

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>19</b>
1.1	Rheologie, Rheometrie, und Viscoelastizität.....	19
1.2	Deformation und Fließverhalten.....	20
<b>2</b>	<b>Fließverhalten und Viskosität .....</b>	<b>23</b>
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
<b>3</b>	<b>Rotationsversuche.....</b>	<b>35</b>
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
<b>4</b>	<b>Elastisches Verhalten und Schubmodul .....</b>	<b>93</b>
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
<b>5</b>	<b>Viskoelastisches Verhalten.....</b>	<b>100</b>
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
<b>6</b>	<b>Kriechversuch .....</b>	<b>112</b>
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

<b>7</b>	<b>Relaxationsversuch.....</b>	<b>126</b>
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
<b>8</b>	<b>Oszillationsversuche.....</b>	<b>138</b>
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 $\tau_y$ (yield point) .....	155
8.3.4.2	Fließgrenze $\tau_f$ (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
<b>9</b>	<b>Komplexes Verhalten von Tensidsystemen.....</b>	<b>219</b>
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
<b>10</b>	<b>Messsysteme.....</b>	<b>238</b>
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

<b>11</b>	<b>Messgeräte.....</b>	<b>297</b>
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

<b>12</b>	<b>Leitfaden für rheologische Versuche .....</b>	<b>356</b>
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
<b>13</b>	<b>Rheologen und die historische Entwicklung der Rheologie .....</b>	<b>364</b>
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
<b>14</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>390</b>
14.1	Verwendete Zeichen, Symbole und Abkürzungen.....	390
14.2	Griechisches Alphabet.....	399
14.3	Umrechnung von Einheiten.....	399
<b>15</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>403</b>
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
<b>Lebenslauf .....</b>	<b>427</b>	
<b>Index .....</b>	<b>429</b>	