

Reihe 18

Mechanik/  
Bruchmechanik

Nr. 347

Dipl.-Ing. Dirk Schellenberg,  
Chemnitz

## Identifikation und Optimierung im Kontext technischer Anwendungen



Berichte aus der  
Professur Festkörpermechanik  
Technische Universität Chemnitz



# Identifikation und Optimierung im Kontext technischer Anwendungen

Von der Fakultät für Maschinenbau der  
Technischen Universität Chemnitz  
genehmigte

## Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Dirk Schellenberg  
geboren am 29.06.1978 in Freiberg(Sachs)  
eingereicht am 22.06.2015

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. habil. Jörn Ihlemann

Prof. Dr. rer. nat. Roland Herzog

Tag der Verteidigung: 6. November 2015



# Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 18

Mechanik/  
Bruchmechanik

Dipl.-Ing. Dirk Schellenberg,  
Chemnitz

Nr. 347

## Identifikation und Optimierung im Kontext technischer Anwendungen



Berichte aus der  
Professur Festkörpermechanik  
Technische Universität Chemnitz

Schellenberg, Dirk

## **Identifikation und Optimierung im Kontext technischer Anwendungen**

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 18 Nr. 347. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

166 Seiten, 88 Bilder, 21 Tabellen.

ISBN 978-3-18-334718-6, ISSN 0178-9457,

€ 62,00/VDI-Mitgliederpreis € 55,80.

**Für die Dokumentation:** Stoffgesetzanpassung – Parameteridentifikation – Formoptimierung – Formidentifikation – Gummiwerkstoffe – Nichtlineare FEM – Materialcharakterisierung – Numerische Integration

Die vorliegende Arbeit richtet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der Parameteridentifikation und Formoptimierung sowie der Materialcharakterisierung. Vor dem Hintergrund der Entwicklung eines hauseigenen Optimierungsprogrammes werden die darin implementierten Verfahren in kompakter Form dargestellt und bewertet. Diese umfassen ein robustes Levenberg-Marquardt-Fletcher-Verfahren, Line-Search- und Trust-Region-Verfahren, Algorithmen zur Approximation der Hesse-Matrix sowie Verfahren zur Startparametervariation. Zudem werden Schnittstellen zur Einbindung von ABAQUS, ANSYS und MSC.MARC vorgestellt. Der zweite Teil der Arbeit bezieht sich auf die Weiterentwicklung bestehender Verfahren zur Stoffgesetzanpassung bei Gummiwerkstoffen. Hierbei wird das Konzept der Anpassung anhand bauteilnaher Probekörper vorgestellt. Am Beispiel einer Fahrwerksbuchse wird das Konzept intensiv beleuchtet, die Eignung zur Anwendung im industriellen Umfeld dargelegt und es werden die Vorteile gegenüber herkömmlichen Verfahren nachgewiesen.

Die Arbeit ist unter <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:chl-qucosa-216126> abrufbar.

### **Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek**

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

### **Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek**

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9457

ISBN 978-3-18-334718-6

# Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Festkörpermechanik des Instituts für Mechanik und Thermodynamik der Technischen Universität Chemnitz sowie am Deutschen Institut für Kautschuktechnologie e.V. in Hannover. Für die während dieser Zeit erhaltene Unterstützung möchte ich mich an dieser Stelle gerne bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater und Erstgutachter Herrn Prof. Jörn Ihlemann, dessen Ideen die Grundlage eines maßgeblichen Anteils der Arbeit darstellen und ohne dessen vielfältige Unterstützung die Fertigstellung der Dissertation nicht möglich gewesen wäre. Die Vielzahl fachlicher Gespräche und Diskussionen habe ich sehr genossen und eröffnete mir oft neue Blickwinkel und Perspektiven. Für das entgegengebrachte Vertrauen und den uneingeschränkten Rückhalt, insbesondere in schwierigen Situationen, möchte ich mich herzlich bedanken.

