

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Das Konzept der Systemtheorie.....	1
1.2 Übersicht über die Methoden der Signalverarbeitung	5
2 Analoge Signale	17
2.1 Klassierung der Signale	17
2.1.1 Unterscheidung kontinuierlich - diskret	17
2.1.2 Unterscheidung deterministisch - stochastisch.....	19
2.1.3 Unterscheidung Energiesignale - Leistungssignale	19
2.2 Die Fourier-Reihe	22
2.2.1 Einführung	22
2.2.2 Sinus- / Cosinus-Darstellung.....	24
2.2.3 Betrags- / Phasen-Darstellung.....	24
2.2.4 Komplexe Darstellung	25
2.2.5 Das Theorem von Parseval für Leistungssignale	31
2.3 Die Fourier-Transformation (FT)	32
2.3.1 Herleitung des Amplitudendichtespektrums	32
2.3.2 Die Faltung.....	38
2.3.3 Das Rechnen mit der Delta-Funktion	41
2.3.4 Die Fourier-Transformation von periodischen Signalen	46
2.3.5 Die Eigenschaften der Fourier-Transformation.....	51
2.3.6 Das Theorem von Parseval für Energiesignale	62
2.3.7 Tabelle einiger Fourier-Korrespondenzen.....	64
2.4 Die Laplace-Transformation (LT)	65
2.4.1 Wieso eine weitere Transformation?.....	65
2.4.2 Definition der Laplace-Transformation und Beziehung zur FT	65
2.4.3 Die Eigenschaften der Laplace-Transformation.....	69
2.4.4 Die inverse Laplace-Transformation.....	74
2.4.5 Tabelle einiger Laplace-Korrespondenzen (einseitige Transformation) ..	75
3 Analoge Systeme	77
3.1 Klassierung der Systeme	77
3.1.1 Linearität	77
3.1.2 Zeitinvarianz	80
3.1.3 Kausale und deterministische Systeme	81
3.1.4 Dynamische Systeme	81
3.1.5 Stabilität	81
3.2 Die Impulsantwort oder Stossantwort.....	82
3.3 Der Frequenzgang und die Übertragungsfunktion.....	90
3.4 Die Schrittantwort oder Sprungantwort.....	96
3.5 Kausale Systeme.....	102
3.6 Pole und Nullstellen.....	103
3.6.1 Einführung	103

3.6.2	Amplitudengang, Phasengang und Gruppenlaufzeit	106
3.6.3	PN-Schemata der Filterarten	111
3.6.4	Realisierungsmöglichkeiten	113
3.7	Bodediagramme	114
3.8	Systemverhalten im Zeitbereich	117
3.9	Spezielle Systeme	121
3.9.1	Mindestphasensysteme	121
3.9.2	Allpässe	123
3.9.3	Zweipole	125
3.9.4	Polynomfilter	125
3.10	Systembeschreibung mit Zustandsvariablen	126
3.11	Normierung	128
3.12	Übersicht über die Systembeschreibungen	131
3.12.1	Einführung	131
3.12.2	Stabile LTI-Systeme mit endlich vielen konzentrierten Elementen	132
3.12.3	Nichtlineare und/oder zeitvariante Systeme	134
3.12.4	Bestimmen der Systemgleichung	135
3.12.5	Computergestützte Systemanalyse	138
3.13	Das Übertragungsverhalten von LTI-Systemen	141
3.13.1	Ideale Tiefpass-Systeme	145
3.13.2	Ideale Bandpass-Systeme	148
4	Digitale Signale	151
4.1	Einführung	151
4.2	Die Fourier-Transformation für Abtastsignale (FTA)	154
4.2.1	Einführung	154
4.2.2	Die ideale Abtastung von Signalen	154
4.2.3	Das Spektrum von abgetasteten Signalen	155
4.2.4	Das Abtasttheorem	160
4.2.5	Die Rekonstruktion von abgetasteten Signalen (DA-Wandlung)	163
4.3	Die diskrete Fourier-Transformation (DFT)	166
4.3.1	Die Herleitung der DFT	166
4.3.2	Die Verwandtschaft mit den komplexen Fourier-Koeffizienten	168
4.3.3	Die Eigenschaften der DFT	171
4.3.4	Die schnelle Fourier-Transformation (FFT)	176
4.3.5	Die Redundanz im Spektrum reeller Zeitfolgen	183
4.4	Spektralanalyse mit der DFT/FFT	185
4.4.1	Einführung	185
4.4.2	Periodische Signale	187
4.4.3	Quasiperiodische Signale	190
4.4.4	Nichtperiodische, stationäre Leistungssignale	202
4.4.5	Nichtstationäre Leistungssignale	202
4.4.6	Transiente Signale	203
4.4.7	Messung von Frequenzgängen	205
4.4.8	Zusammenfassung	206
4.5	Die diskrete Faltung	207
4.6	Die z-Transformation (ZT)	209
4.6.1	Definition der z-Transformation	209
4.6.2	Zusammenhang der ZT mit der LT und der FTA	212
4.6.3	Eigenschaften der z-Transformation	215

