Alexander Weinmann

Test- und Prüfungsaufgaben Regelungstechnik

457 durchgerechnete Beispiele mit analytischen, nummerischen und computeralgebraischen Lösungen in MATLAB und MAPLE

Zweite, erweiterte und überarbeitete Auflage

SpringerWienNewYork

Inhaltsverzeichnis

1 Regelstrecken **13**

1.1 Blockbildreduktion . . . 13
1.2 Polortskurven für ein PT_2-Element . . . 14
1.3 Exponentiell anwachsende Störung . . . 14
1.4 Störungsübertragungsfunktion . . . 15
1.5 Stoßantwort bei $D = 1$ . . . 15
1.6 Resonanzfrequenz, 0-dB-Durchtrittsfrequenz und Transientenfrequenz in Abhängigkeit vom Dämpfungsgrad . . . 15
1.7 Wendepunkt der Sprungantwort . . . 16
1.8 PT_2-System . . . 17
1.9 Ortskurve eines Elements mit Totzeit . . . 17
1.10 Identifikation einer Regelstrecke . . . 17
1.11 Greiferkran . . . 18
1.12 Aufgestelltes Pendel . . . 19
1.13 Heizungsregelstrecke . . . 19
1.14 Ortskurve des Frequenzgangs eines PDT_3-Elements . . . 20
1.15 Allpass in Operationsverstärkerbeschaltung . . . 20
1.16 Logarithmisch dargestellte Sprungantwort . . . 20
1.17 SIMO-Regelstrecke . . . 21
1.18 Trajektorien eines IT_1-Systems . . . 21
1.19 Motorenanlauf . . . 22
1.20 Regelstrecke in Form einer Differenzengleichung . . . 22
1.21 Motorenanlaufverhalten . . . 22
1.22 Fahrleistung . . . 23
1.23 Synthetische Division . . . 23
1.24 Bode-Diagramm, exakt und in Polygon-Approximation . . . 23
1.25 Frequenzgangsermittlung aus der Sprungantwort . . . 24
1.26 Nominal-Stationärleistung Kranantrieb . . . 24
1.27 IT_t-System . . . 25
1.28 Linearisierung an einer Synchronmaschine . . . 25
1.29 Sprungantwort mit endlichen Anfangsbedingungen . . . 26
1.30 Bode-Diagramm eines hochgradig schwingungsfähigen Systems . . . 26
1.31 Sprungantwort eines ungedämpften Systems . . . 26
1.32 Sprungantwort unter verschiedenen Anfangsbedingungen . . . 27
1.33 Bode-Diagramm mit schlechter Polygonapproximation . . . 27
1.34 Streckenidentifikation . . . 28
1.35 Identifikation eines Bandpasses . . . 29
1.36 Boje in stabiler aufrechter Lage . . . 29

2 Analyse einfacher Regelkreise **31**

2.1 Kenngrößen eines Regelkreises 2. Ordnung . . . 31
2.2 * Drehzahlregelung einer Gleichstrommaschine . . . 31
2.3 Störungsübertragung . . . 32
2.4 Sprungantwort eines Regelkreises auf Sollwertsprung . . . 34
2.5 * Stellenergie an einer integrierenden Strecke . . . 34
2.6 Schleppfehler . . . 34
2.7 Anregelzeit . . . 35

