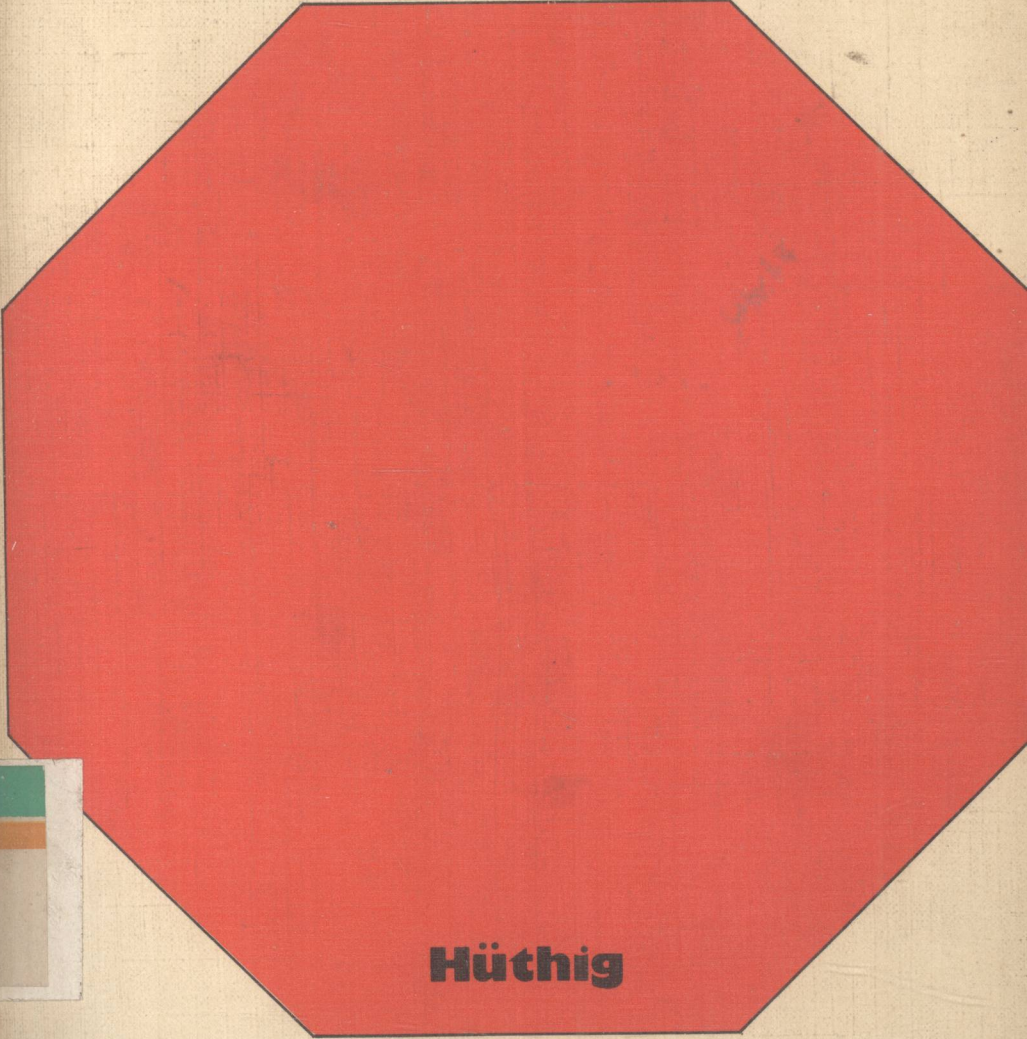


A. Lacroix · K.-H. Witte

Zeitdiskrete normierte Tiefpässe

Discrete Time Normalized Low Pass Filters



Hüthig

Praktischer Entwurf von Wellenparameterfiltern

von **Horst Rühl und Heang-Ha Nguyen**

1977, 190 S., kart., DM 26,80

ISBN 3-7785-0438-X

Mit diesem Buch werden vor allem Entwickler angesprochen, die eine Siebschaltung benötigen, ohne daß diese Aufgabe an Spezialisten delegiert werden muß. Wellenparameterfilter zu dimensionieren ist nicht einfach, besonders, da die Praxis bestimmte Dämpfungswerte in Abhängigkeit von der Frequenz fordert. Müssen zwei oder mehr M-Glieder verwendet werden, so wird die Wahl der wichtigen M-Werte immer schwieriger. Der vorliegende Katalog umgeht diese Schwierigkeiten, indem alle für einen Entwurf wesentlichen Daten in Tabellen zusammengestellt sind, wobei grundsätzlich immer zwei Entwurfsverfahren, die nach eigenem Wunsch gewählt werden können, möglich sind. Jedes ausgeführte Beispiel enthält beide Wege. Die aufgeführten Werte führen zu Siebschaltungen, die ihrer erreichbaren Dämpfungswerte wegen für die meisten praktischen Aufgaben ausreichen und im Rahmen der Wellenparametertheorie optimal und auch am wirtschaftlichsten sind.

Das Buch ist ein preisgünstiges Hilfsmittel für alle Anwender, die nicht ständig Filter berechnen müssen, außerdem ist es eine Brücke für die umfangreichen und daher teuren Tabellenwerke für vielfältige Anwendungen.

Grundlagen der Impulstechnik

von **Hermann Schunk und Werner Engel**

1979, 206 S., 185 Abb., zahlr. Beispiele, geb. DM 44,80

ISBN 3-8101-0054-4

Die Impulstechnik hat besonders in den letzten Jahren sehr an Bedeutung gewonnen, so daß grundlegende Kenntnisse der Zusammenhänge bei Impulsvorgängen und entsprechendes Wissen über den Entwurf und die Dimensionierung von Impulsschaltungen für jeden Elektrotechniker/Elektroniker von größter Bedeutung geworden sind.

