

# HANSER

Markus Stommel, Marcus Stojek, Wolfgang Korte

FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen

ISBN: 978-3-446-42124-0

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-42124-0>

sowie im Buchhandel.

# Index

## Symbole

1-Wert 270  
2½D Konzept 252  
3D-Konzept 253  
3σ-Grenze 270  
4.5σ-Grenze 270

## A

Abminderungsfaktor 141, 142, 143, 144, 146, 147, 148, 149, 150, 152, 176  
Advani-Tucker-Modell 52  
aktiv (Freiheitsgrad) 239  
Alterung 127, 133, 134, 143, 161  
Amplitude 264  
Animation 301  
Anisotropieachse 169, 172  
Anregungsfrequenz 262  
Ansatzfreiwert 126  
Ansatzfunktion 206  
Anstrengungsfaktor 172, 173, 176  
aperiodischer Grenzfall 267  
Äquipotenzialbedingung 124  
Äquipotenzialfläche 124  
Arbeitsaufnahmevermögen 134  
Arrhenius-Beziehung 39  
Arruda-Boyce-Modell 79  
artificial strain energy 241, 301  
Aspektverhältnis 243, 289  
Auftrittswahrscheinlichkeit 269  
Auslastungsgrad 172  
Auslegung 121  
äußere Gestalt 235  
Auswertung 278  
Autokorrelationsfunktion 264  
Averaging 302  
axialsymmetrisches Element 243

## B

Bailey-Norton-Modell 66  
Balkenelement 215  
Bauteiltoleranz 278  
Beanspruchung  
– einmalig, kurzzeitig 144  
– langfristig 145  
– mehraxial, schwingend 186  
– schwingend 129, 137  
– statisch, kurzzeitig 130  
– statisch, langfristig 131  
– stoßartig 134  
– zyklisch 147  
Beanspruchungsgeschwindigkeit 128, 134, 136  
Beanspruchungszustand, mehraxial 123  
Belastungsgrenze, zyklisch 140  
Bemessung 121  
Bemessungskennwert 142  
Bernoulli-Balken 244  
Berstdruckfestigkeit 179  
Beschleunigung 294  
Bewertungsmethode 277  
Biegelast 199  
Bilanzbetrachtung 301  
Bindenaht 148, 149, 259  
Bindenahtdurchströmung 149  
breitbandig 266  
Bruchfläche 168, 169  
Bruchkriterium, differenzierend, pauschal 170  
Burgers-Modell 22

## C

Cauchy-Green-Tensor 13  
Composite-Schale 247  
Converse 257  
Crash-Simulation 234  
Craze 160, 161

**D**

Dämpfung 138, 140, 266  
 Dämpfungsmatrix 232  
 Dämpfungsverhältnis 266  
 Deformation, große 184  
 Deformationsgeschichte 71  
 Dehngeschwindigkeit 45  
 Dehnrate 136  
 Dehnung 10  
 – plastische 130, 163  
 – technische 12  
 – wahre 12  
 Dehnungskristallisation 37  
 Dehnungstensor 11  
 – deviatorischer Anteil 11  
 – hydrostatischer Anteil 11  
 Dehnungsüberhöhung 169  
 Detaillierungsgrad 285  
 Determinante 212  
 deterministisch 188, 189  
 deviatorisch 153  
 Dichte 233  
 Dichtungselement 250  
 Dimensionierung 121  
 – dehnungsbasiert 159  
 – energiebasiert 166  
 – spannungsbasiert 152  
 – von Elastomeren 181  
 – von kurtfaserverstärkten Kunststoffen 166  
 Dimensionierungsbedingung 123  
 Dimensionierungskennwert 121, 123  
 direkte Steifigkeitsmethode 210  
 discontinuity 304  
 Diskretisierung 205, 239  
 Diskretisierungsgrad 304  
 DOE 190  
 dreidimensional 235  
 Drillsteifigkeit 239  
 Druckabhängigkeit 60  
 Druckbeanspruchung 153, 154, 157, 174, 184  
 Drucker-Prager-Modell 60  
 Druckfestigkeit 157, 158, 172  
 Druckunterschied 293  
 Druckversuch 92  
 Durchbiegung 219  
 Duroplast 38, 128, 155, 181

