

Inhaltsverzeichnis

1.	<u>Einleitung</u>	1
2.	<u>Einführung in die mathematische Beschreibung von Abtastsystemen</u>	5
2.1	Voraussetzungen	5
2.2	Der Abtaster mit Halteglied	6
2.3	Beschreibung eines einfachen Abtastsystems durch Faltungssumme und z-Transformation	14
2.4	Zusammenschaltung einfacher Abtastsysteme	20
2.5	Zusammenhang zwischen Folge und Lage der Pole der z-Transformierten	23
3.	<u>Die Rechenregeln der z-Transformation und ihre Anwendung auf Abtastsysteme</u>	28
3.1	Schreibweisen und Voraussetzungen	28
3.2	Linearität	29
3.3	Rechtsverschiebung einer Folge	30
3.4	Linksverschiebung einer Folge	33
3.5	Dämpfungssatz	34
3.6	Differenz und Summe einer Folge	35
3.7	Differentiation einer Folge nach einem Parameter	38
3.8	Anfangswert einer Folge	39
3.9	Endwert einer Folge	40
3.10	Inverse z-Transformation	41
3.11	Numerische Inversion	47
3.12	Reelle Faltung, Abtastsysteme mit Totzeit	50
3.13	Komplexe Faltung, Parseval-Gleichung	53
3.14	Andere Darstellungen von Abtastsignalen im Zeit- und Frequenzbereich	56

4.	<u>Beschreibung von linearen Abtastsystemen</u>	
	<u>im Zustandsraum</u>	59
4.1	Einleitung	59
4.2	Beschreibung linearer kontinuierlicher Systeme im Zustandsraum	60
4.3	Übergang vom kontinuierlichen System zum Abtastsystem	65
4.4	Zusammenschaltung einfacher Abtastsysteme	72
	4.4.1 Parallelschaltung	72
	4.4.2 Diskrete Reihenschaltung	73
	4.4.3 Geschlossener Regelkreis	74
4.5	Spezielle Abtastprobleme	77
	4.5.1 Zustand zwischen den Abtastzeitpunkten .	77
	4.5.2 Nichtsynchrone Abtastung	79
	4.5.3 Nichtmomentane Abtastung	81
4.6	Lösung der Differenzgleichung, Zusammenhang mit Gewichtsfolge und z-Übertragungsfunktion ..	83
4.7	Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit	90
	4.7.1 Steuerbarkeit	90
	4.7.2 Beobachtbarkeit	93
	4.7.3 Zusammenhang mit der Ein-Ausgangs- Beschreibung	96
5.	<u>Lineare Transformationen und kanonische Formen</u>	101
5.1	Lineare Transformationen	101
5.2	Diagonal- und Jordan-Form	104
5.3	Steuerungs-Normalformen	123
	5.3.1 Steuerbarkeits-Normalform	123
	5.3.2 Regelungs-Normalform	125
5.4	Beobachtungs-Normalformen	128
	5.4.1 Beobachtbarkeits-Normalform	128
	5.4.2 Beobachter-Normalform	130
5.5	Systemparameter	131
	5.5.1 Zähler- und Nennerkoeffizienten der z-Übertragungsfunktion	132
	5.5.2 Gewichtsfolge und charakteristisches Polynom	132
	5.5.3 Eigenwerte und Residuen	133

