

Inhaltsverzeichnis

1 Signale	1
1.1 Einführung	1
1.2 Klassifizierung von Signalen	2
1.3 Grundoperationen an Signalen	4
1.3.1 Spiegelung und Verschiebung von Signalen	4
1.3.2 Zerlegung von Signalen	5
1.4 Zeitdiskrete determinierte Signale	6
1.4.1 Zahlenfolge	6
1.4.2 Zeitreihe	7
1.4.3 Zeitdiskretes Signal	8
1.4.3.1 Deltafunktion	9
1.4.3.2 Darstellung von Zeitreihen durch zeitdiskrete Signale	10
1.4.3.3 Deltaabtastung von zeitkontinuierlichen Signalen .	11
1.5 Stochastische zeitdiskrete Signale	12
1.5.1 Beschreibung von Zufallssignalen	14
1.5.2 Elementarereignis	14
1.5.3 Vektorielle Zufallssignale	14
1.5.4 Verteilungsfunktion und Dichtefunktion	15
1.5.5 Erwartungswerte	17
1.6 Physikalische Darstellung eines zeitdiskreten Signals	19
1.7 Verarbeitung von Zeitreihen	19
1.8 Faltung	20

1.8.1	Definition und Eigenschaften der Faltung	20
1.8.2	Grafische Interpretation der Faltung	21
1.8.3	Faltung mit Distributionen	22
1.8.4	Diskrete Faltung	23
1.8.5	Faltung zeitkontinuierlicher zeitbegrenzter Signale	24
1.8.6	Zyklische diskrete Faltung	25
1.8.7	Diskrete Faltung und z-Transformation	26
1.8.8	Aufgaben	28
1.9	Laplace- und Z-Transformation	30
1.9.1	Laplacetransformation	30
1.9.2	Z-Transformation	31
1.9.3	Zusammenstellung von Transformationspaaren	32
2	Fouriertransformation	35
2.1	Rechenregeln der Fouriertransformation	35
2.2	Wichtige Fouriertransformationspaare	36
2.3	Fouriertransformierte kausaler Signale	36
2.4	Diskrete Fouriertransformation	38
2.5	Ermittlung der Fouriertransformierten	39
2.5.1	Fouriertransformierte zeitdiskreter Signale	39
2.5.1.1	Fouriertransformierte periodischer Signale	40
2.5.1.2	Fouriertransformierte zeitbegrenzter Signale	40
2.5.1.3	Fouriertransformierte sehr langer Signale	42
2.5.2	Fouriertransformierte zeitkontinuierlicher Signale	42
2.5.2.1	Fouriertransformierte zeitbegrenzter Signale	42
2.5.2.2	Fouriertransformierte periodischer Signale	44
2.6	Fourierreihen	44
2.7	Die Beziehung der Fouriertransformation zur Laplacetransformation	45
2.8	Parsevalsche Theoreme	45
2.8.1	Aperiodische zeitkontinuierliche Signale	45
2.8.2	Aperiodische zeitdiskrete Signale	46
2.8.3	Periodische zeitkontinuierliche Signale	47
2.8.4	Periodische zeitdiskrete Signale	48
2.9	Leckeffekt bei der DFT	49
2.10	Nichtstationäre Signale	51
2.10.1	Einführung	51
2.10.2	Kurzzeitspektren	52
2.11	Aufgaben	54

