

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichenverzeichnis</b> .....	11
<b>0. Einführung</b> .....	17
0.1. Charakterisierung zeitdiskreter Systeme .....	17
0.2. Beispiele für Diskontinuitäten in kybernetischen Systemen .....	18
0.3. Problemstellung .....	20
<b>1. Mathematische Beschreibung zeitdiskreter Signale</b> .....	21
1.1. Beschreibung zeitdiskreter Signale im Zeitbereich .....	21
1.2. Beschreibung zeitdiskreter Signale durch Laplace-Transformation/spektrale Darstellung .....	24
1.3. Beschreibung zeitdiskreter Signale durch z-Transformation .....	26
1.3.1. Definition und Eigenschaften .....	26
1.3.2. Grundregeln der z-Transformation .....	27
1.3.3. Beispiele für die z-Transformation von Originalfolgen und die Anwendung der Grundregeln .....	31
1.3.4. Umkehrung der z-Transformation .....	36
1.3.4.1. Rücktransformation unter Verwendung von Korrespondenztabelle .....	37
1.3.4.2. Rücktransformation mittels Residuenrechnung .....	38
1.3.4.3. Rücktransformation durch Reihenentwicklung .....	38
1.4. Übungsaufgaben zum Abschnitt 1. ....	40
<b>2. Mathematische Beschreibung von Signalübertragung und Zustandsverhalten in linearisierten zeitdiskreten Systemen</b> .....	42
2.1. Signalübertragung in linearisierten zeitdiskreten Systemen .....	43
2.1.1. Signalübertragung in zeitdiskreten Grundgliedern .....	43
2.1.1.1. Charakterisierung der Grundglieder .....	43
2.1.1.2. Beschreibung der Signalübertragung mit Differenzgleichungen .....	43
2.1.1.3. Beschreibung der Signalübertragung mit diskreten Übertragungsfunktionen .....	48
2.1.2. Signalübertragung in kontinuierlichen Grundgliedern bei gestuften Eingangssignalen .....	50
2.1.2.1. Charakterisierung der Grundglieder und des Speicher- bzw. Haltevorgangs ..	50
2.1.2.2. Beschreibung der Signalübertragung mit Gewichtungs- und Übergangsfunktionen .....	52
2.1.2.3. Beschreibung der Signalübertragung mit Übertragungsfunktionen .....	54
2.1.3. Signalübertragung in Verknüpfungen von Grundgliedern .....	61
2.2. Zustandsverhalten in linearisierten zeitdiskreten Systemen .....	63
2.2.1. Zustandsverhalten in zeitdiskreten Grundgliedern .....	64
2.2.1.1. Beschreibung des Zustandsverhaltens mit Systemgleichungen .....	64
2.2.1.2. Beschreibung des Zustandsverhaltens mit Bewegungsgleichungen .....	67
2.2.2. Zustandsverhalten in kontinuierlichen Grundgliedern bei gestuften Eingangssignalen .....	71

2.2.3.	Beziehungen zwischen zeitdiskreten Zustands- und Übertragungsmodellen ..	75
2.2.4.	Zustandsverhalten in Verknüpfungen von Grundgliedern .....	78
2.3.	Beschreibung des Systemverhaltens zwischen den Abtastzeitpunkten .....	83
2.4.	Beschreibung zeitdiskreter Totzeitsysteme .....	88
2.5.	Übungsaufgaben zum Abschnitt 2. ....	93
<b>3.</b>	<b>Analyse zeitdiskreter Steuerungssysteme .....</b>	<b>96</b>
3.1.	Steuer- und Beobachtbarkeit .....	96
3.1.1.	Steuerbarkeit .....	97
3.1.2.	Beobachtbarkeit .....	98
