

# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b>	<b>V</b>
<b>1 Signale und Systeme</b>	<b>1</b>
1.1 Einführung	1
1.2 Signale und ihre Klassifizierung	1
1.2.1 Zeitkontinuierliche und zeitdiskrete Signale	1
1.2.2 Analoge und digitale Signale	3
1.2.3 Reellwertige und komplexwertige Signale	4
1.2.4 Deterministische Signale und Zufallssignale	5
1.2.5 Gerade und ungerade Signale	7
1.2.6 Periodische und aperiodische Signale	9
1.2.7 Energie- und Leistungssignale	12
1.3 Grundlegende zeitkontinuierliche Signale	14
1.3.1 Der Einheitssprung	14
1.3.2 Die Einheitsimpulsfunktion	15
1.3.3 Komplexwertige harmonische Schwingung	21
1.3.4 Reellwertige harmonische Schwingung	22
1.4 Grundlegende zeitdiskrete Signale	24
1.4.1 Einheitssprunghenfolge	24
1.4.2 Einheitsimpulsfolge	24
1.4.3 Komplexe Exponentialfolge	26
1.4.4 Gleichmäßige Abtastung als Ursache der Mehrdeutigkeit	30
1.4.5 Beispiel: Ton-Aliasing	32
1.5 Systeme und deren Klassifizierung	36
<b>2 Lineare zeitinvariante Systeme</b>	<b>39</b>
2.1 Einführung	39
2.2 Berechnung der Antwort der LTI-Systeme mit dem Faltungsintegral	39
2.2.1 Praktische Erläuterung des Faltungsintegrals	41
2.2.2 Eigenschaften des Faltungsintegrals	47
2.2.3 Sprungantwort der LTI-Systeme	47
2.2.4 Kausale LTI-Systeme	49
2.3 Zeitkontinuierliche Systeme beschrieben durch Differentialgleichungen	50
2.3.1 Homogene und partikuläre Lösung	52
2.3.2 Linearität und alternative Zerlegung der Lösung	55
2.3.3 Beispiel: Lösung der Differentialgleichung für das Feder-Masse-System	55
2.3.4 Beispiel: Simulation des Feder-Masse-Systems mit dem Euler-Verfahren	60

2.4	Zustandsmodelle für zeitkontinuierliche Systeme .....	63
2.4.1	Antwort kontinuierlicher LTI-Systeme ausgehend vom Zustandsmodell .....	67
2.4.2	Beispiel: Zustandsmodell eines Gleichstrommotors .....	69
2.4.3	Beispiel: Zustandsmodell eines Tiefpassfilters vierter Ordnung ....	72
2.4.4	Beispiel: Zustandsmodell eines Feder-Masse-Systems mit Zwischenvariable .....	77
2.5	Die Laplace-Transformation .....	80
2.5.1	Definition der Laplace-Transformation .....	80
2.5.2	Laplace-Transformation der ordentlichen Differentialgleichungen .	83
2.5.3	Eigenschaften der Laplace-Transformation .....	84
2.5.4	Inverse Laplace-Transformation über Partialbruchzerlegung .....	85
2.5.5	Zusammenfassung von Übertragungsfunktionen .....	88
2.5.6	Beispiel: Erschütterung eines Hochhauses .....	91
2.5.7	Beispiel: Modell eines Ofens .....	99
2.5.8	Beispiel: Simulink-Modell eines Regelungssystems .....	100
2.5.9	Beispiel: Wärmediffusion entlang eines Stabes .....	103
2.6	Antwort zeitdiskreter LTI-Systeme über die Faltungssumme .....	108
2.7	Zeitdiskrete Systeme beschrieben durch Differenzgleichungen .....	110
2.7.1	Lineare Differenzgleichung mit konstanten Koeffizienten .....	111
2.7.2	Homogene Lösung der Differenzgleichung .....	114
2.8	Zustandsmodelle für zeitdiskrete Systeme .....	118
2.9	Beispiele von Systemen beschrieben durch Differenzgleichungen .....	119
2.9.1	Untersuchung eines zeitdiskreten IIR-Filters .....	119
2.9.2	Untersuchung eines FIR-Filters .....	122
<b>3</b>	<b>Zeitkontinuierliche Signale und Systeme im Frequenzbereich</b> .....	<b>127</b>
3.1	Einführung .....	127
3.2	Darstellung der periodischen Signale mit Hilfe der Fourier-Reihe .....	127
3.3	Amplituden- und Phasenspektrum .....	130
3.3.1	Leistung eines periodischen Signals .....	134
3.4	Annäherung der Fourier-Reihe mit Hilfe der DFT .....	135
3.4.1	Der Leckeffekt ( <i>Leakage</i> ) beim Einsatz der DFT .....	143
3.4.2	Beispiel: DFT-Spektrum eines Signals mit mehreren Schwingungen .....	151
3.4.3	Beispiel: Spektrum eines künstlich erzeugten EKG-Signals .....	157
3.4.4	Beispiel: DFT-Untersuchung eines rechteckigen Signals .....	160
3.4.5	Beispiel: Bestimmung des analytischen Ausdrucks eines Signals über die Fourier-Reihe .....	167

