

Lehrstuhl für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
der Technischen Universität München

Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation

Alexander Schober

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

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Horst Baier

Prüfer: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. A. Erman Tekkaya,
Technische Universität Dortmund

Die Dissertation wurde am 06.02.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 07.07.2014 angenommen.

Alexander Schober

**Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung
in der Schweißstruktursimulation**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 291

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2014

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2014

ISBN 978-3-8316-4415-5

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Stand der Technik	2
1.2.1 Einführung	2
1.2.2 Schweißsimulation	3
1.2.2.1 Finite-Elemente-Methode und deren An- wendung	3
1.2.2.2 Teilbereiche der Schweißsimulation	8
1.2.2.3 Grundlagen der Schweißstruktursimulation	16
1.2.2.4 Wärmequellenmodelle	20
1.2.3 Interpolation	26
1.2.4 Künstliche Neuronale Netze	29
1.3 Motivation und Zielsetzung	38
1.4 Vorgehensweise	40
2 Eingangsdaten für die Schweißstruktursimulation	43
2.1 Überblick der Eingangsdaten	43
2.2 Simulationsobjekt	45
2.3 Wärmeeinbringung und Wärmetransport	47
2.4 Werkstoffdaten	49
2.5 Mechanische Lasten und Einspannung	50
2.6 Weitere Eingangsdaten	53
2.7 Die Schweißsimulation als Teil einer Prozesskette	53
2.8 Zusammenfassung	56
3 Methode zur Wärmequellenkalibrierung	59
3.1 Entwicklung der Methode	59
3.2 Betrachtungsrahmen	60

Inhaltsverzeichnis

3.3	Wärmequellenmodell	61
3.4	Basisdaten	62
3.5	Interpolation	64
3.6	Künstliche Neuronale Netze	66
3.7	Berechnung der Wärmequellenparameter	67
3.8	Zusammenfassung der Methode	68
4	Anwendungsbeispiel zum BHLS	71
4.1	Verfahrensgrundlagen und Versuchsanlage	71
4.2	Ein Wärmequellenmodell für das BHLS	73
4.3	Untersuchtes Bauteil und Prozessparameter	75
4.4	Anwendung der entwickelten Methode	77
4.5	Abschließende Bemerkungen	85
5	Analyse, Bewertung und Ableitung von Schlussfolgerungen	89
5.1	Analyse und Bewertung der Ergebnisse	89
5.2	Berücksichtigung von verfahrensspezifischen Aspekten .	98
5.2.1	Einleitung	98
5.2.2	Verfahrensgrundlagen des Rührreischweißen und zugehörige Versuchsanlage	98
5.2.3	Untersuchtes Bauteil und Prozessparameter . . .	100
5.2.4	Ein Wärmequellenmodell für das Rührreischweißen	102
5.2.5	Anwendung der entwickelten Methode	105
5.3	Schlussfolgerungen für die Anwendung	108
5.4	Möglichkeiten der industriellen Anwendung	111
6	Zusammenfassung und Ausblick	115
	Literaturverzeichnis	119
A	Anhang	151
A.1	Ergebnisse der Schweißstruktursimulationen	151
A.2	Übersicht der Wärmequellenparameter	161
A.3	Übersicht der verwendeten Software	163
A.4	Übersicht der verwendeten Anlagentechnik	163

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Im gesamtwirtschaftlichen Rahmen, besonders am Standort Deutschland, bildet die Produktionstechnik eine entscheidende Kernkomponente. In den kommenden Jahren stehen der Produktionstechnik in vielerlei Hinsicht große Herausforderungen bevor (ABELE ET AL. 2011). Unterschiedliche Megatrends, wie die Globalisierung, die Ressourcenverknappung oder der Klimawandel, werden unweigerlich zu notwendigen Veränderungen in den produktionstechnischen Systemen führen. Zielgerichtete Produktionsforschung dient hierbei als Wegbereiter dieser Veränderungen. Innovation, sowohl auf Produkte bezogen als auch hinsichtlich der eingesetzten Fertigungsverfahren, stellt das wesentliche Ergebnis der Produktionsforschung dar. Im Einzelnen wird dieser Wandel alle Teilbereiche der Produktionstechnik mehr oder weniger stark betreffen. Insbesondere sind dabei zahlreiche Wechselwirkungen zu berücksichtigen. Bezogen auf die angesprochene Innovation ist maßgeblich zu beachten, dass innovative Produkte meist auch innovative Fertigungsverfahren erfordern, um diese herzustellen. Die Fügetechnik, also alle Verfahren für das Zusammenführen von mehreren Komponenten zu einem Zwischen- oder Endprodukt, stellt dabei einen wesentlichen Teilbereich der Produktionstechnik dar. Dementsprechend gilt es auch dort entscheidende Herausforderungen zu bewältigen. Zukunftsträchtige Fügeverfahren müssen mehr denn je die Anforderungen hinsichtlich Flexibilität, Robustheit und Produktivität erfüllen. Als Beispiel kann hier das Remote-Laserstrahlschweißen genannt werden (ABELE ET AL. 2011, S. 97 f.). Dieses Verfahren bietet hohes Potential zur industriellen Anwendung, etwa durch hohe realisierbare Schweißgeschwindigkeiten als Beitrag zur Produktivität, erfordert allerdings entsprechende Anstrengungen, um als flexibles und robustes Verfahren genutzt werden zu können. Der entscheidende Baustein dabei ist die Kenntnis des Prozessverhaltens für den jeweiligen Anwendungsfall. Dazu zählt das Prozessfenster ebenso wie die Sensitivität des Prozesses hinsichtlich von Störgrößen, wie etwa schwankende Werkstoffeigenschaften

1 Einleitung

oder eine wechselnde Beschaffenheit der Bauteiloberflächen. Im Besonderen sind als Herausforderungen für die Fügetechnik auch der Einsatz neuartiger Werkstoffe und der sich daraus ableitende Bedarf diese zu fügen zu nennen. Im Detail stellt sich häufig auch die Aufgabe verschiedenartige Werkstoffe miteinander zu verbinden. Dabei zeichnet sich insbesondere das Fügen durch plastische Deformation durch vielfältige Lösungsansätze aus (MORI ET AL. 2013). Eine prozesssichere und qualitätsoptimierte Fügeverbindung ist meist das angestrebte Ziel. Nach heutigem Stand und auch in Zukunft ist die Erreichung dieses Ziels, je nach Ausgangssituation, mit mehr oder weniger großen Anstrengungen verbunden. In der industriellen Praxis bestimmt vorhandenes oder mangelndes Erfahrungswissen die Ausgangssituation entscheidend. Als grundlegende Vorgehensweise zur Erreichung der Zielsetzung hat sich zumeist der Weg über experimentelle Versuchsreihen etabliert. Je nach Anwendungsfall kann sich hierbei ein erheblicher Aufwand einstellen, insbesondere wenn Prozesse für eine industrielle Serienreife qualifiziert werden sollen. Die Simulation von Fügeprozessen kann hierbei ein wertvolles Hilfsmittel sein und eine wesentliche Reduktion des experimentellen Versuchsaufwands bedeuten (GOLDAK ET AL. 2005). Um allerdings, gerade im Rahmen der zukünftigen Wandlung der Produktionstechnik, das volle Potential der Simulation ausschöpfen zu können, sind, aus Sicht der Forschung, auch Anstrengungen hinsichtlich der unterschiedlichen Simulationsmethoden notwendig. Diese Arbeit liefert einen Beitrag zur Simulation von Schweißprozessen, der bei der Formulierung der Motivation und der Zielsetzung (vgl. Abschnitt 1.3) detailliert wird.

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Einführung

Aufgrund des in Abschnitt 1.1 skizzierten Betrachtungsrahmens der vorliegenden Arbeit bezieht sich die relevante Literatur auf die folgenden Themenbereiche: Die *Finite-Elemente-Methode* bildet das theoretische Grundgerüst der untersuchten Ansätze der Schweißsimulation. Die vorliegende Arbeit gliedert sich in den Forschungsbereich der *Schweißsimulation* ein, im Detail in den Teilbereich der *Schweißstruktursimulation*. Die entwickelte Methode dient der Kalibrierung von sogenannten *Wärmequellen*

und beinhaltet als Teilelement den Einsatz von *Interpolationsmethoden* oder als Alternative von *Künstlichen Neuronalen Netzen*.

1.2.2 Schweißsimulation

1.2.2.1 Finite-Elemente-Methode und deren Anwendung

Im Folgenden wird eine kurze, überblickhafte Einführung zur Finite-Elemente-Methode gegeben. Dementsprechend soll auch kein Anspruch auf Vollständigkeit bestehen. Detaillierte Ausführungen sind in der Literatur vielfach dokumentiert, beispielsweise durch DAHMEN ET AL. (2008, S. 490 ff.), woran die folgenden Erläuterungen angelehnt sind.

Die *Finite-Elemente-Methode* (FEM) für elliptische Randwertaufgaben ist grundsätzlich ein Ansatz zur Lösung von partiellen Differentialgleichungen. Das klassische Beispiel hierzu ist das

Poisson-Problem: Gesucht $u \in C^2(\Omega) \cap C(\bar{\Omega})$, so dass

$$\begin{cases} -\Delta u = f & \text{in } \Omega, \\ u = g & \text{auf } \partial\Omega. \end{cases} \quad (1.1)$$

Dabei bezeichnet u die gesuchte Lösungsfunktion, $C^2(\Omega)$ den Raum der zweifach differenzierbaren Funktionen auf dem Gebiet Ω , $C(\bar{\Omega})$ den Raum der stetigen Funktionen auf dem Abschluss des Gebiets Ω , Δ den Laplace-Operator und f sowie g vorgegebene Funktionen. $u = g$ ist eine sogenannte Dirichlet-Randbedingung. Für den Fall $u = g = 0$ spricht man von einer homogenen Randbedingung. Aus physikalischer Sicht wird durch das Poisson-Problem die Auslenkung (Lösung u) einer am Rand eingespannten (Funktion g) elastischen Membran unter einer vorgegebenen Last als Funktion der Ortsvariablen (Funktion f) beschrieben.

Die FEM zeichnet sich durch die Einführung des Begriffs der *schwachen Lösung* aus. Das heißt im Wesentlichen, die Anforderungen der für das gestellte Problem gesuchten Lösung hinsichtlich Differenzierbarkeit werden abgeschwächt. Dazu wird das ursprüngliche Problem entsprechend umformuliert, um die sogenannte *schwache Formulierung* zu erhalten. (1.1) wird dann als *starke Formulierung* bezeichnet. Zunächst wird hierbei der Funktionenraum

1 Einleitung

$$V_k := \{v \in C^k(\Omega) \cap C(\overline{\Omega}) \mid v = 0 \text{ auf } \partial\Omega\}, \quad k = 1, 2 \quad (1.2)$$

definiert. Durch Multiplikation der Differentialgleichung in (1.1) mit einer beliebigen Funktion $v \in V_1$, Integration über Ω , Anwendung des Gaußschen Integralsatzes und Ausnützung von $v = 0$ auf $\partial\Omega$ erhält man

$$\int_{\Omega} f v \, dx = \int_{\Omega} \nabla u \cdot \nabla v \, dx. \quad (1.3)$$

Durch Definition von

$$F(v) := \int_{\Omega} f v \, dx \quad \text{und} \quad a(u, v) := \int_{\Omega} \nabla u \cdot \nabla v \, dx \quad (1.4)$$

lässt sich (1.1) äquivalent umformulieren zu:

$$\begin{aligned} \text{Gesucht } u \in V_2, \text{ so dass} & \quad (1.5) \\ a(u, v) = F(v) \text{ für alle } v \in V_1. & \end{aligned}$$

Wird nun $u \in V_1$ statt $u \in V_2$ gesucht, führt dies zu einer Abschwächung hinsichtlich der Differenzierbarkeit. Der normierte Vektorraum $(V_1, \|\cdot\|_1)$ mit

$$\langle u, v \rangle_1 := \int_{\Omega} \nabla u \cdot \nabla v \, dx, \quad \|u\|_1 := \langle u, v \rangle_1^{\frac{1}{2}}, \quad u, v \in V_1 \quad (1.6)$$

eignet sich aber noch nicht zur Aufstellung der schwachen Formulierung. Dazu muss die Vervollständigung zum sogenannten *Sobolevraum* $H_0^1(\Omega)$ betrachtet werden. Die schwache Formulierung des Poisson-Problems lautet damit:

$$\begin{aligned} \text{Gesucht } u \in V = H_0^1(\Omega), \text{ so dass} & \quad (1.7) \\ a(u, v) = F(v) \text{ für alle } v \in V. & \end{aligned}$$

Hinsichtlich der Existenz und Eindeutigkeit einer Lösung kann der Satz von Lax-Milgram betrachtet werden (DAHMEN ET AL. 2008, S. 495 ff.). Dieser sichert insbesondere die eindeutige Lösbarkeit der schwachen Formulierung des Poisson-Problems (1.7).

Hinleitend zur FEM muss noch der Begriff der *Galerkin-Methode* eingeführt werden. Dabei wird der Grundgedanke verfolgt, eine Lösung für die schwache Formulierung eines Problems in einem endlichdimensionalen Unterraum des betrachteten Funktionenraums zu suchen. Mit den obigen Bezeichnungen bedeutet dies für $H_h \subset H_0^1(\Omega)$, die Aufgabe

$$\begin{aligned} \text{Gesucht } u_h \in H_h, \text{ so dass} & \tag{1.8} \\ a(u_h, v_h) = F(v_h) \text{ für alle } v_h \in H_h & \end{aligned}$$

zu lösen. Die weitreichende Gültigkeit des Satzes von Lax-Milgram sichert unmittelbar auch die eindeutige Lösbarkeit dieser *Galerkin-Diskretisierung*. Des Weiteren liefert das Lemma von Cea eine Abschätzung für den Diskretisierungsfehler $\|u - u_h\|$ (DAHMEN ET AL. 2008, S. 499).

Die Finite-Elemente-Methode zur Diskretisierung einer schwachen Formulierung eines Problems ist eine Galerkin-Methode, wobei ein spezieller Unterraum $H_h \subset H_0^1(\Omega)$ gewählt wird. Zur Konstruktion dieses speziellen Unterraums wird zunächst das Gebiet Ω in Teilgebiete zerlegt. Diese Zerlegung heißt dann *zulässige Triangulierung* von Ω , falls Ecken und Kanten der benachbarten Teilgebiete zusammenpassen. Der zulässigen Triangulierung wird dann ein Funktionenraum zugeordnet, der alle Funktionen enthält, die auf $\bar{\Omega}$ stetig sind und auf jedem Teilgebiet einem Polynom entsprechen. Falls das Gebiet Ω zweidimensional ist, kann die Triangulierung im einfachsten Fall durch eine Zerlegung in Dreiecke erfolgen. Es sei h_{T_i} der Durchmesser eines Dreiecks T_i aus einer zulässigen Triangulierung $\mathcal{T}_h = \{T_1, \dots, T_r\}$ und $h := \max_{1 \leq i \leq r} h_{T_i}$. Dann ist h ein Maß für die Feinheit der Diskretisierung. Für eine zulässige Triangulierung \mathcal{T}_h von Ω ist der Raum der *stückweise linearen Finite Elemente* durch

$$\mathcal{S}_h := \{v \in C(\bar{\Omega}) \mid v|_{\partial\Omega} = 0 \text{ und } v|_T \in \Pi_1 \text{ für alle } T \in \mathcal{T}_h\} \tag{1.9}$$

1 Einleitung

definiert, wobei Π_1 den Raum der reellen Polynome vom (totalen) Grad eins bezeichnet. Die Finite-Elemente-Diskretisierung der schwachen Formulierung des Poisson-Problems (1.7) lautet damit:

$$\begin{aligned} &\text{Gesucht } u_h \in \mathcal{S}_h, \text{ so dass} && (1.10) \\ &a(u_h, v_h) = F(v_h) \text{ f\"ur alle } v_h \in \mathcal{S}_h. \end{aligned}$$

Der Satz von Lax-Milgram liefert wiederum die eindeutige Lösbarkeit der Aufgabe. Die Berechnung dieser Lösung wird nach einigen Bemerkungen im Folgenden noch ausgeführt.

