

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung in die Theorie der zeitdiskreten Regelungen	13
1.1	Grundstruktur zeitdiskreter Regelungen	13
1.2	Mathematische Beschreibung der zeitdiskreten Stellgrößeneinwirkung auf die Regelstrecke	16
1.2.1	Vorbetrachtungen und Einführung von Differenzgleichungen	16
1.2.2	Differenzgleichung eines Integrierglieds	18
1.2.3	Differenzgleichung eines P-T ₁ -Glieds	20
1.2.4	Differenzgleichung eines Totzeitglieds	22
1.2.5	Algebraische Gleichung eines Proportionalglieds	23
1.2.6	Auswirkungen der Rechenzeit auf die Modellbildung	23
1.2.7	Ausblick auf Differenzgleichungen für beliebige lineare und zeitinvariante Übertragungsglieder	25
2	z-Transformation	31
2.1	Grundlegende Definitionen	31
2.2	Rechenregeln der z-Transformation	35
2.2.1	Linearitätsregel	35
2.2.2	Differentiationsregel für die Bildfunktion	36
2.2.3	Dämpfungsregel	36
2.2.4	Rechtsverschiebungsregel	37
2.2.5	Linksverschiebungsregel	38
2.2.6	Differenzbildungs- und Summationsregel	39
2.2.7	Faltungsregel	40
2.2.8	Grenzwertsätze	42
2.3	Zusammenstellung häufig verwendeter Korrespondenzen der z-Transformation	43
2.4	z-Transformation von linearen, zeitinvarianten Differenzgleichungen	45
2.5	z-Übertragungsfunktion	47
2.6	Umkehrung der z-Transformation	50
2.6.1	Rücktransformation von rationalen z-Transformierten	50
2.6.2	Weitere Rücktransformationsmöglichkeiten	52

3	Bestimmung der z-Übertragungsfunktion aus der s-Übertragungsfunktion	55
3.1	Berechnung der z-Übertragungsfunktion aus der Laplace-transformierten Sprungantwort	55
3.2	Berechnung der z-Übertragungsfunktion direkt aus der s-Übertragungsfunktion	61
3.3	Zusammenhängende Eigenschaften von z- und s-Übertragungsfunktionen	63
3.4	Reihen- und Parallelschaltung von Übertragungsgliedern	65
3.4.1	Reihenschaltung	65
3.4.2	Parallelschaltung	69
3.5	Approximative Bestimmung der z-Übertragungsfunktion aus der s-Übertragungsfunktion	69
3.5.1	Approximation der z-Übertragungsfunktion durch Bildung des Vorwärtsdifferenzenquotienten	70
3.5.2	Approximation der z-Übertragungsfunktion durch Bildung des Rückwärtsdifferenzenquotienten	72
3.5.3	Approximation der z-Übertragungsfunktion mittels einer bilinearen Transformation	73
3.5.4	Vergleich der Approximationsverfahren	74
3.5.5	Gliedweise Approximation einer z-Übertragungsfunktion	75
4	Beschreibung von Regelkreisen und ihrer Dynamik mit der z-Übertragungsfunktion	81
4.1	z-Übertragungsfunktion des geschlossenen, zeitdiskreten Regelkreises ...	81
4.2	Pole einer z-Übertragungsfunktion und ihr Einfluss auf das Einschwingverhalten	85
4.2.1	Allgemeine Vorbetrachtungen sowie die Beseitigung von Mehrfachbrüchen in der z-Übertragungsfunktion	85
4.2.2	Pole und ihr Stabilitätsverhalten	88
4.2.3	Pole und die ihnen zuordenbaren Zeitkonstanten und Dämpfungen	94
4.2.4	Zusammenfassung der Poleigenschaften	98
4.3	Stabilitätskriterien	99
4.3.1	Allgemeines	99
4.3.2	Notwendige Stabilitätskriterien	100
4.3.3	Hinreichende Stabilitätskriterien	101
4.3.4	Notwendiges und hinreichendes Stabilitätskriterium	102
5	Zeitdiskrete Standard- und Kompensationsregler	107
5.1	P-Regler	107
5.2	PI-Regler	109
5.3	PID-Regler	114
5.3.1	Idealer PID-Regler	114
5.3.2	Realer PID-Regler	116

