

Peter Gerdson • Gesammelte Werke



Band 2

Mensch und Wissenschaft

Wandel in der Nachrichtentechnik
[1994]

Digitale Signalverarbeitung
in der Nachrichtenübertragung –
Elemente, Bausteine, Systeme
und ihre Algorithmen
[1997]

herausgegeben und eingeleitet
von
Hamid Reza Yousefi

gefördert durch
Peter-Gerdsen-Stiftung

Traugott Bautz
Nordhausen 2016

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation
in Der Deutschen Nationalbibliographie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet
über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Verlag Traugott Bautz GmbH
99734 Nordhausen 2016
Alle Rechte vorbehalten

Dieses 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 insbesondere
für Vervielfältigung, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung
und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Printed in Germany
ISBN 978-3-95948-060-4
www.bautz.de

Inhalt

Worum geht es in diesem Band?	7
[1994] Wandel in der Nachrichtentechnik.....	9
[1997] Digitale Signalverarbeitung in der Nachrichtenübertragung - Elemente, Bausteine, Systeme und ihre Algorithmen.....	19
Vorwort zur zweiten Auflage.....	19
Vorwort zur ersten Auflage.....	20
Einleitung	23
1. Grundlagen der DSV	27
1. 1. Zahlenfolgen.....	28
1. 2. Diskrete Fourier-Transformation (DFT): Analyse von Zahlenfolgen	42
1. 3. Digitale Filter: Filterung von Zahlenfolgen	56
1. 4. Veränderung der Abtastfrequenz.....	65
2. Algorithmen der DSV	73
2. 1. Struktur und Beschreibung algorithmischer Systeme	73
2. 2. Algorithmische Elemente: Mathematische Operationen.....	80
2. 3. Algorithmische Bausteine	93
2. 4. Algorithmische Teilsysteme.....	179
2. 5. Algorithmische Systeme in der analogen Übertragungstechnik.....	210
2. 6. Algorithmische Systeme in der digitalen Übertragungstechnik.....	245
2. 7. Algorithmische Systeme in der Meßtechnik.....	269
3. Realisierung der DSV	297
3. 1. Analoge und digitale Signalverarbeitung.....	297
3. 2. Echtzeit- und Stapelverarbeitung	298

Inhalt

3. 3. Wortlängeneffekte	300
3. 4. Wortlänge der Wandler	301
3. 5. Wortlänge im Rechenwerk	301
4. Entwicklungsmethodik in der DSV	307
4. 1. Entwicklungsphasen	307
4. 2. Simulation in der Entwurfsphase.....	310
4. 3. Implementierung	317
5. PC-Übungen mit MATLAB/SIMULINK und DSV_SIM.....	321
5. 1. Übung A: Matlab/Simulink	323
5. 2. Übung B: Filter	335
5. 3. Übung C: Mischung und Abtastung von Bandpaßsignalen	347
5. 4. Übung D: Modulation	353
5. 6. Übung F: Nichtlineare Kennlinie und Schwingungserzeugung.....	367
6. Anhang.....	377
6. 1. Fourier-Transformation	377
6. 2. Z-Transformation	381
6. 3. Hilbert -Transformation.....	384
6. 4. Abtasttheorem für Zeitfunktionen.....	386
6. 5. Einführung in MATLAB	388
6. 6. Einführung in SIMULINK	398
6. 7. Einführung in DSV_SIM	418
6. 8. Programme und Dateien auf der Diskette.....	433
6. 9. Lösungen zu den Übungsaufgaben	454

Worum geht es in diesem Band?

Band 1:

Der erste Band umfasst die erste Sektion der Gesamtausgabe von Peter Gerdson mit folgenden Schriften: 13 natur- und ingenieurwissenschaftliche Abhandlungen aus den Jahren 1966-1979 sowie die Monographie ›Hochfrequenzmesstechnik – Messgeräte und Messverfahren‹ aus dem Jahr 1982. Charakteristisch für diese Periode ist, dass die Aufsätze 1966-1970 aus der Industriezeit Gerdsons, die praktische Anwendungen aus der Farbfernsehtechnik behandeln, während der Lehrtätigkeit 1971-1982 eine theoretische Vertiefung für das wissenschaftliche Fundament der studentischen Ausbildung erfahren. Die Hochfrequenzmesstechnik, die als konstitutives Element der Natur- und Ingenieurwissenschaften eine verbindende Bedeutung für Gerdsons Schriften hat, dokumentiert unter dem Paradigma der analogen Nachrichtentechnik eine Kulmination seines Wirkens.

Band 2:

Der vorliegende zweite Band beschreibt einen vertiefenden Weg des Denkens von Peter Gerdson. In den 1980er Jahren vollzieht sich ein allmählicher Paradigmenwechsel von der analogen zur digitalen Nachrichtentechnik, welche die Gebiete der Signalübertragung und -verarbeitung umfasst. Dabei tritt an die Stelle der Signaldarstellung durch eine kontinuierliche Spannungszeitfunktion eine solche durch eine Zahlenfolge.

Die Signalverarbeitung wird nicht mehr mit einer Schaltung aus elektrischen und elektronischen Bauelementen durchgeführt, sondern mit einem Zahlenfolgen verarbeitenden Rechenwerk, welches durch einen Signalprozessor realisiert wird. Damit entsteht die Aufgabe, klassische Schaltungen der analogen Signalverarbeitung in Algorithmen für Signalprozessoren umzusetzen. Die neue digitale Nachrichtentechnik ist der analogen hinsichtlich der Präzision weit überlegen.

