

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	19
1.1	Rheologie, Rheometrie, und Viskoelastizität.....	19
1.2	Deformation und Fließverhalten.....	20
2	Fließverhalten und Viskosität	23
2.1	Einleitung	23
2.2	Begriffsdefinitionen.....	23
2.2.1	Schubspannung.....	24
2.2.2	Scherrate	24
2.2.3	Viskosität	29
2.3	Scherbelastungsabhängiges Fließverhalten.....	31
2.3.1	Idealviskoses Fließverhalten nach Newton.....	31
2.4	Strömungsformen im Zwei-Platten-Modell	34
3	Rotationsversuche.....	35
3.1	Einleitung	35
3.2	Grundlagen.....	35
3.2.1	Versuchsarten Scherraten- und Schubspannungsvorgabe, Rohdaten und rheologische Messgrößen	35
3.3	Fließkurven und Viskositätsfunktionen.....	36
3.3.1	Versuchsbeschreibung	36
3.3.2	Scherverdünnendes Fließverhalten	40
3.3.2.1	Strukturen von Polymeren mit scherverdünnendem Verhalten.....	42
3.3.2.2	Strukturen von Dispersionen mit scherverdünnendem Verhalten	47
3.3.3	Scherverdickendes Fließverhalten.....	47
3.3.3.1	Strukturen von Polymeren mit scherverdickendem Verhalten	51
3.3.3.2	Strukturen von Dispersionen mit scherverdickendem Verhalten	51
3.3.4	Fließgrenze.....	52
3.3.4.1	Auswertung der Fließgrenze über Fließkurven	53
3.3.4.2	Fließgrenzenbestimmung über Anpassungsgeraden im Schubspannungs-/Deformations-Diagramm	54
3.3.4.3	Weitere Informationen zur Fließgrenze	56
3.3.5	Überblick: Fließkurven und Viskositätsfunktionen	61
3.3.6	Anpassungsfunktionen für Fließ- und Viskositätskurven	62
3.3.6.1	Modellfunktion für idealviskoses Fließverhalten nach Newton	63
3.3.6.2	Modellfunktionen für scherverdünnendes und scherverdickendes Fließverhalten	63
3.3.6.3	Modellfunktionen für Fließverhalten mit Null-Viskosität und Unendlich-Viskosität	64
3.3.6.4	Modellfunktionen für Fließkurven mit Fließgrenze.....	65
3.3.7	Wirkung rheologischer Additive in wässrigen Dispersionen	68
3.4	Zeitabhängiges Fließverhalten und Viskositätsfunktion	73

3.4.1	Versuchsbeschreibung	73
3.4.2	Zeitabhängiges Fließverhalten ohne Aushärtung der Messprobe.....	73
3.4.2.1	Strukturabbau und -wiederaufbau (Thixotropie und Rheopexie)	75
3.4.2.2	Testmethoden zur Untersuchung thixotropen Verhaltens	77
3.4.3	Zeitabhängiges Fließverhalten mit Aushärtung der Messprobe	84
3.5	Temperaturabhängiges Fließverhalten und Viskositätsfunktion	85
3.5.1	Versuchsbeschreibung	85
3.5.2	Temperaturabhängiges Fließverhalten ohne Aushärtung der Messprobe.....	86
3.5.3	Temperaturabhängiges Fließverhalten mit Aushärtung der Messprobe.....	86
3.5.4	Anpassungsfunktionen für Kurven der temperaturabhängigen Viskosität....	88
3.6	Druckabhängiges Fließverhalten und Viskositätsfunktion	90
4	Elastisches Verhalten und Schubmodul	93
4.1	Einleitung	93
4.2	Begriffsdefinitionen.....	93
4.2.1	Deformation	94
4.2.2	Schubmodul.....	94
4.3	Scherbelastungsabhängiges Deformationsverhalten	97
4.3.1	Idealelastisches Deformationsverhalten nach Hooke	97
5	Viskoelastisches Verhalten.....	100
5.1	Einleitung	100
5.2	Grundlagen.....	100
5.2.1	Viskoelastische Flüssigkeiten nach Maxwell	100
5.2.1.1	Das Maxwell-Modell.....	100
