

INSTITUT WAR — Bibliothek —  
Wasserversorgung, Abwassertechnik  
Abfalltechnik und Raumplanung  
Technische Universität Darmstadt

Rolf Isermann

Petersenstraße 13, 64287 Darmstadt

TEL. 0 61 51/16 36 59 + 16 27 48

FAX 0 61 51/16 37 58

W. A. R. — Bibliothek  
Inv.-Nr. D/18408

01. 4 ISE

# Digitale Regelsysteme

Zweite, überarbeitete und erweiterte Auflage

Band I: Grundlagen  
Deterministische Regelungen

Mit 88 Abbildungen

Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York  
London Paris Tokyo 1988

# Inhaltsverzeichnis

|   |     |
|---|-----|
| <b>Verzeichnis der Abkürzungen</b> . . . . .  | XXI |
| <b>1 Einführung</b> . . . . .   | 1   |
| <b>A Grundlagen</b>   |     |
| <b>2 Regelung mit Digitalrechnern (Prozessor, Mikrorechner)</b> . . . . .                       | 15  |
| <b>3 Grundlagen linearer Abtastsysteme (zeitdiskrete Systeme)</b> . . . . .                     | 20  |
| 3.1 Zeitdiskrete Signale . . . . .  | 20  |
| 3.1.1 Diskrete Funktionen, Differenzgleichungen . . . . .                                       | 20  |
| 3.1.2 Impulsfolgen . . . . .  | 25  |
| 3.1.3 Fourier-Transformierte der Impulsfolge . . . . .  | 26  |
| 3.2 Laplace-Transformation zeitdiskreter Funktionen und Shannonsches<br>Abtasttheorem . . . . . | 30  |
| 3.2.1 Laplace-Transformation zeitdiskreter Funktionen . . . . .                                 | 30  |
| 3.2.2 Shannonsches Abtasttheorem . . . . .  | 31  |
| 3.2.3 Halteglied . . . . .  | 33  |
| 3.2.4 Frequenzgang von Abtastsystemen . . . . .   | 35  |
| 3.3 Die z-Transformation . . . . .  | 36  |
| 3.3.1 Einführung der z-Transformation . . . . .   | 36  |
| 3.3.2 Rechenregeln der z-Transformation . . . . .   | 37  |
| 3.3.3 z-Rücktransformation . . . . .  | 40  |
| 3.4 Faltungssumme und z-Übertragungsfunktion . . . . .  | 43  |
| 3.4.1 Faltungssumme . . . . .   | 43  |
| 3.4.2 Impulsübertragungsfunktion, z-Übertragungsfunktion . . . . .                              | 44  |
| 3.4.3 Eigenschaften von z-Übertragungsfunktionen und<br>Differenzgleichungen . . . . .          | 48  |
| 3.5 Pole und Nullstellen, Stabilität . . . . .  | 54  |
| 3.5.1 Lage der Pole in der z-Ebene . . . . .  | 55  |
| 3.5.2 Stabilitätsbedingungen . . . . .  | 60  |
| 3.5.3 Stabilitätsuntersuchung durch bilineare Transformation . . . . .                          | 60  |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.5.4 | Schur-Cohn-Jury Kriterium . . . . .  | 62 |
| 3.5.5 | Lage der Nullstellen in der z-Ebene . . . . .                                      | 65 |
| 3.6   | Zustandsgrößendarstellung . . . . .  | 67 |
| 3.6.1 | Vektordifferenzgleichung durch Lösung der<br>Vektordifferentialgleichung . . . . . | 67 |
| 3.6.2 | Vektordifferenzgleichung aus der Differenzgleichung . . . . .                      | 71 |
| 3.6.3 | Kanonische Formen . . . . .  | 74 |
| 3.6.4 | Prozesse mit Totzeit . . . . .   | 77 |
| 3.6.5 | Lösung der Vektordifferenzgleichung . . . . .                                      | 79 |
| 3.6.6 | Berechnung der z-Übertragungsfunktion . . . . .                                    | 81 |
| 3.6.7 | Berechnung der Gewichtsfunktion . . . . .  | 81 |
| 3.6.8 | Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit . . . . .  | 81 |
| 3.7   | Mathematische Prozeßmodelle . . . . .  | 85 |
| 3.7.1 | Grundtypen technischer Prozesse . . . . .  | 86 |
| 3.7.2 | Gewinnung der Prozeßmodelle – Modellbildung und<br>Identifikation . . . . .        | 88 |
| 3.7.3 | Berechnung von z-Übertragungsfunktionen aus<br>s-Übertragungsfunktionen . . . . .  | 89 |
| 3.7.4 | Vereinfachung von Prozeßmodellen für zeitdiskrete Signale . . . . .                | 94 |

