

# Inhalt

|          |                                                                      |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einführung</b>                                                    | <b>1</b>  |
| 1.1      | Das Prinzip der Steuerung                                            | 2         |
| 1.2      | Das Prinzip der Regelung                                             | 2         |
| 1.3      | Signale und Komponenten des Regelkreises                             | 3         |
| 1.4      | Klassifikation von Regelungen                                        | 4         |
| 1.5      | Regelungsstrategien                                                  | 5         |
| 1.6      | „Beste“ Einstellung eines Reglers                                    | 6         |
| 1.7      | Statisches Übertragungsverhalten                                     | 10        |
| 1.8      | Dynamisches Verhalten linearer Übertragungsglieder                   | 16        |
| 1.9      | Besondere Führungsgrößen                                             | 21        |
| 1.10     | Vorgehensmodell Reglerentwurf                                        | 22        |
| <b>2</b> | <b>Einführung Python und Pakete</b>                                  | <b>27</b> |
| 2.1      | Python                                                               | 27        |
| 2.2      | Matplotlib                                                           | 32        |
| 2.3      | NumPy                                                                | 35        |
| 2.4      | SciPy                                                                | 37        |
| 2.5      | Python Control Systems Toolbox                                       | 40        |
| 2.6      | MicroPython                                                          | 41        |
| <b>3</b> | <b>Mathematische Modelle</b>                                         | <b>47</b> |
| 3.1      | Lösung der Differenzialgleichung mithilfe eines Simulators           | 47        |
| 3.2      | Lösung der Differenzialgleichung mithilfe der Laplace-Transformation | 48        |
| 3.2.1    | Regeln für das Rechnen mit Übertragungsfunktionen                    | 53        |
| 3.2.2    | Anfangswert- und Endwertsätze                                        | 55        |
| 3.3      | Frequenzgang                                                         | 59        |
| 3.3.1    | Berechnung und Messung des Frequenzgangs                             | 59        |
| 3.3.2    | Darstellung des Frequenzgangs in der Ortskurve                       | 62        |
| 3.3.3    | Darstellung des Frequenzgangs im Bode-Diagramm                       | 64        |
| 3.4      | Python-Beispiel                                                      | 66        |
| 3.5      | Mathematische Signalmodelle                                          | 68        |
| 3.6      | Elementare Übertragungsglieder                                       | 69        |
| 3.6.1    | Proportionalglied (P-Glied)                                          | 69        |
| 3.6.2    | Integrierendes Glied (I-Glied)                                       | 71        |
| 3.6.3    | Differenzierendes Glied (D-Glied)                                    | 73        |
| 3.6.4    | Totzeitglied ( $T_t$ -Glied)                                         | 74        |
| 3.7      | Wirkungsplan-Elemente der Elektrotechnik                             | 75        |

|                                                                    |            |
|--------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4 Regelstrecken</b>                                             | <b>79</b>  |
| 4.1 Verzögerungsglied 1. Ordnung ( $P-T_1$ -Glieder)               | 79         |
| 4.2 Verzögerungsglied n-ter Ordnung ( $P-T_n$ -Glieder)            | 81         |
| 4.3 Verzögerungsglied 2. Ordnung ( $P-T_2$ -Glieder)               | 85         |
| 4.4 Totzeit-Strecke mit Verzögerung                                | 92         |
| 4.5 Integrale Strecke mit Verzögerung ( $I-T_1$ -Glieder)          | 95         |
| 4.6 Lead-Lag-Glieder                                               | 98         |
| 4.7 Das allgemeine rationale Übertragungsglied                     | 100        |
| 4.8 Strecke ohne Ausgleich: Beispiel Fahrzeuglenkung               | 102        |
| 4.9 Strecke mit Ausgleich: Beispiel DC-Motor                       | 107        |
| 4.10 Nicht lineare Strecke mit Ausgleich: Beispiel Fahrzeug        | 115        |
| 4.11 Nicht lineare Strecke mit Ausgleich: Beispiel Tiefsetzsteller | 119        |
| <b>5 PID-Regler</b>                                                | <b>123</b> |
| 5.1 PI-Regler                                                      | 123        |
| 5.2 PD-Regler                                                      | 128        |
| 5.3 $PD-T_1$ -Regler                                               | 129        |
| 5.4 PID-Regler                                                     | 132        |
| 5.5 $PID-T_1$ -Regler                                              | 133        |
| 5.6 Industrielle PID-Regler                                        | 135        |
| 5.6.1 Kompaktregler                                                | 135        |
| 5.6.2 Regler-Software-Baustein                                     | 138        |
| 5.6.3 Servo-Regler                                                 | 140        |
| <b>6 Reglerentwurf</b>                                             | <b>143</b> |
| 6.1 Stationäres Regelkreisverhalten                                | 144        |
| 6.2 Dynamisches Regelkreisverhalten                                | 150        |
| 6.3 Stabilität                                                     | 152        |
| 6.4 Frequenzkennlinienverfahren                                    | 161        |
| 6.5 Kompensationsreglerentwurf                                     | 164        |
| 6.6 Entwurfsverfahren für PID-Regler                               | 165        |
| 6.6.1 PID-Kompensationsregler                                      | 165        |
| 6.6.2 Das Betragsoptimum                                           | 169        |
| 6.6.3 Einstellregel nach Ziegler und Nichols                       | 173        |
| 6.6.4 T-Summen-Einstellregel                                       | 174        |
| 6.6.5 Einstellregel von Chien, Hrones und Reswick                  | 176        |
| 6.7 Regelung von $I-T_1$ -Strecken                                 | 179        |
| 6.8 Regelung von Strecken mit Totzeit                              | 191        |
| 6.9 Numerische Optimierung der Reglerparameter                     | 196        |
| 6.9.1 Optimierung mithilfe von evolutionären Algorithmen           | 197        |
| 6.9.2 Numerische Optimierung für den robusten Entwurf              | 200        |

