

# ***Inhaltsverzeichnis***

<b><i>Einführung</i></b>	<b>23</b>
Über dieses Buch	23
Konventionen in diesem Buch	23
Wie dieses Buch aufgebaut ist	23
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
<b><i>Teil I</i></b>	<b>29</b>
<b><i>Der Einstieg in ein spannendes Fach</i></b>	<b>29</b>
<b><i>Kapitel 1</i></b>	<b>31</b>
<b><i>Das Ganze im Überblick</i></b>	<b>31</b>
Königsdisziplin der Automatisierung	31
Das Servicehaus	31
Messen, Steuern, Regeln	32
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	43
Prozess und Regelung im Wechselspiel	45
<b><i>Kapitel 2</i></b>	<b>49</b>
<b><i>Ein Beispiel zum Einstieg</i></b>	<b>49</b>
Am Anfang steht der Auftrag	49
Den Prozess gut kennenlernen	52
Modelle sind hilfreich	53

Möglichst auch Messungen machen	55
Theorie und Praxis zusammenführen	56
Den Regelkreis schließen	57
Alles eine Frage der Einstellung	60
Ein paar Dinge sind schon klar geworden	61

## Kapitel 3

### Das Grundwissen für die Regelungstechnik

65

Der komplette Regelkreis	65
Die Komponenten	66
Fragen zum Entwurf	67
Testsignale für den Regelkreis	68
Einfach mal einschalten	68
Hochlaufen lassen	70
Harmonisch schwingen	70
Das Verhalten der Regelstrecke	72
Prominente Modelle	74
Lineares bevorzugt	80
Stabil oder nicht	82
Reglertypen	84
Bei Reglern gibt es Standards	84
Manchmal genügt schalten	87
Wünsche erfüllen	90

## Teil II

### Theorie kann praktisch sein

91

## Kapitel 4

### Schnell fertig mit Mathe

93

Differenziale machen dynamisch	93
Unterschiedlich und doch ähnlich	94
Da steckt alles drin	97
Systeme sich selbst überlassen	99
Steckbriefe der Dynamik	101
Schnell zu den Eigenwerten	101
Komplexe Zahlen	102
Stabile Bekannte	105
Algebra ist einfacher	108
Eine sehr brauchbare Transformation	108
Dynamik im Bildbereich	111
Der Weg zurück	112
Ein zentraler Begriff	113

***Kapitel 5******Die Algebra der Regelungstechnik*****117**

Die Übertragungsfunktion im Fokus	117
Oben und unten	117
Wohin die Reise geht	119
Häufige Vertreter	120
Einfacher Zusammenbau	120
In Reihe	121
Nebeneinander	123
Im Kreis	124
Der Regelkreis im Bildbereich	125
Zusammenschalten von Regler und Strecke	125
An Zähler und Nenner denken	126
Hilfreiches Programm	128
MATLAB – weltweit	128
Die Arbeitsweise	129
Polynome	130
Der Werkzeugkasten für die Regelungstechnik	130
Übertragungsfunktionen – noch einmal	130
Der Regelkreis mit MATLAB	131
Dynamik sichtbar machen	133
Blöcke zusammenschalten	134

***Kapitel 6******Alles schwingt*****135**

Schwingung rein, Schwingung raus	135
Der Gang mit der Frequenz	136
Auch hier wird Dynamik einfach	138
Mehr zu komplexen Zahlen	139
Vom einen zum anderen	140
Ein Beispiel aus der Mechanik	141
Der Antrieb erzeugt Schwingungen	141
Die Bilanz führt zum Modell	142
Der Frequenzgang zeigt die Resonanz	143
Der Frequenzgang grafisch	145
Die Ortskurve	145
Das Bode-Diagramm	151
Einen Schwingen schwingend anregen	154
... und wieder helfen Programme	156
Mit Asymptoten arbeiten	156
Wie Asymptoten entstehen	157
Wichtige Typen schnell erkennen	158
Einfaches Zusammenschalten und Zerlegen	161

## Kapitel 7

### Zustände kompakt

165

Zustände, Vektoren und Matrizen	165
Mehrere Aufgaben gleichzeitig	165
Attraktive Modelle	167
Alles in einer Zeile	169
Die ABCD-Form	170
MIMO und SISO	171
Die beteiligten Matrizen	171
Drei Tanks	172
Flüssigkeitsbilanzen	173
Kompaktes Modell	174
Probelauf mit dem Modell	174
Lösung der Zustandsgleichung	176
Erst mal skalar betrachten	177
Numerisch integrieren	179
Jetzt vektoriell	180
Potenzreihe der Exponentialfunktion	181
Die Berechnung der Fundamentalmatrix	181
Das vektorielle Modell im Block	183

