

**Markus Stommel**

**Marcus Stojek**

**Wolfgang Körte**

# **FEM zur Berechnung von Kunststoff- und Elastomerbauteilen**

**2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage**

**HANSER**

# Inhalt

<b>Vorwort</b>	<b>XI</b>
2. Auflage	XI
1. Auflage	XIII
<b>Die Autoren</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung und Übersicht</b>	<b>1</b>
Literatur zu Kapitel 1	4
<b>TEIL A: Werkstoffverhalten, Materialmodellierung und Bewertung</b>	<b>5</b>
<b>2 Mechanisches Werkstoffverhalten und -modellierung</b>	<b>7</b>
2.1 Grundbegriffe der Mechanik	7
2.2 Charakteristische mechanische Werkstoffeigenschaften	28
2.2.1 Thermoplaste	29
2.2.2 Kurzfaserverstärkte Thermoplaste	39
2.2.3 Elastomere	40
2.2.4 Duroplaste	44
2.2.5 Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip	44
2.3 Modellierung des Werkstoffverhaltens	49
2.3.1 Thermoplaste	50
2.3.1.1 Materialmodelle für Kurzzeit-Belastung	51
2.3.1.2 Materialmodelle für Langzeit-Belastung	63
2.3.1.3 Materialmodelle für dynamische Belastung	73
2.3.2 Kurzfaserverstärkte Thermoplaste	74
2.3.2.1 Grundlagen zur Mikromechanik	76
2.3.2.2 Elastische Materialmodelle	82
2.3.3 Elastomere und TPE	90
2.3.3.1 Materialmodelle für Kurzzeit-Belastung	90

2.3.3.2	Materialmodelle für langzeitige und dynamische Belastung	94
2.3.3.3	Materialmodelle für die Kompressibilität	95
2.3.4	Duroplaste	97
2.4	Bestimmung von Materialparametern	101
2.4.1	Elastische Materialmodelle	102
2.4.2	Hyperelastische Materialmodelle	113
2.4.3	Elasto-plastische Materialmodelle	123
2.4.4	Kriechmodelle	130
2.4.5	Viskoelastische Materialmodelle	135
	Literatur zu Kapitel 2	142
<b>3</b>	<b>Dimensionierung von thermoplastischen Kunststoffbauteilen</b>	<b>145</b>
3.1	Statische Festigkeit	148
3.1.1	Ermittlung von statischen Festigkeitskennwerten	149
3.1.2	Bewertung mehraxialer Beanspruchungen und Versagen	160
3.1.2.1	Spannungsbezogene Versagenshypothesen	165
3.1.2.2	Dehnungsbezogene Versagenshypothesen	170
3.1.3	Einflussfaktoren auf die Bauteilfestigkeit	174
3.1.3.1	Phänomenologisches Verhalten beim Versagen des Werkstoffs	176
3.1.3.2	Einfluss von Beanspruchungsgeschwindigkeit, Temperatur und Feuchte	176
3.1.3.3	Einfluss von Bauteilkonstruktion und Lastsituation	178
3.1.3.4	Einfluss der Fertigung	179
3.1.4	Ansätze zur Bemessung thermoplastischer Kunststoffbauteile ..	182
3.1.4.1	Werkstoffmechanik des Versagens von Thermoplasten ..	183
3.1.4.2	Bemessung gegen eine zulässige Dehnung	187
3.1.4.3	Bemessung gegen eine zulässige Spannung	188
3.1.4.4	Bemessung auf Basis von Spannungs-/ Dehnungs-Kurven	191
3.1.4.5	Bemessung gegen eine zulässige spezifische Arbeitsaufnahme	196
3.1.4.6	Bemessung gegen eine zulässige plastische Vergleichsdehnung	196
3.1.5	Vergleich der Bemessungsansätze	197
3.1.5.1	Bemessungsgrenze und Bauteil-Beanspruchung	200
3.1.5.2	Spannungs- und dehnungsbasierte Vorgehensweise	203
3.2	Ermüdungsfestigkeit	203
3.2.1	Ermittlung von zyklischen Festigkeitskennwerten	205