Eine zulässige Triangulierung kann für ein zweidimensionales Gebiet neben Dreiecken auch durch Rechtecke oder Parallelogramme erfolgen. Für dreidimensionale Gebiete (und damit bei der Behandlung von dreidimensionalen Bauteilen in der Anwendung) kommen in der Regel Tetraeder und Quader zum Einsatz. Durch die Verwendung von Polynomen der Ordnung zwei und drei können auch quadratische Finite Elemente und kubische Finite Elemente konstruiert werden. Um dabei dann eine Funktion aus dem Finite-Element-Raum eindeutig festzulegen, werden mehr „Stützstellen“ benötigt. Fehlerabschätzungen im Rahmen der Finite-Elemente-Methode beinhalten h als Maß für die Feinheit der Diskretisierung sowie den Grad der angesetzten Polynome (DAHMEN ET AL. 2008, S. 506 ff.). Hierbei spricht man dann von A-priori-Fehlerschranken. Je kleiner h gewählt wird, desto besser approximiert die berechnete Lösung u_h die exakte Lösung u . Die Finite-Elemente-Methode eröffnet auch die Möglichkeit, eine lokale Verfeinerung der Zerlegung des betrachteten Gebiets vorzunehmen. Insbesondere sind damit adaptive Anpassungen im Laufe der Berechnung einer Lösung möglich. In diesem Zusammenhang sind dann A-posteriori-Fehlerschranken von Bedeutung (DAHMEN ET AL. 2008, S. 511 ff.).

Zur Bestimmung der Lösung u_h von (1.10) kann die folgende Vorgehensweise genutzt werden. Zunächst wird eine Basis $(\phi_j)_{1 \leq j \leq m}$ des endlichdimensionalen Raums \mathcal{S}_h ($\dim(\mathcal{S}_h) = m$) gewählt. Damit lässt sich die gesuchte Lösung u_h in der Form $u_h = \sum_{j=1}^m x_j \phi_j$ mit den unbekanntenen Koeffizienten $x_j \in \mathbb{R}, j = 1, \dots, m$, darstellen. Da sich alle $v_h \in \mathcal{S}_h$ als Linearkombination der Basisfunktionen schreiben lassen und aufgrund der Linearität der Funktionen a und F lässt sich (1.10) äquivalent umformulieren zu:

Gesucht $x = (x_1, \dots, x_m)^T \in \mathbb{R}^m$, so dass (1.11)

$$\sum_{j=1}^m a(\phi_j, \phi_i) x_j = F(\phi_i) \text{ für alle } i = 1, \dots, m.$$

Damit liegen m lineare Gleichungen in den m Unbekannten x_j vor. Insgesamt ist also (1.10) äquivalent zur Lösung von

$$Ax = b \text{ mit } A = (a_{i,j})_{1 \leq i, j \leq m}, a_{i,j} := a(\phi_j, \phi_i) \quad (1.12)$$

und $b := (F(\phi_1), \dots, F(\phi_m))^T$.

In diesem Zusammenhang wird A als *Steifigkeitsmatrix* (diese Namensgebung rührt vom Zusammenhang zwischen den gegebenen Lasten und den gesuchten Verschiebungen her (vgl. Poisson-Problem (1.1)) und b als *rechte Seite* bezeichnet. Die einzelnen Koeffizienten von A und b müssen mittels numerischer Quadratur bestimmt werden. Speziell für die Finite-Elemente-Methode eignet sich die Wahl der sogenannten *nodalen Basis*. Dazu sei $\{\xi_1, \dots, \xi_m\}$ die Menge der Eckpunkte der Triangulierung \mathcal{T}_h im Inneren des Gebiets Ω und $\{\xi_{m+1}, \dots, \xi_M\}$ die Menge der restlichen Punkte auf dem Rand $\partial\Omega$ des Gebiets. Die nodale Basis wird damit für $i = 1, \dots, m$ durch

$$\phi_i \in \mathcal{S}_h, \phi_i(\xi_i) = 1, \phi_i(\xi_j) = 0 \text{ für alle } 1 \leq j \leq M, j \neq i \quad (1.13)$$

definiert. Durch die Wahl der nodalen Basis ergibt sich A als dünnbesetzte Matrix. Dementsprechend sind passende Algorithmen zur Lösung des Gleichungssystems $Ax = b$ zu wählen (DAHMEN ET AL. 2008, S. 516 ff.). Abbildung 1.1 fasst das gesamte beschriebene Vorgehen zur Finite-Elemente-Methode zusammen.

Kommerzielle Simulationsssoftware auf Basis der Finite-Elemente-Methode beinhaltet in der Regel die komplette algorithmische Umsetzung der aufgezeigten Vorgehensweise. Dem Anwender bleiben dann mehr oder weniger eingeschränkte Möglichkeiten zur Beeinflussung einzelner Aspekte,

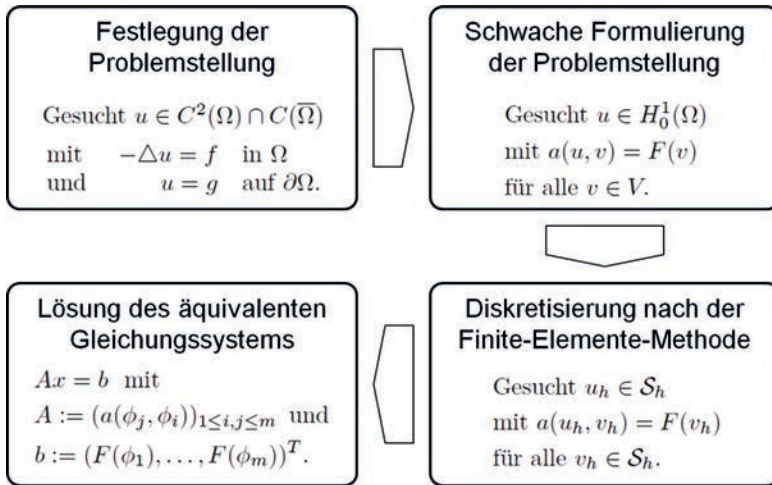


Abbildung 1.1: Prinzip der Finite-Elemente-Methode

wie beispielsweise die Definition von Kriterien hinsichtlich der Konvergenz der berechneten Lösungen.

1.2.2.2 Teilbereiche der Schweißsimulation

Der Bereich der Schweißsimulation umfasst ein breites Spektrum an unterschiedlichen Ansätzen und Methoden. Ausgehend von den jeweiligen Zielsetzungen unterteilte RADAJ (2002a, S. 4 f.) die Schweißsimulation in drei Teilbereiche. In Hinblick auf die Komplexität der heute untersuchten Ansätze und die zur Verfügung stehende Rechenleistung ist diese Einteilung auch eine Notwendigkeit. Abbildung 1.2 zeigt die drei Teilbereiche der Schweißsimulation nach RADAJ mit den jeweiligen *Zielgrößen* sowie den zwischen den Teilbereichen wirkenden *Koppelgrößen*.

Die Forschungsaktivitäten in den einzelnen Teilbereichen werden im Folgenden im Detail beleuchtet. Danach wird die Kopplung der Teilbereiche angesprochen. Die für alle drei Teilbereiche gleichermaßen geltende Notwendigkeit von Maßnahmen zur Absicherung von Simulationsergebnissen wird abschließend belegt.

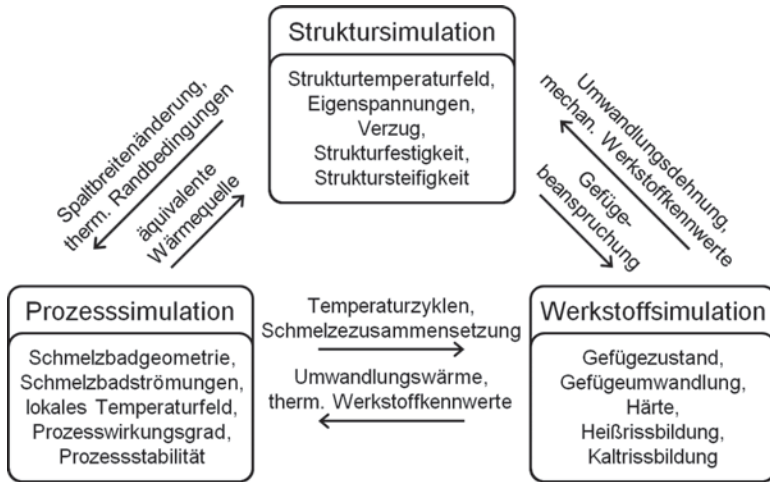


Abbildung 1.2: Teilbereiche der Schweißsimulation (in Anlehnung an RADAJ (2002a, S. 4 f.))

Die *Struktursimulation* soll hier am umfassendsten betrachtet werden, da sich diese Dissertation gänzlich diesem Teilbereich widmet. Die Grundlagen der Schweißstruktursimulation werden im folgenden Abschnitt gesondert erläutert. Im Teilbereich der Struktursimulation werden das Strukturtemperaturfeld, der Verzug, die Eigenspannungen und die Strukturfestigkeit sowie -steifigkeit betrachtet. Diesen Zielgrößen entsprechend werden hierbei meist Bauteile oder ganze Bauteilstrukturen untersucht. Das heißt, die globalen, makroskopischen Auswirkungen der Schweißprozesse sind von größtem Interesse. Demnach wird der eigentliche Schweißprozess meist abstrahiert mittels sogenannter Wärmequellenmodelle betrachtet. In Abschnitt 1.2.2.4 werden diese ausführlich erläutert.

Meist haben simulationsgestützte Untersuchungen einen Bezug zu einem konkreten Anwendungsfall oder Verfahren. So liefert WOHLFAHRT (2000) grundlegende Betrachtungen zum Laserstrahlschweißen, wobei im Wesentlichen die Nahtausbildung, das Gefüge, der Verzug und die Eigenspannungen berechnet werden. Im Rahmen der FEM-basierten Ansätze wird unter anderem eine sogenannte dynamische Vernetzung und deren Einsparpotentiale hinsichtlich Rechenzeit und Speicherplatzbedarf untersucht. Des Weiteren wird der hohe Einfluss der eingesetzten

1 Einleitung

Werkstoffdaten sowie von prozessbedingten Phasenumwandlungen auf die Ergebnisse der Schweißsimulation herausgearbeitet. PASQUALE (2001) fokussiert seine Untersuchungen zu mehreren Schweißverfahren auf die Berechnung der Eigenspannungen. Dabei werden im Detail auch die Wechselwirkungen zwischen dem Temperaturfeld, den Gefügemwandlungen und dem mechanischen Verhalten betrachtet. Bei einer Mehrlagenschweißung wird exemplarisch der große Einfluss der Schweißfolge und der Einspannsituation auf den letztendlichen Eigenspannungszustand aufgezeigt. Insbesondere wird die zunehmende Wichtigkeit des Einsatzes von Schweißsimulationen als Werkzeug bei der Auslegung und Verbesserung von Schweißprozessen betont. In dieser Hinsicht zeigt PORZNER (2001) unterschiedliche Potentiale der Schweißsimulation auf. Der Schwerpunkt seiner Ausführungen liegt dabei auf den unerwünschten, fertigungsbedingten Verzügen und Eigenspannungen, die während eines Schweißprozesses entstehen. Insbesondere werden unterschiedliche Einflussmöglichkeiten (Schweißparameter, Schweißprozess, Schweißnahtreihenfolge, Position der Schweißnähte, Einspannbedingungen) zur Minimierung dieser Größen sowie Methoden zur Berechnung derselben aufgezeigt. Diesbezüglich widmet sich ENZINGER (2002) der Implementierung einer FEM-basierten Ermittlung von Schweiß eigenspannungen. Sein Fokus liegt dabei auf den Werkstoffdaten und den Phasenumwandlungen. Außerdem thematisiert er die Komplexität der Modelle zur Eigenspannungsberechnung und damit die rechenleistungsbedingten Grenzen der heutigen Methoden. LINDGREN (2002) betrachtet allgemeingültige Konzepte hinsichtlich methodischer Ansätze zu Schweißsimulationen. Dabei trifft er insbesondere eine Klassifizierung unterschiedlicher Methoden bezüglich deren Genauigkeitsanforderungen an die erzielten Resultate. Als Zielgrößen werden hierbei wiederum Verzüge und Eigenspannungen untersucht. An Beispielen zeigt er Möglichkeiten zur Vereinfachung von Modellen auf.

Die zu fügenden Werkstoffe beeinflussen sowohl die reale Auslegung als auch die simulationsgestützte Abbildung des jeweiligen Schweißprozesses ganz maßgeblich. Insbesondere zeigen sich schon zwischen Stahl- und Aluminiumwerkstoffen große Unterschiede. Zu den letztgenannten untersucht HACKMAIR (2003) im Experiment und über Simulationsansätze die Ausbildung von Schweißverzügen an Fahrwerkskomponenten der Automobilindustrie. Dabei werden die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Schweißverzug an komplexen Bauteilstrukturen, wie beispielsweise die Schweißreihenfolge und die Schweißrichtung, betrachtet. Außerdem wird das Potential von Schweißsimulationen in der industriellen Anwen-

derung beleuchtet. Hierbei wird grundsätzlich stets der Einsatz in einer möglichst frühen Phase der Produktentwicklung angestrebt. Aus dieser Sicht untersucht ENZINGER (2005) die Nutzung einer kommerziellen FEM-Software zur Berechnung von schweißbedingten Eigenspannungen. Des Weiteren betrachtet er die Übertragbarkeit der Simulationsansätze auf das Flammrichten. RADAJ (2002b) untersucht die Ermittlung von Verzügen und Eigenspannungen. Schwerpunkt dieser Arbeit ist die weiterführende Einbeziehung verschiedener Versagenskriterien. Von PAPADAKIS ET AL. (2006) werden beim Laserstrahlschweißen die Wechselwirkungen zwischen Laserstrahl, Prozesseffekten und den Struktureigenschaften untersucht. Im Detail wird auch der Einfluss unterschiedlicher Faktoren (Einspannung, Schweißspalt und weitere) auf die Zielgrößen (Verzug, Eigenspannungen) betrachtet. PIRCH ET AL. (2007) widmen sich der Berechnung von Eigenspannungen beim Laserstrahlschweißen. Dabei werden im Speziellen Mängel der Finite-Elemente-Methode diskutiert. LOOSE ET AL. (2008) untersuchen Umfangsnähte an zylindrischen Strukturen hinsichtlich der Ausbildung der Verzüge. Dabei ist im Besonderen der Einfluss von Schweißnahtreihenfolge und -richtung sowie der Aspekt von Heftschweißungen von Interesse. WOHLFAHRT (2008) gibt eine Übersicht über die unterschiedlichen Einflüsse auf Schweißverzüge und deren Wechselwirkungen. Insbesondere wird die Übertragbarkeit hinsichtlich Warmumformen betrachtet. Unterschiedliche Werkstoffmodelle haben einen starken Einfluss auf die Berechnung der Eigenspannungen (LOOSE ET AL. 2010). LOOSE ET AL. (2010) betrachten hierzu unterschiedliche Vorgehensweisen und Vergleiche der berechneten Resultate mit realen Messergebnissen. HEINZE ET AL. (2011) untersuchen hinsichtlich FEM-basierter Ansätze den Einfluss der Netzfeinheit und des Umwandlungsverhaltens auf die berechneten Verzüge. Beide Aspekte haben eine entscheidende Auswirkung auf die Güte der Ergebnisse, wobei hierzu entsprechende Empfehlungen abgeleitet werden. Von LACKI ET AL. (2011) werden Untersuchungen des Elektronenstrahlschweißens hinsichtlich der Ermittlung der Eigenspannungen angestellt. Dabei werden Methoden der Ausgleichsrechnung (beschrieben etwa bei DAHMEN ET AL. (2008, S. 117 ff.)) zur Bestimmung der Schmelzbadgeometrie genutzt.

