

Hartmut Janocha (Hrsg.)

# Aktoren

Grundlagen und Anwendungen

Mit 243 Abbildungen



Springer-Verlag

Berlin Heidelberg New York

London Paris Tokyo

Hong Kong Barcelona Budapest

# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 Einführung</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 Definition des Aktors . . . . .   | 1         |
| 1.2 Aktor und Normung . . . . .   | 2         |
| 1.3 Aktor als Systemkomponente . . . . .  | 5         |
| 1.4 Mechatronik und Mikrosystemtechnik . . . . .  | 7         |
| 1.5 Aktor-Schnittstellen . . . . .  | 8         |
| 1.6 Aktoren in Echtzeit-Umgebung . . . . .  | 9         |
| <b>2 Elektronische Aktoren</b>  | <b>13</b> |
| 2.1 Einleitung . . . . .  | 13        |
| 2.2 Leistungsdioden . . . . .   | 14        |
| 2.2.1 Ausführungsformen der Leistungsdioden . . . . .   | 14        |
| 2.2.2 Dynamische Eigenschaften der Leistungsdioden . . . . .  | 17        |
| 2.2.3 Beispiele für typische Leistungsdioden . . . . .  | 18        |
| 2.3 Bipolare Leistungstransistoren . . . . .  | 18        |
| 2.3.1 Grundstruktur und Stromführungsmechanismus . . . . .  | 18        |
| 2.3.2 Schaltvorgänge und dynamische Verluste . . . . .  | 21        |
| 2.3.3 Kritische Betriebszustände, sicherer Arbeitsbereich, praktisch aus-<br>nutzbare Sperrspannung . . . . . | 23        |
| 2.3.4 Darlington-Transistoren . . . . .   | 25        |
| 2.3.5 Kaskoden . . . . .  | 27        |
| 2.3.6 Typische Beispiele . . . . .  | 28        |
| 2.4 Leistungs-Feldeffekt-Transistoren . . . . .   | 28        |
| 2.4.1 Hochspannungs- und Leistungs-MOSFETs . . . . .  | 28        |
| 2.4.2 Durchlaßverhalten . . . . .   | 29        |
| 2.4.3 Ansteuerung und dynamische Eigenschaften . . . . .  | 30        |
| 2.4.4 Thermisches Verhalten und Überlastfestigkeit . . . . .  | 31        |
| 2.4.5 Die eingebaute Rückwärtsdiode . . . . .   | 31        |
| 2.4.6 Typische Beispiele . . . . .  | 32        |
| 2.5 Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) . . . . .  | 32        |
| 2.5.1 Grundstruktur . . . . .   | 33        |
| 2.5.2 Thermisches Verhalten und kritische Betriebsfälle . . . . .   | 34        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.5.3    | Einige Produktbeispiele   | 34        |
| 2.6      | Thyristoren und GTOs  | 35        |
| 2.6.1    | Konventionelle Thyristoren  | 35        |
| 2.6.2    | Gate-Turn-Off-Thyristoren   | 35        |
| 2.7      | Weitere abschaltbare Leistungsbauelemente                                   | 37        |
| 2.7.1    | Static Induction Transistor (SIT)   | 38        |
| 2.7.2    | Field Controlled Thyristor (FCT)  | 38        |
| 2.8      | Einsatzschwerpunkte der verschiedenen Bauelemente                           | 38        |
| 2.9      | Integrierte Leistungsmodule und Smart-Power-Module                          | 40        |
| 2.9.1    | Technologien und Grundbausteine der monolithischen Hochspannungsintegration | 41        |
| 2.9.2    | Hybride Leistungsintegration  | 46        |
| 2.10     | Simulation von Leistungsbauelementen  | 46        |
| 2.11     | Anwendungsbeispiele   | 47        |
| 2.11.1   | Schematische Einteilung   | 47        |
| 2.11.2   | Leistungstransistoren als Emitterfolger                                     | 49        |
| 2.11.3   | Einfache Wechselstromsteller  | 50        |
| 2.11.4   | Gesteuerte Gleichrichter  | 51        |
| 2.11.5   | Der Gleichstromsteller (Chopper)  | 53        |
| 2.11.6   | Selbstgeführter Wechselrichter  | 56        |
| 2.12     | Entwicklungstendenzen   | 58        |
|          | Literaturverzeichnis  | 58        |
| <b>3</b> | <b>Elektromagnetische Aktoren</b>   | <b>61</b> |
| 3.1      | Einleitung  | 61        |
| 3.1.1    | Definition des elektromagnetischen Aktors, Normen                           | 61        |
| 3.1.2    | Antriebsübersicht   | 63        |
| 3.1.3    | Grundsätzliche Konstruktionsmöglichkeiten                                   | 66        |
| 3.2      | Selbstgeführte Motoren mit mechanischem Kommutator                          | 69        |
| 3.2.1    | Allgemeines   | 69        |
| 3.2.2    | Gleichstrom-Kommutatormotoren   | 69        |
| 3.2.3    | Wechselstrom-Kommutatormotoren  | 78        |
| 3.3      | Selbstgeführte Motoren mit elektronischem Kommutator                        | 82        |
| 3.3.1    | Elektronikmotor   | 82        |
| 3.3.2    | Servomotoren  | 87        |
| 3.3.3    | Geschalteter Reluktanzmotor   | 93        |
| 3.4      | Fremdgeführte Motoren   | 94        |
| 3.4.1    | Asynchronmotoren  | 94        |
| 3.4.2    | Synchronmotoren   | 104       |
| 3.4.3    | Schrittmotoren  | 111       |
| 3.5      | Antriebe mit begrenzter Bewegung  | 116       |
| 3.5.1    | Allgemeines   | 116       |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 3.5.2 | Elektromagnet-Prinzip . . . . .              | 117 |
| 3.5.3 | Tauchspul-Prinzip . . . . .                  | 122 |
| 3.6   | Steuerungs- und Regelungskonzepte . . . . .  | 123 |
| 3.6.1 | Allgemeines . . . . .                        | 123 |
| 3.6.2 | Netzgeführte Stromrichter . . . . .          | 123 |
| 3.6.3 | Gleichstromsteller . . . . .                 | 124 |
| 3.6.4 | Wechselstromsteller . . . . .                | 124 |
| 3.6.5 | Stromrichter für Drehfeldmaschinen . . . . . | 125 |
| 3.7   | Antriebsbeispiele . . . . .                  | 125 |
|       | Literaturverzeichnis . . . . .               | 134 |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>4</b> | <b>Fluidtechnische Aktoren</b>   | <b>137</b> |
| 4.1      | Einleitung . . . . .   | 137        |
| 4.2      | Fluidtechnische Antriebssysteme . . . . .  | 139        |
| 4.2.1    | Stetige Ventile . . . . .  | 139        |
| 4.2.2    | Unstetige Ventile . . . . .  | 159        |
| 4.2.3    | Fluidtechnische Motoren . . . . .  | 163        |
| 4.2.4    | Sensoren . . . . .   | 175        |
| 4.2.5    | Regelungskonzepte . . . . .  | 180        |
| 4.2.6    | Der fluidtechnische Antrieb als Subsystem . . . . .                                | 198        |
| 4.2.7    | Vergleich zwischen fluidtechnischen und elektromagnetischen Ak-<br>toren . . . . . | 199        |
| 4.3      | Anwendungsbeispiele . . . . .  | 201        |
| 4.3.1    | Automatische Blockierverhinderungssysteme . . . . .                                | 201        |
| 4.3.2    | Servopneumatische Linearantriebe für Handhabungsaufgaben . .                       | 204        |
| 4.3.3    | Pneumatische Greifer . . . . .   | 206        |
| 4.3.4    | Bewegungssimulatoren . . . . .   | 207        |
| 4.3.5    | Numerisch gesteuerte Werkzeugmaschine . . . . .                                    | 209        |
| 4.3.6    | Einsatzgebiete und Einsatzbedingungen der Theaterhydraulik .                       | 212        |
|          | Literaturverzeichnis . . . . .   | 215        |