Diese veränderte Situation erforderte ein radikales Umdenken sowohl bei den Ingenieuren in der Praxis als auch bei den Studenten. Eingeleitet wird

der vorliegende Band der Gesamtausgabe von Peter Gerdson durch den Aufsatz ›Wandel in der Nachrichtentechnik‹, der in der ›Nachrichtentechnischen Zeitschrift NTZ – Fachmagazin für Telekommunikation und Informationstechnik‹ im November 1997 erschien. Der Aufsatz stellt die Grundzüge des Paradigmenwechsels dar, um diesen in der nachrichtentechnischen Öffentlichkeit zur Diskussion zu stellen.

Mit der anschließenden Monographie ›Digitale Signalverarbeitung in der Nachrichtenübertragung – Elemente, Bausteine, Systeme und ihre Algorithmen‹ gibt Peter Gerdson der neuen Situation insbesondere für die Ausbildung der Studenten ein sicheres Fundament. Die 1. Auflage des Buches erscheint 1993; auf Grund des großen Erfolges erfolgt 1997 eine 2. Auflage in wesentlich erweiterter Form, die Gegenstand des vorliegenden 2. Bandes der Gesamtausgabe ist. Dabei bezieht sich die Erweiterung hauptsächlich auf die Berücksichtigung von Simulationsprogrammen in der digitalen Signalverarbeitung. Damit wird einem Trend Rechnung getragen, Systeme nach ihrem Entwurf durch Simulation auf einem Computer auf ihre Eigenschaften hin zu überprüfen.

Solche Simulationsprogramme, die auch für die Schaltungen der analogen Nachrichtentechnik entwickelt wurden, sind durch die ständig steigenden Rechenleistungen der Computer möglich geworden. Die Monographie ist geprägt sowohl durch ihren Lehrbuchcharakter, der in zahlreichen Übungsaufgaben zum Ausdruck kommt, als auch von einer gründlichen Darstellung des neuen Gebietes der Nachrichtentechnik.

[1994] Wandel in der Nachrichtentechnik

Seit etwa 25 Jahren hat die Digitale Signalverarbeitung eine stürmische Entwicklung durchgemacht und sich jetzt endgültig als eine eigenständige Realisierungsalternative in der elektrischen Nachrichtentechnik etabliert. Dabei sind neue Methodiken und Betrachtungsweisen entwickelt worden, die auch die bisherige analoge Technik in einem anderen Licht erscheinen lassen. Diese neuen Aspekte, die besonders in der Buchveröffentlichung zu Tage treten, werden im Folgenden untersucht.¹

Wandel in der Entwicklungsmethodik

Aufbauend auf den Grundlagen der Elektrizitätslehre der Physik begann die elektrische Nachrichtentechnik ausgestattet mit einem relativ niedrigem technologischen Bestand an Bauelementen ihren Siegeszug vor allem durch Intuitionen und Erfindungsreichtum. Im Vordergrund des Interesses standen Systeme der Signalübertragung. Bestandteile solcher Systeme sind immer auch signalverarbeitende Systeme. Filterung, Modulation, Demodulation, Mischung und Gleichrichtung sind Beispiele zur Signalverarbeitung, die zum Kernbereich der analogen Nachrichtentechnik gehören. Durchgeführt wurde diese Signalverarbeitung von Schaltungen, die aus Widerständen, Induktivitäten, Überträgern, Kapazitäten, Dioden und Transistoren bestehen. Gefunden wurden diese Schaltungen zunächst in einer intuitiv-experimentellen Vorgehensweise. Analyse und Berechnung solcher Schaltungen waren deshalb seit jeher ein wichtiges Betätigungsfeld von Nachrichtentechnikern. Ergebnis der Analyse ist die mathematische Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Eingangs- und Ausgangssignal eines Signalverarbeitungsblocks.

Eine Abkehr von dieser klassischen Entwicklungsmethodik wurde durch die teilweise Ablösung der Analogtechnik durch digitale Signalverarbeitung eingeleitet. Bild 1 gibt einen Überblick über die Stufen des Umbruchs in der

¹ Vgl. Gerdson, Peter und Peter Kröger: *Digitale Signalverarbeitung in der Nachrichtenübertragung*, Wiesbaden 1993.

Entwicklungsmethodik. Man begann zunächst damit, die Eigenschaften analoger Schaltungen durch Digitale Verarbeitung wegen ihrer bekannten Vorteilen wie Genauigkeit, Reproduzierbarkeit und fehlenden Bauelementtoleranzen nachzubilden. Nach diesem Übergangsstadium wurde dann eine neue Sichtweise eingeführt, indem der Entwicklungsablauf umgekehrt wurde.

