Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 77 (1986)

Heft: 11

Artikel: Von der analogen zur digitalen Signalverarbeitung

Autor: Guggenbühl, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-904210

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Von der analogen zur digitalen Signalverarbeitung

W. Guggenbühl

Nach einer einleitenden Präzisierung des in diesem Aufsatz verwendeten Signalbegriffs wird die Geschichte der elektrischen Signaldarstellung von Morse bis zur Mitte dieses Jahrhunderts kurz dargestellt. Es werden Vorteile digitaler Signale anhand der Übertragungstechnik und der Shannonschen Kanalkapazität illustriert und der enge Zusammenhang zwischen den Fortschritten bei den digitalen Signalverarbeitungsmethoden und den Fortschritten in der Halbleiter- und Prozessortechnik aufgezeigt.

Après une précision de la notion de signal appliquée dans cet exposé, l'évolution de la représentation électrique des signaux, de Morse jusqu'au milieu de ce siècle, est brièvement décrite. Les avantages des signaux numériques sont illustrés à l'exemple de la technique des transmissions et par la capacité des canaux selon Shannon. L'étroite relation entre les progrès en traitement numérique des signaux et ceux de la technique des semi-conducteurs et des processeurs est montrée.

Adresse des Autors
Prof. Dr. *W. Guggenbühl*, Institut für Elektronik, ETH-Zentrum, 8092 Zürich.

1. Signalformen und Signalverarbeitung

Als *Signal* wird im allgemeinen die physikalische Darstellung einer Information bezeichnet; in den hier interessierenden Fällen werden dazu elektrische Grössen verwendet. Der Begriff sei im folgenden auf Informationen eingeschränkt, die aus sich kontinuierlich ändernden physikalischen Quellen stammen, beispielsweise durch Messung von Druck, Länge, Magnetfeld usw. Diese Einschränkung schliesst das weite Gebiet der sog. *Daten* (z.B. Texte, Kontostände) sowie die zugehörige Datenverarbeitung aus.

Der Begriff *Signalverarbeitung* ist eine Sammelbezeichnung für eine Vielzahl von Anwendungen, bei denen man informationstragende Signale elektronisch verändert. In der Nachrichtentechnik wird er in vielen Fällen insofern eingeengt, als darunter die Umformung von Signalen zwecks anschliessender Übertragung von einer Informationsquelle zu einem Empfänger und die nachfolgende Wiederaufbereitung verstanden wird.

Im Sinne der obigen Definitionen sind die hier betrachteten Signale ursprünglich *analoger* Natur, d.h. zeit- und wertekontinuierlich; mit anderen Worten, sie sind zu jeder Zeit definiert und können innerhalb bestimmter Grenzen beliebige Werte annehmen. Diese Signalart sowie die zugehörigen Verarbeitungsmethoden haben die Nachrichtentechnik, wie anschliessend gezeigt wird, in der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts geprägt. Die Notwendigkeit der Umwandlung von elektrischen Analogsignalen aus ihrer ursprünglich informationsproportionalen Form (z.B. Strom proportional zum Schalldruck) in eine für die Übertragung geeignetere Darstellung - z.B. durch Modulation eines Trägers - wurde schon in der Frühzeit der drahtlosen Nachrichtentechnik erkannt. Viel länger, nicht zuletzt auch wegen des relativ grossen apparativen Aufwandes, dauerte es, bis Alternativen zur analogen, d.h. werte- und zeitkontinuierlichen Signaldarstellung zur Anwendung kamen. Die Figur 1 zeigt die 4 Grundformen der Signaldarstellung, die aus der Diskretisierung der Zeit- und Werteachse hervorgehen. Alle diese Darstellungsarten sowie die entsprechend modulierten Trägersignale werden heute in der Informationstechnik benützt: so z.B. die Form in Figur 1b (amplitudenkontinuierlich, zeitdiskret) in der Technik der geschalteten Kapazitäten (SC-Technik) und die beiden amplitudendiskreten Formen (Fig. 1c, d) in der Digitaltechnik. Der Quantisierung der Amplituden wird in digitalen Systemen allerdings fast immer ein Codierungsschritt nachgeschaltet (Fig. 1e), wodurch bei den meisten Anwendungen erst die Vorteile dieser Technik voll zum Tragen kommen.