6.	<u>Mehrgrößensysteme</u>	134
6.1	Darstellung von Mehrgrößen-Abtastsystemen, zyklische Abtastung der Eingangsgrößen	134
6.2	Steuerbarkeits- und Beobachtbarkeitsstruktur..	140
6.3	Kanonische Formen für Mehrgrößensysteme	149
6.3.1	Jordan-Form	149
6.3.2	Steuerungs- und Beobachtungs-Normal- formen mit Kopplungen zwischen den Teilsystemen in einer Richtung	152
6.3.3	Steuerungs- und Beobachtungs-Normal- formen mit Kopplungen zwischen den Teilsystemen in beiden Richtungen	159
6.4	Minimale Ein-Ausgangs-Beschreibung	169
7.	<u>Bestimmung des mathematischen Modells eines Abtastsystems aus gemessenen Ein-Ausgangswerten</u> ...	175
7.1	Diskreter Frequenzgang	176
7.2	Minimale Realisierung einer Sprung- oder Impulsantwort	178
7.3	Realisierung aus Ein-Ausgangs-Messungen	185
8.	<u>Stabilität von Abtastsystemen</u>	193
8.1	Definitionen und allgemeine Stabilitäts- bedingungen	193
8.2	Die Liapunov-Methode	202
8.2.1	Allgemeine hinreichende Bedingung	202
8.2.2	Notwendige und hinreichende Bedingung für die Stabilität linearer Abtastsysteme .	207
8.3	Bedingungen für Polynom-Nullstellen im Einheitskreis	210
8.3.1	Bilineare Transformation	210
8.3.2	Wilf's quadratische Form	211
8.3.3	Reduktionsverfahren	211
8.3.4	Determinantenverfahren	212
8.3.5	Notwendige Stabilitätsbedingungen	215
8.3.6	Hinreichende Stabilitätsbedingungen ...	217
8.3.7	Kritische Stabilitätsbedingungen für den Entwurf	217
8.4	Grafische Verfahren	220
8.4.1	Wurzelortskurven	220
8.4.2	Nyquist-Ortskurven	223
8.4.3	Logarithmische Frequenzkennlinien	228

9. Entwurf von Abtast-Regelungssystemen 230

 9.1 Aufbau von Abtastreglern 230

 9.1.1 Abtaster mit Halteglied und kontinuierlichen Gliedern 231

 9.1.2 Realisierung der Zustandsgleichungen durch Speicherelemente 232

 9.1.3 Digitalrechner als Regler 234

 9.1.4 Folgerungen für den Systementwurf 236

 9.2 Wahl der Abtastfrequenz 239

 9.2.1 Allgemeine Gesichtspunkte 239

 9.2.2 Bandbreite und Abtastfrequenz 241

 9.2.3 Stabilität und Abtastfrequenz 244

 9.2.4 Steuerbarkeitsbereich und Abtastfrequenz 252

 9.3 Allgemeine Entwurfsüberlegungen 262

 9.3.1 Aufgabe des Regelungssystems 262

 9.3.2 Struktur von Regelungssystemen 268

 9.3.3 Kürzungen von Polen und Nullstellen 276

 9.3.4 Wahl der Eigenwerte des Regelungssystems 282

 9.4 Entwurf für bekannte Eingangssignale 288

 9.4.1 Positions-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsfehler 288

 9.4.2 "Deadbeat"-Führungsverhalten 290

 9.4.3 Entwurf für bekannte Eingangssignale mit einer rationalen Laplace-Transformierten 300

10. Synthese von Mehrgrößen-Regelungssystemen im Zustandsraum 305

 10.1 Polfestlegung durch Zustandsvektor-Rückführung. 306

 10.1.1 Polfestlegung über die Regelungsnormalform 307

 10.1.2 Polfestlegung ohne kanonische Form 310

 10.1.3 Minimale Einschwingzeit 316

 10.2 Zustandsschätzung durch Beobachter 321

 10.2.1 Der Beobachter der Ordnung n 321

 10.2.2 Der Beobachter reduzierter Ordnung 329

 10.2.3 Beobachter mit minimaler Einschwingzeit. 334

 10.2.4 Berücksichtigung von Störgrößen 338

 10.2.5 Wahl der Beobachterpole 343

10.3	Das Regelungssystem mit Rückführung der Zustands-Schätzwerte	344
10.3.1	Separation von Zustands-Schätzung und Zustandsvektor-Rückführung	344
10.3.2	Führungsverhalten	348
10.3.3	Invarianten	356
10.3.4	Störverhalten	361
10.3.5	Polfestlegung mit minimaler Reglerordnung	366
10.4	Quadratische optimale Regelung	368
11.	<u>Tabelle der Laplace- und z-Transformation</u>	375
12.	<u>Literaturverzeichnis</u>	378
13.	<u>Sachverzeichnis</u>	388