fließende Werkstoff (kleiner r-Wert) dünnst stärker aus und bewirkt eine lokale Schwächung des Materials. Da in dieser Arbeit auf eine konstante Dicke während des Umformprozesses Wert gelegt wurde, fanden hauptsächlich Werkstoffe mit hohem r-Wert Verwendung.

Für die Simulation des Schweißvorgangs sind neben dem Zeit-Temperatur-Umwandlungsverhalten (metallurgische Phasen) thermische und thermomechanische Kennwerte von Bedeutung. Als thermische Kennwerte werden die Wärmeleitfähigkeit, die spezifische Wärmekapazität und die Umwandlungsenthalpien bezeichnet. Thermomechanische Daten sind das Elastizitätsmodul, der Wärmeausdehnungskoeffizient, die Querkontraktionszahl, die Fließspannung und das Verfestigungsverhalten sowie die Dichte. Diese Kennwerte müssen als temperaturabhängige Größen von Raum- bis zur Schmelztemperatur verfügbar sein. Für einige gängige Werkstoffe existieren

Tabellenwerke (z.B. *Touloukian 1967*) sowie Quellen der verschiedenen Werkstoffinstitutionen (z.B. *The British Iron and Steel Research Association 1953*), die zahlreiche der benötigten Daten enthalten. Für viele Werkstoffe sind temperaturabhängige Werkstoffdaten, insbesondere für Temperaturen nahe der Schmelztemperatur, nicht in der Literatur verfügbar. Nach *Radaj (1999)* kann in vielen Fällen eine Extrapolation der fehlenden Werte ausreichend sein. Für genaue Berechnungen müssen jedoch die Werte in aufwändigen Versuchen (z.B. Hochtemperatur-Zugversuche) ermittelt werden. Es existieren zahlreiche Bestrebungen, Datenbanken für die thermische Simulation aufzubauen. Diese sind bisher noch nicht öffentlich zugänglich.

In der hier vorgestellten Methode lagen durch Versuche gemessene, verifizierte Werkstoffdaten des verwendeten Werkstoffs S 235 JR vor. Die Metallurgie wurde über den halbempirischen mathematischen Ansatz zur Beschreibung des diffusionsgesteuerten Umwandlungsverhaltens nach *Leblond (1986, 1989)* implementiert (Gleichung 3.8 und 3.10).

### Die Fertigungstechnik

Das Umformwerkzeug muss so gestaltet sein, dass das Bauteil reproduzierbar abgebildet werden kann. Ferner ist es nötig, dass alle geplanten Schweißnähte für die Bearbeitungsoptik und die Handhabungskinematik frei zugänglich sind. Zusätzlich müssen die erzielten Oberflächen und die resultierenden Bauteiltoleranzen des Umformprozesses den hohen Ansprüchen der Lasertechnik genügen. Dabei spielt bei Tiefziehprozessen insbesondere die Teilungsebene des Umformwerkzeugs eine wichtige Rolle, da die Übergänge zwischen Ober- und Unterteil des Werkzeuges teilweise eine schlechtere Oberflächengüte und abweichende Toleranzen aufweisen.

Für eine Auswahl der Parameter muss in der Analysephase zunächst das abzubildende Objekt untersucht werden, damit der Simulationszweck bestimmt und die nötigen Vereinfachungen des realen Systems getroffen werden können. Dies ist insbesondere bei den betrachteten Prozessen der Blechumformung und des Laserstrahlschweißens notwendig, da diese Technologien physikalisch sehr komplex sind. Die Parameter eines Prozesses bilden dabei die Schnittstelle zwischen Realität und Modell. Die Erfassung aller Prozessparameter würde ein perfektes Modell beschreiben. Ein solches Modell würde aber bereits in einem statischen Zustand alle Kapazitäten sprengen, geschweige denn eine dynamische Simulation ermöglichen. Daher muss die

Auswahl der für die Simulation wichtigen Parameter ebenfalls in der Analyse der Fertigungsaufgabe durchgeführt werden.

In der fertigungstechnischen Umsetzung sind der Umform- und der Fügeprozess, d.h. die hydraulischen Pressen und die Laseranlagen, räumlich und personell getrennt. Dies gilt in der Regel auch für die Simulation der Prozesse. Der Spezialist der Umformsimulation ist häufig in einer anderen Abteilung als der Fachmann für die Simulation des Fügeprozesses zu finden. Aus diesem Grund dient die Analyse der Fertigungsaufgabe auch dazu, allen Beteiligten die Anforderungen der einzelnen Teilbereiche zu erläutern und ein gemeinsames Bewusstsein für die zu lösende Fertigungsaufgabe zu schaffen.

## 4.2 Ergebnisse aus der Umformsimulation

Die Einstellparameter und Zielgrößen der Blechumformung sind in Kap 2.2.3 beschrieben, die Vorgehensweise bei der Simulation mit Hilfe der FEM ist in Kap. 3.2.4 dargestellt. Im realen Fertigungsprozess wird das Bauteil nach dem Umformen aus dem Werkzeug entnommen, zugeschnitten und evtl. abgekantet bzw. gefalzt. In einem nächsten Schritt wird es dann gefügt. Aus diesem Grund müssen in der Simulation ebenfalls alle während der Umformung durchgeführten Prozessschritte abgebildet werden. D.h. von eventuellen Vorbiegeoperationen bis hin zum Abkanten des Bauteils und dem anschließenden Ausspannen inklusive des Rücksprungs müssen alle Teilprozesse berechnet werden. Dies ist in der Umformsimulation Stand der Technik. Einzig die Rücksprungberechnung steht an der Schwelle der industriellen Nutzung. Das Ziel der Berechnung ist das Auflösen des hochenergetischen Zustandes des Bauteils nach dem Umformen in ein stabiles Gleichgewicht.

Während der Umformsimulation wird die Diskretisierung des Bauteils ständig den Anforderungen der Berechnung angepasst. Durch eine adaptive Vernetzung ist es möglich, z.B. in Bereichen enger Radien, das FE-Netz schrittweise zu verfeinern und bereits berechnete Attribute auf dieses Netz zu projizieren. Am Ende der Berechnung wird das Netz wieder entfeinert und die Werte entsprechend übertragen. Als Ergebnis stehen somit für die Schweißsimulation folgende Informationen über das Bauteil und das Modell auf einem neutralen FE-Netz zur Verfügung:

- Elastische Dehnungen [ ]
- Eigenspannungen [N/mm<sup>2</sup>]
- Geometrie (bzw. plastische Dehnungen)
- Blechdickenverteilung [mm]
- Werkstoff und Materialmodell

In der Rücksprungberechnung werden alle plastischen Dehnungen im Bauteil in eine Verformung der Struktur umgewandelt (siehe Gleichung 3.4). Zurück bleiben eingefrorene elastische Dehnungen, welche mit den Eigenspannungen und der neuen geometrischen Form im energetischen Gleichgewicht stehen.

Gängige Umformsimulationssysteme erlauben es, diese Informationen in einer ASCII-Textdatei abzulegen. Diese beinhaltet die Geometrie des umgeformten Halbzeugs sowie sämtliche Werte der global-geometrischen plastischen Verformung und der Spannungsverteilung pro Element bzw. Integrationspunkt des Bauteils. Die Datei ist in der Regel in vier Bereiche unterteilt (siehe Abbildung 4.2).

Der erste Teil beinhaltet allgemeine Strukturdaten wie z.B. Anzahl und Art der Knoten und Elemente des Modells. Im zweiten Teil werden den Knoten kartesische Koordinaten zugewiesen und damit die Geometrie bestimmt. Der dritte Teil definiert in Abhängigkeit von den Knoten aus dem zweiten Teil die Lage und Nummerierung der Elemente. Der abschließende vierte Teil weist den Elementen aus dem dritten Teil die Ergebnisattribute Dehnung, Spannung und Blechdickenverteilung zu.

Das FE-Programm *Sysweld* stellt ein Übersetzungsprogramm zur Verfügung dass es erlaubt diese neutralen Textdateien in ein schweißsimulations-propriäres Format umzuwandeln. Das Programm erzeugt dabei zwei Ergebnisdateien, die Geometrieeinformation und Ergebnisse der Umformsimulation im *Sysweld*-Format beinhalten (siehe Abbildung 4.3).

Strukturdaten (Anzahl/Art der Elemente, Knoten etc.)							
AMAP							
6							
11	2	0	688	630	3		
DATE	03/10/15	HOUR	15/24/38				
VERS							
PSOL	2000						
Zuweisung von Koordinaten an Knoten							
NODE /	803	0.10677500E+04	-0.48652802E+03	0.61609698E+03			
NODE /	820	0.10607500E+04	-0.48652802E+03	0.61609698E+03			
NODE /	921	0.10617500E+04	-0.48764600E+03	0.61599298E+03			
NODE /	922	0.10627500E+04	-0.48764600E+03	0.61599200E+03			
....							
Definition der Elemente							
SHELL /	602	1	2436	2452	2453	2437	
SHELL /	603	1	2341	2357	2358	2342	
SHELL /	604	1	2357	2373	2374	2358	
....							
Zuweisung von Attributen							
SHELL 678							
0.222762E+01	0.629078E-01	0.129009E+00	0.324847E+00				
0.195319E+00	0.207806E+00	-0.475202E-02	0.000000E+00				
0.000000E+00	0.172588E+00	0.109491E+00	-0.432426E-02				
0.000000E+00	0.000000E+00	-0.198407E+00	-0.452483E-01				
0.441399E-02	0.000000E+00	0.000000E+00					
.....							

Abbildung 4.2: Morphologie der neutralen Ergebnisdatei der Umformsimulation

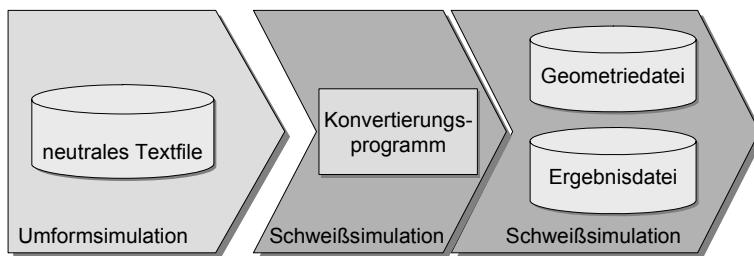


Abbildung 4.3: Übertragung einer neutralen Ergebnisdatei in ein Format der Schweißsimulation

Die Informationen bzgl. des verwendeten Materialmodells müssen gesondert übertragen werden und finden in der thermomechanischen Modellierung der Schweißsimulation Beachtung.

### 4.3 Erstellung des Finite Elemente-Netzes

Für die Schweißsimulation gibt es unterschiedliche Möglichkeiten die Diskretisierung der Geometrie durch Finite Elemente zu realisieren. Dabei ist die Vernetzung immer ein Kompromiss zwischen notwendiger Genauigkeit und akzeptabler Modellgröße. Beim Laserstrahlschweißen treten die höchsten Temperaturgradienten und Spannungen im Bereich der Schweißnaht auf. Aus diesem Grund muss die Struktur in diesem Gebiet besonders fein vernetzt werden.

Die Modellierung durch dreidimensionale Volumenelemente, sog. isoparametrische Hexaederelemente mit acht Knoten, ist die klassische Vernetzungsvariante in der Schweißsimulation. Diese Elemente können per Definition sowohl Phasenübergänge des Werkstoffs berücksichtigen als auch die ungleichmäßige Temperatureinbringung und die daraus resultierenden Temperaturgradienten über die Bauteildicke repräsentieren. Es existieren zwar bereits Ansätze diese Funktionalität auch für Schalenelemente zur Verfügung zu stellen, allerdings sind die Ergebnisse bisher nicht zufrieden stellend (*Faure u.a. 2003*).

Die realitätsnahe Abbildung der Wärmeinbringung setzt eine sehr hohe Auflösung im Bereich der Schweißnaht voraus, d.h. die Anzahl der Elemente im stark verfeinerten Netz ist sehr groß. Um die Modellgröße möglichst klein zu halten, wird die Struktur deshalb in den Bereichen kleiner Gradienten sehr grob und im Bereich großer Gradienten sehr fein vernetzt. Daraus ergeben sich drei Bereiche des FE-Netzes (siehe Abbildung 4.4).

Im Bereich A findet die Energieeinbringung statt. Dies hat sehr hohe Temperatur- und Spannungsgradienten zur Folge. Um deren Verlauf möglichst realitätsnah abzubilden, ist es erforderlich die Bauteildicke mit zwei bis vier Elementen nachzubilden. Versuche haben gezeigt, dass eine Kantenlänge kleiner oder gleich des halben Fokussdurchmessers des Lasers gute Ergebnisse liefert. Dieser sehr feine Bereich sollte sich an der Breite des Schmelzbades orientieren, d.h. sowohl in der Breite, als auch in der Ebene und Tiefe soll das Schmelzbad und der Schmelzbadquerschnitt mit Elementen der kleinsten Kantenlänge modelliert werden. Ferner ist darauf zu achten, dass das FE-Netz möglichst parallel und symmetrisch zur Schweißrichtung ausgerichtet ist. Dadurch werden numerische Fehler vermieden, das Konvergenzverhalten verbessert und die Energieeinbringung fehlerfrei abgebildet.

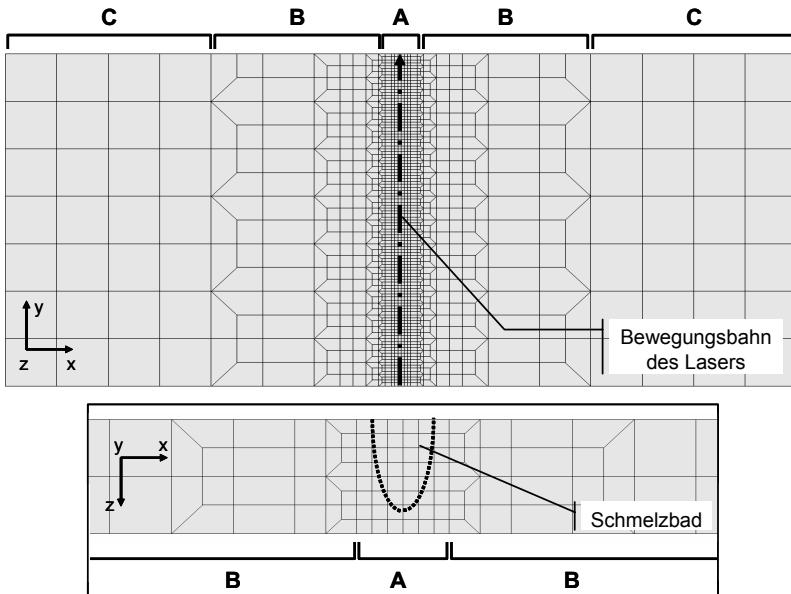


Abbildung 4.4: Verschiedene Bereiche eines FE-Netzes in Draufsicht und Querschnitt nach Lenz (2001): Nahtbereich A, Übergangsbereich B, unkritischer Bereich C

Der Bereich B stellt den Übergangsbereich zwischen feiner und grober Vernetzung dar. Dabei wird die Anzahl der Elemente sowohl in der Ebene als auch in der Dicke reduziert. Hierzu gibt es zwei Möglichkeiten. Die Entfeinerung kann mit verzerrten Hexaederelementen oder durch eine Vernetzung mit Zwischenknoten realisiert werden (siehe Abbildung 4.5).

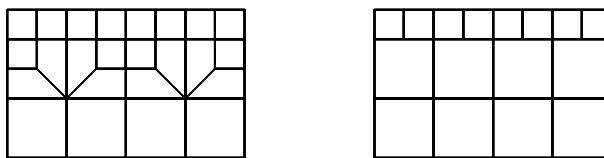


Abbildung 4.5: FE-Netzverfeinerung mit verzerrten Hexaederelementen (links) und Zwischenknoten (rechts)

Die Qualität der Berechnungsergebnisse ist nach Lenz (2001) in etwa vergleichbar. Der einzige Unterschied besteht in der Art der Modellierung. Zwischenknoten können von zahlreichen FE-Systemen automatisch erstellt werden, eine derartige Modellierung erfordert aber eine Kopplung der freien Knoten auf Elementkanten. Diese Kopplungsbedingungen müssen gesondert definiert werden. Bei verzerrten Hexaederelementen sind keine weiteren Randbedingungen nötig, dafür müssen sie manuell erzeugt werden. Der Modellierungsaufwand beider Möglichkeiten ist annähernd gleich.

Der Bereich C des FE-Netzes ist als unkritisch einzustufen. Unter Umständen sind hier die Flächen der Einspannung feiner zu vernetzen. Im Allgemeinen ist ein Element über die Dicke und sehr flächige Elemente ausreichend. Dieser Abschnitt kann auch automatisch vernetzt werden, während die Bereiche A und B in der Regel manuell gestaltet werden müssen.

Eine Alternative zur Modellierung durch Volumenelemente stellt eine hybride Vernetzung dar. Dabei wird die Wärmeinflusszone mit feinen Volumenelementen modelliert, während teilweise der Übergangsbereich oder zumindest der Bereich C mit Schalenelementen abgebildet wird (siehe Abbildung 4.6).

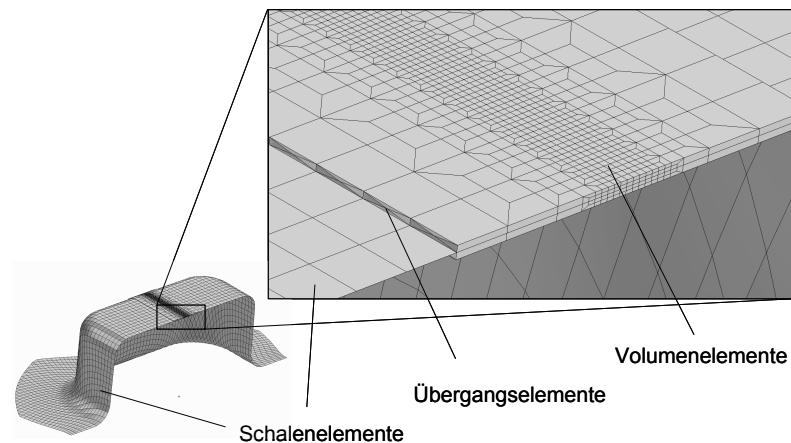


Abbildung 4.6: Hybrides Netz mit Schalen-, Volumen- und Übergangselementen

Diese Art der Vernetzung verringert die Anzahl der Elemente nur gering, da zum einen der feine und elementreichste Bereich weiterhin durch Hexaeder abgebildet wird und zum anderen Übergangselemente zwischen den Volumen-

und Schalenelementen eingeführt werden müssen. Diese Übergangselemente kompensieren die Freiheitsgrade, die durch das Fehlen passender Integrationspunkte auf Seiten der zweidimensionalen Schalenelemente entstehen (siehe Abbildung 4.7).

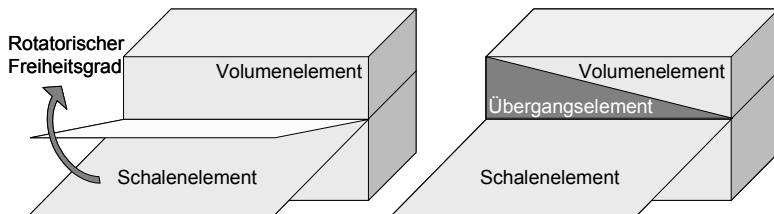


Abbildung 4.7: Rotatorischer Freiheitsgrad und Fixierung durch ein Übergangselement bei einem hybriden Netz.

Versuche mit hybriden Modellen im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, dass durch die Fixierung des rotatorischen Freiheitsgrades in den Übergangselementen hohe Spannungen induziert werden können. Die Ursache hierfür sind die resultierenden Hebelkräfte. Werden in den äußeren Bereichen z.B. durch die Einspannung Kräfte aufgebracht, können diese durch die Art der Vernetzung mit einer sehr großen Hebelwirkung auf die Übergangselemente übertragen werden. Die Folge sind Spannungsspitzen in den Dreieckselementen, die das Gesamtergebnis der Verzugsberechnung beeinträchtigen.

Bei einer durchgängigen Vernetzung mit Hexaederelementen ist dieses Phänomen ausgeschlossen. Ferner können im Gegensatz zu Schalenelementen in allen Bereichen des Modells metallurgische Phasen berücksichtigt werden. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit die Modellierung des Laserstrahlschweißprozesses mit Hexaederelementen durchgeführt. Die Geometriedatei des umgeformten Bauteils wird in der Regel durch Schalenelemente, welchen über Integrationspunkte eine sog. virtuelle Dicke zugeordnet wird, modelliert. In Abbildung 4.8 ist ein Schalenelement und dessen Integrationspunkte schematisch dargestellt.

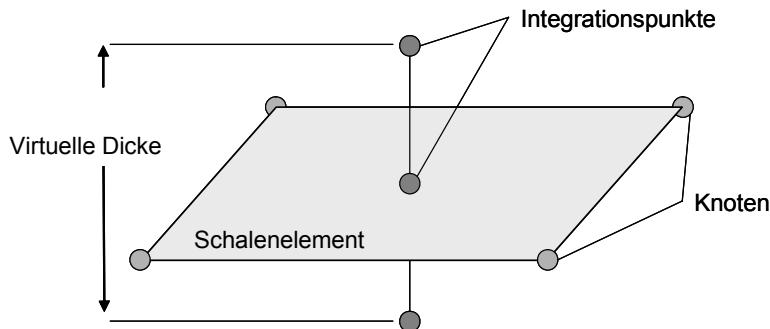


Abbildung 4.8: Morphologie eines Schalenelements

Die Verwendung von Volumenelementen hat zur Folge, dass dieses Netz für die Schweißsimulation entsprechend modifiziert werden muss. Das vorhandene Schalennetz wird durch eine Extrusion in eine erste Volumenstruktur umgewandelt (siehe Abbildung 4.9). Dabei stehen die Volumenelemente auf den Schalenelementen senkrecht und repräsentieren durch ihre Höhe die virtuelle Dicke der Schalenelemente. Die Schalenelemente werden anschließend gelöscht. Die Volumenelemente werden zu einem späteren Zeitpunkt durch Zwischenknoten im Bereich der Schweißnaht feiner vernetzt.

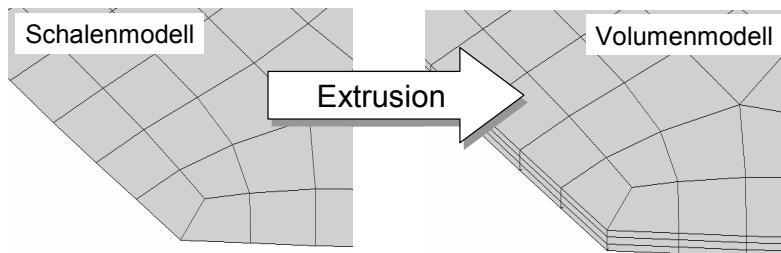


Abbildung 4.9: Extrusion des Schalenmodells zu einem Volumenmodell

Grundsätzlich bestehen zahlreiche Möglichkeiten die Anzahl der Volumenelemente über die Dicke zu variieren. Es wurden Untersuchungen mit einer Extrusion von zwei bis fünf Elementen in Dickenrichtung durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass die besten Übertragungsergebnisse erzielt werden, wenn die Anzahl der Integrationspunkte des Schalenmodells mit den Elementen in Dickenrichtung des Volumenmodells übereinstimmen, da dies die Zuordnung

der Integrationspunkte stark vereinfacht. Ferner ist bei der Extrusion zu beachten, dass die Modellierung der Dicke einen erheblichen Einfluss auf die Anzahl der Elemente und damit die Modellgröße sowie die benötigte Rechenzeit hat. Eine hinreichend genaue Rücksprungberechnung in der Umformsimulation benötigt mindestens fünf Integrationspunkte in der Dickenrichtung des Schalenelementes, optimal neun Integrationspunkte. Dies würde die Rechnerkapazität auf Grund der enormen Modellgröße eines Volumenmodells deutlich übersteigen. Deshalb wird das Berechnungsergebnis der Umformsimulation mit fünf bzw. neun Integrationspunkten auf ein Netz mit drei Integrationspunkten übertragen. Diese drei Integrationspunkte werden im Volumenmodell durch drei Volumenelemente in Dickenrichtung abgebildet. Diese Vorgehensweise erlaubt eine genaue Abbildung der Rücksprungberechnung gemäß dem Stand der Technik in der Umformsimulation, gepaart mit einer akzeptablen Modellgröße in der Schweißsimulation.

### **Definition der Schweißbahn**

Im realen Schweißprozess bewegt sich die Bearbeitungsoptik entlang einer definierten Schweißbahn über das Bauteil, so dass durch die Energieeinbringung entlang dieses Pfades die charakteristische Schweißnaht erzeugt wird. Diese Bahn muss in der Simulation abgebildet werden. Die Bahnkurve in der thermischen Berechnung kann in Form einer Unterroutine als Funktion der Zeit hinterlegt werden. Der Pfad der Energieeinbringung auf das Bauteil wird durch einen Startpunkt und als mathematische Verfahrkurve modelliert. Dies ist nur möglich, wenn die Schweißbahn als mathematische Funktion  $f(x,y,z,t)$  des Ortes und der Zeit mit vertretbarem Aufwand beschrieben werden kann. Ein Beispiel hierfür sind z.B. gerade Schweißnähte auf ebenen Bauteilen (siehe Abbildung 4.10).

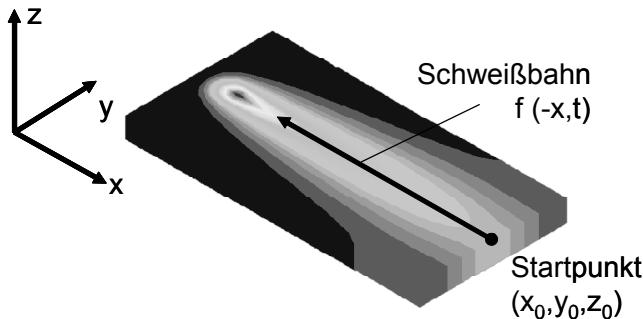


Abbildung 4.10: Beschreibung einer ebenen Schweißbahn durch einen Startpunkt und eine mathematische Funktion des Ortes und der Zeit

Diese Form der Modellierung schränkt den Anwendungsbereich der Schweißsimulation stark ein. Speziell dreidimensionale, gekrümmte Bahnen, wie sie z.B. ein tiefgezogener Napf (siehe Abbildung 4.11) aufweist, können nur durch komplexe mathematische Funktionen beschrieben werden. Die Entwicklung und Implementierung dieser mathematischen Beschreibungen sind sehr zeitaufwändig. In diesen Fällen wird deshalb die angestrebte Bahnkurve und eine weitere sog. Orientierungskurve durch eindimensionale Stabelemente dargestellt, d.h. die vollständige Bahn des Lasers wird durch zwei Kurven aus stückweise linearen Stabelementen durchgängig abgebildet. Die erste Kurve dient als Schweißbahn, d.h. die Energieeinbringung wird entlang dieser Kurve realisiert. Die zweite Kurve definiert den Anstellwinkel der Energieeinbringung. Somit ist sowohl die Bewegungskurve als Funktion der Zeit als auch die Lage zur Oberfläche eindeutig bestimmt (siehe Abbildung 4.11)).

