

**Informationstechnik**

**U. Zölzer**

**Digitale Audiosignalverarbeitung**

# Informationstechnik

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Norbert Fliege, Hamburg-Harburg

In der Informationstechnik wurden in den letzten Jahrzehnten klassische Bereiche wie lineare Systeme, Nachrichtenübertragung oder analoge Signalverarbeitung ständig weiterentwickelt. Hinzu kam eine Vielzahl neuer Anwendungsbereiche wie etwa digitale Kommunikation, digitale Signalverarbeitung oder Sprach- und Bildverarbeitung. Zu dieser Entwicklung haben insbesondere die steigende Komplexität der integrierten Halbleiterschaltungen und die Fortschritte in der Computertechnik beigetragen. Die heutige Informationstechnik ist durch hochkomplexe digitale Realisierungen gekennzeichnet.

In der Buchreihe „Informationstechnik“ soll der internationale Stand der Methoden und Prinzipien der modernen Informationstechnik festgehalten, algorithmisch aufgearbeitet und einer breiten Schicht von Ingenieuren, Physikern und Informatikern in Universität und Industrie zugänglich gemacht werden. Unter Berücksichtigung der aktuellen Themen der Informationstechnik will die Buchreihe auch die neuesten und damit zukünftigen Entwicklungen auf diesem Gebiet reflektieren.

# **Digitale Audiosignal- verarbeitung**

Von Dr.-Ing. habil. Udo Zölzer  
Technische Universität Hamburg-Harburg

2., durchgesehene Auflage  
Mit 277 Bildern



**B. G. Teubner Stuttgart 1997**

Die Deutsche Bibliothek – CIP-Einheitsaufnahme

**Zölzer, Udo:**

Digitale Audiosignalverarbeitung / von Udo Zölzer.

2., durchg. Aufl. – Stuttgart : Teubner, 1997

(Informationstechnik)

ISBN 978-3-322-96770-1

ISBN 978-3-322-96769-5 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-96769-5

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt besonders für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© B. G. Teubner Stuttgart 1997

Softcover reprint of the hardcover 2nd edition 1997

# Vorwort

Die digitale Audiosignalverarbeitung wird zur Aufnahme und Speicherung von Musik- und Sprachsignalen, zur Tonmischung und Produktion digitaler Tonträger, zur digitalen Übertragung zum Rundfunkempfänger und in Consumergeräten wie CD, DAT und PC eingesetzt. Hierbei befindet sich das Audiosignal direkt nach dem Mikrofon bis hin zur Lautsprecherbox in digitaler Form, so daß eine Echtzeit-Verarbeitung mit schnellen digitalen Signalprozessoren durchgeführt werden kann.

Das vorliegende Buch ist Grundlage einer Vorlesung *Digitale Audiosignalverarbeitung*, die ich seit 1992 an der Technischen Universität Hamburg-Harburg für höhere Semester halte. Es wendet sich an Studenten der Ingenieurwissenschaften, Informatik und Physik, aber auch an den Praktiker in der Industrie, der sich mit Aufgaben der Audiosignalverarbeitung in den Bereichen Studioteknik, Consumer-Elektronik und Multimedia beschäftigt. Es werden die mathematischen und systemtheoretischen Grundlagen der digitalen Audiosignalverarbeitung behandelt und die typischen Anwendungen im Hinblick auf Realisierungsaspekte diskutiert. Vorausgesetzt werden Kenntnisse in der Systemtheorie, der digitalen Signalverarbeitung und der Multiraten-Signalverarbeitung.

