

Daniel Ch. von Grünigen

Digitale Signalverarbeitung

mit einer Einführung in die
kontinuierlichen Signale und Systeme



5., neu bearbeitete Auflage



HANSER



Blieben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Daniel Ch. von Grünigen

Digitale Signalverarbeitung

mit einer Einführung in die
kontinuierlichen Signale und Systeme

5., neu bearbeitete Auflage

Mit 249 Bildern, 125 Beispielen, 82 Aufgaben



Fachbuchverlag Leipzig
im Carl Hanser Verlag

Autor:

Prof. Dr. sc. techn. ETH Daniel Ch. von Grünigen
Bernere Fachhochschule, Hochschule für Technik und Informatik Burgdorf



Alle in diesem Buch enthaltenen Programme, Verfahren und elektronischen Schaltungen wurden nach bestem Wissen erstellt und mit Sorgfalt getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund ist das im vorliegenden Buch enthaltene Programm-Material mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieses Programm-Materials oder Teilen davon entsteht.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-446-44079-1

E-Book-ISBN: 978-3-446-43991-7

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2014 Carl Hanser Verlag München

Internet: <http://www.hanser-fachbuch.de>

Lektorat: Franziska Jacob, M.A., Mirja Werner, M.A.

Herstellung: Dipl.-Ing. (FH) Franziska Kaufmann

Satz: Daniel Ch. von Grünigen

Produktion der DSV-Programme: Ivo Oesch (dipl. El. Ing. FH)

Coverconcept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Coverrealisierung: Stephan Rönigk

Druck und Bindung: Pustet, Regensburg

Printed in Germany

**»Der Weltuntergang steht bevor,
aber nicht so, wie Sie denken.
Dieser Krieg jagt nicht alles in die Luft,
sondern schaltet alles ab.«**



Tom DeMarco
Als auf der Welt das Licht ausging

ca. 560 Seiten. Hardcover
ca. € 19,99 [D] / € 20,60 [A] / sFr 28,90
ISBN 978-3-446-43960-3
Erscheint im November 2014

**Hier klicken zur
Leseprobe**

Sie möchten mehr über Tom DeMarco und seine Bücher erfahren.
Einfach reinklicken unter www.hanser-fachbuch.de/special/demarco

Vorwort

Die *digitale Signalverarbeitung* (DSV), d. h. das Verarbeiten von Signalen mittels digitaler Rechner, hat in den letzten dreißig Jahren einen ungeheuren Aufschwung erlebt. Der Grund dafür liegt bei den leistungsfähigen und preiswerten Computern, die seit den Achtzigerjahren zur Verfügung stehen sowie in der fundierten Theorie, die Forscherinnen und Forscher in den letzten Jahrzehnten erarbeitet haben, und schließlich in den attraktiven Anwendungen, die je länger je mehr Eingang in unseren Alltag finden. Die digitale Signalverarbeitung wird sich in den Bereichen Software, Technologie, Theorie und Anwendungen rasch weiterentwickeln, so dass es für jeden Ingenieur, Physiker und Informatiker lohnenswert ist, sich in den Grundlagen dieses Fachgebiets auszukennen.

Die digitale Signalverarbeitung ist eine vorwiegend mathematisch orientierte Disziplin und es bereitet deshalb vielen Studenten und Praktikern Mühe, den Einstieg zu finden. Um den Zugang zu erleichtern, verzichte ich unter Angabe von Literaturstellen auf viele Herleitungen und lege das Gewicht auf die Interpretation und Illustration der Resultate. Andererseits ist es mir ein Anliegen, die Ergebnisse mathematisch korrekt und in Übereinstimmung mit der maßgebenden Fachliteratur zu präsentieren. Zudem lege ich Wert auf die Verwendung der Matrizenrechnung, weil ich glaube, dass sie zukünftig für die DSV unentbehrlich ist. Beispiele für die Verwendung der Matrizenrechnung sind MATLAB[®] und LabVIEW, zwei weit verbreitete Programm-Systeme, welche digitale Signale in Form von Zeilen- oder Spaltenmatrizen verarbeiten.

Mein Grundlagenbuch richtet sich an Studierende, Ingenieure, Physiker und Informatiker, die sich für die DSV interessieren oder Probleme aus diesem Aufgabenkreis zu lösen haben. Bezüglich der Mathematik werden Kenntnisse vorausgesetzt, wie sie an Technischen Universitäten, Hoch- und Fachhochschulen in den ersten vier Semestern gelehrt werden. Ich möchte aber auch Leser und Leserinnen ohne tiefe Mathematikkenntnisse motivieren, in das zukunftssträchtige Gebiet der digitalen Signalverarbeitung einzusteigen, und bemühe mich daher, den Stoff so anschaulich wie möglich zu präsentieren. Dennoch darf nicht verschwiegen werden, dass die Mathematik für ein gründliches Verstehen unerlässlich ist und vom Studierenden deshalb die Bereitschaft vorausgesetzt wird, sich mit anspruchsvollem, aber faszinierendem Stoff auseinanderzusetzen.

