



Das
Bachelor - Lehrbuch

Signale & Systeme

Tilo Ehlen

1. Auflage

Hannemann Verlag



ISBN: 978-3-920088-64-8

Hannemann Verlag

www.haverlag.de

Vorwort

Signale in elektrischen Schaltungen wie auch in biologischen Systemen sind die Träger jeglicher Art von analoger oder digitalisierter Information. Dies betrifft Audiosignale in Mikrofonen, Verstärkern oder Lautsprechern ebenso wie Videosignale in CCD-Kameras, Fernsehern oder Monitoren, Funksignale vom Satelliten, Steuersignale auf der USB-Schnittstelle oder Bussignale zwischen Speicher und Prozessor. Signalsender, Übertragungstrecke und Empfänger bilden ein System, in dem die Signale bewusst oder unbewusst vermischt, gestört, verändert, korrigiert und detektiert werden. Das vorliegende Buch vermittelt Techniken und Methoden, welche die Interaktion von Signalen und Systemen beschreiben. Ausgehend von linearen Systemen, wie sie durch analoge Netzwerke von Widerständen, Kondensatoren, Induktivitäten, Verstärkern, Antennen oder Verbindungsleitungen gebildet werden, erstreckt sich die Thematik bis hin zur Nachbildung und Korrektur der analogen Welt in digitalen Filtern, realisierbar in Mikrocontrollern, Signalprozessoren oder FPGAs.

Im ersten Teil des Buches werden die Grundlagen der linearen Systemtheorie vorgestellt, die es ermöglichen, die Zeitverläufe von Strom- und Spannungssignalen in den Schaltungen bei beliebiger deterministischer Anregung zu bestimmen. Anwendung finden dabei Methoden wie Faltung, Fourier- und Laplace-Transformation oder die Anfangs-Endwertmethode. Die folgenden Grundlagen der Digitalen Signalverarbeitung mit FFT und z-Transformation erlauben die Nachbildung der analogen zeitkontinuierlichen Schaltungen im Rechner samt Abtastung und Analog-Digital-Wandlung. Der erste Teil schließt mit der Behandlung von Zufallssignalen in linearen Schaltungen und Netzwerken, gefolgt von Sende- und Empfangsstrukturen mit analogen und digitalen Übertragungsverfahren.

Übungsaufgaben, die in Kapitel 10 aufgeführt sind, beinhalten zu einem großen Teil Simulationen mit Matlab/Simulink und Octave. Der ausführbare Code ist hierbei vollständig angegeben und basiert auf der Matlab-Version 2009 und Octave 4.0.0.

Das Buch entstand im Rahmen der Vorlesungen „Signale und Systeme“ und Übertragungstechnik, die von mir seit 2002 an der Fachhochschule Gelsenkirchen und der Westfälischen Hochschule gehalten werden. Ich danke dabei insbesondere meinen Studenten, Mitarbeitern und Kollegen für die Korrektur- und Verbesserungsvorschläge.

Gelsenkirchen, 01.10 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	7
2	Darstellung von Signalen	13
2.1	Signalmerkmale.....	13
2.2	Elementarsignale.....	15
2.3	Deltafunktion = Diracstoß = Nadelimpuls = Impulsfunktion	20
3	Systeme	22
3.1	Differentialgleichung	22
3.2	Sprungantwort und AE-Methode.....	26
3.3	Lineare Überlagerung – LTI-Systeme	31
3.4	Systemeigenschaften.....	34
3.5	Stoßantwort	36
3.6	Faltung – Reaktion auf beliebige Signale.....	39
3.7	Faltungsalgebra	42
3.8	Stoßantwort – zeitdiskret.....	44
4	Systeme im Frequenzbereich	47
4.1	Fouriertransformation.....	47
4.1.1	Zeigerdarstellung Zeitbereich.....	50
4.1.2	Einseitige spektrale Darstellung auf Frequenz-Achse	56
4.1.3	Einführung negativer Frequenzen	57
4.1.4	Differentialgleichung und Eigenfunktionen	60
4.2	Periodische Signale	66
4.2.1	Fourierkoeffizienten.....	66
4.2.2	Rechenbeispiel Rechteckimpulsfolge.....	70
4.2.3	Komplexe Fourier-Reihe.....	73
4.3	Systemreaktion auf periodische Signale.....	75
4.3.1	Beispiel: Sägezahnsignal am Eingang eines RC-Tiefpasses	76
4.4	Nicht periodische Erregung.....	83
4.4.1	Bandbreite-Pulsbreite-Produkt.....	86
4.4.2	Zusammenhänge – Faltung - Transformation	87
4.4.3	Transformation von Kosinus- und Sinusfunktionen.....	92
4.4.4	Energiesatz – Parseval Theorem.....	93
4.4.5	Dirac-Stoßfolge.....	93
4.4.6	Sprungfunktion	95
4.4.7	Multiplikation im Frequenzbereich	96
4.4.8	Messung von Systemen	96
4.4.9	Allgemeine Eigenschaften.....	100
4.4.10	Laplace Transformation.....	101
4.4.11	allgemeine Struktur von Übertragungsfunktionen	112
4.4.12	Pol-Nullstellen-Darstellung (PN)	114
4.4.13	Stabilitätsbedingung im Laplace-Bereich	116
4.4.14	Reaktanz-Zweipole und -Vierpole.....	118
4.4.15	Übertragungsfunktion von OP-Schaltungen	119
4.4.16	Bode-Diagramm	129
4.4.17	Synthese von Übertragungsfunktionen.....	131
4.4.18	Allpass.....	134

