

# Inhalt

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung</b>   | <b>1</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  | 29         |
| 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>49</b>  |
| 3.1      | Kinematik des Massenpunktes   | 49         |
| 3.2      | Kinematik des starren Körpers   | 52         |
| 3.2.1    | Die ebene Bewegung des starren Körpers                                  | 52         |
| 3.2.2    | Die ebene Relativbewegung eines Punktes                                 | 58         |
| 3.2.3    | Die Bewegung des starren Körpers im Raum                                | 60         |
| 3.2.3.1  | Rotation im Raum  | 61         |
| 3.2.3.2  | Relativbewegung eines Punktes des starren Körpers                       | 63         |
| 3.2.3.3  | Darstellung der Bewegung des starren Körpers in<br>Matrizenschreibweise | 64         |
| 3.3      | Bindungen in Mehrkörpersystemen   | 75         |
| 3.4      | Kinetik   | 86         |
| 3.4.1    | Impuls-, Schwerpunkt- und Drallsatz                                     | 86         |
| 3.4.2    | Energiesatz   | 94         |
| 3.4.3    | Die Prinzipien der Mechanik   | 97         |
| 3.4.3.1  | Prinzip der virtuellen Arbeit   | 97         |
| 3.4.3.2  | Lagrangesche Bewegungsgleichungen                                       | 102        |
| <b>4</b> | <b>Schwingungen</b>   | <b>108</b> |
| 4.1      | Einmassenschwinger  | 108        |
| 4.1.1    | Freie ungedämpfte Schwingungen  | 110        |
| 4.1.2    | Freie gedämpfte Schwingungen  | 112        |
| 4.1.3    | Erzwungene Schwingungen   | 115        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 4.1.3.1  | Nichtperiodische Erregung                                      | 116        |
| 4.1.3.2  | Harmonische Erregung   | 118        |
| 4.1.4    | Nichtlineare Schwinger   | 123        |
| 4.2      | Mehrmassenschwinger  | 125        |
| 4.3      | Schwingungsanalyse   | 132        |
| 4.3.1    | Reelle Form der Fourier-Reihe                                  | 133        |
| 4.3.2    | Komplexe Form der Fourier-Reihe                                | 138        |
| 4.3.3    | Fourier-Transformation nichtperiodischer Funktionen            | 140        |
| 4.3.4    | Diskrete Fourier-Transformation zur Analyse von Abtastsignalen | 142        |
| <b>5</b> | <b>Sensoren</b>  | <b>150</b> |
| 5.1      | Messtechnik  | 153        |
| 5.1.1    | Messgrößen und Maßeinheiten                                    | 153        |
| 5.1.2    | Messgrößenaufnehmer und Messwertwandler                        | 155        |
| 5.1.2.1  | Messwertanpassung  | 157        |
| 5.1.2.2  | Analog-/Digital-Wandler  | 159        |
| 5.1.3    | Kenngrößen von Messeinrichtungen                               | 161        |
| 5.1.3.1  | Statische Kenngrößen   | 162        |
| 5.1.3.2  | Dynamische Kenngrößen  | 164        |
| 5.1.3.3  | Fehlerkenngrößen   | 166        |
| 5.2      | Messeffekte  | 169        |
| 5.2.1    | Widerstandseffekte   | 172        |
| 5.2.1.1  | Ohmsche Widerstandseffekte                                     | 172        |
| 5.2.1.2  | Piezowiderstandseffekt   | 174        |
| 5.2.2    | Magnetische Effekte  | 175        |
| 5.2.2.1  | Induktionsprinzip  | 175        |
| 5.2.2.2  | Galvanomagnetische Effekte                                     | 177        |
| 5.2.2.3  | Magnetoelastische Effekte                                      | 179        |
| 5.2.3    | Kapazitive Effekte   | 179        |
| 5.2.4    | Piezo- und Pyroelektrische Effekte                             | 180        |
| 5.2.5    | Optische Effekte   | 181        |
| 5.3      | Sensoren für mechatronische Systeme                            | 184        |
| 5.3.1    | Bewegungssensoren  | 184        |