2. Die Ära der klassischen Nachrichtentechnik

Aus historischer Sicht würde der Titel dieses Aufsatzes besser «Von der digitalen zur analogen und zurück zur digitalen Signaldarstellung» lauten. Tatsächlich arbeitete das erste elektrische nachrichtentechnische Gerät, der Telegraph, der 1837 von Morse zur Textübermittlung eingeführt wurde, mit digitalen Signalen. Dieser Apparat benutzte in seiner einfachsten Form einen mittels Stromimpulsen ferngesteuerten Elektromagneten zur Bewegung eines Schreibstiftes am Empfangsort. Wenn auch der Morse-Telegraph im Sinne des oben definierten Signalbegriffs den Datenverarbeitungsgeräten zuzuzählen ist, so weist doch bereits dieser Erstling unter den nachrichtentechnischen Geräten einige der heute als wesentlich erkannten

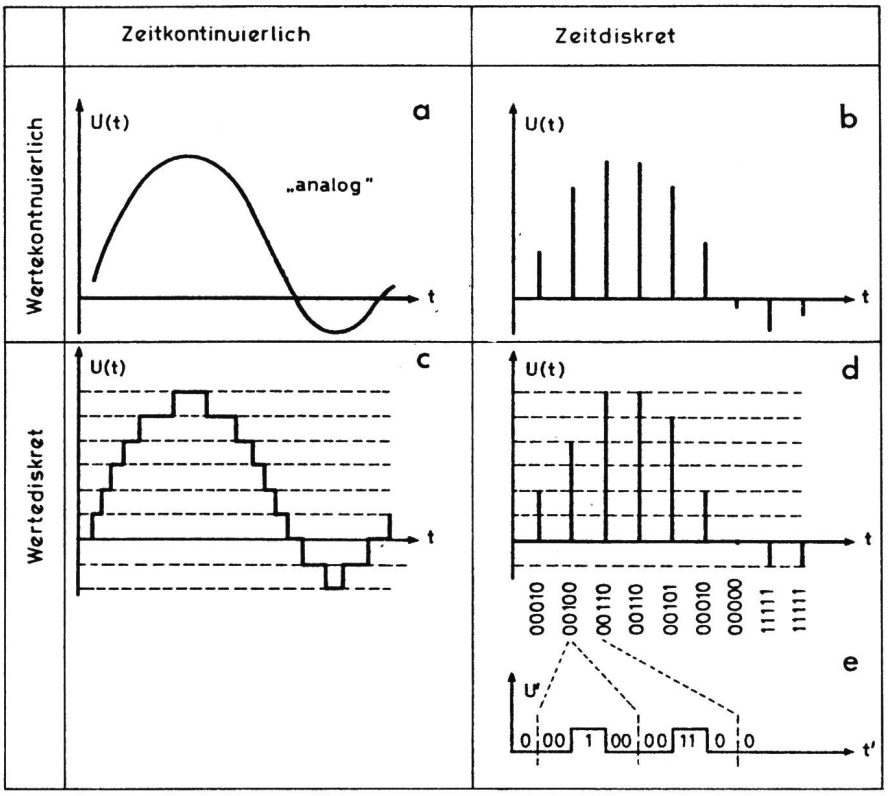

Fig. 1 Signalformen im Basisband

a analog
b abgetastet wertekontinuierlich
c digital asynchron
d digital synchron
e digital binär codiert

Merkmale der digitalen Technik – die Verwendung eines binären Signalalphabetes sogar mit Anpassung der Länge der Symbole an deren Häufigkeit – auf und profitierte vom bekannten Vorteil der binären Signalcodierung, der grossen Robustheit gegenüber äusseren Störungen.

