

# Inhalt

<b>Vorwort .....</b>	<b>VII</b>
<b>Die Autoren .....</b>	<b>XI</b>
<b>1 Einleitung und Übersicht .....</b>	<b>1</b>
<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 .....	30
2.2.1 Thermoplaste .....	31
2.2.2 Kurzfaserverstärkte Thermoplaste .....	41
2.2.3 Elastomere .....	43
2.2.4 Duroplaste .....	46
2.2.5 Zeit-Temperatur-Verschiebungsprinzip .....	47
2.3 Modellierung des Werkstoffverhaltens .....	51
2.3.1 Thermoplaste .....	52
2.3.1.1 Materialmodelle für Kurzzeit-Belastung .....	53
2.3.1.2 Materialmodelle für Langzeit-Belastung .....	60
2.3.1.3 Materialmodelle für dynamische Belastung .....	71
2.3.2 Kurzfaserverstärkte Thermoplaste .....	72
2.3.2.1 Grundlagen zur Mikromechanik .....	74
2.3.2.2 Elastische Materialmodelle .....	81

2.3.3	Elastomere und TPE .....	92
2.3.3.1	Materialmodelle für Kurzzeit-Belastung .....	92
2.3.3.2	Materialmodelle für langzeitige und dynamische Belastung	96
2.3.3.3	Materialmodelle für die Kompressibilität .....	97
2.3.4	Duroplaste.....	100
2.4	Bestimmung von Materialparametern .....	103
2.4.1	Elastische Materialmodelle.....	104
2.4.2	Hyperelastische Materialmodelle .....	114
2.4.3	Elasto-plastische Materialmodelle.....	124
2.4.4	Kriechmodelle .....	131
2.4.5	Viskoelastische Materialmodelle .....	138
<b>3</b>	<b>Dimensionierung von thermoplastischen Kunststoffbauteilen .....</b>	<b>149</b>
3.1	Statische Festigkeit .....	152
3.1.1	Werkstoffmechanik des Versagens von Thermoplasten .....	153
3.1.2	Ermittlung von statischen Festigkeitskennwerten .....	158
3.1.2.1	Statische kurzzeitige Beanspruchungen.....	158
3.1.2.2	Statische langzeitige Beanspruchungen.....	160
3.1.2.3	Stoßartige Beanspruchungen .....	166
3.1.3	Bewertung mehraxialer Beanspruchungen und Versagen .....	169
3.1.3.1	Spannungsbezogene Versagenshypothesen.....	174
3.1.3.2	Dehnungsbezogene Versagenshypothesen .....	179
3.1.4	Einflussfaktoren auf die Bauteilfestigkeit .....	182
3.1.4.1	Phänomenologisches Verhalten beim Versagen des Werkstoffs.....	184
3.1.4.2	Einfluss von Beanspruchungsgeschwindigkeit, Temperatur und Feuchte.....	185
3.1.4.3	Einfluss von Bauteilkonstruktion und Lastsituation.....	186
3.1.4.4	Einfluss der Fertigung.....	188
3.1.5	Ansätze zur Bemessung thermoplastischer Kunststoffbauteile.....	194
3.1.5.1	Bemessung gegen eine zulässige Dehnung .....	194
3.1.5.2	Bemessung gegen eine zulässige Spannung .....	196
3.1.5.3	Bemessung auf Basis von Spannungs-/Dehnungs-Kurven ..	199
3.1.5.4	Bemessung gegen eine zulässige spezifische Arbeitsaufnahme .....	203

3.1.5.5 Bemessung gegen eine zulässige plastische Vergleichsdehnung.....	204
3.1.5.6 Bemessung nach VDI-Richtlinie 2016 .....	204
3.1.6 Vergleich der Bemessungsansätze.....	207
3.1.6.1 Spannungs- und dehnungsbasierte Vorgehensweise .....	207
3.1.6.2 Bemessungsgrenze und Bauteil-Beanspruchung.....	210
3.2 Ermüdungsfestigkeit .....	213
3.2.1 Ermittlung von zyklischen Festigkeitskennwerten.....	215
3.2.2 Konstruktions- und fertigungsbedingte Einflüsse auf die Ermüdungsfestigkeit.....	223
3.2.2.1 Einfluss des Spannungsgradienten auf die Ermüdungsfestigkeit .....	224
3.3 Dimensionierung kurzfaserverstärkter Thermoplaste .....	229
3.3.1 Verhalten beim Versagen von kurzfaserverstärkten Thermoplasten	231
3.3.2 Ermittlung von Dimensionierungskennwerten für kurzfaserverstärkte Thermoplaste .....	233
3.3.3 Versagenshypothesen für kurzfaserverstärkte Kunststoffe .....	237
3.3.4 Ermüdungsfestigkeit kurzfaserverstärkter Kunststoffe.....	245
3.3.4.1 Ermittlung von zyklischen Festigkeitskennwerten .....	246
3.3.4.2 Master-Wöhlerkurven-Konzept .....	247
3.3.4.3 Interpolation von Wöhlerkurven.....	248
3.3.4.4 Wöhlerkurven-Ermittlung auf Basis mikromechanischer Ansätze .....	249
3.3.4.5 Lokales Wöhlerkurven-Konzept.....	251
3.4 Streuungen .....	254
<b>4 Dimensionierung von Elastomerbauteilen .....</b>	<b>263</b>
4.1 Abschätzung der Belastbarkeit mittels Formänderungsenergiedichte und Formänderungsbetrag.....	265
4.2 Praktische Auslegungsregeln .....	266
4.3 Auswertung von FEM-Ergebnissen bei großen Deformationen .....	268
4.4 Methode der „Crack-Energy-Density“ (CED).....	270
<b>5 Prozesssimulation und Prozess-Struktur-Kopplung.....</b>	<b>275</b>
5.1 Der Spritzgießprozess .....	276
5.2 Beschreibung von Strömungsvorgängen .....	280
5.2.1 Berechnung der Faserorientierungen .....	290

