



Auf einen Blick

Über den Autor	9
Einführung	23
Teil I: Der Einstieg in ein spannendes Fach	29
Kapitel 1: Das Ganze im Überblick	31
Kapitel 2: Ein Beispiel zum Einstieg	47
Kapitel 3: Das Grundwissen für die Regelungstechnik	61
Teil II: Theorie kann praktisch sein	87
Kapitel 4: Schnell fertig mit Mathe	89
Kapitel 5: Die Algebra der Regelungstechnik	111
Kapitel 6: Alles schwingt	131
Kapitel 7: Zustände kompakt	161
Kapitel 8: Mehr zu den Zuständen	181
Teil III: Der Regelkreis hat Ecken	201
Kapitel 9: Das Regeln in einer Schleife	203
Kapitel 10: Die richtige Reglereinstellung	227
Kapitel 11: Erweiterte Regelkreise	255
Kapitel 12: Regeln mit Rechnern	275
Kapitel 13: Digitale Regelgeräte	293
Teil IV: Alles gleichzeitig regeln	309
Kapitel 14: Die Regelung von Zuständen	311
Kapitel 15: Zustandsbeobachter ersetzen Messungen	335
Kapitel 16: Integrales und Digitales	357
Teil V: Optimales, Menschliches und Hilfreiches	371
Kapitel 17: Optimal – besser geht es nicht	373
Kapitel 18: Fuzzy-Regler mit menschlichen Zügen	385
Kapitel 19: Hilfreiche Software für die Regelungstechnik	403
Teil VI: Der Top-Ten-Teil	429
Kapitel 20: Zehn Toptipps zur Regelungstechnik	431
Stichwortverzeichnis	439







Inhaltsverzeichnis

Über den Autor	9
Einführung.....	23
Über dieses Buch.....	23
Konventionen in diesem Buch.....	23
Wie dieses Buch aufgebaut ist.....	24
Teil I: Der Einstieg in ein spannendes Fach.....	24
Teil II: Theorie kann praktisch sein.....	24
Teil III: Der Regelkreis hat Ecken.....	25
Teil IV: Alles gleichzeitig regeln.....	25
Teil V: Optimales, Menschliches und Hilfreiches.....	26
Teil VI: Der Top-Ten-Teil.....	26
Symbole, die in diesem Buch verwendet werden.....	26
Wie es weitergeht.....	27
TEIL I	
DER EINSTIEG IN EIN SPANNENDES FACH	29
Kapitel 1	
Das Ganze im Überblick.....	31
Königsdisziplin der Automatisierung.....	31
Das Servicehaus.....	32
Messen, Steuern, Regeln.....	33
Aktoren und Sensoren.....	34
Regelungen in Technik und Natur.....	35
Das Prinzip Rückmeldung.....	36
Alles ist in Bewegung.....	38
Die Aufgaben von Regelungen.....	39
Die Regelstrecke.....	39
Die drei Schritte zu Regelungen.....	40
Es gibt viel zu tun.....	40
Viele Partner in einem Kreis.....	42
Prozess und Regelung im Wechselspiel.....	45
Kapitel 2	
Ein Beispiel zum Einstieg.....	47
Am Anfang steht der Auftrag.....	47
Den Prozess gut kennenlernen.....	50
Modelle sind hilfreich.....	51
Möglichst auch Messungen machen.....	53
Theorie und Praxis zusammenführen.....	54
Den Regelkreis schließen.....	55
Alles eine Frage der Einstellung.....	58
Ein paar Dinge sind schon klar geworden.....	60





14 Inhaltsverzeichnis

Kapitel 3

Das Grundwissen für die Regelungstechnik.....	61
Der komplette Regelkreis.....	61
Die Komponenten.....	62
Fragen zum Entwurf.....	63
Testsignale für den Regelkreis.....	64
Einfach mal einschalten.....	65
Hochlaufen lassen.....	66
Harmonisch schwingen.....	66
Das Verhalten der Regelstrecke.....	68
Prominente Modelle.....	70
Lineares bevorzugt.....	76
Stabil oder nicht.....	77
Reglertypen.....	79
Bei Reglern gibt es Standards.....	80
Manchmal genügt schalten.....	83
Wünsche erfüllen.....	85