Eine zentrale Aufgabenstellung in der Schweißstruktursimulation ist es, ausgehend von Berechnungen von Verzügen und Eigenspannungen, Maßnahmen, die zur Reduktion dieser Größen führen, abzuleiten und simulationsgestützt zu untersuchen. Dieser Aspekt ist insbesondere aus Sicht der industriellen Anwendung interessant und entsprechend der Wich-

1 Einleitung

tigkeit der Thematik gibt es hierzu auch zahlreiche Untersuchungen. MOCHIZUKI ET AL. (2005) betrachten diesbezüglich eine der Schweißung vorlaufende Wärmequelle mit dem Ziel, die Schweißverzüge während des Prozesses zu kontrollieren. Diese Methode liefert für die betrachteten Anwendungen eine effektive Reduktion der Schweißverzüge. PAZOOKI ET AL. (2010) verfolgen einen ähnlichen Ansatz mit zwei vorlaufenden Wärmequellen. Bei diesem und vergleichbaren Ansätzen spielt die genaue Einstellung der angewandten Maßnahmen eine entscheidende Rolle. Zur Reduktion und teilweisen Eliminierung von Verzügen und Eigenspannungen untersucht VAN DER AA (2007) eine der Schweißung nachlaufende Wärmesenke. Neben der guten Eignung dieser Methode zur Verzugs- und Eigenspannungsreduktion werden insbesondere die Abhängigkeit vom Werkstoff und vom betrachteten Schweißprozess dargelegt. SCHWENK ET AL. (2007a) zeigen Möglichkeiten der simulationsgestützten Umsetzung zur Reduktion von fertigungsbedingten Verzügen auf. Dabei wird im Speziellen ein mittels Elektronenstrahlschweißen gefügtes Zahnrad betrachtet, wobei Potentiale zur Übertragung der Ansätze auf vergleichbare Anwendungen bestehen. NITSCHKE-PAGEL ET AL. (2007) geben eine Übersicht über unterschiedliche thermische und mechanische Methoden zur Eigenspannungsverringering. Oft wird hierbei der Begriff *Stress Engineering* verwendet. WILLIAMS ET AL. (2008) stellen zu diesem Thema unterschiedliche Ansätze vor, die vielfach Gegenstand laufender Untersuchungen sind.

Einen weiteren Aspekt in der Schweißstruktursimulation, der gerade aus Sicht der Industrie interessant ist, stellt die Untersuchung großer, komplexer Strukturen dar. Der Schritt von einfachen Probenbauteilen hin zu solchen großen, komplexen Strukturen erfordert seitens der Simulation vor allem die Bereitstellung von passenden methodischen Ansätzen (vgl. Abschnitt 1.2.2.3). Auch diese Thematik wird in zahlreichen Forschungsaktivitäten betrachtet. FAURE ET AL. (2005) präsentieren hierzu drei unterschiedliche Ansätze, die alle auf eine Reduktion der Komplexität der Modelle und damit eine Verringerung der Berechnungszeit abzielen. Als Referenz für die Güte der Ergebnisse diente eine transiente Simulation mit Volumenelementen (vgl. Abschnitt 1.2.2.3). Von BRAND ET AL. (2009a) wird ein Ansatz zur Verkürzung der Berechnungszeit betrachtet, der auf einer Ausnutzung der quasistationären Ausbildung des Temperaturfelds während des Schweißprozesses basiert. Dabei werden Potentiale aufgezeigt, eine verringerte Berechnungszeit zu erreichen, ohne Einbußen hinsichtlich der Güte der Ergebnisse in Kauf nehmen zu müssen. URNER ET AL.

(2010) untersuchen eine ausgewählte komplexe Trägerstruktur bezüglich der Genauigkeit der berechneten Verzüge. Insbesondere werden Heftscheidungen betrachtet und die Wichtigkeit von deren Berücksichtigung in der Simulation diskutiert. Die mehrfach angesprochene Güte der Ergebnisse bei vereinfachenden Ansätzen ist bei der Untersuchung von großen, komplexen Strukturen besonders wichtig, da Standardansätze aufgrund einer zu großen Komplexität oder einer unakzeptablen Berechnungsdauer vielfach nicht in Frage kommen. Solche vereinfachenden Ansätze können dabei auch die Möglichkeit eröffnen, eine bessere Abbildung der Realität als bei komplexen Modellen umzusetzen. Als Beispiel kann hierbei etwa die Berücksichtigung von sehr vielen Schweißnähten in der Simulation genannt werden (ZÄH ET AL. 2009A). Die zuvor beschriebene Verzugsreduktion etwa durch Variation der Schweißnahtreihenfolge kann damit vollständig und in einem zeitlich vertretbaren Rahmen betrachtet werden. BRAND ET AL. (2010) liefern eine Zusammenstellung verschiedener Maßnahmen (Vernetzungsstrategie bei der FEM, Wahl passender Rechenalgorithmen sowie Solvereinstellungen und weitere) für eine effiziente Schweißsimulation großer Strukturen.

Im Teilbereich der *Prozesssimulation* wird der Schweißprozess an sich detailliert betrachtet. Anders als bei einer Struktursimulation liegt hier der Fokus auf einer Abbildung der unterschiedlichen physikalischen Phänomene, die bei den einzelnen Schweißverfahren auftreten. Dementsprechend werden Zielgrößen wie die Schmelzbadgeometrie, Schmelzbadströmungen und weitere untersucht. Globale, prozessbedingte Auswirkungen sind in der Regel nicht von wesentlichem Interesse. ZACHARIA ET AL. (1995) liefern hierzu eine Übersicht zur Abbildung fundamentaler Phänomene in der Schweißsimulation. Dabei wird unter anderem die Berechnung der Schmelzbadströmungen betrachtet, wobei insbesondere der Entwicklungsbedarf für die zugrundeliegenden Modelle aufgezeigt wird. Des Weiteren wird die Interaktion von Werkstoff und Wärmequelle des jeweiligen Schweißverfahrens untersucht. Auch hierbei werden relevante Forschungsfragen herausgearbeitet. Eine umfassende Aufbereitung der Prozesssimulation von Schweißprozessen wird von RADAJ (1999) zur Verfügung gestellt. Dabei werden für zahlreiche Klassen von Schweißverfahren (wie etwa Strahl-, Lichtbogen- oder Reibschweißen) detaillierte Ansätze präsentiert. Im Detail werden Modelle für die Wärmeeinbringung, das fluid- und das thermodynamische Verhalten sowie weitere Aspekte betrachtet. BRÜGGEMANN ET AL. (2000) untersuchen den Prozess des Laserstrahlschweißens mittels einer Prozesssimulation. Dabei steht der

1 Einleitung

Vergleich von mittels Thermographie erhaltenen Messdaten mit berechneten Simulationsergebnissen im Fokus. DEBROY (2001) widmet sich der Modellbildung hinsichtlich Schmelzeströmungen und Wärmetransport bei Schmelzschweißverfahren. Dabei zeigt er im Besonderen die Wichtigkeit von simulationsgestützten Untersuchungen ergänzend zu realen Experimenten zur Steigerung des Prozessverständnisses auf. Prozesssimulationen können hierbei Einblick in unterschiedliche physikalische Phänomene gewähren, die nicht oder nur mit erheblichem Aufwand messtechnisch erfassbar sind. Von PAVLYK ET AL. (2001) werden die gleichen Zielgrößen für eine Variante des Lichtbogenschweißens im Experiment und in der Simulation betrachtet. Sie stellen dabei auch die Implementierung unterschiedlicher physikalischer Phänomene in der Simulation vor. FUHRICH ET AL. (2002) untersuchen die Strömungsvorgänge im Schmelzbad beim Laserstrahl-tiefschweißen. Dabei wird die entscheidende Bedeutung des sogenannten Marangoni-Effekts für die Schmelzbadströmungen herausgearbeitet. RAI ET AL. (2006) präsentieren ein Modell zur Bestimmung von Wärmetransport und Schmelzbadströmungen beim Laserstrahl-tiefschweißen. Die Ausbildung des Schmelzbad und dabei der Vergleich von experimentellen mit berechneten Ergebnissen bilden den Fokus der Untersuchungen. DEBROY ET AL. (2010) betrachten die Fortschritte hinsichtlich Modellbildung bei der Berechnung des konvektiven Wärmetransports im Schmelzbad. Dabei werden aktuelle Forschungsfragen und die Potentiale der zugehörigen Ansätze beleuchtet.

Im Teilbereich der *Werkstoffsimulation* werden Fragestellungen untersucht, die maßgeblich aus der Veränderung des gefügten Werkstoffs durch den Schweißprozess resultieren. So sind der Gefügestand, Gefügeumwandlungen, die Härte sowie Heiß- und Kaltrisse die wesentlichen Zielgrößen in diesem Teilbereich. Von ZACHARIA ET AL. (1995) werden neben den zuvor genannten prozessseitigen Betrachtungen auch Beiträge zur Werkstoffsimulation geliefert. Hierbei erfolgt eine detaillierte Behandlung der Ausbildung der Mikrostruktur sowie von Phasenumwandlungen. Es wird ein Überblick über Arbeiten zu diesen Zielgrößen und ein Ausblick auf weitere Forschungspotentiale gegeben. BOELLINGHAUS (2001) leistet einen umfassenden Beitrag zum Verständnis der Wasserstoffdiffusion und der damit verbundenen Kaltrissbildung beim Schweißen des Werkstoffs Stahl. Dabei werden bestehende Modelle behandelt und ein neuer Ansatz präsentiert. KANNENGIESSER ET AL. (2002) untersuchen die Thematik der Heißrissbildung hinsichtlich des Einflusses lokaler Deformationen im Schweißnahtbereich. Unter anderem werden Möglichkeiten zur Vermei-

dung von Heißrissen behandelt. Auch MURAKAWA ET AL. (2005) widmen sich der Simulation der Heißrissbildung. Dabei wird ein FEM-basierter Ansatz mit sogenannten Schnittstellenelementen vorgestellt und Vergleiche von experimentellen und simulationsgestützten Untersuchungen werden diskutiert. BABU ET AL. (2005) betrachten die Entwicklung der Mikrostruktur beim Schweißen von unterschiedlichen Stahlwerkstoffen. Dabei werden unterschiedliche physikalische Vorgänge hinsichtlich Modellierung und Charakterisierung beleuchtet. THIESSEN ET AL. (2005) untersuchen die Mikrostruktur mit dem Fokus auf dem Laserstrahlschweißen. Insbesondere geben sie dabei eine Übersicht über unterschiedliche Modellansätze. Wie bereits angesprochen, kann eine nachlaufende Wärmesenke die schweißbedingten Verzüge wesentlich reduzieren (VAN DER AA 2007). Von VAN DER AA ET AL. (2007) wird hierzu auch der Einfluss einer solchen Wärmesenke auf die Ausbildung der Mikrostruktur untersucht. Dabei wird die Zielsetzung verfolgt, eine negative Beeinflussung der Mikrostruktur durch die Wärmesenke zu verhindern bzw. einer solchen durch geeignete Wahl der Parameter entgegenzusteuern. Von ARAKI ET AL. (2007) werden das Kornwachstum und Phasenumwandlungen beim Schweißen von Stahlwerkstoffen betrachtet. Dabei kommen stochastische Methoden zur Ermittlung der genannten Zielgrößen zum Einsatz.

Wie zuvor dargelegt, bilden die Koppelgrößen die Bindeglieder zwischen den einzelnen Teilbereichen der Schweißsimulation. Diese Kopplung soll hier exemplarisch zwischen den Teilbereichen der Struktursimulation und der Prozesssimulation kurz betrachtet werden. Bei einer Prozesssimulation kann die Zielsetzung verfolgt werden, eine Wärmequelle bzw. die Parameter einer Wärmequelle (vgl. Abschnitt 1.2.2.4) für eine Struktursimulation zu bestimmen. Das heißt, eine detaillierte Untersuchung eines Prozesses kann genutzt werden, um die variablen Parameter eines abstrahierten Ansatzes zur Wärmeeinbringung zu bestimmen. Mit eben diesem Ziel wird von REISGEN ET AL. (2010) ein Lichtbogenschweißprozess untersucht. Die dabei gewonnene Wärmequelle kann in der Folge angewendet werden, um in einer FEM-basierten Simulation Verzüge und Eigenspannungen zu ermitteln. Im Gegenzug kann bei einer Struktursimulation unter anderem die Breitenänderung des Fügespalts während eines Schweißprozesses ermittelt werden. Eine derartige Änderung beeinflusst das reale Prozessverhalten und kann damit Eingang in eine Prozesssimulation finden.

Maßnahmen zur Absicherung von Simulationsergebnissen bilden einen

wesentlichen Aspekt von simulationsgestützten Untersuchungen. Insbesondere wenn Aussagen in quantitativer Hinsicht getroffen werden, ist es notwendig, die Gültigkeit bzw. den Gültigkeitsbereich derselben zu prüfen. RADAJ ET AL. (2007) geben einen Überblick zu dieser Thematik. Dabei wird im Besonderen herausgearbeitet, dass sich eine umfassende Absicherung von Simulationsergebnissen durchaus komplex und aufwendig gestalten kann. Vielfach werden in diesem Zusammenhang die Begriffe *Kalibrierung*, *Validierung* und *Verifikation* gebraucht. Die Bedeutung dieser Begriffe wird dabei vielfach unterschiedlich ausgelegt. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Definitionen nach DIN SPEC 32534-1 (vgl. Abschnitt 5.4) angewendet (DIN SPEC 2011). Demnach ist eine Kalibrierung eine „Ermittlung der variablen Parameter für das mathematische Modell im Rahmen der Implementierung, bezogen auf einen konkreten Anwendungsfall“, eine Validierung ein „vollständiger oder teilweiser Vergleich zwischen Berechnungsergebnissen und Daten aus Validierungsexperimenten, auch ein Nachweis des realitätskonformen Systemverhaltens des Simulationsmodells“ und eine Verifikation eine „Überprüfung der Übereinstimmung zwischen dem physikalischen Modell, dem mathematischen Modell und der Lösungsmethode, wobei im Gegensatz zur Validierung keine experimentellen Daten hinzugezogen werden“.