## Kapitel 8

### Mehr zu den Zuständen

185

Eigenheiten, Eigenwerte, Eigenverhalten	185
Zunächst die Zustände	186
Weg 1: Bilanzen aufstellen	187
Weg 2: Freiheitsgrade beschreiben	188
Weg 3: Differenzialgleichung umbauen	190
Weg 4: Blockdiagramm auswerten	190
Veränderliches und Konstantes	191
Zustände ändern	191
Die Inverse einer Matrix	192
Transformation für alles	194
Systemeigenschaften bleiben erhalten	194
Normale Formen	197
Regelungsnormalform	198
Beobachternormalform	199
Steuerbares und Beobachtbares	200
Verschiedene Kategorien	200
Prüfung der Steuerbarkeit	201
Prüfung der Beobachtbarkeit	202

<b>Teil III</b>	
<b>Der Regelkreis hat Ecken</b>	<b>205</b>

<b>Kapitel 9</b>	
<b>Das Regeln in einer Schleife</b>	<b>207</b>

Struktur und Aufgaben	207
Der Standard	207
Die Aufgaben	209
Stabilität: Ein Polynom mit Charakter	210
Hurwitz gibt Auskunft	211
Nyquist kann schon mehr	214
Den Regelkreis kurz öffnen	215
Stabiles Verhalten erwünscht	217
Reserven sind wichtig	218
Stabilität numerisch prüfen	220
Vorbereitungen	220
Ein Standardregelkreis mit MATLAB	221
Regeldifferenzen vermeiden	222
Die drei Einflüsse	222
Und so geht es	224
Dynamik vorgeben	227
Die Regelgröße darf etwas überschwingen	228
Kein Überschwingen erlaubt	229

<b>Kapitel 10</b>	
<b>Die richtige Reglereinstellung</b>	<b>231</b>

PID – der Klassiker	231
Drei Kanäle	232
Drei Wirkungen	235
Ein Regler, der alles kompensiert	236
Etwas Algebra	236
Die Methode ist fertig	238
Was zu beachten ist	243
Vorgabe von Eigenwerten	243
Der Nenner ist wichtig	243
... und so wird es gemacht	245
Entwürfe im Bode-Diagramm	247
Die Reihenschaltung	247
Der P-Anteil kommt zuerst	248
Dann folgt der I-Anteil	249
Schließlich kommt der D-Anteil	250
Das Bode-Diagramm mit MATLAB	251
Praktische Regeln	252
Die T-Summen-Regel	252

Die Herren Chien, Hrones und Reswick	255
Das Ziegler-Nichols-Verfahren	256
Probieren mit Erfahrung	257
<b>Kapitel 11</b>	
<b>Erweiterte Regelkreise</b>	<b>259</b>
Regelkreise in einer Kaskade	259
Zusätzliche Information aus der Regelstrecke	260
Zwei geschachtelte Regelkreise	260
Antriebsregelung mit Kaskadenstruktur	261
Einer für alle	262
Von innen nach außen	263
Regelkreise für Drehzahl und Winkel genauer betrachtet	264
Vorgabe von Führungsgrößen	266
Weitere Strukturen	267
Sollwerte direkt berücksichtigen	267
Den Regler unterstützen	269
Störungen erkennen und dagegenhalten	270
Split-Range-Regelung	272
Zwei Größen gleichzeitig regeln	273
Verkoppelte Regelgrößen	273
Abhängigkeiten darstellen	274
Abhängigkeiten beseitigen	274
<b>Kapitel 12</b>	
<b>Regeln mit Rechnern</b>	<b>279</b>
Regler werden zu Programmen	279
Von der Hardware zur Software	279
Signale im Rechner	283
Analogen und Digitales	284
Vom Kontinuierlichen zum Diskreten	285
Der Rechner kennt keine Differenziale	286
Es bleiben die Grundrechenarten	286
Was aus der Differenzialgleichung wird	287
Rekursives	288
Diskrete Regler	288
Der diskrete I-Regler	289
Der diskrete PID-T1-Regler	289
Programmierung	291
Diskrete Übertragungsfunktionen	292
Große Abtastzeiten und eine neue Transformation	293
Diskretisieren mit MATLAB	293
Vorteile und Nachteile	295

