

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	19
1.1	Rheologie, Rheometrie, und Viskoelastizität.....	19
1.2	Deformation und Fließverhalten.....	21
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	31
2.4	Strömungsformen im Zwei-Platten-Modell	34
3	Rotationsversuche.....	36
3.1	Einleitung	36
3.2	Grundlagen.....	36
3.2.1	Versuchsarten Scherraten- und Schubspannungsvorgabe, Rohdaten und rheologische Messgrößen	36
3.3	Fließkurven und Viskositätsfunktionen.....	37
3.3.1	Versuchsbeschreibung	37
3.3.2	Scherverdünnendes Fließverhalten	41
3.3.2.1	Strukturen von Polymeren mit scherverdünnendem Verhalten.....	43
3.3.2.2	Strukturen von Dispersionen mit scherverdünnendem Verhalten	48
3.3.3	Scherverdickendes Fließverhalten.....	48
3.3.3.1	Strukturen von Polymeren mit scherverdickendem Verhalten	52
3.3.3.2	Strukturen von Dispersionen mit scherverdickendem Verhalten	53
3.3.4	Fließgrenze.....	54
3.3.4.1	Auswertung der Fließgrenze über Fließkurven	55
3.3.4.2	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 von Rheologie-Additiven 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	86
3.5.1	Versuchsbeschreibung	86
3.5.2	Temperaturabhängiges Fließverhalten ohne Aushärtung der Messprobe	87
3.5.3	Temperaturabhängiges Fließverhalten mit Aushärtung der Messprobe	88
3.5.4	Anpassungsfunktionen für Kurven der temperaturabhängigen Viskosität	90
3.6	Druckabhängiges Fließverhalten und Viskositätsfunktion	92
4	Elastisches Verhalten und Schubmodul	97
4.1	Einleitung	97
4.2	Begriffsdefinitionen.....	97
4.2.1	Deformation	98
4.2.2	Schubmodul.....	98
4.3	Scherbelastungsabhängiges Deformationsverhalten	101
4.3.1	Idealelastisches Deformationsverhalten nach Hooke	101
4.4	Auswertung der Fließgrenze über Anpassungsgeraden im Schubspannungs-/Deformations-Diagramm	103
5	Viskoelastisches Verhalten.....	107
5.1	Einleitung	107
5.2	Grundlagen.....	107
5.2.1	Viskoelastische Flüssigkeiten nach Maxwell.....	107
5.2.1.1	Das Maxwell-Modell.....	107
5.2.1.2	Anwendungsbeispiele für das Verhalten von VE-Flüssigkeiten in der Praxis	110
5.2.2	Viskoelastische Feststoffe nach Kelvin/Voigt.....	112
5.2.2.1	Das Kelvin/Voigt-Modell.....	112
5.2.2.2	Anwendungsbeispiele für das Verhalten von VE-Festkörpern in der Praxis ..	114
5.3	Normalspannungen.....	116
6	Kriechversuch	121
6.1	Einleitung	121
6.2	Grundlagen.....	121
6.2.1	Versuchsbeschreibung	121
6.2.2	Idealelastisches Verhalten	122
6.2.3	Idealviskoses Verhalten.....	123
6.2.4	Viskoelastisches Verhalten.....	123
6.3	Auswertung.....	124
6.3.1	Verhalten der Moleküle.....	124
6.3.2	Das Burgers-Modell.....	125
6.3.3	Kurvendiskussion	126
6.3.4	Begriffsdefinitionen.....	128
6.3.4.1	Null-Viskosität	128
6.3.4.2	Kriechkomplianz und Kriecherholungs-Komplianz	129
6.3.4.3	Retardationszeit.....	131
6.3.4.4	Retardationszeit-Spektrum.....	132
6.3.5	Datenkonversion.....	133
6.3.6	Bestimmung der Molmassenverteilung.....	134
6.4	Auswertung der Fließgrenze über Kriechversuche.....	134

7	Relaxationsversuch.....	136
7.1	Einleitung	136
7.2	Grundlagen.....	136
7.2.1	Versuchsbeschreibung	136
7.2.2	Idealelastisches Verhalten	138