Ebenso möchte ich Herrn Prof. Reiner Kreißig, dem vormaligen Inhaber der Professur Festkörpermechanik, ausdrücklich für die Möglichkeit zur wissenschaftlichen Arbeit auf einem außerordentlich interessanten Gebiet sowie die aktive Förderung während dieser Zeit danken. Es ist vor allem seiner intensiven Unterstützung während der Übergabe der Professur an Herrn Prof. Ihlemann geschuldet, dass ich meine Arbeit fortsetzen und die Dissertation erfolgreich abschließen konnte. Als Mentor hat er mich sowohl fachlich als auch persönlich inspiriert und mich auch nach seinem Ausscheiden aus dem universitären Betrieb begleitet. Ein großer Dank gebührt meinen Kollegen und Studenten für die intensive Zusammenarbeit, welche mir nicht nur fachlich, sondern auch persönlich sehr viel bedeutet hat. Durch die interessanten fachlichen Gespräche konnte ich nicht nur Einblick in andere Fachgebiete gewinnen, sondern bekam auch wesentliche Impulse und Unterstützung für meine eigene wissenschaftliche Arbeit. Besonders hervorheben möchte ich hierbei Hans Wulf, welcher eine unschätzbare Unterstützung bei der Weiterentwicklung von *SPC-Opt* und auch abseits fachlicher Themen jederzeit ein spannender Gesprächspartner war. Zudem möchte ich mich bei Niklas Nostitz für seine Hilfe bei der Verbesserung der Optimierungsverfahren bedanken und wünsche ihm als meinem Projektnachfolger alles Gute.

Herrn Prof. Roland Herzog danke ich für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie die damit verbundenen Mühen und sein Interesse an meiner Arbeit. Zudem möchte ich mich bei Herrn Prof. Dirk Landgrebe für die freundliche Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken. Schließlich möchte ich mich ganz herzlich bei meiner Frau Julia für die ihre langjährige Unterstützung, ihre Geduld und ihre Motivation zur Fertigstellung der Dissertation bedanken. Für die Zeit, die ich abends oder am Wochenende im Büro verbracht habe und ich nicht mit ihr oder meinen Kindern Maja und Leo verbringen konnte, kann ich mich nur entschuldigen.

*Dirk Schellenberg*





# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen	VII
Kurzfassung	XI
Abstract	XII
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Das Programm <i>SPC-Opt</i></b>	<b>4</b>
2.1 Anforderungsprofil und Funktionalität von <i>SPC-Opt</i>	5
2.2 Programmstruktur	6
2.3 Optimierer	8
2.4 FEM-Schnittstellen	10
2.5 Parametrisierung der Modellgeometrie	14
2.6 Parallelisierung	19
<b>3 Parameteridentifikation</b>	<b>22</b>
3.1 Optimierungsaufgabe	22
3.2 Gewichtete Fehlerquadratkennzahl (GFK)	24
3.3 Gradientenverfahren (Verfahren des steilsten Abstiegs)	25
3.4 Newton-Verfahren	25
3.5 Gauss-Newton-Verfahren	26
3.6 Levenberg-Marquardt-Verfahren	26
3.6.1 Levenberg-Marquardt als Trust-Region-Verfahren	27
3.6.2 Modifikation nach Fletcher	28
3.7 Berücksichtigung von Restriktionen	31
3.8 Abbruchbedingungen	35
3.9 Parameterschätzung	37
3.10 Formidentifikation	40
<b>4 Formoptimierung</b>	<b>43</b>
4.1 Trust-Region-Verfahren	43
4.2 Quasi-Newton-Verfahren	46
4.3 Bewertung der Trust-Region-Verfahren	48
4.4 Beispiel Lochscheibe	49

<b>5 Startparametervariation</b>	<b>52</b>
5.1 Methoden zur Erzeugung von Startvektoren . . . . .	52
5.2 Optimierung der Startdesigns . . . . .	55
5.2.1 Designkriterien . . . . .	56
5.2.2 Stochastische Optimierungsverfahren . . . . .	60
<b>6 Identifikation von Materialparametern anhand bauteilnaher Probekörper</b>	<b>63</b>
6.1 Problemstellung . . . . .	63
6.2 Bauteilgeometrie und Belastungen . . . . .	64
6.3 Gummimischung . . . . .	68
6.4 Stoffgesetze . . . . .	69
6.4.1 MORPH in repräsentativen Richtungen . . . . .	73
6.4.2 Verwendung von Stabilisierungselementen . . . . .	75
6.5 Bauteilsimulation . . . . .	77
6.6 Identifikation mit Standardprobekörpern . . . . .	82
6.6.1 Auswahl der Probekörpergeometrien . . . . .	83
6.6.2 Nullpunktverschiebung von Messdaten . . . . .	88
6.6.3 Kriterien zum Vergleich der Lastfälle . . . . .	92
6.6.4 Durchführung der Identifikation . . . . .	99
6.7 Identifikation anhand bauteilnaher Probekörper . . . . .	105
6.7.1 Der bauteilnahe Probekörper . . . . .	108
6.7.2 Simulation der Lastfälle am bauteilnahen Probekörper . . . . .	110
6.7.3 Inhomogen-Parameteridentifikation . . . . .	116
6.8 Validierung am Bauteil . . . . .	122
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>125</b>
<b>Anhang</b>	<b>129</b>
A.1 Software und Programmpakete . . . . .	129
A.2 Visualisierung von FEM-Ergebnissen . . . . .	133
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>135</b>