Das Buch gliedert sich in acht Kapitel: In einer Einführung werden die praktischen Aspekte der DSV aufgezeigt. Im darauf folgenden Kapitel werden kontinuierliche Signale und Systeme im Zeit- und Bildbereich beschrieben. Der Übergang vom kontinuierlichen zum diskreten Signal und umgekehrt wird im anschließenden Kapitel erläutert. Danach folgt eine Behandlung von diskreten Signalen und Systemen, die u. a. die z -Transformation beinhaltet. Das fünfte Kapitel führt in die Theorie der stochastischen Signale ein und zeigt, wie Korrelationsfunktionen geschätzt werden. In den drei letzten Kapiteln werden die klassischen Anwendungen der DSV präsentiert: die diskrete Fourier-Transformation, die Digitalfilter und die digitalen Signalgeneratoren.

Das Buch will mehrere Zwecke erfüllen:

- Es soll ein Lehrbuch für die Grundlagen der angewandten digitalen Signalverarbeitung sein. Deshalb gibt es zu jedem Kapitel Übungen, deren Lösungen sich auf der Website <http://labs.hti.bfh.ch/dsv> befinden. Zum vollständigen Lösen der Aufgaben wird die Studenten- oder Vollversion von MATLAB 6.1 oder höher inklusive der Signal Processing Toolbox¹ vorausgesetzt. Zum Studium des Buches ist das Software-Paket jedoch nicht erforderlich.
- Es soll in der Praxis als Handbuch bei DSV-Aufgabenstellungen dienen. Es enthält unter anderem Richtlinien zum Entwurf von Bandbegrenzung- und Digitalfiltern, Anwendungsmöglichkeiten für Korrelationen, praktische Hinweise zur Durchführung von Fourier-Transformationen sowie Realisierungsvorschläge für Signalgeneratoren.
- Es soll als Nachschlagebuch für grundlegende Begriffe aus der digitalen Signalverarbeitung behilflich sein. Zu diesem Zweck ist ein umfangreiches Verzeichnis von deutschen *und* englischen Stichworten beigefügt.
- Es soll ein Einsteigerbuch sein für Studierende, die sich eine solide Grundausbildung in der digitalen Signalverarbeitung aneignen wollen, um sich später Spezialgebieten der DSV zuzuwenden. Ich denke dabei an die Sprach- und Bildverarbeitung, die adaptiven Filter, die digitale Kommunikation, die digitale Regelungstechnik, etc.
- Es soll als Manual zu einem DSV-Praktikum einsetzbar sein. Im Anhang sind MATLAB-Programme beschrieben, mit denen man Digitalfilter und Signalgeneratoren entwerfen, simulieren und über die Soundkarte realisieren kann. In der Programmsammlung findet sich zudem das MATLAB unabhängige PC-Programm `spsound`, das mittels der Soundkarte die Echtzeitrealisierung von digitalen Filtern und Signalgeneratoren erlaubt.

¹<http://www.mathworks.com>

Die meisten Simulationen und Berechnungen wurden mit MATLAB durchgeführt. Diese Software ist für die digitale Signalverarbeitung sehr geeignet, da sie Aufgabenstellungen aus dem Bereich der numerischen Mathematik zuverlässig und schnell löst und ausserdem eine Signal-Processing-Toolbox zur Bearbeitung von DSV-Aufgaben enthält. Mithilfe sogenannter M-Files kann der Anwender massgeschneiderte Programme mit MATLAB-Befehlen schreiben, falls er eigene Simulationen und Berechnungen durchführen will. M-Files und weitere Software, welche für das vorliegende Lehrbuch erstellt wurden, sind unter der Internet-Adresse <http://labs.hti.bfh.ch/dsv> verfügbar.

An der Entstehung dieses Lehrbuchs haben einige Personen mitgewirkt. Allen voran Herr Ivo A. Oesch, dipl. El.Ing. FH, der den Simulator und das PC-Programm `spsound` entworfen und programmiert hat. Die Mehrzahl der Zeichnungen wurden von Herrn D. Hadorn erstellt und von der ehemaligen Gesellschaft für Fachpublikationen des Hochschulstandorts Burgdorf gesponsert. Mitgearbeitet haben auch Studentinnen und Studenten in Form von Projektarbeiten, die von Ivo A. Oesch hervorragend betreut wurden. Ihnen allen möchte ich danken. Ein herzliches Dankeschön geht auch an den Hanser Verlag für die gute Zusammenarbeit.