7.2.3	Idealviskoses Verhalten.....	138
7.2.4	Viskoelastisches Verhalten.....	138
7.3	Auswertung.....	139
7.3.1	Verhalten der Moleküle.....	139
7.3.2	Kurvendiskussion	140
7.3.3	Begriffsdefinitionen.....	141
7.3.3.1	Relaxationsmodul.....	141
7.3.3.2	Relaxationszeit.....	142
7.3.3.3	Relaxationszeit-Spektrum.....	143
7.3.4	Datenkonversion	145
7.3.5	Bestimmung der Molmassenverteilung.....	147
8	Oszillationsversuche.....	149
8.1	Einleitung	149
8.2	Grundlagen.....	149
8.2.1	Idealelastisches Verhalten	150
8.2.2	Idealviskoses Verhalten.....	152
8.2.3	Viskoelastisches Verhalten.....	152
8.2.4	Begriffsdefinitionen.....	153
8.2.5	Versuchsarten Deformations- und Schubspannungsvorgabe, Rohdaten und rheologische Parameter.....	158
8.3	Amplitudentest.....	160
8.3.1	Versuchsbeschreibung	161
8.3.2	Stukturcharakter einer Messprobe.....	162
8.3.3	Grenze des LVE-Bereichs	163
8.3.3.1	Grenzwert des LVE-Bereichs als Deformationswert.....	164
8.3.3.2	Grenzwert des LVE-Bereichs als Schubspannungswert.....	168
8.3.4	Bestimmung der Nachgebgränze und Fließgränze mit dem Amplitudentest	168
8.3.4.1	Nachgebgränze (yield point).....	168
8.3.4.2	Fließgränze (flow point).....	169
8.3.4.3	Nachgiebigkeitsbereich zwischen Nachgebgränze und Fließgränze	169
8.3.4.4	Bewertung der beiden Begriffe Nachgebgränze und Fließgränze	170
8.3.4.5	Messprogramme in Kombination mit Amplitudentests	171
8.3.5	Frequenzabhängigkeit beim Amplitudentest.....	172
8.3.6	SAOS- und LAOS-Tests, und Lissajous-Diagramme.....	174
8.4	Frequenztest	178
8.4.1	Versuchsbeschreibung	178
8.4.2	Verhalten von unvernetzten Polymeren (Lösungen und Schmelzen).....	180
8.4.2.1	Einfaches Maxwell-Modell für Polymere mit enger Molmassenverteilung (MMV)	180
8.4.2.2	Verallgemeinertes Maxwell-Modell für Polymere mit breiter MMV	184
8.4.3	Verhalten von vernetzten Polymeren	187
8.4.4	Verhalten von Dispersionen und Gelen.....	190
8.4.5	Vergleich von Überstrukturen mit Hilfe von Frequenzkurven	194
8.4.6	Mehrfrequenz-Versuch (Multiwave-Test).....	194

8.4.7	Datenkonversion.....	195
8.5	Zeitabhängiges Verhalten bei konstantendynamisch-mechanischen und isothermen Bedingungen.....	196
8.5.1	Versuchsbeschreibung	196
8.5.2	Zeitabhängiges Verhalten ohne Aushärtung der Messprobe	197
8.5.2.1	Strukturabbau und -wiederaufbau (Thixotropie und Rheopexie)	198
8.5.2.2	Testmethoden zur Untersuchung thixotropen Verhaltens	199
8.5.3	Zeitabhängiges Verhalten mit Aushärtung der Messprobe	204
8.6	Temperatur-abhängiges Verhalten bei konstanten dynamisch-mechanischen Bedingungen	208
8.6.1	Versuchsbeschreibung	209
8.6.2	Temperatur-abhängiges Verhalten ohne Aushärtung der Messprobe	210
8.6.2.1	Temperaturkurven und Strukturen von Polymeren.....	210
8.6.2.2	Temperaturkurven von Dispersionen und Gelen.....	218
8.6.3	Temperatur-abhängiges Verhalten mit Aushärtung der Messprobe	222
8.6.4	Thermoanalyse (TA)	224
8.7	Zeit-/Temperatur-Verschiebung	226
8.7.1	Temperatur-Verschiebungsfaktor nach der WLF-Methode	227
8.8	Die Cox/Merz-Beziehung.....	232
8.9	Kombinierte Rotations- und Oszillationsversuche	233
8.9.1	Vorgabe von Rotation und Oszillation in Serie.....	233
