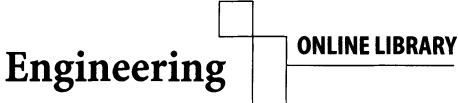


Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH



<http://www.springer.de/engine-de/>

B. Buchmayr

Werkstoff- und Produktionstechnik mit Mathcad

Modellierung und Simulation
in Anwendungsbeispielen

Mit 290 Abbildungen



Springer

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Bruno Buchmayr
TU Graz (u. Montanuniversität Leoben)
Institut für Werkstoffkunde
Schweißtechnik und spanlose Formgebungsverfahren
Kopernikusgasse 24/1
A - 8010 Graz
Österreich
E-mail: buchmayr@weld.tu-graz.ac.at

Additional material to this book can be downloaded from <http://extras.springer.com>

ISBN 978-3-540-43014-8 ISBN 978-3-642-55940-2 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-642-55940-2

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Buchmayr, Bruno:

Werkstoff- und Produktionstechnik mit Mathcad : Modellierung und Simulation in Anwendungsbeispielen /
Bruno Buchmayr. - Berlin ; Heidelberg ; New York ; Barcelona ; Hongkong ; London ; Mailand ; Paris ; Tokio :
Springer, 2002

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

<http://www.springer.de>

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2002
Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2002

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Einbandgestaltung: medio Technologies AG, Berlin

Satz: Daten vom Autor

Gedruckt auf säurefreiem Papier SPIN: 10859485 7/3020/M – 5 4 3 2 1 0

Geleitwort

Der Werkstoffwissenschaft verdanke ich viele schöne Stunden: Bei einem Problem, über das man lange gegrübelt hat, fügen sich plötzlich alle Teile zusammen; „ein Licht geht auf“; „genau so muss es sein!“ – Und dann sofort der Prüfgedanke: Wenn das so ist, dann müsste doch eine Änderung den und den Effekt bringen – und der kleine Triumph, wenn sich das bewahrheitet, und der große, wenn es auch in der Fabrik klappt!

Zu erkennen, wie die Natur funktioniert (und mit ihr die Technik); wie wir sie durch unser Verständnis lenken können – und solche Erkenntnis weitergeben zu dürfen an Studenten, um sich dann mit ihnen zu freuen, wenn bei ihnen „das Licht aufgeht“ ... das gehört zu den schönsten Augenblicken im Leben eines Technikers, eines Forschers, eines Lehrers.

Warum sind solche Augenblicke so selten, vor allem während des Studiums? Unser traditionelles Studium vermittelt *Wissen*, aber zur Problemlösung braucht man *Können*. Können entsteht aus Wissen durch Training: wiederholte Übung, die uns ganze Denkabläufe zum Bild werden lässt, so dass wir dann imstande sind, verschiedene Denkmoleküle frei miteinander zu verbinden, sie aufeinanderzusetzen, bis wir die Ebene der Kreativität erreichen.

In der Werkstoffforschung hat sich jüngstens neben dem Experiment und der Theorie das Computer-Modellieren als eine neue Methode etabliert. Um einen Vorgang rechnerisch nachzubilden, muss man eine klare Vorstellung von den zugrundeliegenden physikalischen Mechanismen und ihren Wechselwirkungen haben. Diese Vorstellungen entstammen der theoretischen Werkstoffwissenschaft. Wenn ein darauf begründetes Computermodell die Wirklichkeit richtig abbildet, dürfen wir sagen, dass wir den Vorgang in seinen wesentlichen Zügen verstanden, ihn auf bekannte Mechanismen und Wirkensweisen zurückgeführt haben. Damit haben wir eine viel sicherere Position, als wenn wir den Prozess bloß durch Erfahrung beherrschen – denn wenn etwas schief geht, verstehen wir jetzt, warum, und können gezielt abhelfen. Wissen ist zu Können geworden, und Können sichert uns die Herrschaft über unsere Fabrikationsprozesse.