Burgdorf, im Februar 2014
Daniel Ch. von Grünigen

Bemerkungen zur 5. Auflage

Das Buch in der 5. Auflage ist eine erweiterte und vollständig überarbeitete Version der 4. Auflage. Neu ist – neben vielen Beispielen und Aufgaben – das Kapitel 3 ‘Signalabtastung und Signalrekonstruktion’, das vorher in eingeschränkter Form in Kapitel 2 integriert war. Verzichtet wurde dagegen auf den Codegenerator für den DSP-Starterkit TMS320VC5510-DSK von Texas-Instruments. An seiner Stelle wurde zur Realisierung von digitalen Filtern und Signalgeneratoren das PC-Programm `spsound` entwickelt. Dieses Programm erlaubt die Eingabe von Digitalfiltern, die Darstellung ihres Amplitudengangs, die Generierung und die Filterung von Signalen, die Berechnung ihrer Spektren und die Ausgabe via Soundkarte. Das Programm ist lauffähig unter Windows XP und Windows 7 und kann von der URL <http://labs.hti.bfh.ch/dsv> heruntergeladen werden.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
1 Einführung	1
1.1 Grundlagen	1
1.2 Der Signalprozessor als Digitalrechner	5
1.3 Anwendungsbeispiele	7
1.3.1 Korrelation	8
1.3.2 Diskrete Fourier-Transformation	9
1.3.3 Digitale Filterung	11
1.3.4 Signalerzeugung	12
1.4 Vor- und Nachteile der DSV	14
1.4.1 Vorteile der digitalen Signalverarbeitung	14
1.4.2 Nachteile der digitalen Signalverarbeitung	15
2 Kontinuierliche Signale und Systeme	17
2.1 Charakterisierung von Signalen	17
2.1.1 Elementarsignale	17
2.1.2 Kontinuierliche und diskrete Signale	21
2.1.3 Deterministische und stochastische Signale	21
2.1.4 Periodische, kausale, gerade und ungerade Signale	22
2.1.5 Reelle und komplexe Signale	24
2.1.6 Energie- und Leistungssignale	26
2.1.7 Orthogonale Signale	28
2.2 Fourier-Reihe und Fourier-Transformation	29
2.2.1 Fourier-Reihe	29

2.2.2	Fourier-Transformation	33
2.2.3	Eigenschaften der Fourier-Transformation	40
2.3	Faltung und Korrelation von Signalen	51
2.3.1	Faltung von Signalen	51
2.3.2	Korrelation von Signalen	55
2.4	Die Laplace-Transformation	57
2.4.1	Definition und Beispiele	57
2.4.2	Vergleich der Laplace- mit der Fourier-Transformation	60
2.5	Kontinuierliche Systeme	65
2.5.1	Grundlagen	65
2.5.2	Impulsantwort und Faltung	66
2.5.3	Frequenzgang und Übertragungsfunktion	69
2.5.4	Differentialgleichung und Übertragungsfunktion	80
2.5.5	Bandbreite und Zeitspezifikationen	86
	Aufgaben	88
3	Signalabtastung und Rekonstruktion	93
3.1	Abtastung	93
3.2	Signalrekonstruktion	97
3.2.1	Ideale Rekonstruktion und Abtasttheorem	97
3.2.2	Signalrekonstruktion mittels Halteglied	101
3.2.3	Rekonstruktion mittels linearer Interpolation	103
3.3	Antialiasing- und Glättungsfilter	105
3.3.1	Antialiasingfilter	105
3.3.2	Glättungsfilter	107
	Aufgaben	108
4	Zeitdiskrete Signale und Systeme	111
4.1	Zeitdiskrete Signale	111
4.1.1	Grundlagen	111
4.1.2	Zeitdiskrete Elementarsignale	113
4.1.3	Periodische und kausale diskrete Signale	114
4.1.4	Diskrete Energie- und Leistungssignale	115
4.2	Lineare zeitinvariante diskrete Systeme	120