Kontinuierliche (analoge) Signale im oben definierten Sinn fanden in der Nachrichtentechnik erstmals mit der Erfindung des Telephons (Bell 1876) Verwendung. Damit wurde eine viel benutzerfreundlichere Art der Nachrichtenübermittlung, die direkt von der Sprache als Informationsquelle ausging, ermöglicht. Voraussetzung für die Realisierung war die Erfindung des Mikrophons, das Schallwellen in proportionale Stromschwankungen umwandelte. Die Rücktransformation in Luftschwingungen am Empfangsort geschah mittels der bereits vom Telegraphen her bekannten elektromagnetischen Kraftwirkung, die nun im Falle des Telephonhörers «kontinuierlich wirkend» auf eine federnde Membran angewendet wurde.

Von Verarbeitung dieser Analogsignale kann allerdings erst nach der Erfindung der Elektronenröhre im ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts (Triode 1906) gesprochen werden. Sie leitete in der Nachrichtentechnik das Zeitalter der Elektronik ein. Die Hauptanwendung der neuen Erfindung war zunächst allerdings nicht die Verbesserung der Telephonnetze, sondern eine viel spektakulärere Art der Nachrichtenübermittlung – die drahtlose Übertragung elektrischer Signale. Dazu war eine frequenzmässige Versetzung der Signale in den Hochfrequenzbereich durch Modulation, d.h. eine Verarbeitung im Sinne der Anpassung an den Übertragungskanal, notwendig. Die sich nun entwickelnde elektronische Schaltungstechnik hatte sich ausserdem der Konzeption geeigneter Verstärkereinrichtungen für schwache Signale am Empfangsort anzunehmen.

Auch die Telephonie bediente sich, angesichts der wachsenden Ausdehnung der drahtgebundenen Übertragungsnetze, allmählich der Elektronik; ihr Anwendungsbereich betraf neben Verstärkereinrichtungen in erster Linie die Signalfilterung, bei welcher erwünschte von unerwünschten Signalkomponenten und Störungen abgetrennt werden.

Solche Aufgabenstellungen aus dem Gebiet der Signalverarbeitung werden in der Elektronik den technologischen Fortschritten entsprechend immer wieder neu angepasst und gelöst. In der klassischen Nachrichtentechnik waren die entsprechenden technologischen Hilfsmittel Elektronenröhren für die Verstärkung und LC-Kreise für die Filterung. Entwurfsziel eines guten Nachrichtenkanals war die «Wiedergabetreue» der Signale am Empfangsort; Abweichungen von der linearen Übertragungscharakteristik wurden durch das Verzerrungsmass (Klirrfaktor, Intermodulationsfaktor) beschrieben, die Störungsfreiheit durch das Signal-Rausch-Verhältnis charakterisiert.

Nur zögernd drang die elektronische Signalverarbeitung in neue Gebiete ausserhalb der Nachrichtentechnik vor. In den späten 30er Jahren finden wir erstmals Anwendungen in Reglern, d.h. in der sog. «industriellen Elektronik». Unter dieser Bezeichnung wurden damals alle nichtnachrichtentechnischen Anwendungen der Elektronik zusammengefasst. In der im Laufe des Zweiten Weltkriegs entwickelten Radartechnik entstanden abgetastete amplitudenkontinuierliche Systeme und entsprechende Signalverarbeitungsmethoden im Zeitbereich.