**E**

ebenes Dreieckselement 218  
 effektive Masse 267  
 Effektivwert 265  
 Eigenform 261  
 Eigenfrequenz 261  
 Eigenspannung 149  
 eindimensional 235  
 Eindringtiefe 295  
 Einfluss  
 – fertigungsbedingt 149  
 – konstruktionsbedingt 150  
 Elastizitätskonstante 18  
 Elastizitätsmodul 199  
 Elastizitätstensor 16  
 – isotrop 17  
 – orthotrop 18  
 – transversal isotrop 19  
 Elastomer 35  
 – inkompressibles Verhalten 37  
 Elementeigenschaft 234  
 Elementformulierung 241  
 Elementkoordinatensystem 237, 306  
 Elementoberseite 305  
 Elementqualität 288  
 Elementsteifigkeitsmatrix 209  
 Elementtyp 234  
 Elementtypenbezeichnung 236  
 Energieaufnahme, volumenspezifische 134  
 Energiebilanz 241, 301  
 Ermüdungsfestigkeitsnachweis 121, 122, 177  
 Ermüdungsverhalten 140  
 Ersatz-E-Modul 53  
 Erwartungswert 270  
 Eshelby-Tensor 50  
 explizite Vorgehensweise 232  
 Extrapolation 233, 302

**F**

Faseranteil 254  
 Faserbruch 168, 170  
 Faserdurchmesser 167  
 Faserenthftung 168  
 Faserlängenverteilung 167  
 Faserorientierung 34  
 Faserorientierungsverteilung 51  
 Faservolumenanteil 48, 85  
 Fast Fourier Transformation (FFT) 264  
 Fatigue-Bewertung 277

- Feder-Dämpfer-Ersatzmodell 22  
Federsteifigkeit 208  
Festigkeit 175, 277  
– richtungsabhängige 174  
Festigkeitskennwert  
– zyklischer 141  
Festigkeitsparameter 173  
Findley-Modell 66  
Flächennormale 237  
Flächenträgheitsmoment 201, 245  
Fließen 153, 157, 158, 162, 164  
Fließspannung 55  
Fließzonenbildung 161  
Formänderungsbetrag 181, 182  
Formänderungsenergiebetrag 182  
Formänderungsenergiedichte 76, 134, 135,  
136, 166, 181, 182, 185  
Formfunktion 206, 214, 216, 238  
Fouriertransformierte 264  
Freiheitsgrad 209  
Frequenz 264  
Frequenzbereich 260  
Frequenzgehalt 266  
Frequenzverhältnis 262  
Füllsimulation 251
- G**  
Gauß-Integration 223  
geometrische Nichtlinearität 226  
Geradengleichung 216  
Gesamtpotenzial 210  
Gesamtverlustarbeit 133  
Geschwindigkeitseinfluss 128  
Gestaltenergieänderungshypothese 152  
Gewichtungsfaktor 223  
Glasfaser 237  
Gleichgewichtszustand 210  
Gleitbruch 125, 127  
Gleitung 10  
Grenzdehnung 132, 133, 140, 160, 161,  
162, 164  
Grenzschicht 169  
gRMS-Wert 269  
Größtdehnungshypothese 159, 160, 164, 165  
Gummi 35
- H**  
Haftvermittler 175  
Haigh-Diagramm 137, 139, 177, 184  
Halpin-Tsai-Modell 47  
Hauptfaserorientierungsrichtung 174  
Hauptorientierungsrichtung 52  
HCF 141  
Hexaedervernetzung 287  
Hill-Kriterium 62  
h-Methode 239  
Hookesches Gesetz 164  
Hourglass Moden 241  
Hourglassing 241, 301  
hybrides Element 242  
Hybridmodell 282  
hydrostatisch 153, 157  
Hysteresefläche 32, 133  
Hysteresemessverfahren 133  
Hysteresis-Messverfahren 138, 139, 140
- I**  
Imaginärteil 269  
implizit 231  
Incompatible Mode Elemente 242  
Ingenieurskonstante 46  
inkompressibel 242  
Inkompressibilität 185  
Innenwinkel 289  
innere Energie 215  
Instabilität 127  
instationär 260  
Integration 206, 222  
Integrationspunkt 222, 223, 302  
Interpolation 206  
Intervallgrenze 223  
Invariante 304  
– Cauchy-Green-Tensor 14  
Invertierung 234  
irreversible Dehnung 55  
isoparametrische Elementformulierung 223  
Iterationsalgorithmus 230  
Iterationsschritt 227, 231
- J**  
Jacobi-Determinante 290  
Johnson-Cook-Modell 59
- K**  
Kautschuk 35  
Kegelkriterium 125, 156  
Kelvin-Voigt-Körper 21  
Kerbe 129, 148, 150, 154, 162, 170  
Kerbgrundbeanspruchung 179, 180, 181  
Kerbschärfe 180