2.8 * Schwach instabiler Regelkreis mit PT_2-Strecke . . . 35
2.9 Dynamischer Regelfaktor . . . 36
2.10 Stellgröße bei Führungssprung . . . 37
2.11 Asymptote einer Frequenzgangsortskurve . . . 37
2.12 Fläche unter der Regelabweichung . . . 38
2.13 Maximaler Wert des Störungsfrequenzgangs . . . 38
2.14 Flächen zum Abweichungsfrequenzgang . . . 38
2.15 * Regelkreis mit Toleranz im Dämpfungsgrad der Strecke . . . 39
2.16 Bode-Diagramm aus der analytischen Angabe . . . 40
2.17 Phasenrand als Funktion der Kreisverstärkung . . . 40
2.18 Störungsfrequenzgänge je nach Angriffspunkt . . . 40
2.19 Regelkreispole mit gleichem Realteil . . . 41
2.20 Ersatz der Störung durch simulierte Führung . . . 41
2.21 Durchtrittsfrequenz nahe der Knickstelle . . . 41
2.22 Abstandsregelung zweier Flugzeuge . . . 42
2.23 Regelkreis und zugeschaltete harmonische Anregung . . . 43
2.24 Zeitbereichsdaten aus gegebenem $|F_o(j\omega)|$ . . . 43
2.25 Regelkreisverhalten aus $|F_o(j\omega)|$ . . . 44
2.26 Regelkreisdiskussion mit Wurzelortskurve . . . 44
2.27 Maximaler Schleppfehler . . . 45
2.28 * Phasenrand und Überschwingweite bei einer PT_2-Schleife . . . 45
2.29 Regelkreisreaktion auf Sollwertstoß . . . 46
2.30 * Wurzelortskurve und maximaler Dämpfungsfaktor . . . 46
2.31 Blockbildreduktion einer mehrschleifigen Anordnung . . . 47
2.32 Regelkreis mit zwei instabilen Schleifenpolen . . . 48
2.33 Asymptote der Ortskurve eines $PIDT_1$-Reglers . . . 48
2.34 Stoßantwortnäherung . . . 49
2.35 Maximale Stellgröße eines optimal ausgelegten Systems . . . 49
2.36 * Messgeräteausfall und seine Auswirkung . . . 50
2.37 Regelkreisbeurteilung aus dem Betrag der Schleife . . . 50
2.38 * Wurzelort eines Systems vierter Ordnung . . . 52
2.39 * Einfach- und Mehrfachverzweigung einer Wurzelortskurve . . . 52
2.40 * Dreiecksimpulsantwort mittels Faltung . . . 53
2.41 Faltung und Laplace-Transformation . . . 53
2.42 Schlechtestes Störungsverhalten . . . 54
2.43 Signalflussdiagramm . . . 54
2.44 Wurzelortskurve und imaginäre Achse . . . 54
2.45 * Wurzelortskurve und zulässiger Verstärkungsbereich . . . 55
2.46 Durchlaufdauer durch einen elliptischen Grenzzyklus . . . 56
2.47 * Wurzelortskurve nach einer Pollage . . . 56
2.48 Wurzelortskurve für negative Verstärkung . . . 57
2.49 Regelkreisresonanz im Führungsverhalten . . . 58
2.50 Stabilität und Wurzelortskurven . . . 58
2.51 * Durchtrittsfrequenz, Phasenrand und Anregelzeit . . . 59
2.52 Allpass-Schleife und Phasenrand . . . 60
2.53 * Last an einem elastischem Seil . . . 60
2.54 * Regelung mit Allpass als Strecke . . . 61