3	Approximation von Signalen	61
3.1	Einführung	61
3.2	Herleitung der Least-Square-Methode	61
3.3	Approximation und Interpolation	64
3.4	Anwendungsbeispiele	64
3.4.1	Approximation mit beliebigen Funktionen	64
3.4.2	Regressionspolynome	65
3.4.3	Interpolation	68
3.4.4	Verstärkungsmessung	68
3.5	Approximation mit orthogonalen Signalen	71
3.5.1	Diskrete Fouriertransformation	73
3.5.2	Diskrete Cosinustransformation, DCT	74
3.5.3	Approximation mit Haarfunktionen	76
4	Systeme	79
4.1	Systembeschreibung	79
4.2	Aufteilung und Zusammenfassung	80
4.3	Klassifizierung von Systemen	81
4.4	Systemsimulation	82
4.5	Mathematische Systembeschreibung	82
4.5.1	Allgemeines	82
4.5.2	Lineare und zeitinvariante Systeme	83
4.5.3	Einteilung der LTI-Systeme	85
4.6	Systembeschreibung mit Testsignalen	85
4.6.1	Gewichtsfunktion und Übertragungsfunktion	86
4.6.2	Übertragungsstabilität	88
4.6.3	Sprungantwort	88
4.6.4	Frequenzgang	89
4.6.4.1	Frequenzgang von zeitkontinuierlichen Systemen	89
4.6.4.2	Frequenzgang von zeitdiskreten Systemen	90
4.6.4.3	Messung von Frequenzgängen	91
4.6.4.4	Eigenschaften kausaler Systeme	92
4.6.4.5	Weitere Begriffe zum Frequenzgang	92
4.7	Verknüpfung von LTI-Systemen	93
4.7.1	Reihen- oder Kaskadenschaltung, Inverses System	93
4.7.2	Parallelschaltung, Komplementärsystem	94
4.7.3	Kreisschaltung	95

5	Differenzengleichungssysteme	97
5.1	Gewichtsfunktion und Sprungantwort	98
5.2	Z-Übertragungsfunktion	99
5.3	Frequenzgang	102
5.4	Übertragungsstabilität	103
5.4.1	Stabilitätskriterium im z-Bereich für Differenzengleichungssysteme	104
5.4.2	Praktische Ausführung der Stabilitätsprüfung	105
5.5	Typen zeitdiskreter Systeme	105
5.6	Aufgaben	106
6	Differentialgleichungssysteme	117
6.1	Einführung	117
6.1.1	Lineare Differentialgleichungssysteme	117
6.1.2	Nichtlineare Differentialgleichungssysteme	118
6.2	Untersuchung von Systemen im Zeitbereich	118
6.3	Anwendung der Laplacetransformation	119
6.3.1	Lösung von Differentialgleichungen mit der Laplacetransfor- mation	119
6.3.2	Laplace-Übertragungsfunktion	120
6.4	Frequenzgang	120
6.5	Sprungantwort	122
6.6	Übertragungsstabilität	123
6.7	Numerische Berechnung der Systemantwort auf beliebige Eingangs- signale	125
6.8	Aufgaben	125
7	Anregungsinvariante Approximation	129
7.1	Lösungsansatz	129
7.1.1	Impulsinvariante Approximation	130
7.1.2	Sprunginvariante Approximation	130
7.1.3	Weitere Approximationsformen	130
7.2	Übertragungsfunktion der sprunginvarianten Approximation	131
7.3	Numerische Berechnung der sprunginvarianten Approximation . . .	132
7.4	Aufgaben	133

8 Zustandsdarstellung von Systemen	141
8.1 Darstellung für zeitkontinuierliche Systeme	141
8.1.1 Ermittlung der Übertragungsfunktion	142
8.1.1.1 Übertragungsfunktion für SISO-Systeme	143
8.1.1.2 Übertragungsfunktionen für MIMO-Systeme	144
8.1.2 Ermittlung der Zustandsdarstellung aus der Übertragungsfunktion	144
8.1.2.1 Ermittlung der Regelungsnormalform	145
8.1.2.2 Ermittlung der Beobachtungsnormalform	146
8.1.2.3 Ermittlung der Jordanschen Normalform	146
8.2 Zustandsdarstellung zeitdiskreter Systeme	147
8.2.1 Ermittlung der Übertragungsfunktion	148
8.3 Diskretisierung der Zustandsdarstellung zeitkontinuierlicher Systeme	148
8.4 Matlab-Funktionen	150
8.5 Verknüpfung von Systemen	150
8.5.1 Verknüpfung zeitkontinuierlicher Systeme	150
8.5.1.1 Zusammenfassung	150
8.5.1.2 Reihenschaltung	151
8.5.1.3 Parallelschaltung	151
8.5.1.4 Kreisschaltung	151
8.5.2 Verknüpfung zeitdiskreter Systeme	151
8.6 Aufgaben	152
9 Abtastung und Rekonstruktion von Signalen	157
9.1 Abtastung	157
9.2 Rekonstruktion	159
9.2.1 Ideale Rekonstruktion	159
9.2.2 Reale Rekonstruktion	160
9.2.3 Möglichkeiten zur Verbesserung der realen Rekonstruktion .	164
9.3 Pulsamplitudenmodulation	165
9.4 Aufgaben	165