5.2.1.2	Anwendungsbeispiele für das Verhalten von VE-Flüssigkeiten in der Praxis.....	103
5.2.2	Viskoelastische Feststoffe nach Kelvin/Voigt.....	105
5.2.2.1	Das Kelvin/Voigt-Modell.....	105
5.2.2.2	Anwendungsbeispiele für das Verhalten von VE-Festkörpern in der Praxis.....	107
5.3	Normalspannungen.....	109
6	Kriechversuch	112
6.1	Einleitung	112
6.2	Grundlagen.....	112
6.2.1	Versuchsbeschreibung	112
6.2.2	Idealelastisches Verhalten	113
6.2.3	Idealviskoses Verhalten.....	114
6.2.4	Viskoelastisches Verhalten.....	114
6.3	Auswertung.....	115
6.3.1	Verhalten der Moleküle.....	115
6.3.2	Das Burgers-Modell	116
6.3.3	Kurvendiskussion	117
6.3.4	Begriffsdefinitionen.....	119
6.3.4.1	Null-Viskosität	119
6.3.4.2	Kriechkomplianz und Kriecherholungs-Komplianz	120
6.3.4.3	Retardationszeit.....	122
6.3.4.4	Retardationszeitspektrum	123
6.3.5	Datenkonversion.....	124
6.3.6	Bestimmung der Molmassenverteilung.....	125

7	Relaxationsversuch.....	126
7.1	Einleitung	126
7.2	Grundlagen.....	126
7.2.1	Versuchsbeschreibung	126
7.2.2	Idealelastisches Verhalten	128
7.2.3	Idealviskoses Verhalten.....	128
7.2.4	Viskoelastisches Verhalten.....	128
7.3	Auswertung.....	129
7.3.1	Verhalten der Moleküle.....	129
7.3.2	Kurvendiskussion	130
7.3.3	Begriffsdefinitionen.....	131
7.3.3.1	Relaxationsmodul.....	131
7.3.3.2	Relaxationszeit.....	132
7.3.3.3	Relaxationszeit-Spektrum.....	133
7.3.4	Datenkonversion	135
7.3.5	Bestimmung der Molmassenverteilung.....	137
8	Oszillationsversuche.....	138
8.1	Einleitung	138
8.2	Grundlagen.....	138
8.2.1	Idealelastisches Verhalten	139
8.2.2	Idealviskoses Verhalten.....	141
8.2.3	Viskoelastisches Verhalten.....	141
8.2.4	Begriffsdefinitionen.....	142
8.2.5	Versuchsarten Deformations- und Schubspannungsvorgabe, Rohdaten und rheologische Parameter.....	147
8.3	Amplitudentest.....	149
8.3.1	Versuchsbeschreibung	149
8.3.2	Stukturcharakter einer Messprobe.....	150
8.3.3	Grenze des LVE-Bereichs	151
8.3.3.1	LVE-Bereich und Grenzwert der Deformation.....	152
8.3.3.2	LVE-Bereich und Grenzwert der Schubspannung.....	155
8.3.4	Bestimmung der Nachgebrenze und Fließgrenze mit dem Amplitudentest	155
8.3.4.1	Nachgebrenze τ_y (yield point)	155
8.3.4.2	Fließgrenze τ_f (flow point)	156
8.3.4.3	Nachgiebigkeitsbereich zwischen Nachgebrenze und Fließgrenze	156
8.3.4.4	Bewertung der beiden Begriffe Nachgebrenze und Fließgrenze	157
8.3.4.5	Messprogramme in Kombination mit Amplitudentests	157
8.3.5	Frequenzabhängigkeit beim Amplitudentest.....	158
8.3.6	SAOS- und LAOS-Tests, und Lissajous-Diagramme.....	159
8.4	Frequenztest	163
8.4.1	Versuchsbeschreibung	164
8.4.2	Verhalten von unvernetzten Polymeren (Lösungen und Schmelzen).....	165
8.4.2.1	Einfaches Maxwell-Modell für Polymere mit enger Molmassenverteilung (MMV)	165
8.4.2.2	Verallgemeinertes Maxwell-Modell für Polymere mit breiter MMV	169
8.4.3	Verhalten von vernetzten Polymeren.....	172
8.4.4	Verhalten von Dispersionen und Gelen.....	175
8.4.5	Vergleich von Überstrukturen mit Hilfe von Frequenzkurven	178
8.4.6	Mehrfrequenz-Versuch (Multiwave-Test).....	178

