

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Grundbegriffe .....</b>	<b>13</b>
1.1	Grundbegriffe der Mechatronik .....	13
1.2	Prozessanalyse mechatronischer Systeme .....	16
1.3	Modellbildung und Funktionsbegriff in der Mechatronik .....	21
1.4	Entwurf mechatronischer Systeme .....	24
1.5	Gliederung des Buches .....	27
<b>2</b>	<b>Aktoren .....</b>	<b>29</b>
2.1	Aufbau und Wirkungsweise der Aktoren .....	30
2.2	Aufbau und Wirkprinzipien elektromagnetischer Aktoren .....	34
2.2.1	Grundlagen elektrodynamischer Wandler .....	35
2.2.2	Bauformen elektrodynamischer Wandler .....	39
2.2.3	Grundlagen elektromagnetischer Wandler .....	43
2.2.4	Bauformen elektromagnetischer Wandler .....	46
2.2.5	Ausführungen und Kenndaten elektromagnetischer Aktoren .....	48
2.3	Fluidische Aktoren .....	51
2.3.1	Gegenüberstellung von hydraulischen und pneumatischen Aktoren .....	54
2.3.2	Grundlagen hydraulischer Wandler .....	55
2.3.3	Ausführungsformen und Kenndaten hydraulischer Aktoren .....	59
2.4	Neuartige Aktoren .....	62
2.4.1	Grundlagen piezoelektrischer Wandler .....	62
2.4.2	Ausführungsformen und Kenndaten piezoelektrischer Aktoren .....	67
2.5	Vergleich ausgewählter Aktoren .....	68
<b>3</b>	<b>Sensoren .....</b>	<b>71</b>
3.1	Einführung und Begriffe .....	72
3.2	Sensoren zur Messung von Dehnung, Kraft, Drehmoment und Druck .....	80
3.2.1	Sensoren zur Messung von Dehnungen .....	80
3.2.2	Auswertung von DMS und Kraftmessung .....	84
3.2.3	Weitere Sensoren zur Kraft- und Druckmessung .....	86
3.3	Sensoren zur Messung von Weg- und Winkelgrößen .....	91
3.3.1	Potentiometrische Verfahren .....	91
3.3.2	Photoelektrische Messgeräte .....	93
3.3.3	Längen- und Winkelmessung durch Nutzung magnetischer Prinzipien ..	104
3.3.4	Optische Triangulation .....	113
3.4	Geschwindigkeits- und Winkelgeschwindigkeitssensoren .....	115
3.4.1	Tachogeneratoren .....	116
3.4.2	Drehratensensoren .....	117

3.4.3	Laservibrometer .....	118
3.5	Beschleunigungs- und Winkelbeschleunigungssensoren .....	119
3.5.1	Beschleunigungssysteme basierend auf dem Feder-Masse-Prinzip .....	119
3.5.2	FERRARIS-Sensor .....	123
3.5.3	Beschleunigungssensor mit magnetischer Wandlung .....	123
3.5.4	Weitere Beschleunigungssensorprinzipien .....	124
3.6	Sensoren zur Messung von Temperatur und Strömung .....	125
3.6.1	Thermistoren.....	125
3.6.2	Thermoelemente .....	128
3.6.3	Sensoren zur Strömungsmessung: Hitzdrahtanemometer .....	129
3.7	Ausblick auf weitere Sensoren .....	130
<b>4</b>	<b>Signalverarbeitung .....</b>	<b>137</b>
4.1	Darstellung von Signalen .....	137
4.1.1	Signalklassen .....	137
4.1.2	Verteilungs- und Verteilungsdichtefunktion .....	139
4.1.3	Signalkennwerte und Signalkennfunktionen .....	141
4.1.4	Formfiltersynthese .....	149
4.1.5	Überlagerung von Signalen .....	152
4.1.6	Zeitdiskrete Signale, periodische Abtastung .....	156
4.1.7	Näherungsformeln und Rechenvorschriften .....	159
4.2	Filtertechnologien .....	164
4.2.1	Filter zur Signalverarbeitung .....	164
4.2.2	Filter zur Erzeugung zeitlicher Ableitungen .....	169
4.2.3	Optimale Filterung: KALMAN-Filter .....	173
4.2.4	Erweiterungen des KALMAN-Filters .....	179
<b>5</b>	<b>Prozessdatenverarbeitung .....</b>	<b>185</b>
5.1	Begriffe der Echtzeitdatenverarbeitung .....	186
5.2	Ereignisbehandlung.....	187
5.3	Multitasking .....	191
5.3.1	Prozesszustände .....	191
5.3.2	Task-Einplanung und Schedulingstrategien .....	195
5.3.3	Synchronisation von Prozessen.....	200
5.3.4	Spezielle Hardware-Architekturen .....	207
5.4	Echtzeitkonforme Netzwerke .....	208
5.5	Bewertung von Echtzeitsystemen .....	211
<b>6</b>	<b>Modellbildung von Mehrkörpersystemen .....</b>	<b>215</b>
6.1	Kinematik von Mehrkörpersystemen.....	217
6.1.1	Koordinatensysteme und Koordinatentransformationen .....	217
6.1.2	Beispiele für Rotationsmatrizen (Drehmatrizen) .....	220
6.1.3	Homogene Koordinaten und homogene Transformationen .....	223
6.1.4	Mechanische Ersatzsysteme mit Baumstruktur .....	227
6.1.5	Direkte und inverse Kinematik .....	230
6.1.6	Differentielle Kinematik und JACOBI-Matrix.....	234