- Kerbschlagbiegeversuch, Charpy 135  
 Kerbwirkung 134, 149  
 Kinematik 292  
 kinetische Energie 299  
 Kirchhoff-Schale 246  
 Knotensteifigkeit 204  
 Knotenverschiebung 204  
 Knotenwert 302  
 Kompressionsmodul 17, 242  
 Konnektivität 237  
 konsistentes Einheitensystem 300  
 Kontaktproblem 294  
 Kontinuumselement 243  
 Konvergenzproblem 234  
 Konvergenzverhalten 230, 297  
 Koordinatensystem 279, 305  
 Kriechen 25, 133, 177, 179  
 Kriechmodell 65  
 Kriechmodul 28, 64  
 Kriechmodul/Zeit-Kurve 28  
 Kriechverformung 131  
 Kriechversagen 132  
 Kriechversuch 28  
 Kristallisation 25  
 kritische Dämpfung 267  
 Kunststoff, endlosfaserverstärkt 84  
 Kurzglasfaser 34  
 Kurzzeitfestigkeit 141, 162  
 Kurzzeit-Ursprungs-Modul, Bestimmung 88  
 Kurzzeitzugversuch 133, 143, 144, 146, 152, 165, 189
- L**
- Lagrange-Element 238  
 Lamésche Konstante 16  
 Lastspielzahl 137, 141, 175, 176, 177, 189  
 Laststeigerungsversuch 140  
 LCF 141  
 linear 225  
 Linearisierung 263  
 lokales Koordinatensystem 223
- M**
- Mapping 257  
 Masse-Feder-Dämpfer System 262  
 Massenelement 248  
 Massenmatrix 232  
 Masseskalierung 234, 299  
 Materialgesetz 43  
 Materialmodell 43
  - elastisch 44
  - elastisch-plastisch 55
  - hyperelastisch 76
  - Klassifizierung 44
  - pseudo-plastisch 179
  - viskoelastisch 67
  - volumenändernder Anteil 82
 Materialverhalten
  - anisotrop 166
  - elastisch 19
  - plastisch 20
  - viskoelastisch 21
  - viskos 20
 Matrixbruch 168, 170  
 Matrizenschreibweise 209  
 Maximalspannungs-Kriterium 171, 172, 175  
 Maxwell-Körper 22  
 Medienbelastung 127  
 Mehrachsigkeit 129  
 Mehrachsigkeitsgrad 154, 155, 158, 165  
 Messgröße
  - charakteristische 131
 Mikrokerbwirkung 175  
 Mikroriss 161, 162  
 Mindlin-Schalenelement 246  
 Miner-Summe 177  
 Mittelfläche 248  
 Mittelflächenmodell 283  
 Mittelspannungseinfluss 141, 177  
 Mittelspannungsempfindlichkeit 137  
 Mittelung 302  
 Modalanalyse 261  
 Modellierungskonzept 281  
 Modellkalibrierung 87  
 Mooney-Rivlin-Modell 76  
 Mullins-Effekt 36
- N**
- Nachgiebigkeitstensor 47  
 Necking-Bildung 100  
 negative Volume 237  
 Neo-Hooke-Modell 77  
 Neuber 179, 180, 181, 193  
 neutrale Faser 200  
 Newton-Raphson-Verfahren 227  
 nichtlinear 225  
 nichtlineare Problemstellung 225  
 nichtlineare Regression 94  
 nichtlineares Materialverhalten 225