Das Buch ist in einen theoretischen Teil (Bearbeiter H. Schunk) und in einen Teil, der die Schaltungstechnik (Bearbeiter W. Engel) behandelt, aufgeteilt.

In den theoretischen Abschnitten 1 – 6 werden u. a. die Darstellung von periodischen und einmaligen Vorgängen im Zeit- und Frequenzbereich sowie die Verformung von Impulsen durch passive Elemente behandelt. Außerdem wird ein kurzer theoretischer Abriß über die Pulsmodulation, die eine sehr große Bedeutung in der Nachrichtentechnik gewonnen hat, gegeben.

Dr. Alfred Hüthig Verlag · Postfach 10 28 69 · 6900 Heidelberg 1

Curt Rint (Hrsg.)

Handbuch für Hochfrequenz- und Elektro-Techniker

Das universelle Nachschlagewerk für Studium und Praxis
in völlig neuer Konzeption

Band 1

12., erg. und völlig neubearb. Aufl.
1978, XVIII, 731 S. mit 464 Abb. und
Tab., Kunststoffeinband, DM 54,80
ISBN 3-8101-0042-0

Mathematische Tafeln und Tabellen, SI-Einheiten, Schaltzeichen der Elektrotechnik und Nachrichtentechnik. Einführende Grundlagen der Mathematik für Elektrotechniker und Elektroniker. Grundlagen Elektrotechnik/Elektronik. Magnetische Werkstoffe sowie elektrische Isolierstoffe und Dielektrika. Passive Bauelemente: Widerstände, Kondensatoren, Kalt- und Heißeiter, Hallgeneratoren und Feldplatten, Relais, elektrisch-mechanische Bauelemente.

Band 2

12., erg. und völlig neubearb. Aufl.
1978, 771 S., 465 Abb., 3 Tab., Kunststoffeinband, DM 58,80
ISBN 3-8101-0043-9

Formeln und Tabellen für den Nachrichtentechniker. Mathematik: Differentialgleichungen, Laplace-Transformation, Zylinderfunktionen, Formeln der Maxwell-Theorie, Numerische Mathematik. Grundlagen: Vierpol- und Mehrorttheorie, Äquivalente Schaltungen, Systemtheorie, Digitale Filter, Modulation, Übertragungstechnik,

Elektromagnetische Schirmung, Physikalische Grundlagen für Halbleiterbauelemente, Hohlleiter, Passive Filter, Schichtschaltungen, Netzwerke.