3.5	Die Fourier-Transformation zeitkontinuierlicher Signale .....	170
3.5.1	Fourier-Spektrum .....	171
3.5.2	Konvergenz der Fourier-Transformation .....	173
3.6	DFT-Annäherung der Fourier-Transformation zeitkontinuierlicher Signale .....	174
3.6.1	Beispiel: Annäherung der Fourier-Transformation eines Pulses ....	178
3.6.2	Beispiel: Annäherung der Fourier-Transformation eines dreieckigen Pulses .....	180
3.6.3	Der Effekt der Nullerweiterung .....	183
3.6.4	Beispiel: Spektrum eines Ausschnittes einer Cosinusfunktion und die DFT-Annäherung .....	187
3.6.5	Beispiel: Spektrum des Gaußpulses und seine DFT-Annäherung ..	194
3.7	Frequenzgang zeitkontinuierlicher LTI-Systeme .....	199
3.8	Frequenzgang der LTI-Systeme ausgehend von ihren Differentialgleichungen .....	203
3.8.1	Beispiel: Frequenzgang eines Feder-Masse-Systems .....	210
3.8.2	Beispiel: Feder-Masse-System mit Bewegungsanregung .....	217
3.8.3	Beispiel: Piezo-Beschleunigungssensor .....	221
3.8.4	Beispiel: Modalanalyse eines Hochhauses .....	225
3.8.5	Beispiel: Mehrfach besetzte Welle .....	231
3.8.6	Beispiel: Feder-Masse-System mit Tilger .....	239
3.8.7	Beispiel: Synchronisation von Schwingungssystemen .....	245
3.9	Filterfunktionen .....	252
3.9.1	Bandbreite der realen Filter .....	255
3.9.2	Verzerrungen der Analogfilter .....	260
3.9.3	Übertragungsfunktionen elektrischer Schaltungen.....	265
<b>4</b>	<b>Zeitdiskrete Signale und Systeme im Frequenzbereich</b>	<b>269</b>
4.1	Einführung .....	269
4.1.1	Abtastung als Produkt mit periodischen Delta-Impulsen .....	269
4.1.2	Spektrum eines abgetasteten Signals .....	270
4.1.3	Beispiel: Frequenzspektrum der Pulsamplitudenmodulation.....	277
4.1.4	Beispiel: Spektrum des Signals am Ausgang eines D/A-Wandlers .....	281
4.2	Eigenschaften der DTFT .....	286
4.2.1	Beispiel für eine DTFT .....	288
4.2.2	Konvergenzbedingungen .....	290
4.2.3	Beispiel: Entwurf eines zeitdiskreten TP-Filters.....	291
4.2.4	Typische DTFT-Transformationspaare .....	296
4.2.5	Beispiel: Zeitskalierung .....	300
4.2.6	Beispiele: Frequenzverschiebungen.....	303
4.3	Frequenzgang der zeitdiskreten LTI-Systeme .....	310
4.3.1	Die z-Transformation der Differenzgleichungen.....	312
4.3.2	Frequenzgang für LTI-Systeme beschrieben durch Differenzgleichungen.....	313
4.3.3	Zeitdiskrete Simulation zeitkontinuierlicher LTI-Systeme .....	319
4.3.4	Verschaltung von zeitdiskreten LTI-Systemen .....	323

