

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | MATLAB für die Regelungstechnik | 9 |
| 1.1 | Übersetzungen in den und vom Zustandsraum | 9 |
| 1.2 | Blockbildreduktion | 10 |
| 1.3 | Polvorgabe | 11 |
| 1.4 | Bode-Diagramm und Frequenzgangsortskurven | 11 |
| 1.5 | Transitionsmatrix | 12 |
| 1.6 | Wurzeln, Residuen | 12 |
| 1.7 | Wurzelortskurve | 13 |
| 1.8 | Rauschantwort | 14 |
| 1.9 | Beobachtbarkeit, Steuerbarkeit | 14 |
| 1.10 | Optimierung | 14 |
| 1.11 | Symbolische Berechnung | 15 |
| 1.12 | SIMULINK | 15 |
| 2 | MAPLE für die Regelungstechnik | 17 |
| 2.1 | MAPLE Grundinformationen | 17 |
| 2.2 | Nummerische Berechnung auf bestimmte Stellenzahl | 18 |
| 2.3 | Substituieren von Ergebnissen | 18 |
| 2.4 | Anwendung einer Funktion auf eine Folge | 18 |
| 2.5 | Faktorisierung von Polynomen | 19 |
| 2.6 | Reihenentwicklung | 19 |
| 2.7 | Bildung von Übermatrizen | 19 |
| 2.8 | Verzweigungspunkt einer Wurzelortskurve (Differenzieren, Nullsetzen) | 20 |
| 2.9 | Berechnung eines bestimmten Integrals | 20 |
| 2.10 | Berechnung einer Summe | 20 |
| 2.11 | Berechnung des Gradienten | 21 |
| 2.12 | Grenzwerte (unbestimmte Form) | 21 |
| 2.13 | Hesse-Matrix | 21 |
| 2.14 | Lösung eines Gleichungssystems | 21 |
| 2.15 | Lösung einer nichtlinearen algebraischen Gleichung | 22 |
| 2.16 | Benützung der Abbruchbedingung <code>while</code> | 22 |
| 2.17 | Überschwingzeit bei vorgegebenem Überschwingen | 22 |
| 2.18 | Zeichnen eines Verlaufs über der Zeit | 22 |
| 2.19 | Ausdrucken mehrerer Kurven in einer Abbildung | 22 |
| 2.20 | Sprungantwort eines PT_2 -Systems | 23 |
| 2.21 | Anregung eines dämpfungsfreien Systems mit seiner Eigenfrequenz | 23 |
| 2.22 | Lösung der Differenzialgleichung eines zeitvarianten Systems | 23 |
| 2.23 | Lösung einer Rekursion, Ergebnis zu einer Differenzgleichung | 24 |
| 2.24 | Regelungsnormalform und charakteristisches Polynom | 24 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.25 | Frequenzgangs-Ortskurve. Zeichnen einer Kurve in parametrischer Darstellung | 24 |
| 2.26 | Gebirge aus Bode-Diagrammen | 25 |
| 2.27 | Zeichnen eines Funktionsverlaufs über zwei Variablen | 25 |
| 2.28 | Umgang mit Beträgen beim Symmetrischen Optimum | 26 |
| 2.29 | Von MAPLE zu LATEX | 27 |
| 3 | Scientific WorkPlace für die Regelungstechnik | 29 |
| 3.1 | Frobenius-Form, Regelungsnormalform, Companion-Matrix, Singulärwerte | 29 |
| 3.2 | Modale Transformation | 29 |
| 3.3 | z -Rücktransformation mittels Synthetischer Division | 30 |
| 3.4 | Frequenzgangs Ortskurve und Begleitendes Netzwerk | 30 |
| 3.5 | Gemeinsamer Nenner. Partialbruchentwicklung. Wurzeln | 30 |
| 3.6 | Nummerische Integration | 30 |
| 3.7 | Partielle Integration | 31 |
| 3.8 | Auflösen von Gleichungen und Ungleichungen | 31 |
| 3.9 | Aufsuchen von Extrema | 31 |
| 3.10 | Lösen von gewöhnlichen Differenzialgleichungen | 31 |
| 3.11 | Graphische Lösung einer Anfangswertaufgabe | 31 |
| 3.12 | Phasenebene | 32 |
| 3.13 | Phasenebene als Vektorfeld | 32 |
| 3.14 | Ortskurven Zeichnen | 32 |
| 3.15 | Übergang von der z -Ebene auf die w -Ebene mit Bode-Diagramm | 33 |
| 3.16 | Lineare Programmierung | 33 |
| 4 | MATHEMATICA für die Regelungstechnik | 35 |
| 4.1 | Grundlegendes | 35 |