TEIL II

THEORIE KANN PRAKTISCH SEIN.....	87
---	-----------

Kapitel 4

Schnell fertig mit Mathe.....	89
Differenziale machen dynamisch.....	89
Unterschiedlich und doch ähnlich.....	90
Da steckt alles drin.....	93
Systeme sich selbst überlassen.....	94
Steckbriefe der Dynamik.....	96
Schnell zu den Eigenwerten.....	97
Komplexe Zahlen.....	98
Stabile Bekannte.....	101
Algebra ist einfacher.....	103
Eine sehr brauchbare Transformation.....	104
Dynamik im Bildbereich.....	106
Der Weg zurück.....	107
Ein zentraler Begriff.....	108

Kapitel 5

Die Algebra der Regelungstechnik.....	111
Die Übertragungsfunktion im Fokus.....	111
Oben und unten.....	112
Wohin die Reise geht.....	113
Häufige Vertreter.....	114
Einfacher Zusammenbau.....	114
In Reihe.....	115
Nebeneinander.....	117
Im Kreis.....	118

Inhaltsverzeichnis 15

Der Regelkreis im Bildbereich.....	119
Zusammenschalten von Regler und Strecke.....	119
An Zähler und Nenner denken.....	120
Hilfreiches Programm.....	121
MATLAB – weltweit.....	122
Die Arbeitsweise.....	122
Polynome.....	123
Der Werkzeugkasten für die Regelungstechnik.....	124
Übertragungsfunktionen – noch einmal.....	124
Der Regelkreis mit MATLAB.....	125
Dynamik sichtbar machen.....	126
Blöcke zusammenschalten.....	128

Kapitel 6**Alles schwingt..... 131**

Schwingung rein, Schwingung raus.....	131
Der Gang mit der Frequenz.....	132
Auch hier wird Dynamik einfach.....	134
Mehr zu komplexen Zahlen.....	135
Vom einen zum anderen.....	136
Ein Beispiel aus der Mechanik.....	137
Der Antrieb erzeugt Schwingungen.....	137
Die Bilanz führt zum Modell.....	137
Der Frequenzgang zeigt die Resonanz.....	139
Der Frequenzgang grafisch.....	141
Die Ortskurve.....	141
Das Bode-Diagramm.....	146
Einen Schwinger schwingend anregen.....	150
... und wieder helfen Programme.....	151
Mit Asymptoten arbeiten.....	152
Wie Asymptoten entstehen.....	152
Wichtige Typen schnell erkennen.....	153
Einfaches Zusammenschalten und Zerlegen.....	156

Kapitel 7**Zustände kompakt..... 161**

Zustände, Vektoren und Matrizen.....	161
Mehrere Aufgaben gleichzeitig.....	161
Attraktive Modelle.....	163
Alles in einer Zeile.....	165
Die ABCD-Form.....	166
MIMO und SISO.....	167
Die beteiligten Matrizen.....	167
Drei Tanks.....	169
Flüssigkeitsbilanzen.....	169
Kompaktes Modell.....	170
Probelauf mit dem Modell.....	170



16 Inhaltsverzeichnis

Lösung der Zustandsgleichung.....	172
Erst mal skalar betrachten	173
Numerisch integrieren.....	175
Jetzt vektoriell.....	176
Potenzreihe der Exponentialfunktion	177
Die Berechnung der Fundamentalmatrix.....	177
Das vektorielle Modell im Block.....	179

Kapitel 8

Mehr zu den Zuständen..... 181

Eigenheiten, Eigenwerte, Eigenverhalten.....	181
Zunächst die Zustände.....	182
Weg 1: Bilanzen aufstellen.....	183
Weg 2: Freiheitsgrade beschreiben.....	184
Weg 3: Differenzialgleichung umbauen.....	186
Weg 4: Blockdiagramm auswerten.....	186
Veränderliches und Konstantes.....	187
Zustände ändern.....	187
Die Inverse einer Matrix.....	188
Transformation für alles.....	190
Systemeigenschaften bleiben erhalten.....	190
Normale Formen.....	192
Regelungsnormalform.....	193
Beobachternormalform.....	194
Steuerbares und Beobachtbares.....	195
Verschiedene Kategorien.....	195
Prüfung der Steuerbarkeit.....	197
Prüfung der Beobachtbarkeit.....	197

TEIL III

DER REGELKREIS HAT ECKEN..... 201

Kapitel 9

Das Regeln in einer Schleife..... 203

Struktur und Aufgaben.....	203
Der Standard.....	203
Die Aufgaben.....	205
Stabilität: Ein Polynom mit Charakter.....	206
Hurwitz gibt Auskunft.....	208
Nyquist kann schon mehr.....	211
Den Regelkreis kurz öffnen.....	211
Stabiles Verhalten erwünscht.....	212
Reserven sind wichtig.....	214
Stabilität numerisch prüfen.....	216
Vorbereitungen.....	216
Ein Standardregelkreis mit MATLAB.....	216