2.55 Spezielle Anfangsbedingung . . . 63
2.56 Regelung mit I_2-Strecke . . . 63
2.57 3-dB-Bandbreite des Führungsverhaltens . . . 63
2.58 * Regelkreisreaktion auf einen Dreiecksimpuls der Störgröße . . . 64
2.59 Ortskurve der Sensitivität eines Regelkreises . . . 64
2.60 Größte Ortskurvendistanz . . . 65
2.61 Grenzstabilität bei Schleife mit Vierfachpol ($2n$-fach-Pol) . . . 66
2.62 Phasenrand und Schleife mit Siebzehnfach-Polstelle . . . 66

3 Einfache Entwürfe von Regelkreisen **67**
3.1 Regelkreis aus Totzeitelement und Integrator . . . 67
3.2 Förderband-Regelung . . . 67
3.3 Betragsoptimum zu PT_4-Strecke und PI-Regler . . . 68
3.4 Reglerdimensionierung für dominierendes Polpaar . . . 69
3.5 Dimensionierung auf Phasenreserve . . . 69
3.6 Ziegler-Nichols-Einstellung . . . 70
3.7 * Totzeitkompensation . . . 70
3.8 * Geschwindigkeitsregelung an einer Elektrolokomotive . . . 71
3.9 PI-Regler-Dimensionierung . . . 72
3.10 Phasenrand zur Dimensionierung . . . 72
3.11 Störungsfrequenz mit bestimmter Resonanz . . . 73
3.12 PDT_1-Regler-Auslegung . . . 73
3.13 Reglerdimensionierung auf bestimmte Regelkreisantwort . . . 74
3.14 Betragsoptimum ohne Aufhebungskompensation . . . 74
3.15 Reglerdimensionierung auf Führungsimpulsantwort . . . 74
3.16 Reglereinstellung für 48° Phasenrand . . . 75
3.17 Ausbleibende Schwingungsneigung des Regelkreises . . . 75
3.18 Betragsoptimale Auslegung mit Aufhebungskompensation . . . 76
3.19 Regelkreisdimensionierung auf Führungsimpulsantwort . . . 76
3.20 Bemessung auf bestimmten Phasenrand . . . 77
3.21 Symmetrisches Optimum . . . 77
3.22 Reglerentwurf auf Überschwingfreiheit . . . 78
3.23 Entwurf eines P-Reglers zu einer Totzeitstrecke . . . 78
3.24 Entwurf auf Durchtrittsfrequenz und Phasenrand . . . 78
3.25 PI-Regler-Bemessung zu einer PT_2T_t-Strecke . . . 79
3.26 PI-Regler mit Stellgrößenbeschränkung . . . 79
3.27 Referenzmodell für den einschleifigen Regelkreis . . . 80
3.28 * Reglerbemessung zu einer I_2-Strecke . . . 80
3.29 Reglerkreisbemessung auf maximale Stellgröße . . . 81
3.30 Zweischleifige Regelung mit Digitalrechner . . . 82
3.31 Reglerentwurf für Überschwingen und Ausregelzeit . . . 82
3.32 Geschwindigkeitskonstante . . . 82
3.33 Fehlerfreie Positionsregelung . . . 83
3.34 Kleinster Dämpfungsgrad . . . 83
3.35 Transmissionsnullstelle . . . 83
3.36 Kombinierte Anregung und Anfangsbedingungen . . . 83
3.37 Möglichkeit zur Stabilisierung? . . . 84
3.38 Vorgabe des Dämpfungsfaktors . . . 84
3.39 Vorgabe des Schleppfehlers . . . 84
3.40 Phasenrand und Stabilität . . . 84