3. Die Vorteile der Digitaltechnik werden erkannt

Etwa zeitgleich um die Jahrhundertmitte entstanden auf drei verschiedenen Gebieten fundamentale Beiträge, die als Basis für den späteren Erfolg der Digitaltechnik betrachtet werden können:

- das mathematische Fundament der digitalen Signaldarstellung und die quantitative Begründung ihrer Störfestigkeit durch *C.E. Shannon* [1; 2].
- die Entdeckung des Transistoreffektes und die nachfolgende theoretische Berechnung der Transistorkennlinien durch *J. Bardeen, W.H. Brattain* und *W. Shockley [3; 4]*.
- die Beschreibung der Struktur eines universellen programmierbaren digitalen Rechners durch *J. von Neumann* [5].

Wenden wir uns kurz den Grundlagen der digitalen Signaldarstellung zu. *Shannon* setzte mit seinen Arbeiten einen Schlusspunkt zu Überlegungen, deren erste Ansätze bereits 1928 durch *Hartley* und *Nyquist* formuliert wurden [6; 7]. Folgende Gesetzmässigkei-

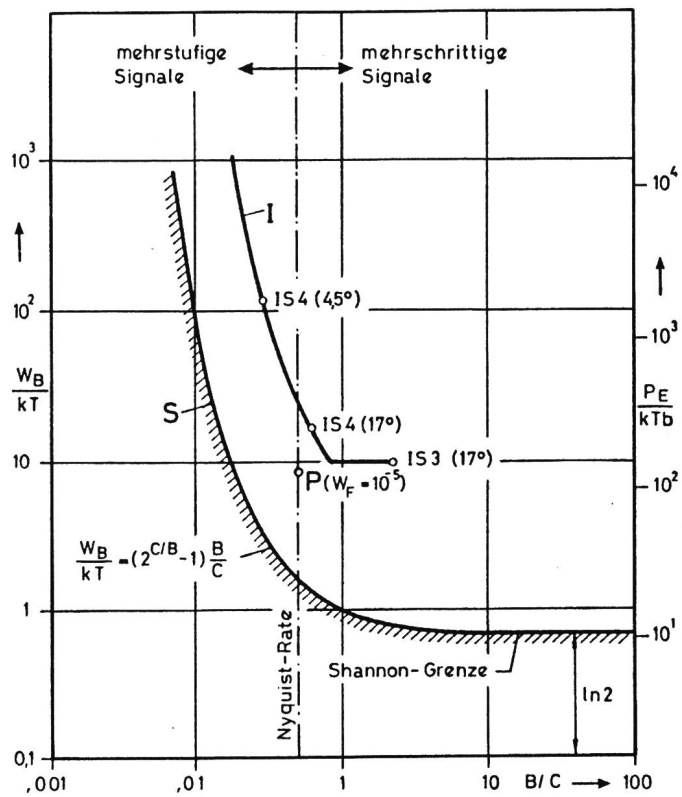

Fig. 2
Energiebedarf pro Bit (W_B/kT) als Funktion der aufgewendeten Bandbreite pro Bit (B/C) in Anwesenheit eines Rauschstörers

S Shannon-Grenze
P Detektion eines binären Bitstroms mit Nyquist-Rate in einem optimierten Empfänger mit Fehlerrate $W_F = 10^{-5}$
I Empfangsleistung P_E im Verhältnis zur Rauschleistung kTb pro Sprechkanal für Breitband-FM-Systeme in Nachrichtensatelliten
IS3 Intelsat 3
IS4 Intelsat 4 mit Antennenbündelöffnung als Parameter

Der Vergleich zwischen Analog- und Digitalsignalen basiert auf der Zuordnung b = 4 kHz ≙ 64 000 bit/s.

ten kennzeichnen die digitale Darstellung eines ursprünglich «analogen» Signals:

- zur vollständigen Beschreibung eines Signals mit Frequenzen innerhalb der Bandbreite B genügt die Angabe seiner Werte im zeitlichen Abstand ΔT = ½B (Abtastkriterium).
- Diese wertekontinuierlichen Abtastwerte werden durch eine endliche Anzahl Stufen N dargestellt (Quantisierung). Bei der Wiederherstellung des ursprünglichen Signals entsteht dadurch ein Quantisierungsgeräusch.
- Durch Codierung (Darstellung der Abtastwerte durch ihnen zugeordnete Nummern bzw. Codes) wird eine Verbesserung des Störabstandes auf Kosten der benötigten Bandbreite erreicht. Bevorzugt wird die Codierung mittels binärer (zweiwertiger) Signale.

