

Serge Zacher | Manfred Reuter

Regelungstechnik für Ingenieure

Analyse, Simulation und Entwurf von Regelkreisen

13., überarbeitete und erweiterte Auflage

Mit 397 Abbildungen, 96 Beispielen und 32 Aufgaben

STUDIUM



VIEWEG +
TEUBNER

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-------------|
| Formelzeichen | XIII |
| 1 Einleitung (von M. Reuter und S. Zacher)..... | 1 |
| 1.1 Das Prinzip der Regelung..... | 3 |
| 1.2 Darstellung im Wirkungsplan..... | 5 |
| 1.3 Gerätetechnische Ausführung eines Regelkreises..... | 7 |
| 1.4 Das Prinzip der Steuerung..... | 8 |
| 1.5 Beispiele für einfache Regelkreise..... | 9 |
| 1.6 Beispiele für vernaschte Regelkreise..... | 12 |
| 2 Mathematische Behandlung von Regelkreisen (von M. Reuter)..... | 15 |
| 2.1 Beharrungszustand und Zeitverhalten eines Regelkreisgliedes..... | 15 |
| 2.2 Das Aufstellen der Differentialgleichung..... | 17 |
| 2.3 Lösung der Differentialgleichung..... | 19 |
| 2.3.1 Spezielle Eingangsfunktionen..... | 19 |
| 2.3.2 Lösung der Differentialgleichung bei sprunghafter Verstellung der Eingangsgröße..... | 21 |
| 2.3.3 Lösung der Differentialgleichung durch Trennen der Veränderlichen..... | 22 |
| 2.3.4 Lösung der Differentialgleichung durch geeigneten Ansatz..... | 23 |
| 2.3.5 Lösung mittels Laplace-Transformation. Die Übertragungsfunktion .. | 25 |
| 2.3.6 Lösung der Differentialgleichung bei sinusförmiger Eingangsgröße. | 30 |
| 2.4 Beschreibung von Regelkreisen im Frequenzbereich..... | 34 |
| 2.4.1 Der Frequenzgang..... | 34 |
| 2.4.2 Die Ortskurve..... | 36 |
| 2.4.3 Beziehung zwischen Ortskurve und Sprungantwort..... | 39 |
| 2.4.4 Das Bode-Diagramm..... | 41 |
| 2.5 Beschreibung von Regelkreisen mit Übertragungsfunktionen..... | 42 |
| 2.5.1 Verbindungsmöglichkeiten von Regelkreisgliedern..... | 42 |
| 2.6 Behandlung des statischen Verhaltens..... | 44 |
| 2.6.1 Statische Kennlinien..... | 45 |
| 2.6.2 Statischer Regelfaktor..... | 47 |
| 2.6.3 Linearisierung mit analytischen Verfahren..... | 48 |
| 2.6.4 Linearisierung mit grafischen Verfahren..... | 50 |
| 3 Regelstrecke (von M. Reuter)..... | 51 |
| 3.1 P-Strecken ohne Verzögerung..... | 53 |
| 3.2 P-Strecken mit Verzögerung 1. Ordnung..... | 53 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.3 | P-Strecken mit Verzögerung 2. Ordnung..... | 59 |
| 3.4 | Strecken höherer Ordnung..... | 70 |
| 3.5 | Schwingungsfähige P-Strecken 2. Ordnung..... | 75 |
| 3.6 | I-Strecken ohne Verzögerung..... | 83 |
| 3.7 | I-Strecken mit Verzögerung! 1. Ordnung..... | 86 |
| 3.8 | Strecken mit Totzeit T_t | 92 |
| 3.9 | Regelstrecken mit Totzeit und Verzögerung 1. Ordnung..... | 96 |
| 4 | Regeleinrichtungen (von M. Reuter)..... | 99 |
| 4.1 | Elektronische Regler mittels Operationsverstärker..... | 101 |
| 4.2 | Führungs- und Störverhalten des geschlossenen Regelkreises..... | 104 |
| 4.2.1 | Führungsübertragungsfunktion..... | 104 |
| 4.2.2 | Störübertragungsfunktion..... | 106 |
| 4.3 | Zeitverhalten stetiger Regeleinrichtungen..... | 106 |
| 4.3.1 | P-Regeleinrichtung..... | 106 |
| 4.3.1.1 | P-Regeleinrichtung zur Regelung einer P-T]-Strecke..... | 108 |
| 4.3.2 | I-Regeleinrichtung..... | 112 |
| 4.3.2.1 | I-Regeleinrichtung zur Regelung einer P-Ti-Strecke..... | 114 |
| 4.3.2.2 | I-Regeleinrichtung zur Regelung einer I-Strecke..... | 117 |
