

# Inhalt

|                                                                                 |           |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Vorworte</b>                                                                 | <b>V</b>  |
| <b>1 Einführung</b>                                                             | <b>1</b>  |
| 1.1 Was sind unkonventionelle Aktoren? .....                                    | 1         |
| 1.2 Aktoren als Systemkomponente .....                                          | 2         |
| 1.3 Aktoren im Zentrum von Mechatronik, Mikrosystemtechnik und Adaptronik ..... | 5         |
| 1.4 „Intelligente“ und Self-sensing-Aktoren.....                                | 7         |
| 1.4.1 „Intelligente“ Festkörperaktoren.....                                     | 7         |
| 1.4.2 Self-sensing-Festkörperaktoren .....                                      | 9         |
| 1.5 Entwurf von Aktoren .....                                                   | 10        |
| 1.6 Charakterisierung von Aktoren.....                                          | 13        |
| 1.6.1 Kenngrößen.....                                                           | 13        |
| 1.6.2 Kenngrößen-Diagramme.....                                                 | 19        |
| <b>2 Piezoelektrische Aktoren</b>                                               | <b>23</b> |
| 2.1 Physikalischer Effekt .....                                                 | 23        |
| 2.2 Piezoelektrische Bauelemente .....                                          | 25        |
| 2.2.1 Piezoelektrische Werkstoffe .....                                         | 25        |
| 2.2.2 Piezokeramische Elemente .....                                            | 30        |
| 2.3 Piezoaktoren mit begrenzter Auslenkung .....                                | 31        |
| 2.3.1 Stapelaktoren und Multilayer-Aktoren .....                                | 31        |
| 2.3.2 Streifentranslatoren .....                                                | 37        |
| 2.3.3 Biegewandler .....                                                        | 37        |
| 2.3.4 Komposite-Wandler.....                                                    | 38        |
| 2.3.5 Piezowandler mit Wegübersetzung.....                                      | 39        |
| 2.4 Aktoren mit unbegrenzter Auslenkung (Piezomotoren) .....                    | 41        |
| 2.4.1 Motoren für den quasistatischen Betrieb .....                             | 42        |
| 2.4.1.1 Wurm- und Schreitantriebe .....                                         | 42        |
| 2.4.1.2 Trägheitsantriebe .....                                                 | 45        |
| 2.4.1.3 Piezo Actuator Drive (PAD™) .....                                       | 45        |

|          |                                                                           |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 2.4.2    | Motoren für den resonanten Betrieb (Ultraschallmotoren) .....             | 47        |
| 2.4.2.1  | Stehwellen-Motoren .....                                                  | 48        |
| 2.4.2.2  | Wanderwellen-Motoren .....                                                | 52        |
| 2.5      | Messen von piezoelektrischen Kenngrößen .....                             | 54        |
| 2.6      | Steuerelektronik für Piezoantriebe .....                                  | 56        |
| 2.6.1    | Leistungsverstärker .....                                                 | 57        |
| 2.6.2    | Linearisierung des Aktor-Übertragungsverhaltens .....                     | 60        |
| 2.7      | Anwendungsbeispiele .....                                                 | 61        |
| 2.7.1    | Positioniertisch .....                                                    | 61        |
| 2.7.2    | Dieselinjektor .....                                                      | 62        |
| 2.7.3    | Hautscanner .....                                                         | 63        |
| 2.7.4    | Entwurfsaufgabe Piezotranslator .....                                     | 65        |
| 2.8      | Entwicklungstendenzen .....                                               | 68        |
| <b>3</b> | <b>Magnetostriktive Aktoren</b> .....                                     | <b>71</b> |
| 3.1      | Physikalischer Effekt .....                                               | 71        |
| 3.2      | Magnetostriktive Bauelemente .....                                        | 72        |
| 3.2.1    | Werkstoffe .....                                                          | 72        |
| 3.2.2    | Magnetostriktive Elemente .....                                           | 76        |
| 3.3      | Magnetostriktive Aktoren mit begrenzter Auslenkung .....                  | 76        |
| 3.3.1    | Translator .....                                                          | 77        |
| 3.4      | Magnetostriktive Aktoren mit unbegrenzter Auslenkung .....                | 82        |
| 3.5      | Messen von magnetostriktiven Kenngrößen .....                             | 84        |
| 3.6      | Elektronischer Leistungsverstärker .....                                  | 85        |
| 3.7      | Anwendungsbeispiele .....                                                 | 86        |
| 3.7.1    | Unterwasser-Sonarsystem .....                                             | 86        |
| 3.7.2    | Dynamischer Vibrationsabsorber .....                                      | 86        |
| 3.7.3    | Hybrider Linearmotor .....                                                | 88        |
| 3.7.4    | Entwurfsablauf .....                                                      | 89        |
| 3.8      | Vergleich zwischen piezoelektrischen und magnetostriktiven Wandlern ..... | 94        |
| 3.9      | Entwicklungstendenzen .....                                               | 95        |
| <b>4</b> | <b>Aktoren mit elektrorheologischer Flüssigkeit</b> .....                 | <b>97</b> |
| 4.1      | Einige rheologische Grundlagen .....                                      | 97        |
| 4.2      | Elektrorheologischer Effekt .....                                         | 99        |
| 4.3      | Technische Realisierung .....                                             | 101       |
| 4.3.1    | Werkstoffe .....                                                          | 101       |
| 4.3.2    | Wirkprinzipien und Entwurfshinweise .....                                 | 106       |

