



dandelion.com

© 2008 AGI-Information Management Consultants  
May be used for personal purposes only or by  
libraries associated to [dandelion.com](http://dandelion.com) network.

---

# Mechatronik

## Komponenten – Methoden – Beispiele

---

Mit 217 Bildern, 25 Tabellen

und 64 ausführlich durchgerechneten Beispielen



**Fachbuchverlag Leipzig**

im Carl Hanser Verlag

# Inhaltsverzeichnis

<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	20
1.4	Entwurf mechatronischer Systeme	26
	Literatur	28
<b>2</b>	<b>Aktoren</b>	<b>30</b>
2.1	Aufbau und Wirkungsweise der Aktoren	30
2.2	Elektromagnetische Aktoren	34
2.2.1	Grundlagen elektrodynamischer Wandler	36
2.2.2	Bauformen elektrodynamischer Wandler	40
2.2.3	Grundlagen elektromagnetischer Wandler	44
2.2.4	Ausführungsformen und Kenndaten elektromagnetischer Aktoren	50
2.3	Fluidische Aktoren	54
2.3.1	Gegenüberstellung von hydraulischen und pneumatischen Aktoren	57
2.3.2	Grundlagen hydraulischer Wandler	58
2.3.3	Ausführungsformen und Kenndaten hydraulischer Aktoren	63
2.4	Neuartige Aktoren	65
2.4.1	Übersicht	65
2.4.2	Grundlagen piezoelektrischer Wandler	65
2.4.3	Ausführungsformen und Kenndaten piezoelektrischer Aktoren	70
2.5	Vergleich ausgewählter Aktoren	72
	Literatur	74
<b>3</b>	<b>Sensoren</b>	<b>76</b>
3.1	Integrationsgrade und Anforderungen an Sensoren	76
3.2	Kenngrößen von Sensoren	79
3.2.1	Begriffe und Definitionen	79
3.2.2	Statisches Verhalten von Meßsystemen	81
3.3	Wirkprinzipien zur Messung kinematischer und dynamischer Größen	84
3.4	Weg- und Winkelmessung	84

3.4.1	Potentiometrische Verfahren . . . . .	85
3.4.2	Induktive Meßverfahren . . . . .	87
3.4.3	Meßverfahren mit Magnetfeldsensoren . . . . .	90
3.4.4	Kapazitive Meßverfahren . . . . .	91
3.4.5	Meßverfahren auf Ultraschallbasis . . . . .	93
3.4.6	Magnetostriktive Weggeber . . . . .	96
3.4.7	Absolutwertgeber . . . . .	97
3.4.8	Inkrementale Meßverfahren . . . . .	98
3.5	Geschwindigkeitsmeßsysteme . . . . .	100
3.6	Beschleunigungsmeßsysteme . . . . .	101
3.6.1	Piezelektrische Beschleunigungssensoren . . . . .	101
3.6.2	Mikromechanische Beschleunigungssensoren . . . . .	103
3.7	Einachsige Kraft- und Momentmessung . . . . .	104
3.7.1	Kraft-/Momentaufnehmer mit Dehnungsmeßstreifen . . . . .	105
3.7.2	Optische Verfahren zur Kraftmessung . . . . .	110
3.7.3	Piezelektrische Kraft- und Momentsensoren . . . . .	111
3.7.4	Magnetoelastische Kraftsensoren . . . . .	112
3.7.5	Kompensationsverfahren zur Kraftmessung . . . . .	113
3.8	Mehrkomponenten-Kraftsensoren . . . . .	113
	Literatur . . . . .	115
<b>4</b>	<b>Signale und Signalverarbeitung . . . . .</b>	<b>117</b>
4.1	Einteilung und Darstellung von Signalen . . . . .	117
4.1.1	Signalkennwerte und Signalkennfunktionen . . . . .	119
4.1.2	Einfluß von Zeitfenstern bei der FOURIER-Transformation . . . . .	125
4.1.3	Überlagerung von Signalen . . . . .	128
4.2	Zeitdiskrete Signale . . . . .	133
4.2.1	Diskrete und Schnelle FOURIER-Transformation (DFT und FFT) . . . . .	135
4.2.2	Schätzung von Signalmodellen (Formfilter) . . . . .	138
	Literatur . . . . .	141
<b>5</b>	<b>Prozeßdatenverarbeitung . . . . .</b>	<b>142</b>
5.1	Begriffsdefinition Echtzeitdatenverarbeitung . . . . .	142
5.2	Grundstrukturen reaktiver Programmierung . . . . .	143
5.2.1	Programmgesteuerte Abfrage, Polling . . . . .	144
5.2.2	Zeitinterruptgesteuerte Abfrage . . . . .	144
5.2.3	Sammelinterruptgesteuerte Abfrage . . . . .	147
5.2.4	Prioritätsinterruptsystem . . . . .	148