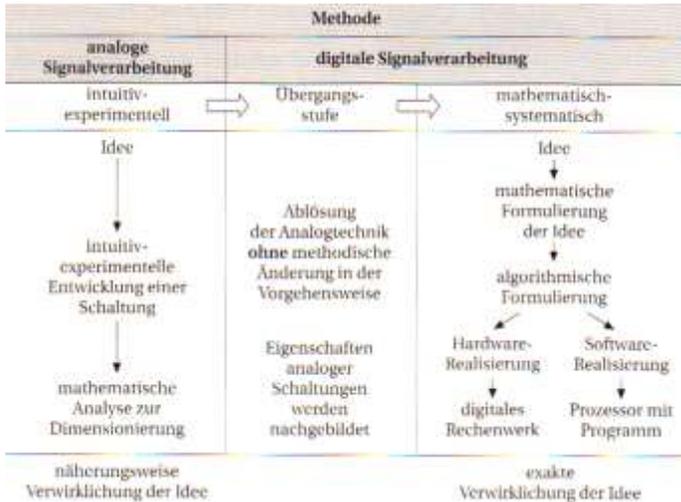


Bild 1. Veränderte Sichtweise in der Signalverarbeitung

Am Anfang steht heute eine Signalverarbeitungs-idee. Diese wird mathematisch durch Gleichungen beschrieben, die den Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsgröße eines Signalverarbeitungsblocks herstellen. Diese Gleichungen werden mit Hilfe eines Prozessors als Digitalrechner berechnet. Dazu werden die in der Symbolsprache der Mathematik formulierten Gleichungen in eine algorithmische Formulierung übersetzt, die eine Handlungsanweisung für das Rechenwerk des Prozessors darstellt. Damit ist eine neue mathematisch-systematische Entwicklungsmethodik entstanden. Dabei zeigt sich, dass viele analoge, schaltungstechnisch gelöste Signalverarbeitungen nur sehr unvollkommene Realisierungen der zugrunde liegenden mathematischen Idee sind. So lassen sich also bei der Entwicklung signalverarbeitender Systeme

1. die intuitiv-experimentelle Methode und
2. die mathematisch-systematische Methode

unterscheiden. Mit der 1. Methode begann die elektrische Nachrichtentechnik ihre stürmische Entwicklung. Die Digitale Signalverarbeitung förderte die 2. Methode zu Tage, Hierin sind Signale, Signalübertragung und Signalverarbeitung mathematische Ideen, für die die Elektrotechnik lediglich eine Darstellungs- und Realisierungsgrundlage ist. Die Unterschiede in der Methode und im Ergebnis lassen sich am besten an einem Beispiel verdeutlichen.

Beispiel: AM-Empfänger

Bild 2 zeigt die stark vereinfachten Signalverarbeitungsblöcke eines AM-Empfängers, wie er in konventioneller analoger Schaltungstechnik realisiert wird. In Superhet-Empfängerkonzepten wird das hochfrequente Eingangssignal der Antenne zunächst durch eine Mischung in einen Zwischenfrequenzbereich (ZF) verschoben, in dem mit Hilfe eines ZF-Filters die geforderte Selektivität erzielt wird. Der Vorkreis dient zur Unterdrückung der Spiegelfrequenzen. An die ZF-Stufe schließt sich die Demodulation des niederfrequenten Signal an, die im Fall der AM durch einen Spitzenwertgleichrichter realisiert wird.

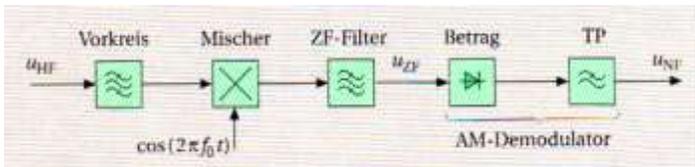


Bild 2. Konventioneller Superhet-AM-Empfänger

Der diesem konventionellen Konzept zu Grunde liegende intuitiv-experimentelle Ansatz geht von der eigentlichen Aufgabe der Demodulation aus; die vorangestellte Mischung ist hierbei lediglich ein Hilfsmittel und kann als ein in weiten Frequenzgrenzen durchstimmbarer Bandpass gesehen werden, der die geforderte Selektivität gewährleistet. Als direkt durchstimmbarer Bandpass nach einem Geradeausempfänger-Prinzip wäre er nicht realisierbar. Die Nachteile dieser Schaltungstechnik liegen in dem geforderten Aufwand für das ZF-Filter und in dem i.a. mit durchstimmbaren Vorkreis. Ferner muss die ZF-Mittenfrequenz sehr viel größer als die höchste NF-Signalfrequenz sein, damit die Demodulation in dieser einfachen Schaltungstechnik hinreichend gute Ergebnisse liefert.

Mit einem Ansatz einer mathematisch-systematischen Vorgehensweise lässt sich dagegen ein ganz anderes Konzept finden, das durch Digitale Signalverarbeitung realisiert, keine dieser Nachteile kennt. Man geht hierbei zunächst von der primären Aufgabe der spektralen Verschiebung des hochfrequenten Eingangssignals in eine niederfrequente Lage aus (Nullage). Dann ist keine ZF-Stufe notwendig und an die Frequenzverschiebung schließt sich direkt die Hüllkurven-Demodulation an. Von der Definition her ist Mischung die Verschiebung des Spektrums

$$\underline{u}_{HF}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} u_{HF}(t) e^{-j2\pi f t} dt$$

des Signals $u_{HF}(t)$. Soll dieses Spektrum auf der Frequenzachse um einen Betrag f_T der Trägerfrequenz in die Nullage verschoben werden, so ist nach dem Verschiebungssatz der Fourier-Transformation

$$\underline{u}_{HF}(f + f_T) = \int_{-\infty}^{\infty} [u_{HF}(t)e^{-j2\pi f_T t}] e^{-j2\pi f t} dt$$

das Signal $u(t)$ mit einem komplexen Signal $\exp(-j2\pi f_T t)$ zu multiplizieren. In der digitalen Signalverarbeitung wird diese mathematische Vorstellung direkt umgesetzt, indem gemäß obiger Gleichung das Signal $u_{HF}(t)$ mit einer komplexen Schwingung $\exp(-j2\pi f_T t)$ multipliziert wird. Dies erfordert eine komplexwertige Signalverarbeitung, wie in Bild 3 gezeigt.