4 Stabilität **85**
4.1 Ortskurve vom Schleifenfrequenzgang $F_o(j\omega)$ . . . 85
4.2 Vollständige Ortskurve und Nyquist-Kriterium . . . 85
4.3 Stabilität eines Synchronmotor-Antriebs . . . 85
4.4 * Instabiler Regler und instabile Nichtphasenminimum-Strecke . . . 86
4.5 * Reeller Stabilitätsradius für ein System 2. Ordnung . . . 87
4.6 Nyquist-Stabilität einer $PIDT_2$-Schleife . . . 88
4.7 * Stabilitätsradius. Polynomgrad bei analytischer Darstellung . . . 88
4.8 Lyapunov-Stabilität . . . 90
4.9 Hurwitz-Kriterium . . . 90
4.10 * Minimaler Stabilitätsradius . . . 91
4.11 * Youla-Stabilisierung einer skalaren integrierenden Strecke . . . 91
4.12 Stabilität mit Beiwertbedingungen und Nyquist-Kriterium . . . 92
4.13 Stabilität bei instabiler PIT_1-Schleife . . . 92
4.14 Routh-Schema zu einer IT_3-Schleife . . . 94
4.15 Stabilität eines dreischleifigen Regelkreises . . . 94

4.16 Stabilität nach Nyquist bei allpasshaltiger Strecke . . . 94
4.17 Stabilitätsbereich mit Wurzelortskurve . . . 95
4.18 Instabiler Regelkreis bei instabiler Schleife . . . 95
4.19 Bode-Diagramm und eigeninstabiles System . . . 96
4.20 Nyquist-Kriterium und Stabilitätsbereich . . . 97
4.21 Instabile IT_1-Schleife und Nyquist-Kriterium . . . 97
4.22 Routh-Kriterium und PI-Regler-Bemessung . . . 97
4.23 Regelschleife mit Vierfachpolstelle . . . 99
4.24 Wurzelortskurve für imaginäres Streckenpolpaar . . . 99
4.25 Regelschleife mit zwei instabilen Polen . . . 99
4.26 Wurzelortskurve für eine Regelschleife mit Doppelpol . . . 100
4.27 Nyquist-Kriterium für Allpass-Inverse . . . 101
4.28 Interne Stabilität bei Pol-Nullstellen-Kürzung . . . 101
4.29 Kontinuierliche Regelung mit Halteglied . . . 101
4.30 * Stabilität und verschwindender Schleppfehler . . . 102
4.31 Regelkreis fast an der Stabilitätsgrenze . . . 103
4.32 Nyquist-Stabilitätskriterium für mehrere Schleifen . . . 103
4.33 * Stabilitätsbereich für Allpass-Regelkreis . . . 104
4.34 Nyquist-Ortskurve und -Stabilität bei IT_1T_t-Schleife . . . 104
4.35 * Stabilitätsbereich bei Allpass-Strecke . . . 105
4.36 Stabilität bei Allpass-Strecke nahe einem Nennpunkt . . . 107
4.37 Stabilitätsbereich eines PDT_1-Reglers mit instabiler PT_2-Strecke . . . 107
4.38 Stabilität nach den Beiwertbedingungen in zwei Varianten . . . 107
4.39 PIT_t-Schleife und Nyquist-Stabilität . . . 109
4.40 Stabilität bei IT_2-Schleife nach Cremer, Leonhard, Michailow . . . 109
4.41 Bode-Stabilitätskriterium . . . 110
4.42 Routh-Stabilitätskriterium . . . 110
4.43 Bestimmung der Stabilität . . . 111
4.44 Stabilität einer zweischleifigen Regelung . . . 111
4.45 Stabilitätsbereich einer IT_3-Schleife nach Routh . . . 111
4.46 Stabilitätsbereich mittels Routh-Schema . . . 112
4.47 * Stabilität nach den Beiwertbedingungen für PT_t-System . . . 112
4.48 Beiwertbedingungen für Stabilitätsbereich eines I_2T_2-Systems . . . 113
4.49 Schließbedingung für komplexe s . . . 113
4.50 Schließbedingung für imaginäre s an PT_3-System . . . 114
4.51 Phasenrand und Amplitudenrand aus der Frequenzgangsortskurve . . . 114
4.52 * Interne Stabilität . . . 114
4.53 Instabiler Regler, stabiler Regelkreis unter Polvorgabe . . . 115
4.54 Nyquist-Stabilitätsbereich für einen P-Regler . . . 116
4.55 Stabilitätsbereich für PDT_1-Regler an IT_2-Strecke . . . 116
4.56 Nyquist-Stabilität . . . 116
4.57 * Familie der stabilisierenden Eingrößenregler. Polynommethode . . . 117
4.58 Koordinatentransformation . . . 117
4.59 Entwurf auf Stabilitätsreserve . . . 118
4.60 Cremer-Leonhard-Michailow-Stabilitätskriterium . . . 118
4.61 Stabilität nach Cremer, Leonhard, Michailow für verschiedene Verstärkungen . . . 118
4.62 Stabilitätsgrenze aus der Wurzelortskurve . . . 119
4.63 Nyquist-Kriterium für PDT_1-Schleife . . . 119
4.64 * Ortskurven für entartetes $F_o(s)$ . . . 119

5 Zustandsregelungen **121**
5.1 * Elemente der Transitionsmatrix einer Regelstrecke . . . 121
5.2 Eigenwerte der Transitionsmatrix einer Regelstrecke . . . 122
5.3 Transitionsmatrix für PT_{2s}-Regelstrecke . . . 123
5.4 Regelstrecke in Regelungsnormalform . . . 123
5.5 Koeffizientenmatrix aus der Übertragungsmatrix . . . 123
5.6 Übertragungsfunktion aus der Transitionsmatrix . . . 124
5.7 Transitionsmatrix und Übertragungsfunktion aus der Koeffizientenmatrix . . . 124