8.4.7	Datenkonversion.....	180
8.5	Zeitabhängiges Verhalten bei konstanten dynamisch-mechanischen und isothermen Bedingungen	180
8.5.1	Versuchsbeschreibung	180
8.5.2	Zeitabhängiges Verhalten ohne Aushärtung der Messprobe	181
8.5.2.1	Strukturabbau und -wiederaufbau (Thixotropie und Rheopexie)	182
8.5.2.2	Testmethoden zur Untersuchung thixotropen Verhaltens	184
8.5.3	Zeitabhängiges Verhalten mit Aushärtung der Messprobe	190
8.6	Temperatur-abhängiges Verhalten bei konstanten dynamisch-mechanischen Bedingungen	193
8.6.1	Versuchsbeschreibung	194
8.6.2	Temperatur-abhängiges Verhalten ohne Aushärtung der Messprobe	195
8.6.2.1	Temperaturkurven und Strukturen von Polymeren.....	195
8.6.2.2	Temperaturkurven von Dispersionen und Gelen.....	202
8.6.3	Temperatur-abhängiges Verhalten mit Aushärtung der Messprobe	205
8.6.4	Thermoanalyse (TA)	207
8.7	Zeit-/Temperatur-Verschiebung	209
8.7.1	Temperatur-Verschiebungsfaktor nach der WLF-Methode.....	209
8.8	Die Cox/Merz-Regel	215
8.9	Kombinierte Rotations- und Oszillationsversuche	216
8.9.1	Vorgabe von Rotation und Oszillation in Serie.....	216
8.9.2	Überlagerung von Rotation und Oszillation	216
9	Komplexes Verhalten von Tensidsystemen.....	219
9.1	Tensidsysteme.....	219
9.1.1	Tensidstrukturen und Mizellen.....	219
9.1.2	Emulsionen.....	228
9.1.3	Mischungen von Tensiden und Polymeren, tensid-ähnliche Polymere.....	229
9.1.4	Anwendungen von Tensidsystemen	231
9.2	Rheologisches Verhalten von Tensidsystemen.....	232
9.2.1	Gewöhnliches Scherverhalten.....	233
9.2.2	Scherinduzierte Effekte, Scherschichtung und „Rheo-Chaos“	235
10	Messsysteme.....	238
10.1	Einleitung	238
10.2	Konzentrische Zylinder-Messsysteme	238
10.2.1	Zylinder-Messsysteme im Allgemeinen	238
10.2.1.1	Geometrie von Zylindersystemen mit weitem Scherspalt.....	238
10.2.1.2	Betriebsarten	239
10.2.1.3	Berechnungen.....	239
10.2.2	Konzentrische Zylinder-Messsysteme mit engem Spalt nach ISO 3219	240
10.2.2.1	Geometrie	240
10.2.2.2	Berechnungen.....	242
10.2.2.3	Umrechnung zwischen Rohdaten und rheologischen Parametern	243
10.2.2.4	Fließinstabilität und Sekundärströmungen im Zylinder-MS	244
10.2.2.5	Vor- und Nachteile von Zylinder-Messsystemen	245
10.2.3	Doppelspalt-Messsysteme.....	246
10.2.4	Zylinder-Messsysteme für hohe Scherraten (High-Shear)	247
10.3	Kegel/Platte-Messsysteme.....	247
10.3.1	Geometrie	247
10.3.2	Berechnungen.....	248

10.3.3	Umrechnung zwischen Rohdaten und rheologischen Parametern	249
10.3.4	Fließinstabilität und Sekundärströmungen.....	249
10.3.5	Kegelspitzenabnahme und Spalteinstellung	250
10.3.6	Maximal zulässige Partikelgröße	251
10.3.7	Befüllung des Kegel/Platte-Messsystems.....	251
10.3.8	Vorteile und Nachteile von Kegel/Platte-Messsystemen	252
10.4	Platte/Platte-Messsysteme.....	254
10.4.1	Geometrie	254
10.4.2	Berechnungen.....	254
10.4.3	Umrechnung zwischen Rohdaten und rheologischen Parametern	256
10.4.4	Fließinstabilität und Sekundärströmungen.....	256
10.4.5	Empfehlungen für den Plattenabstand	256
