

Gunter Erhard

Konstruieren mit Kunststoffen

3. Auflage

mit 584 Abbildungen und 62 Tabellen

HANSER

Inhalt

Zur Geschichte der Polymerwerkstoffe	1
1 Marktüberblick	3
1.1 Anwendungsbeispiele aus verschiedenen Branchen	6
1.1.1 Luft- und Raumfahrt	6
1.1.2 Feinwerktechnik	9
1.1.3 Fahrzeugbau	11
1.1.4 Allgemeiner Maschinenbau	16
1.1.5 Apparatebau	17
1.1.6 Bauwesen	20
1.2 Prognose	23
Literatur	30
2 Struktur und Eigenschaften	33
2.1 Chemische Struktur (Konstitution)	33
2.1.1 Polymerisationsgrad – relative Molekülmasse	36
2.1.2 Homopolymerisation – Copolymerisation	40
2.2 Zwischenmolekulare Bindungsenergien (Nebenvalenzbindungen)	41
2.2.1 Wasseraufnahme bei Polyamiden	42
2.3 Räumliche Anordnung von Atomen und Atomgruppen im Molekül (Konfiguration)	48
2.3.1 Taktizität	49
2.3.2 Verzweigung	50
2.3.3 Vernetzung	50
2.4 Aufbau von Polymersystemen	51
2.4.1 Homogene und heterogene Polymermischungen	51
2.4.2 Äußere Weichmachung	52
2.4.3 Füllung – Verstärkung	52
2.5 Morphologie (übermolekulare Strukturen)	55
2.5.1 Amorpher Gefügestand	55
2.5.2 Kristalliner Gefügestand	56
2.5.3 Anisotropie	61
2.5.3.1 Molekülorientierungen	61
2.5.3.2 Füllstofforientierungen	63
2.6 Thermisch-mechanische Zustandsbereiche	65
2.6.1 Thermoplaste mit amorpher Gefügestruktur	65
2.6.2 Thermoplaste mit teilkristalliner Gefügestruktur	66
2.6.3 Elastomere	67
2.6.4 Duroplaste	68
Literatur	68

3 Kurzcharakterisierung wichtiger Polymerwerkstoffe für konstruktive Anwendungen	71
3.1 Thermoplaste	71
3.1.1 Polymerblends	83
3.1.2 Funktionspolymere	88
3.2 Elastomere	94
3.3 Duromere	95
3.4 Verstärkungsfasern	97
3.4.1 Glasfasern	101
3.4.1.1 Herstellung und Verstärkungsformen von Textilglas.	101
3.4.1.2 Glasarten und Fasereigenschaften	102
3.4.2 Kohlenstoff-Fasern	102
3.4.3 Aramidfasern	103
3.4.4 Metallfasern, Whisker, keramische Fasern	104
Literatur	104
4 Eigenschaften – Werkstoffkennwerte – spezielle Prüfverfahren und Verhaltensweisen	107
4.1 Verformungsverhalten unter uniaxialer, zügiger Zugbeanspruchung (Spannungs-Dehnungs-Versuch)	107
4.1.1 Molekulare Verformungs- und Schädigungsmechanismen	107
4.1.2 Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Kurven	109
4.1.3 Ermittlung von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen und Werkstoffkennwerten	109
4.1.4 Einfluß von Temperatur, Zeit und Feuchte auf Spannungs-Dehnungs-Kurven	114
4.1.5 Mathematische Beschreibung von Spannungs-Dehnungs-Kurven	116
4.2 Verformungsverhalten unter uniaxialer, langzeitiger, statischer Zugbeanspruchung (Zeitstand-Zug-Versuch)	116
4.2.1 Mathematische Beschreibung von Kriechkurven	119
4.3 Zähigkeit und Schlagzähigkeit	122
4.3.1 Zähigkeit aus dem Zugversuch	122
4.3.2 Zähigkeit aus dem Schlagbiegeversuch	122
4.3.3 Durchstoßversuch	126
4.4 Verhalten unter schwingender Beanspruchung	126
4.4.1 Ermittlung charakteristischer Ermüdungskennwerte	128
4.5 Querkontraktionszahl	131
4.6 Thermische Eigenschaften	134
4.6.1 Wärmedehnung	134
4.6.2 Formbeständigkeit	135
4.6.2.1 Elastizitätsmodul, Schubmodul als Funktion der Temperatur	135
4.6.2.2 Wärmeformbeständigkeitstemperatur	136
4.6.2.3 Erweichungstemperatur	136
4.6.3 Thermische Alterung	137
4.6.3.1 Sicherheitstechnische Aspekte	141
4.6.4 Zusammenfassende Bewertung des Temperatureinflusses	142