**B Regelungen für deterministische Störungen**

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| <b>4</b> | <b>Deterministische Regelungen (Übersicht) . . . . .</b>                              | <b>101</b> |
| <b>5</b> | <b>Parameteroptimierte Regler . . . . .</b>   | <b>108</b> |
| 5.1      | Diskretisieren der Differentialgleichungen kontinuierlicher<br>PID-Regler . . . . .   | 108        |
| 5.2      | Parameteroptimierte diskrete Regelalgorithmen niederer Ordnung . . . . .              | 111        |
| 5.2.1    | Regelalgorithmen erster und zweiter Ordnung . . . . .                                 | 113        |
| 5.2.2    | Regelalgorithmen mit Vorgabe der ersten Stellgröße . . . . .                          | 120        |
| 5.2.3    | PID-Regelalgorithmus durch z-Transformation . . . . .                                 | 122        |
| 5.3      | Modifikationen diskreter PID-Regelalgorithmen . . . . .                               | 123        |
| 5.3.1    | Verschiedene Bewertung von Regelgröße und Führungsgröße . . . . .                     | 123        |
| 5.3.2    | Verschiedene Differenzenbildung des Differentialgliedes . . . . .                     | 125        |
| 5.3.3    | Verzögerter Differentialanteil . . . . .  | 126        |
| 5.4      | Entwurf durch numerische Parameteroptimierung . . . . .                               | 127        |
| 5.4.1    | Numerische Parameteroptimierung . . . . .   | 128        |
| 5.4.2    | Simulationsergebnisse für PID-Regelalgorithmen . . . . .                              | 130        |
| 5.5      | Entwurf von PID-Reglern durch Polvorgabe, Kompensation und<br>Approximation . . . . . | 144        |
| 5.5.1    | Entwurf durch Polvorgabe . . . . .  | 144        |
| 5.5.2    | Entwurf als Kompensationsregler . . . . .   | 146        |
| 5.5.3    | Entwurf von PID-Reglern durch Approximation<br>anderer Regler . . . . .               | 149        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.6      | Einstellregeln für parameteroptimierte Regelalgorithmen . . . . .                                 | 149        |
| 5.6.1    | Einstellregeln für modifizierte PID-Regler . . . . .  | 150        |
| 5.6.2    | Einstellregeln aufgrund gemessener Übergangsfunktionen . . . . .                                  | 150        |
| 5.6.3    | Einstellregeln mit Schwingversuchen . . . . .   | 156        |
| 5.7      | Wahl der Abtastzeit bei parameteroptimierten Regelalgorithmen . . . . .                           | 157        |
| 5.8      | Zusatzfunktionen digitaler PID-Regler . . . . .   | 160        |
| <b>6</b> | <b>Allgemeine lineare Regler und Kompensationsregler . . . . .</b>                                | <b>163</b> |
| 6.1      | Allgemeine lineare Regler . . . . .   | 163        |
| 6.1.1    | Allgemeiner linearer Regler mit Entwurf durch Polvorgabe . . . . .                                | 164        |
| 6.1.2    | Allgemeiner linearer Regler mit Entwurf durch<br>Parameteroptimierung . . . . .                   | 166        |
| 6.2      | Kompensationsregler . . . . .   | 166        |
| <b>7</b> | <b>Regler für endliche Einstellzeit (Deadbeat) . . . . .</b>                                      | <b>172</b> |
| 7.1      | Deadbeat-Regler ohne Stellgrößenvorgabe . . . . .   | 172        |
| 7.2      | Deadbeat-Regler mit Stellgrößenvorgabe . . . . .  | 177        |
| 7.3      | Wahl der Abtastzeit bei Deadbeat-Reglern . . . . .  | 182        |
| 7.4      | Approximation durch PID-Regler . . . . .  | 183        |
| <b>8</b> | <b>Zustandsregler und Zustandsbeobachter . . . . .</b>  | <b>186</b> |
| 8.1      | Optimale Zustandsregler für Anfangswerte . . . . .  | 187        |
| 8.2      | Optimale Zustandsregler für äußere Störungen . . . . .  | 196        |
| 8.3      | Zustandsregler mit vorgegebener charakteristischer Gleichung . . . . .                            | 201        |
| 8.4      | Modale Zustandsregelung . . . . .   | 203        |
| 8.5      | Zustandsregler für endliche Einstellzeit (Deadbeat) . . . . .                                     | 208        |
| 8.6      | Zustandsgrößen-Beobachter . . . . .   | 209        |
| 8.7      | Zustandsregler mit Beobachter . . . . .   | 213        |
| 8.7.1    | Beobachter für Anfangswerte . . . . .   | 214        |
| 8.7.2    | Beobachter für äußere Störungen . . . . .   | 215        |
| 8.7.3    | Einführung von Integralgliedern in den Zustandsregler . . . . .                                   | 223        |
| 8.7.4    | Maßnahmen zur Verringerung der Beobachterverzögerung . . . . .                                    | 226        |
| 8.8      | Zustandsgrößenbeobachter reduzierter Ordnung . . . . .  | 227        |
| 8.9      | Zustandsgrößen-Rekonstruktion . . . . .   | 231        |
| 8.10     | Zur Wahl der Bewertungsmatrizen und der Abtastzeit . . . . .                                      | 233        |
| 8.10.1   | Bewertungsmatrizen bei Zustandsreglern und Beobachtern . . . . .                                  | 233        |
| 8.10.2   | Wahl der Abtastzeit . . . . .   | 235        |
| <b>9</b> | <b>Regler für Prozesse mit großen Totzeiten . . . . .</b>   | <b>236</b> |
| 9.1      | Modelle für Prozesse mit Totzeiten . . . . .  | 236        |
| 9.2      | Deterministische Regler für Totzeitprozesse . . . . .   | 238        |
| 9.2.1    | Prozesse mit großen Totzeiten und zusätzlicher Dynamik . . . . .                                  | 238        |
| 9.2.2    | Reine Totzeitprozesse . . . . .   | 240        |
| 9.3      | Vergleich der Regelgüte und Empfindlichkeit verschiedener Regler<br>für Totzeitprozesse . . . . . | 244        |