10 Spezielle zeitdiskrete Systeme	169
10.1 Phasenlineare Systeme	169
10.1.1 FIR-Systeme	169
10.1.2 IIR-Systeme	171
10.1.3 Nullstellenverteilung für phasenlineare FIR-Systeme	172
10.1.3.1 Multiplikation von Spiegel- und Antispiegelpolynomen	172
10.1.3.2 Elementare Spiegel- und Antispiegelpolynome . .	172
10.2 Reverse FIR-Systeme	174
10.2.1 Einführung	174
10.2.2 Definition des reversen FIR-Systems	175
10.2.3 Ausblicke	176
10.3 Allpässe und Minimalphasensysteme	176
10.3.1 Allpässe	176
10.3.2 Inverse oder Minimalphasensysteme	178
10.4 Filter	181
10.4.1 Ideale Filter	182
10.4.2 FIR-Filter	184
10.4.2.1 Ideale FIR-Tiefpässe	184
10.4.2.2 Realisierbare FIR-Tiefpässe	185
10.4.2.3 FIR-Tiefpass mit Rechteckfenster	186
10.4.2.4 FIR-Tiefpass mit Cosinusfenstern	187
10.4.2.5 FIR-Tiefpässe mit anderen Fensterfunktionen . . .	188
10.4.2.6 FIR-Hochpässe	188
10.4.2.7 FIR-Bandpässe und FIR-Bandsperren	189
10.4.2.8 Entwurf von FIR-Filtern mit der LS-Methode . .	191
10.4.2.9 Weitere Entwurfsmethoden für FIR-Filter	193
10.4.3 IIR-Filter	193
10.4.3.1 Entwurfsmethode	193
10.4.3.2 Ausgleich der Phasenverzerrung bei IIR-Filtern . .	195
10.4.4 Aufgaben	197

10.5	Online-Integration von Signalen	201
10.5.1	Einschrittige Integrationsalgorithmen	202
10.5.2	Mehrschrittverfahren	205
10.5.2.1	Zweischrittverfahren	206
10.5.2.2	Dreischrittverfahren	206
10.5.3	Aufgaben	206
10.6	Differentiationsalgorithmen	208
10.6.1	Algorithmen aus Stützpolynomen	209
10.6.2	FIR-Differenzierer	211
10.7	Signalinterpolatoren	215
10.7.1	Offline-Interpolation	215
10.7.1.1	Konstruktion eines Interpolationspolynoms	216
10.7.1.2	Offline-Interpolation mit Intervall-Polynomen	217
10.7.1.3	Whittaker-Interpolation	219
10.7.2	Online-Interpolation	220
10.7.2.1	Lineare Interpolation	222
10.7.2.2	Filterung mit FIR-Tiefpass	223
10.7.3	Aufgaben	225
10.8	Algorithmen zur Signalglättung	228
10.8.1	Gleitender Mittelwert	229
10.8.2	Glättung mit FIR-Tiefpass	229
10.8.3	DFT-Glättung	231
10.8.4	Nichtlineare Glättungsfilter	231
10.8.4.1	Medianfilter	232
10.8.4.2	Entfernung von Ausreißern	232
10.9	Algorithmen zur Hilberttransformation	233
10.9.1	Offline-Hilberttransformation von Signalen	234
10.9.2	Online-Hilberttransformation	237
10.10	Goertzel-Algorithmus	237
10.11	Zufallszahlengeneratoren	240