Band 3

12., erg. und völlig neubearb. Aufl.
1979, XVIII, 731 S., 547 Abb., Kunststoffeinband, DM 59,80
ISBN 3-8101-0044-7

Symbole und Schaltzeichen • Halbleiter-Bauelemente: Dioden, Transistoren • Höchstfrequenzhalbleiter, Thyristoren, Integrierte Schaltungen, Der Mikroprozessor • Optoelektronische Halbleiterbauelemente • Fernsehen

Band 4 jetzt in 10. Neuauflage

10., erg. und völlig neubearb. Aufl.
1980, XIX, 739 S., 509 Abb. und zahlreiche Tab., Kunststoffeinband, DM 59,80
ISBN 3-7785-0620-X

Knotenanalyse • zeitkontinuierlicher Schaltungen • Theorie und Eigenschaften von Fern- und Ortsleitungen • Vakuum-Bauelemente: Grundlagen der Elektronenröhren, Laufzeitröhren, Elektronenstrahlröhren • Akustik • Schallaufzeichnung • Tonfilmtechnik • Sende- und Empfangsantennen • Radartechnik

Dr. Alfred Hüthig Verlag • Postfach 102869 • 6900 Heidelberg 1

Dr. Arild Lacroix
Dipl.-Ing. Karl-Heinz Witte

Zeitdiskrete normierte Tiefpässe
Entwurfstabellen, Taschenrechnerprogramme
Katalog der Potenz-, Tschebyscheff- und Cauer-Filter

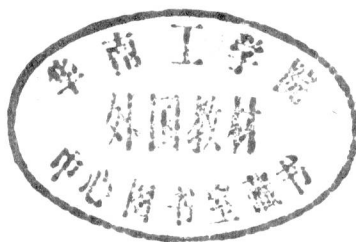
Discrete Time Normalized Low Pass Filters
Design Tables, Pocket Calculator Programs
Catalog of Butterworth, Chebyshev and Cauer Filters

TN 213
L 1472
TN 713
L 147

8061835

5

Dr. Arild Lacroix
Dipl.-Ing. Karl-Heinz Witte



Zeitdiskrete normierte Tiefpässe

Entwurfstabellen
Taschenrechnerprogramme
Katalog der Potenz-,
Tschebyscheff- und Cauer-Filter

Discrete Time Normalized Low Pass Filters

Design Tables
Pocket Calculator Programs
Catalog of Butterworth,
Chebyshev and Cauer Filters



E8051835

Dr. Alfred Hüthig Verlag Heidelberg

Arild Lacroix, Jahrgang 1943, studierte Elektrotechnik (Nachrichtentechnik) an der Technischen Hochschule Darmstadt, wo er 1971 seine Diplom-Hauptprüfung ablegte. Anschließend war er wissenschaftlicher Mitarbeiter, wissenschaftlicher Assistent und Dozent im Fachbereich Nachrichtentechnik der Technischen Hochschule Darmstadt. Promotion zum Doktor-Ingenieur 1975 mit einer Arbeit über die Anwendung digitaler Filter in der Sprachsignalverarbeitung. Seit 1977 Leiter der Forschungsgruppe Signalaufbereitung am Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik in Berlin.

Karl-Heinz Witte, Jahrgang 1948, studierte Nachrichtentechnik an der Fachhochschule der DBP in Dieburg, wo er 1971 seine Ingenieur-Abschlußprüfung ablegte, und an der Technischen Hochschule in Darmstadt, wo er 1976 sein Studium mit der Diplom-Hauptprüfung abschloß. Anschließend war er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für theoretische Elektrotechnik an der Universität Kaiserslautern auf dem Gebiet der optischen Nachrichtentechnik tätig. Seit 1978 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Übertragungstheorie an der Technischen Hochschule in Darmstadt, wo er sich mit der rechnergestützten Synthese von digitalen Filtern beschäftigt.

CIP-Kurztitelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Lacroix, Arild:

Zeitdiskrete normierte Tiefpässe : Entwurfstab., Taschenrechnerprogramme, Katalog d. Potenz-, Tschebyscheff- u. Cauer-Filter — Discrete time normalized low pass filters / Arild Lacroix; Karl-Heinz Witte. — Heidelberg : Hüthig, 1980.