Die Tatsache, dass es bei digitalen Signalen lediglich um die Auswahl aus einer endlichen Zahl n von Symbolen geht, ändert den Charakter der Signalauswertung gegenüber der Analogtechnik grundsätzlich: Ziel eines digitalen Signalempfängers ist nicht mehr die möglichst verzerrungsfreie Wiederherstellung des gesendeten Analogwertes, sondern der *Entscheid* zugunsten des richtigen Symbolwertes. Anstelle des Signal-Rausch-Verhältnisses tritt als Gütemass die Fehlerrate (Fehlerwahrscheinlichkeit) dieses Entscheides.

Es ist das Verdienst *Shannons*, ein Mass für die digital dargestellte Information eingeführt und die Grenze des in Anwesenheit von Störungen (weisses Rauschen) fehlerfrei detektierbaren Informationsflusses angegeben zu haben. Das entsprechende Gesetz für die sogenannte Kanalkapazität C (in bit/s) lautet

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{P_e}{P_n}\right) \qquad (1)$$

wobei

C die Kanalkapazität, B die Übertragungsbandbreite, P_e die Signalleistung und P_n die Rauschleistung darstellt. Diese Gleichung illustriert unter anderem die Möglichkeit des Austausches von Signalleistung und Bandbreite, was mit Hilfe einer Umformung von (1) wie folgt demonstriert werden kann. Mit den Bezeichnungen W_B = Energie pro Bit, kT = thermische Rauschleistung pro Bandbreite kann (1) umgeschrieben werden:

$$\frac{C}{B} = \log_2 \left(1 + \frac{CW_B}{kTB}\right) \qquad (2a)$$

oder

$$\frac{W_B}{kT} = (2^{C/B}-1)\, B/C \qquad (2b)$$

Dabei bedeuten:

W_B/kT die bezüglich der Störenergie normierte Signalenergie pro Bit, B/C die pro Bit aufgewendete Übertragungsbandbreite.

Figur 2 stellt die gemäss (2b) normierte *Shannon-Grenze* der fehlerfreien Signaldetektierbarkeit dar. Diese Betrachtung des minimalen Signalenergiebedarfs als Funktion der Bandbreite ist vor allem für die digitale Signalübertragung von Bedeutung. Sie stellt eine Grenze dar, der man sich (bei entsprechender Zunahme des Codieraufwandes und der Verzögerungszeit) asymptotisch annähern kann. Reale Systeme arbeiten mit gegenüber (2b) höheren Bitenergien; in der Figur 2 ist der mit einem optimierten binären Empfänger bei der Nyquistschen Grenzübertragungsrate von 2 bit/Hz (B/C = 0,5) und einer Bitfehlerrate von $P_B = 10^{-5}$ notwendige Wert für W_B/kT eingetragen. Durch raffinierte Codierung und unter Benützung von mehrschrittigen Codes (Verwendung von mehr Bandbreite pro übertragenes Bit) kann der Leistungsbedarf weiter abgesenkt werden. Mittels mehrstufiger Digitalsignale (z.B. durch Mehrphasenmodulation) kann der Bandbreitebedarf gegenüber der «Nyquist-Bandbreite» B/C = 0,5, allerdings bei grösserem W_B/kT, verkleinert werden.