# Formelzeichen, Symbole und Abkürzungen

## Abkürzungen

CHiC	Chemnitzer <b>H</b> igh <b>P</b> erformance <b>C</b> luster
EPDM	<b>E</b> thylene <b>P</b> robylene <b>D</b> iene <b>M</b> onomer (Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk)
FEM	<b>F</b> inite- <b>E</b> lemente- <b>M</b> ethode
FQ	<b>F</b> ortschritts <b>q</b> uotient
FQM	<b>F</b> ehler <b>q</b> uadrat <b>m</b> inimierung
GFK	<b>G</b> ewichtete <b>F</b> ehlerquadrat- <b>K</b> ennzahl
$\overline{\text{GFK}}$	kombinierte <b>G</b> ewichtete <b>F</b> ehlerquadrat- <b>K</b> ennzahl
HPC	<b>H</b> igh <b>P</b> erformance <b>C</b> luster
LHD	<b>L</b> atin <b>H</b> ypercube <b>D</b> esign
MPI	<b>M</b> essage <b>P</b> assing <b>I</b> nterface
MORPH	<b>M</b> odel of <b>R</b> ubber <b>P</b> henomenology
MPP	<b>m</b> assively <b>p</b> arallel <b>p</b> rocessor computer
NoCs	<b>N</b> etworks <b>o</b> f independent <b>C</b> omputers
NR	<b>N</b> atural <b>R</b> ubber (Naturkautschuk)
PE	<b>P</b> rocessing <b>E</b> lement
RD	<b>R</b> andom <b>D</b> esign
SBR	<b>S</b> tyrene <b>B</b> utadiene <b>R</b> ubber (Styrol-Butadien-Kautschuk)
SLHD	<b>S</b> ymmetric <b>L</b> atin <b>H</b> ypercube <b>D</b> esign

## Skalare

Symbol	Beschreibung	
$a_j$	Bildungsvorschrift einer Abbruchbedingung	(Gl. 3.37)
$\alpha_t$	Wärmeausdehnungskoeffizient	(Kap. 6.7.2)
$\overset{G}{C}_T$	TRESCA-Invariante von $\underline{\underline{C}}$	(Gl. 6.6)
$C_T^S$	Schleppzeiger im MORPH-Stoffgesetz	(Gl. 6.6)
$\gamma_1, \gamma_2$	Streckenverhältnisse zur Positionsbestimmung von FEM-Knoten bei Netzaktualisierung	(Gl. 2.3)
$d_{\eta 1}, d_{\eta 2}$	Abstände eines FEM-Knotens zu den Bezugskurven in $\eta$ -Richtung	(Gl. 2.3)
$d_{\xi 1}, d_{\xi 2}$	Abstände eines FEM-Knotens zu den Bezugskurven in $\xi$ -Richtung	(Gl. 2.3)

