

## Simulation hyperelastischer Materialien mit Z88 – Kalibrierung hyperelastischer Materialmodelle Florian Hüter, Daniel Singer

# **23. Bayreuther 3D-Konstrukteurstag** Bayreuth, 14.09.2022



**Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD** Prof. Dr.-Ing. Stephan Tremmel





#### Anwendungsbeispiele



Lehrstuhl für
 Konstruktionslehre und CAD
 Prof. Dr.-Ing. Stephan Tremmel

MILLS, N. Polymer foams handbook: engineering and biomechanics applications and design guide. Elsevier, 2007. GASSER, T. C.; OGDEN, R. W.; HOLZAPFEL, G. A. Hyperelastic Modelling of Arterial Layers With Distributed Collagen Fibre Orientations. Journal of the Royal Society Interface, vol. 3, pp. 15–35, 2006.

#### Hyperelastisches Materialverhalten

Elastisches Materialverhalten





Reddy, J. N.: An introduction to continuum mechanics: With applications. Cambridge University Press. New York: 2008.



#### **Hyperelastisches Materialverhalten**



Charakterisierung des elastischen Verhaltens

#### Hyperelastisches Materialverhalten



vulkanisierter Kautschuk (Treloar)

- Charakteristische Merkmale
  - nichtlineare Spannungs-Dehnungs-Kurve
  - große Verformungen typisch
  - rein-elastisches Materialverhalten
    - reversible Verformung
    - eindeutige Spannungs-Dehnungs-Relation  $\sigma = \sigma(\varepsilon)$
  - idealisiert: konservativ/energieerhaltend
  - isotrop oder anisotrop (faserverstärkt)
  - (quasi-)inkompressibel bis stark kompressibel



**Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD** Prof. Dr.-Ing. Stephan Tremmel

TRELOAR, L. R. G. Stress-strain data for vulcanised rubber under various types of deformation. Transactions of the Faraday Society, 1944, 40. Jg., S. 59-70.

#### Hyperelastisches Materialverhalten



#### Charakterisierung des elastischen Verhaltens (2)

#### Typische Materialprüfversuche



Spannungs-Dehnungs-Verhalten

- Das nichtlinear-elastische Materialverhalten ist von der Belastungsmode abhängig
- Charakterisierung des Verhaltens f
  ür unterschiedliche Belastungszust
  ände
- Typische Prüfversuche:
  - Uniaxialer Zugversuch
  - Äquibiaxialer Zugversuch
  - Planarer Zugversuch (engl. pure shear)





TRELOAR, L. R. G. Stress-strain data for vulcanised rubber under various types of deformation. Transactions of the Faraday Society, 1944, 40. Jg., S. 59-70. KIM, Nam-Ho. Introduction to nonlinear finite element analysis. Springer Science & Business Media, 2014.

Hyperelastische Materialmodelle

#### Hyperelastizität

Verzerrungsenergiedichte

 $S = 2 \frac{\partial \Psi}{\partial C}$  $\mathbb{C} = 2 \frac{\partial S}{\partial C}$ 

**Polynomansätze:** 

$$\Psi = \sum_{i,j=1}^{N} A_{ij} \cdot (\bar{I}_1 - 3)^i \cdot (\bar{I}_2 - 3)^j + \frac{K}{2} \cdot (J - 1)^2$$

- **Mooney-Rivlin**, Ordnung N = 1
- **NeoHooke**, Ordnung N = 1, j = 0
- Potenzansätze:
  - **Ogden**, Ordnung  $N = 1 \dots 6$ ,
- **Spline-Interpolation**:
  - Marlow-Modell



- 2. Piola-Kirchhoff-Spannungstensor S
- rechter Green-Verzerrungstensor С
- C Materialtensor
- Ψ Verzerrungsenergiedichte

https://doi.org/10.1016/C2013-0-15493-1, HOLZAPFEL, G. A. Nonlinear solid mechanics. 2000. MILLS, N. Polymer foams handbook. Elsevier, 2007. https://doi.org/10.1039/TF9444000059