5.4	PD-Regler	119
5.5	Kompensationsregler	120
5.5.1	Reglerübertragungsfunktion des Kompensationsreglers	120
5.5.2	Auswahl einer geeigneten z-Führungsübertragungsfunktion für den Kompensationsregler	124
5.5.3	Implementierung des Kompensationsregelalgorithmus	127
5.5.4	Kompensationsregler mit endlicher Einstellzeit	129
5.6	Reglerparameterbestimmung für zeitdiskrete Standardregler	133
5.6.1	Quasikontinuierlicher Reglerentwurf	134
5.6.2	Polkompensation	137
6	Erweiterung der Regelungsstruktur	145
6.1	Kaskadenregelung	145
6.2	Störgrößenaufschaltung	151
6.3	Vorsteuerung	154
6.3.1	Vorsteuerung der stationären Stellgröße	154
6.3.2	Dynamische Stellgrößenvorsteuerung	157
6.4	Regler mit Referenzmodell	164
6.5	Dem Regelkreis vorgeschaltetes Sollwertfilter	169
6.6	Ausführliches Applikationsbeispiel	172
7	Beschreibung zeitkontinuierlicher Regelstrecken im Zustandsraum..	183
7.1	Allgemeine Vorbetrachtungen	183
7.2	Eigenschaften zeitkontinuierlicher Zustandsgleichungen	184
7.3	Systematisches Aufstellen zeitkontinuierlicher Zustandsgleichungen	191
7.3.1	Aufstellen von zeitkontinuierlichen Zustandsgleichungen aus einem Strukturbild	191
7.3.2	Aufstellen von zeitkontinuierlichen Zustandsgleichungen aus einer s-Übertragungsfunktion	194
7.3.3	Aufstellen von zeitkontinuierlichen Zustandsgleichungen aus einer Differenzialgleichung	198
7.3.4	Aufstellen von zeitkontinuierlichen Zustandsgleichungen aus einer partialbruchzerlegten s-Übertragungsfunktion	200
7.4	Verbessertes Systemverständnis durch Modaltransformation der Zustandsgleichungen	204
7.5	Lösung der Zustandsdifferenzialgleichungen	211
7.6	Verfahren zur Berechnung der Transitionsmatrix	214
7.6.1	Bestimmung der Transitionsmatrix durch Modalzerlegung der Dynamikmatrix	214
7.6.2	Bestimmung der Transitionsmatrix durch Anwendung der Laplace-Transformation	221
7.6.3	Bestimmung der Transitionsmatrix durch Auswertung der Reihendarstellung	222

8	Zeitdiskrete Zustandsgleichungen	225
8.1	Allgemeine Vorbetrachtungen	225
8.2	Diskretisierung zeitkontinuierlicher Zustandsgleichungen	226
8.2.1	Grundstrukturen von Zustandsdifferenzgleichungen	226
8.2.2	Bestimmung der zeitdiskreten Steuer- und Störeingangsmatrix ..	229
8.3	Aufstellen von zeitdiskreten Zustandsgleichungen aus einer z-Übertragungsfunktion	234
8.4	Aufstellen von zeitdiskreten Zustandsgleichungen aus einer skalaren Differenzgleichung	237
8.5	Aufstellen von zeitdiskreten Zustandsgleichungen durch Partialbruchzerlegung	239
9	Zustandstransformationen und Stabilitätsbetrachtungen	245
9.1	Modaltransformation der zeitdiskreten Zustandsgleichungen	245
9.2	Stabilität eines linearen, zeitinvarianten zeitdiskreten Systems	253
9.3	Transformation der zeitdiskreten Zustandsgleichungen auf Regelungsnormalform	257
9.3.1	Transformation auf Regelungsnormalform bei Eingrößensystemen	258
9.3.2	Transformation auf Regelungsnormalform bei Mehrgößensystemen	262
9.4	Transformation der zeitdiskreten Zustandsgleichungen auf Beobachtungsnormalform	278
9.4.1	Transformation auf Beobachtungsnormalform bei Eingrößensystemen	279
9.4.2	Transformation auf Beobachtungsnormalform bei Mehrgößensystemen	281
10	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	289
10.1	Definition der Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	289
10.2	Steuerbarkeitskriterien für zeitdiskrete Systeme	291
10.2.1	Steuerbarkeitskriterium von Kalman	291
10.2.2	Steuerbarkeitskriterium von Gilbert	293
10.2.3	Steuerbarkeitskriterium von Hautus	304
10.3	Beobachtbarkeitskriterien für zeitdiskrete Systeme	306
10.3.1	Beobachtbarkeitskriterium von Kalman	306
10.3.2	Beobachtbarkeitskriterium von Gilbert	308
10.3.3	Beobachtbarkeitskriterium von Hautus	309
10.4	Auswirkung der Nichtsteuerbarkeit und -beobachtbarkeit auf das Übertragungsverhalten	310
10.5	Auswirkung der Diskretisierung auf die Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	314
10.5.1	Zusammenhang zwischen der Steuerbarkeit von zeitkontinuierlichem und zeitdiskretem System	314