So hat das Computer-Modellieren die Wissenschaft von den Werkstoffen und ihrem Verhalten bei der Produktion und im Einsatz durch und durch revolutioniert. Prof. Bruno Buchmayr gehört zu den Pionieren dieser neuen Wissenschaftssparte. Aus seiner reichen Erfahrung in der Erforschung des Werkstoffverhaltens an der Grundlagenfront und in der Lösung praktischer Betriebs- und Produktionsprobleme hat er jetzt ein Studienmittel völlig neuer Art geformt: Es ist ein knappes Lehrbuch, begleitet von einem umfangreichen Programmsystem, das dem Leser an jedem Punkt erlaubt, mit dem Gelernten noch während des Lernens am Computer zu experimentieren. Was passiert, wenn ich den Walzprozess bei höherer Temperatur beginne? Wenn ich schneller kühle, stärker verforme? Wenn ich den Gehalt an Mangan senke und Chrom zusetze? Dieses Experimentieren am Computer erzeugt genau das Können, das das Wissen erst praktisch nutzbar macht.

Das Werk ist keine Sammlung von Computer-Rezepten. Überall stellt es zuerst das Verständnis der werkstoffwissenschaftlichen Grundlagen her (auch darin schon unterstützt von Computer-Demonstrationen). Der Leser wird ermutigt, die Gleichungen, die den Prozess beschreiben, selber auszudenken oder für andere Prozessvarianten weiterzuentwickeln. So führt das Lernen unmittelbar hinüber in die Arbeitsweise, die der Ingenieur im Betrieb oder der Forscher im Labor verwendet. Wer sich auf diese Weise – durch Nachdenken und dann per Mausklick – ein Wissensgebiet angeeignet hat, ist optimal vorbereitet, sein Können in der Praxis einzusetzen.

Lehrbücher mit beigelegten Beispiel-Disketten gibt es schon länger. Aber ich kenne keines, das in so umfassender Weise ein großes Lehrgebiet von den Verständnisgrundlagen bis zu allen denkbaren

praktischen Anwendungen entwickelt, um den Studenten dann als ausgewachsenen Könner, wohlversehen mit allem Berufswerkzeug, zu entlassen.

Möge das Werk viele Leser und Anwender finden – es wird ihnen das Erlebnis vermitteln, wie Wissen sich zu Können wandelt und aus Können Sicherheit wird.

Glück auf!

Hellmut Fischmeister

Dr. phil., tekn.dr. h.c. (Stockholm), Dr. tech. e.h. (Graz); ehem. o. Prof. der Metallkunde, Chalmers University of Technology, Montanuniversität Leoben; emeritus Direktor am Max-Planck-Institut für Metallforschung, Hon.-Professor der Metallkunde an der Universität Stuttgart und an der Technischen Universität Graz.

Vorwort

Das theoretische Grundlagenwissen und der Fortschritt in der Hard- und Softwaretechnik machen es möglich, experimentelle Untersuchungen durch Computermodelle zu ersetzen. Aufgrund der Vorteile, die diese Methode aufweist, hat sich die Modellierung in allen Wissensbereichen etabliert. Während ursprünglich die Kenntnis von Programmiersprachen und numerischen Algorithmen Grundvoraussetzung für die Lösung komplexer Anwendungsfälle waren, so ist der Programmieraufwand heute dank Computeralgebrasystemen wie Mathcad u.a. drastisch reduziert. Der Aufwand beschränkt sich auf die Vorgabe der grundlegenden Gleichungen, der Eingabedaten und auf die Festlegung des Lösungsweges bzw. auf die Kopplung mit anderen Modellansätzen. Programme, die etwa 100 Seiten Quellcode in herkömmlichen Programmiersprachen umfassen, können mit Computeralgebrasystemen auf wenigen Seiten dargestellt werden.