6.2 Kinetik von Mehrkörpersystemen ..... 237  
 6.2.1 Grundgleichungen für den starren Körper ..... 239  
 6.2.2 NEWTON-EULER-Methode ..... 243  
 6.2.3 LAGRANGE'sche Methode ..... 247

**7 Systembeschreibung ..... 253**

7.1 Lineare, zeitinvariante Systeme ..... 253  
 7.1.1 Klemmenmodell ..... 254  
 7.1.2 Zustandsraumdarstellung ..... 257  
 7.1.3 Stabilitätsbegriff ..... 262  
 7.1.4 Stabilitätskriterien – Systemmatrix ..... 265  
 7.1.5 Stabilitätskriterien – Übertragungsfunktion ..... 268  
 7.2 Modellvereinfachung und -reduktion ..... 273  
 7.2.1 Approximation ..... 274  
 7.2.2 Linearisierung ..... 277  
 7.2.3 Ordnungsreduktion ..... 281  
 7.3 Parameter- und Systemidentifikation ..... 286  
 7.3.1 Einführung in Schätzprobleme ..... 287  
 7.3.2 Prozess zur Identifikation ..... 291  
 7.3.3 Identifikation parametrischer, linearer, zeitdiskreter Systeme ..... 293  
 7.4 Aspekte der Identifikation in der Praxis ..... 301  
 7.4.1 Datenvorverarbeitung ..... 301  
 7.4.2 Bestimmung der Modellordnung ..... 302  
 7.4.3 Identifizierbarkeit und Anregung ..... 307  
 7.4.4 Identifikation im geschlossenen Regelkreis ..... 311  
 7.4.5 Identifikation kontinuierlicher Systeme ..... 313  
 7.4.6 Parameteridentifikation mechatronischer Systeme ..... 317

**8 Regelung ..... 321**

8.1 Entwurfsziele und Grundlagen ..... 322  
 8.1.1 Bewertungskriterien ..... 323  
 8.1.2 Empfindlichkeitsfunktionen und Entwurfslimitierungen ..... 326  
 8.2 Klassische Regelung linearer Systeme ..... 336  
 8.2.1 PID-Regler ..... 336  
 8.2.2 Auslegungsverfahren ..... 338  
 8.3 Zustandsregelung ..... 344  
 8.3.1 Einführung in die Zustandsregelung ..... 344  
 8.3.2 Beobachter und beobachtergestützte Regelung ..... 348  
 8.4 Optimale und robuste Regelung ..... 353  
 8.4.1 Optimale Regelung mit quadratischem Gütemaß ..... 354  
 8.4.2 Robuste Regelung ( $\mathcal{H}_2$ -,  $\mathcal{H}_\infty$ -Regelung) ..... 361  
 8.5 Digitale Regelung (Abtastregelung) ..... 369  
 8.5.1 Zeitdiskrete Systembeschreibung ..... 370  
 8.5.2 Entwurf und Implementierung digitaler Regelungen ..... 382  
 8.6 Ausblick: Weitere Regelungsverfahren ..... 396

<b>9</b>	<b>Beispiele mechatronischer Systeme .....</b>	<b>399</b>
<b>A</b>	<b>Mathematische Grundlagen .....</b>	<b>403</b>
A.1	Integraltransformationen .....	403
A.1.1	LAPLACE-Transformation .....	403
A.1.2	FOURIER-Transformation .....	404
A.1.3	$\mathcal{Z}$ -Transformation .....	406
A.1.4	Korrespondenztabelle und deren Anwendung .....	407
A.2	Matrizenrechnung .....	409
A.2.1	Begriffe und einfache Rechenregeln .....	409
A.2.2	Eigenwerte, Eigenvektoren .....	410
A.2.3	Ähnlichkeitstransformation (Hauptachsentransformation) .....	411
A.2.4	Normen .....	412
A.2.5	Lineare Gleichungssysteme und Singulärwertzerlegung .....	414
A.3	Lineare, zeitinvariante dynamische Systeme .....	416
	<b>Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>419</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>427</b>
	<b>Index .....</b>	<b>437</b>