

HANSER



Inhaltsverzeichnis

Gunter Erhard

Konstruieren mit Kunststoffen

ISBN: 978-3-446-41646-8

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser.de/978-3-446-41646-8>

sowie im Buchhandel.

# Inhalt

<b>Vorwort zur vierten Auflage</b> .....	V
<b>Zur Geschichte der Polymerwerkstoffe</b> .....	1
<b>1 Marktüberblick</b> .....	3
1.1 Anwendungsbeispiele aus verschiedenen Branchen .....	6
1.1.1 Luft- und Raumfahrt .....	6
1.1.2 Feinwerktechnik .....	9
1.1.3 Fahrzeugbau .....	12
1.1.4 Allgemeiner Maschinenbau .....	17
1.1.5 Apparatebau .....	18
1.1.6 Bauwesen .....	21
1.2 Prognose .....	25
<b>2 Struktur und Eigenschaften</b> .....	35
2.1 Chemische Struktur (Konstitution) .....	35
2.1.1 Polymerisationsgrad – relative Molekülmasse .....	38
2.1.2 Homopolymerisation – Copolymerisation .....	42
2.2 Zwischenmolekulare Bindungsenergien (Nebervalenzbindungen) .....	43
2.2.1 Wasseraufnahme bei Polyamiden .....	45
2.3 Räumliche Anordnung von Atomen und Atomgruppen im Molekül (Konfiguration) .....	51
2.3.1 Taktizität .....	51
2.3.2 Verzweigung .....	52
2.3.3 Vernetzung .....	53
2.4 Aufbau von Polymersystemen .....	54
2.4.1 Homogene und heterogene Polymermischungen .....	54
2.4.2 Äußere Weichmachung .....	55
2.4.3 Füllung – Verstärkung .....	55
2.5 Morphologie (übermolekulare Strukturen) .....	58
2.5.1 Amorpher Gefügestand .....	58
2.5.2 Kristalliner Gefügestand .....	59
2.5.3 Anisotropie .....	64
2.5.3.1 Molekülorientierungen .....	64
2.5.3.2 Füllstofforientierungen .....	66
2.6 Thermisch-mechanische Zustandsbereiche .....	68
2.6.1 Thermoplaste mit amorpher Gefügestruktur .....	69
2.6.2 Thermoplaste mit teilkristalliner Gefügestruktur .....	70
2.6.3 Elastomere .....	70
2.6.4 Duroplaste .....	71

<b>3 Kurzcharakterisierung wichtiger Polymerwerkstoffe für konstruktive Anwendungen</b> .....	73
3.1 Thermoplaste .....	73
3.1.1 Polymerblends .....	86
3.1.2 Funktionspolymere .....	89
3.2 Elastomere .....	96
3.3 Duromere .....	99
3.4 Verstärkungsfasern .....	103
3.4.1 Glasfasern .....	104
3.4.1.1 Herstellung und Verstärkungsformen von Textilglas .....	104
3.4.1.2 Glasarten und Fasereigenschaften .....	105
3.4.2 Kohlenstoff-Fasern .....	105
3.4.3 Aramidfasern .....	106
3.4.4 Metallfasern, Whisker, keramische Fasern .....	106
<b>4 Eigenschaften – Werkstoffkennwerte – spezielle Prüfverfahren und Verhaltensweisen</b> .....	109
4.1 Verformungsverhalten unter uniaxialer, zügiger Zugbeanspruchung (Spannungs-Dehnungs-Versuch) .....	109
4.1.1 Molekulare Verformungs- und Schädigungsmechanismen .....	109
4.1.2 Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Kurven .....	111
4.1.3 Ermittlung von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen und Werkstoffkennwerten .....	112
4.1.4 Einfluss von Temperatur, Zeit und Feuchte auf Spannungs-Dehnungs-Kurven .....	116
4.1.5 Mathematische Beschreibung von Spannungs-Dehnungs-Kurven .....	120
4.2 Verformungsverhalten unter uniaxialer, langzeitiger, statischer Zugbeanspruchung (Zeitstand-Zug-Versuch) .....	120
4.2.1 Mathematische Beschreibung von Kriechkurven .....	122
4.3 Zähigkeit und Schlagzähigkeit .....	125
4.3.1 Zähigkeit aus dem Zugversuch .....	125
4.3.2 Zähigkeit aus dem Schlagbiegeversuch .....	125
4.3.3 Durchstoßversuch .....	128
4.4 Verhalten unter schwingender Beanspruchung .....	129
4.4.1 Ermittlung charakteristischer Ermüdungskennwerte .....	131
4.5 Querkontraktionszahl .....	134
4.6 Thermische Eigenschaften .....	137
4.6.1 Wärmedehnung .....	137
4.6.2 Formbeständigkeit .....	138
4.6.2.1 Elastizitätsmodul, Schubmodul als Funktion der Temperatur .....	138
4.6.2.2 Wärmeformbeständigkeitstemperatur .....	139
4.6.2.3 Erweichungstemperatur .....	139
4.6.3 Thermische Alterung .....	139
4.6.3.1 Sicherheitstechnische Aspekte .....	144
4.6.4 Zusammenfassende Bewertung des Temperatureinflusses .....	145