Nichtlinearität aufgrund von

Randbedingungen 226

nichtproportional 187

Normaldehnungshypothese 164, 165

Normalspannungshypothese 154, 155, 158,  
164

Normalverteilung 188

## O

Ogden-Modell 77

Oktaederscherdehnungshypothese 162,  
164, 165

Orientation Averaging 255

Orientierung, molekulare 149

Orientierungsgrad 255

Orientierungstensor 257

## P

Palmgren-Miner 177

Parabel 223

Paraboloidkriterium 156, 158

Parallelisierbarkeit 298

Parametervariation 278

Penalty-Verfahren 295

Phantomnetzwerk 78

Phasenlage 265

plane-strain 244

plane-stress 244

Planung 275

Plastifizierung 180

p-Methode 239

Polyamid 144

Polynomgrad 236

Polyolefine 150

Post-Prozessor 196

Potenzialbegriff 210

Power Spectral Density, PSD 263

Pre-Prozessor 196

probabalistisch 189, 190

Prony-Reihe 68

proportional 186, 187

Proportionalität 187

Prozesssimulation 250

Prozess-Struktur-Kopplung 178, 250

Prüffrequenz 141

Prüfverfahren 130, 152

PSD-Beschleunigung 271

PSD-Diagramm 265

Puck-Ansatz 84

Pure-Shear-Versuch 91

## Q

quadratische Formfunktion 220

Qualitätskriterium 288

Quellung 134

Querdehnung 159, 160

Querkontraktionszahl 14, 88, 164, 165,  
166, 233

## R

Randbedingung 291

Ratenabhängigkeit 58

Rechte-Hand-Regel 237

reduziert integriertes Element 241

Referenzmodell 301

Regressionsmodell 190

Reißdehnung 130

Reißfestigkeit 130, 131

Relaxation 25, 129, 146, 147

Relaxationsmodul 69

Resonanzfrequenz 267

Retardation 25, 147

richtungsabhängiges Materialmodell 237

Rigid Body 249

Rivlin-Modell, zeitabhängig 80

RMS-Wert 269

Rotation 292

rotatorisch 239

## S

Sandwichstruktur 247

Schadensakkumulation 177

Schadensfolge 142, 148

Schädigung 133

Schädigungsanteil 133

Schalenelement 246

Schallgeschwindigkeit 233

Scherdeformation 129

Schichtaufbau 305

Schichtenströmung 252

schmalbandig 266

Schmelztemperaturbereich 25

Schnellzerreiversuch 129, 134

Schubfestigkeit 175

Schubmodul 15

Schweißfaktor 149, 150

Schweißnaht 148, 149, 150

schwingende Beanspruchung

– dehnungsgesteuert 31

– spannungsgesteuert 31

Schwingungsamplitude 269

- Schwingungsart 260
  - Schwingungsenergie 265
  - Schwingungssimulation 259
  - Sekantenmodul 45
  - Serendipity 238
  - Shear Locking 241
  - Shore-Härte A 96
  - Sicherheitsfaktor 143, 144, 148, 152, 159, 189
  - Signalverlauf 264
  - singulär 213
  - skalierbar 297
  - Skew angle 289
  - Solver 196
  - Spaltenmatrix 208
  - Spannung
    - technische 10
    - wahre 10
  - Spannungsanteil, hydrostatischer 9
  - Spannungs-/Dehnungs-Diagramm
    - isochron 30, 132
    - isotherm, isochron 142
  - Spannungs-/Dehnungs-Kurve
    - Elastomer 36
    - Temperatur- und Zeiteinfluss 27
    - Thermoplast 26
  - Spannungsdeviator 9
  - Spannungsgradient 148, 150, 151, 180
  - Spannungsrissbildung 161
  - Spannungstensor 9
  - Spannungsverhältnis 137, 178
  - Spannungsverlauf 202
  - Speicherbedarf 234
  - Speichermodul 33
  - spektrale Leistungsdichte 264
  - Sphärolit 161
  - Spritzgießverfahren 167