| 4.2 | Integration und Differenziation | 36 |
| 4.3 | Vektor- und Matrizenrechnung | 36 |
| 4.4 | Zeichnerische Darstellung | 36 |
| 4.5 | Ausgabe in TeX | 38 |
| 5 | DYMOLA | 43 |
| 5.1 | Zweipolverknüpfung | 44 |
| 5.2 | Netzwerk | 45 |
| 6 | ANA Zeitbereichs-Simulation in der Regelungstechnik | 47 |
| 7 | Dynamische Funktionsmodelle von Regelstrecken | 53 |
| 7.1 | Regelung der Sendeleistung eines Mobiltelefons | 53 |
| 7.2 | Tempomat | 53 |
| 7.3 | Magnetschweberegelung | 56 |
| 7.4 | PT_{2s} -Element mit konjugiert komplexem Polpaar | 57 |
| 7.5 | Verkehrsdynamik | 58 |
| 7.6 | Auswertung einfacher Versuchsdaten zur physikalischen Identifikation | 60 |
| 7.7 | Mechatronische Regelstrecke | 61 |

| | | |
|-----------|---|-----------|
| 8 | Regelungstechnische Grundaufgaben | 63 |
| 8.1 | Schätzung der Überschwingzeit | 63 |
| 8.2 | Lyapunov-Gleichung | 64 |
| 8.3 | Singulärwerte | 64 |
| 8.4 | Eigenvektoren | 64 |
| 8.5 | Synthetische Division | 65 |
| 8.6 | Sprungantwort zu einem n -fachen Pol bei $\frac{T}{n}$ | 65 |
| 8.7 | PDT ₁ -Regler-Entwurf | 66 |
| 8.8 | Phasenrand und Durchtrittsfrequenz exakt | 67 |
| 8.9 | Bedingt stabiler Regelkreis dritter Ordnung, ungünstigster Dämpfungsfaktor | 69 |
| 8.10 | Zur Frage der Kompensation einer instabilen Polstelle | 70 |
| 8.11 | Stabilisierung einer instabilen Strecke | 71 |
| 8.12 | Interne Stabilität | 71 |
| 8.13 | Abklingverhalten einer Regelung mit Totzeit | 72 |
| 8.14 | IT _t -Schleife und Schließbedingung | 73 |
| 8.15 | Quasikontinuierlicher PID-Regler | 73 |
| 8.16 | Grenzstabiler Regelkreis unabhängig von der Reglerverstärkung | 74 |
| 8.17 | Bemessung auf Durchtrittsfrequenz und Phasenrand | 75 |
| 8.18 | Verstärkung für Dämpfungsgrad 0,7 | 75 |
| 8.19 | H_∞ -Norm der Störungsübertragungsfunktion | 76 |
| 8.20 | Zweigrößenregelung mit vertauschten Teilreglern | 77 |
| 8.21 | Reglerbedingungen für einseitig gekoppelten Zweigrößen-Regelkreis | 78 |
| 8.22 | Spurregelung | 78 |
| 8.23 | Spurregelung mit PT ₁ -Näherung des Reglers. Allgemeine Parameter | 79 |
| 8.24 | Spurregelung mit Allpass-Näherung des Reglers | 80 |
| 9 | Ortskurven | 81 |
| 9.1 | Ortskurve mit einfacher Vorzerlegung | 81 |
| 9.2 | Asymptote für $\omega \rightarrow 0$ | 81 |
| 9.3 | Ortskurve von $\frac{1}{s+c}$ für $s = j\omega$ und komplexen Koeffizienten | 81 |
| 9.4 | Ortskurve für Vorzeichenunterschied in einem Parameter | 83 |
| 9.5 | Nyquist-Ortskurve | 83 |
| 9.6 | Frequenzgangs Ortskurve mit Spitze | 83 |
| 9.7 | Ortskurve und Stabilität von $F_o(s) = \frac{1}{1+s^3}$ | 84 |
| 9.8 | Frequenzgangs Ortskurve bei zu kleiner oberer Frequenzgrenze | 85 |
| 9.9 | Aufsuchen einiger Punkte einer Wurzel Ortskurve | 85 |
| 9.10 | Zwei verwandte Wurzel Ortskurven | 86 |
| 9.11 | Wirkung hochfrequenter Pol- und Nullstellen. Ortskurven zu einem I ₂ -System | 88 |
| 9.12 | Totzeitregelung mit paralleler Totzeit. Stabilitätsgrenze | 88 |
| 9.13 | Ortskurve der gleitenden Mittelwertbildung | 91 |
| 9.14 | Nyquist-Kriterium an instabiler Schleife | 91 |
| 9.15 | Stabilität nach Nyquist zu einer instabilen D-Schleife | 92 |
| 10 | Bode-Diagramme | 95 |
| 10.1 | Bode-Diagramm. Konjugiert komplexe Nullstellen und Polstellen | 95 |
| 10.2 | Genäherter Entwurf im Bode-Diagramm mit anschließender genauer Analyse | 96 |