5.3	Multitasking und Multiprocessing . . . . .	150
5.3.1	Einfaches Multitasking . . . . .	150
5.3.2	Multiprozessorarchitekturen . . . . .	155
5.3.3	Das Preemptionproblem . . . . .	156
5.4	Zeit-/Ereignisscheduling . . . . .	158
5.5	Synchronisation von Prozessen . . . . .	159
5.5.1	Konfliktsituationen bei mehreren Prozessen . . . . .	159
5.5.2	Semaphore . . . . .	162
5.5.3	Monitore . . . . .	165
5.5.4	Bolt-Variable . . . . .	166
5.5.5	Zählende Semaphore . . . . .	167
5.5.6	Rendezvous . . . . .	169
5.5.7	Kanäle . . . . .	171
5.6	Deadlock . . . . .	171
5.7	Bewertung von Echtzeitlösungen . . . . .	172
5.8	Echtzeitkonforme Sensor-/Aktornetze . . . . .	176
	Literatur . . . . .	178
<b>6</b>	<b>Modellbildung von Mehrkörpersystemen . . . . .</b>	<b>180</b>
6.1	Kinematik von Mehrkörpersystemen . . . . .	181
6.1.1	Koordinatensysteme und Koordinatentransformationen . . . . .	182
6.1.2	Beispiele für Rotationsmatrizen (Drehmatrizen) . . . . .	184
6.1.3	Homogene Koordinaten und homogene Transformationen . . . . .	189
6.1.4	Mechanische Ersatzsysteme mit Baumstruktur . . . . .	194
6.1.5	DENAVIT-HARTENBERG-Notation (DH-Notation) . . . . .	199
6.1.6	Direkte und inverse Kinematik . . . . .	202
6.1.7	Differentielle Kinematik und JACOBI-Matrix . . . . .	206
6.2	Kinetik von Mehrkörpersystemen . . . . .	211
6.2.1	Grundgleichungen für den starren Körper . . . . .	212
6.2.2	NEWTON-EULER-Methode . . . . .	215
6.2.3	LAGRANGESche Methode . . . . .	220
	Literatur . . . . .	227
<b>7</b>	<b>Trajektorienplanung . . . . .</b>	<b>228</b>
7.1	Kinematische Bahnplanung . . . . .	229
7.1.1	Beschreibung von Raumkurven . . . . .	230
7.1.2	Profile für die Bahngeschwindigkeit . . . . .	232
7.1.3	Generierung allgemeiner Trajektorien durch Interpolationspolynome . . . . .	234