Analoge Signale lassen sich nicht ohne weiteres in eine Darstellung gemäss Figur 2 einordnen, da sie nicht mit den Begriffen der Digitaltechnik (bit/s, Fehlerrate) beschreibbar sind. Eine Gegenüberstellung analog/digital ist nur bedingt und unter Festsetzung von speziellen Vergleichskriterien möglich. So wurde beispielsweise in [8] für Telephonkanäle (4 kHz), die über Nachrichtensatelliten laufen, die digitale Äquivalenz mit 64 kbit/s angenommen. In der Figur 2 sind die Signal-Rausch-Abstände typischer analoger Intelsat-Telephoniekanäle in diesem Sinne vergleichend eingetragen. Dabei ist berücksichtigt, dass die ursprüngliche Kanalbandbreite von 4 kHz im Übertragungskanal durch Frequenzmodulation mit hohem Index etwa 10 bis 30mal «aufgeweitet» ist, um die Übertragungsleistung klein halten zu können. Nichtmodulierte analoge Systeme arbeiten somit ver-

gleichsweise viel schmalbandiger als digitale.

Während Übertragungssysteme, insbesondere in der Raumfahrttechnik, möglichst nahe an der Shannongrenze betrieben werden, arbeiten die üblichen digitalen *Verarbeitungssysteme* mit grossem Leistungs- und Bandbreiteüberschuss. Ein typischer Wert beträgt für ein binäres integriertes CMOS-System mit $W_B/kT = U_B^2C/kT \approx 6{,}2 \cdot 10^8$ ($U_B = 5$ V, $C = 0{,}1$ pF). Dieser grosse Leistungsüberschuss gegenüber der Shannongrenze garantiert eine praktisch vernachlässigbare Fehlerrate gegenüber Rauschen. Man ist dann nicht wie in der Übertragungstechnik zur Bandbreiteoptimierung (Rauschoptimierung) gezwungen. Durch Bandbreiteüberschuss (rechteckförmige Signale) kann die Signaldetektion gegenüber den oben erwähnten optimierten Empfängern vereinfacht (einfache Schwellenschaltung) und der Symbolentscheid (Regeneration) des Digitalsignals in jeder Verarbeitungsstufe durchgeführt werden. Insbesondere wird der Leistungsüberschuss gegenüber der Grenze (2) dazu benützt, Toleranzen und Veränderungen der eingesetzten Bauelemente aufzufangen. In den heutigen digitalen Verarbeitungssystemen rührt eine allfällig verbleibende Fehlerrate nicht von den in (2) angenommenen Rauschvorgängen her, sondern wird durch Übersprechen von anderen Schaltvorgängen innerhalb oder ausserhalb des betrachteten Systems erzeugt. Diese Störungen können durch Massnahmen (redundante Codierung gegen Burstfehler) bekämpft werden, die den gegen Rauschstörer angewandten Methoden ähnlich sind.

Vier wesentliche Vorteile der digitalen Signaldarstellung kommen bei dieser durch die Übertragungstechnik geprägten Betrachtungsweise nicht explizit zum Ausdruck:

- Die Regenerierbarkeit der Signale, d.h. die Möglichkeit der vollen Wiederherstellung des ursprünglichen Signals mit beliebig kleiner Fehlerrate, sofern man innerhalb der Shannongrenze bleibt. Bei analogen Signalen sind demgegenüber nichtdeterministisch aufgetretene Verfälschungen nicht mehr eliminierbar.
- Die Befreiung des Schaltungstechnikers von der Forderung der Verzerrungsfreiheit des Verarbeitungskanals, da bei digitaler Darstellung nur die Unterscheidbarkeit einer endlichen Zahl von (im binären Fall von zwei) Signaltypen gefordert ist.
- Die einfache Möglichkeit der Vergrösserung des Signalbereichs (Dynamik) durch Hinzufügen weiterer Bits, sofern die Auflösung der Wandler A/D, D/A dies erlaubt. Diese potentiell hohe Signalauflösung (Dynamik) verbürgt auch eine (bei entsprechendem Aufwand) beliebig hohe Genauigkeit der Verarbeitungsschritte, was viel komplexere Verarbeitungsmethoden erlaubt als im «analogen» Fall.
- Die einfache Speicherbarkeit digitaler Informationen, die vor allem für die Verarbeitungstechnik gegenüber der Analogtechnik neue Möglichkeiten eröffnet.