10.5.2	Zusammenhang zwischen der Beobachtbarkeit von zeitkontinuierlichem und zeitdiskretem System	321
11	Entwurf von zeitdiskreten Zustandsregelungen	323
11.1	Grundstruktur von zeitdiskreten Zustandsregelungen	323
11.2	Berechnung der Vorfiltermatrix und der statischen Vorsteuermatrizen ..	327
11.3	Zeitdiskreter Zustandsreglerentwurf durch Eigenwertvorgabe	329
11.3.1	Polvorgabereglerentwurf für zeitdiskrete Eingrößensysteme	330
11.3.2	Polvorgabereglerentwurf für zeitdiskrete Mehrgrößensysteme .	337
11.3.2.1	Grundsätzliche Vorgehensweise	337
11.3.2.2	Nutzung der Transformationsfreiheitsgrade für Entkopplungszwecke	347
11.3.2.3	Nutzung der Verkopplungs- und Transformationsfreiheitsgrade zur Ausgangsreglererzeugung	372
11.3.3	Dead-Beat-Reglerentwurf	378
11.3.4	Reglerentwurf bei nicht steuerbarer Regelstrecke	381
11.3.5	Nullstellenbestimmung	388
11.4	Zeitdiskreter Zustandsreglerentwurf durch Minimierung eines quadratischen Gütemaßes	391
11.4.1	Definition und Berechnung des Gütemaßes	392
11.4.2	Gütemaßminimierung	395
11.4.3	Wahl der Gewichtungsmatrizen	402
11.4.4	Ausgangsreglerentwurf	405
11.5	Berücksichtigung von Reglerintegratoren zur Sicherstellung der stationären Genauigkeit	407
11.5.1	Einbeziehung der Reglerintegratoren in das dem Reglerentwurf zugrundeliegende Modell	407
11.5.2	PI-Reglermatrixbestimmung bei bereits vorhandener P-Reglermatrix	413
11.6	Vereinfachte Reglermatrixbestimmung bei Systemen mit Rechenzeit	419
11.7	Störgrößenaufschaltung	426
11.7.1	Statische Störgrößenaufschaltung	426
11.7.2	Modellgestützt-dynamische Störgrößenaufschaltung	429
11.8	Modellgestützt-dynamische Vorsteuerung des Führungsverhaltens	431
11.9	Weitere Zustandsreglerentwurfverfahren	434
11.9.1	Entkopplungsreglerentwurf nach Falb/Wolovich	434
11.9.2	Vollständige Modale Synthese	438

12	Entwurf von zeitdiskreten Beobachtern	443
12.1	Aufgabe und Grundstruktur von Beobachtern	443
12.1.1	Beobachtergrundkonzept	443
12.1.2	Vollständiger Beobachter	444
12.1.3	Berücksichtigung von Störgrößen	446
12.1.4	Reduzierter Beobachter	448
12.2	Separationstheorem	452
12.3	Zeitdiskreter Beobachterentwurf durch Eigenwertvorgabe	456
12.3.1	Beobachter für Regelstrecken mit einer einzigen Messgröße ...	456
12.3.2	Beobachter für Regelstrecken mit mehr als einer Messgröße ...	464
12.3.3	Beobachterentwurf bei nicht beobachtbarer Regelstrecke	476
12.4	Zeitdiskreter Beobachterentwurf durch Minimierung eines quadratischen Gütemaßes	479
13	Anti-Windup-Maßnahmen bei Stellgrößenbegrenzungen	485
13.1	Allgemeine Vorbetrachtungen	485
13.2	Führungsgrößenkorrektur	486
13.2.1	Grundstruktur	486
13.2.2	Steuerbarkeitsanalyse und Stabilitätsaussage	488
13.3	P-Zustandsregler zur Vermeidung von Strecken-Windup	491
13.4	Begrenzungsstruktur für beliebige PI-Zustandsregler ohne Strecken- und Regler-Windup	494
	Literaturverzeichnis	501
	Stichwortverzeichnis	505