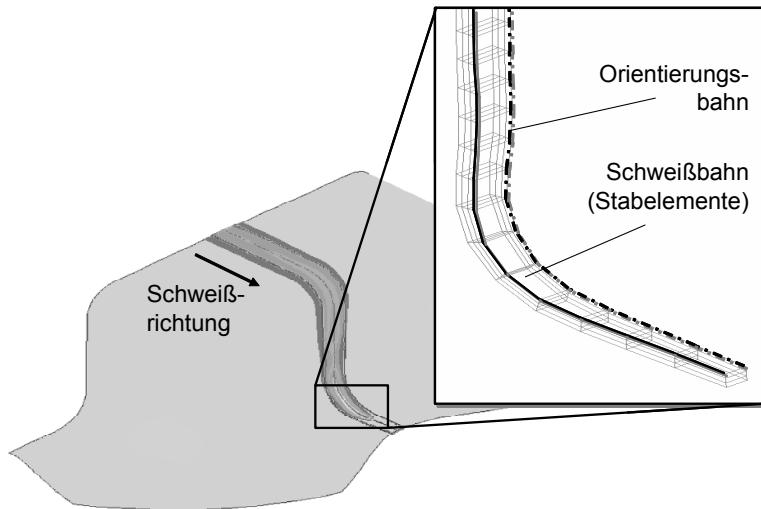


Abbildung 4.11: Definition einer dreidimensionalen Schweißbahn durch Stabelemente

Im Teilschritt Erstellung des FE-Netzes gilt es nun, diesen Pfad der Laserbahn durch Stabelemente abzubilden. Dazu wird der geplante Pfad auf dem Bauteil stückweise diskretisiert und manuell durch eindimensionale Elemente modelliert. Dies setzt insbesondere bei engen Radien und gekrümmten Oberflächen eine ausreichende Anzahl von Stabelementen voraus, da ansonsten die Kurvenbahn unzureichend umgesetzt werden kann. Versuche haben gezeigt, dass Stabelemente in Größe des Fokusdurchmessers des Lasers die Bahn ausreichend parametrisieren.

Das Ergebnis dieses Schrittes ist ein dem Schalenmodell entsprechendes Volumenmodell, mit der modellierten Schweißbahn in Form von eindimensionalen Stabelementen.

## 4.4 Modellierung der dynamischen Wärmequelle

Die Basis der Berechnung thermomechanischer Vorgänge ist die inhomogene Temperaturverteilung auf dem Bauteil. Kräfte, Momente und resultierender

Bauteilverzug sind über die temperaturabhängigen Werkstoffkennwerte eine Funktion der Temperaturgradienten. Aus diesem Grund kommt einer möglichst genauen und den Anforderungen entsprechenden Modellierung der Wärmequelle große Bedeutung zu. Insbesondere die Modellierung des Schmelzbadquerschnitts muss sehr sorgfältig erfolgen, da Tiefe und Form der Querschnittsfläche den Temperaturgradienten in Dickenrichtung bestimmen.

Beim realen Prozess des Laserstrahlschweißens wird die Energieeinbringung durch komplexe Strahl- und Stoffwechselwirkungen erzeugt (vgl. Kap. 2.1). Der Einkoppelwirkungsgrad und die resultierende Schmelzbadgeometrie können mit Hilfe verschiedener Verfahren ermittelt werden, die auf analytischen oder FE-Methoden beruhen. *Sudnik u.a. (2000)* sowie *Mohanty u. Mazumder (1997)* entwickelten analytische Ansätze, um die Energieeinkopplung des Laserstrahlschweißprozesses und den resultierenden Nahtquerschnitt zu ermitteln. *Rick (2001)* stellt eine Integration der physikalischen Modelle in ein FE-System vor, um auf diese Weise die Wärmequelle für nachfolgende Berechnungsschritte zu ermitteln. Diese Ansätze beruhen auf den Modellen zur Energieeinkopplung nach *Beck (1996a und 1996b)*. Dabei werden jedoch einzelne Prozessparameter wie z.B. das Prozessgas nicht berücksichtigt. Aktuelle Forschungsarbeiten von *Härtl u.a. (2003)* haben aber aufgezeigt, dass insbesondere das Prozessgas erheblichen Einfluss auf die Energieeinkopplung und den resultierenden Nahtquerschnitt hat.

Zur Verifikation wurden im Rahmen dieser Arbeit S 235 JR Bleche (3 mm Dicke) durch einen Hochleistungsdiodenlaser mit 3 KW Leistung unter Einsatz verschiedener Prozessgase geschweißt. Abbildung 4.12 zeigt die Nahtoberfläche und den Nahtquerschnitt verschiedener Versuchsschweißungen. Im Bild oben dargestellt ist eine Schweißung mit dem Prozessgas Argon (Ar) bei 1 m/min Vorschub. In der Mitte der Abbildung ist eine Schweißung mit der identischen Vorschubgeschwindigkeit und einer ArCO<sub>2</sub> Mischung als Prozessgas zu sehen. Im Bild unten wurde ebenfalls ArCO<sub>2</sub> als Prozessgas verwendet, jedoch der Vorschub auf 0,75 m/min reduziert.

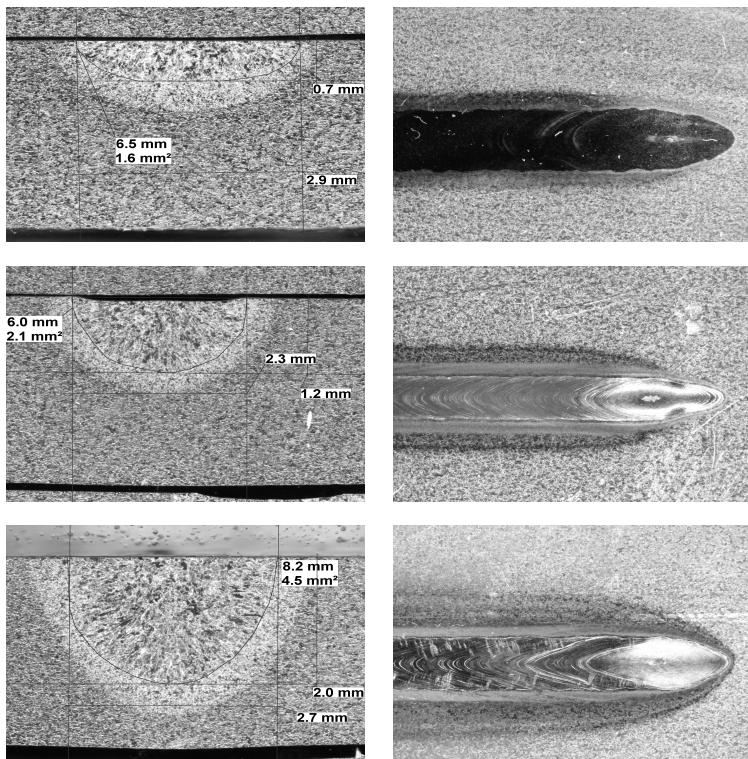


Abbildung 4.12: Einfluss des Prozessgases beim Laserstrahlschweißen.

Es ist eine deutlich veränderte Nahtoberfläche sowie die unterschiedliche Einschweißtiefe in den verschiedenen Schweißproben zu erkennen. Bei gleich bleibenden Schweißparametern wurde durch eine Veränderung des Prozessgases die Einschweißtiefe verdreifacht. Härtl u.a. (2002) führen dies auf eine Modifikation der Oberflächenspannung durch das Prozessgas zurück. Dieser Einfluss, der die Einschweißtiefe und damit die Temperaturgradienten maßgeblich beeinflusst, wird sowohl in existierenden analytischen Ansätzen als auch in den beschriebenen FE-Modellen nicht berücksichtigt.

Aus diesem Grund wurde in dieser Arbeit eine Modellierung der Energieeinbringung über ein mathematisches Ersatzmodell angewendet und verifiziert.

Basierend auf realen Testschweißungen an Blechen des untersuchten Werkstoffs und der entsprechenden Materialdicke werden Querschliffe der Schweißnaht angefertigt. Der Arbeitsablauf gliedert sich dabei in folgende Schritte:

- Probenentnahme
- Einbetten
- Schleifen
- Polieren
- Ätzen

Beim Vorgang des Ätzens unterscheidet man zwischen Makro- und Mikroätzungen. Erstere werden zur Visualisierung von Schweißnaht und Wärmeeinflusszone (WEZ) verwendet. Ist man dagegen speziell an der Zusammensetzung des Gefüges interessiert, so greift man auf Mikroätzungen zurück. Zur Ermittlung der Ersatzwärmequelle werden Makroätzungen verwendet.

Zusätzlich wird während des Schweißprozesses an einem Punkt des Versuchsblechs die Maximaltemperatur über sog. Thermoelemente gemessen. Basierend auf der geometrischen Form des Nahtquerschnitts und der gemessenen Maximaltemperatur wird nun eine mathematische Ersatzwärmequelle ermittelt. Untersuchungen zur Modellierung der Wärmequelle im Rahmen der Verifikation dieser Methode haben gezeigt, dass für Schweißungen mit einem relativ hohem Aspektverhältnis die Verwendung einer konischen Ersatzwärmequelle mit einer Gauß'schen Intensitätsverteilung sehr gute Ergebnisse liefert (siehe Abbildung 4.13).

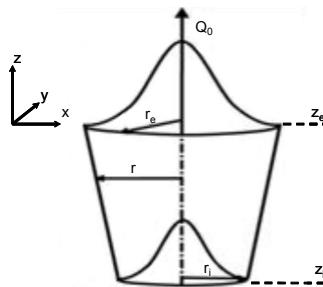


Abbildung 4.13: Mathematisches konisches Ersatzmodell mit Gauß'scher Intensitätsverteilung

Diese Ersatzwärmequelle ist durch die geometrischen Kenngrößen  $r$  und  $z$  parametrisiert. Dabei beschreibt die Ausgangsleistung  $P_0$  die maximale Amplitude der auftretenden Intensität, die in radialer Richtung nach Gleichung 4.1 bis auf den Wert  $P(r_e)=0$  abnimmt.

$$P(r) = P_0 \cdot e^{-\frac{r^2}{r_0^2}}$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}; \quad r_0 = r_e - \frac{(r_e - r_i)(z_e - z)}{z_e - z_i} \quad \text{Gleichung 4.1}$$

Die Modellierung der Wärmequelle kann dabei teilweise entkoppelt vom realen Schweißprozess erfolgen, d.h. es müssen weder Parameter der Ausgangslaserleistung noch der Fokusdurchmesser des Lasers oder die Laserquelle berücksichtigt werden. Die mathematischen Kenngrößen der Ersatzwärmequelle sind lediglich so aufeinander abzustimmen, dass die Geometrie des simulierten Schmelzbades unter Berücksichtigung der auftretenden Maximaltemperatur an einem definierten Ort der im realen Versuch ermittelten Querschnittsgeometrie der Schweißproben entspricht.

Unter Berücksichtigung der thermischen Werkstoffkennwerte Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und Dichte werden die geometrischen Kenngrößen der Ersatzwärmequelle solange in einem iterativen Vorgang verändert bis die gewünschte Nahtgeometrie vorliegt. Um die Rechenzeit der einzelnen Iterationen zu reduzieren wird dabei in der Regel ein vereinfachtes FE-Modell der zu schweißenden Geometrie verwendet. Dieses Modell ist entsprechend der Erkenntnisse aus Kap 4.3 zwar fein vernetzt, bildet jedoch nur einen Teil der Gesamtgeometrie ab.

In den folgenden Abbildungen sind beispielhafte Ergebnisse dieser Vorgehensweise bei unterschiedlichen Schweißungen abgebildet. Abbildung 4.14 zeigt den vergleich der Schmelzbadgeometrie einer Testschweißung eines 3 mm S335 JR Blechs mit 2,5 kW Laserleitung, 0,833 m/min Vorschub und Argon als Prozessgas (oben) und mit 3 kW Laserleitung, 1 m/min Vorschub und ArCO<sub>2</sub> als Prozessgas (unten) in Realität und Simulation.

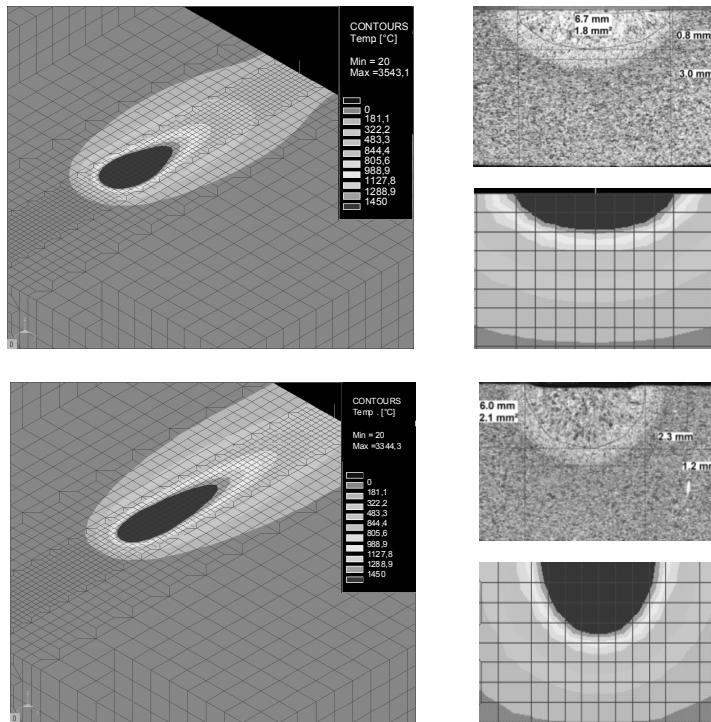


Abbildung 4.14: Vergleich zwischen Realität und Simulation

Diese Vorgehensweise bestehend aus den Schritten Anfertigung von Probeschweißungen, Analyse der Prozessparameter, Erstellung von Querschnitten, Aufbau einer mathematischen Ersatzwärmequelle und der iterativen Anpassung ist in Abbildung 4.15 graphisch dargestellt:

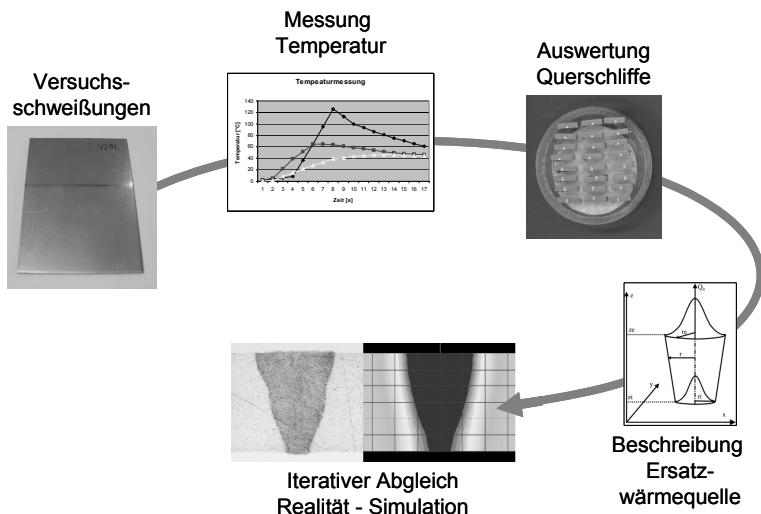


Abbildung 4.15: Vorgehensweise zur Anpassung der Wärmequelle

Zur Abbildung des Schweißvorganges wird diese Ersatzwärmequelle nun von dem vereinfachten Modell auf das Modell der Gesamtstruktur übertragen und entlang der modellierten Schweißbahn durch das Bauteil bewegt. Dazu wird der Anfangs- und Endpunkt sowie die durch Stabelemente dargestellte Schweißbahn als Bewegungsbahn definiert. Über die Orientierungsbahn ist es möglich den Anstellwinkel des Lasers anzupassen. Durch Vorgabe der Vorschubgeschwindigkeit kann nun eine kontinuierliche Schweißbahn abgebildet werden.

#### 4.4.1 Alternative Modellierung der Wärmequelle

Die beschriebene, sog. transiente Bewegung der Ersatzwärmequelle durch das Bauteil stellt eine sehr genaue Berechnung der Wärmeeinbringung in das Bauteil dar. Dieses hohe Maß an Genauigkeit geht mit einer sehr langen Berechnungszeit einher. Eine Berechnung über mehrere Tage und eine Dateigröße von mehreren Gigabyte stößt häufig an die Grenzen des Machbaren. Aus diesem Grund wurden im Rahmen dieser Arbeit Alternativen zu einer rein transienten Berechnung untersucht. Eine Möglichkeit stellt das sog. simultane Verfahren dar. Dabei wird auf die ausgewählten Knoten im

Bereich der Schweißnaht in einem Schritt die durch den Laser verursachte Wärme aufgebracht. Über zeitliche Intensitätskurven kann das Aufheizen bzw. Abkühlen des Nahtbereichs gesteuert werden. Dennoch wird die gesamte Schweißnahtlänge gleichzeitig auf Schmelztemperatur erwärmt. Da bei dieser Variante keine Temperaturgradienten in Längsrichtung der Naht auftreten, können die Elemente im Nahtbereich entsprechend länglich modelliert werden. Nur in Querrichtung, in der die Temperaturgradienten auftreten, sind weiterhin sehr kleine Kantenlängen der Elemente gefordert. Abbildung 4.16 zeigt die Vernetzungsmöglichkeit und das gleichzeitige Aufbringen der Wärme über die gesamte Nahtlänge.

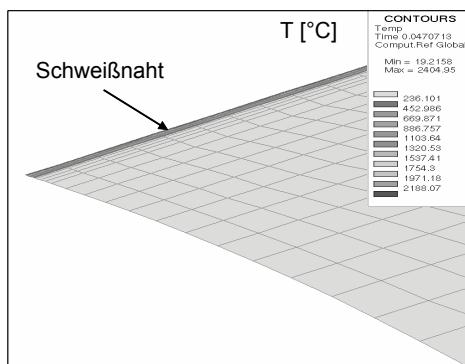


Abbildung 4.16: Aufbringen der Wärme in einem Schritt (simultane Modellierung)

Diese Vereinfachung der Wärmeeinbringung verkürzt die Rechenzeit drastisch, bildet die Realität jedoch nur bedingt ab. Speziell Spannungen und Dehnungen in Längsrichtung können mit diesem Verfahren nicht erfasst werden. Dennoch ist diese Berechnungsmethode für erste Abschätzungen großer Bauteilstrukturen oder bei dominierenden Querspannungseffekten ein sehr anwenderfreundliches Werkzeug.

Eine weitere Alternative stellt die Kombination der transienten und simultanen Berechnung dar. Dabei wird der Eintritts- und Austrittsbereich des Lasers in einer transienten Berechnung ermittelt. In diesen Zonen sind die Temperatureffekte während der Bewegung des Lasers am größten und werden deshalb sehr genau berechnet. Im mittleren Bereich der Schweißnaht findet das simultane Verfahren Verwendung, da sich in diesem Bereich ein mehr oder weniger

stationärer Zustand einstellt. Dieses Verfahren ist deutlich genauer als die reine simultane Methode, erfordert aber größeren Modellierungsaufwand.

Die beste Abbildung des realen Schweißprozesses bietet die rein transiente Berechnung. Da die Genauigkeit der Berechnung gegenüber der Berechnungsdauer in dieser Arbeit im Vordergrund stand, wurde im Folgenden die rein transiente Methode angewandt.

### 4.4.2 Datenbanksystem LASdat

Die vorgestellte und verifizierte Vorgehensweise zur Modellierung der Ersatzwärmequelle setzt Querschliffe und Temperaturmessungen von Testschweißungen voraus. Um deren Anzahl einzuschränken und vorhandene Querschliffe zu archivieren und zu sortieren, wurde im Rahmen dieser Arbeit das Datenbanksystem LASdat entwickelt. In LASdat werden Testschweißungen, die angefertigt wurden, hinterlegt. Dazu werden alle Prozessparameter des realen Versuchs, die Laserleistung, die Vorschubgeschwindigkeit, die Brennweite, die Fokuseinstellungen (Durchmesser und Fläche), der Anstellwinkel, das Prozessgas (Zusammensetzung und Durchflussmenge), die Informationen über den Zusatzwerkstoff (Durchmesser, Geschwindigkeit, Material), das Spaltmaß, der Versatz, die resultierende Einschweißtiefe, die Nahtbreite und der Nahtquerschnitt zusammen mit den Werkstoffinformationen, der Dicke des Versuchsblechs und der gemessenen Temperatur abgelegt. Es werden verschiedene Nahtformen (Stumpfnaht, Kehlnaht etc.) ebenso unterschieden wie diverse Lasertypen (Nd:YAG, HDL, Faserlaser). Alle Eingabemöglichkeiten sind mit einer ausführlichen Hilfefunktion hinterlegt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit Bilder und Auswertungen von Querschliffen zu hinterlegen.

Werden für die Modellierung bestimmter Schweißungen Querschliffe benötigt, so können diese in LASdat gesucht werden. Dazu werden die einzelnen Suchkriterien (z.B. Laserart oder Werkstoff) eingegeben und einzeln gewichtet. Datensätze, die den Anforderungen genügen bzw. der Gewichtung sehr nahe kommen, werden aufgelistet und sind einzeln editierbar.

Wurde die Wärmequelle zu den Schweißaufgaben erfolgreich modelliert, besteht ebenso die Möglichkeit diese Informationen in die Datenbank einzutragen. Neben der verwendeten mathematischen Form (z.B. konische

Wärmequelle) werden die geometrischen Informationen (z.B.  $r$  und  $z$ -Werte, siehe Abbildung 4.13), die Ausgangsleistung und der definierte Wirkungsgrad der Simulation in der Datenbank hinterlegt. Diese Funktionalität erlaubt es, bereits geschweißte Versuchsbleche zu nutzen und ermittelte Ersatzwärmequellen auszulesen. Damit wird der Aufwand der Modellierung einer Schweißung erheblich reduziert. Abbildung 4.17 zeigt beispielhaft den Datensatz einer Schweißung mit einem Hochleistungsdiodenlaser (3 kW Leistung, Werkstoff 1.0338 etc.) und die Parameter der mathematischen Ersatzwärmequelle.

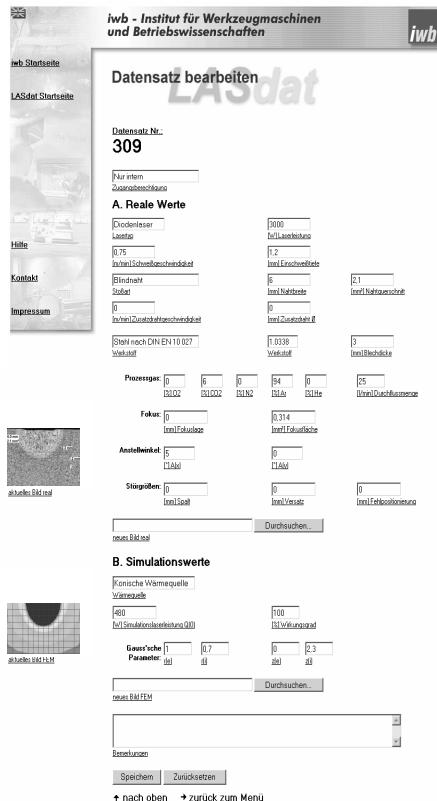


Abbildung 4.17: Beispielhafter Datensatz in der Datenbank LASdat

## 4.5 Kombination der Fertigungsprozesse

Ziel der Vorgehensweise ist es, den Spannungs- und Dehnungszustand zusammen mit der Geometrieinformation des Bauteils nach allen umformtechnischen Prozessen als Initialzustand für die Modellierung des Laserstrahlschweißens zu verwenden. Dabei werden die Ergebnisse nicht überlagert, sondern das Umformergebnis dient als Ausgangszustand für die thermomechanische Berechnung des Schweißens.

### 4.5.1 Modellvorstellung zur Übertragung von dauerhaften Spannungen und Dehnungen

Die Übertragung der Ergebnisse eines Umformprozesses in die Simulation des Laserstrahlschweißens besteht grundsätzlich aus zwei Ebenen. Zum einen gilt es den Informationstransfer zwischen zwei Programmumgebungen zu realisieren. Zum anderen muss entsprechend der Modellvorstellung die physikalische Übertragung umgesetzt werden. Die Ebene der Programmtechnik wird durch eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Routine gelöst. Im Folgenden ist die Modellvorstellung dieser Übertragung erläutert.

#### Umformprozess

Während des Umformens wird das unbelastete Bauteil mit einer externen Kraft beaufschlagt (siehe Punkt 1 in Abbildung 4.18). Der Werkstoff reagiert bis zum Punkt 2 nach Gleichung 4.2 elastisch, dann werden, nach Überschreiten der Fließgrenze des Werkstoffs, plastische Dehnungen in die Struktur eingebracht.

$$\varepsilon = K \cdot \sigma$$

*Gleichung 4.2*

Nach dem Ende des Umformvorgangs (Punkt 3) werden alle externen Kräfte (Einspannungen, Prozesskräfte etc.) aufgelöst und der sog. Rücksprung tritt ein. Die vorhandenen elastischen Dehnungen werden in eine Verformung der Geometrie umgewandelt. Zurück bleibt ein Gleichgewichtszustand, der durch die Geometrie des Bauteils, die Werkstoffdaten inklusive der Kaltverfestigung, die Eigenspannungen und die elastischen Dehnungen charakterisiert ist (Punkt 4).