ISBN 3-7785-0623-4

NE: Witte, Karl-Heinz:

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruckes, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Bei Vervielfältigungen für gewerbliche Zwecke ist gemäß § 54 UrhG eine Vergütung an den Verlag zu zahlen, deren Höhe mit dem Verlag zu vereinbaren ist.

© 1980 Dr. Alfred Hüthig Verlag GmbH Heidelberg
Printed in Germany

Vorwort

Zeitdiskrete Systeme operieren über abgetasteten Signalen. Bei amplitudenstetigen Realisierungen spricht man von Abtastfiltern, bei amplitudendiskreten Realisierungen von digitalen Filtern. Bedingt durch Fortschritte bei der Integration stets komplexerer Funktionsgruppen in digitalen Großschaltkreisen haben digitale Filter eine erhebliche Bedeutung erlangt; eine vergleichbare Aussage läßt sich auch hinsichtlich Abtastfiltern und deren Realisierung durch ladungsgekoppelte Anordnungen (charge coupled devices) treffen. Folgerichtig werden digitale Filter und Abtastfilter in zunehmendem Maße für Anwendungen in der Frequenzfilterung eingesetzt.

Der Entwurf zeitdiskreter Filter wird bislang meist auf der Basis zeitkontinuierlicher Filter unter Anwendung der Bilinear-Transformation vorgenommen. Jedoch ist der Entwurf ausgehend von zeitdiskreten normierten Tiefpässen sinnvoll, da die zweimalige Auswertung der Bilinear-Transformation, die bei der Umrechnung der Filterspezifikationen vom zeitdiskreten in den zeitkontinuierlichen Bereich und bei der Umrechnung der Filterparameter vom zeitkontinuierlichen in den zeitdiskreten Bereich erforderlich wäre. Die beigelegten Taschenrechnerprogramme ermöglichen den Entwurf zeitdiskreter Systeme ohne die Benutzung aufwendiger Rechner. Das vorliegende Entwurfshilfsmittel ist übrigens nicht allein für den Anwender digitaler Filter in der Nachrichtentechnik gedacht. Bekanntlich werden zeitdiskrete Systeme für die Verarbeitung von Signalen auch in der Biologie, Medizin, Geophysik, Maschinenbau und in der Akustik verwendet, um nur einige Beispiele zu nennen.

Die für die Herstellung des Filterkatalogs erforderlichen Berechnungen wurden auf der Rechananlage IBM 370-168 des Rechenzentrums während der Zugehörigkeit beider Verfasser zur Technischen Hochschule Darmstadt durchgeführt. Alle Rechenoperationen wurden dabei mit doppelter Maschinenwortlänge vorgenommen; die Ergebnisse sind auf 10 Dezimalen gerundet.

Die Herausgabe dieses Buches hat Prof. Dr.-Ing. W. Klein durch Anregungen und Diskussionen wesentlich gefördert; leider hat er die Fertigstellung nicht mehr erlebt. Herr Dipl.-Ing. R. Block hat wertvolle Hinweise zur Abfassung der Manuskriptes gegeben. Wesentliche Anregungen zu der englischen Übersetzung haben wir von Herrn I. Trotter erhalten. Herr Dipl.-Ing. N. Höptner hat bei der Druck-

legung des Katalogs mitgewirkt. Den überwiegenden Teil der Reinschrift des druckfertigen Manuskriptes hat Frau Weber-Zuckarelli besorgt. Ihnen allen sei herzlich gedankt ebenso wie Herrn Curt Rint vom Verlag für die Geduld und das bereitwillige Eingehen auf unsere Wünsche.

Arild Lacroix

Karl-Heinz Witte

Berlin und Darmstadt, Januar 1980

Preface

Discrete time systems operate on sampled signals. Continuous amplitude realizations are called sampled data filters and discrete amplitude realizations are called digital filters. Due to progress in the integration of increasing complex functions in digital large scale circuits digital filters have attained considerable attention; comparable statements are valid with respect to sampled-data filters and their realization by charge coupled devices. Consequently digital filters and sampled data filters are utilized more and more for applications in frequency selective filtering.