| 5.3.1.1  | Positionssensoren  | 184        |
| 5.3.1.2  | Geschwindigkeitssensoren                                       | 192        |
| 5.3.1.3  | Beschleunigungssensoren  | 194        |
| 5.3.2    | Kraft- und Momentensensoren                                    | 197        |
| <b>6</b> | <b>Aktoren</b>   | <b>200</b> |
| 6.1      | Klassische Aktoren   | 202        |
| 6.1.1    | Elektromotorische, rotierende Antriebe                         | 202        |
| 6.1.1.1  | Gleichstrommotoren   | 204        |
| 6.1.1.2  | Drehfeldmotoren  | 215        |
| 6.1.1.3  | Asynchronmotoren   | 216        |
| 6.1.1.4  | Schrittmotoren   | 222        |
| 6.1.2    | Elektromotorische Linearantriebe                               | 224        |
| 6.1.3    | Fluidische Aktoren   | 225        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 6.1.3.1  | Pneumatische Aktoren                                  | 226        |
| 6.1.3.2  | Hydraulische Aktoren                                  | 226        |
| 6.1.3.3  | Geschwindigkeitsverstellung von hydraulischen Aktoren | 230        |
| 6.2      | Neuartige Aktoren                                     | 235        |
| <b>7</b> | <b>Automatisierungstechnik</b>                        | <b>246</b> |
| 7.1      | Automatisierungskonzepte                              | 246        |
| 7.1.1    | Intelligente Maschinen                                | 248        |
| 7.1.2    | Steuerung und Regelung                                | 250        |
| 7.1.3    | Schlussfolgern und regelbasiertes Wissen              | 252        |
| 7.1.4    | Autonome intelligente Agenten                         | 253        |
| 7.1.5    | Lernen und Mustererkennung                            | 254        |
| 7.1.6    | Architektur intelligenter Maschinen                   | 255        |
| 7.1.6.1  | Hierarchien   | 256        |
| 7.1.6.2  | Netzwerke   | 257        |
| 7.1.6.3  | Schichtarchitekturen                                  | 263        |
| 7.2      | Steuerungstechnik                                     | 263        |
| 7.2.1    | Boole'sche Algebra                                    | 267        |
| 7.2.1.1  | Kombinatorische Steuerungen                           | 270        |
| 7.2.1.2  | Sequentielle Steuerungen                              | 273        |
| 7.2.2    | Probleme der Modellbildung digitaler Systeme          | 277        |
| 7.2.3    | Mehrwertige und unscharfe Logik (Fuzzy Logic)         | 279        |
| 7.2.3.1  | Fuzzy Mengen  | 280        |
| 7.2.3.2  | Fuzzy- Inferenz                                       | 288        |
| 7.2.4    | Neuronale Netzwerke                                   | 295        |
| 7.2.4.1  | McCulloch-Pitts-Neuron                                | 297        |
| 7.2.4.2  | Perceptron  | 298        |
| 7.2.4.3  | Backpropagation-Netzwerk                              | 301        |
| 7.3      | Regelungstechnik                                      | 303        |
| 7.3.1    | Beschreibung und Analyse regelungstechnischer Systeme | 304        |
| 7.3.1.1  | Systembeschreibungen                                  | 306        |
| 7.3.1.2  | Blockschaltbilder                                     | 314        |
| 7.3.1.3  | Frequenzgang und Ortskurve                            | 320        |
| 7.3.1.4  | Verschiedenartige Übertragungssysteme                 | 322        |
| 7.3.1.5  | Frequenzkennlinien                                    | 329        |
| 7.3.1.6  | Zustandsraumdarstellung                               | 336        |
| 7.3.1.7  | Regler  | 340        |
| 7.3.1.8  | Stabilität von Regelkreisen                           | 347        |
| 7.3.1.9  | Systemidentifikation                                  | 360        |
| 7.3.2    | Synthese von Regelkreisen                             | 365        |