Das Buch gliedert sich in einen ersten Teil (Kapitel 1 bis 4), in dem die Grundlagen für Hardware-Systeme zur digitalen Audiosignalverarbeitung dargestellt werden, und in einen zweiten Teil (Kapitel 5 bis 9), in dem Signalverarbeitungsalgorithmen für digitale Audiosignale diskutiert werden. In Kapitel 1 wird der Weg eines Audiosignals von der Aufnahme im Tonstudio bis hin zur Wiedergabe im Heimbereich beschrieben. Das Kapitel 2 beinhaltet eine Darstellung der Signalquantisierung, Dither-Techniken und Spektralformung von Quantisierungsfehlern zur Reduktion der nichtlinearen Effekte der Signalquantisierung. Abschließend wird eine Gegenüberstellung von Festkomma- und Gleitkomma-Zahlendarstellung und deren Auswirkung auf Formatkonversionen und Algorithmen vorgenommen. Kapitel 3 beschreibt die Verfahren zur AD/DA-Umsetzung von Signalen. Ausgehend von der Nyquist-Abtastung werden überabtastende und Delta-Sigma Verfahren vorgestellt. Die schaltungstechnische Realisierung von AD/DA-Umsetzern schließt dieses Kapitel ab. In Kapitel 4 werden nach einer Einführung in digitale Signalprozessoren und digitale Audio-Schnittstellen einfache Hardware-Systeme, basierend auf Einprozessor- und Mehrprozessor-Systemen, beschrieben. Die in den folgenden Kapiteln 5 bis 9 vorgestellten Algorithmen sind auf den im Kapitel 4 dargestellten Audio-Verarbeitungssystemen zum großen Teil in Echtzeit implementiert worden. In Kapitel 5 werden Klangbewertungsfilter beschrieben. Neben der Realisierung von rekursiven Audio-Filtern werden linearphasige nichtrekursive Filter auf der Grundlage der schnellen Faltung und von Filterbänken vorgestellt.

Im Bereich der rekursiven Filter werden Filterentwürfe, parametrische Filterstrukturen und Maßnahmen zur Reduktion von Quantisierungseffekten ausführlich dargestellt. Kapitel 6 beschäftigt sich mit der Raumsimulation. Es werden Verfahren zur Simulation von künstlichen Raumimpulsantworten und die Approximation von gemessenen Raumimpulsantworten erläutert. In Kapitel 7 wird die Dynamikbeeinflussung von Audiosignalen beschrieben. Diese Verfahren werden in allen Bereichen der Audiokette vom Mikrofon bis zum Lautsprecher zur Anpassung an die Systemdynamik eingesetzt. Kapitel 8 beinhaltet eine Darstellung von Verfahren zur synchronen und asynchronen Abtastratenumsetzung. Hierzu werden recheneffiziente Algorithmen beschrieben, die sowohl zur Echtzeit-Verarbeitung als auch zur Offline-Verarbeitung geeignet sind. Die verlustlose und verlustbehaftete Datenkompression von digitalen Audiosignalen wird in Kapitel 9 erläutert. Während die verlustlose Datenkompression in den Bereichen der Archivierung und der Speicherung höherer Wortbreiten Anwendung findet, ist die verlustbehaftete Datenkompression in den Bereichen der Übertragungstechnik von großer Bedeutung.

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Herren Prof. Fliege und Prof. Kammerer für die Unterstützung und Förderung meiner Aktivitäten bedanken. Desweiteren danke ich den Mitarbeitern des Arbeitsbereiches Nachrichtentechnik der Technischen Universität Hamburg-Harburg und insbesondere den Herren Dr.-Ing. habil. A. Mertins, Dr.-Ing. T. Boltze, Dr.-Ing. M. Schönle, Dr.-Ing. M. Schusdziarra, Dipl.-Ing. W. Eckel, Dipl.-Ing. G. Dickmann, Frau Dipl.-Ing. T. Karp, Dipl.-Ing. B. Redmer, Dipl.-Ing. T. Scholz, Dipl.-Ing. R. Wolf, Dipl.-Ing. J. Wohlert, Dipl.-Inf. H. Zölzer, Frau B. Erdmann, Frau U. Seifert und Herrn D. Gödecke für ihre freundliche Unterstützung. Darüberhinaus gilt mein Dank allen Studenten, die im Verlauf der letzten Jahre an Teilaspekten erfolgreich mitgearbeitet haben. Herrn Dr. J. Schlembach vom Teubner-Verlag danke ich für die kooperative Zusammenarbeit.