1.2.2.3 Grundlagen der Schweißstruktursimulation

Im Folgenden werden die für diese Arbeit relevanten Grundlagen der Schweißstruktursimulation aufbereitet. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der Betrachtung unterschiedlicher Modellierungsansätze und dem jeweiligen Ablauf der Simulation. Ein detaillierter und umfassender Einblick in die Grundlagen der Schweißstruktursimulation wird etwa von RADAJ (2002a) gegeben. Auch bei GOLDAK ET AL. (2005) findet sich eine grundlegende Aufbereitung dieser Thematik.

Ein wesentliches Kennzeichen eines Modellierungsansatzes, grundsätzlich in allen technischen Bereichen, ist die Komplexität desselben. Aus anwendungsorientierter Sicht stehen dahinter unmittelbar die Fragen nach dem Aufwand der Modellierung an sich, nach der notwendigen Rechenleistung und nach der zu veranschlagenden Berechnungszeit. Da ein allgemeines, quantitatives Maß für die Komplexität eines Modellierungsansatzes nicht anzugeben ist, werden meist Vergleiche von unterschiedlichen Ansätzen

herangezogen. Im Teilbereich der Schweißstruktursimulation dient im Allgemeinen die *transiente, entkoppelte Schweißstruktursimulation* als Standardansatz. Bei diesem FEM-basierten Ansatz wird der zeitliche Verlauf der jeweiligen Zielgrößen für das jeweils betrachtete Bauteil berechnet. Aufgrund der eingesetzten Methode liegen die ermittelten Ergebnisse räumlich und zeitlich diskretisiert vor. Der Begriff „entkoppelt“ bedeutet, dass die real vorhandenen Wechselwirkungen zwischen Temperaturfeld, Gefügestand, Verzug und Eigenspannungen teilweise vernachlässigt werden, um eine Vereinfachung des Modellierungsansatzes zu erzielen. Im Detail heißt das, dass etwa die latente Wärme von Gefügeumwandlungen und die durch mechanische Verformungen freigesetzte Wärme nicht berücksichtigt werden (RADAJ 2002A, S. 101 f.). Da die Berücksichtigung oder die Nicht-Berücksichtigung von bestimmten Wechselwirkungen je nach Anwendungsfall variieren kann, ist eine sorgfältige Dokumentation der jeweiligen Simulation sinnvoll und wichtig (vgl. Abschnitt 5.4). Der chronologische, schematische Ablauf einer transienten, entkoppelten Schweißstruktursimulation ist in Abbildung 1.3 zu sehen.

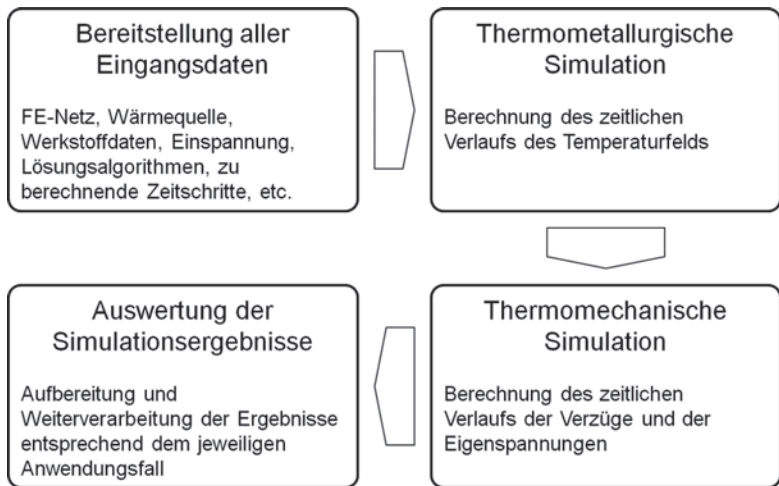


Abbildung 1.3: Chronologischer, schematischer Ablauf einer transienten, entkoppelten Schweißstruktursimulation

Entscheidend ist dabei die vorgelagerte Ermittlung des Temperaturfelds als Basis für die Berechnung der Verzüge und Eigenspannungen.

1 Einleitung

Bei Werkstoffen mit mehreren möglichen Gefügeständen können mit der Bestimmung des Temperaturfelds optional auch die Phasenanteile ermittelt werden. In diesem Zusammenhang wird der erste Teil der Berechnungen als *thermometallurgische Simulation* bezeichnet. Diesem folgt dann die *thermomechanische Simulation*. Eine transiente, entkoppelte Schweißstruktursimulation kann grundsätzlich für ein-, zwei- und dreidimensionale „Bauteile“ durchgeführt werden. Dadurch sind auch Vereinfachungen möglich, die zu einer Reduktion der Komplexität des Modells führen. Von SCHWENK ET AL. (2010) wird eine strukturierte Vorgehensweise für eine transiente, entkoppelte Schweißstruktursimulation vorgeschlagen. Dabei wird insbesondere das Ziel verfolgt, eine Vergleichbarkeit verschiedener Untersuchungen durch eine möglichst einheitliche Dokumentation zu erreichen (vgl. Abschnitt 5.4).

Unter Umständen kann auch eine Steigerung der Komplexität des Modellierungsansatzes für bestimmte Anwendungsfälle notwendig sein. Dies tritt beispielsweise bei der Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen Temperaturfeld, Verzug und Eigenspannungen ein. Ein derartiger Ansatz wird meist als *transiente, gekoppelte Schweißstruktursimulation* bezeichnet. Ausführungen dazu sind etwa bei RADAJ (2002a) zu finden.

Ein Beispiel für einen zu einer transienten, entkoppelten Schweißstruktursimulation vereinfachten Modellierungsansatz stellt der FEM-basierte *Local-Global-Ansatz* dar (SOULOUMIAC ET AL. 2002). Dabei wird die grundlegende Idee verfolgt, eine aus der Sicht industrieller Anwender handhabbare Methode zur Berechnung der schweißbedingten Verzüge großer Strukturen zu schaffen. Abbildung 1.4 zeigt den chronologischen, schematischen Ablauf hierzu.

Der Ausgangspunkt bei diesem Ansatz ist die Überlegung, dass die globalen Auswirkungen auf eine Bauteilstruktur letztendlich durch die lokalen Einwirkungen der Schweißprozesse bedingt sind. Zur Reduktion des Berechnungsaufwands wird bei diesem Ansatz die thermometallurgische und die thermomechanische Berechnung auf einen relevanten lokalen Ausschnitt der Gesamtstruktur beschränkt. In der Regel wird hierbei die unmittelbare Umgebung eines Schweißpfads betrachtet. Das Ziel der lokalen Simulation ist die Ermittlung der plastischen Dehnungen, die dann meist für den untersuchten Schweißstoß in einer Datenbank gespeichert werden. Anschließend wird ein globales Modell des Gesamtbauteils betrachtet, wobei hierbei zur Reduktion der Komplexität zweidimensionale Schalenelemente zum Einsatz kommen. Die berechneten plastischen

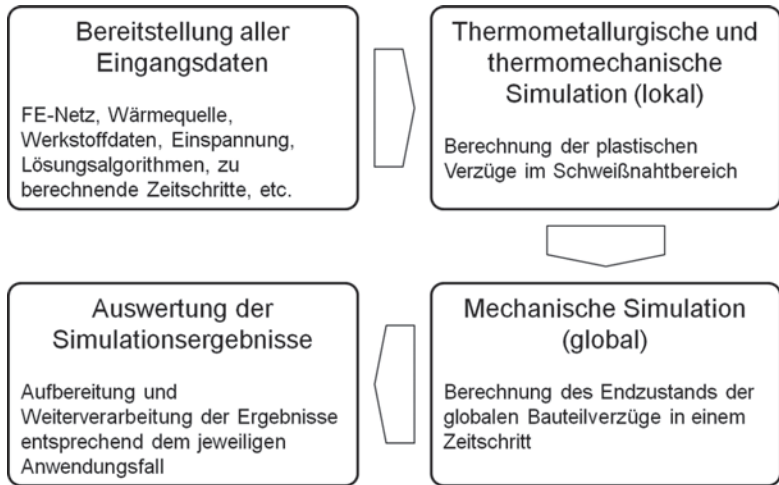


Abbildung 1.4: Chronologischer, schematischer Ablauf einer Schweißstruktursimulation nach dem Local-Global-Ansatz

Dehnungen werden dann in einer mechanischen Berechnung der Gesamtstruktur aufgeprägt, womit der Gesamtverzug bestimmt werden kann. Die Anzahl der notwendigen lokalen Simulationen richtet sich nach der Anzahl der unterschiedlichen Schweißstöße in der Gesamtstruktur. In einer Datenbank hinterlegte Ergebnisse für bestimmte Schweißstöße aus vorangegangenen Simulationsberechnungen können den Aufwand hierbei zusätzlich reduzieren. Der Local-Global-Ansatz eignet sich dementsprechend besonders für große, flächige Bauteile, die viele gleichartige Schweißnähte aufweisen (ZAEH ET AL. 2009A). Eine detaillierte Einführung in die Local-Global-Methode ist bei SOULOUMIAC ET AL. (2002) zu finden. SCHENK ET AL. (2010a) geben einen Überblick über vereinfachte Ansätze in der Schweißstruktursimulation. Dabei werden unterschiedliche Aspekte einer Schweißsimulation hinsichtlich einer Reduktion der Komplexität untersucht. Von VAN DER AA ET AL. (2008) wird ein einfacher Ansatz zur Berechnung von Eigenspannungen betrachtet.

Der idealerweise zu wählende Modellierungsansatz hängt immer vom konkreten Anwendungsfall ab. Viele Faktoren wie die zu untersuchenden Zielgrößen, Genauigkeitsanforderungen an diese, zur Verfügung stehende Rechenzeit und -leistung sowie weitere beeinflussen diese Wahl. Im indus-

1 Einleitung

triellen Produktionsumfeld erschweren auch mangelnde Fachkenntnisse im Bereich der Schweißsimulation diese Entscheidung ganz maßgeblich. Weitere Ausführungen hierzu werden in Abschnitt 5.4 gegeben.

1.2.2.4 Wärmequellenmodelle

Zur räumlichen und zeitlichen Beschreibung der Wärmeeinbringung in ein Bauteil werden in der Schweißstruktursimulation *Wärmequellenmodelle* bzw. *Wärmequellen* eingesetzt. Unter dem Begriff „Bauteil“ ist hier und in der gesamten weiteren Arbeit stets die Gesamtheit der an der jeweils betrachteten Fügeoperation beteiligten Komponenten zu verstehen. Aus Sicht des Fügeprozesses ist das Bauteil dann das Ergebnis des Zusammenführens der einzelnen Fügepartner. Wie in Abschnitt 1.2.2.2 angedeutet, stellen Wärmequellen einen gegenüber dem realen Prozess abstrahierten Modellansatz dar. Das heißt, ein entscheidendes Kriterium für eine Wärmequelle ist die möglichst realitätsnahe Abbildung der Wärmeverteilung bzw. der Ausbildung des Temperaturfelds im jeweils betrachteten Bauteil. Aufgrund dieses Umstands werden häufig auch die Begriffe *äquivalente Wärmequelle* und *Ersatzwärmequelle* gebraucht. Um den vielen unterschiedlichen Anwendungsfällen gerecht zu werden, wurden zahlreiche Wärmequellen entwickelt. RADAJ (2002a) gibt hierzu einen umfassenden Überblick. Auch bei GOLDAK ET AL. (2005) finden sich Ausführungen zu dieser Thematik. Von einfachen punktförmigen Wärmequellen bis hin zu *verteilten Volumenwärmequellen* ist ein breites Komplexitätsspektrum bei den Modellansätzen festzustellen. Aufgrund der maßgeblichen Bedeutung für die anwendungsorientierte Schweißstruktursimulation wird der Schwerpunkt der folgenden Ausführungen auf die verteilten Volumenwärmequellen gelegt. Für einen detaillierten Einblick in die weiteren Modellansätze sei auf die genannten Quellen verwiesen.

Verteilte Volumenwärmequellen werden in der Regel durch zwei Sätze von Parametern definiert. Geometrische Parameter beschreiben die räumliche Ausdehnung der Wärmequelle und Wärmeintensitätsparameter legen fest, wie Wärme verteilt über das definierte Volumen eingebracht wird. Außerdem muss ein Schweißpfad vorgegeben werden, entlang dessen sich die Wärmequelle im zeitlichen Verlauf bewegt. Als vielfach verwendetes Beispiel einer verteilten Volumenwärmequelle kann die *Konische Wärmequelle* genannt werden (PAVELIC ET AL. 1969). Abbildung 1.5 zeigt diese mit den zugehörigen Parametern.

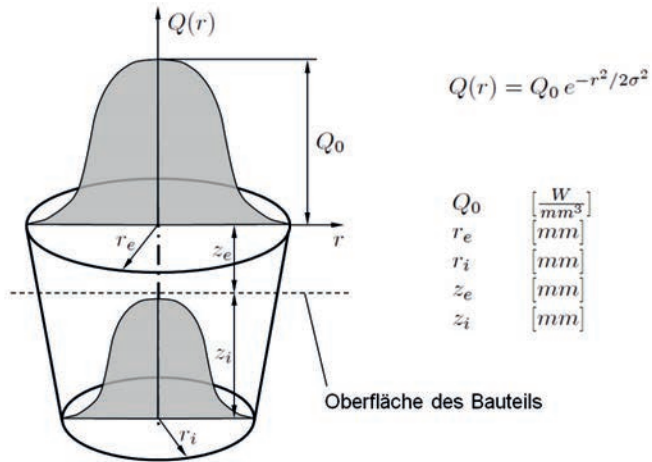
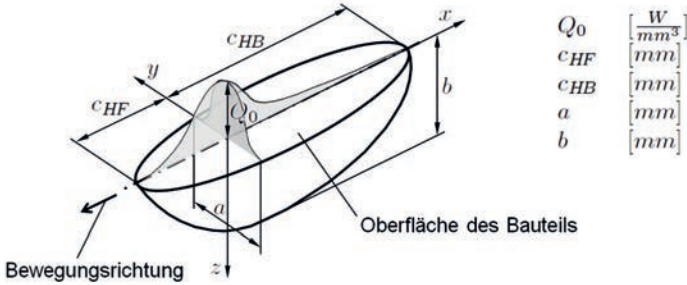


Abbildung 1.5: Konische Wärmequelle nach PAVELIC ET AL. (1969)

Die vier geometrischen Parameter r_e , r_i , z_e und z_i beschreiben in diesem Fall einen Kegel. Die Wärmeintensität mit dem Maximalwert Q_0 wird durch eine Gaußsche Normalverteilung mit Standardabweichung σ festgelegt. Im zeitlichen Verlauf der Simulation wird der Kegel entlang eines definierten Schweißpfads durch das untersuchte Bauteil, abgebildet durch ein Finite-Elemente-(FE)-Netz, bewegt. Alle Knoten des FE-Netzes, die sich zum jeweils betrachteten Zeitpunkt innerhalb des Kegels befinden, werden mit der entsprechenden Wärme beaufschlagt. Über die im Modell hinterlegten Gleichungen wird der Wärmetransport mittels Wärmeleitung berechnet. Dies führt dann letztendlich zur Ermittlung des zeitlichen Verlaufs des Temperaturfelds. Die Konische Wärmequelle eignet sich besonders für die Anwendung bei der Untersuchung von Strahlschweißprozessen, wie beispielsweise Laserstrahlschweißen oder Elektronenstrahlschweißen, denn das bei diesen Prozessen typischerweise auftretende schmale, kegelförmige Schmelzbad lässt sich mit einer Konischen Wärmequelle sehr gut abbilden (PAVELIC ET AL. 1969).