Der Einsatz der Computeralgebra bietet insbesondere bei der schnellen Prototypentwicklung wesentliche Vorteile, aber auch in der Ausbildung. Die klare Schreibweise, verbunden mit erklärenden Kommentaren und Diagrammen fokussiert den Blick auf das Wesentliche. Umständliche Statements zur Gestaltung von Benutzeroberflächen entfallen völlig. Der Ingenieur kann sich ganz seiner eigentlichen Aufgabe, nämlich der Analyse, Reduktion auf das Wesentliche, Modellformulierung, Lösung und Verifikation einer realen Problemstellung widmen.

Thematisch orientiert sich das Buch nach den wesentlichen Inhalten der beiden Fachbereiche Werkstoff- und Fertigungstechnik, wobei die Grundlagen und die Berechnungsansätze erläutert und für jedes Kapitel mit Mathcad-Beispielen ergänzt werden. Die dem Buch beiliegende CD enthält über 150 Beispiele, die alle lauffähig und für Parameterstudien sofort einsatzbereit sind. Dem Anwender steht es aber auch frei, die Beispiele zu modifizieren und zu erweitern. Im Text sind die Mathcad-Programme durch einen Balken und eine seitliche Doppellinie gekennzeichnet.

Den Studierenden eröffnet sich mit dieser Darstellung eine neue Art des Lernens und inkludiert auch die Möglichkeit des Experimentierens mit vorbereiteten numerischen Modellen. Es stellt so eine sinnvolle Erweiterung reiner Lehrbuchtexte dar. Die klare, stets nachvollziehbare Behandlung der Problemansätze und Berechnungsschritte stellt ein Bindeglied zwischen den Grunderfordernissen einer quantitativen Werkstofftechnik und den großen, aber dem Benutzer zumeist undurchsichtigen Finite-Elemente-Programmen in diesem Bereich dar.

Der Autor verwendet das intelligente Berechnungsprogramm Mathcad sowohl für die Vorlesungen „Angewandte EDV-Methoden“ und „Mathematische Modellierung werkstoffkundlicher Vorgänge und Verarbeitungstechnologien“ an der TU Graz, sowie „Modellierung werkstoffkundlicher Prozesse“ an der Montanuniversität Leoben, als auch für die Lösung industrieller Probleme.

Das Buch richtet sich daher insbesondere an Lehrer von technischen Lehrgängen, an Dozenten von Fachhochschulen und Universitäten, ebenso wie an technisch-wissenschaftliches Personal im Bereich Werkstoffforschung und Prozessentwicklung. Meine Leser möchte ich herzlich um Kommentare und Anregungen bitten, damit dieses moderne Konzept weiter optimiert werden kann.

Meinen Kollegen am Institut für Werkstofftechnik, Schweißtechnik und Spanlose Formgebungsverfahren der TU Graz möchte ich für ihre Anregungen und Mithilfe bei der Entstehung dieses Buches danken. Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, die meine Arbeit mit viel Geduld und Verständnis unterstützt hat. Der Fachredaktion des Springer-Verlages danke ich für die gute Zusammenarbeit.

