

# Inhaltsverzeichnis

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| Verzeichnis der Abkürzungen . . . . . | XXI |
|---------------------------------------|-----|

## C Regelungen für stochastische Störungen

|  |    |
|--|----|
| <b>12 Stochastische Regelungen (Einführung)</b> . . . . .                              | 3  |
| 12.1 Vorbemerkungen . . . . .  | 3  |
| 12.2 Mathematische Modelle stochastischer Signalprozesse . . . . .                     | 4  |
| 12.2.1 Grundbegriffe . . . . .   | 4  |
| 12.2.2 Markov-Signalprozeß . . . . .   | 6  |
| 12.2.3 Skalare stochastische Differenzgleichungen . . . . .                            | 9  |
| <b>13 Parameteroptimierte Regler für stochastische Störsignale</b> . . . . .           | 10 |
| <b>14 Minimalvarianzregler für stochastische Störsignale</b> . . . . .                 | 13 |
| 14.1 Verallgemeinerte Minimalvarianzregler für Prozesse<br>ohne Totzeiten . . . . .    | 13 |
| 14.1 Verallgemeinerte Minimalvarianzregler für Prozesse mit Totzeiten                  | 22 |
| 14.3 Minimalvarianzregler für Prozesse mit reinen Totzeiten . . . . .                  | 26 |
| 14.4 Minimalvarianzregler für bleibende Störungen . . . . .                            | 27 |
| 14.4.1 Hinzufügen eines integral wirkenden Gliedes . . . . .                           | 27 |
| 14.4.2 Minimieren der Regeldifferenz . . . . .   | 28 |
| 14.5 Simulationsergebnisse mit Minimalvarianzreglern . . . . .                         | 29 |
| 14.6 Vergleich verschiedener deterministischer<br>und stochastischer Regler . . . . .  | 34 |
| <b>15 Zustandsregler für stochastische Störungen</b> . . . . .                         | 38 |
| 15.1 Optimale Zustandsregler für weißes Rauschen . . . . .                             | 38 |
| 15.2 Optimale Zustandsregler mit Zustandsschätzung<br>für weiße Störsignale . . . . .  | 41 |
| 15.3 Optimale Zustandsregler mit Zustandsschätzung<br>für äußere Störsignale . . . . . | 43 |

**D Vermaschte Regelungen**

|  |    |
|--|----|
| <b>16 Kaskadenregelungen</b>                                 | 51 |
| <b>17 Steuerungen zur Störgrößenaufschaltung</b>             | 58 |
| 17.1 Kompensationssteuerungen                                | 59 |
| 17.2 Parameteroptimierte Steuerungen                         | 62 |
| 17.2.1 Parameteroptimierte Steuerung ohne Stellgrößenvorgabe | 62 |
| 17.2.2 Parameteroptimierte Steuerung mit Stellgrößenvorgabe  | 63 |
| 17.2.3 Zusammenwirken von Steuerung und Regelung             | 66 |
| 17.3 Zustandssteuerungen                                     | 67 |
| 17.4 Minimalvarianzsteuerungen                               | 67 |

**E Mehrgrößenregelungen**

|  |     |
|--|-----|
| <b>18 Strukturen von Mehrgrößenprozessen</b>                                   | 73  |
| 18.1 Strukturelle Eigenschaften bei Übertragungsdarstellung                    | 74  |
| 18.1.1 Kanonische Strukturen   | 74  |
| 18.1.2 Charakteristische Gleichung und Koppelfaktor                            | 78  |
| 18.1.3 Einwirkung äußerer Signale  | 81  |
| 18.1.4 Gegenseitige Wirkung der Hauptregler                                    | 82  |
| 18.1.5 Matrizenpolynomdarstellung  | 84  |
| 18.2 Strukturelle Eigenschaften bei Zustandsdarstellung                        | 85  |
| <b>19 Parameteroptimierte Mehrgrößenregelungen</b>                             | 91  |
| 19.1 Parameteroptimierung der Hauptregler ohne Koppelregler                    | 93  |
| 19.1.1 Stabilitätsgebiete  | 93  |
| 19.1.2 Optimierung der Reglerparameter und Einstellregeln für Zweigrößenregler | 98  |
| 19.2 Entkopplung durch Koppelregler (Autonomisierung)                          | 102 |
| 19.3 Parameteroptimierung von Haupt- und Koppelreglern                         | 105 |
| <b>20 Mehrgrößenregelungen mit Matrizenpolynomen</b>                           | 108 |
| 20.1 Allgemeiner Matrizenpolynomregler   | 108 |
| 20.2 Matrizenpolynom-Deadbeat-Regler   | 109 |
| 20.3 Matrizenpolynom-Minimalvarianzregler                                      | 110 |
| <b>21 Mehrgrößenregelungen mit Zustandsreglern</b>                             | 112 |
| 21.1 Mehrgrößen-Zustandsregler mit Polvorgabe                                  | 112 |
| 21.2 Mehrgrößen-Matrix-Riccati-Zustandsregler                                  | 116 |
| 21.3 Mehrgrößen-Entkopplungs-Zustandsregler                                    | 116 |
| 21.4 Mehrgrößen-Minimalvarianz-Zustandsregler                                  | 117 |