Von der digitalen Signaldarstellung profitiert somit nicht nur die Übertragungs-, sondern in noch viel grösserem Mass auch die Filter- und Regeltechnik. Die entsprechende Theorie abgetasteter Systeme wurde in den 50er und 60er Jahren entwickelt (siehe z.B. [9]). Eine Artikelserie, die in diesem Heft beginnt, soll diesem Thema gewidmet sein [10].

4. Die Schaffung der apparativen Voraussetzungen: Transistoren, integrierte Schaltungen und Prozessoren

Der praktischen Umsetzung der erkannten Vorteile der Digitaltechnik stand zunächst der grosse apparative Aufwand entgegen. Ohne die im vorigen Abschnitt bereits erwähnten Innovationen auf der Hardwareseite – Halbleiter- und Prozessortechnik – um die Jahrhuntertmitte wäre eine wirtschaftliche Nutzung im heutigen Umfang nicht möglich geworden.

Erst mit der Erfindung des Transistors [3; 4] wurde der Elektronik der effiziente, leistungsarme Schalter zur Verfügung gestellt, der in digitalen Systemen in grosser Zahl benötigt wird. Nachdem in den 50er Jahren erste industriell einsetzbare Transistoren verfügbar wurden, folgten auch sogleich die ersten grösseren digitalen Systeme, vor allem auf dem Gebiet der elektronischen Rechner. Der eigentliche Durchbruch zur modernen Digital-

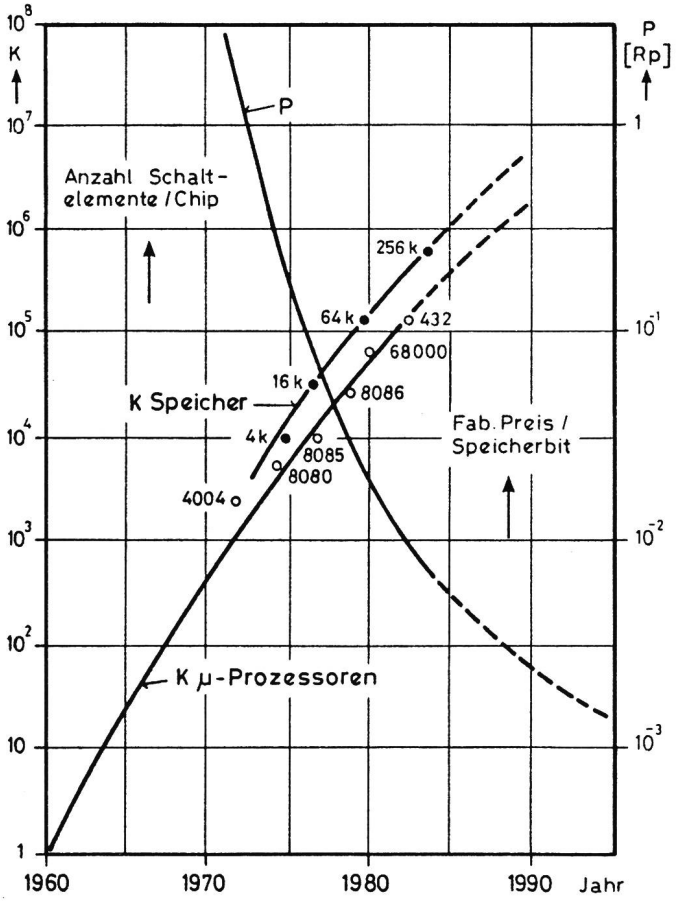

Fig. 3
Komplexitätssteigerung integrierter Grossschaltungen und Preiszerfall pro Funktionseinheit