Till now discrete time filters are designed primarily on the basis of continuous time filters using the bilinear transformation. However, the design on the basis of discrete time normalized lowpass filters is appropriate since the two-fold application of the bilinear transformation can be eliminated during the calculation of the filter specifications from the discrete time domain to the continuous time domain and during the transformation of the filter parameters from the continuous time domain to the discrete time domain. Pocket calculator programs are enclosed which enable the design of discrete time systems without the use of a digital computer. The present design aid is not exclusively intended for the application of digital filters in communication engineering. As is well known discrete time systems are utilized also in biology, medicine, geophysics, mechanical engineering and acoustics to mention just a few examples.

The computations necessary for the production of the filter catalog have been performed during the affiliation of both authors to the University of Engineering in Darmstadt at the computer center on the IBM computer 370-168. All calculations have been carried out with double machine wordlength; the results are rounded to 10 digits.

Prof. Dr. W. Klein has encouraged the edition of this book by suggestions and discussions; unfortunately he departed before its accomplishment. Dipl.-Ing. R. Block has contributed valuable annotations during the preparation of the manuscript. Important comments concerning the english manuscript have been given by I. Trotter. Dipl.-Ing. N. Höptner has assisted during the printout of the cata-

log. The major part of the manuscript has been prepared by Mrs. Weber-Zuckarelli ready for print. The authors would like to express sincere thanks to all of them as well as to Curt Rint from the publishers for his patience and willingness concerning our intentions.

Arild Lacroix

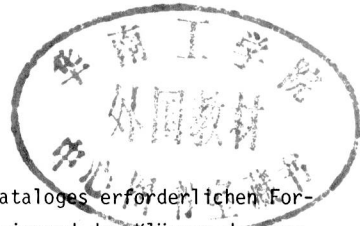
Karl-Heinz Witte

Berlin and Darmstadt, January 1980

Inhalt – Content



Vorwort	5
Preface	7
1. Einleitung	11
2. Entwurf frequenzselektiver Filter	15
3. Benutzung der Entwurfstabellen und des Filterkatalogs	22
4. Entwurfsbeispiele	26
5. Beschreibung von Taschenrechner-Programmen für die Frequenztransformation	34
1. Introduction.	40
2. Design of Frequency Selective Filters	43
3. Use of the Design Tables and of the Catalog	50
4. Design Examples	53
5. Description of Pocket Calculator Programs for Frequency Transformation	62
6. Programmausdruck – Program Listing	68
7. Schrifttum – References	71
8. Zeichnerische Darstellung von Pol-Nullstellen-Verteilungen und Dämpfungsverläufen – Graphic Representation of Pole-Zero Locations and Attenuation Functions	72
9 Entwurfstabellen – Design Tables	103
10. Katalog der Potenzfilter – Catalog of Butterworth Filters	125
11. Katalog der Tschebyscheff-Filter – Catalog of Chebyshev Filters	129
12. Katalog der Cauer-Filter – Catalog of Cauer Filters	133



1. Einleitung

Nachfolgend sind die für den Gebrauch des Filterkataloges erforderlichen Formeln und Zusammenhänge aufgeführt. Dies dient vorwiegend der Klärung der verwendeten Begriffe und der Symbolik. Der an den Grundlagen zeitdiskreter Systeme interessierte Leser sei auf die Monographien und Lehrbücher [1 - 5] verwiesen. Übrigens werden die Begriffe "zeitdiskretes System" und "digitales Filter" nebeneinander verwendet, da es für die hier behandelten Entwurfsfragen von untergeordneter Bedeutung ist, ob die Filter amplitudenstetig oder amplitudendiskret zu realisieren sind.

Für ein digitales Filter beschreibt die Übertragungsfunktion

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = K \prod_{i=1}^n \frac{z - z_{0i}}{z - z_i} \quad (1)$$

den Zusammenhang zwischen dem Eingangssignal X und dem Ausgangssignal Y . Die z_i sind die Pole und die z_{0i} die Nullstellen der Übertragungsfunktion. Der Frequenzgang der Übertragungsfunktion

$$H(e^{j\psi}) = K \prod_{i=1}^n \frac{e^{j\psi} - z_{0i}}{e^{j\psi} - z_i}, \quad (2)$$