Eine weitere verteilte Volumenwärmequelle, die vielfach zum Einsatz kommt, ist die von GOLDAK ET AL. (1984) eingeführte *Ellipsoide Wärmequelle*. In Abbildung 1.6 ist diese mit den entsprechenden Parametern sowie den zugehörigen Gleichungen zu sehen.



$$Q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}}{a \cdot b \cdot c_{HF} \cdot \pi^{3/2}} \cdot Q_0 \cdot \exp\left(-3 \left(\frac{x^2}{c_{HF}^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} \right)\right) \quad \text{für } x < 0$$

$$Q(x, y, z) = \frac{6\sqrt{3}}{a \cdot b \cdot c_{HB} \cdot \pi^{3/2}} \cdot Q_0 \cdot \exp\left(-3 \left(\frac{x^2}{c_{HB}^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} \right)\right) \quad \text{für } x > 0$$

Abbildung 1.6: Ellipsoide Wärmequelle nach GOLDAK ET AL. (1984)

Die geometrischen Parameter a , b , c_{HF} und c_{HB} sowie der Wärmeintensitätsparameter Q_0 beschreiben ein Ellipsoid und legen den exponentiellen Verlauf der Wärmeintensität fest. Die Einbindung der Ellipsoiden Wärmequelle in eine Schweißstruktursimulation findet analog zu der bei der Konischen Wärmequelle statt. Dieses Wärmequellenmodell ist unter anderem für die Untersuchung von Lichtbogenschweißprozessen besonders gut geeignet, denn das langgezogene Schmelzbad bei diesen Prozessen kann durch eine Ellipsoide Wärmequelle sehr gut wiedergegeben werden (GOLDAK ET AL. 1984).

Wärmequellen müssen als abstrahierte Modellansätze kalibriert werden, um eine realitätsgetreue Abbildung der Wärmeeinbringung zu erzielen. Das heißt, den abstrakten Wärmequellenparametern müssen explizite Werte zugeordnet werden. In Abbildung 1.7 ist hierzu die Einbindung von Wärmequellenmodellen in eine Schweißstruktursimulation schematisch dargestellt.

Die Definition der Wärmequelle mit den zugehörigen Wärmequellenparametern und die Definition des Schweißpfads finden dabei Eingang in das Simulationsmodell. Für die Wärmequellenparameter muss zu Beginn ein Satz von Startparametern festgelegt werden. Die Wärmeeinbringung in

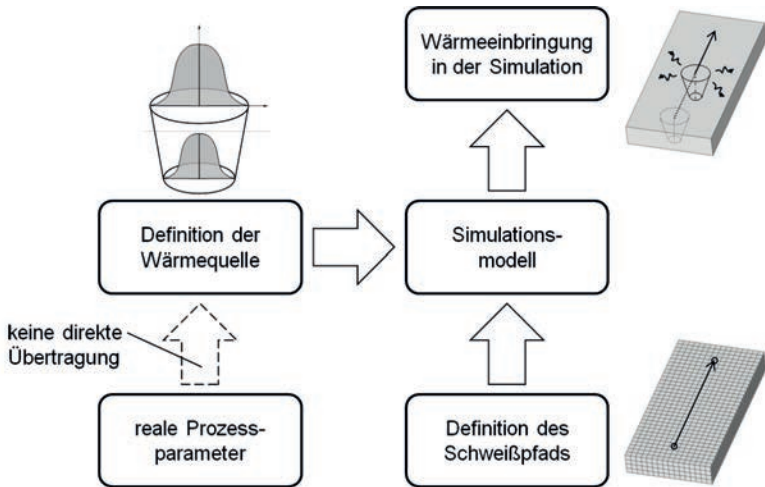


Abbildung 1.7: Schematische Einbindung einer Wärmequelle in eine Schweißstruktursimulation

der Simulation führt dann letztendlich zur Ermittlung des Temperaturfelds. Im Zuge der Kalibrierung der Wärmequelle wird das berechnete Temperaturfeld mit realen Messdaten verglichen. In der Regel werden hierbei Makroschliffe der Schweißnaht und gemessene Temperaturverläufe genutzt. Erstere dienen zum Vergleich der Ausdehnung des Schmelzbads mit dem berechneten Bereich über Schmelztemperatur. Die meist mittels Thermoelementen gemessenen Temperaturverläufe, vielfach auch Temperaturzyklen genannt, beschreiben die Temperaturveränderungen an festen Punkten in der Nähe der Schweißnaht des betrachteten Bauteils. Verglichen werden diese mit den berechneten Temperaturverläufen in den entsprechenden Knoten des FE-Netzes. Diese Vorgehensweise der Kalibrierung wird beim Anwendungsbeispiel in Kapitel 4 noch detailliert dargestellt. Als wichtiger Aspekt hierbei ist zu beachten, dass, zwecks einer effizienten Kalibrierung, die restlichen variablen Größen des Modells als zutreffend angenommen und konstant gehalten werden. Wenn das berechnete Temperaturfeld noch keine ausreichende Übereinstimmung mit den experimentellen Daten aufweist, ist eine Anpassung der Wärmequellenparameter notwendig. Meist erfolgt diese Anpassung iterativ, was mitunter zeitintensiv sein kann. Diese Art der Wärmequellenkali-

brierung wird häufig als *iterative Kalibrierung* bezeichnet. Das heißt im Detail, die Wärmequellenparameter werden angepasst, die Simulation wird durchgeführt und die Simulationsergebnisse werden mit experimentellen Resultaten verglichen, wobei dieser Ablauf solange wiederholt wird, bis eine ausreichende Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment gegeben ist. Die realen Prozessparameter können bei diesem Ansatz nicht direkt übertragen werden. Beispielsweise findet sich bei der Untersuchung des Laserstrahlschweißens der explizite Wert der Laserleistung nicht unter den Wärmequellenparametern wieder. Lediglich indirekte Einflüsse zeichnen sich ab. Dieser Umstand bildet den Ausgangspunkt für diese Dissertation und führt zu der in Abschnitt 1.3 dargelegten Zielsetzung. Die im Folgenden diskutierten Arbeiten beziehen sich meist auf einen speziellen Anwendungsfall bzw. eine Klasse von Schweißverfahren. Die im Rahmen der vorliegenden Dissertation entwickelte Methode stellt dem gegenüber einen allgemein gültigen Ansatz bei der Anwendung einer FEM-basierten Schweißstruktursimulation dar.

Die Bedeutung von Wärmequellen im Bereich der Schweißstruktursimulation wird auch durch die Vielzahl der Forschungsarbeiten zu dieser Thematik verdeutlicht. Bei ROSENTHAL (1941) finden sich hierzu grundlegende Betrachtungen. EAGAR ET AL. (1983) untersuchen von bewegten, verteilten Wärmequellen erzeugte Temperaturfelder. Dabei wird der unterschiedliche Einfluss der Prozessparameter auf die Ausbildung des Schmelzbads betrachtet. Im Fokus steht das Lichtbogenschweißen von unterschiedlichen Werkstoffen. Auch WAHAB ET AL. (1998) widmen sich dem gleichen Schweißverfahren. Sie analysieren insbesondere die Unterschiede hinsichtlich Ergebnisgüte zwischen zwei- und dreidimensionalen Modellen. CHANG ET AL. (2002) untersuchen verschiedene Wärmequellenansätze bezüglich der Ermittlung von Schweißnahtform und Temperaturfeld. Der Fokus liegt dabei auf dem Punktschweißen von dünnen Edelstahlblechen mittels Laserstrahl. GUO ET AL. (2004) betrachteten die Ableitung eines Wärmequellenmodells, basierend auf experimentellen Daten zum Temperaturfeld und zur Mikrostruktur beim Elektronenstrahlschweißen. Von GERY ET AL. (2005) wird ein Wärmequellenmodell, basierend auf der Ellipsoiden Wärmequelle nach GOLDAK ET AL. (1984), untersucht. Dabei wird der Einfluss von Schweißgeschwindigkeit, Energieeintrag und Wärmequellenverteilung auf das Temperaturfeld analysiert. VAN ELSSEN ET AL. (2006) widmen sich der Modellierung von Wärmequellen und der Lösung der Wärmeleitungsgleichung mit analytischen und numerischen Ansätzen. Als numerischer Ansatz wird dabei

die Finite-Differenzen-Methode (beschrieben etwa bei DAHMEN ET AL. (2008, S. 470 ff.)) verwendet. DOYNOV ET AL. (2007) betrachten die Einbindung eines Prozessmodells zur Ermittlung des Schmelzbads in eine thermometallurgische Simulation. Dem Nachteil der Komplexitätssteigerung des Gesamtmodells steht dabei der Vorteil bzw. die Möglichkeit der Berücksichtigung von unterschiedlichen physikalischen Phänomenen gegenüber. Eine ähnliche Zielsetzung wird auch von PAVLYK ET AL. (2007) verfolgt. Sie entwickeln für einen Lichtbogenschweißprozess ein Prozessmodell und zeigen die Ableitung einer Wärmequelle für die Einbindung in eine thermometallurgische Simulation auf. WEISS ET AL. (2007) stellen ein hybrides Modell zur Kalibrierung in der thermischen Simulation vor. Dabei werden theoretische und empirische Ansätze kombiniert. Von SCHWENK ET AL. (2007b) wird dieses hybride Modell mit iterativen Methoden verglichen. Als Anwendungsfall werden dabei laserstrahlgeschweißte Edelstahlbleche betrachtet. BAG ET AL. (2008) entwickeln für das Lichtbogenschweißen ein Wärmequellenmodell zur Berechnung des Temperaturfelds. Dabei ist in das Modell ein genetischer Algorithmus eingebunden, der zur Bestimmung von unbekanntem Eingangsparametern dient. Von BRAND ET AL. (2009b) wird ein Ansatz zur automatischen Anpassung der Wärmeintensität von Wärmequellen vorgestellt. Dieser Anpassung liegen dabei Vergleiche von gemessenen und berechneten Temperaturzyklen zugrunde. XU ET AL. (2011) entwickeln für das Laserstrahlschweißen und ein Laserstrahl-Lichtbogen-Hybrid-Schweißverfahren jeweils ein Wärmequellenmodell zur Berechnung des Temperaturfelds und der Schmelzbadgeometrie. Bei der Bestimmung der Wärmequellen werden maßgeblich die Ausbildung einer Dampfkapillare und die dabei zugrundeliegenden physikalischen Phänomene berücksichtigt.

Beim sogenannten inversen Wärmeleitungsproblem wird versucht, ausgehend von erzielten oder gewünschten Resultaten hinsichtlich der Schmelzbadausprägung, der Mikrostruktur und weiterer Größen auf die jeweiligen Ursachen rückzuschließen. Diese Ursachen beinhalten insbesondere auch den zeitlichen Verlauf der Wärmeeinbringung. KARKHIN ET AL. (2002) analysieren hierzu einen Lösungsansatz und wenden diesen für das Laserstrahl- und das Elektronenstrahlschweißen an. Dabei werden dünne und dicke Bleche aus Stahl sowie aus Aluminium betrachtet. Eine Analyse der Wärmeverteilung beim Schweißen wird von LAMBRAKOS ET AL. (2005), basierend auf inversen Lösungsansätzen, durchgeführt. ROUQUETTE ET AL. (2005) untersuchen das inverse Wärmeleitungsproblem speziell für das Elektronenstrahlschweißen. Es wird das Ziel verfolgt,

die Parameter einer Wärmequelle zu bestimmen. Bei GABRIEL ET AL. (2007) steht eine vergleichbare Zielsetzung im Fokus. Für den Prozess des Lichtbogenschweißens werden dabei unterschiedliche Wärmequellenmodelle untersucht. Der gleiche Prozess dient auch KARKHIN ET AL. (2007) als Anwendungsfall. Dabei werden insbesondere die analytischen Zusammenhänge der Wärmeleitung aufgezeigt. Eine Vertiefung dieser Untersuchungen wird am Beispiel des Laserstrahlschweißens durchgeführt (KARKHIN ET AL. 2011). LAMBRAKOS ET AL. (2007) untersuchen unterschiedliche Algorithmen für die Lösung des inversen Wärmeleitungsproblems. Die dabei untersuchten, allgemein gültigen Ansätze decken im Speziellen auch die Anwendung auf Schweißprozesse ab.

1.2.3 Interpolation

Ein Interpolationsproblem bzw. eine Interpolationsaufgabe lässt sich wie folgt beschreiben. Es sei eine Funktion $\Phi(x; a_0, \dots, a_n)$ einer Variablen x gegeben, die von $n + 1$ weiteren reellen oder komplexen Parametern a_0, \dots, a_n abhängt. Des Weiteren seien $n + 1$ Paare von reellen oder komplexen Zahlen (x_i, f_i) , $i = 0, \dots, n$, mit $x_i \neq x_k$ für $i \neq k$ festgelegt. Dann gilt es, die Parameter a_0, \dots, a_n derart zu bestimmen, dass

$$\Phi(x_i; a_0, \dots, a_n) = f_i \text{ für } i = 0, \dots, n \quad (1.14)$$

erfüllt ist. Die Paare (x_i, f_i) heißen Stützpunkte, die x_i Stützabszissen und die f_i Stützordinaten.

In dieser Dissertation wird die Interpolation im Rahmen des entwickelten methodischen Vorgehens genutzt. In diesem Abschnitt werden dazu die relevanten Grundlagen und Interpolationsansätze vorgestellt. Die Einbindung und die Begründung für die Wahl des entsprechenden Interpolationsansatzes wird in Abschnitt 3.5 beschrieben bzw. dargelegt. Für eine detaillierte Behandlung dieser Thematik sei etwa auf FREUND ET AL. (2007, S. 37 ff.) verwiesen, woran die folgenden Erläuterungen sich orientieren. Weitere Ausführungen hierzu finden sich vielfach in der Literatur, beispielsweise auch bei DAHMEN ET AL. (2008, S. 265 ff.).

Zur Lösung des Interpolationsproblems wurden zahlreiche Ansätze entwickelt. Diese zeichnen sich durch spezifische Vor- und Nachteile aus, die wiederum das jeweilige, mehr oder weniger große, Anwendungsfeld

abstecken. Interpolationsfunktionen können sich in Form von Polynomen, rationalen Funktionen, trigonometrischen Funktionen und weiteren Ansätzen darstellen. Eine Erweiterung der Interpolation mit Polynomen wird durch die *Hermite-Interpolation* beschrieben. Dazu seien für $i = 0, \dots, m$ und $k = 0, \dots, n_i - 1$ die reellen Zahlen x_i und $f_i^{(k)}$ gegeben, wobei $x_0 < x_1 < \dots < x_m$ erfüllt ist. Das *Hermite'sche Interpolationsproblem* besteht dann darin, ein Polynom P mit $\text{grad}(P) \leq n$ ($n + 1 := \sum_{i=0}^m n_i$) zu bestimmen, das die Bedingung

$$P^{(k)}(x_i) = f_i^{(k)} \quad \text{für } i = 0, \dots, m \text{ und } k = 0, \dots, n_i - 1 \quad (1.15)$$

erfüllt. Das heißt, an den Stützabszissen werden jeweils neben den Funktionswerten auch die ersten $n_i - 1$ Ableitungen vorgeschrieben. Für $n_i = 1$ ergibt sich als Spezialfall die gewöhnliche Polynominterpolation. Das gesuchte Polynom P wird dabei als *Hermite-Polynom* bezeichnet. Für das Hermite'sche Interpolationsproblem kann gezeigt werden, dass eine eindeutige Lösbarkeit gegeben ist (FREUND ET AL. 2007, S. 51).