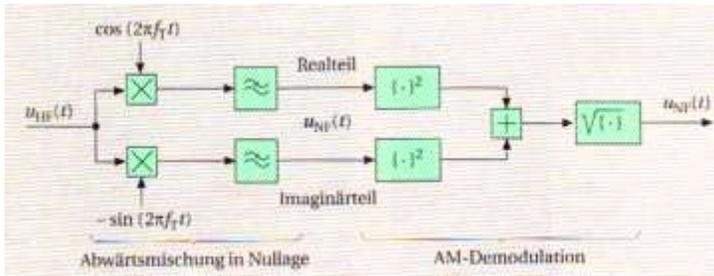


Bild 3. AM-Empfänger mit Digitaler Signalverarbeitung nach²

Ein komplexes Signal bedeutet dabei eine zweikanalige Ausführung für Real- und Imaginärteil. Am Ausgang des zweikanaligen Mischers entsteht

² Ebenda.

ein Spektrum in Nulllage $u_{NF}(t)$ (Basisbandsignal); das ist die komplexe Hüllkurve des modulierten Signals. Die Tiefpässe dienen zur Selektion, wie dies in Bild 2 das ZF-Filter bewirkt, nun allerdings in der Nulllage. Die AM-Demodulation geschieht durch Betragsbildung aus dem Real- und Imaginärteil dieses Basisbandsignals mittels Quadrieren und Wurzelkennlinie.

Man erkennt an dem Beispiel die neue, von einer schaltungstechnisch losgelöste Sichtweise. Durch den mathematisch-systematischen Ansatz ergibt sich eine andere, direktere Lösung der Empfängeraufgabe und, wenn die gezeigten Teilfunktionen in digitaler Signalverarbeitung realisiert werden, die Vorteile hinsichtlich Realisierungsaufwand und Genauigkeit. Bemerkenswert ist, dass das Spiegelfrequenzproblem nicht existent ist und dass hierbei keinerlei Einschränkungen hinsichtlich der Trägerfrequenzlage bei der Demodulation auftritt.

Signalverarbeitung in der Literatur

Bei der analogen und der digitalen Signalverarbeitung handelt es sich heute um zwei weniger miteinander konkurrierende als vielmehr einander ergänzende Realisierungsmethoden. Während die Entstehung der analogen Signalverarbeitung mittels Schaltungstechnik bis in die Anfangszeiten der elektrischen Nachrichtentechnik zurückreicht, liegt der Beginn der digitalen Signalverarbeitung etwa 25 Jahre zurück. So ist auch auf dem Gebiet der digitalen Signalverarbeitung in dieser Zeit ein umfangreiches Schrifttum entstanden. Daher soll einmal untersucht werden, wie sich die Entwicklung der beiden Gebiete überhaupt vollzogen hat und wie sich dies in der Literatur widerspiegelt, wobei nur wichtige, umfassende Buchveröffentlichungen berücksichtigt werden sollen. Gemäß Bild 4 kann man grob fünf Entwicklungslinien unterscheiden, die zeitlich nacheinander beginnen und zum Teil bis in die Gegenwart hineinreichen.

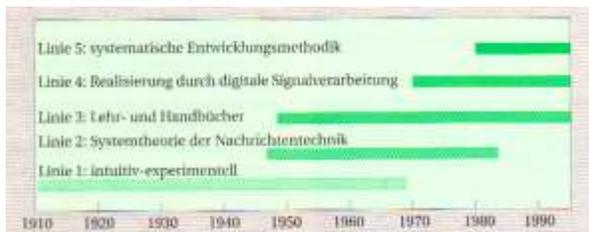


Bild 4. Entwicklungslinien der Signalverarbeitung in der Nachrichtentechnik

Linie 1: Gekennzeichnet ist diese Linie durch eine stürmische Entwicklung auf der Basis einer einfachen technologischen Grundlage angefacht durch Reichtum an Intuitionen und Ideen. Die Entwicklungsmethodik ist intuitiv-experimentell und die Denkweise sehr bauelementebezogen. Grundlage der analogen Signalverarbeitung bildeten die Elektronenröhren und die aus Spulen und Kondensatoren aufgebauten Filter. Modulation, Mischung und Gleichrichtung wurden realisiert. Ein besonders reichhaltiges Schrifttum entstand zur Theorie der Filter.³ Der Beginn dieser Linie reicht in die Anfänge der elektrischen Nachrichtentechnik zurück. Charakteristisch sind die Arbeiten z.B. von Marconi aus der Zeit vor dem 1. Weltkrieg.

Linie 2: Eingeleitet wurde diese Linie durch eine Phase der Reflexion mit der Fragestellung ›Was machen wir hier eigentlich?‹. Diese Phase führte in den beiden Veröffentlichungen: ›Küpfmüller, K.: Systemtheorie der elektrischen Nachrichtentechnik‹ und ›Shannon, C.E.: A mathematical Theory of Communication‹ zur Herausarbeitung des mathematischen Kerns der Signale und Systeme der Nachrichtentechnik. Besonderes Merkmal der Bemühungen war die Loslösung vom speziellen Inhalt der Nachricht und der speziellen Realisierung eines Systems. Die Veröffentlichung von Shannon, die danach mit dem Begriff Informationstheorie belegt wurde, zeigte grundsätzliche Grenzen der Nachrichtentechnik auf und damit den Nachrichtentechnikern, wie weit ihre Lösungen noch von dem entfernt waren, was theoretisch möglich war. Die beiden Bücher von Küpfmüller und Shannon erschienen im Jahre 1949, in deren Folge eine Reihe von Büchern erschienen, von denen stellvertretend⁴, genannt seien.