4.7	Reibungs- und Verschleißverhalten .....	146
4.7.1	Grundlagen .....	147
4.7.1.1	Adhäsion und Oberflächenenergie von Festkörpern .....	149
4.7.1.2	Deformationen und Hysteresisverluste .....	154
4.7.1.3	Rahmenbedingungen für adhäsiv und deformativ bedingtes Gleiten .....	155
4.7.2	Reibung und Verschleiß bei Polymerwerkstoff/Stahl-Paarungen .....	156
4.7.2.1	Einfluss der Oberflächenrauheit des Stahlpartners .....	158
4.7.2.2	Einfluss der relativen Molekülmasse .....	160
4.7.2.3	Einfluss des Feuchtegehalts im Polyamid .....	161
4.7.2.4	Einfluss energiereicher Bestrahlung .....	163
4.7.2.5	Einfluss der Bewegungsform und des Bewegungsablaufes ....	165
4.7.3	Reibung und Verschleiß bei Polymerwerkstoff/Polymerwerkstoff- Paarungen .....	166
4.7.3.1	Gleitreibung .....	166
4.7.3.2	Gleitverschleiß .....	169
4.7.4	Zusammenfassung der Einflüsse von Werkstoffeigenschaften auf Systemeigenschaften .....	169
4.7.5	Einfluss von Füll- und Verstärkungsstoffen .....	169
4.7.5.1	Einfluss von Fasern auf den Verschleiß .....	169
4.7.5.2	Einfluss von anderen, anorganischen Zusätzen .....	172
4.7.5.3	Einfluss von polymeren Zusätzen .....	174
4.7.5.4	Einfluss von polymeren und härteerhöhenden Zusätzen ....	175
4.7.5.5	Einfluss von Zusätzen auf amorphe Thermoplaste .....	177
4.7.6	Stick-Slip (Ruckgleiten) .....	177
4.7.6.1	Beeinflussung des Stick-Slip-Verhaltens durch Parameter des Gleitsystems .....	179
4.7.7	Strahlverschleiß .....	181
<b>5</b>	<b>Berechnen von mechanisch beanspruchten Strukturen an Beispielen geometrisch einfacher Bauteile und statisch bestimmter Lastfälle. ....</b>	<b>187</b>
5.1	Werkstoff- und verarbeitungsspezifische Probleme .....	187
5.1.1	Verformungsverhalten unter uniaxialer, zügiger Zugbeanspruchung ...	187
5.2	Festigkeitsnachweis .....	189
5.2.1	Grundsätzliches Vorgehen bei einer Festigkeitsbetrachtung .....	189
5.2.1.1	Dimensionierungskennwerte .....	190
5.2.1.2	Sicherheitsbeiwerte .....	192
5.2.1.3	Abminderungsfaktoren .....	192
5.2.2	Einachsiger Spannungszustand .....	193
5.2.2.1	Beispiel des dünnwandigen Rohres unter Innendruck .....	194
5.2.3	Mehrachsiges Spannungszustand .....	195
5.2.3.1	Versagenskriterien .....	196
5.2.3.2	Beispiele zum Belastungsfall der Scherung .....	198
5.3	Berechnung von Dehnungen und Verformungen .....	201
5.3.1	Linear-elastisches Materialverhalten .....	201
5.3.2	Nichtlinear-elastisches Materialverhalten .....	202