4.7	Reibungs- und Verschleißverhalten	143
4.7.1	Grundlagen	145
4.7.1.1	Adhäsion und Oberflächenenergie von Festkörpern	146
4.7.1.2	Deformationen und Hysteresisverluste	151
4.7.1.3	Rahmenbedingungen für adhäsiv und deformativ bedingtes Gleiten.	152
4.7.2	Reibung und Verschleiß bei Polymerwerkstoff/Stahl-Paarungen	153
4.7.2.1	Einfluß der Oberflächenrauheit des Stahlpartners	154
4.7.2.2	Einfluß der relativen Molekülmasse.	157
4.7.2.3	Einfluß des Feuchtegehalts im Polyamid	157
4.7.2.4	Einfluß energiereicher Bestrahlung	159
4.7.2.5	Einfluß der Bewegungsform und des Bewegungsablaufes.	162
4.7.3	Reibung und Verschleiß bei Polymerwerkstoff/ Polymerwerkstoff-Paarungen	162
4.7.3.1	Gleitreibung	162
4.7.3.2	Gleitverschleiß	164
4.7.4	Zusammenfassung der Einflüsse von Werkstoffeigenschaften auf Systemeigenschaften	164
4.7.5	Einfluß von Füll- und Verstärkungsstoffen	165
4.7.5.1	Einfluß von Fasern auf den Verschleiß.	165
4.7.5.2	Einfluß von anderen, anorganischen Zusätzen	168
4.7.5.3	Einfluß von polymeren Zusätzen	168
4.7.5.4	Einfluß von polymeren und härteerhöhenden Zusätzen.	170
4.7.5.5	Einfluß von Zusätzen auf amorphe Thermoplaste	171
4.7.6	Stick-Slip (Ruckgleiten)	172
4.7.6.1	Beeinflussung des Stick-Slip-Verhaltens durch Parameter des Gleitsystems	174
4.7.7	Strahlverschleiß	176
	Literatur	179
5	Berechnen von mechanisch beanspruchten Strukturen an Beispielen geometrisch einfacher Bauteile und statisch bestimmter Lastfälle	183
5.1	Werkstoff- und verarbeitungsspezifische Probleme	183
5.1.1	Verformungsverhalten unter uniaxialer, zügiger Zugbeanspruchung.	183
5.2	Festigkeitsnachweis.	185
5.2.1	Grundsätzliches Vorgehen bei einer Festigkeitsbetrachtung	185
5.2.1.1	Dimensionierungskennwerte	186
5.2.1.2	Sicherheitsbeiwerte	188
5.2.1.3	Abminderungsfaktoren	189
5.2.2	Einachsiger Spannungszustand	190
5.2.2.1	Beispiel des dünnwandigen Rohres unter Innendruck.	191
5.2.3	Mehrachsiger Spannungszustand.	192
5.2.3.1	Versagenskriterien	192
5.2.3.2	Beispiele zum Belastungsfall der Scherung.	195
5.3	Berechnung von Dehnungen und Verformungen.	198
5.3.1	Linear-elastisches Materialverhalten	198
5.3.2	Nichtlinear-elastisches Materialverhalten	199