<b>Kapitel 13</b>		
<b>Digitale Regelgeräte</b>		<b>297</b>
Regelungstechnische Datenverarbeitung		297
Regler und Rechner		297
Signale für die digitalen Regler		299
Prozentiges		300
Kompaktregler		301
So kann er aussehen		302
Funktionen auswählen		303
Wichtiges Umschalten		304
Störgrößen aufschalten		304
Schaltende Regler		305
Zwei Regler mit einer Aufgabe		306
Verhältnisse regeln		307
Was noch gebraucht wird		309
Sollwerte und Stellgrößen zügeln		309
Den I-Anteil begrenzen		309
Nichtlineares am Eingang		310
<b>Teil IV</b>		
<b>Alles gleichzeitig regeln</b>		<b>313</b>
<b>Kapitel 14</b>		
<b>Die Regelung von Zuständen</b>		<b>315</b>
Rückführung des Systemzustands		315
Zwei Zustände eines Wagens		315
Die Regelung der zwei Zustände		317
Vorgabe der Regeldynamik		318
Eigenwertvorgaben leicht gemacht		322
Eine Stellgröße		322
Es geht noch einfacher		325
Und jetzt für mehrere Stellgrößen		326
Sollzustände erreichen		326
Aufschalten von Sollzuständen		326
Pseudo		328
In Bildern denken		329
Der Zwei-Massen-Schwinger		330
Der Versuchsaufbau		330
Die Mechanik		331
Aktiv dämpfen		333
Positionieren		335
Simulieren		336

<b>Kapitel 15</b>		
<b>Zustandsbeobachter ersetzen Messungen</b>		<b>339</b>
Mit Modellen schätzen		339
Das Modell läuft mit		339
Zustände beobachten		340
Den Beobachter ebenfalls regeln		342
Nur eine Frage der Dimension		342
Berechnung von Beobachtern		343
Die regelnde Fehlerrückführung		343
Die Rückführung berechnen		345
Bei einer Messgröße ist es einfach		346
Beobachter an einer Rührkesselkaskade		347
Die Zustandsgleichungen		348
Beobachtbar?		348
Eigenwerte platzieren		349
Ein Test des Beobachters		349
Regeln mit Beobachtern		350
Die Kombination		350
Der richtige Entwurf		351
Beobachter und Regler an einem Antrieb		351
Eine Schwingerkette		352
In zehn Schritten zum Ziel		352
<b>Kapitel 16</b>		
<b>Integrales und Digitales</b>		<b>361</b>
Zustandsregler mit I-Anteil		361
Der Zustandsregler wird ergänzt		361
Die Erweiterung		363
Konkret		364
Übrigens ...		365
Diskretes für den Rechner		366
Prozess und Rechner		366
Der leichte Übergang		367
Der Entwurf findet im Kontinuierlichen statt		369
... auch für den Beobachter		373
<b>Teil V</b>		
<b>Optimales, Menschliches und Hilfreiches</b>		<b>375</b>
<b>Kapitel 17</b>		
<b>Optimal – besser geht es nicht</b>		<b>377</b>
Das Prinzip der Optimierung		377
Begriffe der Optimierung		377

Draht biegen	378
Optimierung von Reglern	379
Optimieren heißt: Kompromisse schließen	379
Quadrate werden nicht negativ	381
Ein optimaler P-Regler	382
Die Gütefunktion und das Optimum	384
Optimale Zustandsregler	385
Gütefunktion mit Vektoren	385
Es wird dem Rechner überlassen	386

**Kapitel 18****Fuzzy-Regler mit menschlichen Zügen****389**

Scharfes und Unscharfes	389
Fuzzy	389
Eine neue Mengenlehre	390
Typische Fuzzy-Mengen	391
Fuzzifizierung – Schritte ins Unscharfe	394
Mit Fuzzy-Mengen regeln	395
Drei Teile	396
Ein Abstandsaufomat	397
Die Regelbasis	398
Die Inferenz	400
Die Defuzzifizierung	403
Ein Vergleich	404
Vorteile	404
Nachteile	405
Nicht nur für die Regelungstechnik	405

**Kapitel 19****Hilfreiche Software für die Regelungstechnik****407**

MATLAB und seine Toolboxes	407
Ein kurzer Überblick	407
Zum Schmöckern	408
Scilab – der umfangreiche Werkzeugkasten	409
Drei Möglichkeiten	409
Jede Menge Funktionen	412
Die Paletten von Xcos	414
Zum Schmöckern	415
Mit WinFACT alle Register ziehen	416
Der ganze Baukasten	416
Mit BORIS geht es los	418
Fuzzy-Regelung mit BORIS und FLOP	420
Zum Schmöckern	424
Virtuelle Instrumente mit LabVIEW bauen	424
Außen und innen	424

Auf den Paletten stapelt es sich	426
Ein Schrank voller Instrumente	428
Regelkreise	428
Ein Werkzeugkasten für Reglerentwurf und Simulation	430
Zum Schmöckern	431
<b>Teil VI</b>	
<b>Der Top-Ten-Teil</b>	<b>433</b>
<b>Kapitel 20</b>	
<b>Zehn Toptipps zur Regelungstechnik</b>	<b>435</b>
Merkregeln	435
Tipps für Studenten	435
Hinweise für den Praktiker	435
Damit wir uns nicht missverstehen	436
Schöne Gesellschaften	436
Brauchbares Internet	436
Feine Videos	437
Let's talk in English	439
Zum Blättern	440
Zum Vertiefen	441
<b>Stichwortverzeichnis</b>	<b>443</b>