6

#### Modellkalibrierung

#### **Curve Fitting**

- Die Modellparameter haben nur bei einfachen Modellen eine physikalische Bedeutung und lassen sich direkt messen
- Meist werden die Modellparameter numerisch durch Curve Fitting ermittelt:
  - Lineare Ausgleichsrechnung (Invarianten-basierte Modelle)
  - Nichtlineare Ausgleichrechnung (Ogden), z. B. Levenberg-Marquardt-Algorithmus.
- Ansatz: Minimierung des Fehlerquadrats

$$F = \sum_{i=1}^{M} \left\{ \sigma_i^{Mess} - \sigma_i^{Modell}(\varepsilon_i^{Mess}) \right\}^2 \to min$$

Spannung /MPa Testdaten planar Yeoh planar technische 2 5 2 3 6 7 technische Dehnung /-Yeoh  $\psi = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_2 - 3)^2 + C_{30}(I_3 - 3)^3$  $C_{10} = 0.18346, C_{20} = -1.38796 \cdot 10^{-3}, C_{30} = 3.80829 \cdot 10^{-5}$ 



KIM, Nam-Ho. Introduction to nonlinear finite element analysis. Springer Science & Business Media, 2014.

STOMMEL, Markus; STOJEK, Marcus; KORTE, Wolfgang. FEM zur Berechnung von Kunststoff-und Elastomerbauteilen. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2018.

Testdaten uniaxial

Yeoh aequibiaxial

Testdaten aeguibiaxial

Yeoh uniaxial

8

Ο

Messdaten: Treloar, L. R. G.: Stress-strain data for vulcanised rubber under various types of deformation.