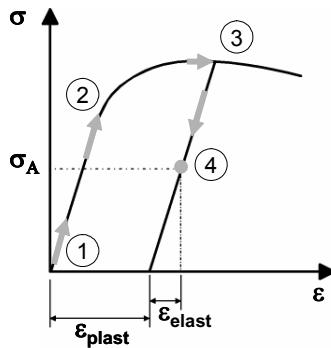


Abbildung 4.18: Spannungs-Dehnungsdiagramm des Umformprozesses ( $\epsilon_{elast}$  = elastische Dehnung,  $\epsilon_{plast}$  = plastische Dehnung,  $\sigma_A$  = Eigenspannungen)

Dieser Vorgang wird mit Hilfe des Umformsimulationsprogramms auf Basis der FEM berechnet. Als Ergebnis stehen für die weitere Verwendung folgende Informationen in einer ASCII-Textdatei zur Verfügung (vgl. Kapitel 4.2):

- Geometrie der Struktur (Lage der FE-Knoten)
- Verwendete Werkstoffdaten (E-Modul, Fließgrenze, Querkontraktionszahl, Isotropie)
- Kaltverfestigung (pro Integrationspunkt)
- Elastische Dehnungen (pro Integrationspunkt)
- Eigenspannungen (pro Integrationspunkt)

Die ASCII-Textdatei aus der Umformsimulation ist in der Regel ungeordnet, d.h. die Reihenfolge der Knoten bzw. Elemente und die dazugehörenden Werte sind zufällig. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit eine weitere Unterroutine entwickelt, die die Knoten und Elemente nach ihrer internen Nummerierung absteigend sortiert. So ist eine spätere Übertragung der Informationen eindeutig möglich.

## Übertragung

Die **Geometrie der Struktur** wird aus der Textdatei ausgelesen und kann über kommerzielle Schnittstellen in gängige CAD-Programme oder direkt in die Schweißsimulationsumgebung eingelesen werden. Dabei werden die

Koordinaten der Knoten übertragen und dadurch die Lage der Elemente definiert. In der Schweißsimulation liegt somit die exakte Geometrie nach der Rücksprungs berechnung ohne Eigenspannungen vor.

Eine automatisierte Übertragung der **verwendeten Werkstoffdaten** aus dem Umformmodell ist nicht sinnvoll, da die Schweißsimulation temperaturabhängige Kennwerte von Raum- bis zur Schmelztemperatur benötigt, die im Umformmodell nicht hinterlegt sind. Aus diesem Grund werden die Werkstoffdaten gesondert in das Modell des Laserstrahlschweißens implementiert, wobei darauf zu achten ist, dass Kennwerte, die in der Umformsimulation von Bedeutung sind, konsistent verwendet werden.

FE-Solver erlauben es einzelne Integrationspunkte der Elemente direkt anzusprechen. Es ist möglich Informationen aus der neutralen Textdatei pro Integrationspunkt auszulesen und in der Schweißsimulation den entsprechenden Elementen zuzuweisen. Ein im Rahmen dieser Arbeit entwickeltes Programm liest aus der neutralen Ergebnisdatei der Umformsimulation die **Kaltverfestigung** pro Integrationspunkt aus und überträgt diese in die Schweißsimulation.

Die **elastischen Dehnungen** können im elastischen Bereich entsprechend Gleichung 4.2 über die Steifigkeitsmatrix direkt den **Eigenspannungen** zugeordnet werden. Aus diesem Grund ist es ausreichend nur einen dieser Werte pro Integrationspunkt zu verwenden. Es ist jedoch nicht möglich einen Initialzustand, bestehend aus Eigenspannungen bzw. elastischen Dehnungen, direkt in die Schweißsimulation zu übertragen. Zwar befinden sich diese Belastungen zusammen mit der Geometrie im energetischen Gleichgewicht, per Definition wird eine aufgebrachte Spannung, soweit diese keine plastischen Verformungen hervorruft, aber als externe Last erfasst. Wirkt diese Kraft nun zum Zeitpunkt  $t=0$  auf das Schweißmodell ist der Initialzustand aus der Umformsimulation exakt abgebildet. Wird der Spannungs-Dehnungszustand zum Zeitpunkt  $t=1$  nicht erneut aufgebracht, lösen sich die Spannungen unwiederbringlich auf, da diese im elastischen Bereich vorliegen. Der Zustand aus der Umformsimulation kann somit zwar aufgebracht werden, stellt jedoch keine dauerhafte Vorbelastung dar.

Für die Generierung eines dauerhaften Initialzustandes muss deshalb ein Umweg gegangen werden. Dazu werden die elastischen Dehnungen aus der Umformsimulation in der Schweißsimulation als plastische Dehnungen

aufgebracht. Sie sind entsprechend ihres physikalischen Ursprungs eigentlich elastische Dehnungen, werden aber als künstliche plastische Dehnungen behandelt und auf das Volumenmodell der Schweißsimulation aufgebracht. Diese künstlichen Dehnungen würden im Modell eine plastische Verformung hervorrufen. Aus diesem Grund wird das Bauteil bei der Übertragung mit einer statisch bestimmten Einspannung modelliert. Durch diese Fixierung erfährt das Bauteil keine Geometrieveränderung, sondern ein Spannungszustand wird induziert, der sich über die Steifigkeitsmatrix gemäß Gleichung 4.2 berechnet. In Abbildung 4.19 ist dieses Vorgehen graphisch dargestellt.

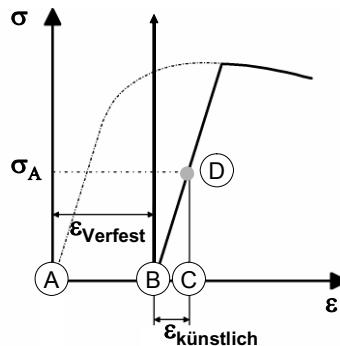


Abbildung 4.19: Übertragener Spannungs-Dehnungszustand im Volumenmodell mit künstlicher Dehnung ( $\varepsilon_{\text{Verfest}} = \text{Kaltverfestigung}$ ,  $\varepsilon_{\text{künstlich}} = \text{künstliche plastische Dehnung}$ ,  $\sigma_A = \text{Eigenspannungen}$ ).

Ausgehend vom Ursprungszustand des unbelasteten Spannungs-Dehnungs-Diagramm (Punkt A) wird die Kaltverfestigung übertragen. Dadurch wird der Ursprung des elastischen Bereiches des Werkstoffs in Punkt B verschoben. Werden nun dauerhafte künstliche Dehnungen aufgebracht (Punkt C) stellt sich das energetische Gleichgewicht zwischen Geometrie, Spannungen und Dehnungen ein (Punkt D). Dieser Zustand entspricht exakt dem Eigenspannungszustand aus der Umformsimulation (siehe Abbildung 4.18, Punkt 4).

Nur wenn alle Parameter aus dem Umformprozess exakt abgebildet werden, kann aus dieser künstlichen plastischen Dehnung der Spannungszustand ermittelt werden, der die Ergebnisse der Umformsimulation genau abbildet.

Die künstlichen Dehnungen verbleiben im Bauteil und generieren den Eigenspannungszustand. Dieser Eigenspannungszustand wird für die weiteren Berechnungen als Initialbelastung verwendet, die das Gesamtergebnis der Verzugsberechnung maßgeblich beeinflusst. Die künstlichen Dehnungen spielen im weiteren Verlauf der Analyse keine Rolle mehr, da im Bereich der Schweißnaht durch die Wärmeeinbringung deutlich höhere plastische Dehnungen entstehen, so dass die künstlichen Belastungen vernachlässigt werden können. In den nahtfernen Bereichen spielen diese insgesamt eine untergeordnete Rolle.

### 4.5.2 Ambivalenz der Dimensionen

Tiefzieh- und IHU-Prozesse sind häufig durch einen hohen Umformgrad charakterisiert. Um diese großen Formänderungen in der Simulation abilden zu können, werden in der Modellierung Schalenelemente verwendet. Die Simulation des Laserstrahlschweißens ist hingegen durch Temperaturgradienten in Dickenrichtung und Phasenübergänge gekennzeichnet. Diese Phänomene können derzeit nur durch Volumenelemente ausreichend genau berechnet werden (Faure u.a. 2003). Für die Übertragung der Ergebnisinformationen aus der Umformsimulation in die Simulation des Laserstrahlschweißens ist es deshalb nötig, die Berechnungsergebnisse von Schalen auf Volumenelemente zu projizieren ohne dabei das innere energetische Gleichgewicht zu zerstören (siehe Abbildung 4.20).

Dies ist nur möglich, wenn die Informationen der Schalenelemente an die richtige Stelle des Volumenmodells übertragen werden. Dazu müssen beide Modelle geometrisch identisch sein und den gleichen Grad der Diskretisierung aufweisen. Dies wird durch eine Extrusion des Schalenmodells gewährleistet (siehe Abbildung 4.9).

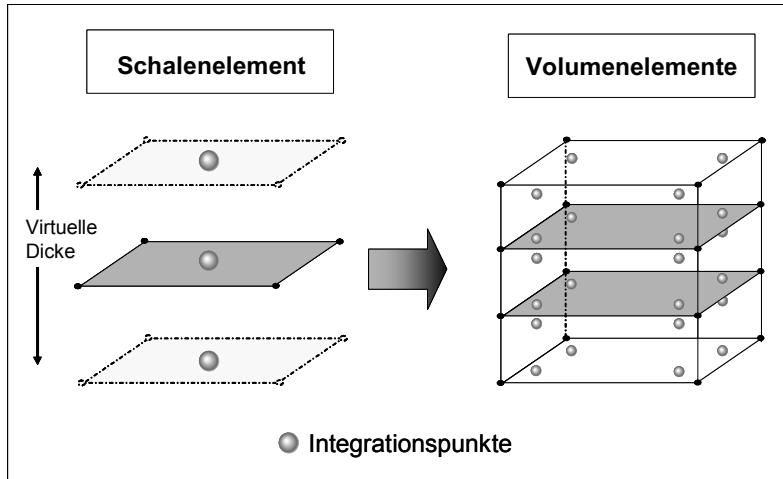


Abbildung 4.20: Übertragung von Schalen auf Volumenelemente

### Konfiguration der Elemente

Jedem Element des Schalenmodells werden pro Zeitschritt Attribute zugewiesen, die sich aus den globalen Randbedingungen und dem Verhalten des jeweiligen Elementes während der Berechnung ergeben. Diese Informationen werden in den Integrationspunkten berechnet und gespeichert. Je nach verwendetem FE-Programm, Elementtyp und Funktionalität der Software variieren diese Speicherdatensätze in Format und Umfang. Für eine Übertragung der Werte ist es jedoch unerlässlich, den genauen Aufbau dieser Datensätze zu kennen. Aus diesem Grund wurde die ASCII-Ergebnisdatei des Umformprozesses in den verwendeten FE-Solver der Schweißsimulation importiert. Mit Hilfe des Handbuchs dieses Solvers kann somit der exakte Aufbau des Datensatzes bestimmt werden. Dieser Elementdatensatz besteht aus einem Datenblock der die Attribute der Integrationspunkte im Element beinhaltet und einem Satz Mittelwerte bezogen auf das gesamte Element. Die verwendeten Schalenelemente besitzen pro Integrationspunkt einen 40stelligen Datenblock (siehe Abbildung 4.21).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sigma_{xx}$	$\sigma_{yy}$	$\sigma_{xy}$	$\sigma_{zz}$	$\varepsilon_{xx}$	$\varepsilon_{yy}$	$\varepsilon_{xy}$	$\varepsilon_{zz}$	$\alpha_{xx}^a$	$\alpha_{yy}^a$
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\alpha_{xy}^a$	$\alpha_{zz}^a$	$\sigma_L$	$\varepsilon_{peq}^a$	T	$\tau$			E	
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
W	XG	YG	$\varepsilon_{TH}$	$\varepsilon_{xx}^p$	$\varepsilon_{yy}^p$	$\gamma_{xy}^p$	$\varepsilon_{zz}^p$	P1	P2
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
P3	P4	P5	P6	$\varepsilon_{ped}^a$	$\alpha_{xx}^{\gamma}$	$\alpha_{yy}^{\gamma}$	$\sigma_{eq}$	$\alpha_{xy}^{\gamma}$	$\alpha_{zz}^{\gamma}$

**Legende:**

$\sigma$ : Spannungen [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\varepsilon$ : Dehnungen  
 $\alpha(a)$ : Initialposition des Bauteils in Phase a  
 $\sigma_L$ : Fließgrenze [N/mm<sup>2</sup>]  
 $\varepsilon_{peq}^a$ : plastische Vergleichsdehnung  
T: Temperatur [K]  
t: Zeit [s]

E: E-Modul [N/mm<sup>2</sup>]  
W: Dehnenergie [J]  
XG,YG: Koordinaten des Integrationspunktes  
 $\varepsilon_{th}$ : thermische Dehnung  
 $\varepsilon_p, \gamma_p$ : plastische Dehnung  
 $\sigma_{eq}$ : Vergleichsspannung [N/mm<sup>2</sup>]  
Pi: Anteile der metallurgischen Phasen

Abbildung 4.21: Datensatz eines Schalenelementes pro Integrationspunkt

Pro Element ergibt sich dadurch ein Vektor an Daten, dessen Länge durch die Anzahl der Integrationspunkte zusammen mit dem beschriebenen Mittelwert, multipliziert mit den Längen der integrationspunktspezifischen Datensätze, bestimmt ist. Der element-spezifische Vektor des Schalenelementes mit 3 Integrationspunkten enthält daher 160 Zeilen. (Zusammengesetzt aus 3 Integrationspunkten und einem Mittelwert, jeweils mit der Länge des Datensatzes von 40 Stellen)

Die Länge und der Inhalt der Datensätze zwischen den Elementen der Quelldatei (Schalenmodell) und Zielfile (Volumenmodell) unterscheiden sich aufgrund der unterschiedlich verwendeten Elementtypen. Volumenelemente besitzen einen element-spezifischen Vektor von 540 Zeilen (8 Integrationspunkte, Mittelwert, Datensatz mit 60 Stellen).

### Koordinatentransformation

Eine Besonderheit bei der Übertragung stellt die unterschiedliche Beschreibung der Elementattribute im Schalen- und Volumenmodell dar. In der Umform-simulation werden die Ergebnisattribute im Elementkoordinatensystem in der Ebene dargestellt. Das bedeutet, dass in Verbindung mit der Lage eines Schalenelementes im Raum jeweils drei Spannungs- bzw. Dehnungswerte pro Gaußpunkt ausreichen, um den Zustand des Elementes zu beschreiben. Der

genutzte FE-Solver in der Schweißsimulation setzt bei der Verwendung von Volumenelementen Attribute in drei Welt-Koordinatenrichtungen voraus. Für eine eindeutige Beschreibung sind jeweils sechs Werte pro Integrationspunkt für den vorherrschenden Spannungs-Dehnungszustand nötig. Aus diesem Grund ist eine Umrechnung der Werte von Elementkoordinatenrichtungen in Weltkoordinatenrichtungen nötig. Dazu werden mit Hilfe einer Koordinatentransformation die Geometrieinformation über die Lage des Schalenelementes im Raum und die vorhandenen Werte entlang der Hauptachsen und der Wertesatz in das Weltkoordinatensystem übertragen. Der verwendete FE-Solver in der Schweißsimulation bietet diese Funktionalität als Teil des Programms.

### Übertragung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Programm entwickelt, dass es erlaubt diverse Attribute pro Integrationspunkt je Element aus dem Schalenmodell auszulesen und dem entsprechenden Integrationspunkt des Volumenmodells zuzuweisen. Dieses Programm wurde so gestaltet, dass es mit kleinen Veränderungen universal für alle Formen der Datenkopplung eingesetzt werden kann.

Vereinfacht dargestellt unterteilt sich dieses Programm in vier Teile. Im ersten Schritt werden die Schalenelemente je nach Anzahl der Integrationspunkte in Ebenen zerlegt und die Attribute der Integrationspunkte ausgelesen. Das Schalenelement aus Abbildung 4.8 besteht somit aus einer oberen, mittleren und unteren Ebene, deren Werte jeweils in einen Vektor geschrieben werden.

In einem zweiten Schritt wird dieser Vektor nun in einen Datensatz für Volumenelemente überführt. Dazu sind die angesprochene Koordinatentransformation und die Erweiterung des Datensatzes von 40 auf 60 Stellen nötig.

Der dritte Teil weist dem jeweiligen Integrationspunkt des Schalenmodells die Integrationspunkte des korrespondierenden Volumenmodells zu und überträgt den entsprechenden Datensatz in Vektorform. Diese Zuweisung erfolgt an Hand der Nummerierung der Elemente je Ebene. Aus diesem Grund ist eine exakte Übereinstimmung der Elementnummern des Schalen- und Volumenmodells in der jeweiligen Modellebene für die korrekte Übertragung notwendig. Dies wird durch die Anwendung der Unterroutine zum Ordnen der Elemente gewährleistet.

Der abschließende Schritt beinhaltet eine Funktion, die es ermöglicht die modifizierten Werte der Elemente auf das Modell aufzubringen und dieses zu aktualisieren.

Im Rahmen der entwickelten Vorgehensweise werden durch diese Unterroutine die elastischen Dehnungen und die Kaltverfestigung pro Integrationspunkt aus dem Schalenmodell ausgelesen. Entsprechend der Modellvorstellung aus Kap. 4.5.1 wird die elastische Dehnung als künstliche plastische Dehnung auf das Volumenmodell übertragen. Die Kaltverfestigung kann direkt transferiert werden. Ferner wird das Modell mit den Werkstoffkennwerten versehen und statisch bestimmt eingespannt. Wird das Modell nun aktualisiert, stellt sich der Eigenspannungszustand nach der Umformsimulation als Initialzustand auf dem Volumenmodell ein.

Eine Überprüfungsmöglichkeit für die Richtigkeit der Übertragung des Eigenspannungszustandes ist die Durchführung einer vereinfachten Rücksprungberechnung. Diese erfolgt durch eine Analyse der Verformung ohne zusätzliche Kräfte in einem folgenden Zeitschritt. Wird zum Zeitpunkt  $t=0$  ein Eigenspannungszustand übertragen, der sich nicht mit der Geometrie im Gleichgewichtszustand befindet, ist im Zeitschritt  $t=1$  eine Verformung, ähnlich der Rücksprungberechnung, die Folge. Durch eine einfache mechanische Analyse im Anschluss an die Übertragung kann somit das Ergebnis verifiziert werden. Ist im Zeitschritt  $t=1$  eine Verformung von wenigen  $\mu\text{m}$  zu beobachten, wurde die Übertragung nahezu fehlerfrei realisiert.

### 4.5.3 Lokale Netzverfeinerung

Der Übergang von Schalen- auf Volumenelemente setzt voraus, dass die Morphologie der Modelle übereinstimmt. Nur so kann die Zuordnung der Werte zu den einzelnen Elementen realisiert werden. Andererseits erfordert die thermische Berechnung des Laserstrahlschweißens im lokalen Bereich der Schweißnaht eine sehr feine Vernetzung, um die auftretenden hohen Temperaturgradienten hinreichend genau zu erfassen und die Konvergenzkriterien zu erfüllen.

Um beide Forderungen zu erreichen, ist es notwendig nach der Übertragung der Umformergebnisse die Werte erneut zu übertragen, und zwar auf ein Volumenmodell, das die geforderte feine Vernetzung im Bereich der Schweißnaht gewährleistet. Dazu besitzt der verwendete FE-Solver *Sysweld*

eine Funktion, die es erlaubt die Werte von einem Quellmodell auf Elemente eines Zielmodells zu projizieren. Die Werte an den Integrationspunkten werden an die örtlich nächstgelegenen Punkte des Zielmodells übergeben. Dabei muss die äußere geometrische Gleichheit beider Modelle gewährleistet sein sowie die Anzahl der Elemente im Zielmodell an den Stellen des ursprünglichen Modells eine positive Potenz der Zahl 2 ergeben (siehe Abbildung 4.22.). Ansonsten ist der Berechnungsalgorithmus der Übertragung nicht fähig, die Zielpunkte zu erfassen und zuzuordnen.

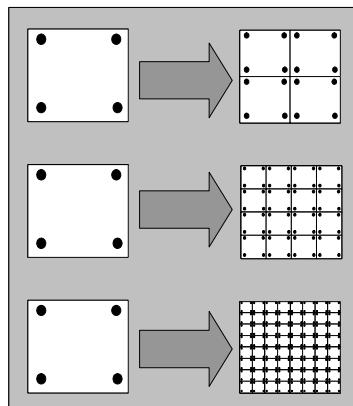


Abbildung 4.22: Projektion der Attribute auf verfeinerte Elemente

In dieser Vorgehensweise wird zur Verfeinerung des Volumenmodells eine Sonderform der adaptiven Vernetzung gewählt. Diese erlaubt es die Verfeinerung als Funktion in den Berechnungsschritt zu implementieren ohne manuell die Diskretisierung anpassen zu müssen. Eine adaptive Vernetzung bietet die Möglichkeit, Kriterien zu definieren nach denen das Netz automatisch verfeinert wird, um die Genauigkeit der Berechnung zu erhöhen. Diese Kriterien können beispielsweise das Überschreiten vorher definierter Temperatur- bzw. Spannungsgradienten oder einfache geometrische Kriterien, wie z.B. ein benutzerdefinierter Volumenbereich (Box-Kriterium), sein. Beim Box-Kriterium wird die geometrische Form mit dem Laser im Raum verschoben und erzeugt neue Elemente innerhalb und fügt Elemente außerhalb des Volumens wieder zusammen (siehe Abbildung 4.23).

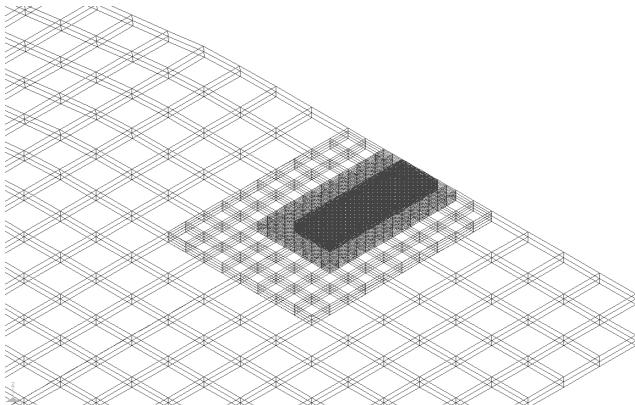


Abbildung 4.23: Adaptive Vernetzung nach dem Box-Kriterium

Es können dabei unterschiedliche Stufen der Verfeinerung gewählt werden. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, die Zahl der Elemente drastisch zu verringern. Allerdings wird durch Zerteilung und das Zusammenfügen der Elemente die Qualität der Berechnungsergebnisse beeinflusst. In der Arbeit von Lenz (2001) finden sich hierzu genauere Untersuchungen.

Die gewählte Sonderform unterscheidet sich von dem oben beschriebenen Vorgehen dahingehend, dass kein mitwanderndes Box-Kriterium verwendet wird, sondern die Verfeinerung entlang der Schweißnaht in einem Schritt aufgebracht wird. Der Grund hierfür ist die verwendete Funktion der Werteprojektion, die bei einem mitwandernden Netz die Elemente, die neu zusammengefügt werden, nicht mehr ansprechen kann, da die interne Nummerierung verändert wurde.

Das Ergebnis der Verfeinerung ist ein aus der ursprünglichen Vernetzung des Schalenmodells entstandenes Volumenmodell, das im Bereich der Schweißnaht durch eine adaptive Vernetzung mit offenen Knoten stark verfeinert wurde. Die von den Schalenelementen auf Volumenelementen übertragenen Attribute (künstliche plastische Dehnung und Kaltverfestigung) werden auf dieses feine Netz projiziert.

## 4.6 Thermische Berechnung

In der thermischen Berechnung des Laserstrahlschweißens wird die mathematische Ersatzwärmequelle, die zuvor ermittelt wurde (Kapitel 4.4), entlang der definierten Bahn, die der Schweißnaht entspricht, durch das Bauteil bewegt. Dabei wird die zum Schweißen nötige Wärme in das mit Volumenelementen diskretisierte, unbelastete Modell mit einer lokalen Verfeinerung entlang der Schweißnaht, die durch ein adaptives Netz modelliert wurde, eingebracht. Damit die instationäre Temperaturverteilung im Bauteil berechnet werden kann, muss für jeden Zeitschritt die verallgemeinerte Fourier-Gleichung (siehe Gleichung 3.14) gelöst werden.

Dazu finden die werkstoffspezifischen, thermophysikalischen Kennwerte der Dichte [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ], der spezifischen Wärmekapazität [ $\text{J}/\text{kgK}$ ] und des Wärmeleitfähigkeit [ $\text{W}/\text{Km}$ ] als Funktion der Temperatur von Raumtemperatur bis zu Dampftemperatur Verwendung.

Zur Lösung der Gleichung sind thermische Randbedingungen nötig. Als Randbedingung 1. Art wurde die Ausgangstemperatur mit  $20^\circ\text{C}$  (entspricht der Raumtemperatur) festgelegt. Des Weiteren wurden die thermischen Mechanismen an der Oberfläche des Modells abgebildet. Für die Struktur, die während der Bearbeitung von Luft umgeben ist, lässt sich nach dem Newton'schen Gesetz der Wärmestrom  $\dot{q}_k$  der Konvektion folgendermaßen bestimmen:

$$\dot{q}_k = \alpha_k \cdot A \cdot (T - T_0) \quad \text{Gleichung 4.3}$$

In der Modellierung der Struktur wurde eine Gruppe bestehend aus allen Oberflächenelementen definiert. Dieser Gruppe wurde durch Abschätzen aus Tabellenwerken (Stöcker 1994) ein Wärmeübergangskoeffizient von 20 [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ] zugewiesen (typische Werte für die natürliche Konvektion in der Luft liegen zwischen 3,5 und 35 [ $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ ]). Das Newton'sche Gesetz wurde in Form einer Unterroutine in der thermischen Berechnung hinterlegt.

Zusätzlich wurde die Wärmestrahlung an der Oberfläche des Bauteils modelliert. Die je nach Fläche und Zeiteinheit von einem erhitzten Körper abgestrahlte Wärme lässt sich nach dem Stefan-Boltzmann Gesetz berechnen:

$$\dot{q}_s = C_0 \cdot A \cdot \varepsilon(T) \cdot (T^4 - T_0^4)$$

Gleichung 4.4

Für den „absolut schwarzen Körper“ ( $\varepsilon=1$ ) gilt die Stefan-Boltzmann Konstante  $C_0 = 5,67 \cdot 10^{-14} \text{ W/mm}^2\text{K}^4$ . Der „graue Körper“ wird durch den Emissionsgrad  $\varepsilon < 1$  erfasst. Für die thermische Simulation wurde das Stefan-Boltzmann Gesetz in einer Unterroutine hinterlegt und der Emissionsgrad  $\varepsilon = 0,4$  (20°C) bzw.  $\varepsilon = 0,6$  (900°C) für Stahl als Funktion der Temperatur aus Tabellenwerken eingesetzt.