$\Delta$	Trust-Region-Radius	(Gl. 4.2)
$E^A$	Teilabbruchbedingung	(Gl. 3.37)
$\overline{E}^A$	kombiniertes Abbruchkriterium	(Gl. 3.39)
$\varepsilon$	technische Dehnung	(Kap. 6.6.1)
$\varepsilon^A$	Abbruchschranke	(Gl. 3.36)
$\overline{\varepsilon}^A$	definierte Abbruchschranke für Optimierung	(Kap. 3.8)
$\varepsilon_{eq}$	Vergleichsdehnung	(Kap. 6.5)
$\varepsilon_{eq}^p$	plastische Vergleichsdehnung	(Kap. 6.5)
$\Phi$	Zielfunktion	(Gl. 3.4)
$h_i$	HENKY-Dehnungen	(Gl. 6.15)
$J_3$	Volumenänderung	(Gl. 6.12)
$\frac{G}{L_T}$	TRESCA-Invariante von $\underline{\underline{L}}$	(Gl. 6.8)
$K$	Kompressionsmodul	(Kap. 6.7.2)
$\kappa, \gamma$	Schernaß	(Gl. 6.6.2)
$l, l_0$	aktuelle Länge, Ausgangslänge	(Gl. 6.17)
$\lambda_i$	Hauptstreckungen	(Gl. 6.4)
$\overline{\lambda}$	Umformgrad	(Gl. 6.39)
$\lambda^L$	Wichtungsfaktor im Levenberg-Marquardt-Algorithmus	(Gl. 3.22)
$\lambda_C^L$	Cut-Off-Parameter	(Gl. 3.27)
$m$	Quadratisches Ersatzmodell in Form einer Taylor-Reihe	(Gl. 3.13)
$M$	Modell zur Beschreibung eines Zustandes am Bauteil	(Gl. 2.3)
$\nu^F$	allgemeiner Fletcher-Parameter	(Gl. 3.26)
$p$	Designvariable	(Gl. 2.1)
$q$	Wichtungsfaktor auf Basis von $J_3$	(Gl. 6.12)
$\bar{r}_i$	Residuum zwischen Modell und fehlerbehaftetem Messwert	(Gl. 3.1)
$r_i$	einheitenloses Residuum $\bar{r}_i$ , bei Bedarf skaliert	(Gl. 3.4)
$\rho$	Fortschrittsquotient	(Gl. 3.25)
$\dot{s}$	akkumulierte Verzerrungsgeschwindigkeit	(Gl. 6.41)
$s^2$	Stichprobenvarianz	(Gl. 3.46)
$\sigma$	technische Spannung	(Kap. 6.6.1)
$t_i$	Beobachtungszeitpunkt	(Gl. 3.1)
$\tau$	Schubspannung	(Kap. 6.6.2)
$\dot{W}$	Energiedichte	(Gl. 6.1)
$w_i$	Wichtungsfaktor der Residuen	(Gl. 3.4)
$w_j$	Wichtungsfaktor der Abbruchbedingungen	(Gl. 3.37)
$\bar{y}_i$	fehlerbehafteter Messwert	(Gl. 3.1)

**Vektoren**

Symbol	Beschreibung	
$d_k$	Korrektur-Vektor in Schritt $k$	(Gl. 3.8)
$d_k^{LM}$	Levenberg-Marquardt-Korrekturschritt	(Gl. 3.12)
$d_k^N$	Newton-Korrekturschritt	(Gl. 3.23)
$\underline{p}$	Parametervektor	(Gl. 3.1)
$\underline{R}_i^B$	Koordinaten eines betrachteten Messpunktes zum Zeitpunkt $t_i$	(Gl. 2.1)
$\underline{R}^0$	Anfangskordinaten der FEM-Knoten	(Gl. 2.1)
$\underline{R}$	Vektor der neu berechneten Koordinaten der FEM-Knoten	(Gl. 2.1)
$\underline{T}$	Formbasisvektor	(Gl. 2.1)
$\underline{x}$	Parametervektor in allgemeiner mathematischer Form	(Gl. 3.5)
$\underline{x}_A$	letzte akzeptierte Lösung	(Gl. 3.40)

**Matrizen und Tensoren**

Symbol	Beschreibung	
$B$	Approximierte Hesse-Matrix	(Gl. 3.15)
$\underline{\underline{C}}$	Rechts-CAUCHY-GREEN-Tensor	(Gl. 6.5)
$\underline{\underline{C}}^G$	Gestaltänderungsanteil von $\underline{\underline{C}}$	(Gl. 6.5)
$D$	Skalierungsmatrix	(Gl. 4.2)
$\underline{\underline{D}}$	Tensor der Formänderungsgeschwindigkeiten	(Gl. 6.39)
$\underline{\underline{F}}$	Deformationsgradient	(Gl. 6.40)
$H, H^{red}$	Hesse-Matrix, reduzierte Hesse-Matrix	(Gl. 3.34)
$I$	Einheitsmatrix	(Gl. 3.19)
$\underline{\underline{J}}, J$	Jakobi-Matrix	(Gl. 3.6)
$K$	Korrelationsmatrix	(Gl. 3.51)
$\underline{\underline{L}}$	Geschwindigkeitsgradient	(Gl. 6.40)
$\underline{\underline{L}}^G$	LAGRANGESches Äquivalent zur ZAREMBA-JAUMANN-Zeitableitung des isochoren Links-CAUCHY-GREEN-Tensor	(Gl. 6.8)
$P$	Kovarianzmatrix	(Gl. 3.47)
$\Pi$	Permutationsmatrix	(Kap. 5.1)
$\underline{\underline{T}}$	1. Piola-Kirchhoff-Spannungstensor	(Gl. 6.16)
$\underline{\underline{\tilde{T}}}$	2. Piola-Kirchhoff-Spannungstensor	(Gl. 6.5)
$\underline{\underline{\tilde{T}}}^Z, \underline{\underline{\tilde{T}}}^H$	Zusatz- und Hüllspannungen	(Gl. 6.7)
$\underline{\underline{U}}$	Rechter Strecktensor	(Kap. 6.6.3)