5	Zeitdiskrete Signale und Systeme	136
5.1	Digitalisierte Analogsignale.....	136
5.2	Abtastung im Zeitbereich	138
5.2.1	Rückgewinnung des Ursprungsignals	141
5.2.2	Aliasing-Fehler.....	143
5.3	Abtastung im Frequenzbereich.....	145
5.4	Diskrete Faltung.....	147
5.5	z-Transformation.....	153
5.6	Digitales FIR-Filter Finite Impuls Filter	155
5.7	IIR-Filter Infinite Impuls Response	158
5.8	Pol-Nullstellen-Diagramm.....	161
5.9	Diskrete Approximation kontinuierlicher Systeme.....	168
5.9.3	Approximation für kleine Frequenzen.....	168
5.9.4	Bilineare Transformation.....	169
5.9.5	Impuls+Sprung-Invarianz-Methode	170
5.9.6	Weitere Verfahren zur digitalen Filtersynthese	175
5.10	FFT und Diskrete Fouriertransformation DFT	176
5.11	Varianten der zeitdiskreten Signalverarbeitung	180
5.12	Fensterung.....	182
6	Analoge Tiefpass- und Bandpasssysteme	185
6.1	Das ideale verzerrungsfreie System	185
6.2	Korrekturfilter $K(f)$	186
6.3	Tiefpass-Signal.....	187
6.3.3	Sprungantwort des idealen Tiefpasses.....	187
6.4	Bandpass-Signale	189
6.4.3	Mischung.....	196
6.4.4	Lineare Verzerrungen	197
6.4.5	Typische Übertragungstrecke	200
6.4.6	Frequenz-Multiplex.....	201
6.5	Modulation	202
6.5.1	Amplitudenmodulation.	203
6.5.2	Amplitudendemodulation - inkohärent.....	204
6.5.3	Amplitudendemodulation – kohärent	206
6.5.4	Einseitenband – AM	206
6.5.5	Hilbert-Transformation bei kausalen Zeitsignalen.....	208
6.5.6	Hilbert-Transformator als lineares Filter	209
6.5.7	ESB-Quadraturmischer mit Hilberttransformator	210
6.5.8	Restseitenband – AM.....	214
6.5.9	Phasen- und Frequenzmodulation - nichtlineare Modulation.....	216
6.5.10	FM-Spektren.....	219
6.5.11	FM-Empfänger.....	221
7	Korrelation von Energiesignalen	226
7.1	Energiesignale und Leistungssignale	226
7.2	Normierte Korrelationsfunktion.....	226
7.3	Kreuzkorrelation und Autokorrelation	228
7.4	Energiedichtespektrum im LTI-System	230
7.5	Anwendungsbeispiele der Kreuzkorrelation	231
7.6	Korrelation von zeitdiskreten Energiesignalen.....	233

8	Statistische Signalbeschreibung	238
8.1	Zufallereignisse.....	238
8.2	Verteilungsdichtefunktion und Verteilungsfunktion	242
8.3	Erwartungswert, Mittelwert und Streuung	247
8.4	Zufallsprozess und Zufallssignale	249
8.5	Leistungssignale – Zufallssignale bei ergodischen Prozessen	253
8.5.1	Beispiel: Analyse eines zeitdiskreten Leistungssignals.....	254
8.6	Zufallssignale bei Durchgang durch LTI-System	255
8.7	Weißes Rauschen	260
8.7.1	Autokovarianzfunktion c_{ss} und weißes zeitdiskretes Rauschen.....	262
8.7.2	Kreuzkovarianz und Systemidentifikation mit weißer Folge	264
8.7.3	AKF und Leistungsdichtespektrum zweiwertiger Signalfolgen.....	267
8.8	Quantisierungsrauschen	273
8.9	Zweidimensionale Gaußverteilung.....	277
9	Sender- und Empfangssysteme.....	280
9.1	Korrelationsempfänger.....	280
9.2	ASK-Übertragung	286
9.3	BPSK-Übertragung	287
9.4	FSK und MSK Übertragung	287
9.5	Übertragung mit orthogonalen Signalen	289
9.6	Pulsamplituden Modulation PAM	292
9.7	Optimales Empfangsfilter für Tiefpass- und Bandpasssignale.....	293
9.8	Bitfehlerrate bei unipolarer Übertragung	296
9.9	Bitfehlerrate bei bipolarer Übertragung	300
9.10	Bitfehlerrate bei Übertragung zweier orthogonaler Signale	302
9.11	Inkohärenter und kohärenter Empfänger.....	303
9.12	Mehrpegelübertragung	309
9.13	ISI-Intersymbolinterferenz.....	310
9.14	Nyquistflanke und \cos^2 -Filter	313
9.15	Quadraturmodulator und -demodulator	316
9.16	Wertdiskrete QAM.....	318
9.17	Mehrwertige PSK.....	320
9.18	FSK und MSK mit Quadraturmodulator	322
9.19	Kanalkapazität	325
10	Übungen.....	329
11	Literatur:	376
12	Index.....	378