8.9.2	Überlagerung von Oszillation und Rotation	234
9	Komplexes Verhalten von Tensidsystemen.....	239
9.1	Tensidsysteme.....	239
9.1.1	Tensidstrukturen und Mizellen	239
9.1.2	Emulsionen	248
9.1.3	Mischungen von Tensiden und Polymeren, tensid-ähnliche Polymere.....	249
9.1.4	Anwendungen von Tensidsystemen	253
9.2	Rheologisches Verhalten von Tensidsystemen	254
9.2.1	Gewöhnliches Scherverhalten.....	254
9.2.2	Scherinduzierte Effekte, Scherschichtung und „Rheo-Chaos“	257
10	Messsysteme.....	262
10.1	Einleitung	262
10.2	Konzentrische Zylinder-Messsysteme	262
10.2.1	Zylinder-Messsysteme im Allgemeinen	262
10.2.1.1	Geometrie von Zylindersystemen mit weitem Scherspalt	262
10.2.1.2	Betriebsarten	263
10.2.1.3	Berechnungen.....	263
10.2.2	Konzentrische Zylinder-Messsysteme mit engem Spalt nach ISO 3219	265
10.2.2.1	Geometrie	265
10.2.2.2	Berechnungen.....	266
10.2.2.3	Umrechnung zwischen Rohdaten und rheologischen Parametern	267
10.2.2.4	Fließinstabilität und Sekundärströmungen im Zylinder-MS	268
10.2.2.5	Vor- und Nachteile von Zylinder-Messsystemen	270
10.2.3	Doppelspalt-Messsysteme.....	270
10.2.4	Zylinder-Messsysteme für hohe Scherraten (High-Shear)	271
10.3	Kegel/Platte-Messsysteme.....	272
10.3.1	Geometrie	272
10.3.2	Berechnungen.....	272

10.3.3	Umrechnung zwischen Rohdaten und rheologischen Parametern	274
10.3.4	Fließinstabilität und Sekundärströmungen.....	274
10.3.5	Kegelspitzenabnahme und Spalteinstellung	274
10.3.6	Maximal zulässige Partikelgröße	275
10.3.7	Befüllung des Kegel/Platte-Messsystems.....	276
10.3.8	Vorteile und Nachteile von Kegel/Platte-Messsystemen	276
10.4	Platte/Platte-Messsysteme.....	278
10.4.1	Geometrie	278
10.4.2	Berechnungen.....	279
10.4.3	Umrechnung zwischen Rohdaten und rheologischen Parametern	281
10.4.4	Fließinstabilität und Sekundärströmungen.....	281
10.4.5	Empfehlungen für den Plattenabstand	281
10.4.6	Automatische Spalt-Einstellung und automatische Spalt-Nachregelung mit Hilfe der Normalkraft-Steuerung	282
10.4.7	Bestimmung des Temperaturgradienten in der Messprobe.....	283
10.4.8	Vorteile und Nachteile von Platte/Platte-Messsystemen	283
10.5	Mooney/Ewart-Messsystem	284
10.6	Relativ-Messsysteme	285
10.6.1	Messsysteme mit sandgestrahlter oder profilierter Oberfläche.....	286
10.6.2	Scheiben-, stift- und kugelförmige Spindeln.....	287
10.6.3	Krebs-Spindeln.....	290
10.6.4	Pasten-Spindeln, Stift- und Flügel-Drehkörper.....	291
10.6.5	Kugel-Messsystem (Rotation auf einer Kreisbahn).....	292
10.6.6	Weitere Relativ-Messsysteme.....	293
10.7	Messsysteme für feste Torsionsstäbe	293
10.7.1	Probenstäbe mit rechteckigem Querschnitt.....	295
10.7.2	Probenstäbe mit kreisförmigem Querschnitt.....	296
10.7.3	Verbundwerkstoffe	297
10.8	Spezielle Messeinrichtungen	299
10.8.1	Besondere Messbedingungen mit Beeinflussung der Rheologie.....	299
10.8.1.1	Magnetische Felder für magneto-rheologische Flüssigkeiten.....	299
10.8.1.2	Elektrische Felder für elektro-rheologische Flüssigkeiten.....	300
10.8.1.3	Immobilisierung von Suspensionen durch Flüssigkeitsentzug	300
10.8.1.4	Ultraviolettes Licht für UV-härtende Materialien	301