3.2.	Stabilitätsanalyse .....	99
3.2.1.	Zustandsstabilität .....	99
3.2.2.	Ausgangsstabilität .....	102
3.2.3.	Algebraische Stabilitätskriterien .....	104
3.2.3.1.	Stabilitätsprüfung anhand des charakteristischen Polynoms in der $z$ -Ebene... ..	104
3.2.3.2.	Stabilitätsprüfung anhand des charakteristischen Polynoms in der $w$ -Ebene.. ..	109
3.2.3.3.	Stabilitätsbedingungen für einfache zeitdiskrete Systeme .....	112
3.2.4.	Grafische Stabilitätskriterien .....	113
3.2.4.1.	Pol-Nullstellen-Bild (Wurzelort) .....	114
3.2.4.2.	Frequenzgang in Ortskurven- und Frequenzkennliniendarstellung .....	117
3.3.	Analyse des Übertragungs- und Zustandsverhaltens zeitdiskreter Systeme .....	120
3.3.1.	Abschätzung des Übergangsvorgangs aus der Lage der Eigenwerte in der $z$ -Ebene .....	121
3.3.2.	Abschätzung des Systemverhaltens aus der Lage des dominierenden Polpaars in der $z$ -Ebene .....	125
3.3.3.	Abschätzung des Systemverhaltens aus dem Pol-Nullstellen-Bild in der $z$ -Ebene ..	130
3.3.4.	Abschätzung des Systemverhaltens aus dem diskreten Frequenzgang .....	130
3.4.	Übungsaufgaben zum Abschnitt 3. ....	134
<b>4.</b>	<b>Synthese zeitdiskreter Steuerungssysteme .....</b>	<b>136</b>
4.1.	Zeitdiskrete Steuerungssysteme ohne Rückführung .....	136
4.1.1.	Zeitdiskrete strukturoptimierte Steuerungen in offener Wirkungskette .....	138
4.1.1.1.	Kompensationsvorwärtssteuerung .....	138
4.1.1.2.	Minimal-Varianz-Vorwärtssteuerung .....	141
4.1.2.	Zeitdiskrete parameteroptimierte Steuerungen in offener Wirkungskette .....	143
4.1.3.	Einschätzungen zum Entwurf zeitdiskreter Vorwärtssteuerungen .....	145
4.2.	Zeitdiskrete Steuerungssysteme mit Ausgangsrückführung .....	145
4.2.1.	Überblick .....	145
4.2.2.	Zeitdiskrete parameteroptimierte Regler für Eingrößensysteme .....	146
4.2.2.1.	Mathematische Beschreibung des Eingrößensystems .....	146
4.2.2.2.	Festlegung von Reglerparametern durch Anforderungen an das stationäre Verhalten .....	148
4.2.2.3.	Bestimmung der Reglerparameter unter Verwendung von Regelgütekriterien ..	149
4.2.2.4.	Bestimmung der Reglerparameter in quasikontinuierlichen Regleralgorithmen ..	157
4.2.2.5.	Bestimmung der Reglerparameter durch Einstellregeln .....	164
4.2.2.6.	Bestimmung der Reglerparameter durch Polvorgabe für den geschlossenen Regelkreis .....	167
4.2.2.7.	Einschätzungen zum Entwurf zeitdiskreter parameteroptimierter Regler ....	169

4.2.3. Zeitdiskrete Kompensationsregler für Eingrößensysteme .....	170
4.2.3.1. Entwurfsprinzip .....	170
4.2.3.2. Reglerentwurf .....	171
4.2.3.3. Einschätzung des Entwurfsverfahrens .....	174
4.2.4. Dead-beat-Regler für Eingrößensysteme .....	175
4.2.4.1. Entwurfsprinzip .....	175
4.2.4.2. Reglerentwurf für Führung .....	175
4.2.4.3. Reglerentwurf für Störung .....	179
4.2.4.4. Einschätzung des Entwurfsverfahrens .....	182
4.2.5. Zeitdiskrete Minimal-Varianz-Regler für Eingrößensysteme .....	183
4.2.5.1. Entwurfsprinzip .....	183