---

5.4	Spannungs- und Verformungsanalysen von biegebeanspruchten Strukturen mit Hilfe einer einfachen FE-Betrachtung . . . . .	207
5.5	Berechnung stoßartig beanspruchter Bauteile . . . . .	209
5.6	Zur Berechnung von Faserverbund-Strukturen . . . . .	210
5.6.1	Mechanische Eigenschaften von Laminaten . . . . .	211
5.6.1.1	Verformungsverhalten unter uniaxialer Zugbeanspruchung, Schädigungsgrenze . . . . .	211
5.6.1.2	Grundelastizitätsgrößen einer UD-Schicht . . . . .	211
5.6.1.3	Gemittelte Kennwerte von Mattenlaminaten . . . . .	213
5.6.2	Berechnungsverfahren . . . . .	215
5.6.2.1	Berechnung mit gemittelten Kennwerten . . . . .	215
5.6.2.2	Kontinuumstheorie . . . . .	216
5.6.2.3	Netztheorie . . . . .	216
5.7	Rechnergestützte Entwicklung . . . . .	216
5.7.1	CAD – Computer Aided Design . . . . .	216
5.7.2	Rapid Prototyping . . . . .	219
5.7.3	Rapid Tooling . . . . .	220
<b>6</b>	<b>Werkstoff- und beanspruchungsgerechte Konstruktion . . . . .</b>	<b>223</b>
6.1	Weiche Konstruktionen . . . . .	223
6.1.1	Elastizitätsmodul . . . . .	223
6.1.2	Flächenträgheitsmoment . . . . .	224
6.1.3	Beanspruchungsart . . . . .	225
6.2	Biegesteife Konstruktionen . . . . .	227
6.3	Biegeweiche-torsionssteife Konstruktionen . . . . .	229
6.4	Biegesteife-torsionsweiche Konstruktionen . . . . .	230
6.5	Torsionsfeste, torsionssteife Konstruktionen . . . . .	231
6.6	Biegesteife und torsionssteife Konstruktionen . . . . .	233
6.7	Torsionsweiche Konstruktionen . . . . .	234
6.8	Zugfeste-, zugsteife-torsionsweiche Konstruktionen . . . . .	235
6.9	Schubfeste, schubsteife Konstruktionen . . . . .	235
6.10	Drucknachgiebige und drucksteife Konstruktionen . . . . .	236
6.11	Multifunktionale Konstruktionen . . . . .	238
6.12	Wärmedehnungen und Wärmespannungen . . . . .	240
6.13	Gelenkverbindungen . . . . .	244
6.14	Kunststoff/Metall-Hybridkonstruktionen . . . . .	247
<b>7</b>	<b>Fertigungsgerechte Konstruktion . . . . .</b>	<b>251</b>
7.1	Formfüllung . . . . .	251
7.1.1	Simulation des Füllvorgangs . . . . .	253
7.1.2	Ursachen zur Entstehung von Orientierungen . . . . .	255
7.1.2.1	Auswirkungen von Orientierungen . . . . .	259
7.1.2.2	Beeinflussung von Orientierungen . . . . .	260
7.1.3	Ursachen zur Entstehung von Bindenähten und Luftpfehlungen . . . . .	264
7.1.3.1	Auswirkungen von Bindenähten und Luftpfehlungen . . . . .	265
7.1.3.2	Beeinflussung von Bindenähten und Luftpfehlungen . . . . .	267

7.2	Abkühlung und Erstarrung .....	273
7.2.1	Abkühlgeschwindigkeit .....	273
7.2.1.1	Auswirkungen der Abkühlgeschwindigkeit .....	273
7.2.1.2	Beeinflussung der Kühlgeschwindigkeit .....	274
7.2.2	Maßänderungen und Toleranzen .....	277
7.2.2.1	Schwindung .....	277
7.2.2.2	Nachschwindung .....	279
7.2.2.3	Toleranzen .....	279
7.2.3	Verzug .....	284
7.2.3.1	Ursachen für Verzug .....	284
7.2.3.2	Beeinflussung von Verzug .....	286
7.3	Entformung .....	289
7.3.1	Entformungsschräge .....	292
7.3.2	Entformung von Hinterschneidungen .....	292
7.3.2.1	Zwangsentformung .....	292
7.3.2.2	Werkzeugtechnische Maßnahmen .....	293
7.3.2.3	Schmelzkerne .....	295
7.3.3	Vermeiden von Hinterschneidungen .....	297
7.3.3.1	Änderungen des Designs .....	297
7.3.3.2	Durchtauchende Kerne (Durchblocken) .....	297
7.3.3.3	Mehrteilige Ausführungen .....	299
7.4	Mehrkomponenten-Spritzgießen .....	301
7.4.1	Zweifarbenspritzguss .....	302
7.4.2	Hart-Weich-Kombinationen .....	306
7.4.3	Gasinjektionstechnik (GIT) .....	311
7.4.4	Wasserinjektionstechnik (WIT) .....	317
7.4.5	Gasaußendrucktechnik (GAT) .....	317
<b>8</b>	<b>Biegeelemente</b> .....	<b>321</b>
8.1	Schnappverbindungen .....	321
8.1.1	Schnapphaken .....	327
8.1.1.1	Formvarianten .....	327
8.1.1.2	Berechnung .....	330
8.1.1.3	Zusatzfunktionen .....	331
8.1.2	Torsionsschnappverbindung .....	334
8.1.2.1	Formvarianten .....	334
8.1.2.2	Berechnung .....	335
8.1.3	Ringschnappverbindung .....	336
8.1.3.1	Formvarianten .....	336
8.1.3.2	Berechnung .....	337
8.1.3.3	Zusatzfunktionen .....	339
8.1.4	Segmentierte Ringschnappverbindung .....	341
8.1.4.1	Formvarianten .....	341
8.1.4.2	Berechnung .....	341
8.1.4.3	Zusatzfunktionen .....	342
8.2	Federelemente .....	344