  - Stabilisierung 301
  - Stabilitätsproblem 234
  - Standardabweichung 269
  - Starrkörperbewegung 213
  - stationär 260
  - Steifigkeit 199, 276
  - Steifigkeitsmatrix 208, 225
  - Steifigkeitstensor 16
    - isotrop 17
    - orthotrop 18
    - transversal isotrop 19
  - stochastische Anregung 260
  - Streckdehnung 130
  - Streckspannung 55, 130, 131, 143, 144, 175, 178
  - Streuung 182, 187, 188, 189
  - Strukturelement 244
  - Stützstelle 205, 221
  - Stützwirkung 151
  - Stützziffer 151
  - Submodellierung 283
  - Superpositionsprinzip 70, 209
  - Symmetrie 281
  - Symmetrieachse 282
  - Symmetriebedingung 292
  - synchron 187
- T**
- Tandon-Weng-Modell 49
  - Tangentensteifigkeitsmatrix 229
  - Taper 289
  - Taylor-Reihe 228
  - Temperatureinfluss 128
  - Thermoplast 24, 128
    - amorph 26
    - teilkristallin 26
  - thermoplastische Elastomere 75
  - Timoshenko-Balken 246
  - Torsion 239
  - Torsionsfeder 240
  - Trägheitselement 248
  - Transformationsmatrix 224
  - transient 233
  - translatorisch 239
  - Trennbruch 125, 127
  - Tsai-Hill-Kriterium 172, 173, 175
  - Tsai-Wu-Kriterium 173
- U**
- Überschreitungswahrscheinlichkeit 270
  - Übertragungsfunktion 262
  - Übertragungsverhalten 261, 269
  - Ursprungs-E-Modul 15
- V**
- V80-Konzept 151
  - van-der-Waals-Modell 79
  - Varianz 269
  - Verbindungselement 249
  - Verfestigung 56
    - isotrop 57
    - kinematisch 57
  - Verformungsbehinderung 129

Verformungsgeschwindigkeit 136  
Vergleichsgröße 121  
Vergleichsspannung 56, 125, 152, 154  
Vergrößerungsfunktion 262  
Verlustmodul 33  
Vernetzungsgrad 36  
Versagensbedingung 123  
Versagenshypothese 121, 124  
Versagenskriterium 124  
Versagenswahrscheinlichkeit 188  
Verschiebung 202  
Verschiebungselement 241  
Versprödung 129, 134  
Verstärkungsfaser 48  
Verstreckgrad 13  
Verteilungskurve 188  
Verwölbung 246  
Verzerrung 10  
Verzerrungstensor 164  
Viskoelastizität 128, 142, 177  
vollintegriertes Element 241  
Volumenänderung 242  
Volumenkonstanz 185, 186  
von-Mises-Spannung 152, 153, 154, 155,  
156, 157, 158, 169, 175  
Vorzugsrichtung 254

**W**

Wahrscheinlichkeit 263  
Wahrscheinlichkeitsdichte 270  
Wallclock Time 275  
Wärmeübergangskoeffizient 291  
Warpage 289  
Wechselbeanspruchung 141, 148, 176

weißes Rauschen 266  
Werkstoff  
– spröde 127  
– zäh, duktil 127  
Werkstoffanstrengung 124, 125, 159, 184,  
185  
Werkstoffbeanspruchung, zulässige 123  
Werkstoffschaden, irreversibler 127  
WLF-Gleichung 42  
Wöhlerkurve 137, 138, 176, 177  
worst-case Betrachtung 278

**Y**

Yeoh-Modell 78

**Z**

Zäh-Spröd-Übergang 128, 134, 135  
Zeitbereich 260  
Zeitinkrement 231  
Zeitintervall 233  
Zeitstandfestigkeit 131, 152  
Zeitstandversuch 131  
Zeit-Temperatur-Verschiebungs-Prinzip 40  
Zugfestigkeit 130, 144, 157, 174, 175  
Zugstab 197  
Zugversuch  
– äquibiaxial 91  
– dehnungsgeregelt 90  
– weggeregelt 90  
Zuverlässigkeit 187  
Zwangsbedingung 292  
zweidimensional 235  
Zylinderkriterium 125  
Zylinderpotenzial 126, 153