

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

Vorwort zur vierten Auflage	V
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	12
1.1.4 Allgemeiner Maschinenbau	17
1.1.5 Apparatebau	18
1.1.6 Bauwesen	21
1.2 Prognose	25
2 Struktur und Eigenschaften	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

3 Kurzcharakterisierung wichtiger Polymerwerkstoffe für konstruktive Anwendungen	73
3.1 Thermoplaste	73
3.1.1 Polymerblends	86
3.1.2 Funktionspolymere	89
3.2 Elastomere	96
3.3 Duomere	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
4 Eigenschaften – Werkstoffkennwerte – spezielle Prüfverfahren und Verhaltensweisen	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
5	Berechnen von mechanisch beanspruchten Strukturen an Beispielen geometrisch einfacher Bauteile und statisch bestimmter Lastfälle.	187
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
6	Werkstoff- und beanspruchungsgerechte Konstruktion	223
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
7	Fertigungsgerechte Konstruktion	251
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
8	Biegeelemente	321
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
9	Schraubverbindungen	375
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
10	Rippenkonstruktionen	399
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
11	Zahnräder	421
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
12	Gleitlager.....	467
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
13	Laufrollen und Laufräder.....	493
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
14	Anleitungen zur Bedienung der Rechenprogramme.....	517
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
Anhang	525
Polymerwerkstoffe und ihre Kurzzeichen	525
Index	527