

Inhalt

1	Einführung	1
1.1	Das Prinzip der Steuerung	2
1.2	Das Prinzip der Regelung	3
1.3	Signale und Komponenten des Regelkreises	4
1.4	Klassifikation von Regelungen	5
1.5	Regelungsstrategien	5
1.6	„Beste“ Einstellung eines Reglers	7
1.7	Statisches Übertragungsverhalten	11
1.8	Dynamisches Verhalten linearer Übertragungsglieder	18
1.9	Besondere Führungsgrößen	23
1.10	Störmodelle	24
1.11	Vorgehensmodell Reglerentwurf	25
2	Einführung Python und Pakete	31
2.1	Python	31
2.2	Matplotlib	36
2.3	NumPy	40
2.4	SciPy	42
2.5	Python Control Systems Library	45
2.6	SymPy und SymPy Control	46
2.7	Grafische Programmierung	48
2.8	MicroPython	50

3	Mathematische Modelle	55
3.1	Lösung der Differenzialgleichung mithilfe eines Simulators	55
3.2	Lösung der Differenzialgleichung mithilfe der Laplace-Transformation	57
3.2.1	Regeln für das Rechnen mit Übertragungsfunktionen	61
3.2.2	Anfangswert- und Endwertsätze	63
3.3	Frequenzgang	67
3.3.1	Berechnung und Messung des Frequenzgangs	68
3.3.2	Darstellung des Frequenzgangs in der Ortskurve	71
3.3.3	Darstellung des Frequenzgangs im Bode-Diagramm	73
3.4	Python-Beispiel	75
3.5	Mathematische Signalmodelle	77
3.6	Elementare Übertragungsglieder	78
3.6.1	Proportionalglied (P-Glied)	79
3.6.2	Integrierendes Glied (I-Glied)	80
3.6.3	Differenzierendes Glied (D-Glied)	82
3.6.4	Totzeitglied (T_t -Glied)	84
3.6.5	Nicht lineare Übertragungsglieder	85
3.7	Wirkungsplan-Elemente der Elektrotechnik	88
4	Regelstrecken	93
4.1	Verzögerungsglied 1. Ordnung (P- T_1 -Glied)	94
4.2	Verzögerungsglied n-ter Ordnung (P- T_n -Glied)	95
4.3	Verzögerungsglied 2. Ordnung (P- T_2 -Glied)	100
4.4	Totzeit-Strecke mit Verzögerung	107
4.5	Integrale Strecke mit Verzögerung (I- T_1 -Glied)	110
4.6	Lead-Lag-Glied	113
4.7	Das allgemeine rationale Übertragungsglied	115
4.8	Strecke ohne Ausgleich: Beispiel Fahrzeuglenkung	117
4.9	Strecke mit Ausgleich: Beispiel DC-Motor	123
4.10	Nicht lineare Strecke mit Ausgleich: Beispiel Fahrzeug	130
4.11	Nicht lineare Strecke mit Ausgleich: Beispiel Tiefsetzsteller	134
4.12	Identifikation dynamischer Systeme mit Python	139
5	PID-Regler	145
5.1	PI-Regler	145
5.2	PD-Regler	150

5.3	PD-T ₁ -Regler	152
5.4	PID-Regler	154
5.5	PID-T ₁ -Regler	155
5.6	Industrielle PID-Regler	157
5.6.1	Kompaktregler	157
5.6.2	Regler-Software-Baustein	160
5.6.3	Servo-Regler	163
6	Reglerentwurf	165
6.1	Stationäres Regelkreisverhalten	166
6.2	Dynamisches Regelkreisverhalten	173
6.3	Stabilität	175
6.4	Frequenzkennlinienverfahren	184
6.5	Kompensationsreglerentwurf	187
6.6	Entwurfsverfahren für PID-Regler	189
6.6.1	PID-Kompensationsregler	189
6.6.2	Das Betragsoptimum	192
6.6.3	Einstellregel nach Ziegler und Nichols	196
6.6.4	T-Summen-Einstellregel	198
6.6.5	Einstellregel von Chien, Hrones und Reswick	200
6.7	Regelung von I-T ₁ -Strecken	202
6.8	Regelung von Strecken mit Totzeit	215
6.9	Numerische Optimierung der Reglerparameter	220
6.9.1	Optimierung mithilfe von evolutionären Algorithmen	222
6.9.2	Numerische Optimierung für den robusten Entwurf	224
7	Besondere Strukturen der Regelungstechnik	233
7.1	Störgrößenaufschaltung	233
7.1.1	Statische Störgrößenaufschaltung	234
7.1.2	Dynamische Störgrößenaufschaltung	235
7.2	Kaskadenregler	237
7.3	Regelkreis mit Vorfilter und Vorsteuerung	240
7.4	Regler in der Rückführung	243
7.5	Entkopplung von Mehrgrößensystemen	244
7.6	Schaltende Regler	252