|          |                                                           |            |
|----------|-----------------------------------------------------------|------------|
| 4.4      | Messen von ERF-Kenngrößen.....                            | 110        |
| 4.4.1    | Rheologische Kenngrößen.....                              | 110        |
| 4.4.2    | Elektrische Kenngrößen .....                              | 114        |
| 4.5      | Elektronischer Leistungsverstärker.....                   | 115        |
| 4.6      | Anwendungsbeispiele .....                                 | 117        |
| 4.6.1    | Stellantrieb.....                                         | 117        |
| 4.6.2    | Tastelement.....                                          | 118        |
| 4.6.3    | Entwurfsaufgabe Stoßdämpfer.....                          | 119        |
| 4.7      | Entwicklungstendenzen .....                               | 123        |
| <b>5</b> | <b>Aktoren mit magnetorheologischer Flüssigkeit</b>       | <b>125</b> |
| 5.1      | Physikalischer Effekt .....                               | 125        |
| 5.2      | Technische Realisierung .....                             | 126        |
| 5.2.1    | Werkstoffe .....                                          | 126        |
| 5.2.2    | Wirkprinzipien .....                                      | 129        |
| 5.2.3    | Wandlerentwurf .....                                      | 132        |
| 5.3      | Messen von MRF-Kenngrößen .....                           | 136        |
| 5.3.1    | Rheologische Kenngrößen .....                             | 136        |
| 5.4      | Elektronische Leistungsverstärker .....                   | 139        |
| 5.4.1    | Analoge Leistungsverstärker .....                         | 140        |
| 5.4.2    | Schaltende Leistungsverstärker .....                      | 141        |
| 5.5      | Anwendungsbeispiele .....                                 | 142        |
| 5.5.1    | Bremse .....                                              | 142        |
| 5.5.2    | Motorlager .....                                          | 143        |
| 5.5.3    | Spannvorrichtung für Werkstücke .....                     | 146        |
| 5.5.4    | Entwurfsaufgabe Kupplung .....                            | 147        |
| 5.6      | Vergleich zwischen ERF- und MRF-Aktoren.....              | 151        |
| 5.7      | Entwicklungstendenzen .....                               | 152        |
| <b>6</b> | <b>Aktoren mit thermischen Formgedächtnis-Legierungen</b> | <b>155</b> |
| 6.1      | Physikalischer Effekt .....                               | 155        |
| 6.2      | Kommerzielle Formgedächtnis-Legierungen.....              | 158        |
| 6.3      | Aufbau von thermischen FG-Aktoren.....                    | 161        |
| 6.3.1    | Aktorkonzepte.....                                        | 161        |
| 6.3.2    | Beheizung von thermischen FG-Bauteilen .....              | 163        |
| 6.3.3    | Dimensionierung von NiTi-Bauteilen.....                   | 164        |
| 6.4      | Anwendungsbeispiele .....                                 | 166        |
| 6.4.1    | Klappenantrieb.....                                       | 166        |
| 6.4.2    | Modellbau .....                                           | 167        |