1



#### Curve Fitting Methoden





#### Kalibrierungstool







Kalibrierungstool: Ablauf und Funktionsweise







#### Kalibrierungstool: Funktionsweise



MATERIAL, MODELS         Noc-Hooke         Monery-Rivin         Yeeh         Arude-Boyce         Ogden         Arude-Boyce         Ogden         TeST DATA         Add Text Data         Evaluate unixial data         Image: Second Se			CFV1			_ 0 ×	
Neo-Hooke	MATERIAL MODELS						
Mooney-Rivin	Neo-Hooke						
Woh	Mooney-Rivlin						
Aruda-Boyce	Yeoh						
Ogden	Arruda-Boyce						
Reduced Polynomial, N=2         IEST DATA         Add Test Data         Evaluate uniaxial data       from         Evaluate uniaxial data       from         Evaluate aequibiaxial data       from         Evaluate planar data       from         Evaluate planar data       from         Evaluate planar data       from         Drucker from:       from         Drucker from:       to:         Silent Mode       from         MOONEY-RIUNN       XCOMP:         Order:       XCOMP:         OGDEN       to:         LEVENBERG-MARQUARDT       TOL:         Max. iterations:       TOL:         Ceate Control File       toL:	Ogden						
TEST DATA         Add Test Data         Evaluate uniaxial data       from:       to:         Evaluate acquibiaxial data       from:       to:         General PARAMETERS       to:       form:         Drucker from:       to:       form:         MOONEY-RILVN       form:       form:         Order:       XCOMP:       form:         OGDEN       form:       form:         LEVENBERG-MARQUARDT       form:       form:         Max. iterations:       TOL:       form:         Create Control File       form:       form:	Reduced Polynomial, N=2						
Add Test Data         Evaluate uniaxial data       from       to:         Evaluate aequibiaxial data       from       to:         GENERAL PARAMETERS       from       to:         Drucker from:       to:       from         Silent Mode       from       from         GODEN       to:       from         Order:       XCOMP:       from         Order:       XCOMP:       from         MORDNEY-RILVIN       from       from         Compensation:       XCOMP:       from         Order:       from       from         LEVENBERG-MARQUARDT       from       from         Max.iterations:       ToL:       from         Create Control File       from       from	TEST DATA						
Evaluate uniaxial datafromto:Evaluate aequibiaxial datafromto:Evaluate aequibiaxial datafromto:Evaluate planar datafromto:GENERAL PARAMETERSPoisson:fromDrucker from:fromImage: Silent Mode:fromSilent Mode:fromOrder:KCOMP:Order:KCOMP:Order:fromLEVENBERG-MARQUARDTCentrol FilefromCentrol Filefrom	Add Test Data						
Evaluate aequibiaxial data from: to:   Evaluate planar data from: to:   GENERAL PARAMETERS   Poisson: from:   Drucker from: from:   Silent Mode: from:   Silent Mode: from:   Gompensation: XCOMP:   Order: XCOMP:   Order: from:   LEVENBERG-MARQUARDT   Max. iterations: TOL:   Create Control File	Evaluate uniaxial data	from		to:			
Evaluate planar data from: to:   GENERAL PARAMETERS   Poisson:   Drucker from:   Compensation:   OGDEN   Order:   Order:   LEVENBERG-MARQUARDT   LEVENBERG-MARQUARDT   Ceate Control File	Evaluate aequibiaxial data	from		to:			
GENERAL PARAMETERS         Poisson:         Drucker from:         Image: Silent Mode         Silent Mode         Gompensation:         Compensation:         OGDEN         Order:         Image: Silent Mode         LEVENBERG-MARQUARDT         Max.iterations:         Image: Total         Total         Total         Total         Total	Evaluate planar data	from:		to:			
Poisson:	GENERAL PARAMETERS						
Drucker from: to:   Silent Mode: .   MOO NEY-RILVIN .   Compensation: XCOMP:   OGDEN .   Order: .   Order: .   LEVENBERG-MARQUARDT .   Max. iterations: .   Cerate Control File .	Poisson:						
Silent Mode:   MOO NEY-RILVIN   Compensation:   Compensation:   OGDEN   Order:   Order:   LEVENBERG-MARQUARDT   Levenberg-marquart   Max. iterations:   TOL:	Drucker from:	to:					
MOONEY-RILVIN Compensation:  COMP: COMP: COGDEN Order: LEVENBERG-MARQUARDT Max.iterations: Create Control File	Silent Mode:						
Compensation: XCOMP:   OGDEN	MOO NEY-RILVIN						
OGDEN Order: LEVENBERG-MARQUARDT Max.iterations: Create Control File	Compensation:	XCOMP:					
Order:       LEVENBERG-MARQUARDT       Max. iterations:       TOL:	OGDEN						
LEVENBERG-MARQUARDT Max. iterations: TOL: Create Control File	Order:						
Max. iterations:     TOL:       Create Control File	LEVENBERG-MARQUARDT						
Create Control File	Max. iterations:	TOL:					
	Create Control File						

A C D

**Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD** Prof. Dr.-Ing. Stephan Tremmel  Einfaches Anwählen der gewünschten Materialmodelle

Vollständiger	Reduzierter	Materialistische
Polynomansatz	Polynomansatz	Ansätze
• Mooney-Rivlin, N=2	<ul> <li>Neo-Hooke, N=1</li> <li>N=2</li> <li>Yeoh, N=3</li> </ul>	<ul><li>Arruda-Boyce</li><li>Ogden, N=16</li></ul>

- Eingabe der Spannungs-Dehnungs-Testdaten
- Steuerung der Rechnung und Verfeinerung der Ergebnisse möglich
- Ergebnisplots und Anzeige der relativen Abbildungsgenauigkeit



Anwendungsbeispiel: Montage eines Radialwellendichtrings



Konstruktionslehre und CAD Prof. Dr.-Ing. Stephan Tremmel



Anwendungsbeispiel: Montage eines Radialwellendichtrings



Anwendungsbeispiel: Montage eines Radialwellendichtrings



**Simulation Montagevorgang** 





#### 14

UNIVERSITÄT BAYREUTH

Ausblick



![](_page_14_Picture_4.jpeg)

Erstellt von Florian Hüter und Daniel Singer