**22 Zustandsgrößenschätzung . . . . . 119**

22.1 Vektorielle Signalprozesse und Annahmen . . . . . 120

22.2 Rekursive Schätzung skalarer Größen . . . . . 122

22.2.1 Gewichtete Mittelwertbildung zweier skalarer Größen . 122

22.2.2 Rekursive Schätzung einer konstanten Größe . . . . . 123

22.2.3 Rekursive Schätzung einer stochastischen zeitvarianten  
Größe . . . . . 124

22.3 Rekursive Schätzung vektorieller Größen . . . . . 130

22.3.1 Gewichtete Mittelwertbildung zweier vektorieller Meßwerte 130

22.3.2 Rekursive Schätzung vektorieller Zustandsgrößen  
(Kalman-Filter) . . . . . 133

**F Adaptive Regelungen**

**23 Adaptive Regelungen (Übersicht) . . . . . 145**

23.1 Adaptive Regler mit Referenzmodell (MRAS) . . . . . 148

23.1.1 Lokale Parameteroptimierung . . . . . 148

23.1.2 Ljapunov-Entwurf . . . . . 150

23.1.3 Hyperstabilitätsentwurf . . . . . 152

23.2 Adaptive Regler mit Identifikationsmodell (MIAS) . . . . . 157

**24 On-line-Identifikation dynamischer Prozesse und stochastischer Signale . 160**

24.1 Prozeß- und Störsignalmodelle . . . . . 160

24.2 Rekursive Methode der kleinsten Quadrate (RLS) . . . . . 162

24.2.1 Dynamische Prozesse . . . . . 162

24.2.2 Stochastische Signale . . . . . 168

24.3 Rekursive, erweiterte Methode der kleinsten Quadrate (RELS) . 169

24.4 Rekursive Methode der Hilfsvariablen (RIV) . . . . . 170

24.5 Einheitlicher rekursiver Parameterschätzalgorithmus . . . . . 172

24.6 Modifikationen rekursiver Parameterschätzalgorithmen . . . . . 175

**25 On-line-Identifikation im geschlossenen Regelkreis . . . . . 179**

25.1 Prozeßidentifikation ohne Zusatzsignal . . . . . 180

25.1.1 Indirekte Prozeßidentifikation . . . . . 181

25.1.2 Direkte Prozeßidentifikation . . . . . 185

25.2 Prozeßidentifikation mit Zusatzsignal . . . . . 189

25.3 Methoden zur Identifikation im geschlossenen Regelkreis . . . 191

25.3.1 Indirekte Prozeßidentifikation ohne Zusatzsignal . . . . 191

25.3.2 Direkte Prozeßidentifikation ohne Zusatzsignal . . . . 191

25.3.3 Direkte Prozeßidentifikation mit Zusatzsignal . . . . . 192

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>26</b> | <b>Parameteradaptive Regler</b>                                       | 193 |
| 26.1      | Entwurfsprinzipien  | 193 |
| 26.2      | Geeignete Regelalgorithmen  | 198 |
| 26.2.1    | Deadbeat-Regelalgorithmen   | 199 |
| 26.2.2    | Minimalvarianzregler  | 200 |
| 26.2.3    | Parameteroptimierte Regler  | 201 |
| 26.2.4    | Allgemeiner linearer Regler mit Polvorgabe (LRPV)                     | 203 |
| 26.2.5    | Zustandsregler  | 203 |
| 26.3      | Geeignete Kombinationen   | 204 |
| 26.3.1    | Arten der Kombinationen   | 204 |
| 26.3.2    | Stabilität und Konvergenz   | 206 |
| 26.3.3    | Auswahl der Elemente parameteradaptiver Regelungen                    | 211 |
| 26.4      | Stochastische parameteradaptive Regler                                | 212 |
| 26.4.1    | Adaptiver Minimalvarianzregler (RLS/MV4)                              | 212 |
| 26.4.2    | Adaptive verallgemeinerte Minimalvarianzregler<br>(RLS/MV3, RELS/MV3) | 215 |
| 26.5      | Deterministische parameteradaptive Regler                             | 217 |
| 26.5.1    | Adaptiver Deadbeat-Regler (RLS/DB)                                    | 218 |
| 26.5.2    | Adaptive Zustandsregler (RLS/ZR)                                      | 221 |