10.8.1.5	Relative Luftfeuchtigkeit macht klebrig oder spröde.....	302
10.8.2	Rheo-optische Messeinrichtungen	303
10.8.2.1	Begriffe aus der Optik.....	303
10.8.2.2	Mikroskopie.....	308
10.8.2.3	Geschwindigkeitsprofil in Scherströmungen durch Partikelreflektion	310
10.8.2.4	Messzellen für Anisotropie mit optischer Drehung und Doppelbrechung....	310
10.8.2.5	SALS für gebeugte Lichtquanten	310
10.8.2.6	SAXS für gebeugte Röntgenstrahlquanten.....	311
10.8.2.7	SANS für gestreute Neutronen	312
10.8.3	Andere spezielle Messeinrichtungen.....	313
10.8.3.1	Grenzflächen-Rheologie mit zweidimensionalen Flüssigkeitsfilmen	313
10.8.3.2	Dielektrische Analyse mit elektrischen Dipolen	314
10.8.3.3	NMR mit Resonanz von magnetisch aktiven Atomkernen	315
10.8.4	Andere Prüfungen als Scherversuche	316
10.8.4.1	Dehnversuche, Zugversuche, Dehnviskosität und Dehnrheologie.....	316
10.8.4.2	Tack-Test, Klebrigkeit und Zähigkeit.....	320
10.8.4.3	Tribologie	323

11	Messgeräte.....	329
11.1	Einleitung	329
11.2	Methoden zur Prüfung von Viskosität und Elastizität	329
11.2.1	Sehr einfache Bestimmungen	329
11.2.2	Fließen auf horizontaler Ebene	331
11.2.3	Ausbreitmaß auf horizontaler Ebene nach Heben eines Behälters	331
11.2.4	Fließen auf schiefer Ebene	332
11.2.5	Fließen auf vertikaler Ebene oder über eine Hilfseinrichtung	333
11.2.6	Fließen in Kanal, Trog, Schale	334
11.2.7	Auslaufbecher und andere drucklose Kapillar-Viskosimeter	335
11.2.8	Geräte mit steigenden, sinkenden, fallenden, rollenden Elementen	335
11.2.9	Penetrometer, Konsistometer, Texture Analyzer	339
11.2.10	Druckbetriebene Zylinder- und Kapillargeräte	341
11.2.11	Einfache Versuche mit Rotationsviskosimetern	343
11.2.12	Geräte mit vibrierenden oder oszillierenden Elementen	346
11.2.13	Rotations- und Oszillations-Vulkameter zur Prüfung des Vulkanisationsverhaltens von Kautschuk, Gummi und Elastomeren	347
11.2.14	Zug- und Dehn-Prüfgeräte	349
11.2.15	Kompressions- oder Druck-Prüfgeräte	350
11.2.16	Linear-Schubgerät, Scherpresse, Ziehprüfer	351
11.2.17	Biege-Prüfgeräte	351
11.2.18	Torsions-Prüfgeräte	351
11.3	Auslaufbecher	352
11.3.1	Der ISO-Becher	353
11.3.1.1	Kapillarlänge	354
11.3.1.2	Berechnungen	354
11.3.1.3	Fließinstabilität, Sekundärströmungen und turbulente Fließbedingungen in Auslaufbechern	356
11.3.2	Andere Bauarten von Auslaufbechern	357
11.4	Kapillar-Viskosimeter	358
11.4.1	Glaskapillar-Viskosimeter	358
11.4.1.1	Berechnungen	360
11.4.1.2	Bestimmung der Molmasse von Polymeren über verdünnte Polymerlösungen	362
11.4.1.3	Bestimmung des Viskositäts-Index VI von Petrochemikalien	367
11.4.2	Druckbetriebene Kapillar-Viskosimeter	368
11.4.2.1	MFR- und MVR-Tester mit Gewichtsantrieb, als Niederdruck- Kapillarviskosimeter	368
11.4.2.2	Hochdruck-Kapillarviskosimeter mit elektrischem Antrieb zur Prüfung von hochviskosen und pastenartigen Materialien	373
11.4.2.3	Hochdruck-Kapillarviskosimeter mit Gasdruck zur Prüfung von Flüssigkeiten	376
11.5	Kugelfall-Viskosimeter	378
11.6	Stabinger-Viskosimeter	380
11.7	Rotations- und Oszillations-Rheometer	382
11.7.1	Bauarten von Rheometern	384
11.7.2	Regelkreise	386