10.4.6	Automatische Spalt-Einstellung und automatische Spalt-Nachregelung mit Hilfe der Normalkraft-Steuerung	257
10.4.7	Bestimmung des Temperaturgradienten in der Messprobe.....	258
10.4.8	Vorteile und Nachteile von Platte/Platte-Messsystemen	258
10.5	Mooney/Ewart-Messsystem	260
10.6	Relativ-Messsysteme.....	260
10.6.1	Messsysteme mit sandgestrahlter oder profilierter Oberfläche.....	261
10.6.2	Scheiben-, stift- und kugelförmige Spindeln.....	262
10.6.3	Krebs-Spindeln.....	265
10.6.4	Pasten-Spindeln, Stift- und Flügel-Drehkörper.....	266
10.6.5	Kugel-Messsystem (Rotation auf einer Kreisbahn).....	267
10.6.6	Weitere Relativ-Messsysteme.....	268
10.7	Messsysteme für feste Torsionsstäbe	269
10.7.1	Probenstäbe mit rechteckigem Querschnitt.....	270
10.7.2	Probenstäbe mit kreisförmigem Querschnitt.....	271
10.7.3	Verbundwerkstoffe	272
10.8	Spezielle Messeinrichtungen.....	274
10.8.1	Besondere Messbedingungen mit Beeinflussung der Rheologie.....	274
10.8.1.1	Magnetische Felder für magneto-rheologische Flüssigkeiten.....	274
10.8.1.2	Elektrische Felder für elektro-rheologische Flüssigkeiten.....	275
10.8.1.3	Immobilisierung von Suspensionen durch Flüssigkeitsentzug.....	275
10.8.1.4	Ultraviolettes Licht für UV-härtende Materialien	275
10.8.2	Rheo-optische Messeinrichtungen	276
10.8.2.1	Begriffe aus der Optik.....	276
10.8.2.2	Mikroskopie.....	281
10.8.2.3	Messzellen für Anisotropie mit optischer Drehung und Doppelbrechung	282
10.8.2.4	SALS für gebeugte Lichtquanten	282
10.8.2.5	SAXS für gebeugte Röntgenstrahlquanten.....	283
10.8.2.6	SANS für gestreute Neutronen	284
10.8.2.7	Geschwindigkeitsprofil in Scherströmungen.....	285
10.8.3	Andere spezielle Messeinrichtungen.....	285
10.8.3.1	Grenzflächen-Rheologie mit zweidimensionalen Flüssigkeitsfilmen.....	285
10.8.3.2	Dielektrische Analyse mit elektrischen Dipolen	286
10.8.3.3	NMR mit Resonanz von magnetisch aktiven Atomkernen	287
10.8.4	Andere Prüfungen als Scherversuche	287
10.8.4.1	Dehnversuche, Dehnviskosität und Dehnrheologie	288
10.8.4.2	Tack-Test, Klebrigkeit und Zügigkeit.....	291
10.8.4.3	Tribologie	294

11	Messgeräte.....	297
11.1	Einleitung	297
11.2	Kurzer Überblick: Methoden zur Prüfung von Viskosität und Elastizität.....	297
11.2.1	Sehr einfache Bestimmungen.....	297
11.2.2	Fließen auf horizontaler Ebene.....	298
11.2.3	Ausbreitmaß auf horizontaler Ebene nach Heben eines Behälters	299
11.2.4	Fließen auf schiefer Ebene.....	300
11.2.5	Fließen auf vertikaler Ebene oder über eine Hilfseinrichtung.....	300
11.2.6	Fließen in Kanal, Trog, Schale	301
11.2.7	Auslaufbecher und andere drucklose Kapillar-Viskosimeter.....	302
11.2.8	Geräte mit steigenden, sinkenden, fallenden, rollenden Elementen	302
11.2.9	Penetrometer, Konsistometer, Texture Analyzer	304
11.2.10	Druckbetriebene Zylinder- und Kapillargeräte.....	306
11.2.11	Einfache Versuche mit Rotationsviskosimetern	307
11.2.12	Geräte mit vibrierenden oder oszillierenden Elementen	310
11.2.13	Rotations- und Oszillations-Vulkameter für Gummi-Prüfungen.....	311
11.2.14	Zug-Prüfgeräte	313
