

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	5
1 Einleitung	17
2 Nutzbare Effekte und grundlegende Eigenschaften von Smart Materials	23
2.1 Nutzbare Effekte von Smart Materials	23
2.1.1 Aktorik	24
2.1.2 Sensorik	31
2.1.3 Generatorik	32
2.1.4 Steuerbare Dämpfung	32
2.2 Zusammensetzung von Smart Materials	32
2.3 Mechanische Eigenschaften von Smart Materials	33
2.4 Zusammenfassung und Ausblick	34
3 Piezokeramische Materialien	35
3.1 Einleitung	35
3.2 Materialzusammensetzung und Struktur	36
3.3 Materialeigenschaften	37
3.4 Materialherstellung	39
3.5 Materialvariabilität, mögliche Anpassbarkeit von Eigenschaften für spezielle Anwendungen	41
3.6 Langzeitverhalten und Recycling	42
3.6.1 Langzeitverhalten	42
3.6.2 Recycling	45
3.7 Aktorwirkung	46
3.7.1 Aktorisch relevante Zustände	46
3.7.2 Ansteuerung von Piezoaktoren	48
3.7.3 Arbeitsdreieck von Piezoaktoren	50
3.7.4 Genauigkeit von Piezoaktoren	50
3.7.5 Bauweisen piezokeramischer Aktoren	51
3.8 Piezokeramische Aktorsysteme	53
3.9 Anwendungsbeispiele piezokeramischer Aktoren	57
3.9.1 Anwendungen piezokeramischer Stapel-/Multilayeraktoren	57
3.9.1.1 Ultraschallmotoren/Schrittmotoren	57
3.9.1.2 Kraftstoffinjektoren	58
3.9.1.3 Feinpositionierung	58
3.9.1.4 Aktive Lagerungen zur Schwingungsreduktion/ Schwingungsbeeinflussung	59
3.9.1.5 Prüftechnik	65
3.9.2 Anwendungen flächiger piezokeramischer Aktoren	67
3.9.2.1 Formkontrolle	68
3.9.2.2 Aktive Schwingungsreduktion und Schwingungsbeeinflussung	69
3.9.2.3 Shunt damping	73
3.9.2.4 Energy Harvesting aus Vibrationen	77

3.10	Piezoelektrische Sensoren	79
3.11	Anwendungsbeispiele piezoelektrischer Sensorik	82
3.11.1	Strukturdynamische Messverfahren	82
3.11.2	Messverfahren basierend auf Ultraschallsensoren	84
3.11.3	Strukturüberwachung	85
3.12	Zusammenfassung und Ausblick	86
4	Thermische Formgedächtnislegierungen	91
4.1	Einleitung	91
4.2	Materialstruktur und Materialzusammensetzung	91
4.3	Materialeigenschaften	93
4.4	Materialherstellung	97
4.5	Formgedächtnisaktoren	97
4.5.1	Aktorwirkung	97
4.5.2	Systemaufbau	99
4.5.3	Energieeffiziente Systeme	101
4.6	Aktorische Anwendungsbeispiele	102
4.7	Sensorische Eigenschaften von Formgedächtnislegierungen	112
4.7.1	Sensorwirkung	112
4.7.2	Systemaufbau Sensorik und sensorische Anwendungen	114
4.8	Ausblick: Elastokalorik	116
4.9	Zusammenfassung und Ausblick	117
5	Dielektrische Elastomere	121
5.1	Elektroaktive Polymere – Vorbemerkung	121
5.2	Einleitung	123
5.3	Materialzusammensetzung von dielektrischen Elastomeren	124
5.4	Materialeigenschaften von dielektrischen Elastomeren	128
5.5	Herstellungsverfahren von dielektrischen Elastomeren	136
5.6	Nutzeffekte von dielektrischen Elastomeren	140
5.6.1	Dielektrische Elastomeraktoren	140
5.6.1.1	Aktorprinzip	140
5.6.1.2	DEA-Systemaufbau	150
5.6.1.3	DEA-Anwendungen	153
5.6.1.4	Langzeitverhalten von DEA	161
5.6.2	Dielektrische Elastomersensoren	162
5.6.2.1	Sensorprinzip	162
5.6.2.2	DES-Systemaufbau	174
5.6.2.3	DES-Anwendungen	176
5.6.2.4	Langzeitverhalten von DES	187
5.6.3	Dielektrische Elastomergeneratoren	188
5.7	Zusammenfassung und Ausblick	191
6	Piezoelektrische Polymere	199
6.1	Einleitung	199
6.2	Piezoelektrischer Effekt	199
6.3	Piezoelektrische Charakterisierungsmethoden	201
6.4	Piezoelektrische Polymermaterialien	204