Bei der Interpolation mit Polynomen kann schon für einfache Beispiele gezeigt werden, dass sich die Interpolationsfunktion bei einer Erhöhung der Stützpunkte stark oszillierend ausbildet (DAHMEN ET AL. 2008, S. 292 ff.). Um dem zu begegnen, bietet sich der Ansatz der stückweisen Interpolation an. Im Folgenden werden dazu die *stückweise kubische Hermite-Interpolation* sowie die *kubische Spline-Interpolation* vorgestellt.

Die stückweise kubische Hermite-Interpolation basiert auf der beschriebenen Hermite'schen Interpolation. Dabei bedeutet „stückweise“, dass für $[x_i, x_{i+1}]$ für $i = 0, \dots, m - 1$ jeweils ein Hermite-Polynom bestimmt wird. Entsprechend der Bezeichnung handelt es sich dabei um ein kubisches Hermite-Polynom und es gilt $n_i = 2$ für $i = 0, \dots, m$ sowie $\text{grad}(P) = 3 = n$. Das heißt, für jedes Intervall wird ein Hermite'sches Interpolationsproblem gelöst. Entsprechend der Definition des Hermite'schen Interpolationsproblems ist gewährleistet, dass für die Intervalle $[x_{i-1}, x_i]$ und $[x_i, x_{i+1}]$ sowie die zugehörigen Hermite-Polynome $P_{[x_{i-1}, x_i]}$ und $P_{[x_i, x_{i+1}]}$ die Bedingungen

$$\begin{aligned} P_{[x_{i-1}, x_i]}(x_i) &= P_{[x_i, x_{i+1}]}(x_i) \text{ und} \\ P'_{[x_{i-1}, x_i]}(x_i) &= P'_{[x_i, x_{i+1}]}(x_i) \text{ f\"ur } i = 1, \dots, m-1 \end{aligned} \quad (1.16)$$

erfüllt sind. Das heißt insbesondere, das Interpolationspolynom P mit $P(x) = P_{[x_i, x_{i+1}]}(x)$ für $x \in [x_i, x_{i+1}]$ und die erste Ableitung P' sind stetig auf $[x_0, x_m]$.

Ein Interpolationspolynom, das über die stückweise kubische Hermite-Interpolation bestimmt wird, hat die Eigenschaft, auf allen Teilintervallen monoton zu sein. Das heißt, die Monotonie von vorgegebenen Stützpunkten wird bei der Interpolation erhalten. Insbesondere werden dadurch lokale Extrema auch als solche durch das Interpolationspolynom abgebildet. Diese Eigenschaft bzw. das Ziel, eine derartige Eigenschaft zu erreichen, bildete auch den Ausgangspunkt für diese Art der Interpolation. FRITSCH ET AL. (1980) leiten die stückweise kubische Hermite-Interpolation her und zeigen deren Anwendung an mehreren Beispielen auf. Bei der stückweise kubischen Hermite-Interpolation, wie auch bei der kubischen Spline-Interpolation, wird auch die qualitative Anforderung, „visually pleasing“ zu sein, erfüllt.

Für eine Unterteilung Δ des Intervalls $[x_0, x_n]$ durch die reellen Zahlen x_0, \dots, x_n mit $x_0 < x_1 < \dots < x_n$ ist eine kubische Spline-Funktion S_Δ allgemein als reelle Funktion $S_\Delta : [x_0, x_n] \rightarrow \mathbb{R}$ mit den Eigenschaften

- a) $S_\Delta \in C^2([x_0, x_n])$ (S_Δ ist auf $[x_0, x_n]$ zweimal stetig differenzierbar)
 - b) $S_\Delta|_{[x_i, x_{i+1}]}$ ist für $i = 0, \dots, n-1$ ein kubisches Polynom
- $$(1.17)$$

definiert (FREUND ET AL. 2007, S. 113). Das entsprechende Interpolationsproblem ist dann dadurch gegeben, zu Stützpunkten (x_i, f_i) für $i = 0, \dots, n$ und zu einer Unterteilung Δ von $[x_0, x_n]$ eine kubische Spline-Funktion S_Δ zu bestimmen, für die

$$\begin{aligned} S_{\Delta}(x_i) &= f_i \text{ für } i = 0, \dots, n \text{ und} \\ S''_{\Delta}(x_0) &= S''_{\Delta}(x_n) = 0 \end{aligned} \tag{1.18}$$

gilt. Die zweite Forderung unter (1.18) sichert die eindeutige Lösbarkeit der Aufgabe (FREUND ET AL. 2007, S. 113 ff.). Diese Forderung kann auch durch alternative Bedingungen ersetzt werden (FREUND ET AL. 2007, S. 113 ff.). Die kubische Spline-Funktion, die (1.18) löst, erfüllt

$$\begin{aligned} S_{\Delta}|_{[x_{i-1}, x_i]}(x_i) &= S_{\Delta}|_{[x_i, x_{i+1}]}(x_i), \\ S'_{\Delta}|_{[x_{i-1}, x_i]}(x_i) &= S'_{\Delta}|_{[x_i, x_{i+1}]}(x_i) \text{ und} \\ S''_{\Delta}|_{[x_{i-1}, x_i]}(x_i) &= S''_{\Delta}|_{[x_i, x_{i+1}]}(x_i) \text{ für } i = 1, \dots, n-1. \end{aligned} \tag{1.19}$$

Diese höheren Anforderungen an die Differenzierbarkeit bei kubischen Spline-Funktionen führen dazu, dass die bei der stückweise kubischen Hermite-Interpolation aufgezeigte Eigenschaft des Erhalts der Monotonie nicht mehr erfüllt wird. Hierzu zeigt Abbildung 1.8 ein einfaches Beispiel.

Diese Eigenschaft bzw. das Fehlen dieser Eigenschaft bei den erläuterten Interpolationsvarianten ist ein entscheidendes Kriterium bei der Auswahl eines passenden Ansatzes für das methodische Vorgehen in Abschnitt 3.5. Alle weiteren Erläuterungen finden sich eben dort.

1.2.4 Künstliche Neuronale Netze

Ein *Künstliches Neuronales Netz* (KNN), bei klarem Bezug vielfach auch einfach als *Neuronales Netz* bezeichnet, ist, elementar betrachtet, ein Verbund von Verarbeitungseinheiten. Diese Verarbeitungseinheiten können Eingangssignale gemäß bestimmter Regeln bearbeiten und entsprechend gewichtete Ausgangssignale weitergeben. Trotz der Einfachheit einer einzelnen Verarbeitungseinheit kann ein Verbund von vielen Verarbeitungseinheiten komplexe Aufgaben bewältigen. Im Rahmen dieser Dissertation werden Künstliche Neuronale Netze beim entwickelten methodischen Vorgehen als alternativer Ansatz zur Interpolation genutzt.

1 Einleitung

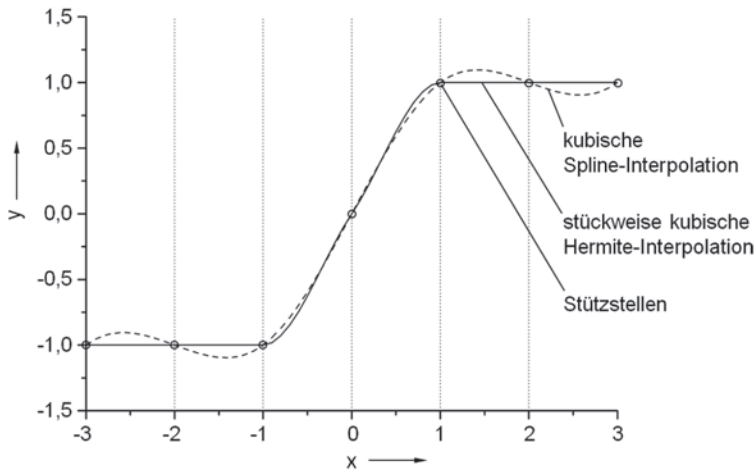


Abbildung 1.8: Vergleich unterschiedlicher Interpolationsansätze für ein Beispiel

In den letzten Jahrzehnten wurden Künstliche Neuronale Netze für vielfältige Anwendungsfälle eingesetzt, insbesondere auch im Zusammenhang mit Schweißverfahren. Im Folgenden werden zunächst, in Anlehnung an CALLAN (2003) und KRATZER (1993), die Grundlagen zu Künstlichen Neuronalen Netzen aufbereitet. Anschließend werden einige themenbezogene Anwendungen vorgestellt.

Künstliche Neuronale Netze können sowohl hardware- als auch softwaretechnisch umgesetzt werden. In der Regel wird die zweite Variante, gerade wegen der stärkeren Flexibilität, bevorzugt. Das wesentliche Merkmal von Künstlichen Neuronalen Netzen ist die Art und Weise, wie Aufgaben gelöst werden. Konventionelle Software wird zur Lösung einer Problemstellung programmiert, bei Künstlichen Neuronalen Netzen werden dem gegenüber diese Lösungen erlernt. Dieses Vorgehen bietet besonders bei Aufgaben, die nur mit hohem Aufwand programmiertechnisch bewältigt werden können, große Vorteile. Ein Künstliches Neuronales Netz kann hierbei vergleichsweise einfach implementiert werden. Eine grundlegende Motivation für Künstliche Neuronale Netze rührt von der Abbildung der Funktionsweise des menschlichen Gehirns her, wobei dessen Komplexität alle Künstlichen Neuronalen Netze weit übertrifft.

Ein Künstliches Neuronales Netz besteht aus einzelnen *Einheiten*, auch *Neuronen* oder *Knoten* genannt, die untereinander verbunden sind, um eine entsprechende Kommunikation zu ermöglichen. Eine einzelne Einheit kombiniert dabei Eingangssignale und berechnet daraus über eine definierte *Aktivierungsregel* bzw. *Aktivierungsfunktion* ein Ausgangssignal. Dieses wird dann über Verbindungen, meist als *Gewichte* bezeichnet, an andere Einheiten weitergegeben. Das sogenannte *Konnektivitätsmuster* beschreibt, wie die Einheiten miteinander verbunden sind und welche Werte den gewichteten Verbindungen zugewiesen sind. Ein Künstliches Neuronales Netz wird meist in zwei Schritten aufgebaut. Zunächst werden die Einheiten und die Verbindungen zwischen diesen festgelegt. Anschließend, in der *Trainingsphase* bzw. beim *Trainieren* des Künstlichen Neuronalen Netzes, werden die Gewichte bestimmt. Die Fähigkeit zur Lösung der jeweiligen Aufgabe ist dann in diesen Gewichten kodiert. Die Vielfältigkeit der Typen von Künstlichen Neuronalen Netzen, die im Laufe der jahrzehntelangen Erforschung dieser Thematik entstanden sind, lässt sich dennoch meist über einige feste Eigenschaften bzw. Merkmale beschreiben: eine Menge von Einheiten, ein Konnektivitätsmuster, eine Regel zur Weiterleitung von Signalen im Netz, eine Regel zur Kombination von Eingangssignalen, eine Regel zur Berechnung von Ausgangssignalen und eine Lernregel zur Anpassung der Gewichte.

Jede Einheit aus der Gesamtmenge verfügt zumeist über eingehende Gewichte zum Empfang von Signalen und ausgehende Gewichte zur Weiterleitung von Signalen. Einige Einheiten, *Eingabeeinheiten* genannt, empfangen Eingangssignale aus der realen Umgebung, wobei diese Eingangssignale bei der Implementierung eines Künstlichen Neuronalen Netzes vielfach aus zuvor gespeicherten Daten gewonnen werden. Andere Einheiten, als *Ausgabeeinheiten* bezeichnet, liefern eines oder mehrere Ausgangssignale an die Umgebung zurück. Diese stellen dann die ermittelte Lösung bzw. die Ausgabe des Künstlichen Neuronalen Netzes dar. Einheiten, die weder Eingabeeinheiten noch Ausgabeeinheiten sind, werden oft als *verborgene Einheiten* beschrieben. Zur Veranschaulichung des Aufbaus eines Künstlichen Neuronalen Netzes zeigt Abbildung 1.9 ein entsprechendes Beispiel mit den erläuterten Bausteinen.

Ein Konnektivitätsmuster legt den Typ des Künstlichen Neuronalen Netzes fest. Dadurch wird auch grundsätzlich bestimmt, welche Verbindungen zwischen den einzelnen Einheiten zulässig sind. Beispielsweise kann ein Netztyp vorsehen, dass jede Einheit mit jeder anderen Einheit

1 Einleitung

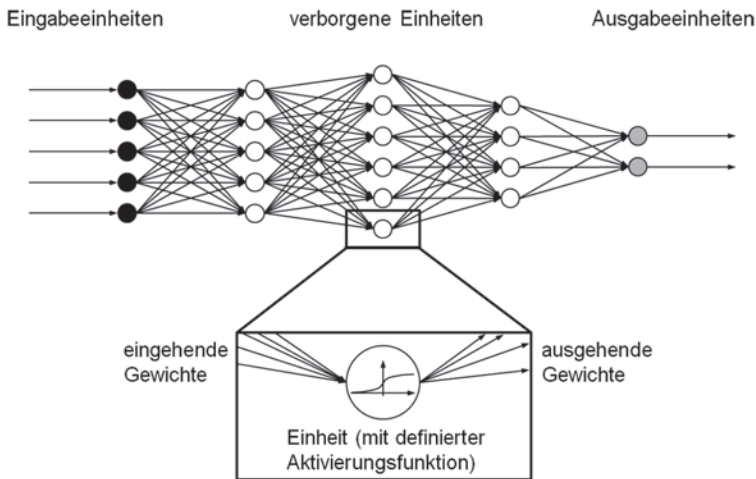


Abbildung 1.9: Schematische Übersicht eines Künstlichen Neuronales Netzes

verbunden ist. In einem anderen Fall ist das Netz schichtweise aufgebaut, wie es etwa in Abbildung 1.9 zu sehen ist. Des Weiteren beinhaltet ein Konnektivitätsmuster die Gewichte des Künstlichen Neuronales Netzes. Dabei ist ein Gewicht durch drei Parameter eindeutig beschrieben: die Einheit, von der das Gewicht ausgeht, die Einheit, zu der das Gewicht hinführt, und eine Zahl, den Gewichtswert, der die „Stärke“ der Verbindung angibt. Um eine rechentechnische Verarbeitung zu ermöglichen, wird ein Konnektivitätsmuster in der Regel durch eine Matrix festgelegt. Das heißt, der Matrixeintrag in Zeile i und Spalte j beschreibt das Gewicht zwischen Einheit i und Einheit j , wobei je nach algorithmischer Umsetzung auch ein „transponierter Ansatz“ notwendig sein kann. Der explizite Zahlenwert des Matrixeintrags entspricht dann dem Gewichtswert. Ist dieser Null, besteht keine Verbindung zwischen den betreffenden Einheiten. Bei schichtweisen Netztypen empfiehlt sich die Angabe einer Matrix pro Schicht.