11.2.15	Kompressions- oder Druck-Prüfgeräte	314
11.2.16	Linear-Schubgerät, Scherpresse, Ziehprüfer	315
11.2.17	Biege-Prüfgeräte	315
11.2.18	Torsions-Prüfgeräte	315
11.3	Auslaufbecher.....	316
11.3.1	Der ISO-Becher	317
11.3.1.1	Kapillarlänge.....	318
11.3.1.2	Berechnungen.....	318
11.3.1.3	Fließinstabilität, Sekundärströmungen und turbulente Fließbedingungen in Auslaufbechern	320
11.3.2	Andere Bauarten von Auslaufbechern.....	321
11.4	Kapillar-Viskosimeter	322
11.4.1	Glaskapillar-Viskosimeter.....	322
11.4.1.1	Berechnungen.....	324
11.4.1.2	Bestimmung der Molmasse von Polymeren über verdünnte Polymerlösungen.....	326
11.4.1.3	Bestimmung des Viskositäts-Index VI von Petrochemikalien	331
11.4.2	Druckbetriebene Kapillar-Viskosimeter	332
11.4.2.1	MFR- und MVR-Tester mit Gewichtsantrieb („Niederdruck-Kapillarviskosimeter“)	332
11.4.2.2	Hochdruck-Kapillarviskosimeter mit elektrischem Antrieb zur Prüfung von hochviskosen und pastenartigen Materialien	336
11.4.2.3	Hochdruck-Kapillarviskosimeter mit Gasdruck zur Prüfung von Flüssigkeiten	339
11.5	Kugelfall-Viskosimeter	342
11.6	Rotations- und Oszillations-Rheometer.....	343
11.6.1	Bauarten von Rheometern	345
11.6.2	Regelkreise.....	346
11.6.3	Drehmoment-Messeinrichtungen	349
11.6.4	Winkel- oder Drehzahl-Messeinrichtungen	350
11.6.5	Lagerung.....	351
11.6.6	Temperiersysteme.....	353

12	Leitfaden für rheologische Versuche	356
12.1	Messsystem-Auswahl.....	356
12.2	Rotationsversuche.....	356
12.2.1	Fließ- und Viskositätskurven.....	356
12.2.2	Zeitabhängiges Fließverhalten (Rotation)	357
12.2.3	Sprungversuch (Rotation): Strukturabbau und -wiederaufbau („Thixotropie“)	357
12.2.4	Temperatur-abhängiges Fließverhalten (Rotation)	358
12.3	Oszillationsversuche	358
12.3.1	Amplitudentest.....	358
12.3.2	Frequenztest.....	359
12.3.3	Zeitabhängiges viskoelastisches Verhalten (Oszillation)	359
12.3.4	Sprungversuch (Oszillation): Strukturabbau und -wiederaufbau („Thixotropie“)	360
12.3.5	Temperatur-abhängiges viskoelastisches Verhalten (Oszillation).....	360
12.4	Wahl der Versuchsart	361
12.4.1	Ruheverhalten.....	361
12.4.2	Fließverhalten.....	362
12.4.3	Abbau und Wiederaufbau der Struktur („thixotropes Verhalten“, z.B. von Beschichtungen).....	363
13	Rheologen und die historische Entwicklung der Rheologie	364
13.1	Entwicklung bis zum 19. Jahrhundert.....	364
13.2	Entwicklung zwischen 1800 und 1900.....	368
13.3	Entwicklung zwischen 1900 und 1949.....	374
13.4	Entwicklung zwischen 1950 und 1979.....	383
13.5	Entwicklung ab 1980	386
14	Anhang	390
14.1	Verwendete Zeichen, Symbole und Abkürzungen.....	390
14.2	Griechisches Alphabet.....	399
14.3	Umrechnung von Einheiten.....	399
15	Literatur	403
15.1	Publikationen und Bücher.....	403
15.2	ISO-Normen (International Standards Organisation).....	415
15.3	ASTM-Normen (American Society for Testing and Materials).....	417
15.4	DIN-, DIN EN-, DIN EN ISO- und EN-Normen (Deutsche Industrie Norm, Europäische Normen).....	422
15.5	Wichtige Normen für Anwender von Rotationsrheometern.....	426
Lebenslauf	427	
Index	429	