7.1.4	Bahnplanung für redundante Systeme . . . . .	237
7.2	Trajektorienplanung und inverse Dynamik . . . . .	239
7.2.1	Parametrisierung der Bewegungsgleichungen . . . . .	241
7.2.2	Bemerkungen zur optimalen Trajektorienplanung . . . . .	245
	Literatur . . . . .	246
<b>8</b>	<b>Regelung mechatronischer Systeme . . . . .</b>	<b>247</b>
8.1	Linearisierung der Bewegungsgleichungen . . . . .	249
8.1.1	Zustandsraumbeschreibung linearer Systeme . . . . .	251
8.1.2	Andere Darstellungen linearer zeitinvarianter Systeme . . . . .	255
8.2	Regelungsentwurf für lineare Mehrgrößensysteme . . . . .	257
8.2.1	Struktur von Mehrgrößensystemen . . . . .	258
8.2.2	Lineare Mehrgrößensregelungen . . . . .	260
8.2.3	Regelungsentwurf durch Polzuweisung . . . . .	264
8.2.4	Polzuweisung für Regelstrecken mit einem Stelleingriff . . . . .	268
8.2.5	Modale Regelung . . . . .	272
8.2.6	Optimale lineare Regelung (LQ-Regelung) . . . . .	274
8.2.7	Beobachterentwurf und Regelung . . . . .	281
8.3	Digitale Regelung (Abtastregelung) . . . . .	283
8.3.1	Abtastung und Halteglied . . . . .	284
8.3.2	Zeitdiskrete Systeme im Zeitbereich . . . . .	285
8.3.3	Zeitdiskrete Systeme im Frequenzbereich . . . . .	292
8.3.4	Entwurf digitaler Regelungen . . . . .	297
8.4	Ausblick auf weitere Regelungsverfahren . . . . .	303
	Literatur . . . . .	310
<b>9</b>	<b>Ausgewählte Beispiele für mechatronische Systeme . . . . .</b>	<b>312</b>
9.1	Modellierung und Berechnung eines Industrieroboters . . . . .	312
9.1.1	Kinematisches Modell . . . . .	314
9.1.2	Differentielle Kinematik und Statik . . . . .	318
9.1.3	Trajektorienplanung (Bahnplanung) . . . . .	322
9.1.4	Dynamisches Modell . . . . .	325
9.1.5	Einzelachsregelung . . . . .	329
9.2	Stabilisierung eines Doppelpendels . . . . .	334
9.2.1	Beschreibung der Anlage . . . . .	334
9.2.2	Modellierung der Anlage . . . . .	335
9.2.3	Linearisierte Bewegungsgleichungen . . . . .	336
9.2.4	Beobachterentwurf der Teilsysteme . . . . .	338
9.2.5	Zustandsrückführung des Gesamtsystems . . . . .	341

9.2.6	Parameter der Regelung . . . . .	342
9.2.7	Zur Realisierung der Regelung auf einem Prozeßrechner . . .	343
9.3	Linear-Magnetführung für Werkzeugmaschinen . . . . .	344
9.3.1	Modellbildung . . . . .	345
9.3.2	Ansatz zur Freiheitsgrad-Regelung . . . . .	351
9.3.3	Entkoppelte Kaskadenregelung . . . . .	354
9.3.4	Meßergebnisse . . . . .	356
9.4	Elastischer Fahrweg . . . . .	358
9.4.1	Problemstellung . . . . .	359
9.4.2	Bewegungsdifferentialgleichung . . . . .	359
9.4.3	Lösung durch FOURIER-Reihen . . . . .	360
9.4.4	Finite-Elemente-Modell des Fahrwegs . . . . .	362
9.4.5	Aufstellen der Bewegungsgleichung . . . . .	363
9.4.6	Modellierung des Unterstützungsmechanismus . . . . .	365
9.4.7	Modaltransformation . . . . .	367
9.4.8	Beobachtergestützte Regelung . . . . .	369
9.4.9	Lineare Zustandsrückführung . . . . .	371
9.4.10	Meßsystem . . . . .	371
9.4.11	Ergebnisse . . . . .	372
	Literatur . . . . .	372
<b>A</b>	<b>Mathematische Grundlagen . . . . .</b>	<b>374</b>
A.1	LAPLACE- und FOURIER-Transformation . . . . .	374
A.1.1	LAPLACE-Transformation . . . . .	374
A.1.2	FOURIER-Transformation . . . . .	375
A.2	Matrizenrechnung . . . . .	377
A.2.1	Begriffe und einfache Rechenregeln . . . . .	377
A.2.2	Eigenwerte, Eigenvektoren . . . . .	378
A.2.3	Ähnlichkeitstransformation (Hauptachsentransformation) . .	380
A.2.4	Lineare Gleichungssysteme und Singulärwertzerlegung . . . .	381
A.3	Lineare, zeitinvariante dynamische Systeme . . . . .	384
A.3.1	Fundamentalmatrix und ihre Eigenschaften . . . . .	385
A.3.2	Modaltransformation . . . . .	386
A.3.3	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit . . . . .	387
	Literatur . . . . .	387
	<b>Sachwortverzeichnis . . . . .</b>	<b>388</b>