5.4	Spannungs- und Verformungsanalysen von biegebeanspruchten Strukturen mit Hilfe einer einfachen FE-Betrachtung	204
5.5	Berechnung stoßartig beanspruchter Bauteile	206
5.6	Zur Berechnung von Faserverbund-Strukturen	207
5.6.1	Mechanische Eigenschaften von Laminaten	208
5.6.1.1	Verformungsverhalten unter uniaxialer Zugbeanspruchung, Schädigungsgrenze	208
5.6.1.2	Grundelastizitätsgrößen einer UD-Schicht.	208
5.6.1.3	Gemittelte Kennwerte von Mattenlaminaten	210
5.6.2	Berechnungsverfahren	212
5.6.2.1	Berechnung mit gemittelten Kennwerten	212
5.6.2.2	Kontinuumstheorie.	212
5.6.2.3	Netztheorie.	213
5.7	Rechnergestützte Entwicklung 213	
5.7.1	CAD – Computer Aided Design.	213
5.7.2	Rapid Prototyping.	215
5.7.3	Rapid Tooling	217
	Literatur	218
6	Werkstoff- und beanspruchungsgerechte Konstruktion	219
6.1	Weiche Konstruktionen	219
6.1.1	Elastizitätsmodul	219
6.1.2	Flächenträgheitsmoment	219
6.1.3	Beanspruchungsart	221
6.2	Biegesteife Konstruktionen	223
6.3	Biegeweiche-torsionssteife Konstruktionen.	224
6.4	Biegesteife-torsionsweiche Konstruktionen.	225
6.5	Torsionsfeste, torsionssteife Konstruktionen	226
6.6	Biegesteife und torsionssteife Konstruktionen.	228
6.7	Torsionsweiche Konstruktionen	229
6.8	Zugfeste-, zugsteife-torsionsweiche Konstruktionen	229
6.9	Schubfeste, schubsteife Konstruktionen	230
6.10	Drucknachgiebige und drucksteife Konstruktionen	231
6.11	Multifunktionale Konstruktionen.	233
6.12	Wärmedehnungen und Wärmespannungen	234
6.13	Gelenkverbindungen	238
6.14	Kunststoff/Metall-Hybridkonstruktionen.	241
	Literatur	243
7	Fertigungsgerechte Konstruktion	245
7.1	Formfüllung	245
7.1.1	Simulation des Füllvorgangs	246
7.1.2	Ursachen zur Entstehung von Orientierungen	248
7.1.2.1	Auswirkungen von Orientierungen.	252
7.1.2.2	Beeinflussung von Orientierungen	253
7.1.3	Ursachen zur Entstehung von Bindenähten und Lufteinschlüssen	256
7.1.3.1	Auswirkungen von Bindenähten und Lufteinschlüssen	257
7.1.3.2	Beeinflussung von Bindenähten und Lufteinschlüssen	259

7.2	Abkühlung und Erstarrung	264
7.2.1	Abkühlgeschwindigkeit	264
7.2.1.1	Auswirkungen der Abkühlgeschwindigkeit	265
7.2.1.2	Beeinflussung der Kühlgeschwindigkeit	265
7.2.2	Maßänderungen und Toleranzen	268
7.2.2.1	Schwindung	268
7.2.2.2	Nachschwindung	269
7.2.2.3	Toleranzen*	270
7.2.3	Verzug	274
7.2.3.1	Ursachen für Verzug	274
7.2.3.2	Beeinflussung von Verzug	277
7.3	Entformung	279
7.3.1	Entformungsschräge	280
7.3.2	Entformung von Hinterschneidungen	283
7.3.2.1	Zwangsentformung	283
7.3.2.2	Werkzeugtechnische Maßnahmen	283
7.3.2.3	Schmelzkerne	285
7.3.3	Vermeiden von Hinterschneidungen	287
7.3.3.1	Änderungen des Designs	287
7.3.3.2	Durchtauchende Kerne (Durchblocken)	287
7.3.3.3	Mehrteilige Ausführungen	289
7.4	Mehrkomponenten-Spritzgießen	290
7.4.1	Zweifarbenspritzguß	292
7.4.2	Hart-Weich-Kombinationen	295
7.4.3	Gasinjektionstechnik (GIT)*	299
7.4.4	Wasserinjektionstechnik (WIT)	306
7.4.5	Gasaußendrucktechnik (GAT)	306
	Literatur	306
8	Biegeelemente	309
8.1	Schnappverbindungen	309
8.1.1	Schnapphaken	314
8.1.1.1	Formvarianten	314
8.1.1.2	Berechnung*	318
8.1.1.3	Zusatzfunktionen	319
8.1.2	Torsionsschnappverbindung	322
8.1.2.1	Formvarianten	322
8.1.2.2	Berechnung*	323
8.1.3	Ringschnappverbindung	324
8.1.3.1	Formvarianten	324
8.1.3.2	Berechnung*	325
8.1.3.3	Zusatzfunktionen	327
8.1.4	Segmentierte Ringschnappverbindung	328
8.1.4.1	Formvarianten	328
8.1.4.2	Berechnung*	329
8.1.4.3	Zusatzfunktionen	329
8.2	Federelemente	331