ergibt sich aus (1) für $z = e^{j\psi}$. Der Frequenzgang eines digitalen Filters gibt an, wie eine stationäre sinusförmige Anregung der normierten Frequenz ψ_1 durch den komplexen Wert des Frequenzgangs an der Stelle $\psi = \psi_1$ in Amplitude und Phase verändert wird. Die normierte Frequenz ψ wird dabei gemäß

$$\psi = \frac{2\pi f}{f_A} = \frac{\omega}{f_A} \quad (3)$$

definiert mit der Abtastfrequenz f_A . Der Betrag des Frequenzgangs, kurz Betragsgang genannt,

$$|H(e^{j\psi})| = |K| \prod_{i=1}^n \frac{|e^{j\psi} - z_{0i}|}{|e^{j\psi} - z_i|}, \quad (4)$$

beschreibt die Bewertung des sinusförmigen Eingangssignals in Amplitude und der Phasengang

$$-\angle H(e^{j\psi}) = \sum_{i=1}^n \{ \angle e^{j\psi} - z_i - \angle e^{j\psi} - z_{0i} \} - \angle K, \quad (5)$$

der negative Winkel des Frequenzganges, beschreibt die (negative) Phasenverschiebung des sinusförmigen Signals.

Bei der Zerlegung des komplexen Frequenzganges in Betrags- und Phasengang wird folgende Schreibweise verwendet:

$$H(e^{j\psi}) = |H(e^{j\psi})| e^{j \angle H(e^{j\psi})} \quad (6)$$

Wegen des für praktische Anwendungen großen Wertbereiches des Betragsganges benutzt man vorteilhaft die logarithmische Darstellung:

$$g(\psi) = -\ln |H(e^{j\psi})| \quad (7a)$$

$$= -\ln |H(e^{j\psi})| - j \angle H(e^{j\psi}) \quad (7b)$$

$$= a(\psi) + jb(\psi); \quad (7c)$$

dabei wird $a(\psi)$ Dämpfungsmaß und $b(\psi)$ Dämpfungswinkel (Phasengang) genannt.

Bei selektiven Filtern interessiert vorzugsweise der Betragsgang, da dieser die amplitudenmäßige Selektion bestimmter Frequenzanteile im Signal wiedergibt. Der Betragsgang (4) ist 2π -periodisch:

$$H(e^{j\psi}) = H(e^{j(\psi + 2\pi)}) \quad (8)$$

Für reellwertige Filter, $H(e^{j\psi}) = H^*(e^{j\psi*})$, ist der Betragsgang eine gerade Funktion

$$|H(e^{j\psi})| = |H(e^{-j\psi})| \quad (9)$$

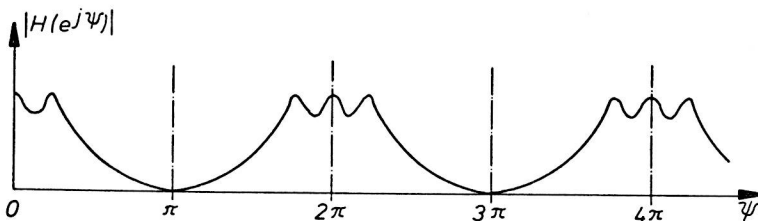


Bild 1: Betragsgang reellwertiger digitaler Filter

wie Bild 1 veranschaulicht. Von dem Betragsgang wird üblicherweise der Frequenzbereich

$$0 \leq \psi \leq \pi \quad (10)$$

zur Signalfilterung benutzt; entsprechend wird das Filter in dem Bereich (10) spezifiziert.

In den nächsten Kapiteln folgt die Darstellung des Entwurfsverfahrens unter Verwendung des Filterkataloges. Daher wird zum Abschluß dieses Kapitels die Realisierung der entworfenen Filter behandelt. Bild 2 zeigt eine Schaltung, die sich hinsichtlich des Fehlerverhaltens als guter Kompromiß erwiesen hat, nämlich das Kaskadenfilter mit Teilsystemen zweiten Grades. Die Koeffizienten des Kaskadenfilters, für geraden und ungeraden Systemgrad n beschrieben durch die Übertragungsfunktion

$$H(z) = \begin{cases} K \cdot \prod_{i=1}^N \frac{z^2 + b_{i,1}z + b_{i,0}}{z^2 + a_{i,1}z + a_{i,0}} & n \text{ geradzahlig} \quad (11a) \\ K \cdot \prod_{i=1}^N \frac{z^2 + b_{i,1}z + b_{i,0}}{z^2 + a_{i,1}z + a_{i,0}} \cdot \frac{z - z_{on}}{z - z_n} & n \text{ ungeradzahlig} \quad (11b) \end{cases}$$