4.6.4	Die inverse z -Transformation.....	219
4.6.5	Tabelle einiger z -Korrespondenzen.....	221
4.7	Übersicht über die Signaltransformationen	222
4.7.1	Welche Transformation für welches Signal?	222
4.7.2	Zusammenhang der verschiedenen Transformationen.....	223
5	Digitale Systeme.....	229
5.1	Einführung.....	229
5.2	Die Differenzengleichung.....	235
5.3	Die Impulsantwort.....	237
5.4	Der Frequenzgang und die z -Übertragungsfunktion.....	240
5.5	Die Schrittantwort.....	246
5.6	Pole und Nullstellen.....	247
5.7	Strukturen und Blockschaltbilder	250
5.8	Digitale Simulation analoger Systeme.....	256
5.9	Übersicht über die Systeme	259
5.10	Der Einfluss der Amplitudenquantisierung	261
5.10.1	Einführung	261
5.10.2	Quantisierung bei der AD-Wandlung.....	261
5.10.3	Quantisierung der Filterkoeffizienten	264
5.10.4	Quantisierung der Rechenergebnisse	267
5.11	Die Realisierung von digitalen Systemen.....	268
5.11.1	Die Signalwandler.....	269
5.11.1.1	Sample- and Hold-Schaltungen (S&H).....	269
5.11.1.2	Analog-Digital-Wandler (ADC).....	270
5.11.1.3	Digital-Analog-Wandler (DAC).....	271
5.11.2	Die Verarbeitungseinheit	271
5.11.2.1	Hardware.....	272
5.11.2.2	Mikrocomputer und -Controller.....	272
5.11.2.3	Digitale Signalprozessoren (DSP).....	272
5.11.3	Die Software-Entwicklung.....	274
6	Zufällige Signale	279
6.1	Einführung.....	279
6.2	Wahrscheinlichkeitsfunktion und Wahrscheinlichkeitsdichte	280
6.2.1	Wahrscheinlichkeit.....	280
6.2.2	Bedingte Wahrscheinlichkeit	282
6.2.3	Verbundwahrscheinlichkeit.....	283
6.2.4	Zufallsvariablen und Wahrscheinlichkeitsdichte	284
6.2.5	Erwartungswert, Varianz und Standardabweichung	290
6.3	Zufallsfunktionen und stochastische Prozesse.....	295
6.3.1	Mittelwerte.....	295
6.3.2	Die Autokorrelationsfunktion (AKF).....	298
6.3.3	Die AKF von periodischen Signalen.....	302
6.3.4	Die Kreuzkorrelationsfunktion (KKF).....	304
6.4	Die Beschreibung von Zufallssignalen im Frequenzbereich	307
6.4.1	Leistungsdichtespektren.....	307
6.4.2	Das Kreuzleistungsdichtespektrum	310
6.4.3	Leistungsspektren von periodischen Signalen.....	311

6.5	Einige Anwendungen.....	312
6.5.1	Die Messung der Korrelationsfunktionen	312
6.5.2	Auffinden einer Periodizität mit der AKF.....	313
6.5.3	Ermitteln der Form eines gestörten periodischen Signals	317
6.5.4	Zeitmessung mit der KKF	319
6.5.5	Weisses Rauschen	319
7	Reaktion von Systemen auf Zufallssignale	323
7.1	Systemreaktion	323
7.1.1	Berechnung im Zeitbereich	323
7.1.2	Berechnung im Frequenzbereich.....	326
7.1.3	Beispiele.....	328
7.2	Messung von Frequenzgängen.....	330
7.2.1	Das Prinzip der Korrelationsmessung	330
7.2.2	Messung bei verrauschten Signalen	334
7.2.3	Die Kohärenzfunktion	336
7.2.4	Die Erzeugung von PRBN-Folgen.....	345
7.3	Optimalfilter (matched filter).....	350
8	Analoge Filter.....	357
8.1	Einführung.....	357
8.2	Approximation des idealen Tiefpasses	364
8.2.1	Einführung.....	364
8.2.2	Butterworth-Approximation.....	365
8.2.3	Tschebyscheff-I-Approximation	368
8.2.4	Bessel-Approximation.....	371
8.2.5	Tschebyscheff-II- und Cauer-Approximation	371
8.2.6	Filter mit kritischer Dämpfung.....	372
8.3	Frequenztransformation.....	373
8.3.1	Tiefpässe	373
8.3.2	Hochpässe	373
8.3.3	Bandpässe.....	375
8.3.4	Bandsperren.....	379
8.3.5	Allpässe	379
8.4	Die praktische Realisierung von aktiven Analogfiltern	380
8.4.1	Darstellung in der Kaskadenstruktur und Skalierung.....	380
8.4.2	Bestimmen der Koeffizienten und Filtertabellen.....	383
8.4.3	Grundsaltungen und Beispiele.....	386
9	Digitale Filter	393
9.1	IIR-Filter (Rekursivfilter).....	393
9.1.1	Einführung.....	393
9.1.2	Filterentwurf mit der impulsinvarianten z -Transformation	395
9.1.3	Filterentwurf mit der bilinearen z -Transformation	404
9.1.4	Frequenztransformation im z -Bereich	415
9.1.5	Direkter Entwurf im z -Bereich.....	416
9.1.6	Rekursive Filter mit linearem Phasengang.....	418
9.2	FIR-Filter (Transversalfilter).....	423
9.2.1	Einführung.....	423