| 7.3.2.1  | Spezifikationen                                       | 366        |
| 7.3.2.2  | Einstellregeln  | 368        |
| 7.3.2.3  | Mehrschleifige Regelkreise                            | 371        |
| 7.4      | Prozessdatenverarbeitung mit Mikrorechnern            | 375        |
| 7.4.1    | Mikrorechner  | 376        |
| 7.4.1.1  | Aufbau von Mikrorechnern                              | 377        |
| 7.4.1.2  | Software für Mikrorechner                             | 386        |
| 7.4.2    | Anwendungsspezifische Prozessoren und Bauelemente     | 387        |

| X  | Inhalt     |
|--|------------|
| <b>8 Simulation</b>  | <b>391</b> |
| 8.1 Numerische Integration                                   | 393        |
| 8.2 Modellbildung mit Bondgraphen                            | 399        |
| 8.2.1 Elemente von Bondgraphen                               | 399        |
| 8.2.2 1-Port Bauelemente                                     | 403        |
| 8.2.2.1 1-Port R-Elemente                                    | 403        |
| 8.2.2.2 1-Port C-Elemente                                    | 404        |
| 8.2.2.3 1-Port I-Elemente                                    | 405        |
| 8.2.2.4 1-Port Quellen                                       | 406        |
| 8.2.3 2-Port Bauelemente                                     | 407        |
| 8.2.3.1 2-Port Transformer                                   | 407        |
| 8.2.3.2 2-Port Gyrator                                       | 408        |
| 8.2.4 Multi-Ports  | 409        |
| 8.2.5 Erstellung von Modellen komplexerer Systeme            | 411        |
| 8.3 Simulationssysteme                                       | 413        |
| 8.3.1 Simulationssprachen                                    | 413        |
| 8.3.2 Simulation elektrischer Schaltungen                    | 414        |
| 8.3.3 Simulation mechanischer Systeme                        | 415        |
| 8.3.4 Modellbeschreibung mit Blockschaltbild-Editoren        | 416        |
| 8.3.5 Objektorientierte Modellbildung                        | 421        |
| 8.3.5.1 2D-Sim   | 422        |
| 8.3.5.2 CAMEL-View   | 427        |
| 8.3.6 Hardware-in-the-Loop, Software-in-the-Loop             | 431        |
| 8.3.6.1 Hardware-in-the-Loop                                 | 432        |
| 8.3.6.2 Software-in-the-Loop                                 | 432        |
| 8.3.6.3 Kopplung von Modellen und Prototypen                 | 432        |
| 8.3.7 Simulationssysteme für Industrieroboter                | 433        |
| <b>9 Mechatronische Systeme</b>                              | <b>436</b> |
| 9.1 Wann ist der Einsatz der Mechatronik sinnvoll?           | 436        |
| 9.2 Entwicklung mechatronischer Systeme                      | 439        |
| 9.3 Mechatronische Teilsysteme                               | 448        |
| 9.3.1 Magnetlager  | 448        |
| 9.3.2 Aktives Fahrwerk                                       | 453        |
| 9.3.2.1 Aktive Federung mit Hydrozylinder                    | 455        |
| 9.3.2.2 Aktive Federung mit Hydrozylinder und aktivem Tilger | 456        |
| 9.3.3 Mechatronische Anwendungen bei Industrierobotern       | 459        |
| 9.3.3.1 Nachführen eines Roboterarms an einer Freiformfläche | 460        |
| 9.3.3.2 Zusätzliche Bewegungsachsen für Industrieroboter     | 465        |
| 9.4 Mechatronische Gesamtsysteme                             | 472        |
| 9.4.1 Hexapodenkonzepte                                      | 472        |
| 9.4.2 Fahrrad mit aktiver Neigetechnik                       | 476        |
| <b>Literaturverzeichnis</b>                                  | <b>482</b> |
| <b>Wortverzeichnis</b>                                       | <b>487</b> |