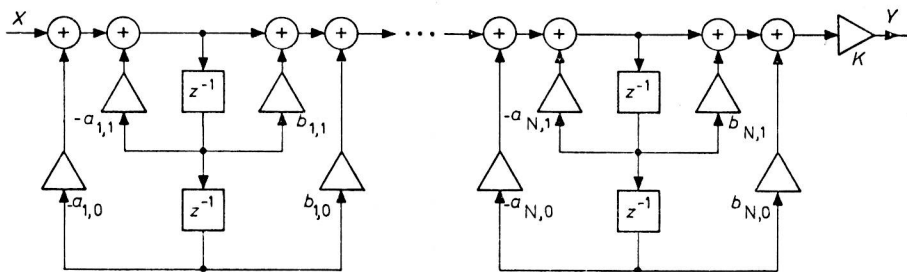


Bild 2: Kaskadenfilter mit Teilsystemen zweiten Grades

lassen sich zudem ohne umfangreiche Berechnung aus den Polen und Nullstellen nach Gl. (1) berechnen:

$$H(z) = \begin{cases} K \cdot \prod_{i=1}^N \frac{z^2 - 2 \operatorname{Re}(z_{02i-1})z + (\operatorname{Re}(z_{02i-1})^2 + \operatorname{Im}(z_{02i-1})^2)}{z^2 - 2 \operatorname{Re}(z_{2i-1})z + (\operatorname{Re}(z_{2i-1})^2 + \operatorname{Im}(z_{2i-1})^2)} & n \text{ geradzahlig} \quad (12a) \\ K \cdot \prod_{i=1}^N \frac{z^2 - 2 \operatorname{Re}(z_{02i-1})z + (\operatorname{Re}(z_{02i-1})^2 + \operatorname{Im}(z_{02i-1})^2)}{z^2 - 2 \operatorname{Re}(z_{2i-1})z + (\operatorname{Re}(z_{2i-1})^2 + \operatorname{Im}(z_{2i-1})^2)} \cdot \frac{z - z_{0n}}{z - z_n} & n \text{ ungeradzahlig}; (12b) \end{cases}$$

dabei ist angenommen, daß das Filter $2N$ komplexe Pole und Nullstellen mit unmittelbar aufeinanderfolgenden konjugierten Polen und Nullstellen und für ungeraden Filtergrad zusätzlich einen reellen Pol und eine reelle Nullstelle aufweist. Treten mehr reelle Pole und Nullstellen als eine auf, dann findet wieder die Darstellung nach Gl. (1) Anwendung. Es lassen sich auch in diesem Fall jeweils zwei reelle Pole und Nullstellen zu einem Teilsystem zweiten Grades zusammenfassen.

Es sei darauf hingewiesen, daß bei ungünstiger Zuordnung von Polen und Nullstellen zu einem Teilsystem und bei ungünstiger Reihenfolge der Teilsysteme beträchtliche Fehler infolge endlicher Wortlänge insbesondere bei Festkommarechnung auftreten können. Die Beachtung der folgenden Entwurfsregeln werden in der Regel zu einem recht günstigen Fehlerverhalten führen [6 - 9] :

1. Bei der Zuordnung von Polen und Nullstellen zu einem Teilsystem sind nacheinander die Pole und Nullstellen zusammenzufassen, die jeweils am dichtesten benachbart sind.
2. Für eine geeignete Reihenfolge der Teilsysteme ist möglichst zu vermeiden, daß Teilsysteme aufeinanderfolgen, deren Polwinkel unmittelbar benachbart sind.

Weitere Verbesserungen des Fehlerverhaltens sind dadurch zu erzielen, daß der Verstärkungsfaktor K in geeigneter Weise faktorisiert und den Teilsystemen zugeordnet wird [8, 9] .