Der dominierende Wärmetransportmechanismus bei metallischen Bauteilen ist die Wärmeleitung. Die Kühlung findet dabei einerseits durch Wärmeleitung im Bauteil, andererseits vom Bauteil zu den Anlageflächen der Einspannvorrichtung bzw. der Umgebung statt. Die allgemeine Form der Wärmeleitungs-gleichung lautet dabei:

$$\dot{q}_l = \frac{A_0}{l_0} \cdot \lambda \cdot (T - T_0)$$

Gleichung 4.5

Die Bezugslänge  $l_0$  ist dabei der Abstand zwischen dem betrachteten Punkt und dem Ort, an welchem Raumtemperatur angenommen wird. Die Wärmeleitung innerhalb des Bauteils ist als Kernfunktionalität im FE-System enthalten. Die Wärmeleitung in die Spannelemente wird in der thermischen Berechnung durch die Vorgabe eines Wärmeflusses als Funktion der Temperatur und der Fläche der Spannelemente abgebildet.

Im Hinblick auf die Komplexität des Modells sollten die thermischen Randbedingungen des Bauteils so einfach wie möglich abgebildet werden. Abhängig vom Zeit-Temperaturverlauf ist es z.B. möglich, den Spannflächen eine feste Temperatur (z.B. Raumtemperatur) vorzugeben. Damit wird der Wärmefluss in die quasiunendliche Spannvorrichtung vereinfacht abgebildet.

Bei Stahlwerkstoffen ist darüber hinaus das thermische Verhalten entscheidend durch metallurgische Vorgänge lokaler Zonen geprägt. Diese werden üblicherweise durch ZTA-Diagramme und für die anschließende Phasenumwandlung während der Abkühlung mit ZTU-Diagrammen dargestellt. Aus den Umwandlungsschaubildern können die resultierenden Eigenschaften in der Regel direkt abgelesen werden. Das Laserstrahlschweißen erfordert auf Grund seiner sehr kurzen und extremen Aufheiz- und Abkühlzyklen spezielle Diagramme, die nur selten verfügbar sind. Häufig wird deshalb als Näherung auf herkömmliche Schweißdiagramme zurückgegriffen. Die Verfügbarkeit bzw.

Ermittlung notwendiger Werkstoffdaten ist eine der größten Herausforderung in der Modellierung des Laserstrahlschweißens.

In dieser Arbeit lagen für den verwendeten Werkstoff S 235 JR gemessene ZTU-Diagrammen für das Laserstrahlschweißen vor. Diese wurden über das semiempirische Leblond-Modell implementiert (Gleichung 3.10). So konnten die diffusionsgesteuerten Phasenübergänge abhängig von Temperaturverlauf abgebildet werden. Die Martensitumwandlung wurde durch das Koistinen-Marburger Gesetz (Gleichung 3.9) berücksichtigt.

Neben der Güte der Lösung stellt die benötigte Rechenzeit ein sehr wichtiges Kriterium der FEM Simulation dar, da diese trotz stetig steigender Rechnerleistung immer noch unbefriedigend ist. Ein Grund liegt sicher darin, dass steigende Prozessortaktraten zur Verwendung immer komplexerer Modelle führen, wodurch häufig die Rechenzeitgewinne wieder aufgehoben werden. Welche Rechenzeiten akzeptabel sind, hängt von der Problemstellung und den persönlichen Anforderungen an die Lösung ab. Für wissenschaftliche Betrachtungen ist der Zeitbedarf von untergeordneter Bedeutung und Berechnungen von mehreren Tagen Dauer sind üblich und akzeptabel. Für den industriellen Einsatz z.B. im Entwicklungsprozess ist die benötigte Zeit eine wichtige Ressource die nur begrenzt zur Verfügung steht. Unter diesen Voraussetzungen stellt die Reduktion der Rechenzeit einen wichtigen Aspekt der Simulation dar, insbesondere wenn Parameterstudien oder Variantenuntersuchungen zahlreiche Lösungen bedingen. Möglichkeiten den Zeitbedarf zu optimieren bieten z.B. eine geeignete Wahl der Diskretisierung oder eine günstige Modellierung der Randbedingungen und der Wärmequelle. Darüber hinaus stehen unterschiedliche Gleichungslöser und die Zeitschrittwahl als Stellschrauben zur Anpassung der Berechnungsdauer zur Verfügung.

Das Lösen der Gleichungssysteme ist die zeitaufwändigste Aufgabe jedes FE-Programms. Überwiegt bei kleinen Modellen noch der Anteil des Assemblierens, so wächst der Anteil des Gleichungslösens mit der Größe des Modells auf ca. 80% der benötigten Zeit an (Tack 1995). Somit kommt der Auswahl eines effizienten, schnellen Gleichungslösers erhebliche Bedeutung zu. Ein großer Vorteil der FEM ist die Tatsache, dass die entstehenden Gleichungssysteme eine symmetrische und positiv definite Koeffizientenmatrix aufweisen, da diese erhebliche Speichervorteile bieten. In der Regel ist es möglich, eine Seite des zu lösenden Gleichungssystems komplett in den Hauptspeicher zu laden. Nur bei sehr großen Modellen kann dies nicht realisiert

werden, so dass Teile der Matrix ausgelagert werden müssen und die fortwährend notwendigen Plattenzugriffe eine erhebliche Verzögerung der Berechnung mit sich ziehen. Die Verfahren zur Lösung linearer Systeme lassen sich in zwei Klassen unterteilen:

- Direkte Verfahren (u.a. Gauß, Cholesky)
- Iterative Verfahren (u.a. Jakobi, Gauß-Seidl)

Alle direkten Verfahren kommen nach einer endlichen Anzahl festgelegter Schritte zur theoretisch exakten Lösung (bis auf Rundungsfehler). Sie benötigen sehr viel Hauptspeicherplatz und sind für große Modelle sehr aufwändig. Iterative Verfahren dagegen erreichen bei Konvergenz nur eine Näherungslösung, mit einer vom Anwender vorgegebenen Genauigkeit. Besonders für große, dünn besetzte Matrizen, wie sie sich in der Schweißsimulation ergeben, lässt sich mit ihnen eine ausreichend genaue Lösung mit weniger Rechenaufwand und mit erheblich weniger Speicher- aufwand ermitteln als mit direkten Solutoren. Für die in Kapitel 6 beschriebenen Anwendungsfälle wurden direkte, plattformspezifische Solver verwendet.

Ein weiteres wichtiges Werkzeug für die Optimierung der Berechnung liegt in einer günstigen Zeitschrittwahl. Erstrebenswert sind möglichst große Zeitschritte ohne negative Auswirkungen auf die Lösung. Zahlreiche FE- Programme bieten die Möglichkeit einer automatischen Zeitschrittwahl. Dabei wird eine Anfangsschrittwte definiert und ein dazugehöriges Fehlerrkriterium definiert. Bei der thermischen Simulation ist dies die maximale Temperaturänderung. Während der Berechnung werden die Zeitschritte automatisch erhöht oder verringert. Ist die maximale Temperaturänderung wesentlich kleiner als der Referenzwert, so wird die Schrittwte verlängert, ist die Änderung größer, so wird die Schrittwte verkleinert, bis Konvergenz erreicht wird. Im Folgenden wurde eine manuelle Anpassung der Zeitschritte vorgenommen, da auf Grund der bewegten Wärmequelle große Temperaturänderungen über den gesamten Berechnungszeitraum auftreten und somit ein adaptives Verfahren u.U. zu kleine Zeitschritte generieren würde. Die Rechenzeiten würden somit erhöht. Dennoch ist es nötig, die Zeitschritte an das Schweißproblem anzupassen. So wurden im Eintrittsbereich des Lasers sehr kleine Zeitschritte gewählt, da hier große Temperaturgradienten zu erwarten sind. Im quasistationären mittleren Bereich der Schweißnaht und im Austrittsbereich finden größere Schritte Verwendung. Allerdings können diese

nicht beliebig variiert werden, da ein zu großer Zeitschritt ein „tupfenartiges“ Temperaturfeld mit ungleichen Temperaturverläufen liefert, weil sich die bewegte Wärmequelle zwischen den untersuchten Zeitpunkten zu weit bewegt hat. Als Obergrenze hat sich dabei die Zeit herauskristallisiert, innerhalb der die Wärmequelle ein Element überschreitet. Empfehlenswert sind deutlich kleinere Werte.

Das Ergebnis der thermischen Berechnung, die je nach Modellgröße bis zu mehrere Tage dauert, ist die Temperatur an jedem Ort des Bauteils zu jedem Zeitpunkt, vom Schweißbeginn bis zur Abkühlung annähernd auf Raumtemperatur.

## 4.7 Thermomechanische Simulation

In der thermomechanischen Berechnung werden die Ergebnisse der Umformsimulation, die zuvor nach der oben beschriebene Methode auf das Schweißmodell übertragen wurden, als Initialzustand verwendet, d.h. zum Beginn der Berechnung herrscht auf dem Bauteil der Eigenspannungszustand vor, der in der Umformsimulation einschließlich aller Folgeoperationen und der Rücksprungberechnung ermittelt wurde.

Aufbauend auf den Ergebnissen der thermischen Simulation wird nun eine transiente, thermomechanische Analyse durchgeführt. Im Mittelpunkt dieses Berechnungsschrittes stehen die Wechselwirkungen zwischen der eingebrachten Wärme, den vorhandenen Initialspannungen und den mechanischen Randbedingungen. Das Ergebnis ist die thermomechanische Reaktion des Bauteils, die sich in Verzug bzw. Eigenspannungen niederschlägt.

In der vorliegenden Simulation sind die mechanischen Werkstoffkennwerte als Funktion der Temperatur und der metallischen Phasen hinterlegt. Damit ist eine Berechnung der Eigenspannung I. Ordnung aus metallurgischen Transformationen grundsätzlich möglich.

Das mechanische Verhalten des Bauteils ist einerseits eine Reaktion auf die thermische Last, andererseits ist diese abhängig von den mechanischen Randbedingungen. Diese können aufgebrachte Kräfte, Verformungen oder Beeinflussung von Freiheitsgraden des Modells sein. In der industriellen Praxis sind zahlreiche Spannvarianten verfügbar. Nach Lenz (2001) können diese

nach Art der Kontaktfläche zwischen Spannmittel und Bauteil (unnachgiebig, nachgiebig) und der Lage im Raum (fest, variabel) klassifiziert werden. Für die Verifikationsbeispiele wurden im Folgenden ausschließlich unnachgiebige und räumlich feste Einspannungen in Form von Kniehebelspannern verwendet. Bei optimalen Bedingungen wird das Bauteil damit starr an seiner Position gehalten, allerdings können auch nur ein oder zwei Freiheitsgrade auf diese Weise fixiert werden. In der Simulation kann diese Form der Einspannung dadurch abgebildet werden, dass an den Orten der Einspannung einzelne FE-Knoten vorhanden sind und diese in den entsprechenden Freiheitsgraden eingefroren werden. Dies stellt eine sehr ungenaue Vereinfachung dar, da die Wechselwirkungen zwischen Bauteil und Spanntechnik stark reduziert werden. Für eine exakte Abbildung der Spannsituation müssen an den Reibungsflächen zwischen Spanner und Bauteil Kontaktflächen modelliert werden, die mit der entsprechenden Steifigkeit und Reibverhalten abgebildet werden. Dies hat sehr großen Einfluss auf die Rechenzeit. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Ersatzmodell mit linear-elastischen Federn verwendet. Dabei werden die Knoten im Einspannungsbereich mit einer definierten Federkennlinie eingespannt. Federn haben in der Regel eine Kennlinie, die für Zug- und Druckbeanspruchung ein gleiches Verhalten aufweist. Ein Elastomer-Spannelement hat auf Druck eine sehr steil ansteigende Kennlinie, während bei Zugbelastung keine weiteren Kräfte übertragen werden können. Solch ein nichtlineares Verhalten ist in den gängigen FE-Systemen noch nicht standardmäßig verfügbar. Mit der Vereinfachung der Einspannung durch Federkennlinien wurde eine Abstraktion erreicht, die ein sehr gutes Verhältnis zwischen Modellierungsaufwand, Rechenzeit und Genauigkeit aufweist.

Ergebnis der thermomechanischen Analyse des Schweißprozesses ist die zeitliche Entwicklung und die resultierende Verteilung der Eigenspannungen im Werkstück sowie die Verformungen als Funktion des Ortes und der Zeit über den gesamten Schweiß- und Abkühlzyklus. Die thermomechanische Berechnung weist sehr hohen Bedarf an Rechenzeit und Arbeitsspeicher auf. Grund hierfür sind die ausgeprägten Nichtlinearitäten der Analyse, die zu einem langsamen Konvergenzverhalten führen. Mögliche Ansätze zur Reduktion der Rechenzeit sind Gegenstand zahlreicher Forschungen. Berücksichtigt man zudem die rasante Entwicklung bei der Rechnerleistung, so ist hier in naher Zukunft mit deutlichen Verbesserungen zu rechnen.

## 5 Fehlerkriterien

Der in Kapitel 4 beschriebene Methode liegt die FEM zugrunde. Durch die verwendeten Eingangsdaten, die nötige Diskretisierung und die getroffenen Annahmen bzw. Randbedingungen ergeben sich Fehler bzw. Ungenauigkeiten, die bei der Ergebnisanalyse in Betracht gezogen werden müssen. Diese Faktoren verstärken sich unter Umständen durch die Aneinanderreihung der nichtlinearen Berechnungen und beeinflussen teilweise das Gesamtergebnis der Berechnung. Im Folgenden wird eine Auswahl möglicher Ungenauigkeiten, die im Rahmen der untersuchten Anwendungsbeispiele eine Rolle spielen diskutiert und bewertet.

Dazu wurden die Fehlerkriterien in die zwei Hauptgruppen *Eingangsdaten* und *Modellierung* gegliedert. Abbildung 5.1 zeigt diese Unterteilung und eine Übersicht der Gewichtung der Ungenauigkeiten.

Ungenauigkeiten der Eingangsdaten	Gewichtung
● Umformsimulation und Rücksprungsberechnung	+
● Statistische Streuung	o
● Werkstoffkennwerte	+
Ungenauigkeit der Modellierung	
● Elementgröße	+
● Vernachlässigung der Dickenvariation	o
● Örtliche Diversifikation der Integrationspunkte	-
● Abbildung der Randbedingungen	+

+ großer Einfluss      o Einfluss      - geringer Einfluss

Abbildung 5.1: Übersicht und Gewichtung ausgewählter Fehlerkriterien

## 5.1 Ungenauigkeiten der Eingangsdaten

### Umformsimulation und Rücksprungberechnung

In Kapitel 3.2.4 wurde aufgezeigt, dass die Simulation von Umformprozessen einen hohen Reifegrad erreicht hat und in vielen Bereichen industrielle Verwendung findet. Dennoch ist die Berechnung des Tiefziehens und des IHU mit Hilfe der FEM zahlreichen Ungenauigkeiten unterworfen. Insbesondere die Abbildung des Reibverhaltens während des Prozesses und die Rücksprungberechnung sind hierbei aktuelle Herausforderungen (Prier 1999, Kirmße u. Wesselmann 1998). Aus diesem Grund ist die Verifikation der Ergebnisse der Umformsimulation über alle untersuchten Prozessschritte von großer Bedeutung. Dazu werden die Ausgangsteile vor dem ersten Prozess mit einem geometrischen Raster markiert. Dieses symmetrische Raster in Form einzelner Kreise wird dauerhaft auf das Bauteil aufgebracht und mit Hilfe hochauflösender Kameras aufgezeichnet. Nach jedem Umformprozess wird das berasterte Bauteil erneut untersucht. Anhand der Verschiebung des ursprünglich regelmäßigen Rasters und der Verzerrung der aufgebrachten Kreise zu Ellipsen kann auf die plastische Dehnung des Bauteils geschlossen werden. Diese Dehnung wird mit den in der Simulation berechneten Dehnungswerten verglichen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der aktuelle Stand der Technik im Bereich der Umformsimulation umgesetzt und teilweise durch Rasteranalysen verifiziert. Dennoch sind die Ergebnisse der FEM-Berechnung Näherungslösungen, deren Ungenauigkeiten sich über die einzelnen Prozessschritte verstärken. Da die Umformsimulation als Ausgangsbasis für alle weiteren Berechnungen dient haben die ermittelten Ergebnisse und deren Qualität maßgeblichen Einfluss auf das Gesamtergebnis der Methode und müssen sehr sorgfältig berechnet werden.

### Statistische Streuung

Statistische Streuungen spielen in der thermischen Modellierung der Ersatzwärmequelle eine bedeutende Rolle. Da der reale Prozess des Laserstrahlschweißens physikalisch sehr komplex ist, findet man bei unterschiedlichen Experimenten mit gleichen Prozessparametern leichte Schwankungen in der Nahtgeometrie und der Temperaturverteilung vor. Durch die Bildung von Mittelwerten, die der Ermittlung der Ersatzwärmequelle zu Grunde liegen, können systematische und statistische Fehler nur bedingt

ausgeschlossen werden. Äußere Störfaktoren, die den realen Prozess während der gesamten Messreihe beeinflusst haben, werden durch die Bildung des Mittelwertes nicht erfasst. Hier sind beispielsweise unterschiedliche Oberflächen der Bauteile, sei es durch Beschädigungen oder Verunreinigungen zu nennen, die den Einkoppelprozess und damit die Temperaturverteilung beeinflussen.

Ein weiterer Aspekt der statistischen Streuung sind unterschiedliche Werkstoffzusammensetzungen. Verschiedene Chargen eines Werkstoffs weisen unter Umständen leichte Schwankungen in der Zusammensetzung auf. Dies hat veränderte Werkstoffeigenschaften und somit ein unterschiedliches thermo-mechanisches Verhalten zur Folge. Auf Grund des geringen Einflusses der Schwankungen ist dieser Aspekt in der Regel zu vernachlässigen.

### **Werkstoffkennwerte**

Die numerische Berechnung einer Wirkgröße (z.B. Verzug) unter Angabe einer Ursachengröße (beispielsweise Wärmeeinbringung) bedingt eine Umrechnungsgröße, die als Koeffizient wirkt (siehe Gleichung 2.5 und 4.2). Diese Koeffizienten beschreiben bei der Simulation des Laserstrahlschweißens das Verhalten des verwendeten Werkstoffs. Die nötigen Parameter zur Abbildung des thermischen Werkstoffverhaltens Wärmeleitfähigkeit, Dichte, spezifische Wärmekapazität und Umwandlungsenthalpie sowie die mechanischen Kennwerte E-Modul, Fließspannung, Querkontraktionszahl, Verfestigungsverhalten, Fließspannung und differentieller Wärmeausdehnungskoeffizient beinhalten dabei ein erhebliches Fehlerpotenzial. Dies liegt einerseits in der Fülle der Daten die über alle metallischen Phasen von Raum- bis zur Schmelztemperatur vorliegen müssen, andererseits an den zum Teil komplizierten Verfahrensweisen (z.B. Dilatometrie zur Analyse der Dehnung von Metallen in Abhängigkeit der Temperatur) zur Ermittlung der Werte.

Versuche haben gezeigt, dass insbesondere die spezifische Wärmekapazität, der E-Modul und die Fließspannung sehr großen Einfluss auf das mechanische Verhalten haben. Des Weiteren ist zu beachten, dass die Werkstoffkennwerte für die Umformsimulation mit denen der Schweißsimulation exakt übereinstimmen müssen, da sonst eine Übertragung der vorhergegangenen Belastungen nicht sinnvoll ist. Wird beispielsweise die Fließgrenze in der Schweißsimulation im Vergleich zur Umformsimulation mit einem geringeren Wert abgebildet, verursachen die im Bauteil verbleibenden Eigenspannungen

ein weiteres Fließen bzw. eine zusätzliche Verformung, die nicht der Realität entspricht.

Ein wichtiger Punkt für die Untersuchung des thermomechanischen Verhaltens der geschweißten Bauteile ist die Gefügeausbildung. Das entstehende Gefüge hängt sowohl vom Werkstoff und seiner chemischen Zusammensetzung als auch vom Abkühlvorgang ab. Um auf Basis dieser Informationen die Bestandteile des Gefüges und damit die entsprechenden Werkstoffkennwerte zu ermitteln, wurden metallurgische Modelle verwendet, die auf einer empirischen Grundlage basieren (Gleichung 3.6 bis 3.10). Diese können am ehesten das stark werkstoffspezifische Verhalten wiedergeben. Dennoch unterliegen diese Modelle auf Grund ihres empirischen Ursprungs einer gewissen Ungenauigkeit.

Um die Interpretation und Vergleichbarkeit der berechneten Ergebnisse zu gewährleisten, ist es nötig, alle verwendeten Werkstoffdaten, Werkstoff- und Metallurgiemodelle, sowie getroffene Annahmen und Vereinfachungen zu dokumentieren.

## 5.2 Ungenauigkeiten der Modellierung

### Elementgröße

Die Wahl der Elementgröße spielt bei FEM-Berechnungen eine sehr große Rolle, da diese entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit, die Dauer der Berechnung, den Speicherbedarf und die Lösbarkeit des Gleichungssystems hat. Letzteres äußert sich vor allem in numerischen Hindernissen wie z.B. Konvergenzproblemen. Die Anzahl der Elemente ist direkt proportional zur Berechnungsdauer. Die Herausforderung bei der Vernetzung der Bauteile liegt darin, dass die noch unbekannte Lösung der Aufgabe bei der Diskretisierung bereits berücksichtigt werden müsste. Ein Beispiel für eine schlecht gewählte Vernetzung zeigt Abbildung 5.2 und Abbildung 5.3. Es handelt sich hierbei um eine hybride Vernetzung (Schalen- und Volumenelemente), die im erweiterten Bereich der Schweißnaht nicht ausreichend verfeinert wurde. Dadurch sind die Temperaturgradienten zwischen zwei Integrationspunkten benachbarter Elemente zu groß, so dass bei einer linearen Extrapolation zwischen diesen Elementen negative Temperaturen berechnet werden.

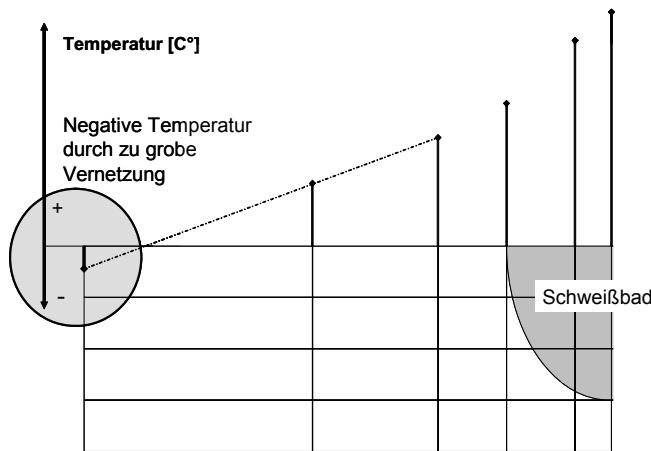


Abbildung 5.2: Entstehung negativer Temperaturen durch Interpolation

Die Folge sind Bereiche auf dem Netz, die trotz einer Anfangsbedingung des Bauteils von 20 °C negative Temperaturen aufweisen (siehe Abbildung 5.3) und die Berechnung verfälschen.

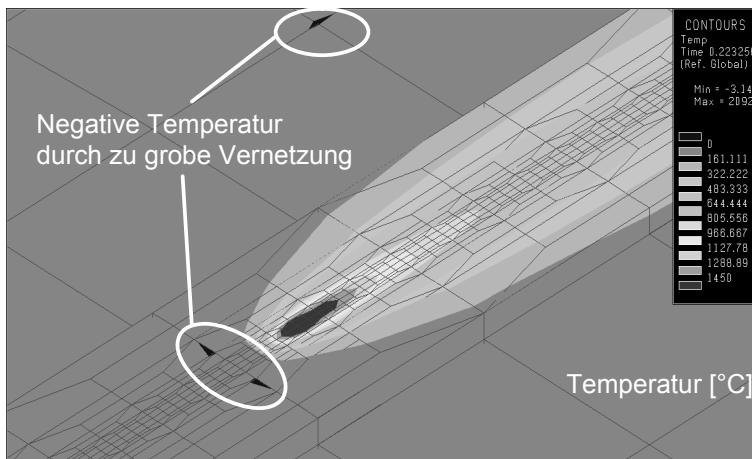


Abbildung 5.3: Negative Temperaturen durch eine zu grobe Vernetzung der Struktur

In der Praxis ist es daher günstig, bereits eine ungefähre Vorstellung der Lösung zu haben bzw. durch Voruntersuchungen mit vereinfachten Modellen diese frühzeitig zu ermitteln. Hierzu können sowohl stark vereinfachte Volumenmodelle, als auch zweidimensionale Schalenmodelle verwendet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse über die zu erwartende Temperaturverteilung, die Temperaturgradienten oder die Spannungsverteilung können dann dazu verwendet werden, ein geeignetes, genaueres Modell für die eigentliche Berechnung zu entwickeln.

Speziell die hier vorgestellte Methode erfordert eine vorausschauende Vernetzung des Bauteils. Durch die Übertragung der Attribute von Schalen- auf Volumenelemente und eine erneute Übertragung auf das durch eine Sonderform der adaptiven Vernetzung erstellte verfeinerte Netz ist eine Modifikation der Diskretisierung und die damit verbundene Anpassung des Modells sehr aufwändig.

### **Modellierung der Randbedingungen**

Die Abbildung mechanischer Randbedingungen hat großen Einfluss auf die Dauer und Genauigkeit der Berechnung. Insbesondere die der Realität entsprechenden Modellierungen über Kontaktflächen und eigenständige Werkstoffdaten für die Einspannung erhöhen die benötigten Rechenkapazitäten, den Aufwand der Modellierung und den Zeitbedarf der Berechnung deutlich. Daher werden die Einspannungen in der vorgestellten Methode durch eine Ersatzlösung mit Hilfe von linear-elastischen Federkennwerten abgebildet. Dies stellt einen Kompromiss zwischen der exakten Modellierung, der Einspannsituation und der starken Vereinfachung durch Festlegung einzelner Knoten dar. Diese Abstraktion erlaubt es, dennoch die Wechselwirkungen zwischen Bauteil und Spannung zu untersuchen und die potenzielle Fehlerquelle kann geduldet werden.

Thermische Randbedingungen werden in den verwendeten Modellen durch Emissionskoeffizienten (Strahlung) bzw. Temperaturübergangskoeffizienten (Konvektion) abgebildet. Liegen diese nicht vor, können Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden. So werden z.B. metallische Spannelemente häufig nicht mit Temperaturübergangskoeffizienten belegt, sondern auf Grund ihrer Bauweise als theoretisch unendlich betrachtet. So ist es möglich diesen eine feste (Raum-)Temperatur vorzugeben, da die Spannelemente die Wärme schnell abtransportieren und sich selbst kaum erwärmen.