| 10.2.1 | Fall 1. D-Stabilisierung (Lead Compensation) | 97 |
| 10.2.2 | Fall 2. Erhöhung der Schnelligkeit | 98 |
| 10.2.3 | Fall 3. Verbesserung der Stabilitätsgüte mit PI-Regler | 99 |

| | |
|--|------------|
| 10.2.4 Fall 4. I-Stabilisierung (Lag Compensation) | 100 |
| 11 Zustandsraum | 101 |
| 11.1 Transitionsmatrix eines grenzstabilen Systems | 101 |
| 11.2 Kreise als Zustandskurven | 102 |
| 11.3 Zustandssteuerbarkeit | 102 |
| 11.4 Inversion von $\Phi(t)$ | 102 |
| 11.5 Polvorgabe nach Ackermann | 103 |
| 11.6 Beobachterentwurf nach Ackermann | 103 |
| 11.7 Polvorgabe für Eingrößenregelung | 104 |
| 11.8 Beobachter und Zustandsregler | 105 |
| 11.9 Mindestabklingverhalten im Zustandsraum | 106 |
| 11.10 Kontrolle mit der Spur der Systemmatrix | 106 |
| 11.11 Rückführung im Zustandsraum | 106 |
| 11.12 Ermittlung der Übertragungsfunktion aus der Deskriptordarstellung | 108 |
| 11.13 Reduktion eines aufwendigen Blockbilds mittels Deskriptordarstellung | 108 |
| 11.14 Vervollständigung sequenzieller Systeme mit Shegalkin-Polynomen | 110 |
| 12 Abtastregelung | 113 |
| 12.1 Umrechnung kontinuierlich-diskret | 113 |
| 12.2 Umfahrung des Primärstreifens der z -Ebene | 113 |
| 12.3 Bemessung der Abtastzeit | 113 |
| 12.4 Struktur des Dead-Beat-Reglers für totzeitbehaftete Regelstrecken | 115 |
| 12.5 Dead-Beat-Regler im Zustandsraum | 116 |
| 12.6 Abtastregelkreis mit PDT ₂ -Element | 117 |
| 12.7 H ₂ -Minimaler Abtastregler | 118 |
| 13 Zweigrößenregelung | 121 |
| 14 Optimierung | 127 |
| 14.1 Ertragsmaximierung im Stationärzustand | 127 |
| 14.2 Wahl der Gewichtsfunktionen für bestimmte Regelkreiseigenschaften | 128 |
| 14.3 Kombinierte Optimierung eines Regelkreises | 128 |
| 14.4 Minimierung eines quadratischen Terms unter linearer Nebenbedingung | 129 |
| 14.5 Rechtspseudoinverse | 132 |
| 14.6 Minimierung unter Nebenbedingung | 132 |
| 14.7 Bemessung nach dem Symmetrischen Optimum und auf Messrauschen | 133 |
| 14.8 Stellenergie nach dem Residuensatz bei komplexen Residuen | 133 |
| 14.9 Stellenergie mit Residuensatz und in Simulation | 135 |
| 14.10 H _∞ -Dimensionierung auf kleine Regelabweichung | 137 |
| 14.11 H _∞ -Übertragung einer bandbegrenzten Störgröße | 140 |
| 14.12 H _∞ -Regler | 142 |
| 14.13 Optimale Störgrößenkompensation | 143 |
| 14.14 Verlauf des quadratischen Güteintegrals | 143 |
| 14.15 Symmetrisches Optimum mit Wurzelortskurve und Ortskurve der Schleife | 144 |

| | |
|--|------------|
| 15 Nichtlineare Regelungen | 149 |
| 15.1 Eigenschwingung | 149 |
| 15.2 Lyapunov-Stabilitätsbereich | 149 |
| 15.3 Kennlinie eines einfachen Fuzzy-Reglers | 151 |
| 16 Exakte Zustandslinearisierung | 153 |
| 16.1 Linearisierung durch Rückführung und Rechnersimulation | 153 |
| 16.2 Exakte Zustandslinearisierung | 154 |
| 16.3 Lineare Approximation | 155 |
| 17 Robustheit | 157 |
| 17.1 Robuste Stabilität eines offenen Systems mittels der resolventen Matrix | 157 |
| 17.2 Stabilitätsrobustheit für Regelstrecke aus Totzeitdifferenz | 158 |
| 17.3 Robuster digitaler I-Regler zu einer Regelstrecke mit Unsicherheit | 158 |
| 17.4 Robuster digitaler Regler zu einer Regelstrecke mit zwei Unsicherheiten | 159 |