4.2.5.2. Reglerentwurf .....	184
4.2.5.3. Einschätzung des Entwurfsverfahrens .....	185
4.2.6. Zeitdiskrete Regler für Eingrößensysteme mit Totzeit .....	188
4.2.7. Zeitdiskrete Regler für kombiniertes Führungs- und Störverhalten von Eingrößensystemen .....	191
4.2.8. Zeitdiskrete Regler und Steuereinrichtungen in mehrschleifigen Eingrößensystemen .....	192
4.2.9. Zeitdiskrete Regler in Mehrgrößensystemen .....	197
4.2.9.1. Mathematische Beschreibung des Mehrgrößensystems .....	197
4.2.9.2. Reglerentwurf .....	200
4.3. Zeitdiskrete Steuerungssysteme mit Zustandsrückführung .....	202
4.3.1. Zustandsregler für vollständig meßbaren Zustandsvektor .....	203
4.3.1.1. Mathematische Beschreibung von Zustandsregelungen .....	203
4.3.1.2. Zustandsregler mit Eigenwertvorgabe .....	204
4.3.1.3. Zustandsregler für endliche Einstellzeit .....	207
4.3.1.4. Optimale Zustandsregelung .....	209
4.3.2. Zustandsregler für unvollständig meßbaren Zustandsvektor und zeitdiskreter Zustandsbeobachter .....	210
4.4. Übungsaufgaben zum Abschnitt 4. ....	213
<b>5. Realisierungsbedingte Probleme beim Entwurf zeitdiskreter Steuerungen, vornehmlich digitaler Regelungen .....</b>	<b>216</b>
5.1. Digitale Steuerung und Regelung als Aufgabenkomplex moderner Automatisierungstechnik .....	216
5.2. Prozeßgrößenerfassung und Prozeßdatenprimärverarbeitung .....	218
5.2.1. Prozeßdatenprimärverarbeitung .....	219
5.2.2. Digitale Filterung .....	220
5.3. Realisierung/Implementierung zeitdiskreter Steueralgorithmen .....	226
5.4. Steuerwertverarbeitung und -ausgabe .....	229
5.5. Amplitudenquantisierungseffekte in digitalen Steuerungssystemen .....	231
5.5.1. Charakterisierung von Quantisierungsvorgängen .....	231
5.5.2. Auswirkungen der Amplitudenquantisierung auf das Systemverhalten .....	234
5.6. Einfluß des Abtastregimes auf das Verhalten zeitdiskreter Steuerungssysteme .....	238
5.6.1. Zeitdiskrete Steuerungssysteme mit endlicher Abtastzeit .....	239
5.6.2. Zeitdiskrete Steuerungssysteme mit ungleichmäßig periodischem Tastvorgang .....	242
5.6.3. Zeitdiskrete Steuerungssysteme mit Tastvorgängen unterschiedlicher Frequenz .....	244
5.6.4. Zeitdiskrete Steuerungssysteme mit nichtsynchrone Abtastung .....	245

<b>6. Rechnergestützter Entwurf zeitdiskreter Steuer- und Regelalgorithmen</b> .....	253
6.1. Untersuchung des Einflusses der Steuergrößenwichtung auf die Parameteroptimierung zeitdiskreter Regler .....	256
6.2. Untersuchung des Einflusses der Amplitudenquantisierung durch A/D- und D/A-Wandler .....	258
6.3. Untersuchung des Einflusses von Steuerwertbeschränkungen auf Dead-beat-Verhalten	259
6.4. Untersuchung des Einflusses von Reglertotzeit .....	261
6.5. Untersuchungen zum Einfluß stochastischer Störsignale auf das Regelverhalten .....	262
<b>Lösungen der Übungsaufgaben</b> .....	264
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	294
<b>Sachwörterverzeichnis</b> .....	297