Linie 3: Gekennzeichnet wird diese Linie, die im Jahre 1944 beginnt, durch groß angelegte, das Gesamtgebiet umfassende Lehr- und Handbücher. Stellvertretend seien hier⁵, genannt.

³ Vgl. Barkhausen, Heinrich: *Lehrbuch der Elektronenröhren*, Bd. I, II, III, IV, Hirzel 1964; Cauer, Wilhelm: *Theorie der linearen Wechselstromschaltungen*, Leipzig 1942; Feldkeller, Richard: *Einführung in die Siebschaltungstheorie der elektrischen Nachrichtentechnik*, Hirzel 1950 und Feldkeller, Richard: *Einführung in die Theorie der Hochfrequenzbandfilter*, Hirzel 1960.

⁴ Vgl. Kreß, Dieter und Ralf Irmer: *Angewandte Systemtheorie - Kontinuierliche und zeitdiskrete Signalverarbeitung*, Oldenburg 1990; Marko, Hans: *Methoden der Systemtheorie. Die Spektraltransformationen und ihre Anwendungen*, Springer 1977 und Khinchin, A. I.: *Mathematical foundations of information theory*, New York 1957.

⁵ Vgl. Vilbig, Fritz: *Lehrbuch der Hochfrequenztechnik* Akademische Verlagsgesellschaft,

Linie 4: Eingeleitet wird diese Linie durch den Beginn der Entwicklung der digitalen Signalverarbeitung, die ihre Entwicklung zunächst als Stapelverarbeitung auf Großrechnern im Zeitraum 1970 - 1980 begann. Mit dem Aufkommen leistungsfähiger Signalprozessoren etablierte sich diese Art der Signalverarbeitung als eigenständige Realisierungsalternative zur analogen Signalverarbeitung. Charakteristisch für die Linie 4 ist, dass vielfach die Eigenschaften analoger Schaltungen durch digitale Realisierungen nachzubilden versucht wird; neue Betrachtungsweisen treten nicht auf. Die Buchveröffentlichungen haben ihren Schwerpunkt in der mathematischen Grundlegung und auf dem Gebiet der Filter. Stellvertretend seien genannt.⁶

Linie 5: Eingeleitet wird diese Linie auf dem Gebiet der digitalen Signalverarbeitung. Die digitale Signalverarbeitung und auch die analoge Schaltungstechnik gelangen in die Phase der systematischen Anwendung und der Konsolidierung. Dabei treten drei sehr charakteristische Merkmale zu Tage:

1. die mathematisch-systematische Entwicklungsmethodik,
2. die Hierarchiebildung aus Elementen, Bausteinen, Teilsystemen und Systemen,
3. die Zusammenstellung von Bausteinen für Standardanwendungen.

Voll zum Tragen kommen alle drei Gesichtspunkte in der Buchveröffentlichung ›Gerdsen, P.; Kröger, P.: Digitale Signalverarbeitung in der Nachrichtentechnik, Springer 1993‹. Andere Veröffentlichungen berücksichtigen Teilaspekte. Besonders hervorzuheben ist dabei das Buch ›Tietze, U.; Schenk, Ch.: Halbleiterschaltungstechnik, Springer 1969‹, das eine ausgezeichnete Zusammenstellung von Bausteinen für Standardanwendungen vorwiegend der analogen Signalverarbeitung bietet, jedoch eine Hierarchiebildung vermissen lässt. Die Merkmale 1. und 2. finden allerdings dabei keine Berücksichtigung. Beide Veröffentlichungen haben den Charakter von Arbeitsbüchern für Ingenieure, deren Aufgabe in der Realisierung, Implementierung und Umsetzung mathematischer Ideen liegt.

Leipzig 1944, 1953, 1960; Meinke, Hans Heinrich und Friedrich Wilhelm Gundlach: *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*, Springer 1962 und Zinke, Otti und Heinrich Brunswig: *Lehrbuch der Hochfrequenztechnik*, Springer 1973.

⁶ Kronmüller, Heinz: *Digitale Signalverarbeitung*, Springer 1991; Lücker, Raimund: *Grundlagen digitaler Filter*, Springer 1980; Lacroix, Arild: *Digitale Filter*, Oldenbourg 1980 und Azizi, Seyed A.: *Entwurf und Realisierung digitaler Filter*, Oldenbourg 1988.

Darstellung der Signalverarbeitung

Wie die letzte Linie der Literaturentwicklung zeigte, sollte eine moderne Darstellung der Digitalen Signalverarbeitung einer Reihe von Kriterien genügen, die im Folgenden verdeutlicht werden sollen.

Ziel der Bemühungen in der digitalen Signalverarbeitung sind die Rechenvorschriften zur Berechnung der Ausgangszahlenfolge aus der Eingangszahlenfolge. Da diese Berechnung auf einem Rechenwerk durchgeführt wird, ist die Rechenvorschrift als Folge von Handlungsanweisungen für das Rechenwerk zu formulieren. Eine solche zeitliche Aufeinanderfolge von Handlungsanweisungen wird Algorithmus genannt. Die höheren Programmiersprachen ALGOL, deren Bezeichnung sich von Algorithmic Language herleitet, und Pascal sind Sprachen zur Beschreibung von Algorithmen. Am Anfang der Systementwicklung mittels einer digitalen Signalverarbeitung steht die mathematische Formulierung der Signalverarbeitungsidee in der Symbolsprache der Mathematik (Bild 6).