|          |                                                  |            |
|----------|--------------------------------------------------|------------|
| <b>7</b> | <b>Besondere Strukturen der Regelungstechnik</b> | <b>207</b> |
| 7.1      | Störgrößenaufschaltung                           | 207        |
| 7.1.1    | Statische Störgrößenaufschaltung                 | 208        |
| 7.1.2    | Dynamische Störgrößenaufschaltung                | 209        |
| 7.2      | Kaskadenregler                                   | 210        |
| 7.3      | Regelkreis mit Vorfilter und Vorsteuerung        | 213        |
| 7.4      | Regler in der Rückführung                        | 216        |
| 7.5      | Entkopplung von Mehrgrößensystemen               | 217        |
| 7.6      | Schaltende Regler                                | 220        |
| 7.7      | Zustandsraumbeschreibung                         | 226        |
| 7.7.1    | Einführung Zustandsraum                          | 226        |
| 7.7.2    | Zustandsraummodell DC-Motor                      | 233        |
| 7.7.3    | Ähnlichkeitstransformation                       | 235        |
| 7.8      | Zustandsregler                                   | 239        |
| 7.8.1    | Struktur eines Zustandsreglers                   | 239        |
| 7.8.2    | Entwurf Zustandsregler                           | 241        |
| 7.8.3    | Beispiel Portalkran                              | 248        |
| 7.9      | Beobachter                                       | 256        |
| 7.10     | Modellreduktion                                  | 260        |
| <b>8</b> | <b>Digitale Regelungen</b>                       | <b>265</b> |
| 8.1      | Analog-Digital-Wandlung                          | 268        |
| 8.2      | Signale des digitalen Regelkreises               | 271        |
| 8.3      | Mathematische Beschreibung des Abtastvorgangs    | 272        |
| 8.3.1    | Abtasttheorem von Shannon                        | 273        |
| 8.3.2    | Wahl der Abtastzeit                              | 274        |
| 8.3.3    | Abtast-Halteglied                                | 274        |
| 8.4      | Diskretisierung linearer Systeme                 | 278        |
| 8.4.1    | Diskretisierung $P$ - $T_1$ -Glied               | 278        |
| 8.4.2    | Diskretisierung $I$ -Glied                       | 281        |
| 8.5      | Diskretisierte Grundregler                       | 282        |
| 8.5.1    | Diskretisierter $P$ -Regler                      | 284        |
| 8.5.2    | Diskretisierter $I$ -Regler                      | 284        |
| 8.5.3    | Diskretisierter $PI$ -Regler                     | 285        |
| 8.5.4    | Diskretisierter $D$ - $T_1$ -Regler              | 285        |
| 8.6      | Regleralgorithmen                                | 286        |
| 8.7      | $Z$ -Transformation                              | 289        |
| 8.8      | Stabilität zeitdiskreter Systeme                 | 299        |
| 8.9      | Bilineare Transformation                         | 301        |
| 8.10     | Entwurf digitaler Regler                         | 306        |
| 8.11     | Motion Control                                   | 310        |

|           |                                                       |            |
|-----------|-------------------------------------------------------|------------|
| <b>9</b>  | <b>Beispiele und Aufgaben</b>                         | <b>325</b> |
| 9.1       | Beispiele                                             | 325        |
| 9.1.1     | Temperaturregelstrecke                                | 325        |
| 9.1.2     | Drehzahlregelung Elektromotor                         | 333        |
| 9.1.3     | Pendel                                                | 338        |
| 9.1.4     | Dreifachkaskade                                       | 343        |
| 9.1.5     | Querdynamikregelung                                   | 352        |
| 9.2       | Aufgaben                                              | 360        |
| 9.2.1     | Rechnen mit Wirkungsplänen und Übertragungsfunktionen | 360        |
| 9.2.2     | Elektrische Netzwerke                                 | 361        |
| 9.2.3     | Bestimmung von Kenngrößen                             | 361        |
| 9.2.4     | Berechnung der Sprungantwort                          | 362        |
| 9.2.5     | Verhalten von PID-Reglern                             | 362        |
| 9.2.6     | Berechnung von Regelkreisen                           | 362        |
| 9.2.7     | Reglerentwurf                                         | 363        |
| 9.2.8     | Diskretisierung von Systemen                          | 363        |
| 9.2.9     | Modellbildung und Reglerentwurf                       | 364        |
| 9.3       | Lösungen der Übungsaufgaben                           | 364        |
| <b>10</b> | <b>Anhang</b>                                         | <b>369</b> |
| 10.1      | Laplace-Korrespondenztabelle                          | 369        |
| 10.2      | Berechnung der Sprungantwort eines $P-T_2$ -Gliedes   | 370        |
| 10.3      | Bestimmung der Überswingweite eines $P-T_2$ -Gliedes  | 373        |
| 10.4      | Reglerentwurf gemäß Betragsoptimum                    | 375        |
| 10.5      | Installation der Software                             | 377        |
| 10.6      | Jupyter Notebooks                                     | 379        |
| 10.7      | Input Output Systems ioSys                            | 381        |
| 10.8      | Formelzeichen                                         | 387        |
| 10.9      | Abkürzungen                                           | 390        |
| 10.10     | Literatur                                             | 391        |
|           | <b>Index</b>                                          | <b>393</b> |