8.2.1	Federn aus thermoplastischen Polymerwerkstoffen	331
8.2.1.1	Biegefeder	332
8.2.1.2	Zugfedern	333
8.2.1.3	Druckfedern	333
8.2.1.4	Drehfedern	337
8.2.2	Federn aus Faser-Kunststoff-Verbunden (GFK, CFK)	338
8.2.2.1	Blattfedern	338
8.3	Filmscharniere und Filmgelenke	341
8.3.1	Herstellung	342
8.3.1.1	Spritzgießen	342
8.3.1.2	Blasformen	343
8.3.1.3	Prägen	344
8.3.2	Gestaltung	345
8.3.3	Werkstoffe	346
8.3.4	Berechnung	346
8.3.4.1	Berechnung der Filmlänge und Filmstärke	347
8.3.5	Anwendungsbeispiele	349
8.3.5.1	Deckel/Gehäuseverbindungen	349
8.3.5.2	Vereinfachte Herstellung	350
8.3.5.3	Montagehilfe oder unverlierbare Anbindung	354
8.3.5.4	Dynamisch beanspruchte Filmgelenke	354
8.3.5.5	Bistabile Gelenke	355
	Literatur	357
9	Schraubverbindungen	359
9.1	Geformtes oder spanend gefertigtes Gewinde	360
9.1.1	Schrauben aus Polymerwerkstoff	360
9.1.2	Spritzgegossene, blasgeformte, spanend gefertigte Gewinde	361
9.1.3	Bewegungsgewinde	364
9.2	Gewindeeinsätze	364
9.2.1	Umspritzte Gewindebuchsen	364
9.2.2	Mit Ultraschall eingebettete Gewindebuchsen	365
9.2.3	Eingepreßte Gewindebuchsen	365
9.2.4	Spreizeinsätze (Expansionseinsätze)	366
9.2.5	Eingeschraubte Einsätze	366
9.2.6	Einsätze aus Polymerwerkstoffen	367
9.2.7	Vergleichende Bewertung der verschiedenen Einsätze	367
9.2.8	Verhalten unter dynamischer Belastung	367
9.3	Gewindeformende Schrauben	370
9.3.1	Schraubenformen und -geometrien	371
9.3.1.1	Flankenwinkel	372
9.3.1.2	Selbsthemmung	372
9.3.2	Gestaltung des Einschraubauges (Tubus)*	372
9.3.2.1	Einschraubtiefe	373
9.3.2.2	Kernlochdurchmesser	374
9.3.2.3	Entlastungsbohrung	374
9.3.2.4	Außendurchmesser	375