9.2.2	Die 4 Typen linearphasiger FIR-Filter	424
9.2.3	Filterentwurf mit der Fenstermethode.....	430
9.2.4	Filterentwurf durch Frequenz-Abtastung	438
9.2.5	Filterentwurf durch Synthese im z-Bereich.....	439
9.2.6	Linearphasige Hochpässe, Bandpässe und Bandsperrn.....	440
9.3	Die Realisierung eines Digitalfilters.....	460
9.3.1	Gegenüberstellung FIR-Filter - IIR-Filter.....	460
9.3.2	Schema zur Filterentwicklung.....	461
10	Einige weiterführende Ausblicke	463
10.1	Systeme mit mehreren Abtastraten.....	463
10.1.1	Einführung	463
10.1.2	Dezimation.....	464
10.1.3	Interpolation.....	465
10.1.4	Rationale Änderung der Abtastfrequenz	467
10.1.5	Polyphasenfilter	468
10.2	Analytische Signale und Hilbert-Transformation.....	472
10.2.1	Die reelle Abtastung von Bandpass-Signalen	472
10.2.2	Die Hilbert-Transformation.....	475
10.3	Adaptive Filter.....	483
10.3.1	Einführung	483
10.3.2	Die drei grundsätzlichen Anwendungsformen	483
10.3.2.1	Direkte Systemmodellierung.....	483
10.3.2.2	Inverse Systemmodellierung	484
10.3.2.3	Prädiktion	485
10.3.3	Einige Anwendungen.....	485
10.3.3.1	Echounterdrückung (echo canceller).....	485
10.3.3.2	Rauschunterdrückung (noise canceller, line enhancer).....	487
10.3.3.3	Unterdrückung schmalbandiger Störsignale (beat canceller) ..	488
10.3.3.4	Dekorrelator (noise whitener)	488
10.3.3.5	Kanalentzerrer (equalizer).....	488
10.3.4	Algorithmen zur Koeffizienteneinstellung.....	489
10.4	Parametrische Spektralanalyse	490
10.4.1	Einführung	490
10.4.2	Klassische Spektralschätzung	490
10.4.3	Moderne Spektralschätzung	491
10.4.4	Anwendungsbeispiel: Sprachkompression mit dem LPC-Verfahren	492
	Hinweise zur Weiterarbeit.....	495
	Anhang: MATLAB	497
A.1	Einführung.....	497
A.2	Darstellung der analogen und digitalen Systeme in MATLAB	498
A.2.1	Direktstruktur (Polynomquotienten)	498
A.2.2	Kaskadenstruktur (Pol-Nullstellen-Verstärkungs - Darstellung).....	499
A.2.3	Biquadkaskade	500
A.2.4	Parallelstruktur (Partialbruchdarstellung)	500
A.2.5	Zustandsraumdarstellung	500

A.3	MATLAB-Befehle.....	501
A.3.1	Umwandlung der Systemdarstellungen.....	501
A.3.2	Digitale Simulation analoger Systeme	501
A.3.3	Analyse von Systemen	502
A.3.4	Analoge Filter.....	502
A.3.5	IIR-Filter	503
A.3.6	FIR-Filter.....	503
A.3.7	Spektralanalyse	503
A.3.8	Spezielle Funktionen	503
A.3.9	Statistische Signalanalyse.....	504
A.4	Beispiel-Programme	504
A.4.1	Analyse von analogen Systemen.....	504
A.4.2	Analyse von digitalen Systemen	507
A.4.3	Gruppenlaufzeit analoger Systeme.....	510
	Literaturverzeichnis.....	511
	Verzeichnis der Formelzeichen	515
	Verzeichnis der Abkürzungen.....	517
	Sachwortverzeichnis.....	519