Inhaltsverzeichnis 17

Regeldifferenzen vermeiden	218
Die drei Einflüsse	218
Und so geht es	220
Dynamik vorgeben	223
Die Regelgröße darf etwas überschwingen	223
Kein Überschwingen erlaubt	225

Kapitel 10 **Die richtige Reglereinstellung 227**

PID – der Klassiker	227
Drei Kanäle	228
Drei Wirkungen	231
Ein Regler, der alles kompensiert	232
Etwas Algebra	232
Die Methode ist fertig	234
Was zu beachten ist	239
Vorgabe von Eigenwerten	239
Der Nenner ist wichtig	239
... und so wird es gemacht	241
Entwürfe im Bode-Diagramm	243
Die Reihenschaltung	243
Der P-Anteil kommt zuerst	244
Dann folgt der I-Anteil	244
Schließlich kommt der D-Anteil	245
Das Bode-Diagramm mit MATLAB	247
Praktische Regeln	247
Die T-Summen-Regel	248
Die Herren Chien, Hrones und Reswick	250
Das Ziegler-Nichols-Verfahren	252
Probieren mit Erfahrung	252

Kapitel 11 **Erweiterte Regelkreise 255**

Regelkreise in einer Kaskade	255
Zusätzliche Information aus der Regelstrecke	256
Zwei geschachtelte Regelkreise	256
Antriebsregelung mit Kaskadenstruktur	258
Einer für alle	258
Von innen nach außen	259
Regelkreise für Drehzahl und Winkel genauer betrachtet	261
Vorgabe von Führungsgrößen	262
Weitere Strukturen	263
Sollwerte direkt berücksichtigen	263
Den Regler unterstützen	264
Störungen erkennen und dagegenhalten	266
Split-Range-Regelung	267



18 Inhaltsverzeichnis

Zwei Größen gleichzeitig regeln.....	269
Verkoppelte Regelgrößen.....	269
Abhängigkeiten darstellen.....	270
Abhängigkeiten beseitigen.....	270

Kapitel 12

Regeln mit Rechnern..... 275

Regler werden zu Programmen.....	275
Von der Hardware zur Software.....	276
Signale im Rechner.....	279
Analoges und Digitales.....	280
Vom Kontinuierlichen zum Diskreten.....	280
Der Rechner kennt keine Differenziale.....	282
Es bleiben die Grundrechenarten.....	282
Was aus der Differenzialgleichung wird.....	283
Rekursive.....	283
Diskrete Regler.....	284
Der diskrete I-Regler.....	284
Der diskrete PID-T1-Regler.....	285
Programmierung.....	286
Diskrete Übertragungsfunktionen.....	288
Große Abtastzeiten und eine neue Transformation.....	288
Diskretisieren mit MATLAB.....	288
Vorteile und Nachteile.....	291

Kapitel 13

Digitale Regelgeräte..... 293

Regelungstechnische Datenverarbeitung.....	293
Regler und Rechner.....	294
Signale für die digitalen Regler.....	295
Prozentiges.....	296
Kompaktregler.....	297
So kann er aussehen.....	298
Funktionen auswählen.....	299
Wichtiges Umschalten.....	300
Störgrößen aufschalten.....	301
Schaltende Regler.....	302
Zwei Regler mit einer Aufgabe.....	303
Verhältnisse regeln.....	303
Was noch gebraucht wird.....	305
Sollwerte und Stellgrößen zügeln.....	305
Den I-Anteil begrenzen.....	306
Nichtlineares am Eingang.....	306

TEIL IV ALLES GLEICHZEITIG REGELN..... 309

Kapitel 14 Die Regelung von Zuständen 311

Rückführung des Systemzustands.....	311
Zwei Zustände eines Wagens.....	311
Die Regelung der zwei Zustände.....	313
Vorgabe der Regeldynamik.....	315
Eigenwertvorgaben leicht gemacht.....	318
Eine Stellgröße.....	319
Es geht noch einfacher.....	321
Und jetzt für mehrere Stellgrößen.....	322
Sollzustände erreichen.....	322
Aufschalten von Sollzuständen.....	322
Pseudo.....	324
In Bildern denken.....	325
Der Zwei-Massen-Schwinger.....	326
Der Versuchsaufbau.....	326
Die Mechanik.....	327
Aktiv dämpfen.....	329
Positionieren.....	331
Simulieren.....	332