9.3.3	Berechnung von Kenngrößen einer Schraubverbindung	376
9.3.3.1	Eindrehmoment.	376
9.3.3.2	Überdrehmoment.	378
9.3.3.3	Auszugkraft	378
9.3.3.4	Anziehmoment und Vorspannkraft.	379
9.3.3.5	Montagebedingungen	380
Literatur		381
10	Rippenkonstruktionen	383
10.1	Vergleich mit anderen Versteifungsmaßnahmen	383
10.1.1	Erhöhung des Elastizitätsmoduls.	383
10.1.2	Vergrößerung der Wanddicke	384
10.1.3	Sicken.	384
10.2	Allgemeine Aspekte zur Rippenversteifung	386
10.2.1	Rippenhöhe	386
10.2.2	Rippenlage.	386
10.2.3	Rippenanzahl (Werkstoffaufwand)	388
10.2.4	Einspannung	391
10.3	Gestaltungsregeln für spritzgegossene Verrippungen	392
10.3.1	Rippendicke.	392
10.3.2	Kühlzeit	392
10.3.3	Anspritrichtung.	393
10.3.4	Rippenkreuzungspunkte (Knoten).	395
10.4	Gestaltungsregeln für Rippen nach den GID-Verfahren	396
10.5	Gestaltungsregeln für blasgeformte Rippen und Sicken	397
10.5.1	Blasgeformte Sicken	397
10.5.2	Blasgeformte Rippen.	399
10.6	Gestaltungsregeln für gepreßte Rippen	400
10.6.1	Handwerkliche Verarbeitung (Handlaminierverfahren).	400
10.6.2	Preßverfahren.	401
Literatur		402
11	Zahnräder	405
11.1	Berechnung der Zahn- und Flankentemperatur von Stirnrädern.	407
11.1.1	Bloksche Blitztemperaturhypothese.	408
11.1.2	Temperaturrechnung nach TAKANASHI	408
11.1.3	Temperaturrechnung nach HACHMANN und STRICKLE.	410
11.1.4	Vergleich der Temperaturberechnungsverfahren	411
11.1.5	Optimierte Temperaturrechnung	413
11.1.5.1	Temperaturmessungen an Kunststoff/Stahl-Paarungen nach [11.12]	413
11.1.5.2	Temperaturmessungen an Kunststoff/ Kunststoff-Paarungen nach [11.36]	415
11.1.5.3	Relative Einschaltdauer	415
11.1.5.4	Optimierte Zahlenwertgleichung	417
11.2	Berechnung der Tragfähigkeit	418

11.2.1 Zahnschäden	418
11.2.2 Allgemeine Kenngrößen	420
11.2.3 Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit	420
11.2.4 Berechnung der Zahnflankentragfähigkeit	425
11.2.5 Berechnung der Zahnverformung	433
11.3 Gestaltung	435
11.3.1 Spritzgießen	435
11.3.2 Spanende Herstellung	438
11.3.3 Wellen/Naben-Verbindung	440
11.3.3.1 Reibschlußverbindung	440
11.3.3.2 Formschlußverbindung	442
11.3.3.3 Vorgespannter Formschluß	444
Literatur	447
12 Gleitlager	449
12.1 Gleitlagerschäden	451
12.2 Berechnung der Belastbarkeit	453
12.2.1 Berechnung der mittleren Lagertemperatur	453
12.2.2 Berechnung der Gleitflächentemperatur	456
12.2.3 Statische Belastbarkeit	456
12.2.3.1 Beanspruchung des Lagerwerkstoffs	456
12.2.3.2 Deformation der Lagerschale	460
12.2.4 Dynamische Belastbarkeit	464
12.2.4.1 Dauerbetrieb	464
12.2.4.2 Aussetzbetrieb	465
12.2.4.3 Verschleiß	465
12.3 Gestaltung	467
12.3.1 Lagerspiel	467
12.3.2 Wanddicke	470
12.3.3 Herstellung	471
12.3.4 Gestaltungsbeispiele	471
Literatur	472
13 Laufrollen und Laufräder	473
13.1 Rollenschäden	474
13.2 Berechnung der Tragfähigkeit	475
13.2.1 Pressungskennwert als näherungsweise Bemessungsgrenze	475
13.2.2 Deformation unter statischer Last	479
13.2.3 Dynamisch beanspruchte Laufrollen	484
13.2.3.1 Frei laufende Rollen (ohne Antrieb)	485
13.2.3.2 Angetriebene Rollen	489
Literatur	493
14 Anleitungen zur Bedienung der Rechenprogramme	495
Anhang: Polymerwerkstoffe und ihre Kurzzeichen	503
Index	505