### Örtliche Diversifikation der Integrationspunkte

Die vorgestellte Methode überträgt Dehnungswerte von Integrationspunkten (IP) des Schalenmodells aus der Umformsimulation auf IP der Volumenelemente der Schweißsimulation. Da die Dehnung eine intensive Größe ist, müssen die Werte nicht mit einem Übertragungsfaktor versehen werden, obwohl aus jeweils einem IP (Schalenmodell) die Werte an 4 IP (Volumenmodell) übertragen werden. Durch die Augmentierung folgt zwangsläufig eine örtliche Aufspreizung (vgl. Abbildung 4.21). Der maximale örtliche Verschiebungsvektor beträgt zwar nur etwa die Hälfte der Kantenlänge eines Schalenelementes, bewirkt aber durch die geringfügige Störung des Gleichgewichtszustands nach der Umformsimulation eine veränderte Struktur des resultierenden Spannungsfeldes. Diese ist abhängig von der Elementgröße der Schalenelemente der Umformsimulation, tritt aber bei der Größe der verwendeten Elemente in einem vernachlässigbaren Maß auf. Eine Überprüfungsmöglichkeit ist der in Kapitel 4.5.2 vorgestellte Rücksprung nach der Übertragung. Da dieser bei allen untersuchten Applikationen im Bereich weniger  $\mu\text{m}$  war, spielt die örtliche Diversifikation der Integrationspunkte nachweislich eine untergeordnete Rolle.

### Vernachlässigung der Dickenvariation

Eine weitere mögliche Fehlerquelle der hier vorgestellten Methode ist die Vernachlässigung der Dickenvariation nach dem Umformprozess. Ein Kriterium für den Umformprozess ist die Ausdünnung des Werkstoffs in den kritischen Zonen. Diese Ausdünnung darf einen bestimmten Wert (Versagen bei ca. 30% der Blechdicke) nicht überschreiten, sonst wird das Bauteil in der Umformsimulation als nicht darstellbar bzw. als Ausschuss gewertet. Diese Dickenvariation wird in der Umformsimulation berechnet und in den einzelnen Schalenelementen gespeichert. Durch die Verwendung von Volumenelementen in der Simulation des Laserstrahlschweißens geht diese Information bei der Übertragung jedoch verloren. Es ist zwar möglich, bei der Extrusion der Schalenelemente zu Volumenelementen diese spezifische Dicke zuzuweisen, bisher ist dies aber nur manuell durch unterschiedliche Gestaltung der Hexaederelemente realisierbar. Bei Modellgrößen von über 10000 Elementen ist diese Art der Modellierung nicht durchführbar. Diese Vernachlässigung birgt je nach Umformprozess und auftretender Ausdünnung ein gewisses Fehlerpotenzial. So ist die Energieeinbringung durch den Laser von der Dicke der Struktur abhängig. Bei konstanten Laserparametern wird beispielsweise bei

einem 2 mm Blech eine Einschweißung, bei einem 1 mm Blech eine Durchschweißung erzielt. Die Maximaltemperatur, die Temperaturgradienten und die daraus resultierenden Spannungen und Dehnungen unterscheiden sich in diesen Fällen maßgeblich voneinander. Abhilfe schafft hier eine Einteilung der Bauteilstruktur in Zonen. Diesen Zonen kann manuell der Mittelwert der in der Umformsimulation berechneten Zahlenwerte für die Blechdicke zugewiesen werden. Dies stellt nur eine grobe Näherung dar, zukünftig muss die Methode um die Übertragung der Dickenvariation und einer automatisierten Extrusion der Volumenelemente auf die entsprechende Materialstärke erweitert werden.

Die untersuchten Beispielbauteile haben jedoch gezeigt, dass bei einem stabilen Umformprozess eine Ausdünnung von weniger als 10% auftritt. Diese geringe Variation in der Dicke hat auf den Laserprozess nur eine unerhebliche Auswirkung. In **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist die Simulation einer Einschweißung bei einem 2 mm S235JR Blech der eines um 10% dünneren Blechs (1,8 mm) gleichen Werkstoffs gegenübergestellt. Die Parameter der Ersatzwärmequelle waren identisch. Es hat sich gezeigt, dass die Temperaturgradienten nur geringfügig voneinander abweichen und die ermittelte Maximaltemperatur um 2% abweicht.

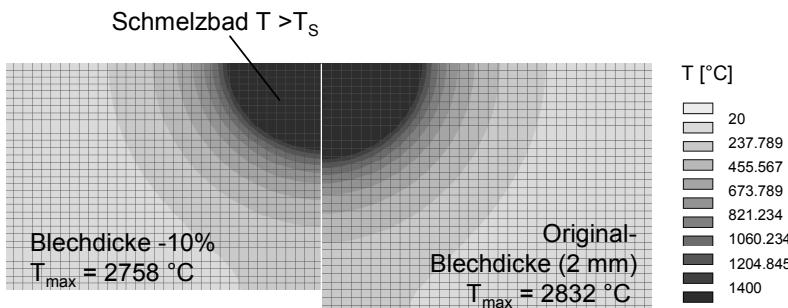


Abbildung 5.4: Maximaltemperatur und Temperaturgradienten in bei einer Blechdickenvariation von 10%

Die Blechausdünnung spielt somit im Vergleich zu den Spannungen, Dehnungen und der Kaltverfestigung eine untergeordnete Rolle. Diese Erkenntnisse wurden auch in Untersuchungen des Softwareherstellers Sysweld durch Gooroochurn (2002) bestätigt.

Deshalb wurde auf eine Aufteilung des Bauteils in unterschiedliche Zonen mit verschiedenen Blechdicken verzichtet.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die in dieser Arbeit vorgestellte komplexe Methode zahlreichen Ungenauigkeiten ausgesetzt ist. Teilweise handelt es sich dabei um allgemeine Herausforderungen der nichtlinearen FEM, teilweise sind dies auch sehr spezielle Fehlerquellen, die sich aus der Kopplung Umform-Laserstrahlschweißsimulation und der heterogenen Systemlandschaft ergeben.

Die Berechnung komplexer physikalischer Vorgänge bedarf zahlreicher Annahmen und Vereinfachungen, da diese sonst nicht berechenbar wären. Die rasante Entwicklung der Rechner- und Softwaresysteme erlaubt es bereits heute, immer komplexere und realistischere Modelle zu untersuchen. Damit die ermittelten Ergebnisse richtig interpretiert werden können, ist es äußerst wichtig, mögliche Fehlerquellen und Ungenauigkeiten und deren Einfluss auf das Gesamtergebnis zu kennen. Eine sorgfältige und vorausschauende Modellierung setzt ein hohes Maß an Expertenwissen voraus. Trotz dieser Einschränkungen ist die Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung vorangegangener Umformsimulationen ein wertvolles Simulationswerkzeug. Die im folgenden Kapitel vorgestellten Anwendungsbeispiele zeigen deutlich, dass durch eine gewissenhafte Modellierung und durch Verwendung der entwickelten Methode eine enorme Verbesserung in der Vorhersagegenauigkeit im Bereich der Simulation des Laserstrahlschweißens erreicht werden konnte

---

## 6 Verifikation und Anwendung

In diesem Kapitel wird die Methode der Ermittlung der Ersatzwärmequelle durch Versuche verifiziert. Ferner wird der Einsatz der Methode zur Berücksichtigung der Ergebnisse der Umformsimulation bei der Simulation des Laserstrahlschweißens an Beispielen aus der Praxis dargestellt. Die Möglichkeiten und derzeitigen Grenzen des Konzeptes werden erläutert und diskutiert. Beispiele sind zum einen ein Tiefziehnnapf aus Stahl. Mit Hilfe dieses Bauteils wurde die Methode verifiziert und das Verbesserungspotenzial durch die Berücksichtigung der Umformergebnisse aufgezeigt. Das zweite Anwendungsbeispiel ist aus der Karosseriefertigung gewählt. In diesem Fall wurde dargestellt, wie die Anwendbarkeit auf komplexe, industriell relevante IHU-Komponenten angewendet werden kann.

Die Schwierigkeit in der Verifikation der vorgestellten Methode liegt in der Beschaffung der Daten und realen Komponenten über die gesamte Prozesskette hinweg. Zum Nachweis des Verbesserungspotenzials der entwickelten Methode werden reale umgeformte Bauteile, sowie die Prozesssimulation aller Arbeitsschritte benötigt. Da für die Anpassung der Wärmequelle zahlreiche Querschliffe angefertigt wurden und eine statistische Streuung der Bauteileigenschaften betrachtet werden muss, ist eine ausreichende Anzahl (ca. 10 Stück) von Bauteilen für die Untersuchungen nötig. Das Grundmaterial der Strukturen wird vor der Umformung berastert, so dass nach dem Prozess eine Auswertung der plastischen Dehnung stattfinden kann. Mit Hilfe dieser Dehnung kann die Umformsimulation verifiziert und gegebenenfalls optimiert werden. Die umformtechnischen Simulationsmodelle und Berechnungen wurden vom Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (*utg*) der TU München erstellt. Die Herstellung der realen Komponenten setzt umformtechnische Anlagen sowie die entsprechenden Werkzeugeinsätze voraus. Hier wurde auf Komponenten aus der Industrie und des *utg* zurückgegriffen. Sämtliche Schweißaufgaben und die Modellbildung wurden am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) durchgeführt und ausgewertet.

## 6.1 Verifikation der Temperaturverteilung durch Schweißversuche

Die Berechnung der Temperaturverteilung im Bauteil ist von entscheidender Bedeutung für die Ergebnisse der Simulation des Laserstrahlschweißens. Aus diesem Grund wurden in einer physikalischen Versuchsreihe zahlreiche Schweißungen durchgeführt und die resultierende Temperaturverteilung auf der Schweißprobe gemessen. Parallel dazu wurde anhand der Querschliffe dieser Versuche die jeweilige Ersatzwärmequelle mit Hilfe der geometrischen Form des Schmelzbades und der Temperatur an einem definierten Punkt ermittelt. Mit Hilfe dieser Ersatzwärmequelle wurde die Schweißung abgebildet und die resultierende Temperaturverteilung berechnet. Diese Ergebnisse wurden mit den physikalischen Versuchen verglichen und ausgewertet.

Ziel dieser Versuche war es, aufzuzeigen, dass bei einer geometrischen Übereinstimmung der Schmelzbadgeometrie in Realität und Modell die Temperaturverteilung im gesamten Bauteil ebenfalls nahezu identisch ist.

### Physikalische Versuche

Dazu wurde ein Schweißprobenhalter (SPH) mit Bohrungen für Thermoelemente konzipiert, in den die eigentliche Schweißprobe aus S 235 JR eingeschoben werden kann. Dadurch ist es möglich zahlreiche Schweißproben mit exakt definierten Randbedingungen zu schweißen. Um den Probenhalter in hohem Maße zu isolieren und so Wärmeverluste an die Umgebung zu verhindern, wurde dieser in extrudierten Polystrol-Hartschaum (XPS) gebettet. XPS weist eine hohe Druck- und Wärmedämmfestigkeit auf und ist schwer entflammbar. Bei einer Temperatur von ca. 500°C beginnt dieser zu schmelzen, ohne dabei entflammt zu werden. Der SPH wurde formschlüssig an den XPS angepasst.

In die Bohrungen des SPH wurden mineralisierte Temperaturelemente, deren Einzeldrähte aus Nichtedelmetallen bestehen, eingebracht. Gemäß ihrer chemischen Zusammensetzung werden die Thermoelemente als NiCr-Ni bezeichnet. Die Funktionsweise dieser Thermoelemente vom Typ K beruht auf dem sog. Seebeck-Effekt, wonach eine Spannung generiert wird, die zu der Temperaturdifferenz zwischen warmer und kalter Verbindungsstelle proportional ist. Abbildung 6.1 zeigt den schematischen Aufbau der Versuchsanordnung mit den Thermoelementen.

Es wurden 30 Versuchsschweißungen mit je fünf Wiederholungen mit einem Hochleistungsdiodenlaser mit variierender Leistung (2,5 - 3 kW), diversen Vorschubgeschwindigkeiten (0,75 – 1 m/min) und unterschiedlichen Prozessgasen (z.B. Argon) durchgeführt. Die Messdaten wurden mit *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench* (LabVIEW) ausgewertet und erfasst.

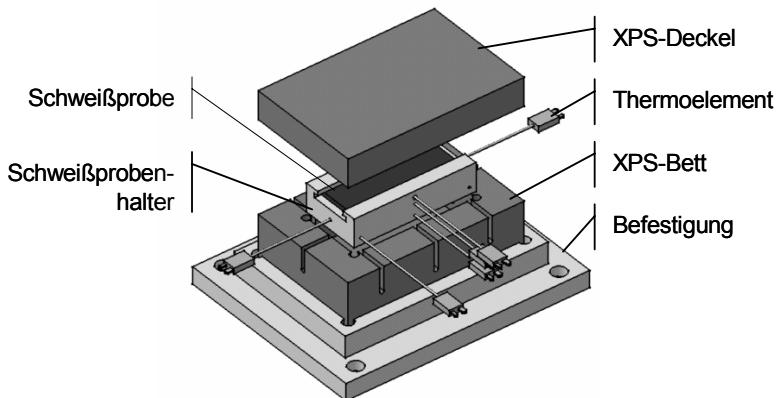


Abbildung 6.1: Schematischer Versuchsaufbau der Temperaturmessung

### Modellierung der Versuche

Entsprechend der in Kapitel 4 beschriebenen Vorgehensweise wurde die Ersatzwärmequelle definiert und das Simulationsmodell der Blindnahtschweißung aufgebaut und berechnet. Dazu war es nötig, das Bauteil durch Finite Volumenelemente hinreichend genau zu diskretisieren. Bei Aufheizgeschwindigkeiten, die beim Laserstrahlschweißen für eine Schweißgeschwindigkeit von 6 m/min und einer Leistung von 3,8 kW unter 8000 K/s liegen, ist eine Elementkantenlänge von 0,2 mm ausreichend (Grieb 2000). Im vorliegenden Fall treten dagegen Schweißgeschwindigkeiten von maximal 1 m/min auf, so dass bei konstanter Laserleistung geringere Temperaturgradienten resultieren. Deshalb wird eine Elementkantenlänge im Bereich des Schmelzbades von 0,3 mm als ausreichend bemessen, zudem erfolgt eine Validierung der Ergebnisse mit kleineren Elementen der Kantenlänge 0,2 mm. Geringere Temperaturgradienten in weiterer Entfernung zum Ort der Wärmeeinbringung erlauben eine weitmaschigere Vernetzung.

Aus Gründen der Reproduzierbarkeit und der Durchgängigkeit der Ergebnisse war es erforderlich nicht nur die eigentlichen Schweißproben aus S 235 JR, sondern auch den Probenhalter aus Aluminium mit temperaturabhängigen Werkstoffdaten abzubilden und in die Modellierung mit einzubeziehen. Wärmeverluste an die Umgebung wurden durch zusätzliche Modellierung von Elementen berücksichtigt, die mit Werkstoffdaten der Isolierung (XPS) dargestellt wurden. Zudem erforderte die Bestimmung der Maximaltemperatur an einer definierten Stelle im physikalischen und digitalen Versuch, an dem die Temperatur zu jedem Zeitschritt der Simulation ausgegeben werden kann.

Um im Anschluss an die Modellierung der Wärmequelle eine thermische Berechnung der gesamten Versuchsanordnung durchführen zu können, wurde zunächst der vollständige Versuchsaufbau modelliert. Die Parameteruntersuchungen und die Ermittlung der auftretenden Maximaltemperatur zur Beschreibung einer Wärmequelle wurden dagegen aus Gründen der Rechenzeit nur an einem Ausschnitt des gesamten Modells durchgeführt. Dabei empfiehlt es sich, einen Bereich in der Nähe der Schweißnahtmitte zu wählen, um unnötige Fehler, basierend auf transienten Prozessen an den Schweißnahtenden, nicht mit in die Berechnung einzubeziehen.

Abbildung 6.2 zeigt die mit Volumenelementen der Kantenlänge 0,3 mm vernetzten Bauteile, die zur Modellierung der Wärmequelle (Abbildung 6.2a) und zur anschließenden Berechnung der gesamten Versuchsanordnung (Abbildung 6.2b) verwendet wurden. Das Koordinatensystem ist dabei so gewählt, dass die Schweißrichtung mit der x-Koordinatenrichtung übereinstimmt.

Das Modell wurde mit den Werkstoffdaten für Aluminium, Stahl und XPS (Isolierung) versehen und die Wärmeübergangskoeffizienten aus Tabellenwerken übernommen. Über die Gleichungen 3.8 bis 3.10 wurde die Phasenumwandlung des Stahlwerkstoffs durch hinterlegte Unterroutinen berücksichtigt. Der angesprochenen Isolierung konnten auf Grund von geringer thermischer Belastung konstante Werte für die Dichte, den Wärmeübergangskoeffizient und der Wärmeleitfähigkeit zugewiesen werden, bei den metallischen Werkstoffen wurden diese als Funktion der Temperatur hinterlegt.

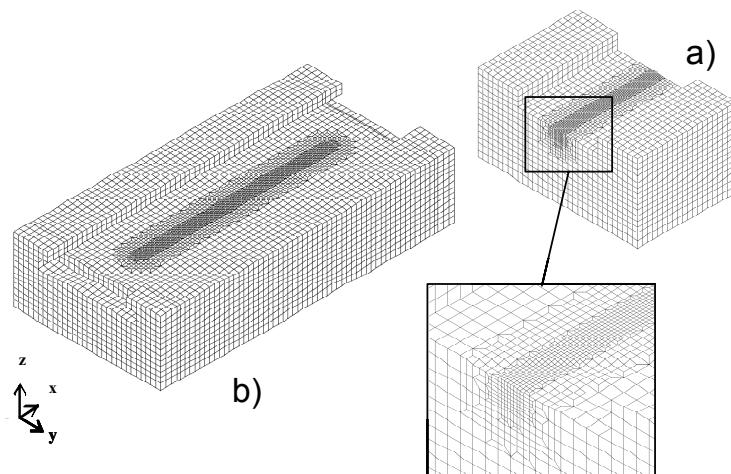


Abbildung 6.2: Vernetztes Modell (Schweißprobenhalter und Schweißprobe) zur Modellierung der Wärmequelle.

Die Modellierung der Ersatzwärmequelle erfolgt mit Hilfe des in Kapitel 4.3 beschriebenen iterativen Vorgangs an dem vereinfachten Modell bis die gewünschte Nahtgeometrie vorliegt. Anschließend wird die Ersatzwärmequelle translatorisch durch die detailliert modellierte gesamte Bauteilgeometrie bewegt um die Blindschweißung abzubilden.

#### Vergleich numerische Ersatzwärmequelle – physikalische Versuche

Repräsentativ für alle durchgeführten Versuchsreihen werden im Folgenden die Wärmequellen für drei variierende Schmelzbadgeometrien vorgestellt. Die realen Querschliffe sind den Ergebnissen der Simulation graphisch gegenübergestellt (Abbildung 6.3 – 6.5) und durch die Tabelle 6.1 mit den physikalischen Versuchsparametern ergänzt. In der Simulation wurde die Temperatur eines charakteristischen Punktes (Thermoelement A, Abbildung 6.8) auf der Bauteilstruktur ermittelt und den dort gemessenen Werten gegenübergestellt bzw. die Abweichung bestimmt. Zusätzlich ist die berechnete Maximaltemperatur in der Schweißnaht dargestellt.

Versuch Nr.:	Realität				Simulation		
	nominelle Leistung HLDL [W]	Gasmischung	$v_s$ [m/min]	Maximal- temperatur char. Punkt [°C]	Maximal- temperatur char. Punkt [°C]	Abweichung in %	Maximal- temperatur absolut [°C]
K 009	2500	Argon	0,833	95	79 (3543)	16,8	3543,1
K 023	3000	Ar CO <sub>2</sub> 92 8	1	86	83 (3344,4)	3,5	3344,4
K 033	3000	Lasgon	0,75	126	120 (3831,4)	4,76	3831,4

Tabelle 6.1: Prozessparameter in Realität und Simulation

Die Versuchsreihe K009 ist maßgeblich geprägt durch flache Nähte mit einem geringen Aspektverhältnis. Eine etwas niedrigere Laserleistung von 2500 W unterstützt diesen Effekt. Ein Vergleich der Temperaturen aus Experiment und Simulation an einem charakteristischen Punkt im Bauteil zeigt, dass derartige Schweißnähte durch die verwendete konische Wärmequelle nicht optimal abgebildet werden können (siehe Abbildung 6.3).

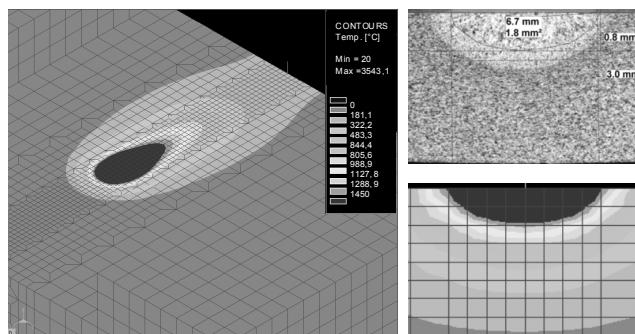


Abbildung 6.3: Schmelzbadgeometrie der Ersatzwärmequelle Versuchsreihe K009

Wird dagegen die Oberflächenspannung durch einen geringen Anteil von Aktivgas herabgesetzt und mit einer erhöhten Laserleistung von 3000 W kombiniert (Versuchsreihe K023), so vergrößert sich die Einschweißtiefe um ca. 50%. Die resultierenden Schweißnahtgeometrien sind unter Berücksichtigung der auftretenden Temperaturen durch die verwendete konische Ersatzwärmequelle der Simulation beschreibbar (siehe Abbildung 6.4). Betrachtet man die auftretende Maximaltemperatur in der Schweißnaht von  $T_{\max}=3344,4^{\circ}\text{C}$ , so ist diese als durchaus plausibel einzuschätzen, da ab etwa  $2800^{\circ}\text{C}$  Dampftemperatur erreicht ist und im Experiment ein Gewichtsverlust durch abströmenden Metalldampf von 110 mg errechnet wurde.

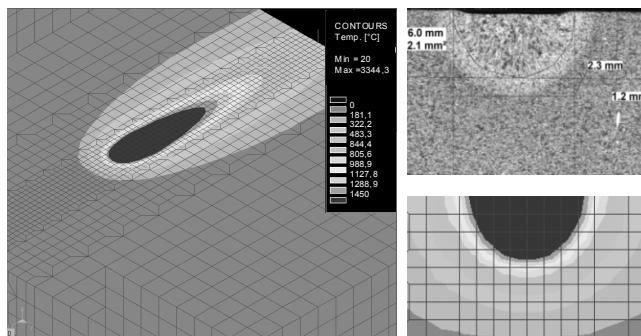


Abbildung 6.4: Schmelzbadgeometrie der Ersatzwärmequelle Versuchsreihe K023

Die Schmelzbadgeometrien der Versuchsreihe K033 weisen auf Grund des verwendeten Prozessgases *Lasgon* ein hohes Aspektverhältnis auf. Dadurch ist es möglich, den Parameter  $z_i$  der konischen Ersatzwärmequelle sehr weit in negativer z-Richtung im Bauteil zu platzieren und eine geringe Wechselwirkung mit den übrigen Parametern  $z_i, r_e, r_i$  (siehe Abbildung 4.13) zu erlangen. Ein optimaler Abstimmprozess aller einzustellenden Parameter kann erreicht werden und sowohl Temperaturen, als auch Schmelzbadgeometrien von Experiment und Simulation stimmen überein (siehe Abbildung 6.5). Der hohe Wert der Maximaltemperatur an der Schmelzbadoberfläche von  $T_{\max}=3831,4^{\circ}\text{C}$  resultiert einerseits aus der geringeren Vorschubgeschwindigkeit von  $v_s=0,75$  m/min gegenüber den vorangestellten Versuchen und ist anderseits durch den experimentell ermittelten Gewichtsverlust durch abströmenden Metalldampf von 94 mg zu erklären.

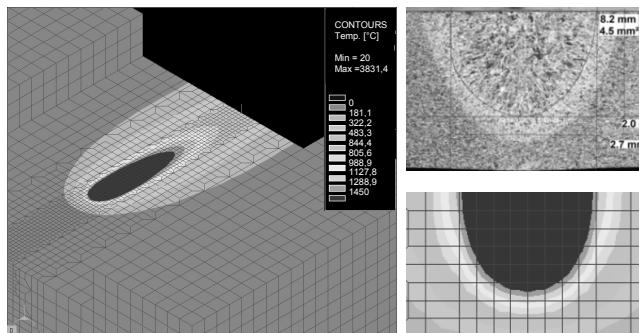


Abbildung 6.5: Schmelzbadgeometrie der Ersatzwärmequelle Versuchsreihe K033

### Untersuchung der Vernetzung

Zur numerischen Validierung der durchgeföhrten Untersuchungen mit einer Elementkantenlänge von 0,3 mm wurde die Versuchsreihe K033 unter Verwendung identischer Prozessparameter zur Beschreibung der Ersatzwärmequelle mit einem feiner vernetzten FE-Modell wiederholt. Dabei finden im Bereich des erwarteten Schmelzbades Volumenelemente der Kantenlänge 0,2 mm Verwendung. Die resultierenden Ergebnisse sind in Abbildung 6.6 dargestellt. Demnach sind im Modell mit höherer numerischer Genauigkeit keinerlei Abweichungen in der Schmelzbadgeometrie zu beobachten. Zudem wird für die Temperatur an einem exakt definierten Ort in der Bauteilgeometrie einen Wert von  $T=123^{\circ}\text{C}$ , der lediglich um  $3^{\circ}\text{C}$  von der berechneten Temperatur des weniger fein vernetzten Modells abweicht (siehe Tabelle 6.1) ermittelt. Die Abweichung der absoluten Maximaltemperatur von  $\Delta T=66,7^{\circ}\text{C}$  liegt zudem im Bereich der beispielsweise von Grieb (2000) geforderten numerischen Genauigkeit von 3%.