5.8 Stoßantwort zu einem System mit Angabe im Zustandsraum . . . 124
5.9 Modalmatrix . . . 125
5.10 Transitionsmatrix . . . 125
5.11 Modalmatrix-Bestätigung . . . 125
5.12 * Faddeev-Algorithmus . . . 125
5.13 Zustandsraumdarstellung einer zeitdiskreten Regelstrecke . . . 126
5.14 Transitionsmatrix einer zeitdiskreten Regelstrecke . . . 127
5.15 Eigenwertrelationen gemäß Cayley–Hamilton . . . 127
5.16 Änderung der Eigenwerte bei Änderung in der Koeffizientenmatrix . . . 127
5.17 Regelkreis mit Zustandsregler und I-Element . . . 127
5.18 Zustandsregler und Vorfilter . . . 128
5.19 Zustandsregler unter Polvorgabe . . . 128
5.20 Zustandsregler und sein Koppelplan . . . 129
5.21 Zustandsregler auf vorgegebene Sollwertsprungantwort . . . 130
5.22 * Symmetrische Mehrgrößenregelung im Zustandsraum . . . 130
5.23 Nichtsteuerbarkeit und Nichtbeobachtbarkeit . . . 132
5.24 Polverschiebung und Polkompensation durch Zustandsregelung . . . 133
5.25 Regelkreis in Zustandsraumdarstellung . . . 133
5.26 * Regelkreisentwurf bei Vorgabe von Polen und Nullstellen . . . 133
5.27 Zustandsregler und Sensitivität . . . 134
5.28 Matrixfunktion . . . 135
5.29 Zustandsregler, Berechnung von Stellgröße und Vorfilter . . . 135
5.30 Zustandsregler zur Polverschiebung . . . 136
5.31 * Eingeschränkter Zustandsregler und Polverschiebung . . . 136
5.32 Analyse einer Zustandsregelung . . . 136
5.33 Entwurf einer Abtastregelung mit Polvorgabe . . . 137
5.34 * Entwurf eines Zustandsreglers durch Polvorgabe bei verschiedenen Streckendarstellungen 138
5.35 Zustandsraumdarstellung zu gegebener Streckenübertragungsfunktion . . . 139
5.36 * Dimensionierung einer Positions-Zustandsregelung . . . 139
5.37 * Kontrolle der Transitionsmatrix . . . 140
5.38 Zustandsraumdarstellung aus der Übertragungsfunktion . . . 140
5.39 Übertragungsfunktion aus der Zustandsraumdarstellung . . . 141
5.40 Übertragungsfunktion und Zustandsraumdarstellung aus dem gegebenen Koppelplan . . . 141
5.41 * Zustandsregler mit Integrator, Stabilitätsbereich . . . 141
5.42 * Zustandsregler mit Integrator . . . 142
5.43 Zustandsregelung in Potenzreihenentwicklung . . . 144
5.44 Stabilität einer Zustandsregelung . . . 144
5.45 * Differenzierung als Schaltungskombination im Zustandsraum . . . 144
5.46 Einfache Rückführung als Schaltungskombination . . . 145
5.47 * Unbestimmte Form $s \to 0$ gegen Inverse der entarteten Systemmatrix . . . 145
5.48 Spezielle Zustandsraumdarstellungen . . . 146
5.49 Zustandsraumdarstellung in Tabellenform . . . 147
5.50 * Zustandsraumdarstellung der Kettenschaltung zweier Mehrgrößensysteme . . . 147
5.51 Transienten in der Phasenebene . . . 147
5.52 Bewegungen in der Phasenebene . . . 148
5.53 * Ausgangs-Zustandsregler-Vektor mit Leverrier-Algorithmus . . . 149
5.54 Vermeidung einer Inversen . . . 150

6 Beobachter **151**
6.1 Beobachter an einer Eingrößenstrecke . . . 151
6.2 Beobachterentwurf bei Strecke in Beobachtungsnormalform . . . 151
6.3 Beobachter bei Strecke in Regelungsnormalform . . . 152
6.4 Regelstrecke samt Beobachter . . . 152
6.5 Beobachterentwurf und Beobachterkoppelplan . . . 153
6.6 Strecke zum Beobachter . . . 154
6.7 * Beobachter für Modalgrößen . . . 154
6.8 Beobachter unter Polvorgabe . . . 155
6.9 Beobachterentwurf . . . 156

7 Totzeitregelungen **157**
7.1 Ortskurve eines Totzeitelements . . . 157
7.2 Totzeitregelung . . . 157
7.3 Abtastregelkreis mit Totzeit . . . 157
7.4 Identifikation eines Totzeitgliedes . . . 158
7.5 * Betragsnäherung einer Totzeitregelstrecke . . . 159
7.6 Totzeitregelung mit P-Element . . . 160
7.7 Totzeitregelung mit I-Element . . . 160
7.8 Untersuchung einer Totzeitregelung für verschiedene T_t . . . 161
7.9 Regelkreisbemessung nach dem Betragsoptimum . . . 161
7.10 * Stabilität einer Regelschleife mit Resonanz und Totzeit . . . 162
7.11 I_2T_t-Element und Frequenzgangsortskurve . . . 163
7.12 Stabilität einer IT_t-Schleife mit Beiwertbedingungen . . . 163
7.13 * Vergleich PT_t- und PT_n-Element . . . 164
7.14 * Entwurf eines P-Reglers an einer Totzeitstrecke bei unbekannter Störgrößenfrequenz . . . 165

