

# Inhalt

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>   |            |
| 1.1      | Entwicklung von Maschinenbau und Elektrotechnik                         | 1          |
| 1.2      | Entwicklung der Technik am Beispiel der Werkzeugmaschine                | 4          |
| 1.3      | Mechatronik als neues Bindeglied  | 6          |
| 1.4      | Maschinenbau und Elektrotechnik - grundsätzlich verschieden?            | 8          |
| 1.5      | Unterschiede zwischen Maschinenbau, Elektrotechnik und Mechatronik      | 16         |
| 1.6      | Teilgebiete der Mechatronik   | 21         |
| <b>2</b> | <b>Modellbildung technischer Systeme</b>                                | <b>25</b>  |
| 2.1      | Systembegriff   | 25         |
| 2.2      | Verfahren der Modellbildung   | 28         |
| 2.2.1    | Theoretische Modellbildung  | 30         |
| 2.2.1.1  | Allgemein bekannte Modellvorstellungen                                  | 30         |
| 2.2.1.2  | Vorgehensweise bei der Modellbildung                                    | 31         |
| 2.3      | Klassifizierung dynamischer Systeme                                     | 38         |
| 2.4      | Modellierung von Geometrie und Körpereigenschaften                      | 41         |
| 2.4.1    | Mehrkörpersysteme   | 41         |
| 2.4.2    | Systeme mit elastischen Elementen                                       | 43         |
| 2.5      | Modellierung elektrischer Komponenten                                   | 45         |
| <b>3</b> | <b>Dynamik mechanischer Systeme</b>                                     | <b>50</b>  |
| 3.1      | Kinematik des Massenpunktes   | 50         |
| 3.2      | Kinematik des starren Körpers   | 53         |
| 3.2.1    | Die ebene Bewegung des starren Körpers                                  | 53         |
| 3.2.2    | Die ebene Relativbewegung eines Punktes                                 | 59         |
| 3.2.3    | Die Bewegung des starren Körpers im Raum                                | 61         |
| 3.2.3.1  | Rotation im Raum  | 62         |
| 3.2.3.2  | Relativbewegung eines Punktes des starren Körpers                       | 64         |
| 3.2.3.3  | Darstellung der Bewegung des starren Körpers in<br>Matrizenschreibweise | 66         |
| 3.3      | Bindungen in Mehrkörpersystemen   | 77         |
| 3.4      | Kinetik   | 88         |
| 3.4.1    | Impuls-, Schwerpunkt- und Drallsatz                                     | 88         |
| 3.4.2    | Energiesatz   | 97         |
| 3.4.3    | Die Prinzipien der Mechanik   | 100        |
| 3.4.3.1  | Prinzip der virtuellen Arbeit   | 100        |
| 3.4.3.2  | Lagrange'sche Bewegungsgleichungen                                      | 105        |
| <b>4</b> | <b>Schwingungen</b>   | <b>112</b> |
| 4.1      | Einmassenschwinger  | 112        |
| 4.1.1    | Freie ungedämpfte Schwingungen  | 114        |
| 4.1.2    | Freie gedämpfte Schwingungen  | 116        |
| 4.1.3    | Erzwungene Schwingungen   | 120        |
| 4.1.3.1  | Nichtperiodische Erregung   | 121        |
| 4.1.3.2  | Harmonische Erregung  | 122        |
| 4.1.4    | Nichtlineare Schwinger  | 128        |
| 4.2      | Mehrmassenschwinger   | 130        |
| 4.3      | Schwingungsanalyse  | 138        |
| 4.3.1    | Reelle Form der Fourier-Reihe   | 140        |
| 4.3.2    | Komplexe Form der Fourier-Reihe   | 144        |
| 4.3.3    | Fourier-Transformation nichtperiodischer Funktionen                     | 146        |
| 4.3.4    | Diskrete Fourier-Transformation zur Analyse von Abtastsignalen          | 148        |