|          |                                                                           |            |
|----------|---------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.4.3    | Stellzylinder für große Lasten.....                                       | 168        |
| 6.4.4    | AF-/ OIS-Aktor.....                                                       | 168        |
| 6.5      | Entwicklungstendenzen .....                                               | 169        |
| 6.6      | Vergleich mit direkt konkurrierenden Aktorprinzipien .....                | 170        |
| <b>7</b> | <b>Aktoren mit magnetischen Formgedächtnis-Legierungen</b>                | <b>175</b> |
| 7.1      | Physikalischer Effekt.....                                                | 175        |
| 7.2      | Kommerzielle Formgedächtnis-Legierungen .....                             | 177        |
| 7.3      | Aufbau von magnetischen FG-Aktoren.....                                   | 179        |
| 7.3.1    | Entstehung der aktorischen Kennlinienverläufe .....                       | 180        |
| 7.3.2    | Betriebsarten von MFG-Aktoren .....                                       | 181        |
| 7.3.3    | Erzeugung orthogonaler Magnetfelder .....                                 | 185        |
| 7.3.4    | Dynamisches und statisches Verhalten.....                                 | 187        |
| 7.4      | Messen von Aktor-Kenngrößen.....                                          | 189        |
| 7.5      | Elektronische Ansteuerung.....                                            | 190        |
| 7.6      | Anwendungsbeispiele.....                                                  | 192        |
| 7.6.1    | Experimentier-Aktor von AdaptaMat.....                                    | 192        |
| 7.6.2    | Positionsregelung.....                                                    | 193        |
| 7.6.3    | Multistabiler Aktor .....                                                 | 196        |
| 7.6.4    | Entwurfsablauf .....                                                      | 197        |
| 7.7      | Vergleich zwischen MFG-Aktoren und magnetostriktiven sowie TFG-Aktoren... | 199        |
| 7.8      | Entwicklungstendenzen .....                                               | 199        |
| <b>8</b> | <b>Elektrochemische Aktoren</b>                                           | <b>201</b> |
| 8.1      | Elektrochemische Reaktionen .....                                         | 201        |
| 8.2      | Technische Realisierung.....                                              | 202        |
| 8.2.1    | Nickel-Wasserstoff-Zelle.....                                             | 202        |
| 8.2.2    | Zink-Luft-Zelle.....                                                      | 205        |
| 8.3      | Anwendungsbeispiele.....                                                  | 205        |
| 8.4      | Entwicklungstendenzen .....                                               | 207        |
| 8.5      | Vergleich mit direkt konkurrierenden Aktorprinzipien .....                | 207        |
| 8.5.1    | Dehnstoff-Elemente.....                                                   | 207        |
| 8.5.2    | Metallhydrid-Aktoren.....                                                 | 209        |
| <b>9</b> | <b>Aktoren mit elektroaktiven Polymeren</b>                               | <b>211</b> |
| 9.1      | Dielektrische Elastomeraktoren.....                                       | 212        |
| 9.1.1    | Physikalischer Effekt.....                                                | 212        |
| 9.1.2    | Werkstoffe .....                                                          | 214        |