6.5	PVDF und PVDF-Copolymere	206
6.5.1	Struktureigenschaften	206
6.5.2	Prozessierung von Schichten und Folien	208
6.5.3	Elektrische Funktionalisierung ferroelektrischer Polymere	209
6.5.4	Charakterisierung und Integration piezoelektrischer Wandler	210
6.5.5	Anwendungsbeispiele	212
6.6	Ferroelektrete	214
6.6.1	Konzept und Materialien	214
6.6.2	Prozessierung zellulärer Folien	215
6.6.3	Elektrische Funktionalisierung zellulärer Polymerstrukturen	217
6.6.4	Charakterisierung und Integration von Ferroelektret-Wandlern	217
6.6.5	Anwendungsbeispiele	219
6.6.6	Weitere Entwicklungen	221
6.7	Zusammenfassung und Ausblick	222
7	Formgedächtnispolymere	227
7.1	Grundlagen	227
7.2	Charakterisierung	232
7.3	Effekte	238
7.4	Anwendungsbeispiele	244
7.5	Zusammenfassung und Ausblick	249
8	Magnetorheologische Flüssigkeiten	261
8.1	Einleitung	261
8.2	Materialzusammensetzung von MRF	263
8.2.1	Magnetisierbare Partikel	263
8.2.2	Trägerflüssigkeit	264
8.2.3	Additive	265
8.3	Materialeigenschaften von MRF	266
8.3.1	Basisviskosität	266
8.3.2	Schubspannung im Magnetfeld	267
8.3.3	Sedimentationsstabilität	268
8.3.4	Redispergierbarkeit	271
8.3.5	Magnetische Eigenschaften	272
8.3.6	Einsatztemperaturbereich	273
8.3.7	Ansprechzeit	274
8.3.8	Langzeitverhalten der MRF	275
8.4	Herstellung von MRF	275
8.5	Aktorwirkung von MRF	276
8.5.1	Schermodus	277
8.5.2	Fließmodus	278
8.5.3	Quetschmodus	279
8.6	Magnetkreis mit MRF	280
8.7	Systemaufbau mit MRF	284
8.8	Anwendungen von MRF	285
8.8.1	Adaptive Dämpfung	285
8.8.2	Steuerbare Kupplungen und Bremsen	294
8.8.3	Weitere Anwendungen von MRF	305

8.9	Langzeitverhalten von MRF-Systemen	309
8.10	Zusammenfassung und Ausblick	309
9	Elektrorheologische Flüssigkeiten	315
9.1	Einleitung	315
9.2	Polarisationsmechanismen von ERF	317
9.3	Materialzusammensetzung von ERF	320
9.3.1	Polarisierbare Partikel	320
9.3.2	Trägerflüssigkeit	323
9.3.3	Additive	324
9.4	Materialeigenschaften von ERF	324
9.4.1	Basisviskosität	324
9.4.2	Schubspannung im elektrischen Feld	325
9.4.3	Elektrische Stromdichte	327
9.4.4	Sedimentationsstabilität	328
9.4.5	Einsatztemperaturbereich	329
9.4.6	Ansprechzeit	329
9.4.7	Langzeitverhalten von ERF	329
9.5	Herstellung von ERF	330
9.6	Aktorwirkung von ERF	331
9.6.1	Schermodus	331
9.6.2	Fließmodus	332
9.6.3	Quetschmodus	333
9.6.4	Vergleich der Wirkmoden	333
9.7	Systemaufbau mit ERF	334
9.8	Anwendungen von ERF	335
9.8.1	Adaptive Dämpfung	335
9.8.2	Steuerbare Kupplungen und Bremsen	337
9.8.3	Weitere Anwendungen von ERF	340
9.9	Langzeitverhalten von ERF-Systemen	342
9.10	Zusammenfassung und Ausblick	343
10	Magnetorheologische Elastomere	347
10.1	Einleitung	347
10.2	Materialzusammensetzung von MRE	348
10.3	Materialeigenschaften von MRE	350
10.3.1	Mechanische Eigenschaften	350
10.3.2	Magnetomechanische Eigenschaften	352
10.3.3	Magnetische Eigenschaften	356
10.3.4	Anisotropie	357
10.3.5	Einsatztemperaturbereich	360
10.4	Materialherstellung von MRE	361
10.5	Aktorwirkung von MRE	362
10.6	Magnetkreis mit MRE	363
10.7	Systemaufbau mit MRE	366
10.8	Anwendungen von MRE	367
10.9	Langzeitverhalten von MRE	378
10.10	Zusammenfassung und Ausblick	379

11	Magnetische Formgedächtnislegierungen	383
11.1	Einleitung	383
11.2	Chemische Zusammensetzung und Kristallstruktur von Ni-Mn-Ga-Legierungen	383
11.3	Verformungsmechanismus	385
11.4	Herstellung von Ni-Mn-Ga-Aktorsticks	387
11.4.1	Ni-Mn-Ga-Einkristallzucht und Wärmebehandlung	387
11.4.2	Orientierung von Ni-Mn-Ga-Einkristallen	389
11.4.3	Trennen und Polieren	390
11.4.4	Training und magneto-mechanische Charakterisierung von Ni-Mn-Ga-Aktorsticks	390
11.5	Aktorisches oder sensorisches Wirkprinzip	390
11.6	Zusammenhang zwischen magnetischer Feldstärke und Dehnung	392
11.7	Systemaufbau eines Aktors	393
11.8	Anwendungen	395
11.9	Werkstoffeigenschaften des einkristallinen Ni-Mn-Ga-Materials	399
11.10	Zusammenfassung und Ausblick	401
12	Magnetostriktive Materialien	405
12.1	Einleitung	405
12.2	Magnetostriktive Aktorwerkstoffe	407
12.2.1	Terfenol-D	408
12.2.2	Galfenol	411
12.3	Vergleich magnetostriktiver Materialien mit piezokeramischen Materialien	413
12.4	Aktoren auf Basis magnetostriktiver Materialien	414
12.5	Anwendungsgebiete	416
12.5.1	Aktorik	416
12.5.2	Sensorik	416
12.5.3	Anwendungsgebiete von INVAR-Legierungen	417
12.6	Zusammenfassung und Ausblick	417
13	Neue Produkte mit Smart Materials	419
13.1	Vergleich der Aktorwirkung von Smart Materials	419
13.2	Smart Materials für die Handhabungstechnik	424
13.3	Kurzer Leitfadens zum Einsatz von Smart Materials	428
	Stichwortverzeichnis	435