|          |                                   |            |
|----------|-----------------------------------|------------|
| <b>5</b> | <b>Unkonventionelle Aktoren</b>   | <b>217</b> |
| 5.1      | Einleitung . . . . .              | 217        |
| 5.2      | Thermobimetalle . . . . .         | 218        |
| 5.2.1    | Physikalischer Effekt . . . . .   | 218        |
| 5.2.2    | Technische Realisierung . . . . . | 219        |
| 5.2.3    | Anwendungsbeispiel . . . . .      | 222        |
| 5.3      | Memory-Legierungen . . . . .      | 223        |
| 5.3.1    | Physikalischer Effekt . . . . .   | 223        |
| 5.3.2    | Technische Realisierung . . . . . | 224        |
| 5.3.3    | Anwendungsbeispiele . . . . .     | 229        |

|       |   |            |
|-------|---|------------|
| 5.3.4 | Entwicklungstendenzen . . . . .             | 232        |
| 5.4   | Dehnstoff-Elemente . . . . .                | 232        |
| 5.4.1 | Physikalischer Effekt . . . . .             | 232        |
| 5.4.2 | Technische Realisierung . . . . .           | 233        |
| 5.4.3 | Anwendungsbeispiele . . . . .               | 234        |
| 5.5   | Elektrochemischer Aktor . . . . .           | 236        |
| 5.5.1 | Elektrochemische Reaktionen . . . . .       | 236        |
| 5.5.2 | Technische Ausführung . . . . .             | 238        |
| 5.5.3 | Anwendungsbeispiele . . . . .               | 241        |
| 5.5.4 | Entwicklungstendenzen . . . . .             | 242        |
| 5.6   | Elektorrheologische Flüssigkeiten . . . . . | 242        |
| 5.6.1 | Physikalischer Effekt . . . . .             | 242        |
| 5.6.2 | Technische Realisierung . . . . .           | 244        |
| 5.6.3 | Anwendungsbeispiele . . . . .               | 250        |
| 5.6.4 | Entwicklungstendenzen . . . . .             | 257        |
| 5.7   | Piezoelektrische Aktoren . . . . .          | 257        |
| 5.7.1 | Physikalischer Effekt . . . . .             | 257        |
| 5.7.2 | Technische Realisierung . . . . .           | 259        |
| 5.7.3 | Anwendungsbeispiele . . . . .               | 275        |
| 5.7.4 | Entwicklungstendenzen . . . . .             | 278        |
| 5.8   | Magnetostriktive Aktoren . . . . .          | 278        |
| 5.8.1 | Physikalischer Effekt . . . . .             | 278        |
| 5.8.2 | Technische Realisierung . . . . .           | 279        |
| 5.8.3 | Anwendungsbeispiele . . . . .               | 289        |
| 5.8.4 | Entwicklungstendenzen . . . . .             | 292        |
| 5.9   | Mikroaktoren . . . . .                      | 293        |
| 5.9.1 | Prinzip . . . . .                           | 293        |
| 5.9.2 | Technische Realisierung . . . . .           | 294        |
| 5.9.3 | Anwendungsbeispiele . . . . .               | 295        |
| 5.9.4 | Entwicklungstendenzen . . . . .             | 299        |
|       | Literaturverzeichnis . . . . .              | 300        |
|       | <b>Sachverzeichnis</b> . . . . .            | <b>303</b> |