| 4.3.3 | PI-Regeleinrichtung..... | 118 |
| 4.3.3.1 | PI-Regeleinrichtung zur Regelung einer P-T]-Strecke..... | 120 |
| 4.3.3.2 | PT-Regeleinrichtung zur Regelung einer I-Strecke..... | 124 |
| 4.3.4 | D-Verhalten..... | 125 |
| 4.3.5 | PD-Regeleinrichtung..... | 127 |
| 4.3.5.1 | PD-Regeleinrichtung zur Regelung einer P-T?-Strecke..... | 131 |
| 4.3.6 | PID-Regeleinrichtung..... | 135 |
| 4.3.6.1 | PID-Regeleinrichtung zur Regelung einer P-T2-Strecke..... | 140 |
| 5 | Das Bode Diagramm. Frequenzkennlinien verfahren (von M. Reuter)... | 143 |
| 5.1 | Bode-Diagramme einfacher Frequenzgänge..... | 143 |
| 5.1.1 | Bode-Diagramm eines P(-)Gliedes..... | 144 |
| 5.1.2 | Bode-Diagramm eines I-Gliedes..... | 144 |
| 5.1.3 | Bode-Diagramm eines D-Gliedes..... | 146 |
| 5.1.4 | Bode-Diagramm eines P-Gliedes mit Verzögerung 1. Ordnung..... | 147 |
| 5.1.5 | Bode-Diagramm eines PI-Gliedes..... | 148 |
| 5.1.6 | Bode-Diagramm eines PD-Gliedes..... | 150 |
| 5.1.7 | Bode-Diagramm eines P-T?-Gliedes..... | 152 |
| 5.2 | Darstellung in Reihe geschalteter Glieder im Bode-Diagramm..... | 153 |
| 5.2.1 | Konstruktion des Bode-Diagramms mittels Einzelfrequenzgängen..... | 153 |
| 5.2.2 | Konstruktion mittels Asymptoten (aktualisiert von S. Zacher)..... | 156 |
| 5.3 | Numerische Berechnung des Bode-Diagramms..... | 163 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 6 | Stabilitätskriterien (von M. Reuter) | 167 |
| 6.1 | Stabilitätskriterium nach Hurwitz | 168 |
| 6.2 | Stabilitätskriterium nach Nyquist | 174 |
| 6.2.1 | Graphische Ermittlung der Ortskurve bei gegebener Pol-Nullstellenverteilung | 175 |
| 6.2.2 | Ableitung des Nyquist-Kriteriums | 178 |
| 6.2.3 | Anwendung des Nyquist-Kriteriums | 180 |
| 6.3 | Stabilitätsuntersuchung nach Nyquist im Bode-Diagramm | 185 |
| 6.3.1 | Vereinfachtes Nyquist-Kriterium | 190 |
| 6.3.2 | Stabilitätsgüte und Phasenrand | 191 |
| 6.4 | Stabilitätsuntersuchung mittels Zweiortskurvenverfahren | 195 |
| 6.4.1 | Konstruktion der negativ inversen Ortskurve der Strecke | 197 |
| 7 | Das Wurzelortskurvenverfahren (von M. Reuter) | 201 |
| 7.1 | Analytische Berechnung der Wurzelortskurve | 203 |
| 7.2 | Geometrische Eigenschaften von Wurzelortskurven | 213 |
| 8 | Entwurf von linearen Regelkreisen (von S. Zacher) | 221 |
| 8.1 | Gütekriterien des Zeitverhaltens | 221 |
| 8.2 | Praktische Einstellregeln | 224 |
| 8.2.1 | Grob approximierter Strecke | 224 |
| 8.2.2 | Fein approximierter Strecke | 228 |
| 8.3 | Integalkriterien | 233 |
| 8.4 | Einstellregeln im Frequenzbereich | 236 |
| 8.4.1 | Betragsoptimum | 236 |
| 8.4.2 | Symmetrisches Optimum | 238 |
| 8.5 | Entwurf von Regelkreisen mit instabilen Strecken | 243 |
| 8.5.1 | Instabile P-T ₁ -Glieder | 243 |
| 8.5.2 | Instabile P-T ₂ -Glieder | 245 |
| 8.5.3 | Beispiele von instabilen Regelstrecken | 248 |
| 8.6 | Vermaschte Regelung | 251 |
| 8.6.1 | Regelung mit Hilfsregelgrößen | 251 |
| 8.6.2 | Kaskadenregelung | 252 |
| 8.6.3 | Begrenzungsregelung | 254 |
| 8.6.4 | Störgrößenaufschaltung | 256 |
| 8.7 | Mehrgrößenregelung | 258 |
| 8.7.1 | Regelstrecken mit mehreren Ein- und Ausgangsgrößen | 258 |
| 8.7.2 | Strukturen der Mehrgrößenregelung | 261 |
| 8.7.3 | Entwurf eines Diagonalreglers | 262 |
| 8.7.4 | Stabilität der Zweigrößenregelung | 265 |
| 8.7.5 | Entwurf eines Entkopplungsreglers | 265 |