3.2.2	Konstruktions- und fertigungsbedingte Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit	213
3.2.2.1	Einfluss des Spannungsgradienten auf die Ermüdungsfestigkeit	214
3.3	Dimensionierung kurzfaserverstärkter Thermoplaste	219
3.3.1	Verhalten beim Versagen von kurzfaserverstärkten Thermoplasten	221
3.3.2	Ermittlung von Dimensionierungskennwerten für kurzfaserverstärkte Thermoplaste	223
3.3.3	Versagenshypothesen für kurzfaserverstärkte Kunststoffe	228
3.3.4	Ermüdungsfestigkeit kurzfaserverstärkter Kunststoffe	235
3.3.4.1	Ermittlung von zyklischen Festigkeitskennwerten	235
3.3.4.2	Master-Wöhlerkurven Konzept	236
3.3.4.3	Interpolation von Wöhlerkurven	238
3.3.4.4	Wöhlerkurven-Ermittlung auf Basis mikromechanischer Ansätze	239
3.3.4.5	Lokales Wöhlerkurven-Konzept	241
3.4	Streuungen	244
	Literatur zu Kapitel 3	248
<b>4</b>	<b>Dimensionierung von Elastomerbauteilen</b>	<b>253</b>
4.1	Abschätzung der Belastbarkeit mittels Formänderungsenergiegedichte und Formänderungsbetrag	255
4.2	Praktische Auslegungsregeln	256
4.3	Auswertung von FEM-Ergebnissen bei großen Deformationen	258
4.4	Methode der „Crack-Energy-Density“ (CED)	260
	Literatur zu Kapitel 4	262
<b>5</b>	<b>Prozesssimulation und Prozess-Struktur-Kopplung</b>	<b>265</b>
5.1	Der Spritzgießprozess	266
5.2	Beschreibung von Strömungsvorgängen	270
5.2.1	Berechnung der Faserorientierungen	280
5.3	Modellierungsansätze für die Prozesssimulation	285
5.4	Prozess-Struktur-Kopplung	289
5.4.1	Ergebnisse für die Struktursimulation	293
	Literatur zu Kapitel 5	302

<b>TEIL B: Vorschlag für einen vereinfachten Festigkeitsnachweis ...</b>	<b>305</b>
<b>6 Vereinfachte Vorgehensweise zum Festigkeitsnachweis thermoplastischer Kunststoffbauteile</b>	<b>307</b>
6.1 Verwendete Konzepte beim vereinfachten Festigkeitsnachweis	308
6.1.1 Ermittlung der Bemessungsgrenze	308
6.1.2 Bauteilfestigkeit, Auslastungsgrad und Tragfähigkeit	310
6.1.2.1 Konzept der lokalen Bauteilfestigkeit	310
6.1.2.2 Auslastungsgrad	311
6.1.2.3 Bauteiltragfähigkeit	316
6.1.3 Auswahl der Versagenshypothese und Berücksichtigung von Mehraxialität	322
6.1.4 Grenzspannungsamplitude und Näherungskonstruktion des Haigh-Diagramms	328
6.1.5 Mehraxialität bei zyklischer Beanspruchung	330
6.1.6 Kerbspannungskorrektur-Verfahren	340
6.2 Vorschlag für einen vereinfachten statischen Festigkeitsnachweis	342
6.2.1 Ermittlung der Spannungskennwerte	343
6.2.2 Ermittlung der lokalen Bauteilfestigkeit bei kurzzeitiger Beanspruchung	344
6.2.2.1 Erfassung des Temperatureinflusses auf die Bauteilfestigkeit	349
6.2.3 Ermittlung der lokalen Bauteilfestigkeit bei langzeitiger Beanspruchung	351
6.2.4 Ermittlung des statischen Auslastungsgrads	355
6.2.5 Tragfähigkeitsnachweis	359
6.3 Vorschlag für einen vereinfachten Ermüdungsfestigkeitsnachweis	359
6.3.1 Ermittlung der Spannungskennwerte	362
6.3.2 Nachweis gegen die Grenzspannungsamplitude	362
6.3.3 Erfassung des Mittelspannungseinflusses	364
6.3.4 Nachweis gegen eine Zeitfestigkeit	369
6.3.5 Ermittlung des zyklischen Auslastungsgrads	373
Literatur zu Kapitel 6	375
<b>TEIL C: Einführung in die FEM</b>	<b>377</b>
<b>7 Prinzip der FEM</b>	<b>379</b>
7.1 Grundlegende Vorgehensweise	381
7.2 Systemgleichungen und Gleichungslösung	389
7.3 Formfunktionen	398

7.4	Integrationspunkte	407
7.5	Nichtlineare Problemstellungen	410
7.6	Implizite und Explizite Solver	416
7.7	Elementtypen	420
7.7.1	Elementeigenschaften	420
7.7.2	Kontinuumsэлеmente	428
7.7.3	Strukturelemente	430
7.7.4	Sonstige Elemente	434
7.8	Schwingungssimulation	436
7.8.1	Lösung von Schwingungsproblemen in der FEM	437
7.8.2	Definition des FE-Modells	440
7.8.3	Ergebnisse von Schwingungssimulationen	444
	Literatur zu Kapitel 7	449
<b>8</b>	<b>FEM im Entwicklungsprozess</b>	<b>451</b>
8.1	Planung	451
8.1.1	Ergebnisdefinition	453
8.1.2	Eingangsdaten, Datenquellen	456
8.2	Modellerstellung	457
8.2.1	Modellierungskonzept	457
8.2.2	Vernetzung	461
8.2.3	Randbedingungen	467
8.2.3.1	Kontaktprobleme	471
8.3	Lösungsverfahren	474
8.3.1	Lineare und nicht-lineare Probleme	474
8.3.2	Implizite und explizite Solver	474
8.4	Validierung	476
8.5	Auswertung und Dokumentation	479
8.5.1	Formale Anforderungen an einen Bericht	484
8.5.2	Prozesssicherheit	484
	<b>Index</b>	<b>487</b>