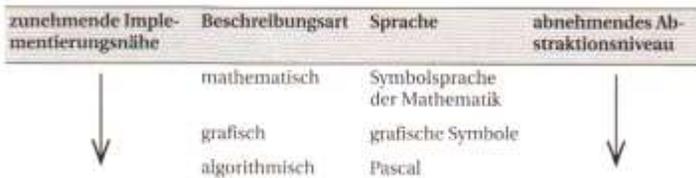


Bild 6. Beschreibungsarten eines digitalen signalverarbeitenden Systems (nach⁷)

Auf Grund der Komplexität und des Abstraktionsniveaus digitaler signalverarbeitender Systeme wird zusätzlich eine graphische Beschreibung in Form von Blockdiagrammen benutzt. Aus der mathematisch formulierten Signalverarbeitungsaufgabe leitet sich schließlich die algorithmische Beschreibung des Systems als Handlungsanweisung für das Rechenwerk ab.

Diese Vorgehensweise beim Entwurf der Systeme und die Darstellungsstufen der digitalen Signalverarbeitung ist die Grundlage der Buchveröffentlichung⁸, die sich damit besonders an Ingenieure wendet, welche mathema-

⁷ Vgl. Gerdson, Peter und Peter Kröger: *Digitale Signalverarbeitung in der Nachrichtenübertragung*, Springer 1993.

⁸ Ebenda.

tische Signalverarbeitungsideen realisieren sollen; denn die aus der mathematischen Formulierung hergeleitete algorithmische Beschreibung ist die eigentliche Implementierungsgrundlage.

Algorithmen-Baukasten

Grundlage jeder modernen Systementwicklung ist eine Modularisierung der Gesamtaufgabe in hierarchisch gegliederte Teilaufgaben. Dadurch werden umfangreiche Systeme erst überschaubar und man kann durch entsprechende Abspaltung von Standardfunktionen einen hohen Wiederverwendbarkeitswert der Teile erreichen. In der Schaltungstechnik wird diese Methode seit langem eingesetzt. Hier bilden die Schaltungselemente eine untere Hierarchiestufe, aus denen sich komplexere Bausteine, Teilsysteme und Gesamtsysteme kombinieren lassen. Bewährte Schaltungen auf den verschiedenen Hierarchiestufen, die man immer wieder verwendet, wurden mit großem Erfolg systematisch gesammelt und in speziellen Handbüchern zusammengetragen. Dadurch wurden sie einem breitem Anwenderkreis gewissermaßen als Baukasten verfügbar gemacht. Als Standardwerk ist hier zu nennen.⁹

Es ist leicht einzusehen, dass man auch bei der Digitalen Signalverarbeitung zum effektiven Entwerfen einen Lösungskatalog für Standardaufgaben benötigt. Analog zur Schaltungssymbolik in der Schaltungstechnik benutzt man hier Symbole für verschiedene mathematische Operationen und die Hardware-Implementierung entspricht hierbei der algorithmischen Darstellung für die verschiedenen Teile eines Gesamtsystems. Man erhält so einen Algorithmen-Baukasten, in dem die Algorithmen für Standardaufgaben der Digitalen Signalverarbeitung geordnet werden können und zu komplexeren System-Algorithmen kombiniert werden können. Einen derartigen Algorithmen-Lösungskatalog für das Gebiet der Nachrichtenübertragung findet man in¹⁰, dessen Baukasten in Bild 7 gezeigt ist.

⁹ Vgl. Tietze, Ulrich und Christoph Schenk: *Halbleiter-Schaltungstechnik* (1993), Wiesbaden 21969.

¹⁰ Vgl. Gerdson, Peter und Peter Kröger: *Digitale Signalverarbeitung in der Nachrichtenübertragung*, Wiesbaden 1993.

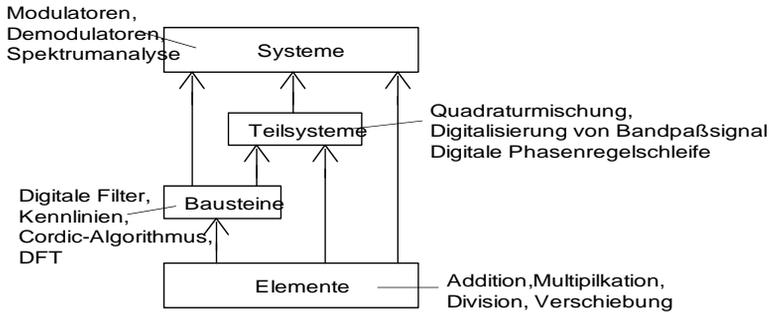


Bild 7. Systemhierarchie eines Algorithmen-Baukastens (nach¹¹)

In der untersten Ebene der Systemhierarchie findet man einfache Elemente der digitalen Signalverarbeitung; dies sind einfache mathematische Operationen wie Addition, Multiplikation, Division und die Verschiebung von Zahlenfolgen. Aus diesen Elementen lassen sich Bausteine bilden, wie z.B. die Digitalen Filter, die nichtlinearen Kennlinien, der Cordic-Algorithmus, die Schwingungserzeugung und die Diskrete Fourier-Transformation. Bausteine und Elemente können in der nächsten Hierarchiestufe zu Teilsystemen und schließlich zu Gesamtsystemen zusammengesetzt werden, für die im Bild einige Beispiele der Nachrichtenübertragung aufgeführt sind.