Die zuvor genannte Regel zur Weiterleitung von Signalen im Netz legt fest, wann bzw. in welcher Reihenfolge die Einheiten des Künstlichen Neuronales Netzes die jeweiligen Eingangssignale kombinieren, ein Ausgangssignal berechnen und dieses dann an die anderen Einheiten weiter-

leiten. Je nach Netztyp gibt es hierbei mitunter große Unterschiede. Die angesprochene Kombination der Eingangssignale wird durch eine weitere Regel beschrieben. Eine vielfach eingesetzte Möglichkeit besteht darin, für alle eingehenden Verbindungen die Ausgangswerte der sendenden Einheiten mit dem Gewichtswert der jeweiligen Verbindung zu multiplizieren und anschließend die Summe über alle Produkte zu bilden. Abhängig vom Anwendungsfall gibt es auch hierbei verschiedene Varianten dieser Regel.

Um den Ausgangswert einer Einheit zu erhalten, ist wiederum eine Regel, die zuvor schon genannte Aktivierungsfunktion, zu dessen Berechnung erforderlich. Beim ermittelten Ausgabewert wird dann häufig von der *Aktivierung* der Einheit gesprochen. Bei den Eingabeeinheiten eines Künstlichen Neuronales Netzes ist die Aktivierungsfunktion immer die Identitätsfunktion. Das heißt, die realen Eingangssignale werden von den Eingabeeinheiten unverändert weitergegeben. Für alle weiteren Einheiten kommt vielfach eine binäre Schwellenfunktion zum Einsatz. Eine derartige Funktion f wird durch

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{für } x \geq x_0 \\ 0 & \text{für } x < x_0 \end{cases} \quad (1.20)$$

festgelegt. Dabei ist x der Wert der kombinierten Eingangssignale und x_0 der sogenannte Schwellenwert. Wird der Schwellenwert nicht erreicht, ist das Ausgangssignal der Einheit gleich 0, andernfalls gleich 1. Dieser Aspekt motiviert besonders auch die Bezeichnung „Aktivierung“ in diesem Zusammenhang.

Weitere Aktivierungsfunktionen, die oft verwendet werden, sind die sogenannten sigmoiden Funktionen. Die logistische Funktion, als Beispiel hierzu, ist durch

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (1.21)$$

definiert. Wie zuvor bezeichnen f und x die Funktion bzw. den Wert der kombinierten Eingangssignale. \exp ist die reelle Exponentialfunktion. Die Funktionswerte der logistischen Funktion liegen im Bereich zwischen 0 und 1, wobei diese Funktion, im Gegensatz zur binären Schwellenfunktion, durchgängig stetig ist.

1 Einleitung

Die letzte Eigenschaft, die ein Künstliches Neuronales Netz eindeutig definiert, ist eine Lernregel zum Anpassen der Gewichte. Eine Lernregel bestimmt, wie die Gewichte eines Künstlichen Neuronalen Netzes während der Trainingsphase angepasst werden. Das heißt, durch die Anwendung einer Lernregel wird ein Künstliches Neuronales Netz (Einheiten, Verbindungen und zu Beginn meist zufällig festgelegte Gewichte) für die Lösung der beabsichtigten Aufgabe trainiert. Oft wird hierbei ein überwachtes Lernen verfolgt. Dabei ist zu jeder Eingabe eine entsprechende Zielausgabe bekannt. Die Abweichung zwischen Zielausgabe und tatsächlicher Ausgabe, die zu Beginn der Trainingsphase zwangsläufig auftritt, stellt dann einen Fehler dar, der anschließend bei der Anpassung der Gewichte eingebracht werden kann. Vielfach wird dazu die sogenannte Delta-Regel eingesetzt, bei der sich das neue Gewicht aus der Addition des alten Gewichts und dem mit weiteren Faktoren multiplizierten Fehler errechnet (CALLAN 2003, S. 26 f.).

Die Daten, die zum Trainieren genutzt werden, sind von entscheidender Bedeutung für die Leistungsfähigkeit eines Künstlichen Neuronalen Netzes. Das heißt, diese müssen für die jeweilige Aufgabe repräsentativ sein. Ebenso sind aber auch die Festlegung des Netztyps, die Definition von Einheiten und Verbindungen sowie die Spezifizierung einer Lernregel von maßgeblicher Wichtigkeit für den erfolgreichen Einsatz eines Künstlichen Neuronalen Netzes. Um die Güte eines trainierten Künstlichen Neuronalen Netzes zu testen, sollten zusätzlich zu den Trainingsdaten auch entsprechende Testdaten vorliegen. Die Testdaten (Eingaben mit bekannten Zielausgaben) dienen dazu, zu prüfen, wie gut das Künstliche Neuronale Netz die beabsichtigte Aufgabe bewältigt.

Der Aufbau, das Trainieren und die Anwendung von Künstlichen Neuronalen Netzen werden heute durch den Einsatz von kommerzieller Software mitunter sehr vereinfacht. Dennoch sind grundlegende Kenntnisse, wie in diesem Abschnitt dargelegt, von Bedeutung, um entsprechende Fehler zu vermeiden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde beim Einsatz von Künstlichen Neuronalen Netzen die Software MATLAB (vgl. Abschnitt A.3) genutzt (vgl. Abschnitt 4.4).

Zum Abschluss der Grundlagen zu Künstlichen Neuronalen Netzen wird im Folgenden noch ein einfaches Anwendungsbeispiel präsentiert. Zu einer Menge von Koordinatenpaaren $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ($n \in \mathbb{N}$), die beispielsweise in einer Messung gewonnen wurden, kann eine Funktion berechnet werden, um Aussagen über einen möglichen funktionalen

Zusammenhang zu gewinnen. Im einfachsten Fall ist dies eine Gerade, die dann über die Gleichung

$$y = mx + c \quad (1.22)$$

bestimmt ist. Dabei sind x und y die Koordinaten, m die Steigung der Geraden und c der Koordinatenwert beim Schnitt der Geraden mit der Ordinate. Um eine „beste“ Lösung zu finden, wird hier meist die Methode der kleinsten Quadrate eingesetzt, um m und c direkt zu berechnen. Ebenso kann aber auch ein einfaches Künstliches Neuronales Netz zur Lösung herangezogen werden. Abbildung 1.10 zeigt hierzu eine Übersicht.

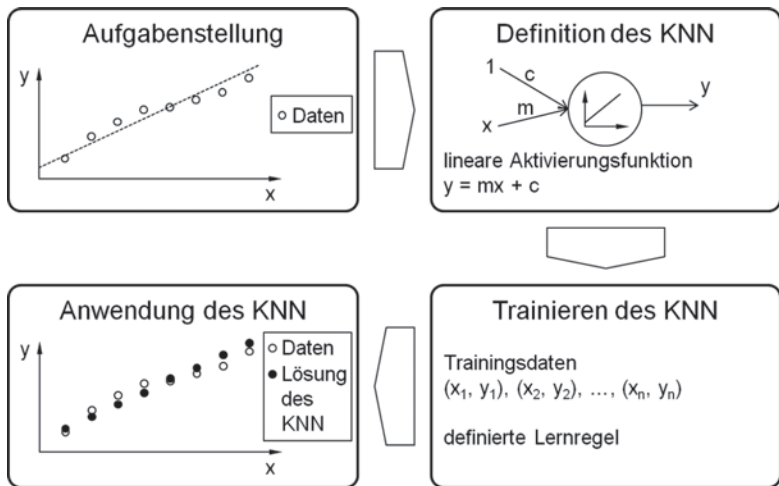


Abbildung 1.10: Beispielhafte Anwendung eines Künstlichen Neuronales Netzes

In diesem Fall ist eine einzelne Einheit ausreichend. Die beiden Eingangssignale x und 1 werden mit den Gewichten m bzw. c multipliziert und in der linearen Einheit verarbeitet (addiert), sodass sich die Ausgabe y ergibt. Zu Beginn werden die Gewichte m und c mit zufälligen Werten belegt. Die Menge der Koordinatenpaare stellt die Trainingsdaten dar. Über eine entsprechende Lernregel, wie beispielsweise die angesprochene Delta-Regel, werden die Gewichte im Laufe des Trainings angepasst. Bei einer korrekten Umsetzung dieser Vorgehensweise entspricht die mittels

1 Einleitung

des Künstlichen Neuronalen Netzes ermittelte Lösung annähernd der Lösung aus der Methode der kleinsten Quadrate.

Künstliche Neuronale Netze eignen sich für vielfältige Einsatzmöglichkeiten. So gibt es auch im Bereich der Produktionstechnik und im Speziellen bei Schweißverfahren einige Anwendungen. Meist wird dabei ausgehend von einigen experimentellen Daten, den Trainingsdaten, das Ziel verfolgt, Vorhersagen über das jeweils betrachtete Schweißverfahren zu treffen.

Von JIN ET AL. (1995) wird ein Künstliches Neuronales Netz dazu verwendet, die Schweißnahtbreite und die Abkühlrate beim Lichtbogenschweißen einer Rohrstruktur in Abhängigkeit von den Prozessparametern zu ermitteln. Die Qualitätsanforderung einer möglichst konstanten Schweißnahtbreite und Abkühlrate kann damit erreicht werden. Eine ähnliche Zielsetzung wird von ZHANG ET AL. (1996) verfolgt. Dabei werden mit Hilfe eines Künstlichen Neuronalen Netzes Aussagen über die Schweißnahtform beim Lichtbogenschweißen gewonnen. Auch VITEK ET AL. (1998) betrachten mittels Künstlicher Neuronaler Netze Schweißnahtformen, wobei gepulstes Laserstrahlschweißen von Aluminium untersucht wird. Insbesondere gelingt es dabei, die Unterscheidung zwischen Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen mit dem Künstlichen Neuronalen Netz korrekt zu prognostizieren. JENG ET AL. (2000) nutzen Künstliche Neuronale Netze, um Schweißparameter beim Laserstrahlschweißen zu ermitteln. Als Motivation dient dabei auch eine Verbesserung der industriellen Einsetzbarkeit. CHANG ET AL. (2001) widmen sich wieder der Berechnung von Schweißnahtformen über Künstliche Neuronale Netze. Als Anwendungsfall dient hierbei das Laserstrahlpunktschweißen von Edelstahlblechen. Von GUNDERSEN ET AL. (2001) werden Künstliche Neuronale Netze dazu verwendet, neben der Schweißnahtform auch Aussagen über die mechanischen Eigenschaften und den Verzug einer Aluminiumstruktur zu gewinnen. Insbesondere werden dabei Möglichkeiten zur Optimierung dieser Größen aufgezeigt. DI ET AL. (2001) nutzen Künstliche Neuronale Netze zusammen mit Ansätzen der Fuzzy-Logik. Als Anwendung wird dabei die Steuerung von Lichtbogenschweißprozessen untersucht. KIM ET AL. (2002) setzen ein Künstliches Neuronales Netz zur Vorhersage der Schweißnahthöhe beim Mehrlagenschweißen ein. Eine hohe Güte der Resultate ermöglicht dabei zuverlässige Aussagen zur Schweißnahtqualität. METZBOWER ET AL. (2002) nutzen ein Künstliches Neuronales Netz, um die mechanischen Eigenschaften und die Festigkeit von Schweißkonstruktionen zu ermitteln. Die Anwendung

bezieht sich dabei auf Beispiele aus dem Schiffsbau. NAGESH ET AL. (2002) verfolgen wieder das Ziel, die Schweißnahtform und die Schweißnahttiefe über Künstliche Neuronale Netze vorherzusagen. Dabei wird, wie bei einigen der anderen Arbeiten, das Lichtbogenschweißen betrachtet. Von YOO ET AL. (2003) wird das automatisierte Schweißen von dreidimensionalen Nähten untersucht. Mittels eines optischen Sensors ermittelte Daten werden dabei durch ein Künstliches Neuronales Netz verarbeitet. Von GREITMANN ET AL. (2005) wird ein Ansatz verfolgt, Künstliche Neuronale Netze zur Qualitätssicherung einzusetzen. Dabei wird vom Künstlichen Neuronalen Netz die Verbindungsgüte in Abhängigkeit von den Prozessparametern ermittelt. TSENG (2006) verwendet Künstliche Neuronale Netze, um Zusammenhänge zwischen Schweißparametern und Versagenskriterien herzustellen. Betrachtet wird dabei das Punktschweißen. NANDAN ET AL. (2007) nutzen ein Künstliches Neuronales Netz als Teil eines größeren methodischen Vorgehens. Als Zielsetzung wird die Verbesserung von Modellen zum Rührreibschweißen und zum Lichtbogenschweißen angestrebt. VITEK ET AL. (2007) widmen sich Künstlichen Neuronalen Netzen im Zusammenhang mit der Vorhersage von Werkstoffeigenschaften. Als Teil der Arbeit werden unterschiedliche Ansätze miteinander verglichen. Auch KANTI ET AL. (2008) betrachten Künstliche Neuronale Netze, um die Schweißnahtgeometrie vorherzusagen. Als Anwendungsfall dient dabei das Lichtbogenschweißen. PARK ET AL. (2008) verfolgen das Ziel einer Parameteroptimierung beim Laserstrahlschweißen von Aluminium. Ein Künstliches Neuronales Netz wird dabei zur Vorhersage der Zugfestigkeit verwendet. SHEN ET AL. (2009) nutzen Künstliche Neuronale Netze, um wechselseitig zwischen Prozessparametern und der Schweißnahtform (Tiefe und Breite) Vorausagen zu treffen. Dabei wird das Elektronenstrahlschweißen von Edelstahl untersucht. Von VASUDEVAN ET AL. (2010) wird ein Künstliches Neuronales Netz im Rahmen der Optimierung von Prozessparametern beim Lichtbogenschweißen verwendet. Das Künstliche Neuronale Netz liefert dabei Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern und der Schweißnahtausprägung. Von PITTNER ET AL. (2010) wird ein Künstliches Neuronales Netz im Zusammenhang mit dem inversen Wärmeleitungsproblem (vgl. Abschnitt 1.2.2.4) genutzt. CHOKKALINGHAM ET AL. (2010, 2011) setzen Künstliche Neuronale Netze ein, um Zusammenhänge zwischen Daten aus einer Prozessüberwachung und der Schweißnahtausprägung zu ermitteln. Diese Untersuchungen finden am Beispiel des Lichtbogenschweißens statt. SUDHAKARAN ET AL. (2011) betrachten die Optimierung eines

1 Einleitung

Lichtbogenschweißprozesses hinsichtlich der Einschweißtiefe. Ein Künstliches Neuronales Netz kommt dabei zur Ermittlung von Zusammenhängen zwischen den Prozessparametern und der Einschweißtiefe zum Einsatz.