5.3	Modellierungsansätze für die Prozesssimulation . . . . .	295
5.4	Prozess-Struktur-Kopplung . . . . .	300
5.4.1	Ergebnisse für die Struktursimulation . . . . .	303
<b>TEIL B: Vorschlag für einen vereinfachten Festigkeitsnachweis . . . . .</b>		<b>315</b>
<b>6</b>	<b>Vereinfachte Vorgehensweise zum Festigkeitsnachweis thermoplastischer Kunststoffbauteile . . . . .</b>	<b>317</b>
6.1	Verwendete Konzepte beim vereinfachten Festigkeitsnachweis . . . . .	318
6.1.1	Ermittlung der Bemessungsgrenze . . . . .	319
6.1.2	Bauteilfestigkeit, Auslastungsgrad und Tragfähigkeit . . . . .	320
6.1.2.1	Konzept der lokalen Bauteilfestigkeit . . . . .	320
6.1.2.2	Auslastungsgrad . . . . .	321
6.1.2.3	Bauteiltragfähigkeit . . . . .	326
6.1.3	Versagenshypothese und Mehraxialität bei statischer Beanspruchung . . . . .	331
6.1.4	Grenzspannungsamplitude und Näherungskonstruktion des Haigh-Diagramms . . . . .	337
6.1.5	Mehraxialität bei zyklischer Beanspruchung . . . . .	340
6.1.5.1	Proportionale und nichtproportionale Beanspruchungen .	340
6.1.5.2	Vergleichsspannungshypothesen für zyklische Beanspruchung . . . . .	342
6.1.5.3	Kritisches Schnittebenenverfahren . . . . .	349
6.1.6	Kerbspannungskorrektur-Verfahren . . . . .	351
6.2	Vorschlag für einen vereinfachten statischen Festigkeitsnachweis . . . . .	353
6.2.1	Ermittlung der Spannungskennwerte . . . . .	354
6.2.2	Ermittlung der lokalen Bauteilfestigkeit bei kurzzeitiger Beanspruchung . . . . .	354
6.2.2.1	Erfassung des Temperatureinflusses auf die Bauteilfestigkeit . . . . .	359
6.2.3	Ermittlung der lokalen Bauteilfestigkeit bei langzeitiger Beanspruchung . . . . .	362
6.2.4	Ermittlung des statischen Auslastungsgrads . . . . .	365
6.2.5	Tragfähigkeitsnachweis . . . . .	369
6.3	Vorschlag für einen vereinfachten Ermüdungsfestigkeitsnachweis . . . . .	369
6.3.1	Ermittlung der Spannungskennwerte . . . . .	372
6.3.2	Nachweis gegen die Grenzspannungsamplitude . . . . .	372

6.3.3 Erfassung des Mittelspannungseinflusses.....	374
6.3.4 Nachweis gegen eine Zeitfestigkeit.....	379
6.3.5 Ermittlung des zyklischen Auslastungsgrads .....	383
<b>TEIL C: Einführung in die FEM .....</b>	<b>389</b>
<b>7 Prinzip der FEM.....</b>	<b>391</b>
7.1 Grundlegende Vorgehensweise.....	393
7.2 Systemgleichungen und Gleichungslösung.....	401
7.3 Formfunktionen .....	410
7.4 Integrationspunkte.....	418
7.5 Nichtlineare Problemstellungen.....	421
7.6 Implizite und explizite Solver .....	427
7.7 Elementtypen.....	430
7.7.1 Elementeigenschaften .....	430
7.7.2 Kontinuumselemente .....	438
7.7.3 Strukturelemente.....	440
7.7.4 Sonstige Elemente .....	444
7.8 Schwingungssimulation .....	446
7.8.1 Lösung von Schwingungsproblemen in der FEM .....	447
7.8.2 Definition des FE-Modells .....	450
7.8.3 Ergebnisse von Schwingungssimulationen.....	454
<b>8 FEM im Entwicklungsprozess.....</b>	<b>461</b>
8.1 Planung .....	462
8.1.1 Ergebnisdefinition.....	463
8.1.2 Eingangsdaten, Datenquellen.....	466
8.2 Modellerstellung .....	467
8.2.1 Modellierungskonzept .....	468
8.2.2 Vernetzung .....	471
8.2.3 Randbedingungen.....	477
8.2.3.1 Kontaktprobleme .....	480
8.3 Lösungsverfahren.....	483
8.3.1 Lineare und nicht-lineare Probleme .....	483
8.3.2 Implizite und explizite Solver .....	484
8.4 Validierung.....	485

<b>8.5 Auswertung und Dokumentation .....</b>	<b>488</b>
8.5.1 Formale Anforderungen an einen Bericht .....	492
8.5.2 Prozesssicherheit.....	493
<b>Index .....</b>	<b>495</b>