|          |   |     |
|----------|---|-----|
| <b>5</b> | <b>Sensoren</b>                                       | 157 |
| 5.1      | Messtechnik   | 160 |
| 5.1.1    | Messgrößen und Maßeinheiten                           | 160 |
| 5.1.2    | Messgrößenaufnehmer und Messwertwandler               | 162 |
| 5.1.2.1  | Messwertanpassung                                     | 164 |
| 5.1.2.2  | Analog-/Digital-Wandler                               | 167 |
| 5.1.3    | Kenngößen von Messeinrichtungen                       | 169 |
| 5.1.3.1  | Statische Kenngößen                                   | 169 |
| 5.1.3.2  | Dynamische Kenngößen                                  | 171 |
| 5.1.3.3  | Fehlerkenngößen                                       | 173 |
| 5.2      | Messeffekte   | 177 |
| 5.2.1    | Widerstandseffekte                                    | 180 |
| 5.2.1.1  | Ohmsche Widerstandseffekte                            | 180 |
| 5.2.1.2  | Piezowiderstandseffekt                                | 183 |
| 5.2.2    | Magnetische Effekte                                   | 184 |
| 5.2.2.1  | Induktionsprinzip                                     | 184 |
| 5.2.2.2  | Galvanomagnetische Effekte                            | 185 |
| 5.2.2.3  | Magnetoelastische Effekte                             | 187 |
| 5.2.3    | Kapazitive Effekte                                    | 188 |
| 5.2.4    | Piezo- und Pyroelektrische Effekte                    | 189 |
| 5.2.5    | Optische Effekte                                      | 190 |
| 5.3      | Sensoren für mechatronische Systeme                   | 193 |
| 5.3.1    | Bewegungssensoren                                     | 194 |
| 5.3.1.1  | Positionssensoren                                     | 194 |
| 5.3.1.2  | Geschwindigkeitssensoren                              | 204 |
| 5.3.1.3  | Beschleunigungssensoren                               | 206 |
| 5.3.2    | Kraft- und Momentensensoren                           | 209 |
| <b>6</b> | <b>Aktoren</b>  | 212 |
| 6.1      | Klassische Aktoren                                    | 214 |
| 6.1.1    | Elektromotorische, rotierende Antriebe                | 214 |
| 6.1.1.1  | Gleichstrommotoren                                    | 216 |
| 6.1.1.2  | Drehfeldmotoren                                       | 227 |
| 6.1.1.3  | Asynchronmotoren                                      | 229 |
| 6.1.1.4  | Schrittmotoren  | 234 |
| 6.1.2    | Elektromotorische Linearantriebe                      | 236 |
| 6.1.3    | Fluidische Aktoren                                    | 238 |
| 6.1.3.1  | Pneumatische Aktoren                                  | 238 |
| 6.1.3.2  | Hydraulische Aktoren                                  | 239 |
| 6.1.3.3  | Geschwindigkeitsverstellung von hydraulischen Aktoren | 242 |
| 6.2      | Neuartige Aktoren                                     | 248 |
| 6.2.1    | Piezoelektrische Aktoren                              | 250 |
| 6.2.2    | Aktoren aus Formgedächtnislegierungen                 | 253 |
| 6.2.3    | Dehnstoffaktoren                                      | 256 |
| 6.2.4    | Mikrostrukturierte Aktoren                            | 257 |
| <b>7</b> | <b>Automatisierungstechnik</b>                        | 260 |
| 7.1      | Automatisierungskonzepte                              | 260 |
| 7.1.1    | Intelligente Maschinen                                | 262 |
| 7.1.2    | Steuerung und Regelung                                | 264 |
| 7.1.3    | Schlussfolgern und regelbasiertes Wissen              | 266 |
| 7.1.4    | Autonome intelligente Agenten                         | 267 |
| 7.1.5    | Lernen und Mustererkennung                            | 268 |
| 7.1.6    | Architektur intelligenter Maschinen                   | 269 |
| 7.1.6.1  | Hierarchien   | 270 |
| 7.1.6.2  | Netzwerke   | 271 |