| | | |
|-----------|---|-----|
| 9 | Nichtlineare Glieder im Regelkreis (von M. Reuter)..... | 271 |
| 9.1 | Harmonische Balance..... | 275 |
| 9.2 | Ermittlung spezieller Beschreibungsfunktionen..... | 276 |
| 9.2.1 | Beschreibungsfunktion eines Gliedes mit Sättigung..... | 277 |
| 9.2.2 | Beschreibungsfunktion eines Gliedes mit toter Zone..... | 279 |
| 9.2.3 | Beschreibungsfunktion eines Gliedes mit Hysterese..... | 282 |
| 9.2.4 | Beschreibungsfunktion eines Dreipunktreglers ohne Hysterese... .. | 285 |
| 9.3 | Stabilitätsuntersuchungen an nichtlinearen Regelkreisen..... | 287 |
| 9.3.1 | Dreipunktregler mit nachgeschaltetem Stellmotor..... | 288 |
| 9.3.2 | Untersuchung eines Regelkreises mit Ansprechempfindlichkeit... .. | 292 |
| 10 | Unstetige Regelung (von M. Reuter)..... | 295 |
| 10.1 | Idealer Zweipunktregler an einer P-Strecke höherer Ordnung..... | 296 |
| 10.2 | Zweipunktregler mit Hysterese an einer P-Strecke 1. Ordnung..... | 302 |
| 10.3 | Zweipunktregler mit Rückführung..... | 305 |
| 10.3.1 | Zweipunktregler mit verzögerter Rückführung..... | 306 |
| 10.3.2 | Zweipunktregler mit verzögert-nachgebender Rückführung..... | 310 |
| 10.4 | Dreipunktregler..... | 312 |
| 10.4.1 | Dreipunktregler mit Rückführung..... | 313 |
| 11 | Digitale Regelung (von S. Zacher)..... | 315 |
| 11.1 | Digitale Regeleinrichtungen..... | 315 |
| 11.2 | Abtastregelung..... | 319 |
| 11.2.1 | Wirkungsweise von digitalen Regelkreisen..... | 320 |
| 11.2.2 | Rechenzeit..... | 323 |
| 11.2.3 | Beschreibungsmethoden..... | 324 |
| 11.3 | Quasikontinuierliche Regelung..... | 327 |
| 11.3.1 | Wahl der Abtastperiode..... | 327 |
| 11.3.2 | Praktische Einstellregeln..... | 327 |
| 11.4 | Beschreibung von Abtastsystemen im Zeitbereich..... | 330 |
| 11.4.1 | Differenzgleichungen..... | 330 |
| 11.4.2 | Aufstellen der Differenzgleichungen..... | 330 |
| 11.4.3 | Lösung der Differenzgleichungen mittels Rekursion..... | 331 |
| 11.4.4 | Exakte Lösung der Differenzgleichungen..... | 331 |
| 11.4.5 | Digitalisierung analoger Regelalgorithmen..... | 335 |
| 11.4.6 | Stabilitätsbedingung für Abtastsysteme..... | 341 |
| 11.5 | Beschreibung von digitalen Systemen im z-Bereich..... | 343 |
| 11.5.1 | Die z-Transformation..... | 343 |
| 11.5.2 | Die z-Übertragungsfunktionen..... | 346 |
| 11.5.3 | Digitale Übertragungsfunktionen von einzelnen Elementen..... | 348 |
| 11.5.4 | Digitale Führungsübertragungsfunktionen..... | 351 |
| 11.5.5 | Stabilitätskriterien für digitale Regelkreise..... | 352 |