Die Anwendung einer mathematisch-systematischen Entwicklungsmethodik mit der algorithmischen Darstellung der Signalverarbeitung und in Verbindung mit der Hierarchiebildung aus einem Baukasten schaffen damit die Grundlagen für einen effizienten Entwurf für komplexe Systeme der Nachrichtenübertragung.

¹¹ Ebenda.

[1997] Digitale Signalverarbeitung in der Nachrichtenübertragung – Elemente, Bausteine, Systeme und ihre Algorithmen

Vorwort zur zweiten Auflage

Die Autoren freuen sich, dass die freundliche Aufnahme und der rasche Verkauf der ersten Auflage ihnen die Möglichkeit gibt, die ›Digitale Signalverarbeitung in der Nachrichtenübertragung‹ in überarbeiteter und in wesentlichen Punkten stark erweiterter Form neu herauszugeben.

Wichtiges Merkmal des Buches ist es, dass der Leser nicht nur distanziert lesend abstrakte Inhalte aufnimmt, sondern nach dem Prinzip ›learning by doing‹ dazu angehalten wird, selbst auf dem Wege der Simulation, Systeme der digitalen Signalverarbeitung zu studieren. Grundlage für die Funktionssimulation ist dabei das Programm MATLAB/SIMULINK und für die algorithmische Simulation das von uns entwickelte Programm DSV_SIM.

Dieses Merkmal wird in der zweiten Auflage durch die Aufnahme eines umfangreichen Kapitels ›PC-Übungen mit MATLAB/SIMULINK und DSV_SIM‹ weiter ausgebaut. Die Übungen, die sich auf die Gebiete Filter, Mischung, Abtastung, Modulation, Spektralmesstechnik sowie Schwingungserzeugung beziehen, geben eine praktische Anleitung zur Entwicklung von Systemen. Zu diesen Übungsaufgaben enthält der Anhang vollständige Lösungen.

Um dem Leser den Einstieg in das selbständige Arbeiten mit den Simulationsprogrammen zu erleichtern, wurden in den Anhang Einführungen in MATLAB, in SIMULINK und in DSV_SIM aufgenommen. Dabei sollen die Einführungen in die sehr umfangreichen Programme MATLAB und SIMULINK deren Handbücher natürlich nicht ersetzen. Sie können aber den Einsteiger über manche Schwierigkeit hinweghelfen. Zur Erleichterung des Einstiegs in die Übungsaufgaben wurden besondere Werkbank-Dateien erstellt, die alle Simulink-Blöcke enthalten, welche zur Lösung einer Aufgabe erforderlich sind. Diese Werkbank-Dateien befinden sich auf der Begleitdiskette zum Buch.

Außerdem enthält die beigelegte Diskette eine von uns selbst entwickelte Toolbox DsvCom. Sie besteht aus einer Reihe von Script- und Function-Files sowie einer umfangreichen Ergänzung zur Standard Simulink-Library. Man findet hier all die Bausteine und Systeme der Signalverarbeitung fertig konstruiert vor, die im Buch behandelt werden. Diese Toolbox kann auch eine wertvolle Hilfe beim selbständigen Weiterarbeiten des Lesers sein.

Ein wichtiges Merkmal des Buches ist neben der mathematischen und graphischen Beschreibung der Systeme eine algorithmische Beschreibung in Pascal-Notation. Diese beschreibt ein System processorunabhängig mit großer Implementierungsnähe und ist Grundlage für die algorithmische Simulation mit DSV_SIM. Um dem Leser im Rahmen dieses Buches auch einen Eindruck von der Assemblerprogrammierung zu geben, haben wir DSV_SIM durch einen virtuellen Prozessor ergänzt.

So hoffen wir, mit den Erweiterungen der zweiten Auflage den Wünschen der Leser der ›Digitalen Signalverarbeitung in der Nachrichtenübertragung‹ weitgehend zu entsprechen und ihnen den Einstieg in dieses interessante Gebiet noch besser und noch praxisnäher darzubringen.

Unseren Lesern möchten wir danken für die vielen, wertvollen Hinweise zur Verbesserung dieses Buches. Unser Dank gilt Herrn cand. el. Jasper Friese für das Korrekturlesen und schließlich möchten wir uns beim Springer-Verlag, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Lehnert, für die bewährte gute Zusammenarbeit bedanken.

Hamburg, im Frühjahr 1996
Peter Gerdson und Peter Kröger

Vorwort zur ersten Auflage

Signale sind physikalische Darstellungen von Nachrichten. Diese können aufgefasst werden als Informationen im Zustand der Übertragung. Signalübertragung aber ist nicht möglich ohne Signalverarbeitung. Filterung, Modulation, Demodulation, Mischung und Gleichrichtung sind Beispiele zur Signalverarbeitung, die zum Kernbereich der analogen Nachrichtentechnik gehören. Durchgeführt wird diese Signalverarbeitung von Schaltungen, die aus Widerständen, Induktivitäten, Überträgern, Kapazitäten, Dioden und Transistoren bestehen. Analyse und Berechnung solcher Schaltungen sind ein wichtiges Betätigungsfeld von Nachrichtentechnikern. Ergebnis der Analyse ist die mathematische Beschreibung des Zusammenhangs zwischen

Eingangs und Ausgangssignal. So wird ein Filter z.B. durch eine lineare Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten beschrieben.