|   |     |
|---|-----|
| <b>10 Empfindlichkeit und Robustheit mit konstanten Reglern</b>                       | 251 |
| 10.1 Zur Empfindlichkeit von Regelungen   | 252 |
| 10.2 Unempfindliche Regelungen  | 256 |
| 10.2.1 Unempfindlichkeit durch zusätzliche dynamische Rückführung                     | 256 |
| 10.2.2 Unempfindlichkeit durch Variation des Entwurfs üblicher Regler                 | 259 |
| 10.3 Zur Robustheit von Regelungen  | 262 |
| 10.4 Robuste Regelungen   | 268 |
| <b>11 Vergleich verschiedener Regler für deterministische Störsignale</b>             | 272 |
| 11.1 Vergleich von Reglerstrukturen, Polen und Nullstellen                            | 272 |
| 11.1.1 Allgemeiner linearer Regler für vorgegebene Pole                               | 273 |
| 11.1.2 Parameteroptimierte Regler niederer Ordnung                                    | 273 |
| 11.1.3 Allgemeiner Kompensationsregler  | 273 |
| 11.1.4 Deadbeat-Regler  | 274 |
| 11.1.5 Prädiktorregler  | 275 |
| 11.1.6 Zustandsregler   | 276 |
| 11.2 Kennwerte für einen Gütevergleich  | 280 |
| 11.3 Gütevergleich der Regelalgorithmen   | 281 |
| 11.4 Vergleich des dynamischen Regelfaktors   | 292 |
| 11.5 Folgerungen für die Anwendung der Regelalgorithmen                               | 297 |
| <b>Anhang A</b>   | 300 |
| A1 Tabelle der z-Transformierten und Laplace-Transformierten                          | 300 |
| A2 Tabelle einiger Übertragungsglieder mit kontinuierlichen und abgetasteten Signalen | 301 |
| A3 Testprozesse zur Simulation  | 301 |
| A4 Zur Ableitung von Vektoren und Matrizen  | 307 |
| <b>Anhang B</b>   | 310 |
| Übungsaufgaben  | 310 |
| <b>Anhang C</b>   | 319 |
| Ergebnisse der Übungsaufgaben   | 319 |
| <b>Literatur</b>  | 329 |
| <b>Sachverzeichnis</b>  | 336 |