| 17.5 Robustheit eines Prädiktor-Reglers | 160 |
| 17.6 Stabilitätsrobustheit eines prädiktiven Reglers | 160 |
| 17.7 Robustifizierung | 161 |
| 17.8 Größter Unsicherheitsbereich bei Stabilität | 161 |
| 17.9 H_∞ -Regelung einer flexiblen Positionierung | 162 |
| 17.10 Stabilitätsüberprüfung bei unstrukturierter Unsicherheit | 166 |
| 18 Lineare Matrizenungleichungen | 171 |
| 18.1 Lösbarkeit zu LMI | 171 |
| 18.2 Lyapunov-Gleichung | 172 |
| 18.3 LQG-Problem | 172 |
| 18.4 ISE-Kriterium, berechnet mittels LMI | 173 |
| 18.5 H_∞ -Verstärkung unter Verwendung von LMI | 174 |
| 19 Stochastische Regelkreise | 177 |
| 19.1 Empfindlichkeit auf parasitäre Zeitkonstante | 177 |
| 19.2 Identifikation eines Totzeitgliedes | 178 |
| 19.3 Bemessung auf Überschwingzeit und Rauschübertragung | 179 |
| 19.4 Umformungen für bias-freie Schätzung | 180 |
| 20 Neuronale Netze | 183 |
| 20.1 Balancierung mit Kohonen-Modell | 183 |
| 20.2 Perceptron als nichtlinearer Abtastregelkreis | 184 |
| 20.3 Identifikation mit neuronalem Netz | 187 |
| 21 Hyperstabilität | 191 |
| 21.1 Hyperstabilität, gleiche Anzahl Stell- und Regelgrößen | 191 |
| 21.2 Hyperstabilität, mehr Regelgrößen als Stellgrößen | 193 |
| 22 PLL mit nichtlinearem Phasendiskriminator | 199 |
| 22.1 PLL 1. Ordnung | 199 |
| 22.2 Linearisierte PLL 1. Ordnung im Spektralbereich | 201 |
| 22.3 Einrastbedingung für PLL 1. Ordnung | 202 |
| 22.4 Zeitverhalten PLL 1. Ordnung | 202 |
| 22.5 Zeitverhalten der PLL 1. Ordnung in linearer Approximation | 203 |

| | |
|--|------------|
| 22.6 PLL 2. Ordnung | 204 |
| 22.7 PLL 2. Ordnung in linearer Approximation | 204 |
| 22.8 PLL 2. Ordnung mit PI-Regler als Schleifenfilter | 205 |
| 22.9 Isoklinen der PLL 2. Ordnung mit PI-Regler | 205 |
| 22.10 PLL 2. Ordnung, Wurzelortskurve nach Linearisierung | 208 |
| 22.11 Grenzen des Einrast- und Regelverhaltens | 208 |
| 22.12 PLL als Demodulator | 209 |
| 22.13 Tracking und Akquisition | 209 |
| 22.14 Übersicht über Zustandskurven bei linearen Systemen 2. Ordnung | 210 |
| 23 Invertiertes einfaches Pendel | 211 |
| 24 Invertiertes Doppelpendel | 217 |
| 25 Hubschrauber im Schwebeflug | 219 |
| 26 Höhenregler eines Heißluftballons | 221 |
| 27 Höhenregler eines Höhenseglers | 225 |
| 28 Satelliten-Winkelregelung | 227 |
| 29 Positionsregelung eines geostationären Wettersatelliten | 231 |
| 30 Regelungen bei einem Kleinwasserkraftwerk | 239 |
| 30.1 Pegelregelung | 239 |
| 30.2 Pegelregelung mit Abdämpfung des Wellenschlags | 241 |
| 30.3 Nachgeschaltete Frequenzregelung im Inselbetrieb | 242 |
| 31 Motordrehzahlregelung für Transportschlitten | 245 |
| 31.1 Entwurf des Stromregelkreises | 245 |
| 31.2 Entwurf des Drehzahlregelkreises | 247 |
| 32 Umrüstung eines Leonardsatzes auf umrichtergespeiste Asynchronmaschine | 249 |
| 33 Roboterbewegung als Brachistochrone | 253 |
| 33.1 Euler-Lagrange-Differenzialgleichung | 253 |
| 33.2 Bewegungsgleichung zur Brachistochrone | 254 |
| A Verzeichnis häufig verwendeter Formelzeichen | 257 |
| A.1 Allgemeine Hinweise | 257 |
| A.2 Verknüpfungssymbole | 257 |
| A.3 Hochgestellte Symbole | 258 |
| A.4 Indizes | 258 |
| A.5 Operationszeichen | 259 |
| A.6 Symbole spezieller Art | 259 |
| B Literaturverzeichnis | 265 |
| C Index | 270 |