| | |
|--|-----|
| 12 Intelligente Regelung (von S. Zacher)..... | 357 |
| 12.1 Modellbasierte Regelung..... | 357 |
| 12.1.1 Kompensationsregler..... | 357 |
| 12.1.2 Smith-Prädiktor..... | 359 |
| 12.1.3 PFC-Regler (Predictive Function Control)..... | 361 |
| 12.1.4 Regler mit einem adaptiven Filter..... | 364 |
| 12.1.5 Regler mit endlicher Einstellzeit..... | 367 |
| 12.2 Fuzzy-Regler..... | 371 |
| 12.2.1 Funktionsweise und Aufbau eines Fuzzy-Reglers..... | 371 |
| 12.2.2 Fuzzy-Mengen und Zugehörigkeitsfunktionen..... | 372 |
| 12.2.3 Regelbasis und Inferenz..... | 374 |
| 12.2.4 Defuzzifizierung..... | 375 |
| 12.3 Neuro-Regelung..... | 377 |
| 12.3.1 Grundmodell eines künstlichen Neurons..... | 377 |
| 12.3.2 Mehrschicht-KNN und Backpropagation..... | 379 |
| 12.3.3 Regelkreisstrukturen mit KNN..... | 383 |
| | |
| 13 Zustandsregelung (von S. Zacher)..... | 387 |
| 13.1 Zustandsebene..... | 387 |
| 13.1.1 Zustandsebene eines linearen Systems..... | 388 |
| 13.1.2 Stabilitätsuntersuchung in der Zustandsebene..... | 390 |
| 13.1.3 Zustandsrückführung eines nichtlinearen Systems..... | 394 |
| 13.2 Zustandsraum..... | 397 |
| 13.3 Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit..... | 400 |
| 13.4 Entwurf von Regelkreisen mittels Polzuweisung..... | 402 |
| 13.4.1 Zustandsrückführung..... | 402 |
| 13.4.2 Vorfilter..... | 404 |
| 13.4.3 Ausgangsrückführung..... | 405 |
| 13.4.4 Störgrößenaufschaltung..... | 408 |
| 13.4.5 Beobachterentwurf..... | 410 |
| 13.5 Optimale Zustandsregelung nach LQ-Kriterien..... | 413 |
| 13.5.1 Optimale Zustandsrückführung..... | 414 |
| 13.5.2 Entwurf eines optimalen Beobachters..... | 416 |
| | |
| 14 Regelkreisanalyse mit MATLAB / Simulink (von S. Zacher)..... | 417 |
| 14.1 Grundlagen der MATLAB-Programmierung..... | 417 |
| 14.2 Grafik mit MATLAB..... | 421 |
| 14.3 Control System Toolbox..... | 426 |
| 14.4 Botfe-Diagramm mit MATLAB..... | 429 |
| 14.5 WOK mit MATLAB..... | 432 |
| 14.6 Einführung in MATLAB / Simulink..... | 438 |

| | |
|--|------------|
| Anhang | 441 |
| Lösungen der Übungsaufgaben (von M. Reuter und S. Zacher)..... | 441 |
| Rechenregeln der Laplace-Transformation (von M. Reuter)..... | 465 |
| Korrespondenztabelle (von M. Reuter)..... | 466 |
| Sätze der Laplace- und z-Transformation (von M. Reuter)..... | 467 |
| Tabelle der Laplace- und z-Transformation (von M. Reuter)..... | 468 |
| Tabelle der wichtigsten Regelkreisglieder (von M. Reuter)..... | 470 |
| | |
| Literaturverzeichnis (von S. Zacher)..... | 476 |
| | |
| English-German Symbols Directory (von S. Zacher)..... | 483 |
| | |
| Fachwörter Deutsch-Englisch (von S. Zacher)..... | 491 |
| | |
| Sachwortverzeichnis | 505 |