Kapitel 15 Zustandsbeobachter ersetzen Messungen 335

Mit Modellen schätzen.....	335
Das Modell läuft mit.....	336
Zustände beobachten.....	337
Den Beobachter ebenfalls regeln.....	338
Nur eine Frage der Dimension.....	338
Berechnung von Beobachtern.....	339
Die regelnde Fehlerrückführung.....	339
Die Rückführung berechnen.....	341
Bei einer Messgröße ist es einfach.....	342
Beobachter an einer Rührkesselkaskade.....	343
Die Zustandsgleichungen.....	343
Beobachtbar?.....	344
Eigenwerte platzieren.....	344
Ein Test des Beobachters.....	345
Regeln mit Beobachtern.....	345
Die Kombination.....	346
Der richtige Entwurf.....	346
Beobachter und Regler an einem Antrieb.....	347
Eine Schwingerkette.....	347
In zehn Schritten zum Ziel.....	348



20 Inhaltsverzeichnis

Kapitel 16

Integrales und Digitales	357
Zustandsregler mit I-Anteil.....	357
Der Zustandsregler wird ergänzt.....	357
Die Erweiterung.....	359
Konkret.....	360
Übrigens	362
Diskretes für den Rechner	362
Prozess und Rechner.....	362
Der leichte Übergang.....	363
Der Entwurf findet im Kontinuierlichen statt.....	365
... auch für den Beobachter.....	369

TEIL V

OPTIMALES, MENSCHLICHES UND HILFREICHES.....	371
---	------------

Kapitel 17

Optimal – besser geht es nicht	373
Das Prinzip der Optimierung.....	373
Begriffe der Optimierung.....	373
Draht biegen	374
Optimierung von Reglern	375
Optimieren heißt: Kompromisse schließen	375
Quadrate werden nicht negativ.....	376
Ein optimaler P-Regler	378
Die Gütefunktion und das Optimum	380
Optimale Zustandsregler	381
Gütefunktion mit Vektoren.....	381
Es wird dem Rechner überlassen.....	382

Kapitel 18

Fuzzy-Regler mit menschlichen Zügen	385
Scharfes und Unscharfes.....	386
Eine neue Mengenlehre.....	386
Typische Fuzzy-Mengen	388
Fuzzifizierung – Schritte ins Unscharfe	390
Mit Fuzzy-Mengen regeln.....	391
Drei Teile	391
Ein Abstandsautomat.....	392
Die Regelbasis	394
Die Inferenz.....	396
Die Defuzzifizierung	398
Ein Vergleich	400
Vorteile.....	400
Nachteile.....	400
Nicht nur für die Regelungstechnik.....	401



Inhaltsverzeichnis 21

Kapitel 19	
Hilfreiche Software für die Regelungstechnik.....	403
MATLAB und seine Toolboxes.....	403
Ein kurzer Überblick.....	404
Zum Schmökern.....	405
Scilab – der umfangreiche Werkzeugkasten.....	405
Drei Möglichkeiten.....	405
Jede Menge Funktionen.....	408
Die Paletten von Xcos.....	410
Zum Schmökern.....	411
Mit WinFACT alle Register ziehen.....	412
Der ganze Baukasten.....	412
Mit BORIS geht es los.....	414
Fuzzy-Regelung mit BORIS und FLOP.....	415
Zum Schmökern.....	420
Virtuelle Instrumente mit LabVIEW bauen.....	420
Außen und innen.....	420
Auf den Paletten stapelt es sich.....	422
Ein Schrank voller Instrumente.....	424
Regelkreise.....	424
Ein Werkzeugkasten für Reglerentwurf und Simulation.....	426
Zum Schmökern.....	428
TEIL VI	
DER TOP-TEN-TEIL.....	429
Kapitel 20	
Zehn Toptipps zur Regelungstechnik.....	431
Merkregeln.....	431
Tipps für Studenten.....	431
Hinweise für den Praktiker.....	432
Damit wir uns nicht missverstehen.....	432
Schöne Gesellschaften.....	433
Brauchbares Internet.....	433
Feine Videos.....	433
Let's talk in English.....	435
Zum Blättern.....	437
Zum Vertiefen.....	437
Stichwortverzeichnis.....	439