7.7	Zustandsraumbeschreibung	258
7.7.1	Einführung Zustandsraum	258
7.7.2	Zustandsraummodell DC-Motor	266
7.7.3	Ähnlichkeitstransformation	268
7.8	Zustandsregler	272
7.8.1	Struktur eines Zustandsreglers	273
7.8.2	Entwurf Zustandsregler	275
7.8.3	Beispiel Portalkran	283
7.9	Beobachter	291
7.10	Modellreduktion	294
8	Digitale Regelungen	299
8.1	Analog-Digital-Wandlung	303
8.2	Signale des digitalen Regelkreises	306
8.3	Mathematische Beschreibung des Abtastvorgangs	307
8.3.1	Abtasttheorem von Shannon	308
8.3.2	Wahl der Abtastzeit	309
8.3.3	Abtast-Halteglied	309
8.4	Diskretisierung linearer Systeme	313
8.4.1	Diskretisierung P-T ₁ -Glied	314
8.4.2	Diskretisierung I-Glied	316
8.5	Diskretisierte Grundregler	318
8.5.1	Diskretisierter P-Regler	320
8.5.2	Diskretisierter I-Regler	321
8.5.3	Diskretisierter PI-Regler	321
8.5.4	Diskretisierter D-T ₁ -Regler	322
8.6	Regleralgorithmen	323
8.7	Z-Transformation	326
8.8	Stabilität zeitdiskreter Systeme	336
8.9	Bilineare Transformation	339
8.10	Entwurf digitaler Regler	344
8.11	Motion Control	349

9 Beispiele und Aufgaben 363

9.1 Beispiele 363

9.1.1 Temperaturregelstrecke 363

9.1.2 Drehzahlregelung Elektromotor 371

9.1.3 Pendel 377

9.1.4 Dreifachkaskade 381

9.1.5 Querdynamikregelung 391

9.1.6 Regler Beispiel RC-Netzwerk 399

9.1.7 Beobachter 406

9.2 Aufgaben 409

9.2.1 Rechnen mit Wirkungsplänen und Übertragungsfunktionen 409

9.2.2 Elektrische Netzwerke 410

9.2.3 Bestimmung von Kenngrößen 410

9.2.4 Berechnung der Sprungantwort 411

9.2.5 Verhalten von PID-Reglern 411

9.2.6 Berechnung von Regelkreisen 412

9.2.7 Reglerentwurf 412

9.2.8 Diskretisierung von Systemen 413

9.2.9 Modellbildung und Reglerentwurf 413

9.3 Lösungen der Übungsaufgaben 414

10 Anhang 419

10.1 Laplace-Korrespondenztabelle 419

10.2 Berechnung der Sprungantwort eines P-T₂-Gliedes 420

10.3 Bestimmung der Überschwingweite eines P-T₂-Gliedes 423

10.4 Reglerentwurf gemäß Betragsoptimum 425

10.5 Installation der Software 427

10.6 Jupyter Notebooks 429

10.7 Input Output Systems ioSys 431

10.8 Formelzeichen 436

10.9 Abkürzungen 438

10.10 Literatur 439

Index 441

Die wichtigsten Python-Funktionen bzw. Methoden 447