Ein Vergleich aller durchgeföhrten Versuche zur Modellierung der Wärmequelle zeigt grundsätzlich, dass Schweißnähte ab einem Aspektverhältnis von ca. 0,2 mit einem Fehler von weniger als 5% durch eine konische Wärmequelle mit gaussförmiger Intensitätsverteilung abgebildet werden können. Die auftretenden Temperaturen innerhalb der Bauteilgeometrie sind konsistent mit den Werten der physikalischen Temperaturmessungen. Zudem können auftretende Maximaltemperaturen zwischen  $3300^{\circ}\text{C}$  und  $3900^{\circ}\text{C}$  an der

Schweißnahtoberfläche, welche die Siedetemperatur von Stahl überschreiten, plausibel durch experimentell gewonnene Aussagen bestätigt werden.

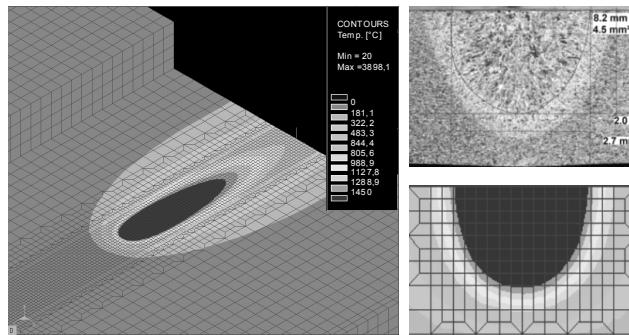


Abbildung 6.6: Schmelzbadgeometrie des höher diskretisierten FE-Modells

### Vergleich der Schweißung in Simulation und Realität

Die translatorisch mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,75 m/min bewegte Ersatzwärmequelle aus der Versuchsreihe K033 wird durch das detailliert abgebildete Gesamtmodell des Versuchsaufbaus bewegt und somit die Blindschweißung berechnet (siehe Abbildung 6.7).

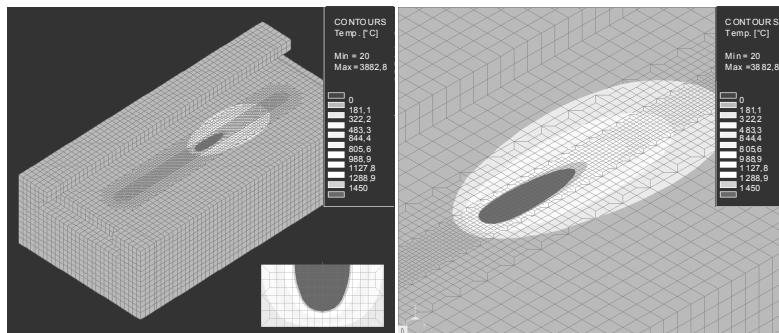


Abbildung 6.7: Graphische Darstellung der Berechnung der gesamten Schweißnaht

Die Übertragung der Wärmequelle vom vereinfachten Simulationsmodell auf das Gesamtmodell verursacht eine Abweichung der Maximaltemperatur von

0,4% (15,3°C). Die resultierende Schmelzbadgeometrie des Teilmodells stimmt mit der des Gesamtmodells und den realen Querschiffen überein, so dass die Wahl der Systemgrenze des vereinfachten Modells zur Ermittlung der Wärmequelle bestätigt wurde.

In Abbildung 6.9 und Abbildung 6.10 ist der gemessene Temperaturverlauf an zwei Thermoelementen einer exemplarischen Versuchsreihe den Ergebnissen der Simulation an diesen Stellen gegenüber gestellt. Die Position der Thermoelemente ist Abbildung 6.8 zu entnehmen.

Die mit Simulation bezeichneten Kurven beziehen sich dabei auf definierte Stellen im FE-Netz der Schweißsimulation, Messung dagegen steht für die im physikalischen Versuch an den Thermoelementen aufgezeichneten Werte. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist eine reduzierte Anzahl von Messwerten abgebildet.

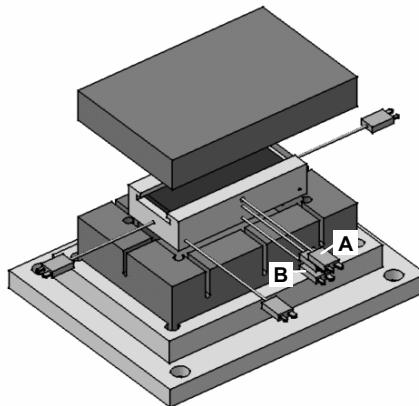


Abbildung 6.8: Position der Thermoelemente A und B

Die Einstellung eines stationären Temperaturniveaus erfolgt dabei sowohl in der Simulation, als auch in der Realität nach einer Zeit von  $t=15$  s. Im stationären Bereich kann ein Offsetwert der Temperatur  $\Delta T$  von etwa 22°C erkannt werden. Dies lässt darauf schließen, dass die in der Simulation als ideal abgebildete Isolierung geringen Abstrahlungsverlusten im physikalischen Versuch gegenübersteht. Der Verlauf der Temperaturkurve und der Maximalwert stimmen in Simulation und Messung nahezu exakt überein.

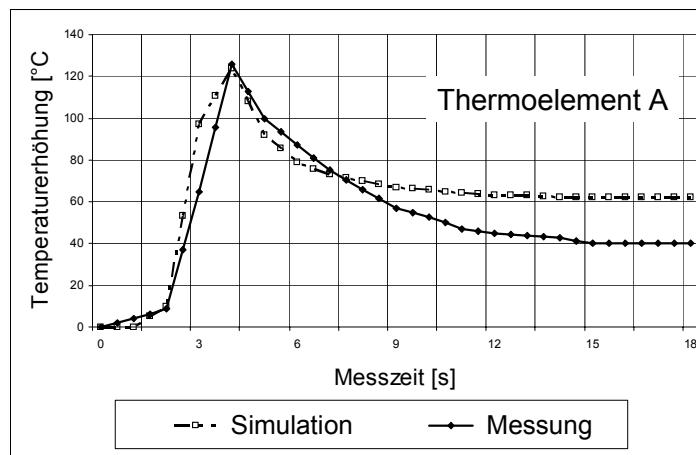


Abbildung 6.9: Temperaturverlauf im Punkt A in Simulation und Realität

In Abbildung 6.10 ist der Verlauf der Temperatur im Thermoelement B (Position siehe Abbildung 6.8) dargestellt.

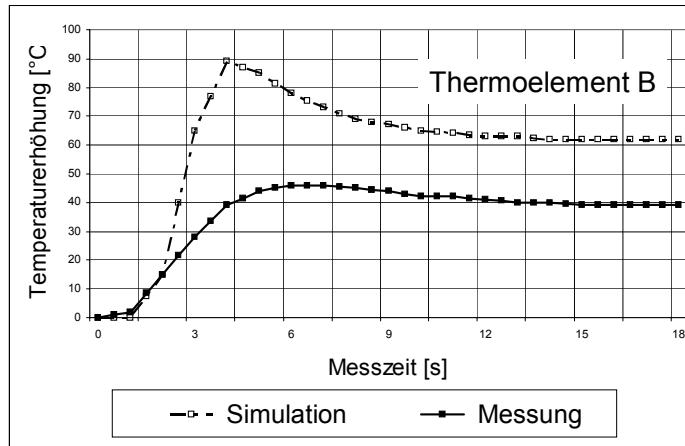


Abbildung 6.10: Temperaturverlauf im Punkt B in Simulation und Realität

Im stationären Bereich weisen die Temperaturverläufe erneut die Abweichung von ca. 22°C auf. Der sehr große Temperaturunterschied in der Maximal-

temperatur von ca. 45°C ist auf den idealisierten Wärmeübergang von der Schweißprobe auf den SPH in der Schweißsimulation zurückzuführen. Trotz Verwendung von Wärmeleitpaste in den realen Experimenten konnte der in der Simulation abgebildete theoretische Wärmeübergangskoeffizient nicht erreicht werden.

Nach Auswertung der Messungen und Berechnungen an allen Thermoelementen lässt sich zusammenfassend feststellen, dass die in Kapitel 4.4 beschriebene Vorgehensweise zur Ermittlung der Ersatzwärmequelle mit Hilfe von Querschliffen die Temperaturverteilung im Bauteil gut abbildet. Auftretende Abweichungen einander entsprechender Temperaturverläufe aus Simulation und Realität waren plausibel durch erhöhte Abstrahlungsverluste, sowie einen nicht idealisierten Wärmeübergang im physikalischen Versuch zu erklären. Diese Vorgehensweise zur Anpassung der Wärmequelle wurde für die folgenden Beispielbauteile übernommen.

## 6.2 Tiefziehnäpf

Für zahlreiche industrielle Anwendungen, wie z.B. Spülbecken, werden Stahlwerkstoffe durch ein einstufiges Tiefziehverfahren in sog. Näpfe ungeformt. An einem exemplarischen Tiefziehnäpf wird im Folgenden die Methode zur Kopplung der Umformsimulation mit der Simulation des Laserstrahlschweißens dargestellt.

### Analyse der Fertigungsaufgabe und physikalischer Versuch

In der Analysephase wurde die herzustellende Geometrie definiert. Es handelt sich dabei um einen 160 mm x 120 mm x 65 mm (Breite, Höhe, Tiefe) großen Napf aus DC04 mit einer Wandstärke von 1 mm. Die zugeschnittene Platine wurde in einem Zug umgeformt, das Bauteil anschließend nicht beschnitten oder abgekantet. An den umgeformten Napf wurde mit einem Nd:YAG Laser (3 kW Leistung, 0,3 mm Fokusdurchmesser, Vorschub 2 m/min) an der Oberfläche eine Blindnaht angebracht (siehe Abbildung 6.11). Dazu wurde das Bauteil in einer angefertigten Vorrichtung ausgerichtet und eingespannt. Es wurden fünf Näpfe umgeformt und geschweißt.

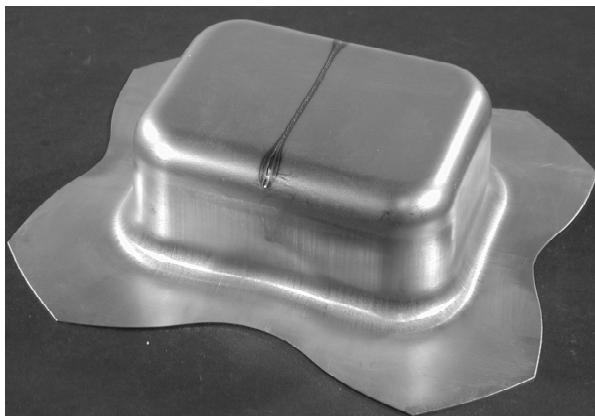


Abbildung 6.11: Blindnaht an der Oberfläche des Napfes

Die Näpfe wurden vor und nach dem Schweißen mit Hilfe eines 3D-Scannersystems digitalisiert und die Bilder mit einem Best-Fit-Algorithmus überlagert. Dabei werden die aufgenommenen Pixelwolken durch mathematische Algorithmen übereinander gelegt und so verschoben, dass eine möglichst hohe Übereinstimmung erzielt wird. Das Ergebnis ist ein digitales Modell des Verzugs durch die Wärmeeinbringung beim Schweißen.

### Umformsimulation

Die Umformsimulation einschließlich der Rücksprungberechnung der Struktur wurde mit Elementen mit fünf Integrationspunkten über die Dicke berechnet. Das Ergebnis wurde für die Kopplung auf ein FE-Modell bestehend aus 4817 Schalenelementen mit einer Kantenlänge von 4 mm und einer durch drei Integrationspunkte dargestellten virtuellen Dicke von 1 mm projiziert. Die Berechnung des Prozesses erfolgte mit dem kommerziellen FE-Programm *PamStamp* der Firma *ESI Group*. Das Ergebnis war die Geometrie des Napfes nach dem Umformprozess und dem Ausspannen des Bauteils (also nach der Rücksprungberechnung), sowie eine neutrale Textdatei mit den Eigenspannungswerten, den Werten der Kaltverfestigung und der elastischen Dehnung pro Integrationspunkt je Element.

### Erstellung des FE-Netzes

Basierend auf diesen Informationen wurde das FE-Netz für die Schweißsimulation aufgebaut. Dazu wurde das FE-Netz der Umformsimulation

importiert und die Schalenelemente durch Extrusion in Volumenelemente umgewandelt. Die Blechdicke wurde durch 3 Elemente in Dickenrichtung repräsentiert. Die Nummerierung der Elemente wurde durch die entwickelte Unterroutine geordnet.

### **Modellierung der dynamischen Wärmequelle**

Mit Hilfe von Querschliffen der realen Versuche, wie bereits erläutert und verifiziert, wurde die Ersatzwärmequelle für diesen Prozess modelliert. Die mathematischen Kenngrößen einer konischen Wärmequelle wurden iterativ angepasst, bis die Geometrie des Schmelzbades in Simulation und realem Versuch hinreichend genau übereinstimmt. Dabei fand ein vereinfachtes FE-Modell der Struktur Verwendung. Die Ersatzwärmequelle wurde in das Gesamtmodell des Napfes übernommen und die Schweißbahn durch Stabelemente modelliert.

### **Kombination der Fertigungsprozesse**

Die Ergebnisinformation des Schalenmodells wurde mit Hilfe der entwickelten Unterroutine entsprechend der in Kapitel 4 beschriebenen Methode aus der neutralen Textdatei ausgelesen und auf das Volumenmodell übertragen. Das Ergebnis dieser Übertragung ist am Beispiel der Spannung  $\sigma_{11}$  in x-Richtung den Ergebnissen aus der Umformsimulation in Abbildung 6.12 graphisch gegenüber gestellt. Die graphischen Abweichungen resultieren aus der örtlichen Diversifikation der Integrationspunkte (vgl. Kapitel 5.2) und der unterschiedlichen Darstellung von Schalen- und Volumenmodellen. Schalenmodelle können in unterschiedlichen Ebenen der Integrationspunkte dargestellt werden (obere, mittlere und untere Ebene), während die Ergebnisse in Volumenelementen über das ganze Element dargestellt sind. Vergleicht man die einzelnen Zahlenwerte der Spannungen an den Integrationspunkten, so erhält man eine exakte Übereinstimmung.

Das Volumennetz wurde entlang der Schweißnaht auf 47899 Elemente stark verfeinert (siehe Abbildung 6.13) und die übertragenen Spannungs-, Dehnungs- und Kaltverfestigungswerte auf dieses feine Netz projiziert.

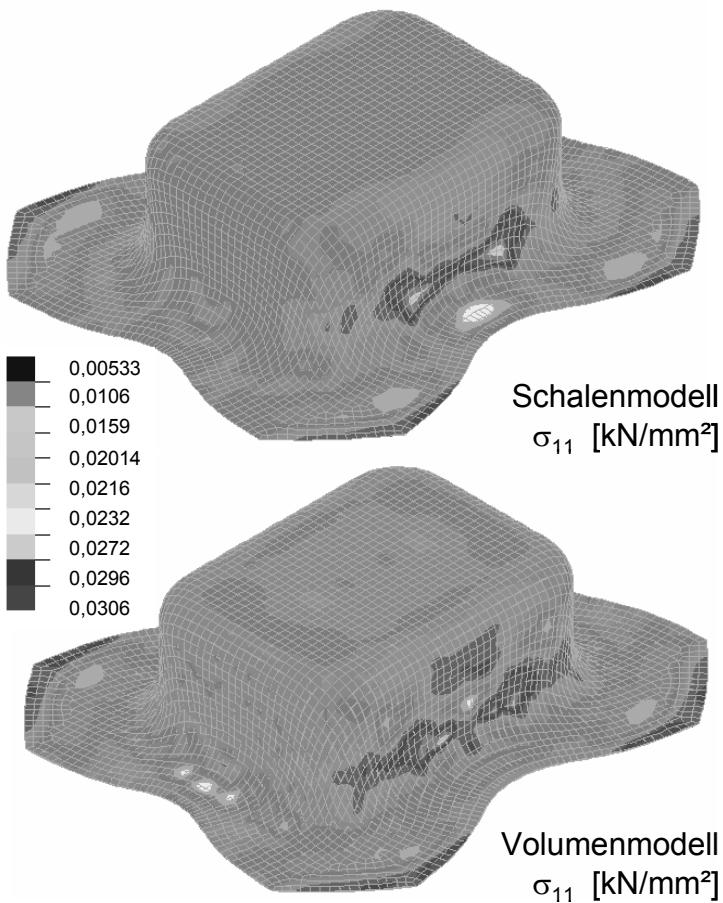


Abbildung 6.12: Spannung  $\sigma_{11}$  in x-Richtung im Schalenmodell nach dem Umformen (Bild oben) und auf das Volumenmodell übertragener Spannungszustand (Bild unten)

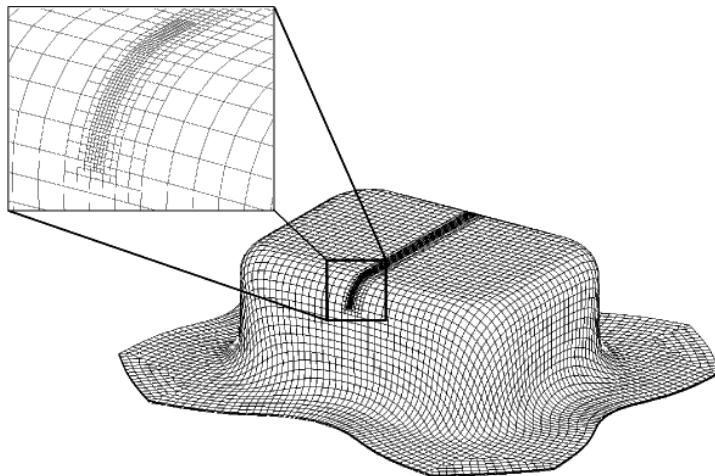


Abbildung 6.13: Lokal verfeinertes Volumenmodell

### Thermische Berechnung

Den Elementen des Modells wurden die Werkstoffdaten der thermischen Berechnung (Wärmeleitfähigkeit, Dichte, spezifische Wärmekapazität) für S 235 JR von Raum- bis zur Schmelztemperatur über alle metallischen Phasen zugewiesen. Die Phasenübergänge (Gleichung 3.8 und 3.10), und die thermischen Randbedingungen (Gleichung 4.3, 4.4 und 4.5) wurden durch UnterROUTinen hinterlegt. Die Ersatzwärmequelle wurde in einem transienten Prozess entlang den Stabelementen mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit von 2 m/min durch das Bauteil bewegt. Das Ergebnis war die Temperaturverteilung auf dem Napf von Beginn der Schweißung bis zum Abkühlen auf nahezu Raumtemperatur.

### Thermomechanische Simulation

Abschließend wurden zwei thermomechanische Berechnungen durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen der thermischen Untersuchungen, den temperaturabhängigen mechanischen Werkstoffdaten (E-Modul, Querkontraktionszahl, differentieller Wärmeausdehnungskoeffizient, Fließspannung, Verfestigungsverhalten) sowie den mechanischen Einspannungen wurde der

Verzug des Napfes mit und ohne Initialbelastung durch die Spannungen aus dem Umformprozess berechnet. Anschließend wurden die Einspannbedingungen aufgelöst und der resultierende Verzug der Struktur berechnet.

### **Vergleich physikalische Versuche - Simulation**

Die Ergebnisse dieser Simulationsläufe sind in Abbildung 6.14 als Gesamtverzug in [mm] graphisch dargestellt. Dabei zeigt die Abbildung oben den durch das Scannersystem ermittelten Verzug des realen Bauteils nach dem Schweißprozess. Deutlich ist die Konzentration des Verzugs im Bereich der Schweißnahtmitte auf der Oberfläche des Napfes zu erkennen. Der über fünf Näpfe gemittelte Maximalverzug beträgt dabei 0,22 mm. In der Mitte der Abbildung ist die Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Umformsimulation dargestellt. Es zeigt sich eine Übereinstimmung der Werte mit einer identischen Verteilung des Verzugs und einem Maximalwert von 0,24 mm. Im unteren Bereich der Abbildung ist das Ergebnis der Schweißsimulation ohne Berücksichtigung der Umformsimulation dargestellt. In diesem Fall konzentriert sich der Verzug auf das erste Drittel der Schweißnaht bei einem Maximalwert von 0,13 mm

Abbildung 6.15 zeigt den Verlauf des Verzugs an der Oberfläche des Napfes rechtwinklig zur Schweißnaht (siehe Markierung in Abbildung 6.14) in ausgewählten Messpunkten. Die Kurve des physikalischen Experiments stellt den Mittelwert dar, die Fehlerindikatoren zeigen die statistische Streuung der Messwerte bei fünf Versuchen. Die Simulation mit Berücksichtigung der Umformergebnisse weist in diesem Bereich ebenso wie die realen Versuche das Maximum des Gesamtverzugs auf. Die Simulation ohne Berücksichtigung hingegen ermittelt das Maximum nicht in diesem Bereich, so dass die Ergebnisse in diesem Querschnitt deutlich unterhalb der gemessenen Werte liegen.

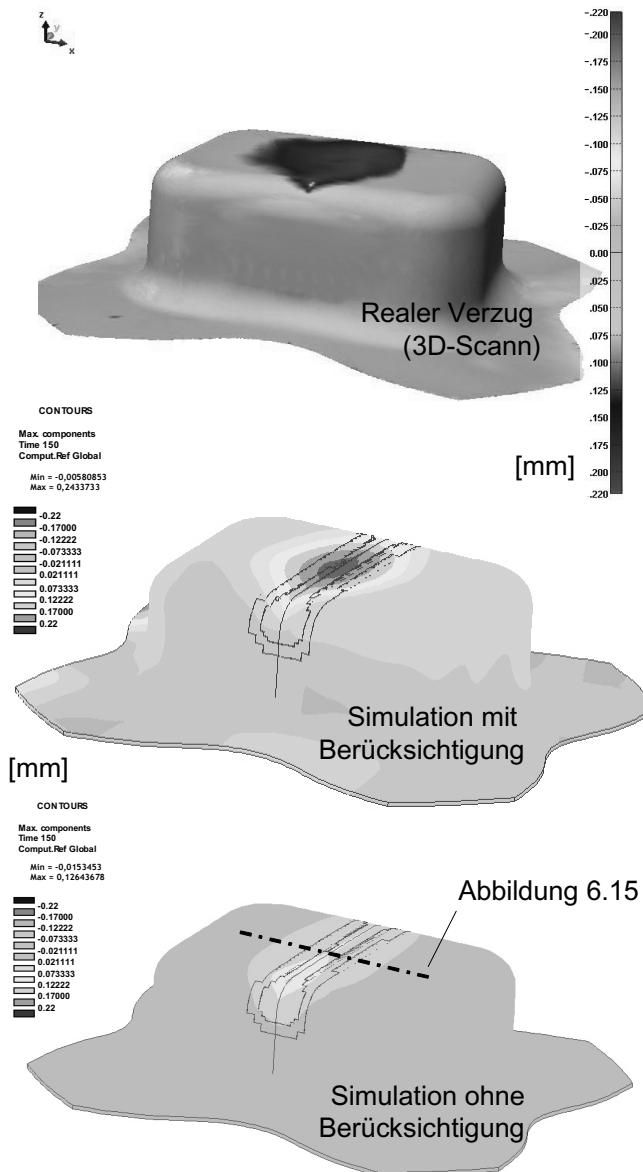


Abbildung 6.14: Verzug des Napfes nach dem Schweißen im realen Bauteil und in der Simulation

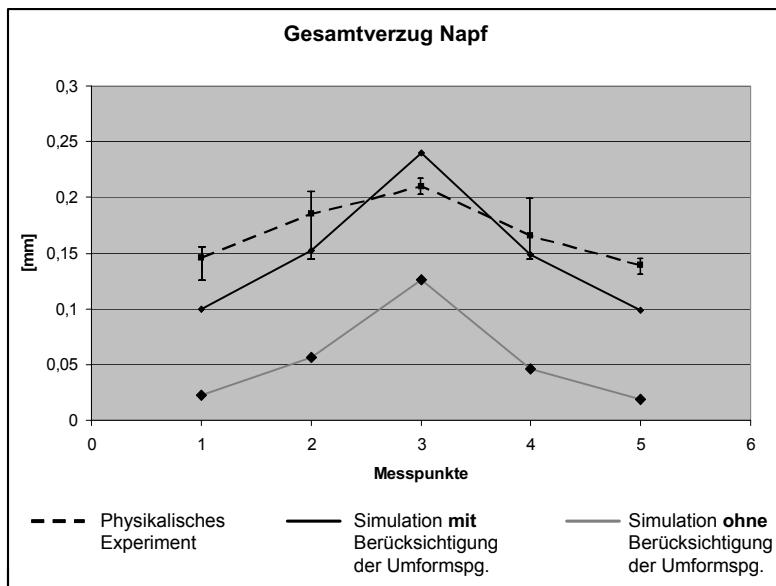


Abbildung 6.15: Gesamtverzug des Napfes in Simulation und Experiment an der Oberfläche quer zur Schweißnaht

Das Experiment hat gezeigt, dass die Berücksichtigung vorangegangener Belastungen das Berechnungsergebnis zur Vorhersage des Bauteilverzugs beim Laserstrahlschweißen deutlich verbessert. Dies gilt sowohl für den zu erwartenden Maximalverzug als auch die geometrische Verteilung.

## 6.3 IHU-Längsträger

Die in diesem Kapitel behandelte Kraftfahrzeug-Trägerstruktur wurde durch einen mehrstufigen IHU-Prozess hergestellt. Dieser Prozess bedingt durch hohe Umformgrade sowohl eine erhebliche Gestaltänderung, als auch einen komplexen Eigenspannungszustand. Durch die Energieeinbringung beim Schweißen wird der hochenergetische Gleichgewichtszustand gestört. Im Folgenden wird dieser Effekt durch die Verwendung des Eigenspannungszustandes nach der Umformung als Ausgangszustand für die Schweißsimulation in der Modellierung berücksichtigt.

### Phyiskalischer Versuch

Ausgangsbauteil für die Längsträgerstruktur waren Rohre mit einem Durchmesser von 103 mm. Diese wurden in einem ersten Prozess vorgebogen und anschließend im IHU-Werkzeug umgeformt. Fünf Bauteile wurde mit Hilfe einer Koordinatenmessgerät vermessen.

Im Versuchsaufbau für den Schweißprozess wurde die feste Einspannung so gestaltet (siehe Abbildung 6.16), dass durch eine Schweißung im äußeren Bogen des Bauteils der Verzug einseitig beschränkt bleibt. Die Längsträger wurden mit einem Nd:YAG Laser (2 kW Leistung, 0,3 mm Fokussdurchmesser und 1,5 m/min Vorschub) geschweißt.