---

8.2.1	Federn aus thermoplastischen Polymerwerkstoffen	344
8.2.1.1	Biegefeder	344
8.2.1.2	Zugfedern	346
8.2.1.3	Druckfedern	346
8.2.1.4	Drehfedern	350
8.2.2	Federn aus Faser-Kunststoff-Verbunden (GFK, CFK)	351
8.2.2.1	Blattfedern	351
8.3	Filmscharniere und Filmgelenke	354
8.3.1	Herstellung	354
8.3.1.1	Spritzgießen	354
8.3.1.2	Blasformen	357
8.3.1.3	Prägen	357
8.3.2	Gestaltung	358
8.3.3	Werkstoffe	359
8.3.4	Berechnung	360
8.3.4.1	Berechnung der Filmlänge und Filmdicke	361
8.3.5	Anwendungsbeispiele	363
8.3.5.1	Deckel/Gehäuseverbindungen	363
8.3.5.2	Vereinfachte Herstellung	364
8.3.5.3	Montagehilfe oder unverlierbare Anbindung	369
8.3.5.4	Dynamisch beanspruchte Filmgelenke	369
8.3.5.5	Bistabile Gelenke	370
<b>9</b>	<b>Schraubverbindungen</b>	<b>375</b>
9.1	Geformtes oder spanend gefertigtes Gewinde	376
9.1.1	Schrauben aus Polymerwerkstoff	376
9.1.2	Spritzgegossene, blasgeformte, spanend gefertigte Gewinde	378
9.1.3	Bewegungsgewinde	380
9.2	Gewindeeinsätze	381
9.2.1	Umspritzte Gewindebuchsen	381
9.2.2	Mit Ultraschall eingebettete Gewindebuchsen	381
9.2.3	Eingepresste Gewindebuchsen	382
9.2.4	Spreizeinsätze (Expansionseinsätze)	382
9.2.5	Eingeschraubte Einsätze	383
9.2.6	Einsätze aus Polymerwerkstoffen	383
9.2.7	Vergleichende Bewertung der verschiedenen Einsätze	383
9.2.8	Verhalten unter dynamischer Belastung	387
9.3	Gewindeformende Schrauben	387
9.3.1	Schraubenformen und -geometrien	387
9.3.1.1	Flankenwinkel	389
9.3.1.2	Selbsthemmung	389
9.3.2	Gestaltung des Einschraubauges (Tubus)	389
9.3.2.1	Einschraubtiefe	390
9.3.2.2	Kernlochdurchmesser	390
9.3.2.3	Entlastungsbohrung	391
9.3.2.4	Außendurchmesser	391