10.11.1	Generator für gleichverteilte Zufallszahlen	241
10.11.2	Generatoren mit vorgebbaren Dichtefunktionen	241
10.11.2.1	Zufallszahlengenerator für Poisson-Verteilung . . .	242
10.11.2.2	Zufallszahlen mit Binominal-Verteilung	242
10.11.2.3	Zufallszahlengenerator für Normalverteilung . . .	243
10.11.3	Generator für Pseudo-Rausch-Binär-Signal	243
10.11.3.1	Herleitung des PRB-Signals	243
10.11.3.2	Numerische Erzeugung des PRB-Signals	247
10.11.3.3	Die z -Übertragungsfunktion des PRBS-Generators	247
10.11.4	Generator für gewichtete Binärfolgen	247
11	Einstellen von Systemen in endlicher Zeit	249
11.1	Einstellen von zeitdiskreten Systemen in endlicher Zeit	249
11.1.1	Einstellen von FIR-Systemen	249
11.1.2	Einstellen von IIR-Systemen	250
11.2	Einstellen von zeitkontinuierlichen Systemen in kürzester Zeit . . .	251
11.3	Aufgaben	252
12	Systemidentifikation	255
12.1	Schätzung von z -Übertragungsfunktionen	255
12.1.1	Parameterermittlung im Zeitbereich	255
12.1.2	Schätzung der z -Übertragungsfunktion aus Frequenzgang .	258
12.2	Frequenzanalyse bei Mehrtonsignalen	259
12.3	Rekursive Systemidentifikation	262
12.3.1	Nichtrekursiver Algorithmus	262
12.3.2	Rekursiver Algorithmus	264

13 Korrelationsfunktion und spektrale Leistungsdichte	269
13.1 Korrelationskoeffizient	269
13.2 Korrelationsfunktionen	271
13.2.1 Autokorrelationsfunktion	272
13.2.1.1 Definition und Eigenschaften	272
13.2.1.2 Interpretation	273
13.2.1.3 Autokovarianzfunktion	274
13.2.2 Kreuzkorrelationsfunktion	274
13.2.2.1 Kreuzkovarianzfunktionen	274
13.2.3 Rechenregeln für Korrelationsfunktionen	275
13.2.4 Korrelationsfunktionen periodischer zeitdiskreter Signale . .	275
13.2.5 Numerische Berechnung von Korrelationsfunktionen	275
13.3 Spektrale Leistungsdichte	278
13.3.1 Definition	278
13.3.2 Numerische Berechnung	279
13.4 Spektrale Kreuzleistungsdichte	281
13.5 Leistungsdichten und Frequenzgang	282
13.6 Weißes und farbiges Rauschen	282
13.7 Aufgaben	283
14 Systemsimulation mit Simulink	287
14.1 Einführung	287
14.2 Simulation zeitdiskreter Systeme	288
14.2.1 Sinus-Cosinus-Generator	288
14.2.2 Generator für Pseudo-Rausch-Binär-Signale (PRBS)	289
14.2.3 IIR-Algorithmus	290
14.2.4 Messung von Amplitude und Frequenz harmonischer Signale	293
14.2.5 Phasenschieber	295
14.2.6 Rekursive Parameterschätzung	297
14.3 Simulation zeitkontinuierlicher Systeme	298
14.3.1 Simulation eines Fliehkraftpendels	298
14.3.2 Simulation einer Verladebrücke	301
14.3.3 Simulation der Reibung	305
14.3.4 Simulation von Flüssigkeitsbehältern	307
14.3.5 Simulation eines Gleichstrommotors	310
14.3.6 Mathieu-Differentialgleichung	313
14.3.7 Simulationsbeispiel aus der Populationsdynamik	314