11.7.3	Drehmoment-Messeinrichtungen	389
11.7.4	Winkel- oder Drehzahl-Messeinrichtungen	390
11.7.5	Lagerung	391
11.7.6	Temperiersysteme	393

12	Leitfaden für rheologische Versuche	400
12.1	Messsystem-Auswahl.....	400
12.2	Rotationsversuche.....	400
12.2.1	Fließ- und Viskositätskurven	400
12.2.2	Zeitabhängiges Fließverhalten (Rotation)	401
12.2.3	Sprungversuch (Rotation): Strukturabbau und -wiederaufbau (Thixotropie).....	401
12.2.4	Temperatur-abhängiges Fließverhalten (Rotation)	402
12.3	Oszillationsversuche	402
12.3.1	Amplitudentest.....	402
12.3.2	Frequenztest	403
12.3.3	Zeitabhängiges viskoelastisches Verhalten (Oszillation)	403
12.3.4	Sprungversuch (Oszillation): Strukturabbau und -wiederaufbau (Thixotropie).....	404
12.3.5	Temperatur-abhängiges viskoelastisches Verhalten (Oszillation).....	404
12.4	Wahl der Versuchsart	405
12.4.1	Ruheverhalten.....	405
12.4.2	Fließverhalten	407
12.4.3	Abbau und Wiederaufbau der Struktur (thixotropes Verhalten, z.B. von Beschichtungen).....	407
13	Scherversuche mit Pulvern und Schüttgütern.....	408
13.1	Einleitung	408
13.1.1	Klassifikation von Schüttgütern nach ihrer Fluidisierbarkeit.....	408
13.1.2	Einflussfaktoren auf das Fließverhalten von Pulver.....	409
13.2	Scherprüfung von stark verdichteten, verfestigten Schüttgütern	410
13.2.1	Vorverdichten des Schüttguts	411
13.2.2	Anscheren des Schüttguts	412
13.2.3	Abscheren des Schüttguts	413
13.2.4	Weitere Versuchsdurchläufe mit Anscheren und Abscheren.....	413
13.2.5	Mohrscher Spannungskreis	415
13.2.5.1	Mohr-Kreis für das stationäre Fließen, und die Verfestigungsspannung....	415
13.2.5.2	Mohr-Kreis zur Bestimmung der Druckfestigkeit.....	415
13.2.5.3	Fließfunktion mit der Verfestigungsspannung und der Druckfestigkeit...	416
13.2.6	Weitere Prüfungen mit Schergeräten.....	416
13.2.6.1	Zeitverfestigung, ausgewertet als Zeitfließort.....	416
13.2.6.2	Wandreibung ausgewertet als Wandfließort	417
13.2.6.3	Wandreibung mit Zeitverfestigung, ausgewertet als Zeitwandfließort	417
13.3	Scherprüfung von leicht verdichteten Schüttgütern mit der Fluidisierungs- und Pulver-Messzelle	418
13.3.1	Pulver-Messgeräte und Fluidisierungszellen.....	418
13.3.2	Vorbereitungen zur Pulverprüfung.....	419
13.3.3	Vorversuche zum Fluidisierungsverhalten von Pulvern	420
13.3.4	Pulverprüfung und Bestimmung der Kohäsionsstärke	422
14	Rheologen und die historische Entwicklung der Rheologie	426
14.1	Entwicklung bis zum 19. Jahrhundert.....	426
14.2	Entwicklung zwischen 1800 und 1900.....	430
14.3	Entwicklung zwischen 1900 und 1949	439
14.4	Entwicklung zwischen 1950 und 1979	449
14.5	Entwicklung ab 1980	452

15	Anhang	465
15.1	Verwendete Zeichen, Symbole und Abkürzungen	465
15.2	Griechisches Alphabet	475
15.3	Umrechnung von Einheiten	475
16	Normen	479
16.1	ISO-Normen (International Standards Organisation)	479
16.2	ASTM-Normen (American Society for Testing and Materials)	482
16.3	DIN-, DIN EN-, DIN EN ISO- und EN-Normen (Deutsche Industrie Norm, Europäische Normen)	489
16.4	Wichtige Normen für Anwender von Rotationsrheometern	494
	Lebenslauf	496
	Danksagung	496
	Index	497