|           |                                                                         |            |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------|------------|
| 9.1.3     | Aufbau von DE-Aktoren.....                                              | 217        |
| 9.1.3.1   | Membranaktoren.....                                                     | 217        |
| 9.1.3.2   | Weitere Bauformen.....                                                  | 222        |
| 9.1.4     | Messen von Aktor-Kenngrößen.....                                        | 223        |
| 9.1.5     | Elektronischer Leistungsverstärker.....                                 | 225        |
| 9.1.6     | Anwendungsbeispiele.....                                                | 227        |
| 9.1.6.1   | Experimentier-Aktor von Danfoss.....                                    | 227        |
| 9.1.6.2   | Laser Speckle Reducer.....                                              | 228        |
| 9.1.6.3   | Stapelaktor für hohe Frequenzen.....                                    | 230        |
| 9.1.6.4   | Rechenbeispiel Membranaktor.....                                        | 230        |
| 9.1.7     | Entwicklungstendenzen.....                                              | 233        |
| 9.2       | Ionenaktive Polymeraktoren.....                                         | 234        |
| <b>10</b> | <b>Mikroaktoren</b>                                                     | <b>237</b> |
| 10.1      | Krafterzeugungsprinzipien.....                                          | 237        |
| 10.2      | Herstellungsverfahren und Werkstoffe.....                               | 241        |
| 10.3      | Anwendungsbeispiele.....                                                | 242        |
| 10.3.1    | Mikrofluidische Komponenten und Systeme.....                            | 242        |
| 10.3.2    | Aktoren für mikrooptische Systeme.....                                  | 245        |
| 10.3.3    | Mikroantriebe und Greifersysteme.....                                   | 246        |
| 10.4      | Entwicklungstendenzen.....                                              | 249        |
| <b>11</b> | <b>Leistungsverstärker für unkonventionelle Aktoren</b>                 | <b>251</b> |
| 11.1      | Einführung.....                                                         | 252        |
| 11.1.1    | Ein-, Zwei- und Vierquadranten-Betrieb.....                             | 252        |
| 11.1.2    | Schaltende, analoge und hybride Leistungsverstärker.....                | 254        |
| 11.1.3    | Vergleich der Schaltungskonzepte.....                                   | 260        |
| 11.2      | Leistungselektronik für Piezoaktoren und ERF-Aktoren.....               | 262        |
| 11.2.1    | Ansteuerung von Piezoaktoren.....                                       | 262        |
| 11.2.2    | Ansteuerung von elektrorheologischen Flüssigkeiten.....                 | 264        |
| 11.2.3    | Wichtige Kenngrößen für den Verstärkerentwurf.....                      | 264        |
| 11.3      | Leistungselektronik für magnetostriktive Aktoren und MRF-Aktoren.....   | 266        |
| 11.3.1    | Ansteuerung von magnetostriktiven und magnetorheologischen Aktoren..... | 267        |
| 11.3.2    | Wichtige Kenngrößen für den Verstärkerentwurf.....                      | 268        |
| 11.4      | Vorgehensweise bei der Auswahl eines Verstärkers.....                   | 269        |
| <b>12</b> | <b>Self-sensing-Aktoren</b>                                             | <b>271</b> |
| 12.1      | Einführung.....                                                         | 271        |
| 12.2      | Operatorbasierte Modellierung von Festkörperaktoren.....                | 273        |
| 12.2.1    | Modellbeschreibung in Gleichungsform.....                               | 274        |
| 12.2.2    | Modellbildung in Form von Signalflussplänen.....                        | 275        |

---

|                  |                                                                     |            |
|------------------|---------------------------------------------------------------------|------------|
| 12.3             | Methoden zur Nutzung des Self-sensing-Effektes .....                | 277        |
| 12.3.1           | Zustandsgrößenbasierte Methode .....                                | 277        |
| 12.3.2           | Parameterbasierte Methode.....                                      | 279        |
| 12.3.3           | Voraussetzungen für die Rekonstruktion der mechanischen Größen..... | 280        |
| 12.4             | Mess- und Leistungselektronik.....                                  | 281        |
| 12.4.1           | Messkreis für Spannung und Polarisationsladung .....                | 281        |
| 12.4.2           | Leistungselektronik .....                                           | 282        |
| 12.5             | Linearisierung der Ausgang-Eingang-Charakteristik .....             | 282        |
| 12.6             | Anwendungsbeispiel: Piezoelektrischer Mikropositionierantrieb ..... | 285        |
| <b>Nachwort</b>  |                                                                     | <b>289</b> |
| <b>Literatur</b> |                                                                     | <b>291</b> |
| <b>Index</b>     |                                                                     | <b>303</b> |