---

9.3.3	Berechnung von Kenngrößen einer Schraubverbindung	393
9.3.3.1	Eindrehmoment	393
9.3.3.2	Überdrehmoment	395
9.3.3.3	Auszugkraft	395
9.3.3.4	Anziehmoment und Vorspannkraft	396
9.3.3.5	Montagebedingungen	398
<b>10</b>	<b>Rippenkonstruktionen</b>	<b>399</b>
10.1	Vergleich mit anderen Versteifungsmaßnahmen	399
10.1.1	Erhöhung des Elastizitätsmoduls	399
10.1.2	Vergrößerung der Wanddicke	400
10.1.3	Sicken	401
10.2	Allgemeine Aspekte zur Rippenversteifung	402
10.2.1	Rippenhöhe	402
10.2.2	Rippenlage	403
10.2.3	Rippenanzahl (Werkstoffaufwand)	405
10.2.4	Einspannung	407
10.3	Gestaltungsregeln für spritzgegossene Verrippungen	408
10.3.1	Rippendicke	408
10.3.2	Kühlzeit	409
10.3.3	Anspritzrichtung	410
10.3.4	Rippenkreuzungspunkte (Knoten)	412
10.4	Gestaltungsregeln für Rippen nach den GID-Verfahren	413
10.5	Gestaltungsregeln für blasgeformte Rippen und Sicken	414
10.5.1	Blasgeformte Sicken	415
10.5.2	Blasgeformte Rippen	416
10.6	Gestaltungsregeln für gepresste Rippen	417
10.6.1	Handwerkliche Verarbeitung (Handlaminierverfahren)	418
10.6.2	Pressverfahren	418
<b>11</b>	<b>Zahnräder</b>	<b>421</b>
11.1	Berechnung der Zahn- und Flankentemperatur von Stirnrädern	423
11.1.1	Blok'sche Blitztemperaturhypothese	424
11.1.2	Temperaturrechnung nach TAKANASHI	424
11.1.3	Temperaturrechnung nach HACHMANN und STRICKLE	427
11.1.4	Vergleich der Temperaturberechnungsverfahren	428
11.1.5	Optimierte Temperaturrechnung	429
11.1.5.1	Temperaturmessungen an Kunststoff/Stahl-Paarungen nach [11.12]	429
11.1.5.2	Temperaturmessungen an Kunststoff/Kunststoff-Paarungen nach [11.36]	432
11.1.5.3	Relative Einschaltdauer	432
11.1.5.4	Optimierte Zahlenwertgleichung	433
11.2	Berechnung der Tragfähigkeit	435
11.2.1	Zahnschäden	435
11.2.2	Allgemeine Kenngrößen	436



11.2.3	Berechnung der Zahnfußtragfähigkeit.....	437
11.2.4	Berechnung der Zahnflankentragfähigkeit.....	444
11.2.5	Berechnung der Zahnverformung.....	450
11.3	Gestaltung.....	453
11.3.1	Spritzgießen.....	453
11.3.2	Spanende Herstellung.....	456
11.3.3	Wellen-/Naben-Verbindung.....	457
11.3.3.1	Reibschlussverbindung.....	458
11.3.3.2	Formschlussverbindung.....	460
11.3.3.3	Vorgespannter Formschluss.....	462
<b>12</b>	<b>Gleitlager.....</b>	<b>467</b>
12.1	Gleitlagerschäden.....	470
12.2	Berechnung der Belastbarkeit.....	471
12.2.1	Berechnung der mittleren Lagertemperatur.....	471
12.2.2	Berechnung der Gleitflächentemperatur.....	474
12.2.3	Statische Belastbarkeit.....	475
12.2.3.1	Beanspruchung des Lagerwerkstoffs.....	475
12.2.3.2	Deformation der Lagerschale.....	479
12.2.4	Dynamische Belastbarkeit.....	483
12.2.4.1	Dauerbetrieb.....	483
12.2.4.2	Aussetzbetrieb.....	484
12.2.4.3	Verschleiß.....	485
12.3	Gestaltung.....	487
12.3.1	Lagerspiel.....	487
12.3.2	Wanddicke.....	490
12.3.3	Herstellung.....	490
12.3.4	Gestaltungsbeispiele.....	490
<b>13</b>	<b>Laufrollen und Laufräder.....</b>	<b>493</b>
13.1	Rollenschäden.....	494
13.2	Berechnung der Tragfähigkeit.....	496
13.2.1	Pressungskennwert als näherungsweise Bemessungsgrenze.....	496
13.2.2	Deformation unter statischer Last.....	500
13.2.3	Dynamisch beanspruchte Laufrollen.....	505
13.2.3.1	Frei laufende Rollen (ohne Antrieb).....	506
13.2.3.2	Angetriebene Rollen.....	511
<b>14</b>	<b>Anleitungen zur Bedienung der Rechenprogramme.....</b>	<b>517</b>
14.1	Anleitung zur Berechnung von Biegeelementen mit dem Programm BEAMS.....	517
14.1.1	Berechnung der Verformung unter kurzzeitiger Lasteinwirkung.....	517
14.1.2	Berechnung der Verformung unter langzeitiger Lasteinwirkung.....	519
14.1.3	Berechnung der Relaxation unter langzeitiger Lasteinwirkung.....	520

14.2 Anleitung zur Berechnung von Schnappverbindungen mit dem Programm SNAPS .....	520
14.3 Anleitung zur Berechnung von Schraubverbindungen mit dem Programm SCREWS .....	522
<b>Anhang</b> .....	525
Polymerwerkstoffe und ihre Kurzzeichen .....	525
<b>Index</b> .....	527