Operatoren und sonstige Symbole

Symbol	Beschreibung
$()^T$	Transponierter Tensor
$()^{-1}$	Inverser Tensor
$\nabla$	Nabla-Operator
$d()$	Vollständiges Differential
$\partial()/\partial()$	Partielle Ableitung
$Sp()$	Spur eines Tensors

# Kurzfassung

Es wurde die Optimierungssoftware *SPC-Opt* entwickelt, mit welcher sich Aufgaben aus den Bereichen der Formoptimierung sowie der Material- und Formidentifikation bearbeiten lassen. Zur Lösung von Identifikationsproblemen steht eine robuste Implementierung des Levenberg-Marquardt-Fletcher-Verfahrens zur Verfügung. Ergänzt wird dieses durch Line-Search- und Trust-Region-Verfahren, welche sich besonders für Aufgaben der Formoptimierung eignen. Es wurden effiziente Algorithmen zur Approximation der Hesse-Matrix sowie verschiedene Verfahren zur Startparametervariation integriert. Das Programm verfügt über Schnittstellen zur Nutzung von *ABAQUS*, *ANSYS*, *MSC.MARC*, eigenen FEM-Programmen sowie LUA-Skripten. Für Formoptimierungen können geometrische Konturen durch NURBS approximiert und deren Kontrollpunkte als Formparameter genutzt werden. Die Aktualisierung der FEM-Netze entsprechend der Formparameteränderung erfolgt durch ein analytisches Verfahren. Der zweite Schwerpunkt der Arbeit bezieht sich auf die Weiterentwicklung bestehender Verfahren zur Materialparameteridentifikation im Bereich der Gummwerkstoffe. Hierbei wurde das Konzept der Anpassung anhand bauteilnaher Probekörper entwickelt. Dabei wurde am Beispiel einer Fahrwerksbuchse ein Probekörper entworfen, welcher dem originalen Bauteil zwar ähnlich sieht, jedoch eine deutlich einfachere Geometrie hat. Durch diesen konnte das Verhalten des Bauteils gut approximiert und sichergestellt werden, dass die im Rahmen der Parameteridentifikation durchgeführten FEM-Simulationen sicher konvergieren. Zudem wurden die Nutzerschnittstellen des inelastischen MORPH-Stoffgesetz für *MSC.MARC* und *ABAQUS* weiterentwickelt, sodass diese nunmehr auch im industriellen Umfeld nutzbar sind. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Verwendung bauteilnah identifizierter Parameter zu einer erheblich besseren Abbildung des Materialverhaltens führt als die Verwendung anhand von Standardprobekörpern identifizierter Parameter. Weiterhin zeigte sich, dass vor allem der Einsatz eines Stoffgesetzes mit der Möglichkeit zur Abbildung des charakteristischen Verhaltens von Elastomeren unbedingt erforderlich ist.

## Schlagworte

Stoffgesetzanpassung, Parameteridentifikation, Formoptimierung, Formidentifikation, Gummwerkstoffe, Nichtlineare FEM, Materialcharakterisierung, Numerische Integration

# Abstract

Within the scope of this work the optimization software *SPC-Opt* has been developed to successfully process tasks in the fields of shape optimization and parameter identification. The software includes a robust Levenberg-Marquardt-Fletcher algorithm, several line search and trust region algorithms as well as efficient methods for the approximation of the Hessian matrix. Additionally, procedures for the variation of initial parameters (Design Of Experiments) were implemented. The software includes interfaces to *ABAQUS*, *ANSYS*, *MSC.MARC*, in-house FEM programs and LUA scripts. Within shape optimization problems, geometric shapes are approximated by NURBS and the related control points are employed as design variables. For the update of the FE mesh during the variation of the design variables, a special analytical algorithm is used to preserve the mesh topology.

Another focus is related to the further development of existing material parameter identification procedures for rubber materials. Therefor, the concept of component-oriented specimens was developed. Using the example of a bushing, a specimen was designed, which is similar to the original component but has a much simpler geometry. According to this, the behavior of the original component is approximated and the stability of necessary FE simulations is ensured. Additionally, the utilized Model of Rubber Phenomenology (MORPH) is improved in view of the industrial use.

It is shown that the identification of material parameters using component-oriented specimens leads to a much better approximation of the original component behaviour than using standard specimens. Additionally, it is shown that the use of a material law which can consider characteristic properties of elastomers, is absolutely necessary.

## Keywords

Parameter identification, shape optimization, shape identification, rubber materials, finite element method, material characterization, numerical integration