4.3.5	Kanonische Strukturen von zeitdiskreten LTI-Systemen .....	325
4.4	Digitale Filter .....	328
4.4.1	FIR-Filter .....	328
4.4.2	IIR-Filter .....	333
4.5	Die Verbindung zwischen der DTFT und der DFT .....	340
4.5.1	Aliasing im Zeitbereich wegen der Abtastung der DTFT .....	348
4.5.2	Faltung über die DFT .....	353
4.5.3	Beispiel: Identifikation einer Einheitspulsantwort über die DFT des Eingangs und des Ausgangs .....	356
<b>5</b>	<b>Zufallsprozesse</b> .....	<b>359</b>
5.1	Definition eines Zufallsprozesses .....	359
5.2	Statistik der Zufallsprozesse .....	362
5.2.1	Wahrscheinlichkeitsfunktionen .....	362
5.2.2	Statistische Mittelwerte .....	364
5.3	Stationäre Zufallsprozesse .....	366
5.3.1	Stationär im strengen Sinn .....	367
5.3.2	Stationär im weiteren Sinn .....	367
5.3.3	Ergodische Prozesse .....	368
5.3.4	Beispiel: Stationärer und ergodischer Prozess .....	369
5.3.5	Beispiele: Nichtstationäre Zufallsprozesse .....	373
5.3.6	Beispiel: Gauß-Zufallsprozess .....	376
5.4	Zufallsprozesse im Frequenzbereich .....	379
5.4.1	Autokorrelationsfunktion .....	379
5.4.2	Spektrale Leistungsdichte .....	383
5.4.3	Spektrale Kreuzleistungsdichte .....	389
5.4.4	Weißes Rauschen .....	394
5.4.5	Schmalbandiger Zufallsprozess .....	398
5.5	Zufallssignale in LTI-Systemen .....	400
5.5.1	Beispiel: Feder-Masse-System mit zufälliger Anregung .....	405
5.6	Direkte Schätzung der spektralen Leistungsdichte .....	411
5.6.1	Beispiel: Ermittlung der spektralen Leistungsdichte über Bandpassfilter .....	414
5.6.2	Beispiel: Spektrale Leistungsdichten über die Autokorrelation ermitteln .....	421
5.6.3	Beispiel: Spektrale Leistungsdichten direkt über die DFT ermittelt .....	427
5.6.4	Die Welch-Methode zur Schätzung der spektralen Leistungsdichte .....	428
5.6.5	Beispiel: Untersuchung der spektralen Leistungsdichte mit <i>Spectrum Scope</i> .....	432
5.6.6	Beispiel: Identifikation eines Systems über die spektrale Kreuzleistungsdichte .....	438
5.6.7	Beispiel: Identifikation eines Feder-Masse-Systems über die spektrale Kreuzleistungsdichte .....	441

---

5.7	Parametrische Methoden zur Schätzung der spektralen Leistungsdichte .....	448
5.7.1	Das Autokorrelationsverfahren zur Schätzung der AR-Modelle ...	450
5.7.2	Beispiel: Identifikation von AR-Modellen aus den Signalen eines zeitkontinuierlichen Systems .....	452
5.7.3	Beispiel: Identifikation von AR-Modellen mit der MATLAB-Funktion <b>levinson</b> .....	455
5.7.4	Beispiel: Spektrale Leistungsdichte sinusförmiger Signale in weißem Rauschen .....	460
5.7.5	Beispiel: Spektrale Leistungsdichte des Quantisierungsfehlers eines A/D-Wandlers .....	465
5.7.6	Beispiel: Widerstandsrauschen in einer RC-Schaltung .....	472
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>477</b>
	<b>Index</b>	<b>481</b>