8 Abtastregelungen **167**
8.1 Modifizierte z-Rücktransformation . . . 167
8.2 Näherung der Ortskurve eines getasteten Signals . . . 167
8.3 Abtastregelstrecke . . . 168
8.4 Zulässige Abtastzeit in Totzeitabschätzung . . . 169
8.5 Zulässige Abtastzeit für Stabilität . . . 169
8.6 Abtastereinfluss auf die Stabilität . . . 170
8.7 Dead-Beat-Regler . . . 170
8.8 Stellgröße eines Abtastreglers . . . 170
8.9 Abtastregelkreis mit integrierender Schleife . . . 171
8.10 Bode-Diagramm von $F_o(z)$ ohne w-Ebene . . . 171
8.11 Stabilität einer Abtastregelung mit und ohne Regler-Halteglied . . . 171
8.12 Abtastzeit an der Stabilitätsgrenze . . . 172
8.13 Stabilitätsgrenze mittels Wurzelortskurve . . . 173
8.14 * Abtastregelkreis mit PDT_2-Strecke . . . 173
8.15 Abtastregelkreis. Stabilitätsbereich des P-Reglers . . . 174
8.16 Dead-Beat-Verhalten zu den Abtastzeitpunkten . . . 174
8.17 * Abtastregelung auf Sprung- und Exponentialeingang . . . 174
8.18 Abtastregler-Differenzengleichung . . . 175
8.19 * Reaktion einer getasteten Regelstrecke . . . 176
8.20 * Abtastregelung mit Totzeit . . . 177
8.21 Abtastregelkreis mit ein oder zwei Haltegliedern . . . 179
8.22 Wurzelortskurve zu einer Abtastregelung mit Schleifendoppelpol . . . 179
8.23 Abtastregelkreis mit Einheitsvorwärtszweig . . . 180
8.24 Spektrum des Halteglieds nullter Ordnung . . . 180
8.25 Verstärkungseinstellung bei einem Abtastregelkreis . . . 181
8.26 * Entwurf eines Abtastregelkreises . . . 181
8.27 Entwurf in der w-Ebene als integrale Schleife . . . 182
8.28 * Näherungen für PT_{2s}-Element nach Euler und nach Tustin . . . 182
8.29 Abtastregelung mit Einheitsregler . . . 183
8.30 Differenzengleichung und z-Transformation . . . 184
8.31 Verstärkung an der Stabilitätsgrenze . . . 184
8.32 Abtaster vor dem Vergleichsglied . . . 184
8.33 Ortskurve des Abtastsystems . . . 185
8.34 Abschnittweise stabile Abtastregelung . . . 185
8.35 Stabilitätsdiskussion mit Wurzelortskurve . . . 186
8.36 Abtastregelung, Stabilität über T und V . . . 186
8.37 * Schrittregler-Regelkreis . . . 187
8.38 P-Regler mit verschiedener Abtastzeit . . . 188
8.39 I-Regler mit verschiedener Abtastzeit . . . 188
8.40 Schleppfehler bei einem Abtastregelkreis . . . 189
8.41 * Abtastregler in Tustin-Näherung . . . 190

8.42 Abtastregelung. Dead-Beat-Überprüfung . . . 190
8.43 * Rechner-Regler . . . 191
8.44 Stabilität in der w-Ebene . . . 191
8.45 * Abtastregelkreis. Regler mit und ohne Halteglied . . . 192
8.46 * Zeitoptimale zeitdiskrete Zustandsregelung . . . 194
8.47 Abtastregelung mit verschiedenen Abtastzeiten . . . 194

9 Mehrgrößenregelungen 195
9.1 P-kanonische Darstellung aus der V-kanonischen . . . 195
9.2 Zweigrößensystem mit einseitiger Kopplung . . . 196
9.3 Stabilität eines V-kanonischen Systems . . . 196
9.4 Führungsautonomer Mehrgrößen-Regelkreis . . . 196
9.5 * Zweischleifige Regelung mit Querbeeinflussung . . . 197
9.6 * Regelkreis in nur teilweiser Funktion . . . 197
9.7 Entkopplung einer Messmatrix . . . 199
9.8 * Tilgung einer Verkopplung . . . 199
9.9 * Mehrgrößenregelung ohne Kopplungsregler . . . 200
9.10 Zweigrößenregelung und Routh-Stabilität . . . 201
9.11 * Mehrgrößen-Abtastregelung im Zustandsraum . . . 202
9.12 * Zweigrößenregelung mit I-Reglern . . . 203
9.13 * Dynamisches Vorfilter zur Autonomisierung . . . 204
9.14 Identität . . . 204
9.15 Kontrollbeobachter . . . 205
9.16 Grenzstabilität einer Zweigrößenregelung . . . 205
9.17 * Schrittweise Verbesserung des Stabilitätsradius . . . 206
9.18 Humanbiologischer Mehrgrößenregelkreis . . . 206