15 Digitale Regelung	317
15.1 Vorbemerkung	317
15.2 Einführung in die Regelungsaufgabe	317
15.3 Grundzüge der digitalen Regelung	318
15.4 Kompensationsregler	320
15.4.1 Aufgabenstellung	320
15.4.2 Ermittlung des Reglers	321
15.4.2.1 Auswahl des Führungsverhaltens	321
15.4.2.2 Bestimmung der Regler	321
15.4.2.3 Störverhalten	322
15.4.2.4 Numerische Implementierung	322
15.5 Regelung mit endlicher Einstellzeit	323
15.5.1 Aufgabenstellung	323
15.5.2 Ermittlung der Tastzeit	324
15.5.3 Auslegung des Reglers	325
15.5.4 Störverhalten	326
15.5.5 Simulink-Simulation	326
15.6 Zweipunktregelung	329
15.6.1 Zweipunktregler	329
15.7 Zeitoptimale Regelung von Strecken	329
15.8 Wurzelortskurve	334
15.9 Aufgaben	335
16 Ermittlung von Signalparametern aus Messwerten	339
16.1 Minimierung von Funktionen	339
16.1.1 Lösungsansätze	340
16.1.2 Simplexmethode zur Funktionsminimierung	340
16.2 Ermittlung von Signalparametern	343

17 Anhang 1: Darstellungen von Differenzengleichungssystemen	345
17.1 Kanonische Darstellungen	345
17.1.1 Erste kanonische Form	345
17.1.2 Zweite kanonische Form	346
17.1.3 Kaskadenform	347
17.2 Parallelform	348
18 Anhang 2: Berechnung der Systemantwort mit der Gewichtungsfunktion	349
19 Anhang 3: Fensterfunktionen	351
19.1 Einführung	351
19.2 Einige Fensterfunktionen	351
19.2.1 Rechteckfenster	351
19.2.2 Cosinusfenster	353
19.3 Blackman-Fenster	354
19.4 Dolph-Tschebycheff-Fenster	354
19.5 Kaiser-Fenster	355
20 Anhang 4: Transformation von Übertragungsfunktionen	357
20.1 Vereinbarungen	357
20.2 Transformation der Übertragungsfunktionen	357
20.3 Wichtige Transformationen	359
21 Anhang 5: Entwurf zeitkontinuierlicher Filter	363
21.1 Festlegung des Toleranzschemas	363
21.2 Transformation von Übertragungsfunktionen	364
21.3 Ermittlung des Toleranzschemas des Normtiefpasses	364
21.4 Entwurf zeitkontinuierlicher Normtiefpässe	365
21.4.1 Einführung	365
21.4.2 Definition der Normtiefpässe	367
21.5 Transformation des Normtiefpasses in das gewünschte Filter	374

22 Anhang 6: Bilineare Transformation	377
22.1 Definition der bilinearen Transformation	377
22.2 Eigenschaften der bilinearen Transformation	378
22.3 Bestimmung des Transformationsfaktors A	378
22.4 Numerische Ausführung der bilinearen Transformation	379
22.5 Transformationsmatrizen	379
22.6 Inversion der bilinearen Transformation	380
22.7 Beispiel	381
23 Anhang 7: Der FFT-Algorithmus	383
24 Anhang 8: Herleitung der Spline-Interpolation	389
25 Anhang 9: Matrizen	393
25.1 Definition der Matrix	393
25.2 Rechenregeln	394
25.3 Transposition einer Matrix	395
25.3.1 Definition und Rechenregeln	395
25.3.2 Orthogonale Matrizen	396
25.3.3 Rechnen mit Transponierten	397
25.4 Determinante einer Matrix	397
25.5 Rang einer Matrix	398
25.6 Inverse einer quadratischen Matrix	399
25.7 Normen von Vektoren und quadratischen Matrizen	400
25.8 Differentiation nach Vektoren	400
25.9 Matrizenpolynome	401
25.10 Eigenwerte und Eigenvektoren	402
25.11 Spezielle Matrizen	403
26 Literaturverzeichnis	405
27 Zur beiliegenden CD	407
27.1 Matlab-Dateien	407
27.2 PDF-Dateien	408
Stichwortverzeichnis	409