| 26.5.3    | Adaptive PID-Regler   | 225 |
| 26.6      | Simulationsbeispiele  | 228 |
| 26.6.1    | Stochastische und deterministische adaptive Regler                    | 229 |
| 26.6.2    | Verschiedene Prozesse   | 233 |
| 26.7      | Start der adaptiven Regler und Wahl der freien Parameter              | 233 |
| 26.7.1    | Voridentifikation   | 233 |
| 26.7.2    | Wahl der Entwurfparameter   | 237 |
| 26.7.3    | Startverfahren  | 238 |
| 26.8      | Überwachung und Koordinierung adaptiver Regelungen                    | 239 |
| 26.8.1    | Überwachung der adaptiven Regelung                                    | 239 |
| 26.8.2    | Koordinierung der adaptiven Regelung                                  | 241 |
| 26.9      | Parameteradaptive Störgrößenaufschaltung                              | 242 |
| 26.10     | Parameteradaptive Mehrgrößenregelungen                                | 245 |
| 26.11     | Einsatz parameteradaptiver Regelalgorithmen                           | 246 |

## **G Zur digitalen Regelung mit Prozeßrechnern und Mikrorechnern**

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| <b>27</b> | <b>Einfluß der Amplitudenquantisierung bei digitalen Regelungen</b> | 253 |
| 27.1      | Ursachen von Quantisierungsfehlern                                  | 253 |
| 27.2      | Verschiedene Quantisierungseffekte                                  | 258 |
| 27.2.1    | Quantisierungseffekte von Variablen                                 | 258 |
| 27.2.2    | Quantisierungseffekte von Koeffizienten                             | 262 |
| 27.2.3    | Quantisierungseffekte von Zwischenergebnissen                       | 263 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>28 Störsignalfilterung</b> . . . . .   | 268 |
| 28.1 Störsignalquellen und Störsignalspektren . . . . .   | 268 |
| 28.2 Analoge Filterung . . . . .  | 272 |
| 28.3 Digitale Filterung . . . . .   | 274 |
| 28.3.1 Tiefpaßfilter . . . . .  | 274 |
| 28.3.2 Hochpaßfilter . . . . .  | 277 |
| 28.3.3 Spezielle Filter . . . . .   | 278 |
| <b>29 Anpassung von Regelalgorithmen an verschiedene Stellantriebe</b> . . . . .                  | 283 |
| <b>30 Rechnerunterstützter Entwurf von Regelalgorithmen mit Prozeßidentifikation</b> . . . . .    | 296 |
| 30.1 Programmpakete . . . . .   | 296 |
| 30.1.1 Modellgewinnung durch theoretische Modellbildung oder Identifikation . . . . .             | 298 |
| 30.1.2 Programmpakete zur Prozeßidentifikation . . . . .  | 299 |
| 30.1.3 Programmpakete zum Entwurf der Regelalgorithmen . . . . .                                  | 302 |
| 30.2 Beispiele . . . . .  | 304 |
| 30.2.1 Digitale Regelung eines Überhitzers (Simulation) . . . . .                                 | 304 |
| 30.2.2 Digitale Regelung eines Wärmeaustauschers . . . . .  | 305 |
| 30.2.3 Digitale Regelung eines Trommeltrockners . . . . .   | 310 |
| <b>31 Adaptive und selbsteinstellende Regelung mit Mikrorechnern und Prozeßrechnern</b> . . . . . | 322 |
| 31.1 Mikrorechner für die adaptive Regelung . . . . .   | 322 |
| 31.2 Beispiele . . . . .  | 324 |
| 31.2.1 Adaptive Regelung eines Überhitzers (Simulation) . . . . .                                 | 325 |
| 31.2.2 Adaptive Regelung von Klimaanlage . . . . .  | 325 |
| 31.2.3 Adaptive Regelung des pH-Wertes . . . . .  | 332 |
| <b>Literatur</b> . . . . .  | 339 |
| <b>Sachverzeichnis</b> . . . . .  | 349 |