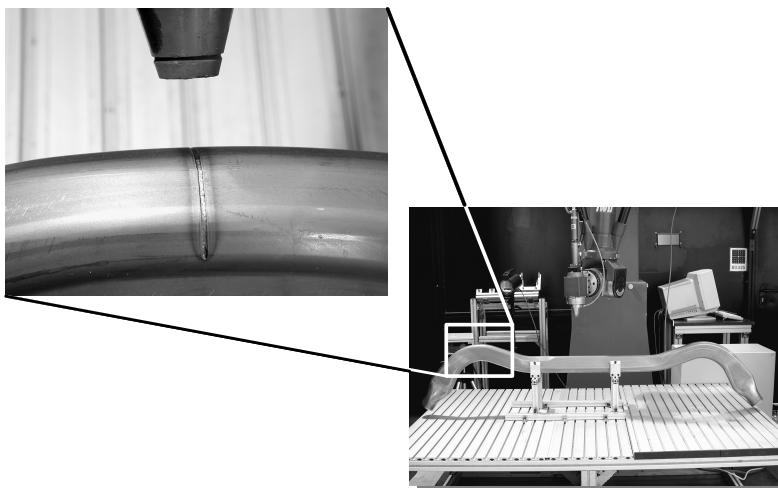


Abbildung 6.16: Vorbereitung zum Laserstrahlschweißen und Lage und Gestalt der Schweißnaht

Ausgewählte Punkte der Struktur wurden vor und nach der Schweißung analysiert. Als Referenzkoordinatensystem wurde das Koordinatensystem der folgenden Simulation verwendet, so dass die Ergebnisse direkt verglichen werden konnten. Zu beachten ist hierbei, dass sich eine Vermessung des Verzugs des dreidimensionalen Bauteils mit einer Koordinatenmessmaschine als ungenauer als die in Kapitel 6.2 beschriebene Digitalisierung der Struktur erwiesen hat. Der Grund hierfür liegt in der zweimaligen manuellen Vermessung. Nach Definition der Bezugsebenen werden ausgewählte Punkte

angefahren. Nach dem Schweißprozess werden die Bauteile erneut eingespannt und diese Punkte wieder angetastet. Trotz größter Sorgfalt bei diesem Vorgehen ergibt sich daraus in gewisser Streubereich, der bei der Ergebnisdiskussion betrachtet werden muss.

### **Simulation und Vergleich**

Die Vorgehensweise und Modellierung der Schweißung entspricht dem Tiefziehnapf. Auf Grund der Symmetrie der Struktur und der gewählten Einspannung ist es möglich in der Simulation nur eine Hälfte des Trägers zu modellieren, ohne dabei das Gesamtergebnis zu beeinflussen. Die Modellgröße wurde dadurch drastisch reduziert.

Die Simulationsergebnisse aller Umformprozesse (Biegen und IHU) wurden auf ein neutrales Schalenmodell des IHU-Bauteils projiziert, welches aus 9345 Knoten bzw. 8976 Elementen mit einer Kantenlänge von 4 mm besteht. Dieses Netz wurde in einer Extrusion in ein Hexaedermodell mit drei Elementen in Dickenrichtung, die die Blechdicke von 1 mm repräsentieren, umgewandelt.

Mit Hilfe von Querschliffen wurde die Ersatzwärmequelle iterativ angepasst und die Schweißbahn in Form von Stabelementen abgebildet.

Die Übertragung der Ergebnisse aus der Umformsimulation wurde über die neutrale Textdatei vorgenommen. Da die Nummerierung der Elemente aus der Umformsimulation in diesem Fall zufällig und somit ungeordnet war, war es nötig, diese Datei neu zu strukturieren, damit die Werte der Schalenelemente den Volumenlementen eindeutig zugewiesen werden können. Zu diesem Zweck wurde das entwickelte Fortran Programm verwendet, das die zusammengehörenden Knoten, Elemente und Attribute der einzelnen Ergebnissätze in der Ergebnisdatei dedektiert und neu ordnet. Nach erfolgreicher Strukturierung war es mit Hilfe der entwickelten Unterroutine möglich, den Eigenspannungszustand nach dem Umformprozess auf die Volumenstruktur zu übertragen (siehe Abbildung 6.17).

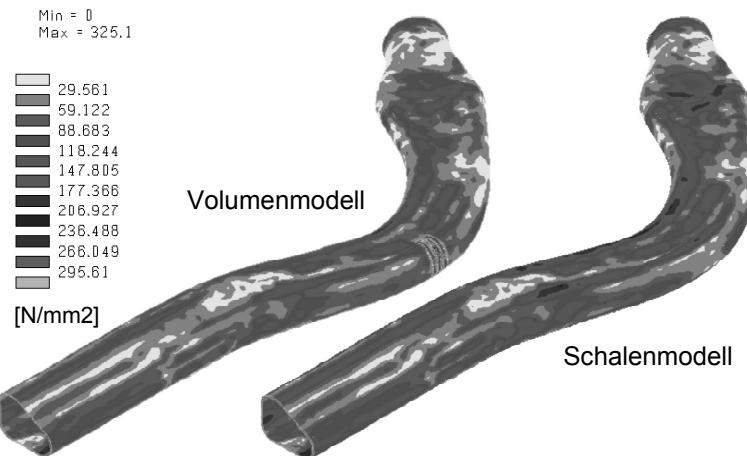


Abbildung 6.17: Übertragung des Spannungszustandes des Schalemodells (rechts) auf das Volumenmodell (links). Darstellung der Von-Mises-Spannung

Durch eine adaptive Vernetzung wurde das FE-Modell im Bereich der Schweißnaht auf 46858 Elemente (mit 54675 Knoten) verfeinert. Die Kantenlängen der Elemente im Bereich der Schweißnaht betrugen dabei 0,2 mm. Dieses adaptive Netz wurde mit Hilfe eines geometrischen Boxkriteriums erstellt. Das hat zur Folge, dass die gekrümmte Bauteilstruktur an unterschiedlichen Stellen verfeinert wird (siehe Abbildung 6.18). So entsteht das ungleichmäßige Netz, das aber die Berechnung des Schweißprozesses nicht beeinflusst, da in Bereichen sehr hoher Temperaturgradienten ausreichend kleine Elemente vorliegen.

Im Anschluss an die Übertragung der Spannungen auf das homogene vernetzte Volumenmodell wurden die Spannungen auf das lokal verfeinerte Netz der thermischen Berechnung projiziert.

Für die thermische Berechnung des Schweißvorgangs wurden alle thermischen Randbedingungen (Gleichung 4.3 – 4.4) in Form von Unterroutinen hinterlegt. Die Ersatzwärmequelle wurde transient entlang der definierten Schweißbahn durch das vernetzte Bauteil bewegt. Abbildung 6.18 zeigt das Entstehen des Temperaturfeldes zu Beginn der Schweißung ( $t=0,04$  s) und die in einem Schritt mit Hilfe eines adaptiven Netzes verfeinerte Schweißnaht.

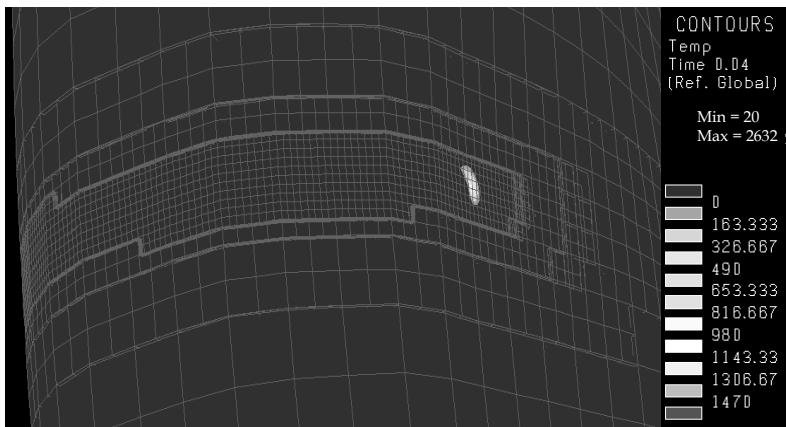


Abbildung 6.18: Darstellung des Temperaturfeldes ( $T$  in  $^{\circ}\text{C}$ ) in einem adaptiven Netz.

Für die themomechanische Berechnung wurden die mechanischen Randbedingungen durch Fixierung der Knoten entsprechend des Versuchsaufbaus (siehe Abbildung 6.16) abgebildet. Auf Grund der Modellgröße und des hohen Grades der Vernetzung benötigte die thermo-mechanische Berechnung ca. 125 Stunden. In Abbildung 6.19 ist der gemessene reale Verzug den Verzugsergebnissen ausser Simulation in den einzelnen Koordinatenrichtungen gegenübergestellt. Es wird dabei zwischen der Simulation mit und ohne Berücksichtigung vorangegangener Umformprozesse unterschieden. Die Auswertung des Gesamtverzugs zeigt, dass trotz der relativ großen Streuung der gemessenen Werte die Simulation mit Berücksichtigung der Ergebnisse des Umform-prozesses den realen Verzug deutlich besser repräsentiert.

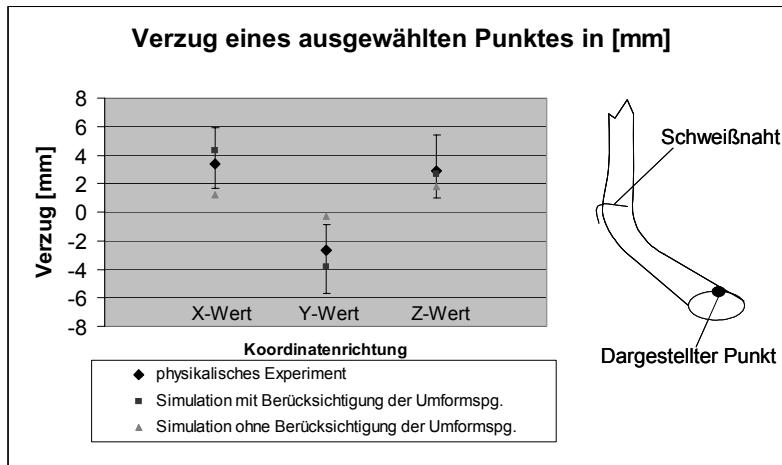


Abbildung 6.19: Gesamtverzug eines Punktes in den einzelnen Koordinatenrichtungen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In vielen Industriezweigen ist die Absicherung von Produkt- und Prozesseigenschaften durch digitale Modelle im Sinne einer *Virtuellen Produktion* zu beobachten. Dies ermöglicht die konsequente Umsetzung des vorhandenen Innovationspotenzials und erfordert den Einsatz unterschiedlichster Simulationstechnologien zur Analyse der Konstruktion, der Funktionen und der Fertigungsprozesse.

Auf Prozessebene ist die Simulation des Laserstrahlschweißens ein Werkzeug, das einen erheblichen Beitrag zu dieser Entwicklung leisten kann. Die komplexen physikalischen Zusammenhänge bei der Energieeinbringung sowie die thermomechanischen Reaktionen der Strukturen auf die thermischen Einflüsse durch das Schweißen sind in der industriellen Anwendung schwer zu beherrschen. Vor dem Hintergrund immer schnellerer Innovationszyklen gewinnt dabei die Qualifikation der Prozesse durch virtuelle Prototypen an Stelle physikalischer Modelle immer mehr an Bedeutung. Diese Entwicklung setzt eine Simulationsmethode voraus, die die Realität hinreichend genau abbildet. Dies bedeutet, dass es nicht ausreicht, den physikalischen Prozess des Schweißens möglichst genau abzubilden, sondern dass insbesondere Produkteigenschaften, die aus vorangegangenen Prozessen entstehen, berücksichtigt werden müssen. Diese Erweiterung der Simulation setzt eine qualifizierte Vorgehensweise voraus, die unabhängig von verwendeten Softwarewerkzeugen und Systemplattformen abgewendet werden kann.

In dieser Arbeit wurde deshalb, ausgehend von den Grundlagen Laserstrahlschweißens und der Blechumformung, im Stand der Technik die Virtuelle Produktion und die Simulation dieser Fertigungsverfahren analysiert und die vorhandenen Ansätze zur durchgängigen Simulation von Prozessketten aufgezeigt. Nach Untersuchung dieser Forschungsarbeiten und der bisher entwickelten Methoden und Vorgehensweisen in der Modellierung wurden relevante Anforderungen an eine durchgängige Simulation des Laserstrahlschweißens formuliert.

Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Umformsimulation entwickelt. Dabei werden die Belastungen nicht addiert, sondern die Ergebnisse der Umformsimulation als Initialzustand für die Schweißsimulation verwendet.

Ein wichtiger Baustein ist dabei die Erstellung des FE-Netzes. Die Vorgehensweise zur Extrusion vorhandener Schalenelemente zu einem Volumenmodell und die anschließende Netzverfeinerung inklusive der modellierten Schweißbahn dient als Grundlage für die Modellierung des Prozesses. Darauf aufbauend wurde die Modellierung der mathematischen Ersatzwärmequelle detailliert beschrieben und durch Experimente verifiziert. Die zahlreichen physikalischen und digitalen Versuche haben gezeigt, dass die Abbildung der „Wärmequelle Laser“ durch ein Ersatzmodell, basierend auf Querschliffen und der Temperatur eines ausgewählten Punktes hinreichend genau realisiert werden kann. Durch diese Modellierungen werden alle physikalischen Effekte (z.B. Einfluss des Prozessgases) hinreichend genau abgebildet. Um den Arbeitsaufwand zur Erstellung der nötigen Schweißproben zu reduzieren, wurde das Datenbanksystem LASdat entwickelt und aufgebaut, welches Schweißproben, Querschliffe und Modelle inklusive der verwendeten Parameter verwaltet. Der Kern der entwickelten Methode besteht in der Übertragung von dauerhaften Spannungen und Dehnungen auf das Schweißmodell. Dazu wurde die Modellvorstellung dieses Transfers erläutert und die Herausforderung durch die Ambivalenz der Dimensionen dargelegt.

Zur Verifizierung der Methode wurden die Ergebnisse der thermomechanischen Berechnung mit experimentellen Untersuchungen an beispielhaften Bauteilen verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass durch die Berücksichtigung der Ergebnisse der Umformsimulation in der Schweißsimulation im Wesentlichen eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment erzielt werden kann. Die vorgestellte und verifizierte Methodik erfüllt dabei folgende Kriterien:

- Flexibilität hinsichtlich Geometrie der Bauteile, Art und Lage der Schweißnaht
- Genauigkeit in der Abbildung aller wichtigen Prozessparameter (z.B. Arbeitsgas) bzw. thermischer und mechanischer Randbedingungen
- Modellierung durch Volumenelemente zur exakten Abbildung metallurgischer Phänomene und des resultierenden Verzugs
- Neutrale, softwareunabhängige Vorgehensweise

Dennoch sind hier weitere Arbeiten nötig, um die in Kapitel 5 beschriebenen Fehler weiter zu reduzieren. Im Bereich der Eingangsdaten kommt hier der kontinuierlich zu Verbesserung der Rücksprungberechnung besondere Bedeutung zu. Die Auflösung des hochenergetischen Zustandes nach dem Umformprozess in ein Gleichgewicht aus Spannungen und Verformungen ist derzeit mathematisch nicht immer eindeutig zu beschreiben. Im Rahmen der entwickelten Methode findet der aktuelle Stand der Technik im Bereich der Rücksprungberechnung Verwendung. Ein weiterer Aspekt ist die Verfügbarkeit der benötigten Werkstoffdaten einschließlich ihrer Temperaturabhängigkeit. Ein umfassender Einsatz der Prozesssimulation setzt qualifizierte Werkstoffdaten der verwendeten Werkstoffe voraus.

Verbesserungspotenzial auf dem Gebiet der Modellierung liegt in der vernachlässigten Übertragung der Dickeninformation aus dem Umformprozess. Dazu sind Schalenelemente zu entwickeln, die metallurgische Phasenübergänge und das thermomechanische Verhalten der Struktur exakt abbilden können. Ein anderer Ansatz wäre die automatisierte Extrusion der Schalenelemente unter Berücksichtigung der Dicke. Dies hätte den Vorteil, dass die Temperaturverteilung über die Dickenrichtung und Phasenübergänge berechnet werden könnte.

Eine wichtige Fragestellung zur Weiterentwicklung der Simulation ist die weitere Integration unterschiedlicher Werkzeuge. Mit der Simulation eines einzelnen Fertigungsverfahrens ist häufig nur ein Teil der Fragestellungen beantwortet. Häufig liegen Probleme nicht an einem einzelnen Prozess sondern in der gesamten Fertigungskette. Die entwickelte Methode kann in weiten Teilen für die Integration von Berechnungsergebnissen mit Hilfe der FEM unterschiedlichster Bereiche verwendet werden. So ist beispielsweise eine Kopplung zur Modellierung spanender Verfahren oder zur Toleranzsimulation denkbar.

Die Arbeiten an den Simulationswerkzeugen sind noch nicht abgeschlossen. Es ist noch ein weiter Weg bis zum Erreichen der Vision, reale Prototypen gänzlich durch digitale Modelle zu ersetzen. Dazu gilt es insbesondere die Bedienbarkeit zu vereinfachen und den Bedarf an Rechenzeit und Speicherplatz drastisch zu reduzieren. Dennoch unterstützt die Virtuelle Produktion schon heute die Unternehmen bei der Umsetzung und Erprobung von Produkt- und Prozessinnovationen.

## 8 Literatur

*Ahamanache u.a. 1996*

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

*AIT 1996*

AIT Consortium: AIT Glossary. *ESPRIT Project 7704 Advanced Information Technology in Design and Manufacture*, 1996.

*Avrami 1939*

Avrami, M.: Kinetics of Phase Change. I. *Journal of chemical physics* 7 (1939), S. 1103 - 1112.

*Avrami 1940*

Avrami, M.: Kinetics of Phase Change. II. *Journal of chemical physics* 8 (1940), S. 212-224.

*Avrami 1941*

Avrami, M.: Kinetics of Phase Change. III. *Journal of chemical physics* 9 (1941), S. 117-184.

*Bathe 1990*

Bathe, K.-J.: *Finite-Elemente-Methoden*. Berlin: Springer 1990.

*Beck u.a. 1992*

Beck, M.; Berger, P.; Palle, N.; Dantzig, J. A.: Aspekte der Schmelzbaddynamik beim Laserschweißen mit hoher Bearbeitungsgeschwindigkeit. In: Waidelich, W. (Hrsg.): *Laser in der Technik: Vorträge des 10. Int. Kongr. Laser 91*, S. 429-434. Berlin: Springer 1992.

*Beck 1996a*

Beck, M: A survey of modelling laser deep welding. In: Proceeding of the 6th European Conference in Laser Treatment of Materials: ECLAT '96, Stuttgart. AWT, Wiesbaden 1996.

*Beck 1996b*

Beck, M.: Modellierung des Lasertiefschweißens. Dissertation TU Stuttgart: Teubner 1996. (Laser in der Materialbearbeitung).

*Berger 1993*

Berger, P.: Physical Models on deep penetration welding with emphasis on fluid dynamics; In Papazolou, T. et al (eds): 9th Int. Symposium on Gas Flow and Chemical Lasers 1992, SPIE Vol. 1810, 1993.

*Bergmann u. 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.

*Beske 1992*

Beske, E. U.: Untersuchungen zum Schweißen mit Nd:YAG-Laserstrahlung. Dissertation Universität Hannover 1992.

*Beyer 1995*

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

*Beyer u.a. 2001*

Beyer, E. u. a.: Calculating temperature field and single track bead shape in laser cladding with Marangoni flow using Rosenthal's solution. In: Proceedings of the First International WLT Conference on Lasers in Manufacturing, Munich, June 2001. Stuttgart: AT Fachverlag 2001.

### *Bimberg 1991*

Bimberg, D: Materialbearbeitung mit Lasern. Eningen: Expert Verlag 1991.

### *Bley u. Franke 2001*

Bley, H.; Franke, C.: Integration von Produkt- und Produktionsmodell mit Hilfe der Digitalen Fabrik. *wt Werkstatttechnik* 91 (2001), S. 214-220.

### *Bley 2003*

Bley, H.: Wege zur Modellierung für die virtuelle Fabrik. In Reinhart, G.; Zäh, M. F.: *Marktchance Individualisierung*. 1. Aufl. Berlin: Springer 2003, S. 153-160.

### *Blumhardt 2001*

Blumhardt, R.: FEM - crash simulation and optimization. *International Journal of Vehicle Design* 26 (2001) 4, S. 331-347.

### *Bracht 2002*

Bracht, U.: Ansätze und Methoden der Digitalen Fabrik. In: Tagungsband „Simulation und Visualisierung 2002“, Magdeburg, 2002.

### *Brockhaus 2003*

[www.brockhaus.de](http://www.brockhaus.de), 2003.

### *Buchmayr 1991*

Buchmayr, B.: Computer in der Werkstoff- und Schweißtechnik: Anwendung und mathematische Modelle. Düsseldorf: DVS 1991. (Fachbuchreihe Schweißtechnik 112).

### *Carmignani u.a. 1999*

Carmignani, C. u. a.: Transient finite element analysis of deep penetration laser welding process in a singlepass butt-welded thick steel plate. *Comp. Methods Appl. Mech. Eng.* 179 (1999), S. 197-214.

*Dahl u.a. 1999*

Dahl, W.; Dilthey, 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.

*Dausinger 1995*

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

*Debroy 2001*

Debroy, T.: Mathematical Modelling of Fluid Flow and Heat Transfer in Fusion Welding. In: Cerjak, H. (Hrsg.): Mathematical Modelling of Weld Phenomena, Graz. Oxford, Alden Press 2001, S.1-21. (5).

*Dilthey 1995*

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

*Dilthey 2000*

Dilthey, U. (Hrsg.): Laserstahlschweißen - Prozesse, Werkstoffe, Fertigung und Prüfung. Handbuch zum BMBF-Projektverband "Qualifizierung von Laserverfahren" im Rahmen des Förderkonzeptes LASER 2000. Düsseldorf: DVS 2000 (Fachbuchreihe Schweißtechnik).

*Dilthey u. Pavlyk 1998*

Dilthey, U.; Pavlyk, V.: Einsatz eines Finite-Elemente-Programms zur Berechnung von Temperaturfeld und Schmelzbadgeometrie beim WIG-Schweißen. In: Schweißen und Schneiden '98, Hamburg. Düsseldorf: DVS1998. (DVS-Berichte 194)

*DIN 8528-1*

DIN 8528 – Teil 1: Schweißbarkeit – metallische Werkstoffe, Begriffe. Berlin: Beuth 1983.

### *DIN 8580*

DIN 8580: Begriffe der Fertigungsverfahren. Berlin: Beuth 1985.

### *DIN 8582*

DIN 8582: Fertigungsverfahren Umformen, Einordnung, Unterteilung. Berlin: Beuth 1985.

### *DIN 8583*

DIN 8583: Fertigungsverfahren, Druckumformen. Berlin: Beuth 1985.

### *DIN 8584*

DIN 8584: Fertigungsverfahren, Zugdruckumformen. Berlin: Beuth 1985.

### *DIN 8585*

DIN 8585: Fertigungsverfahren, Zugumformen. Berlin: Beuth 1985.

### *DIN 8586*

DIN 8586: Fertigungsverfahren, Biegeumformen. Berlin: Beuth 1985.

### *DIN 8587*

DIN 8587: Fertigungsverfahren, Schubumformen. Berlin: Beuth 1985.

### *DIN 8593*

DIN 8593, Teil 6: Fertigungsverfahren Fügen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth 1985.

### *DIN 8593-6*

DIN 8593, Teil 6: Fertigungsverfahren Fügen; Fügen durch Schweißen; Unterteilung. Berlin: Beuth 1985.

*DIN EN 10052, 1994*

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

*DIN EN 10130*

DIN EN 10130 – Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen. Berlin: Beuth 1999.

*DIN EN ISO 11145*

DIN EN ISO 11145: Laser und Laseranlagen. Begriffe und Formelzeichen. Berlin: Beuth 1995.

*DIN EN ISO 9956-11*

DIN EN ISO 9956, Teil 11: Anforderungen und Anerkennung von Schweißverfahren für Metallische Werkstoffe. Berlin: Beuth 1996.

*Doege 1976*

Doege, E.: Wichtige Einflussgrößen beim Tiefziehen. WT-Zeitschrift für industrielle Fertigung 66 (1976), S. 615-619.

*Doege u.a. 1996*

Doege, E.; Dohrmann, H.; Kösters, R.: Simulation of active and passive blankholder concepts using the Finite Element Method. In: Proceeding of the 4th International Conference on Sheet Metal 1996, Twente (Netherlands), 01. - 03. April 1996. Vol. II, S. 193-192.

*Doege u.a. 1998*

Doege, E. u.a.: Der simulierte und geregelte Prozess. Genauigkeit im Presswerk – Teil II. Blech Rohre Profile Bd. 45 (1998) Nr. 7/8, S. 40-45.

*Doege u. Dohrmann 1998*

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

### *Dombrowski u.a. 2001*

Dombrowski, U.; Bothe, T.; Tiedemann, H.: Auf dem Weg zur Digitalen Fabrik. In: Forschungsmagazin der TU Braunschweig, 2001.

### *Dowden u.a. 1995*

Dowden, J.; Davis, M.; Kapadia, P.: The flow of heat and the motion of the weld pool in penetration welding with a laser. *J. Appl. Phys.* 57(9), 1995.

### *Dudziak 1996*

Dudziak, K.-U.: Prozessmodell zum Innenhochdruckumformen von hohlwellenförmigen Werkstücken. VDI Reihe 2 Nr. 368, Düsseldorf: VDI 1996.

### *Engel 1996*

Engel, B.: Verfahrensstrategie zum Innenhochdruckumformen, Dissertation TU Darmstadt 1995.

### *Faure u.a. 2003*

Faure, F.; Souloumiac, B.; Bergheau, J.-M.; Leblond, J.-B.: Prediction of distortions of large thin structures during welding using shell elements and multiscale approaches. In: Cerjak, H.: Mathematical Modelling of Weld Phenomena 6. 1. Aufl. London: Maney Publishing vor. 2004.

### *Fröhlich 1995*

Fröhlich, P.: FEM Leitfaden – Einführung und praktischer Einsatz von Finite-Elemente-Programmen. Springer: Berlin 1995.

### *Fuhrich u.a. 1999*

Fuhrich, T.; Berger, P.; Hügel, H.: Marangoni effect in deep penetration laser welding of steel. In: Proceeding of the 18th international Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO'99), Orlando, Florida, USA 1999.

*Gausemeier 2000*

Gausemeier, J.; Lindemann, U.; Reinhart, G.; Wiendahl, H.-P.: Kooperatives Produktengineering – Ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens. Paderborn: HNI-Verlagsschriftenreihe (Band 79) 2000.