Diese Arbeiten, die sich etwa über die letzten 20 Jahre erstrecken, belegen viele verschiedene Anwendungsfälle von Künstlichen Neuronalen Netzen im Bereich des Schweißens. Im Rahmen dieser Arbeit werden Künstliche Neuronale Netze, als Alternative zur Interpolation, zur Bestimmung von Simulationsparametern genutzt. Der reale Bezug entsteht dann bei der Auswertung der Simulationsergebnisse und deren Vergleich mit Messergebnissen.

1.3 Motivation und Zielsetzung

Der Einsatz der Simulation von Schweißprozessen in der industriellen Praxis bietet grundsätzlich ein großes Potential, allerdings existieren auch mehrere Hemmnisse, die eine wirtschaftliche Nutzung behindern. Eine Schweißsimulation kann beispielsweise wertvolle Erkenntnisse über den Schweißprozess an sich, über eine Einspannvariante des betrachteten Bauteils mit verzugsminimalen Ergebnissen und über viele weitere Aspekte liefern. Insbesondere kann eine Schweißsimulation experimentelle Untersuchungen ersetzen und damit die Möglichkeit eröffnen, Zeit, Kosten und Ressourcen einzusparen. Eine Schweißsimulation kann teilweise noch weiter gehen und etwa Ergebnisse über nicht oder nur schwer messbare Größen erbringen. Diesen Potentialen gerecht werdend, gibt es zahlreiche Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Schweißsimulation (vgl. Abschnitt 1.2). Eine umfassende Nutzung von Schweißsimulationen für industrielle Zwecke findet derzeit noch nicht statt, wobei mangelnde Fachkenntnisse und nicht vorhandene Werkstoffdaten als wesentliche Gründe hierfür genannt werden können (GOLDAK ET AL. 2005, S. 247 ff.). Im Allgemeinen liegen einer Schweißsimulation komplexe Modelle mit einer Vielzahl an variablen Parametern zugrunde. Dementsprechend sind meist fundierte, spezifische Fachkenntnisse erforderlich, um eine Schweißsimulation aufzubauen, durchzuführen und deren Ergebnisse zu interpretieren, womit meist eine große Hürde für industrielle Anwender geschaffen wird. Diesbezüglich gibt es bei kommerziellen Herstellern von Software für die Schweißsimulation in den letzten Jahren vermehrt das Bemühen, Lösungen bereitzustellen, die eine einfache Bedienbarkeit ermöglichen und nur minimale Fachkenntnisse voraussetzen. Fehlende Werkstoffdaten stellen

ein grundlegendes Problem dar, das nur schwer zu lösen ist. Die Werkstoffdaten, die für eine Schweißsimulation erforderlich sind (vgl. Abschnitt 2.4 und Abbildung 2.4), bilden einen essenziellen Teil der Eingangsdaten einer Schweißsimulation. Letztendlich beschreiben die Werkstoffdaten das gesamte Verhalten des jeweils betrachteten Bauteils unter den äußeren Einflüssen während des Schweißprozesses. Dementsprechend stark wirken sich fehlerbehaftete Werkstoffdaten auf die Ergebnisse einer Schweißsimulation aus. Weitere Ausführungen hierzu sind in Abschnitt 2.4 zu finden.

Neben dem Werkstoff gibt es noch einige weitere Aspekte, die als Teil der Eingangsdaten einer Schweißsimulation berücksichtigt werden müssen (vgl. Kapitel 2). Einer dieser Aspekte ist die Abbildung der Wärmeeinbringung in das jeweils betrachtete Bauteil. Bei einer Schweißstruktursimulation (vgl. Abschnitt 1.2.2.2) kommen hierfür in der Regel sogenannte Wärmequellenmodelle zum Einsatz. Diese beschreiben den räumlichen und zeitlichen Verlauf der Einbringung von Wärme in das untersuchte Bauteil. Da Wärmequellenmodelle in einer Schweißstruktursimulation nicht die realen physikalischen Phänomene nachbilden, ist eine entsprechende Kalibrierung notwendig. Unter Kalibrierung ist hierbei die Einstellung der zugehörigen Modellparameter gemeint, um realitätsgetreue Ergebnisse hinsichtlich der Wärmeeinbringung bzw. des berechneten Temperaturfelds zu erzielen (vgl. Abschnitt 1.2.2.2). Für eine derartige Kalibrierung stehen grundsätzlich mehrere Möglichkeiten zur Verfügung. Meist hat sich hierbei ein iteratives Vorgehen etabliert, also die iterative Anpassung der Modellparameter, bis ein zufriedenstellendes Ergebnis erreicht wird (vgl. Abschnitt 1.2.2.4). Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation, die eine direkte Verknüpfung der Prozessparameter und der Wärmequellenparameter durch die Nutzung von Basisdaten sowie durch den Einsatz von Interpolationsansätzen oder Künstlichen Neuronalen Netzen ermöglicht. In Abbildung 1.11 ist die Zielsetzung, das heißt das methodische Vorgehen, zu sehen.

Diese Methode stellt einen wesentlichen Baustein in einer Schweißstruktursimulation (vgl. Abschnitt 1.2.2.3) dar und soll zur Förderung der industriellen Anwendung der Schweißsimulation beitragen. Insbesondere soll in dieser Arbeit die prinzipielle Funktionsfähigkeit des gewählten methodischen Vorgehens aufgezeigt werden.

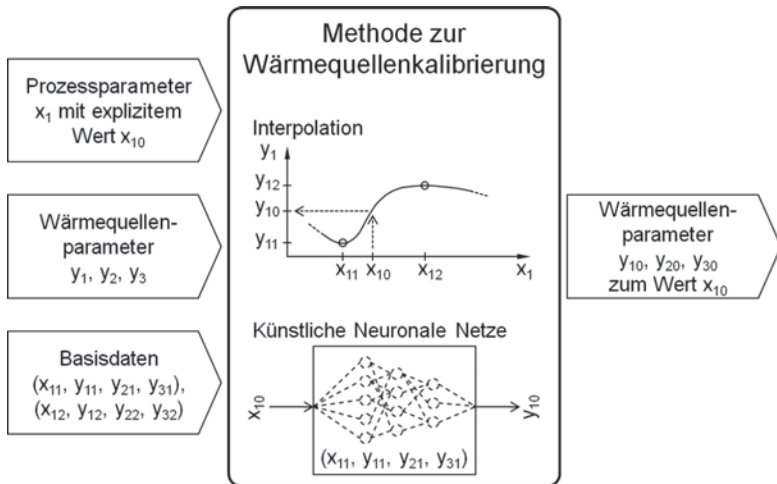


Abbildung 1.11: Zielsetzung der vorliegenden Arbeit (methodisches Vorgehen in der Wärmequellenkalibrierung)

1.4 Vorgehensweise

In diesem ersten Kapitel wurde zunächst die Ausgangssituation für diese Arbeit geschildert. Anschließend wurden im Abschnitt zum Stand der Technik die für diese Dissertation relevanten Arbeiten und Grundlagen aufbereitet. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit einer Erläuterung der Motivation und der Zielsetzung sowie der Beschreibung der Vorgehensweise. Das zweite Kapitel widmet sich den Eingangsdaten einer Schweißstruktursimulation. Im ersten Abschnitt wird dazu eine Übersicht gegeben, wobei die gesamten Eingangsdaten in fünf Gruppen unterteilt werden. Diese Gruppen werden dann entsprechend in den folgenden fünf Abschnitten detailliert betrachtet. Zum Ende des Kapitels wird noch der Aspekt beleuchtet, dass eine Schweißoperation in den meisten Fällen Teil einer Prozesskette ist. Dabei wird dann im Besonderen darauf eingegangen, was im Rahmen einer Schweißstruktursimulation bei der Einbettung in eine virtuelle Prozesskette zu beachten ist. Abbildung 1.12 zeigt eine Übersicht der einzelnen Kapitel dieser Arbeit.

Die Vorstellung des in der Zielsetzung angesprochenen methodischen Vorgehens bildet den Inhalt des dritten Kapitels. Das methodische Vorge-

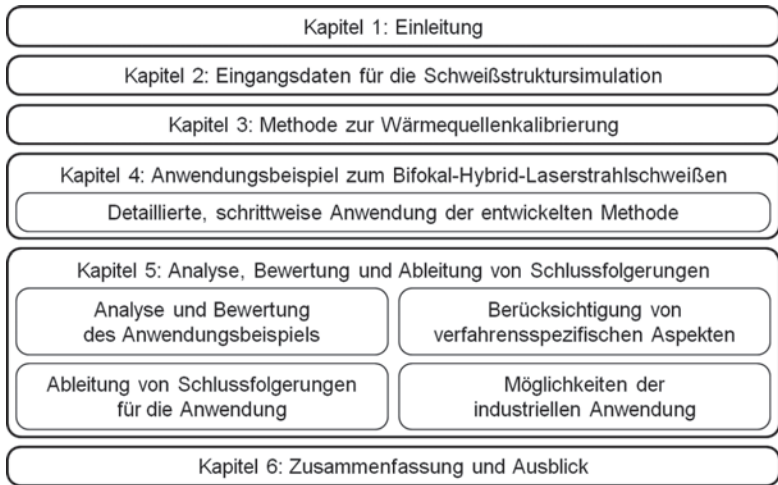


Abbildung 1.12: Aufbau der Arbeit

hen, als Kernthema dieser Arbeit, wird dabei in allgemeiner Weise, also ohne Bezug zu einem konkreten Anwendungsfall, detailliert erläutert. Im ersten Abschnitt wird zunächst auf die Entwicklung des methodischen Vorgehens eingegangen. Anschließend werden in den folgenden Abschnitten die einzelnen Schritte der Methode vorgestellt. Abschließend wird das Gesamtverfahren noch zusammengefasst. Im vierten Kapitel wird die Anwendung der Methode anhand eines Beispiels zum Bifokal-Hybrid-Laserstrahlschweißen betrachtet. Das methodische Vorgehen wird dabei Schritt für Schritt umgesetzt und dokumentiert.

Das fünfte Kapitel widmet sich zunächst der Analyse und Bewertung der Ergebnisse des Beispiels zum Bifokal-Hybrid-Laserstrahlschweißen. Dabei wird insbesondere die Güte der erzielten Ergebnisse betrachtet. Im zweiten Abschnitt des Kapitels wird die Übertragung des methodischen Vorgehens auf weitere Schweißverfahren beschrieben, wobei als Schwerpunkt die Berücksichtigung von verfahrensspezifischen Aspekten diskutiert wird. Zum besseren Verständnis wird dabei für die Erläuterungen ein Beispiel zum Rührreißschweißen herangezogen. Der dritte Abschnitt des Kapitels legt Schlussfolgerungen für die Anwendung, bezogen auf das entwickelte methodische Vorgehen, dar. Der letzte Abschnitt zeigt dann noch Möglichkeiten der industriellen Anwendung auf, wobei

1 Einleitung

sowohl bestehende Ansätze als auch mögliche weitere Schritte beleuchtet werden. Das sechste und letzte Kapitel fasst zunächst die gesamte Arbeit zusammen. Anschließend wird ein Ausblick auf mögliche weitere Forschungsansätze gegeben.

Seminarberichte IWB

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
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, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 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 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management**
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar**
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- 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 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung 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 - Flexibel 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 Mikrobautteilen**
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 - Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen
161 Seiten - ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik - Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten
ISBN 3-89675-071-2 - vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb - Erfahrungen - Werkzeuge - Visionen
ISBN 3-89675-072-0 - vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion - Erwartungen - Erfahrungen - Entwicklungen
179 Seiten - ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik
133 Seiten - ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung - Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle
95 Seiten - ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis - Erfahrungen, Best Practices, Visionen
153 Seiten - ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik - Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen
155 Seiten - ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement
267 Seiten - ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing - Fertigungsverfahren für alle Ansprüche
154 Seiten - ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing - Heutige Trends - Zukünftige Anwendungsfelder
172 Seiten - ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement
100 Seiten - ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik - Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen
160 Seiten - ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?
104 Seiten - ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforschung - Innovation im Werkzeug- und Formenbau
375 Seiten - ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing - Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement - Schlank im Mittelstand
102 Seiten - ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik - Vorsprung durch Simulation
134 Seiten - ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion - Wertschöpfung effizient gestalten
122 Seiten - ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik - Durch Innovation schnell und flexibel am Markt
100 Seiten - ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion - Die Zukunft der Automatisierungstechnik
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing - Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik - Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben
136 Seiten - ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwB Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen
245 Seiten - ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik - Herausforderung der automatisierten Montage!
111 Seiten - ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld - Seminar »Risiko und Chance«
151 Seiten - ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 - Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-097-6

- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlenschmelzen
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! Herausforderungen und Lösungen für die Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

Forschungsberichte IWB

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

Band 1–121, herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, sind im Springer Verlag,
Berlin, Heidelberg erschienen

Forschungsberichte IWB ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
183 Seiten · ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernd Goldstein*: Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 *Helmut E. Mößner*: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
164 Seiten · ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 *Ralf-Gunter Gräser*: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
167 Seiten · ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 *Hans-Jürgen Trossin*: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 *Doris Kugelmann*: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
168 Seiten · ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 *Ralf Diesch*: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 *Werner E. Lulay*: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
190 Seiten · ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 *Otto Murr*: Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
178 Seiten · ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 *Michael Macht*: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 *Bruno H. Mehler*: Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden
152 Seiten · ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Heitmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle
146 Seiten · ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 *Can Abay*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
159 Seiten · ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 *Stefan Brandner*: Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
172 Seiten · ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 *Arnd G. Hirschberg*: Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
165 Seiten · ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 *Alexandra Reek*: Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
193 Seiten · ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabbah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
148 Seiten · ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schiffenbacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
187 Seiten · ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprenzel*: Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
144 Seiten · ISBN 978-3-89675-757-9

- 142 **Andreas Gallasch:** Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 **Ralf Cuiper:** Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 **Christian Schneider:** Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-789-0
- 145 **Christian Jonas:** Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 **Ulrich Willnecker:** Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 **Christof Lehmer:** Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 **Frank Rick:** Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 **Michael Höhn:** Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0
- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0023-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilerbereitstellung
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudorfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Fährer:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppner:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weissenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Roggeder:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehverfahren für hochfeste Schraubverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräzenter Montagesysteme
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitingner:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieverling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Jochim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierloh:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9

- 185 **Tim Angerer:** Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgssysteme
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patran:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3
- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlsschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schlip:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eirener:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griech:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraßer:** Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 **Klaus Schlickentrieder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Möller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrenbewegungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansoerg:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Wünsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oerth:** Strukturmekanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Lucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mörtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbigen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkopplenden Handschuhen
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlinterns
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4

- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 **Ulrich Munzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Sharif Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilezuführung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schlip:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transientscher Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sharif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Radd:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Ruhstorfer:** Rührreibschweißen von Rohren
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Stählen
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorförmlingen
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5

- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reihschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Moutchiho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6
- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen
142 Seiten - ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 **Stefan Rainer Johann Braunreuther:** Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4348-6
- 284 **Johannes Pohl:** Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4358-5
- 285 **Mathey Wiesbeck:** Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4369-1
- 286 **Sonja Huber:** In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4370-7
- 287 **Robert Wiedenmann:** Prozessmodell und Systemtechnik für das lasterunterstützte Fräsen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4384-4
- 288 **Thomas Irenhauser:** Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4404-9
- 289 **Jens Hatwig:** Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4405-6
- 290 **Matthias Baur:** Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spanenden Werkzeugmaschinen
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-4408-7
- 291 **Alexander Schober:** Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-4415-5