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Elke und meiner Tochter Franziska.

Hamburg, im Dezember 1995

Udo Zölzer

## Vorwort zur zweiten Auflage

Die positive Resonanz auf das Buch *Digitale Audiosignalverarbeitung* und die interessanten Hinweise aus dem Kreis der Leserschaft zeigen eine erfreuliche Aufnahme des dargestellten Forschungs- und Entwicklungsgebietes. Die hier vorgelegte zweite Auflage beinhaltet die Beseitigung einiger Schreibfehler und didaktischer Unzulänglichkeiten. Desweiteren wurde eine Ergänzung des Literaturverzeichnisses vorgenommen. Mein Dank für konstruktive Kritik und Diskussionen gilt den Professoren K.D. Kammeyer, U. Heute und N. Fliege. Herrn Dr. J. Schlembach vom Teubner-Verlag danke ich für die gute Zusammenarbeit.

Hamburg, im April 1997

Udo Zölzer

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Studiotechnik . . . . .	1
1.2	Digitale Übertragungsverfahren . . . . .	4
1.3	Speichermedien . . . . .	13
1.4	Audio-Komponenten im Heimbereich . . . . .	16
<b>2</b>	<b>Quantisierung</b>	<b>21</b>
2.1	Signalquantisierung . . . . .	21
2.1.1	Klassisches Quantisierungsmodell . . . . .	21
2.1.2	Quantisierungstheorem . . . . .	25
2.1.3	Statistik des Quantisierungsfehlers . . . . .	31
2.2	Dither-Techniken . . . . .	38
2.2.1	Prinzip . . . . .	38
2.2.2	Realisierung . . . . .	42
2.2.3	Beispiele . . . . .	43
2.3	Spektralformung von Quantisierungsfehlern . . . . .	47
2.4	Zahlendarstellung . . . . .	52
2.4.1	Festkomma-Zahlendarstellung . . . . .	52
2.4.2	Gleitkomma-Zahlendarstellung . . . . .	57
2.4.3	Auswirkungen auf Formatkonversion und Algorithmen . . . . .	61
<b>3</b>	<b>AD/DA-Umsetzung</b>	<b>65</b>
3.1	Verfahren . . . . .	66
3.1.1	Nyquist-Abtastung . . . . .	66
3.1.2	Überabtastungsverfahren . . . . .	68
3.1.3	Delta-Sigma Verfahren . . . . .	71
3.2	AD-Umsetzer . . . . .	84
3.2.1	AD-Kenngrößen . . . . .	84
3.2.2	Parallel-Umsetzer . . . . .	88
3.2.3	Sukzessive Approximation . . . . .	89
3.2.4	Zählverfahren . . . . .	90



