

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Regelstrecken</b>	<b>13</b>
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 Differenzgleichung	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
<b>2</b>	<b>Analyse einfacher Regelkreise</b>	<b>31</b>
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 Grenzyklus	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

<b>3</b>	<b>Einfache Entwürfe von Regelkreisen</b>	<b>67</b>
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 $48^\circ$ 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 $PT_2T_1$ -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
<b>4</b>	<b>Stabilität</b>	<b>85</b>
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 $IT_1 T_t$ -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 $I_2 T_2$ -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
<b>5</b>	<b>Zustandsregelungen</b> . . . . .	<b>121</b>
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 $s \rightarrow 0$ 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
<b>6</b>	<b>Beobachter</b> . . . . .	<b>151</b>
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

<b>7</b>	<b>Totzeitregelungen</b>	<b>157</b>
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
<b>8</b>	<b>Abtastregelungen</b>	<b>167</b>
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-Differenzgleichung . . . . .	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	Differenzgleichung 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	Abschnittsweise stabile Abtastregelung . . . . .	185
8.35	Stabilitätsdiskussion mit Wurzelortskurve . . . . .	186
8.36	Abtastregelung, Stabilität über $T$ und $V$ . . . . .	186
8.37	* Schrittreger-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
<b>9</b>	<b>Mehrgrößenregelungen</b>	<b>195</b>
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
<b>10</b>	<b>Optimierung</b>	<b>207</b>
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 $H_\infty$ -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
<b>11</b>	<b>Robuste Regelungen</b>	<b>213</b>
11.1	Kurven konstanter Spektralnorm . . . . .	213
11.2	Bauer-Fike-Theorem . . . . .	213
11.3	Singulärwerte als Grenzen der Eigenwerte . . . . .	214
11.4	* $H_\infty$ -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 $\mathbf{A}$ . . . . .	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 $H_\infty$ -Norm der Störungsübertragungsfunktion . . . . .	224
<b>12 Regelkreise auf stochastischer Basis</b> . . . . .	<b>227</b>
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 Nutzsingalrauschens . . . . .	236
12.19 Rauschersatz: Resonanzamplitude und -frequenz . . . . .	237
12.20 Abschätzung der Rauschleistung . . . . .	237
12.21 Auswirkung des Messrauschens auf die Stellgröße . . . . .	238
<b>13 Zweipunktregelungen</b> . . . . .	<b>239</b>
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 * Grenzyklus 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



<b>14 Grenzyklen mittels Beschreibungsfunktion</b>	<b>261</b>
14.1 Zweipunktelement ohne Hysterese	261
14.2 Zweipunktelement mit Hysterese	261
14.3 * Dreipunktregler	261
14.4 * IT <sub>2</sub> -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 <sub>2</sub> -Strecke	265
14.8 Zweipunktregler mit IT <sub>1</sub> -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
<b>15 Fachübergreifende und komplexere Aufgabenstellungen</b>	<b>271</b>
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 <sub>∞</sub> -Regelung an einer Magnetschwebestrecke	285
15.18 * Symmetrische Wurzelortskurve	287
15.19 * Robuste Internal-Model-Control	288
15.20 * Differentiell flaches System	289
<b>16 Numerische und symbolische Computerunterstützung</b>	<b>291</b>
16.1 MATLAB numerisch. 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
<b>A Verzeichnis häufig verwendeter Formelzeichen</b>	<b>295</b>
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>B Literatur</b>	<b>301</b>
<b>C Sachverzeichnis</b>	<b>303</b>