Auf der Grundlage des Abtasttheorems für Zeitvorgänge lassen sich analoge Signale in Zahlenfolgen und diese auch wieder zurück in analoge Signale verwandeln. Dabei werden die Zahlen digital, in der Regel als Dualzahlen, dargestellt. Man spricht von der Digitalisierung eines analogen Signals. Dies wird von der Digitalen Übertragungstechnik genutzt, die der analogen Übertragungstechnik hinsichtlich Genauigkeit und Verzerrungsfreiheit in weiten Bereichen überlegen ist. Es bietet sich an, die bei der Übertragung anfallenden Verarbeitungsaufgaben nun mit den digital dargestellten Zahlenfolgen durchzuführen.

Man betritt dann das Gebiet der Digitalen Signalverarbeitung, das eine Reihe interessanter Aspekte aufweist. Während bisher Eingangs- und Ausgangssignal eines Verarbeitungssystems durch eine SCHALTUNG miteinander verknüpft waren, wird jetzt die Ausgangszahlenfolge nach einer bestimmten RECHENVORSCHRIFT aus der Eingangszahlenfolge berechnet. Die Berechnung wird in der Regel von einem nach einem PROGRAMM arbeitenden DIGITALRECHNER durchgeführt. Befindet sich dieser Digitalrechner als integrierte Schaltung in einem Baustein, so spricht man von einem MIKROPROZESSOR. Ist die Architektur dieses Prozessors speziell auf die Belange der Echtzeitverarbeitung zugeschnitten, so nennt man ihn SIGNALPROZESSOR.

So entsteht die Situation, dass an die Stelle der Schaltungen der klassischen Signalverarbeitung Rechenvorschriften bzw. Programme treten: Es wird HARDWARE durch SOFTWARE ersetzt. Viele Schaltungen erscheinen jetzt als unvollkommene Realisierungen bestimmter Rechenvorschriften. In digitaler Technik sind Signalverarbeitungen möglich geworden, für die sich keine Schaltungen finden lassen bzw. für die Schaltungen zu aufwendig sind.

Viele Bücher, die sich mit dem Thema der Digitalen Signalverarbeitung beschäftigen, haben den Titel DIGITALE FILTER und behandeln vorzugsweise die theoretischen Grundlagen und den Entwurf der Filter, ausgehend von der Z-Transformation. Filter sind jedoch nur ein Teilaspekt in der Nachrichtenübertragungstechnik. Andere Teilaufgaben der Übertragungstechnik wie Modulation, Mischung, Codierung, Schwingungserzeugung sowie Messtechnik werden heute ebenfalls durch Digitale Signalverarbeitung gelöst. Das vorliegende Buch will deshalb den Bogen weiter spannen, indem

es gezielt auf diese Teilaufgaben in der Nachrichtenübertragungstechnik eingeht.

Eine möglichst anwendungs- und praxisnahe Darstellung der Thematik wird angestrebt. Im Vordergrund sollen daher die Rechenvorschriften bzw. ALGORITHMEN stehen, die zu bestimmten Signalverarbeitungsaufgaben gehören und die der Ausgangspunkt einer Realisierung, z.B. auf einem Signalprozessor sind. Auf eine Darstellung der Algorithmen in einer prozessor-spezifischen Assemblersprache wird bewusst verzichtet, um die Thematik von vornherein nicht zu sehr auf eine spezielle Hardware-Realisierung einzuengen. Stattdessen wird eine möglichst neutrale, d.h. prozessorunabhängige Darstellung der Algorithmen in Form der höheren Programmiersprache PASCAL gewählt. Der Übergang von dieser Hochsprache in ein Signalprozessor-Assemblerprogramm ist für einen geübten Software-Entwickler dann leicht selbst zu vollziehen.

Damit ergibt sich der folgende Aufbau des Buches. Nach der Einleitung werden zunächst die Grundlagen der Digitalen Signalverarbeitung behandelt. Dabei handelt es sich um eine mathematisch-signaltheoretische Beschreibung mit den Kennzeichen eines hohen Abstraktionsniveaus und großer Implementierungsferne. Die Beantwortung der Frage nach der Realisierung erfordert eine algorithmische, aus der mathematisch-signaltheoretischen Darstellung hergeleitete Beschreibung. Sie ist Gegenstand des Hauptkapitels 3. Die abschließenden Kapitel 4 und 5 behandeln schließlich Fragen der Realisierung und des Entwurfs, d.h., den Übergang von den Algorithmen zu den Rechenwerken.

Das Buch richtet sich als Lehrbuch vornehmlich an Studenten der Nachrichtentechnik, Datentechnik und Technischen Informatik sowie an in der Praxis tätige Entwicklungsingenieure dieser Fachgebiete. Es setzt Grundlagenwissen in der Systemtheorie, speziell in der analogen und digitalen Nachrichtenübertragungstechnik voraus. Zum Verständnis der behandelten Algorithmen sollten Grundkenntnisse in der Programmiersprache PASCAL oder einer anderen Programmiersprache vorhanden sein.

Dem Buch liegt eine Diskette bei, auf der sich die behandelten Algorithmen sowie ein Simulationsprogramm als Pascal-Quelltexte befinden. Das Simulationsprogramm ist auf einem handelsüblichen PC ablauffähig, so dass der Leser die Algorithmen praktisch nachvollziehen und sie ggf. durch eigene Algorithmen ergänzen kann.

Hamburg, im Frühjahr 1993
Peter Gerdson und Peter Kröger