---

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 7.1.6.3  | Schichtarchitekturen                                  | 277        |
| 7.2      | Steuerungstechnik                                     | 278        |
| 7.2.1    | Boole'sche Algebra                                    | 281        |
| 7.2.1.1  | Kombinatorische Steuerungen                           | 285        |
| 7.2.1.2  | Sequentielle Steuerungen                              | 288        |
| 7.2.2    | Probleme der Modellbildung digitaler Systeme          | 291        |
| 7.2.3    | Mehrwertige und unscharfe Logik (Fuzzy Logic)         | 294        |
| 7.2.4    | Neuronale Netzwerke                                   | 299        |
| 7.2.4.1  | McCulloch-Pitts-Neuron                                | 301        |
| 7.2.4.2  | Perceptron  | 302        |
| 7.2.4.3  | Backpropagation-Netzwerk                              | 305        |
| 7.3      | Regelungstechnik                                      | 307        |
| 7.3.1    | Beschreibung und Analyse regelungstechnischer Systeme | 308        |
| 7.3.1.1  | Laplace-Transformation                                | 310        |
| 7.3.1.2  | Blockschaltbilder                                     | 318        |
| 7.3.1.3  | Frequenzgang und Ortskurve                            | 324        |
| 7.3.1.4  | Verschiedenartige Übertragungssysteme                 | 327        |
| 7.3.1.5  | Frequenzkennlinien                                    | 333        |
| 7.3.1.6  | Zustandsraumdarstellung                               | 340        |
| 7.3.1.7  | Regler  | 345        |
| 7.3.1.8  | Stabilität von Regelkreisen                           | 352        |
| 7.3.1.9  | Systemidentifikation                                  | 365        |
| 7.3.2    | Synthese von Regelkreisen                             | 370        |
| 7.3.2.1  | Spezifikationen                                       | 371        |
| 7.3.2.2  | Einstellregeln  | 373        |
| 7.3.2.3  | Mehrschleifige Regelkreise                            | 376        |
| 7.4      | Prozessdatenverarbeitung mit Mikrorechnern            | 380        |
| 7.4.1    | Mikrorechner  | 381        |
| 7.4.1.1  | Aufbau von Mikrorechnern                              | 382        |
| 7.4.1.2  | Software für Mikrorechner                             | 392        |
| 7.4.2    | Anwendungsspezifische Prozessoren und Bauelemente     | 393        |
| <b>8</b> | <b>Simulation</b>                                     | <b>397</b> |
| 8.1      | Numerische Integration                                | 399        |
| 8.2      | Modellbildung mit Bondgraphen                         | 407        |
| 8.2.1    | Elemente von Bondgraphen                              | 408        |
| 8.2.2    | 1-Port Bauelemente                                    | 412        |
| 8.2.2.1  | 1-Port R-Elemente                                     | 412        |
| 8.2.2.2  | 1-Port C-Elemente                                     | 413        |
| 8.2.2.3  | 1-Port I-Elemente                                     | 414        |
| 8.2.2.4  | 1-Port Quellen  | 415        |
| 8.2.3    | 2-Port Bauelemente                                    | 416        |
| 8.2.3.1  | 2-Port Transformer                                    | 416        |
| 8.2.3.2  | 2-Port Gyrtor   | 417        |
| 8.2.4    | Multi-Ports   | 418        |
| 8.2.5    | Erstellung von Modellen komplexerer Systeme           | 420        |
| 8.3      | Simulationssysteme                                    | 422        |
| 8.3.1    | Simulationssprachen                                   | 422        |
| 8.3.2    | Simulation elektrischer Schaltungen                   | 423        |
| 8.3.3    | Simulation mechanischer Systeme                       | 424        |
| 8.3.4    | Modellbeschreibung mit Blockschaltbild-Editoren       | 425        |
| 8.3.5    | Objektorientierte Modellbildung                       | 430        |
| 8.3.5.1  | 20-Sim  | 431        |
| 8.3.5.2  | CAMel-View  | 436        |
| 8.3.6    | Hardware-in-the-Loop, Software-in-the-Loop            | 438        |
| 8.3.6.1  | Hardware-in-the-Loop                                  | 439        |
| 8.3.6.2  | Software-in-the-Loop                                  | 439        |

| X |  | Inhalt |
|---|--|--------|
|   | 8.3.6.3 Kopplung von Modellen und Prototypen                 | 439    |
|   | 8.3.7 Simulationssysteme für Industrieroboter                | 440    |
| 9 | <b>Mechatronische Systeme</b>                                | 443    |
|   | 9.1 Wann ist der Einsatz der Mechatronik sinnvoll?           | 443    |
|   | 9.2 Entwicklung mechatronischer Systeme                      | 446    |
|   | 9.3 Mechatronische Teilsysteme                               | 455    |
|   | 9.3.1 Magnetlager  | 456    |
|   | 9.3.2 Anti-Blockier-System (ABS)                             | 461    |
|   | 9.3.3 Aktives Fahrwerk                                       | 463    |
|   | 9.3.3.1 Aktive Federung mit Hydrozylinder                    | 465    |
|   | 9.3.3.2 Aktive Federung mit Hydrozylinder und aktivem Tilger | 466    |
|   | 9.3.4 Mechatronische Anwendungen bei Industrierobotern       | 470    |
|   | 9.3.4.1 Nachführen eines Roboterarms an einer Freiformfläche | 471    |
|   | 9.3.4.2 Zusätzliche Bewegungsachsen für Industrieroboter     | 476    |
|   | 9.4 Mechatronische Gesamtsysteme                             | 483    |
|   | 9.4.1 Hexapodenkonzepte                                      | 483    |
|   | 9.4.2 Fahrrad mit aktiver Neigetechnik                       | 486    |
|   | <b>Literaturverzeichnis</b>                                  | 493    |
|   | <b>Sachwortverzeichnis</b>                                   | 497    |