10 Optimierung 207
10.1 Berechnung der L_2-Norm im Zeitbereich . . . 207
10.2 Berechnung der L_2-Norm mit Residuensatz im Frequenzbereich . . . 207
10.3 * Berechnung der L_2-Norm mit dem Parseval-Theorem . . . 207
10.4 * Berechnung der L_2-Norm mit Controllability-Gramian . . . 208
10.5 Zusammenhang zwischen den H_∞-Normen des Ein- und Ausgangs im Zeitbereich . . . 208
10.6 * Infinity-Norm des Ausgangs, 2-Norm des Eingangs . . . 209
10.7 * Minimierung eines ITSE-Kriteriums . . . 209
10.8 * IEXSE-Kriterium . . . 210
10.9 * Hamilton-Matrix in H_2 . . . 210
10.10 Güteintegral . . . 210
10.11 * LQ-Regler mit instabiler Strecke . . . 211
10.12 * Minimierung unter Nebenbedingungen . . . 211
10.13 * Optimal Modell-Referenzierung . . . 211

11 Robuste Regelungen 213
11.1 Kurven konstanter Spektralnorm . . . 213
11.2 Bauer-Fike-Theorem . . . 213
11.3 Singulärwerte als Grenzen der Eigenwerte . . . 214
11.4 * H_∞-Norm einer PT_{2s}-Strecke samt Zustandsregelung . . . 214
11.5 Nichtexistenz einer stabilen Regelung . . . 215
11.6 Robuster I-Regler . . . 216
11.7 * Kreiskriterium für Stabilitätsrobustheit . . . 216
11.8 Robuster Abtastregelkreis . . . 217
11.9 Robuste Stabilität einer Abtastregelung mit Totzeit . . . 217
11.10 Streckentoleranz für Stabilität . . . 217
11.11 * Robuster Eingrößenregler . . . 218
11.12 * Robuster Regelkreis mit Routh-Kriterium . . . 219
11.13 Robuster Regler nach Patel und Toda . . . 220
11.14 Stabilitätsrobustheit von **A** . . . 221
11.15 * Robustes Führungsverhalten einer Eingrößenregelung . . . 221

11.16 * Robustes Führungsverhalten . . . 222
11.17 * Value Set . . . 223
11.18 * Robustes Störungsverhalten einer Eingrößenregelung . . . 223
11.19 H_∞-Norm der Störungsübertragungsfunktion . . . 224

12 Regelkreise auf stochastischer Basis 227
12.1 Leistungsdichte des Ausgangssignals . . . 227
12.2 Regelkreis unter Messrauschen . . . 227
12.3 Spektrale Leistungsdichte des Ausgangs . . . 228
12.4 Rauschanregung . . . 228
12.5 Approximation eines Rauschsignals . . . 228
12.6 Abweichungsspektraldichte . . . 229
12.7 * Regelkreis unter Störungsrauschen . . . 229
12.8 Spektraldichten des Ausgangs . . . 230
12.9 Spektraldichte des Ausgangs bei Anregung mit weißem Rauschen . . . 230
12.10 Identifikation aus Spektraldichten . . . 231
12.11 * Identifikation im geschlossenen Regelkreis . . . 231
12.12 Messrauschminderung . . . 231
12.13 Optimale Verstärkung eines Parallel-Elements . . . 232
12.14 * Minimum der Ausgangsspektraldichte . . . 232
12.15 Formfilter . . . 233
12.16 * Stochastischer Regelkreis . . . 233
12.17 * Entwurf auf Störung und Messrauschen . . . 234
12.18 * Optimale Vorhersage eines Nutzsignalrauschens . . . 236
12.19 Rauschersatz: Resonanzamplitude und -frequenz . . . 237
12.20 Abschätzung der Rauschauswirkung . . . 237
12.21 Auswirkung des Messrauschens auf die Stellgröße . . . 238