4.2.1	Grundlagen	120
4.2.2	Impulsantwort	121
4.2.3	Diskrete Faltung	122
4.3	Die z-Transformation	125
4.3.1	Von der Fourier- zur z-Transformation	125
4.3.2	Eigenschaften der z-Transformation	128
4.3.3	Frequenzgang und Übertragungsfunktion	130
4.4	Nichtrekursive und rekursive Systeme	135
4.4.1	Differenzgleichung	135
4.4.2	Übertragungsfunktion	140
	Aufgaben	143
5	Zeitdiskrete stochastische Signale	147
5.1	Die Zufallsvariable	147
5.2	Erwartungswerte	151
5.3	Stochastische Signale	156
5.3.1	Mittelwert und Korrelation stochastischer Signale	158
5.3.2	Stationäre und ergodische Signale	159
5.4	Leistungsdichtespektrum und Filterung	164
5.4.1	Leistungsdichtespektrum	164
5.4.2	Filterung stochastischer Signale	166
5.5	Schätzung von Erwartungswerten	169
5.5.1	Eigenschaften von Schätzfunktionen	169
5.5.2	Schätzung des Mittelwerts und der Korrelationsfunktion	171
	Aufgaben	177
6	Diskrete Fourier-Transformation	181
6.1	Einführung	181
6.1.1	Motivation	181
6.1.2	Definition	182
6.2	Interpretationen und Eigenschaften der DFT	183
6.2.1	Matrix-Interpretation der DFT	183
6.2.2	Die DFT-Koeffizienten als Korrelationen	185
6.2.3	Graphische Interpretation	186

6.2.4	Eigenschaften der DFT	187
6.3	Die DFT als Approximation	188
6.3.1	Die DFT als Approximation der Fourier- Transformierten	189
6.3.2	Die DFT als Approximation der Fourier-Reihe	190
6.3.3	Die DFT als Approximation der DTFT	191
6.4	Die Berechnung der DFT mittels der FFT	192
6.5	Der Goertzel-Algorithmus	196
6.5.1	Herleitung	197
6.5.2	Der Goertzel-Algorithmus als dezimierendes Bandpassfilter	199
6.6	Fensterung	202
6.6.1	Die DFT periodischer Signale	202
6.6.2	Mathematische Interpretation der Fensterung	204
6.6.3	Fensterung und spektrale Auflösung	205
6.6.4	Fensterfunktionen	206
6.7	Die praktische Durchführung der DFT	212
6.7.1	Die Wahl der Abtastfrequenz	212
6.7.2	Die Wahl der Anzahl Abtastwerte	213
6.7.3	Beispiele	215
6.7.4	Fazit	222
	Aufgaben	222
7	Digitalfilter	227
7.1	Einführung	227
7.1.1	Echtzeitsystem zur digitalen Filterung	227
7.1.2	Filterfunktionen	228
7.1.3	Das Digitalfilter als LTI-System	231
7.2	Eigenschaften und Strukturen digitaler Filter	234
7.2.1	Eigenschaften und Strukturen von FIR-Filtern	234
7.2.2	Eigenschaften und Strukturen von IIR-Filtern	240
7.3	Entwurf digitaler Filter	247
7.3.1	Einführung	247
7.3.2	Entwurf von FIR-Filtern	250
7.3.3	Entwurf von IIR-Filtern	254

7.4	Nichtideale Effekte bei Digitalfiltern	258
7.4.1	Zahlendarstellungen	258
7.4.2	Quantisierung bei der Analog-Digital-Wandlung	262
7.4.3	Quantisierung der Filterkoeffizienten	266
7.4.4	Überlauf und Quantisierung von Zwischen- ergebnissen	269
7.4.5	Skalierung zur Verhinderung von Überläufen	272
7.4.6	Quantisierungsrauschen	276
7.4.7	Zusammenfassung	281
7.5	Realisierung digitaler Filter	283
7.5.1	Vorgehen zur Realisierung eines Digitalfilters	283
7.5.2	Anwendungsbeispiel	287
	Aufgaben	291
8	Signalgeneratoren	301
8.1	Einfache Signalgeneratoren	301
8.1.1	Sägezahngenerator	302
8.1.2	Rechteckgenerator	304
8.1.3	Dreieckgenerator	306
8.2	Direkte digitale Synthese	308
8.3	Polynomapproximation	310
8.4	Impulsantwort-Generatoren	316
8.4.1	Das stabile Digitalfilter als Signalgenerator	316
8.4.2	Das instabile Digitalfilter als Sinusoszillator	317
8.4.3	Kombinierter Sinus-Cosinus-Oszillator	319
8.5	Rauschgeneratoren	321
8.5.1	Rauschgenerator mit gleichverteilten Abtastwerten	321
8.5.2	Rauschgenerator mit gaussverteilten Abtastwerten	322
8.5.3	Generator für farbiges Rauschen	323
	Aufgaben	324
A	Begleitdateien und Programme zum Buch	327
A.1	Begleitdateien und Installation	327
A.2	Das MATLAB-Programm <code>spfilt</code>	329
A.3	Der MATLAB-Simulator <code>simdsp</code>	333