Inhalt

1 Einführung in die werkstofftechnische Modellierung	1
1.1 Prinzip der mathematischen Modellierung	1
1.2 Bedeutung der mathematischen Modellierung.....	3
1.3 Einsatz und Ziele metallkundlicher Modellrechnungen.....	5
Weiterführende Literatur.....	6
2 Numerische Algorithmen und Computeralgebrasysteme	7
2.1 Numerische Algorithmen	8
2.2 Entwicklung der Berechnungswerkzeuge	9
2.3 Computeralgebrasysteme	10
2.4 Einführung in Mathcad	11
2.5 Vergleich konventioneller Programmiersprachen mit Mathcad-Programmen.....	20
2.6 Numerik mit Mathcad	27
Weiterführende Literatur.....	40
3 Metallkundliche Berechnungsansätze	43
3.1 Atomarer Aufbau und Kristallstruktur	44
3.2 Chemische Thermodynamik und Zustandsdiagramme	50
3.3 Diffusion	71
3.4 Umwandlungs- und Ausscheidungskinetik	85
3.5 ZTU-Verhalten niedriglegierter Stähle	99
3.6 Plastizität, Erholung und Rekristallisation	104
3.7 Einschub über Zelluläre Automaten.....	111
3.8 Bildbearbeitung und Quantitative Metallografie.....	117
3.9 Festigkeits- und Zähigkeitsverhalten	121
3.10 Bruchmechanik	130
3.11 Kriechen	149
3.12 Ermüdung.....	163
Weiterführende Literatur.....	174
4 Berechnung instationärer Temperaturfelder	179
4.1 Die Wärmeleitungsgleichung	180
4.2 Analytische Lösungen für interessante Fälle	180
4.3 Lösung der Fourier-Gleichung mittels finiter Differenzen	191
4.4 Finite-Elemente-Berechnung von Temperaturfeldern.....	197
4.5 Thermophysikalische Werkstoffkennwerte.....	200
4.6 Experimentelle Verifikation.....	208
Weiterführende Literatur.....	211
5 Schweißtechnische Berechnungen	213
5.1 Aspekte der Schweißbarkeit.....	214
5.2 Verfahrensspezifische Gesichtspunkte.....	214
5.3 Der thermische Schweißzyklus	222
5.4 Beurteilung der Schweißbeignung	228

5.5 Mikrostrukturelle Vorgänge in der WEZ	232
5.6 Mechanische Eigenschaften von Schweißverbindungen	235
5.7 Komplexe, gekoppelte Modelle in der Schweißtechnik.....	237
Weiterführende Literatur.....	246
6 Anwendungen im Bereich der Umformtechnik.....	247
6.1 Übersicht über die Fertigungsverfahren und Kenngrößen	248
6.2 Mathematische Beschreibung von Fließkurven	251
6.3 Strangpressen	254
6.4 Fließpressen	256
6.5 Flachwalzen.....	258
6.6 Thermomechanische Umformung beim Warmbandwalzen	265
6.7 Drahtziehen	273
6.8 Tiefziehen.....	277
6.9 FE-Simulation von Umformprozessen	280
Weiterführende Literatur.....	292
7 Anwendungen im Bereich Gießen und Erstarren	295
7.1 Einführung	296
7.2 Keimbildung.....	297
7.3 Thermische Analyse.....	298
7.4 Seigerungsphänomene.....	298
7.5 Konstitutionelle Unterkühlung und Gefügemorphologie.....	301
7.6 Wärmeübergang bei der Erstarrung	305
7.7 Übersicht über kommerzielle Erstarrungsprogramme.....	307
Weiterführende Literatur.....	311
8 Anwendungen im Bereich Bauteilauslegung und Werkstoffauswahl.....	313
8.1 Festigkeitsberechnung von Bauteilen	314
8.2 Zweidimensionale, elastische FE-Rechnung.....	319
8.3 Messung und Auswertung von Bauteilbeanspruchungen	333
8.4 Systematische Werkstoffauswahl.....	336
8.5 Werkstoffdatenbanken	344
Weiterführende Literatur.....	349
9 Anwendungen im Bereich der Prozessoptimierung	351
9.1 Methoden zur Prozess- und Qualitätsplanung.....	352
9.2 Methoden zur Auswertung von Prozessdaten	359
9.3 Statistische Prozesskontrolle	360
9.4 Multivariate Prozessanalyse mittels Regressionsrechnung.....	364
9.5 Neuronale Netzwerke.....	366
9.6 Genetische Algorithmen.....	371
9.7 Mechanismenbasierte Modelle für komplexe Prozesse	374
Weiterführende Literatur.....	385
Anhang	
Übersicht und Hinweise zur beiliegenden CD	387
Mathcad Bedienungsanleitung und Funktionsübersicht	393
Internet-Adressen zu den Fachbereichen	395
Sachverzeichnis	399