*Gerhardt u. Lanza 2001*

Gerhardt, A.; Lanza, M.: Die Überwindung der Arbeitsteilung durch die Digitale Fabrik. Vortrag anlässlich der Mitgliederversammlung der VDMA am 19.10.2002, Berlin.

*Goldak u.a. 1992*

Goldak, J. u. a.: Coupling Heat Transfer, Microstructure Evolution and Thermal Stress Analysis in Weld Mechanics. In: Karlsson, E. et al. (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.; Dorling, D.: Predicting Burn Trough when Welding on Pressurized Pipelines. In: Proceeding of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference (PVP 2000), Seattle, Washington, USA 2000.

*Gooroochurn 2002*

Gooroochurn, Y.: Taking the Influence of Stamping in a Welding Simulation. In: Proceeding of Ameripam 2002, Detroit, USA 2002.

*Grieb 2000*

Grieb, J., Michailov, V., Wohlfahrt, H., Göhler, K., Voß, O.: Einfluss verschiedener Parameter auf die Schweißsimulation der Fertigung von Tailored Blanks, Friedrichshafen (Bodensee). Grafing: CAD-FEM-GmbH 2000.

### *Haffner 2002*

Haffner, P.: Nichtlineare Strukturoptimierung mit ABAQUS und TOSCA – SHAPE: Fallbeispiel Abschleppbeanspruchung beim Audi D3. In: Tagungsband 14. Deutschsprachiges ABAQUS Anwender-Treffen in Wiesbaden, 23./24. September 2002, ABACOM Software GmbH (eds.), Aachen.

### *Hallfeldt 2002*

Hallfeldt, T.: Untersuchung zur Beschreibung des Tiefzieh- und Streckziehverhaltens höherfester Feinbleche aus Stahlwerkstoffen. Fortschrittsberichte VDI Reihe 2 Nr. 602. Düsseldorf: VDI 2002.

### *Härtl u.a. 2002*

Härtl, J.; Berkmanns, J.; Danzer, W.: Influence of Process Gases in Welding with Diode Lasers. In: Proceedings of the 21st international Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics (ICALEO'02), Scottsdale, Arizona (USA) 2002.

### *Härtl u.a. 2003*

Härtl, J.; Färber, M.; Danzer, W.: Active Gases in Diode Laser Welding. In: Proceeding of the 9th Conference on Laser Materials Processing in the Nordic Countries 2003, Trondheim (Norway), 01.-04. August 2003, S.211-218

### *Häuser u.a. 1999*

Häuser, H.; Braun, S; Reitsam, R.: Finite-Elemente-Simulation von Schweißprozessen mit AlMg- und AlMgSi-Legierungen unter Berücksichtigung von Rekristallisation, Ausscheidungsrückbildung und natürlichem Altern. In: Tagungsband der 3. DVS-Sondertagung Schweißtechnische Software in der Praxis, Halle. Düsseldorf: DVS 1999, S. 47 - 51. (DVS-Berichte 194)

### *Hessler 1991*

Hessler, C.: Beitrag zur Entwicklung des Hydraulischen-Rohr-Innendruck-Umformens. Dissertation TU Darmstadt 1991.

*Hilbinger und Bergmann 1997*

Hilbinger, R. M.; Bergmann, H. W.: Numerische Simulation der Heißrissbildung beim Schweißen von Aluminium. In: Schweißen und Schneiden '97. Düsseldorf: DVS 1997, S. 38 - 42. (DVS-Berichte 186)

*Hill 1971*

Hill, R.: The mathematical theory of plasticity. Oxford University Press, London 1971.

*Hillebrand 1997*

Hillebrand, A.: Numerische Simulation des Laserstrahlschneid- und Schweißprozesses durch Finite Elemente Simulation. Dissertation RWTH Aachen 1997.

*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. 336-379.

*Hoffmann u.a. 2001*

Hoffmann, H.; Engl, B.; Lenze, F.-J.; Schwarz, S.: Stahlwerkstoffe für die Blechumformung. In: Kolloquium Wirkmedien-Blechumformung, Universität Dortmund, DFG Schwerpunktprogramm 1098, 12/2001, S. 121-128.

*Hoffmann u. Kohnhäuser 1999*

Hoffmann, H.; Kohnhäuser, M.: Wirtschaftliche Blechumformung durch Simulation. Werkstatt und Betrieb 132 (1999) 6, S. 70-77.

*Homberg 2001*

Homberg, W. J.: Untersuchungen zur Prozessführung und zum Fertigungssystem bei der Hochdruck-Blech-Umfomung. Dissertation RWTH Aachen 2001.

*Hügel 1992*

Hügel, H.: Strahlwerkzeug Laser. Stuttgart: B. G. Teubner 1992.

*Issler u.a. 1995*

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

*Kadiviar u.a. 2000*

Kadiviar, M.; Jafapur, K.; Baradaran, G. H.: Optimizing Welding Sequenze 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 u. Wohlfahrt 1997*

Kaßner, M.; Wohlfahrt, H.: Modellbildung und Vernetzung für Finite-Elemente-Berechnungen zur Einschätzung der Dauerschwingfestigkeit von Schweißverbindungen. In: Fortschritte bei der Konstruktion und Berechnung geschweißter Bauteile, Braunschweig. Düsseldorf: DVS 1997, S. 169 - 171. (DVS-Berichte 187)

*Kaßner und Wohlfahrt 1999*

Kaßner, M.; Wohlfahrt, H.: Verzugs- und Eigenspannungsberechnung an geschweißten Bauteilstrukturen mit der Methode der Finiten Elemente. In: Tagungsband der 3. DVS-Sondertagung Schweißtechnische Software in der Praxis, Halle. Düsseldorf: DVS 1999, S. 27 - 34. (DVS-Berichte 194)

*Keeler 1965*

Keeler, S. P.: Determination of forming limits in automotive stampings. Society of Automotive Engineers. (1965) 650, S. 1-9.

*Kern u.a. 1998*

Kern, M. u. a.: Dreidimensionale Simulation der Kapillarausbildung und der Schmelzbadströmung beim Laserschweißen. In: Sepold, G.; Geiger, M. (Hrsg.): Strahl-Stoff-Wechselwirkung bei der Laserstrahlbearbeitung 2. Bremen: BIAS 1998, S. 73 - 76. (Strahltechnik Band 6).

*Kern u.a. 1999*

Kern, M.; Berger, P.; Fuhrich, T; Hügel, H.: Influence of the surface tension gradient on the shape of the weld pool in laser beam welding. In Kaplan.; Schöcker, D. (Hrsg.): Proceedings on Mathematical Modelling of Material Processing with Lasers; Wien: TU Wien / ILST 1999.

*Kirmße u. Wesselmann 1998*

Kirmße, H.; Wesselmann, L.: Fertigungsverfahren Innenhochdruckumformen. Bericht des Projektes Prozessoptimierung Innenhochdruckumformen verschweißter Platinen, 1998.

*Knothe u. Wessels 1992*

Knothe, K.; Wessels, H.: Finite Elemente. Springer Verlag: Berlin 1992.

*Koistinen u. Marburger 1959*

Koistinen, D.; Marburger, R.: A general equation prescribing the extent of the austenite – martensite transformation in pure iron-carbon alloys and plain carbon steels. *Acta Metall* vol. 7 (1959), S. 59-60.

*Kolleck 1999*

Kolleck, R.: Finite-Elemente Simulation wirkmedienbasierter Blechformverfahren als Teil einer virtuellen Fertigung. Dissertation RWTH Aachen1999.

### *Krause u.a. 2000*

Krause, F.-L. u.a.: iViP – eine Initiative für die integrierte virtuelle Produktentstehung. In: Tagungsband Innovationsforum Virtuelle Produktentstehung. Krause, F.-L.; Tang, T.; Ahle, U. (Hrsg.). Berlin: 2000, S. 81-92.

### *Lampa u.a. 1997*

Lampa, C. u.a.: An analytical thermodynamic model of laserwelding. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 30 (1997), S. 1293-1299.

### *Lange 1990*

Lange, K.: Umformtechnik, Band 3: Blechbearbeitung. 2. Aufl. Berlin: Springer 1990.

### *Lange u.a. 1993*

Lange, K.; Roll, K.; Tekkay, A.; Wanheim, T.: Prozesssimulation und Optimierung. In: Umformtechnik Bd. 4: Sonderverfahren, Prozesssimulation, Werkzeugtechnik, Produktion. 2. Aufl. Berlin: Springer 1993.

### *Leblond 1986*

Leblond, J. B.: A theoretical and numerical approach to the plastic behaviour of steels during phase transformations - I. Derivation of general relations. *J. Mech. Phys. Solids* 34 (1986) 4, S. 395 - 409.

### *Leblond 1989*

Leblond, J.B.: Mathematical modelling of transformation plasticity in steels II: Coupling with strain hardening phenomena. *International Journal of Plasticity* 5 (1989), S. 573 - 591.

### *Lenz u.a. 1999*

Lenz, B.; Reinhart, G.; Rick, F.: Ein Prozeß-Prototyp für das Laserschweißen. In: Tagungsband der 3. DVS-Sondertagung Schweiß-technische Software in der Praxis, Halle. Düsseldorf: DVS 1999. (DVS-Berichte 194)

*Lenz 2001*

Lenz, B.: Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung. Dissertation TU München 2001.

*Lichtenberg u. Hoff 1996*

Lichtenberg, S.; Hoff, H.-G.: Stand der Innenhochdruckumformung in Deutschland. Blech Rohre Profile 43 (1996).

*Lichtenberg 1996*

Lichtenberg, S.: Möglichkeiten und Grenzen des Umformens von Stahlwerkstoffen mit hydraulischen Wirkstoffen. Forschungsbericht P305; Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V.; Verlag und Vertriebsgesellschaft mbH, Düsseldorf 1996.

*Linner 1999*

Linner, S., Geyer, M.; Wunsch, A.: Optimierte Prozesse durch Digital Factory Tools. VDI Bericht 1489, VDI 1999, S. 187-198.

*Macherauch u. Hauck 1983*

Macherauch, E.; Hauck, V.: Eigenspannungen. Entstehung - Messung - Bewertung, Bd. 1, Oberursel: Deutsche Gesellschaft für Metallkunde 1983.

*Malisius 1977*

Malisius, R.: Schrumpfungen, Spannungen und Risse beim Schweißen. Fachbuchreihe Schweißtechnik, Bd. 10. Düsseldorf: DVS 1977.

*Martin u. Dölle 2000*

Martin, M.; Dölle, N.: Simulation der Prozesskette mechanisch gefügter Verbindungselemente. Werkstatttechnik 11/12 (2000) 90, S. 499-503.

*Masubuchi 1976*

Masubuchi, K.: Residual Stresses and Distortion. In: Weisman, C. (Hrsg.): The Welding Handbook, Vol. I. Miami: American Welding Society 1976, S. 221-227.

*Masubuchi 1980*

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

*Matsunawa u.a. 1998*

Matsunawa, A. u.a.: Dynamics of keyhole and molten pool in laser welding. J. Phys. D.: Appl. Phys. 31, 1998.

*Milberg 2003*

Milberg, J.: Grenzen überwinden – Wachstum durch Innovation. In: Hoffmann, H.; Milberg, J.; Reinhart, G.; Zäh, M. F.: Münchener Kolloquium 2003: Grenzen überwinden – Wachstum der neuen Art, München. München: Utz 2003.

*Mohanzy u. Mazumder 1997*

Mohanzy, P. S.; Mazumder, J.: Workbench for Keyhole Laser Welding. Science and Technology of Welding and Joining 2 (1997) 3, S. 133 -138.

*Myhr u. Grong 1991*

Myhr, O. R.; Grong, Ø.: Process modelling applied to 6082-T6 Aluminium weldments. Acta metall. mater. 39 (1991) 11, S. 2693 - 2708.

*Nagtegaal u.a. 1998*

Nagtegaal, J. C. u.a.: Development of industrial strength software for simulation of industrial forming processes. Proceedings of the 6th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes, 22.-25.6.1998, University of Twente, Enschede (Netherlands), S. 53-62. Rotterdam & Brokfield: Balkema Publishers 1998.

*Neugebauer u. Bräunlich 1997*

Neugebauer, R.; Bräunlich, H.: Leichtbau durch Verschiebung der umformtechnischen Grenzen mittels intelligenter Ziehtechnik. In: Leichtbau durch intelligente Blechbearbeitung. Tagungsband T17 für das EFB Kolloquium. 04.-05. März 1997 in Fellbach. Hannover 1997.

*Niemann 1980*

Niemann, G.: Maschinenelemente. Band I Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. 2. Aufl. Berlin: Springer 1980.

*Oertli 2001*

Oertli, T.: Integrierte NC-FE-Simulation zur Optimierung von Fertigungsprozessen. In: Simulationsbasierte Werkzeuge für die Produktionstechnik. Ergebnisbericht zum 2. Forschungsjahr, 2001.

*Otto 1997*

Otto, A.: Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen. Dissertation Univ. Erlangen-Nürnberg 1997.

*Pitscheneder u.a. 1996*

Pitscheneder, W. u. a.: Untersuchung von Laser-Schweißbädern durch numerische Simulation und Experimente. In: Schweißtechnische Software in der Praxis. Düsseldorf: DVS 1996, S. 68 - 74. (DVS-Berichte 179)

*Praun 2001*

Praun, S. von: Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess. Dissertation TU München 2001.

*Prier 1999*

Prier, M.: Die Reibung als Einflussgröße im Innenhochdruckumformprozess. Dissertation. RWTH Aachen 1999.

*Prokhorov 1973*

Prokhorov, A. M.: Metal Evaporation Under Powerful Optical Radiation. In: IEEE Journal of Quantum Electronics, QE 9 (5) 1973, S. 503-510.

*Radaj 1988*

Radaj, D.: Wärmewirkungen des Schweißens – Temperaturfeld, Eigenspannungen, Verzug. Berlin, Heidelberg: Springer 1988.

*Radaj 1992*

Radaj, D.: Heat Effects of Welding - Temperature Field, Residual Stresses, Distortion; Berlin: Springer1992.

*Radaj 1999*

Radaj, D.: Schweißprozesssimulation: Grundlagen und Anwendungen. Düsseldorf: DVS 1999. (Fachbuchreihe Schweißtechnik 116).

*Reinhart u. Praun 1999*

Reinhart, G.; Praun, S. von: Digital Mock up Process Simulation – next generation product development. Manufacturing Systems 29 (1999) 3, S. 259-263.

*Reinhart u.a. 1999*

Reinhart, G.; Grunwald, S; Rick, F.: Virtuelle Produktion – Virtuelle Produkte im Rechner produzieren. VDI-Z 141 (1999) 12, S. 26-29.

*Reinhart u.a. 2002*

Reinhart, G.; Baudisch, T.; Fusch, T; Lanza, M.: Rechnergestützte Produkt-, Prozess- und Anlagenentwicklung. In: 6. Automobiltechnische Konferenz und iViP-Abschlusskonferenz: Virtual Product Creation 2002. Berlin, 2002.

*Reinhart u.a. 2001*

Reinhart, G.; Oertli, Th.; Zeller, W.: Auslegung von NC-Antrieben unter Berücksichtigung strukturdynamischer und prozessbedingter In: Schwingungen in Antrieben 2001, Würzburg. Düsseldorf: VDI Verlag, 2001, 187-207. (VDI-Berichte 1630)

*Rick 2001*

Rick, F.: Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen. Dissertation TU München 2001.

*Ritter u.a. 1999*

Ritter, R.; Wohlfahrt, H.; Zhang, F.: Werkstoff-, Verfahrens- und Geometrieeinflüsse auf den schweißbedingten Verzug. In: Aurich (Hrsg.): Eigenspannungen und Verzug durch Wärmewirkung. Weinheim: Wiley-VCH 1999, S. 202-232.

*Roll u. Tekkaya 1993*

Roll, K.; Tekkaya, A. E.: Numerische Verfahren der Prozesssimulation in der Umformtechnik. In: Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Bd. 4: Sonerverfahren, Prozesssimulation, Werkzeugtechnik, Produktion. 2. Aufl. Berlin: Springer 1993.

*Scheil 1935*

Scheil, E.: Anlaufzeit der Austenitumwandlung. Arch. Eisenhüttenwesen 12 (1935), 565-567.

*Schumpeter 1997*

Schumpeter, J: Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung. Eine Untersuchung über Unternehmertgewinn, Kapital, Kredit, Zins und den Konjunkturzyklus. 9. Aufl. Berlin: Duncker & Humblot 1997.

### *Schweiger 1992*

Schweiger, W.: Simulation von Schweiß- und Härteverfahren auf Basis des FE-Programms Sysweld. In: Erfolgreiche Anwendungen von Datenbanken, Expertensystemen und Simulationen in der Oberflächentechnik. VDI-Bericht, Bd. 936, S. 197-205. VDI, 1992.

### *Schuler 1996*

Schuler GmbH: Handbuch der Umformtechnik. Berlin: Springer 1996.

### *Seyffart u. Hoffmann 1999*

Seyffarth, P.; Hoffmann, J.: Umwandlungsverhalten un- und niedriglegierter Stähle unter besonderer Berücksichtigung der für das Laserstrahlschweißen typischen Temperatur-Zeit-Zyklen. In: Abschlusspräsentation des Projektverbandes Qualifizierung von Laserverfahren, Weimar. Düsseldorf: DVS 1999. (DVS-Berichte 205)

### *Seyffarth 1999*

Seyffarth, P.; Hoffmann, J.: Umwandlungsverhalten un- und niedriglegierter Stähle unter besonderer Berücksichtigung der für das Laserstrahlschweißen typischen Temperatur-Zeit-Zyklen. In: Abschlusspräsentation des Projektverbandes Qualifizierung von Laserverfahren, Weimar. Düsseldorf: DVS-Verlag 1999. (DVS-Berichte 2005)

### *Spur 2003*

Spur, G.: Technologische Innovationen – ein wissenschaftstheoretischer Ansatz. In: acatech – Konvent für Technikwissenschaften der Union der Akademien der deutschen Wissenschaften e.V.: Nachhaltiges Wachstum durch Innovation, Berlin. Berlin: 2003, S. 27 – 37.

### *Spur u. Krause 1997*

Spur, G.; Krause, F.-L.: Das Virtuelle Produkt: Management der CAD-Technik. München: Hanser 1997.

*Stöcker 1994*

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

*Sudnik u.a. 1996*

Sudnik, W. u.a.: Computerized simulation of laser beam welding, modelling and verification. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 29 (1996) S. 2811-2817.

*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), S. 662-671.

*Tack 1995*

Tack, L. H.: Integration mikromechanischer Werkstoffmodelle in die Methode der Finiten Elemente. Dissertation RWTH Aachen 1995.

*Tekkaya 1998*

Tekkaya, A. E.: State of the Art of Simulation of Sheet Metal Forming. Int. Conf. SheMet 1998, 4.-6. April 98. University of Twente, Enschede (Netherlands), S. 53-66.

*The British Iron and Steel Research Association 1953*

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

*Touloukian 1967*

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

*Ujihara 1972*

Ujihara, K.: Reflectivity of Metals at High Temperatures. In: *Journal of Appl. Physics* 43 (1972), No. 5, S. 2376-2383.

### *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-Richtlinie 3147*

VDI-Richtlinie 3147, Blatt 1: Innenhochdruckumformen, Verfahren.  
VDI Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf 1999

### *Vollertsen 1996*

Vollertsen, F.: Laserstrahlumformen, lasergestützte Formgebung: Verfahren, Mechanismen, Modellierung. Dissertation Univ. Erlangen-Nürnberg 1996.

### *Voß u.a. 1998*

Voß, O. u. a.: Verbesserung der mechanisch-technologischen Eigenschaften lasergeschweißter Werkstücke durch gezielte Wärmeeinbringung. In: Sepold, G.; Geiger, M. (Hrsg.): Strahl-Stoff-Wechselwirkung bei der Laserstrahlbearbeitung 2. Bremen: BIAS 1998, S. 215 - 222. (Strahltechnik Band 6)

### *Wagon 1996*

Wagon, R. H.: Numisheet 1996. 3<sup>rd</sup> International Conference: Numerical Simulation of 3-d Sheet Metal Forming Processes. Ohio State University, Columbus, 1996.

### *Westkämper 2003,*

Westkämper, E.; Bierschenk, S.; Kuhlmann, T.: Digitale Fabrik – nur was für die Großen? *wt Werkstattstechnik* 93 (2003), S. 22-26.

*Wiehndal 2002*

Wiehndal, H.-P.; Harms, T.; Heger, C.: Kontextsensitiver Einsatz von Virtual Reality im Rahmen der Digitalen Fabrik. In: Tagungsband zum 1. Paderborner Workshop Augmented Reality und Virtual Reality in der Produktentstehung. Gausemeier, J. (Hrsg); Graf, M. (Hrsg.). Paderborn: HNI, 2002 (HNI-Verlagschriftenreihe; Bd. 107).

*Wohlfahrt 1977*

Wohlfahrt, H.; Macherauch, E.: Die Ursachen des Schweißeigenspannungszustandes. Materialprüf. 19, Nr. 8 August, 1977.

*Zäh 2002*

Zäh, M. F.; Wagner, W.: Die Fabrik der Zukunft ist wandlungsfähig. In: Zäh, M. F.; Reinhart, G.: Fabrikplanung 2002–Visionen, Umsetzung, Werkzeuge (Tagung), München. München: Utz 2002, S. 1/1-1/17.

*Zäh u.a. 2003*

Zäh, M. F.; Carnevale, M.; Müller, S.: Roadmap zur Virtuellen Produktion. In: Reinhart, G.; Zäh, M. F.: Virtuelle Produktion - Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik, Garching. München: Utz 2003, S. 2-22. (iwb-Seminarberichte 68)

*Zienkiewicz 1984*

Zienkiewicz, O. C.: Methode der Finiten Elemente. Wien: Hansa Verlag 1984.

# 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 *Meier, 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.*  
Schneideroderte 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 *Reithofer, 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 Leitungssäte  
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 *Groh, A.*  
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme  
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*  
Klippsmontage 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.*  
Mobilier 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 *Heuser, H.-J.*  
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme  
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*  
Ermittlung modularer Parameter aus Übertragungsfrequenzängen  
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 *Wrbá, P.*  
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik  
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, 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 *Tuzcek, H.*  
Inspektion von Karosserierechteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung  
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*  
Planungsstrategien zur störmungstechnischen 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 · 88 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 Programmabaukastens für robotergeführte Klebeprozesse  
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 *Schräfer, N.*  
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung  
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wissbacher, J.*  
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen  
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Gernic, F.*  
Laserbearbeitung mit Robotern  
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*  
Digitale Zustanderegelung 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 *Heilm, 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 *Strahmayer, R.*  
Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringereinrichtungen  
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Gles, J.*  
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware  
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*  
Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboter Einsatzes  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*  
Roboter systeme 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 *Kummelsteiner, 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 Produktionsystemen  
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 Produktionsystemen  
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 3-540-58634-2
- 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 Materialflussteuerungen  
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*  
Flexibilisierung der automatischen Teilebereitstellung 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 *Deutschle, 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 varianteureiche 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 *Fichtmöller, N.*  
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme  
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*  
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestructuren in Werkzeugmaschinen  
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*  
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme  
1995 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*  
Autonome Fertigungszeilen · Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung  
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Motezuma 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 *Pischetsrieder, 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 varianteureichen 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 Materialflus- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem  
1997 · 98 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wegner, M.*  
Steuerungsintegrierte 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 *Krämer, U.*  
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitssuche 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 3-540-64868-8
- 116 *Koehler, J.*  
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung  
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuler, 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 *Pfob, 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](mailto: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 3-931327-76-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen  
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel  
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte  
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 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
- 14 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 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 Leitechnik 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
- 23 EDM Engineering Data Management  
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 24 Rationale Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele  
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauflauf  
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
- 30 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends  
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 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 Modern 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
- 60 **Mechatronische Produktionssysteme** · Genauigkeit gezielt entwickeln  
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 **Nicht erschienen** – wird nicht erscheinen
- 62 **Rapid Technologien** · Anspruch – Realität – Technologien  
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 **Fabrikplanung 2002** · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge  
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 **Mischverbindungen** · Einsatz und Innovationspotenzial  
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 **Fabrikplanung 2003** · Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen  
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 **Mit Rapid Technologien zum Aufschwung** · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder  
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 **Mechatronische Produktionssysteme** · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder  
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 **Virtuelle Produktion** · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik  
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 **Kooperationsmanagement in der Produktion** · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette  
134 Seiten · ISBN 3-98675-069-0
- 70 **Mechatronik** · Strukturdynamik von Werkzeugmaschinen  
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 **Klebtechnik** · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten  
ISBN 3-89675-071-2 · erscheint 12/04
- 72 **Fabrikplanung 2004** · Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen  
ISBN 3-89675-072-0 · erscheint 12/04
- 73 **Rapid Manufacturing** · Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen  
ISBN 3-89675-073-9 · erscheint 12/04
- 74 **Virtuelle Produktionssystemplanung** · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik  
ISBN 3-89675-074-7 · erscheint 12/04
- 75 **Nicht erschienen** – wird nicht erscheinen
- 76 **Berührungslose Handhabung** · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle  
ISBN 3-89675-076-3 · erscheint 12/04
- 77 **ERP-Systeme** · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen  
ISBN 3-89675-077-7 · erscheint 03/05
- 78 **Mechatronik** · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen  
ISBN 3-89675-078-X · erscheint 04/05

# 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.de](mailto:utz@utzverlag.de)

- 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 Mößmer, 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 Partnerverbünden**  
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 Sprengel, 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
- 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
- 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
- 162 Michael Loferer  
**Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen**  
2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fährer  
**Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses**  
2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner  
**Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler**  
2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte  
**Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik**  
2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weissenberger  
**Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess**  
2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob  
**Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik**  
2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer  
**System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen**  
2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel  
**Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen**  
2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross  
**Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung**  
2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun  
**Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess**  
2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen  
**Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen**  
2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer  
**Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe**  
2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen  
**Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme**  
2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton  
**Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenter Montagesysteme**  
2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser  
**Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke**  
2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitinger  
**Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen**  
2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling  
**Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling**  
2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch  
**Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine**  
2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein  
**Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems**  
2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak  
**Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen**  
2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr  
**Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung**  
2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber  
**Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken**  
2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt  
**Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern**  
2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer  
**Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten**  
2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger  
**Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme**  
2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl  
**Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing**  
2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch  
**Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie**  
2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

- 189 Thomas Mosandl  
**Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme**  
2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron  
**Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung**  
2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek  
**Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen**  
2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer  
**Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen**  
2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1