3.2.5	Delta-Sigma AD-Umsetzer . . . . .	92
3.3	DA-Umsetzer . . . . .	94
3.3.1	DA-Kenngrößen . . . . .	94
3.3.2	Geschaltete Spannungs- und Stromquellen . . . . .	97
3.3.3	Gewichtete Widerstände und Kapazitäten . . . . .	98
3.3.4	R-2R-Widerstandsnetzwerke . . . . .	100
3.3.5	Delta-Sigma DA-Umsetzer . . . . .	100
<b>4</b>	<b>Audio-Verarbeitungssysteme</b>	<b>103</b>
4.1	Digitale Signalprozessoren . . . . .	103
4.1.1	Festkomma-Signalprozessoren . . . . .	105
4.1.2	Gleitkomma-Signalprozessoren . . . . .	108
4.1.3	Entwicklungswerkzeuge . . . . .	110
4.2	Digitale Audio-Schnittstellen . . . . .	112
4.2.1	Zweikanalige AES/EBU-Schnittstelle . . . . .	112
4.2.2	Mehrkanal-Schnittstelle (MADI) . . . . .	116
4.3	Einprozessor-Systeme . . . . .	119
4.3.1	Peripherie . . . . .	119
4.3.2	Steuerung . . . . .	120
4.4	Mehrprozessor-Systeme . . . . .	121
4.4.1	Kopplung über serielle Verbindungen . . . . .	121
4.4.2	Kopplung über parallele Verbindungen . . . . .	122
4.4.3	Kopplung über Standard-Bussysteme . . . . .	123
4.4.4	Skalierbares Audio-Verarbeitungssystem . . . . .	124
<b>5</b>	<b>Klangbewertungsfilter</b>	<b>127</b>
5.1	Rekursive Audio-Filter . . . . .	127
5.1.1	Entwurf rekursiver Audio-Filter . . . . .	127
5.1.2	Parametrische Filterstrukturen . . . . .	138
5.1.3	Quantisierungseffekte bei rekursiven Filtern . . . . .	148
5.2	Nichtrekursive Audio-Filter . . . . .	171
5.2.1	Schnelle Faltung . . . . .	171
5.2.2	Schnelle Faltung langer Folgen . . . . .	176
5.2.3	Filterentwurf mit Frequenzabtastung . . . . .	182
5.3	Multikomplementär-Filterbank . . . . .	184
5.3.1	Prinzip . . . . .	184
5.3.2	Beispiel: 8-Band Multikomplementär-Filterbank . . . . .	191
<b>6</b>	<b>Raumsimulation</b>	<b>199</b>
6.1	Erste Reflexionen . . . . .	203
6.1.1	Untersuchungen von Ando . . . . .	203
6.1.2	Gerzon-Algorithmus . . . . .	203
6.2	Diffuser Nachhall . . . . .	209
6.2.1	Schroeder-Algorithmus . . . . .	209

6.2.2	Verallgemeinerte Rückkopplungsstrukturen . . . . .	219
6.3	Approximation von Raumimpulsantworten . . . . .	223
<b>7</b>	<b>Dynamikbeeinflussung</b>	<b>227</b>
7.1	Statische Kennlinie . . . . .	228
7.2	Dynamische Eigenschaften . . . . .	231
7.2.1	Pegelmessung . . . . .	231
7.2.2	Glättung des Steuerwertes . . . . .	232
7.2.3	Zeitkonstantenbildung . . . . .	233
7.3	Dynamik-Realisierung . . . . .	234
7.3.1	Limitier . . . . .	234
7.3.2	Compressor, Expander, Noisegate . . . . .	234
7.3.3	Kombinationssystem . . . . .	235
7.4	Realisierungsaspekte . . . . .	238
7.4.1	Abtastratenreduktion . . . . .	238
7.4.2	Kennlinienapproximation . . . . .	239
7.4.3	Stereo-Verarbeitung . . . . .	240
<b>8</b>	<b>Abtastratenumsetzung</b>	<b>241</b>
8.1	Synchrone Umsetzung . . . . .	241
8.2	Asynchrone Umsetzung . . . . .	246
8.2.1	Einstufige Verfahren . . . . .	248
8.2.2	Mehrstufige Verfahren . . . . .	252
8.2.3	Steuerung der Interpolationsfilter . . . . .	255
8.3	Interpolationsverfahren . . . . .	258
8.3.1	Polynom-Interpolation . . . . .	258
8.3.2	Lagrange-Interpolation . . . . .	261
8.3.3	Spline-Interpolation . . . . .	263
<b>9</b>	<b>Datenkompression</b>	<b>271</b>
9.1	Verlustlose Datenkompression . . . . .	271
9.2	Verlustbehaftete Datenkompression . . . . .	273
9.3	Psychoakustische Grundlagen . . . . .	275
9.3.1	Frequenzgruppe und absolute Hörschwelle . . . . .	275
9.3.2	Ausnutzung der Maskierung . . . . .	277
9.4	ISO-MPEG1 Audio-Codierung . . . . .	283
9.4.1	Filterbänke . . . . .	283
9.4.2	Psychoakustische Modelle . . . . .	285
9.4.3	Dynamische Bitzuweisung und Codierung . . . . .	288
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>291</b>
	<b>Sachverzeichnis</b>	<b>301</b>