13 Zweipunktregelungen 239
13.1 Phasenlinien einer linearen Regelstrecke . . . 239
13.2 Isoklinen und Trajektorien eines Regelkreises . . . 239
13.3 Isokline und Trajektorie . . . 240
13.4 * Nichtlinearer Regelkreis in der Phasenebene . . . 241
13.5 Zeitoptimale Steuerung eines Zweifachintegrators . . . 242
13.6 Unstetiger Greifer-Regler . . . 242
13.7 Unstetiger Regler mit Hysterese . . . 243
13.8 * Zweipunktregelung mit sprungfähiger Regelstrecke in der Phasenebene . . . 244
13.9 * Zweipunktregler mit sprungfähiger Strecke nach Zypkin . . . 245
13.10 Zweipunktregler mit interner Rückführung . . . 246
13.11 Unstetiger Regler ohne Hysterese . . . 246
13.12 Regelung mit Hysterese und zusätzlicher P-Rückführung . . . 246
13.13 * Grenzzyklus an einem PDI_2-System . . . 247
13.14 Zustandskurven bei Hysterese-Zweipunktelement . . . 248
13.15 Abschätzungen an einem Zweipunktregelkreis . . . 249
13.16 * Zweipunktsteuerung/regelung an dämpfungsfreiem PT_{2s}-System . . . 249
13.17 * Zweipunktregelung an einer PT_1-Strecke . . . 251
13.18 * Zweipunktregelung an mittelwertbildender I_1-Strecke . . . 252
13.19 * Dreipunktregler und Gleiten . . . 253
13.20 Stückweise linearer Regler und I_1-Strecke . . . 254
13.21 Stückweise linearer Regler und IT_1-Strecke . . . 256
13.22 Regelung mit I_2-Schleife und Begrenzung . . . 258
13.23 Linearer Regler mit Totzone . . . 258
13.24 Korrektur einer mechanischen Turmuhr . . . 259
13.25 * Zweipunktregler mit Hysterese und instabiler PT_1-Strecke . . . 260

14 Grenzzyklen mittels Beschreibungsfunktion **261**
14.1 Zweipunktelement ohne Hysterese . . . 261
14.2 Zweipunktelement mit Hysterese . . . 261
14.3 * Dreipunktregler . . . 261
14.4 * IT_2-System und P-Regler mit Ansprechschwelle . . . 262
14.5 * Zweipunktregelkreis mit instabiler P-Strecke . . . 264
14.6 Zweipunktregelkreis. Anregelzeit . . . 264
14.7 Zweipunktregler mit IT_2-Strecke . . . 265
14.8 Zweipunktregler mit IT_t-Strecke . . . 265
14.9 Zweipunktregler mit zweifach instabiler Strecke . . . 265
14.10 Integrierende Rückführung zum Zweipunktregler . . . 268
14.11 * Instabile Strecke mit frequenzabhängiger Beschreibungsfunktion . . . 269
14.12 * Phasenbahnen und Beschreibungsfunktion . . . 269

15 Fachübergreifende und komplexere Aufgabenstellungen **271**
15.1 Linearisierung. Nichteinstellbarer Arbeitspunkt . . . 271
15.2 Zweischleifiger Regelkreis mit verschiedenen Schnittstellen . . . 273
15.3 Autopilotenmodell . . . 274
15.4 * Mehrgrößenregelung. Versteckte überflüssige Pole . . . 276
15.5 Nicht steuerbare (nicht stabilisierbare) Regelstrecke . . . 279
15.6 Methode bei unterschiedlichen Eigenwerten . . . 280
15.7 Nicht-Steuerbarkeit in Frequenzbereichs-Darstellung . . . 280
15.8 Steuerbarkeit mit Gram-Steuerbarkeitsmatrix . . . 280
15.9 Steuerbarkeit nach Hautus . . . 281
15.10 Steuerbarkeit bei Eingrößensystemen . . . 281
15.11 Steuerbarkeit an Laplace-Rücktransformation . . . 281
15.12 Veranschaulichung der Nicht-Steuerbarkeit . . . 281
15.13 Pol-Nullstellen-Mindestabstand . . . 282
15.14 Fuzzy Regelung . . . 282
15.15 Editor für Zugehörigkeitsfunktion, Regeln und Defuzzifizierung . . . 284
15.16 * Deterministisch-chaotische Regelung . . . 285
15.17 * H_∞-Regelung an einer Magnetschwebestrecke . . . 285
15.18 * Symmetrische Wurzelortskurve . . . 287
15.19 * Robuste Internal-Model-Control . . . 288
15.20 * Differentiell flaches System . . . 289

16 Nummerische und symbolische Computerunterstützung **291**
16.1 MATLAB nummerisch. Kurzkurs . . . 291
16.2 MATLAB symbolisch. Kurzkurs . . . 291
16.3 Simulink . . . 292
16.4 * Connect-Anwendung an einem Zweigrößen-System . . . 292
16.5 * Auswertungen mit MAPLE und MATLAB . . . 294

A Verzeichnis häufig verwendeter Formelzeichen **295**
A.1 Allgemeine Hinweise . . . 295
A.2 Verknüpfungssymbole . . . 295
A.3 Hochgestellte Symbole . . . 296
A.4 Indizes . . . 296
A.5 Operationszeichen . . . 296
A.6 Symbole spezieller Art . . . 297

B Literatur **301**

C Sachverzeichnis **303**