K Komplexität = Anzahl Schaltelemente pro Chip
P Fabrikationspreis pro Speicherbit

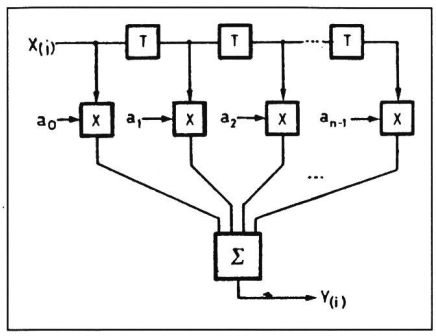

Fig. 4 Struktur eines Transversal-(FIR-)Filters

T Verzögerer

X Multiplikator

Σ Summierer

technik geschah jedoch in den 60er Jahren mit der Weiterentwicklung der Transistortechnologie zur integrierten Schaltungstechnik. Die seitherige Entwicklung der Komplexität pro Chip sowie der Kosten pro Elementarfunktion sind bestens bekannt. Die Figur 3 illustriert nochmals diese revolutionäre Veränderung der hardwaremässigen Grundlagen der signalverarbeitenden Elektronik, durch die diese unaufhaltsam in die digitale Richtung gedrängt wird.

Eine zweite, oben erwähnte Entwicklung – die Strukturierung der digitalen Systeme nach Computerart – beförderte die wirtschaftliche Nutzung grosser Schaltungskomplexitäten in integrierter Technik und damit die Einführung digitaler Signalverarbeitungsmethoden auch für Anwendungen mit kleinen Stückzahlen. Mit dem Mikroprozessor (1972) entstand durch Symbiose von integrierter Schaltungstechnik und Computerarchitektur eine universelle, durch Programmierung dem individuellen Verwendungszweck anpassbare digitale Schaltungskomponente. Damit wurde das Problem, Schaltungen hoher Komplexität in grosser Stückzahl fertigen zu können, für viele Anwendungsfälle gelöst.

Universalität wird jedoch in der Elektronik allgemein mit Verlust an Arbeitsgeschwindigkeit bezahlt. Die bezüglich Verarbeitungsleistung recht anspruchsvollen Signalverarbeitungsmethoden der Nachrichtentechnik liegen jenseits der Geschwindigkeit heute üblicher einfacherer Universalprozessoren und können deren Eigenschaften auch nicht optimal ausnützen. Erst in den letzten Jahren sind Spezialprozessoren entwickelt worden, deren Architektur spezifisch an die Algorithmen der digitalen Signalverarbeitung angepasst ist und die weiterhin flexibel (d.h. durch Programmierung dem jeweiligen Problem anpassbar) eingesetzt werden können.

Die spezifischen Wünsche an die Eigenschaften dieser sog. Signalprozessoren seien am Beispiel des Transversalfilters (FIR-Filter) erläutert, dessen Struktur in der Figur 4 dargestellt ist. Die Abtastwerte X des Eingangssignals werden der Verzögerungskette im zeitlichen Abstand T zugeführt, und es wird die Summe der letzten n mit den Faktoren a_i gewichteten Abtastwerte gemäss folgender Gleichung gebildet

$$Y_i = a_0 X_i + a_1 X_{i-1} + \ldots + a_{n-1} X_{i-n+1} \qquad (3)$$

wobei $X_{(i-k)}$ den gegenüber dem Zeitmoment iT um kT früher abgetasteten Signalwert bezeichnet. Man kann leicht zeigen, dass mit einer solchen Struktur die Operationen Korrelation und Faltung, also Filterfunktionen im Zeitbereich, durchgeführt werden können.

Es ist das Prinzip universell verwendbarer digitaler Prozessoren, die Rechenoperationen in sequentielle Schritte zu zerlegen. Wie die alternative Schreibweise von (3)

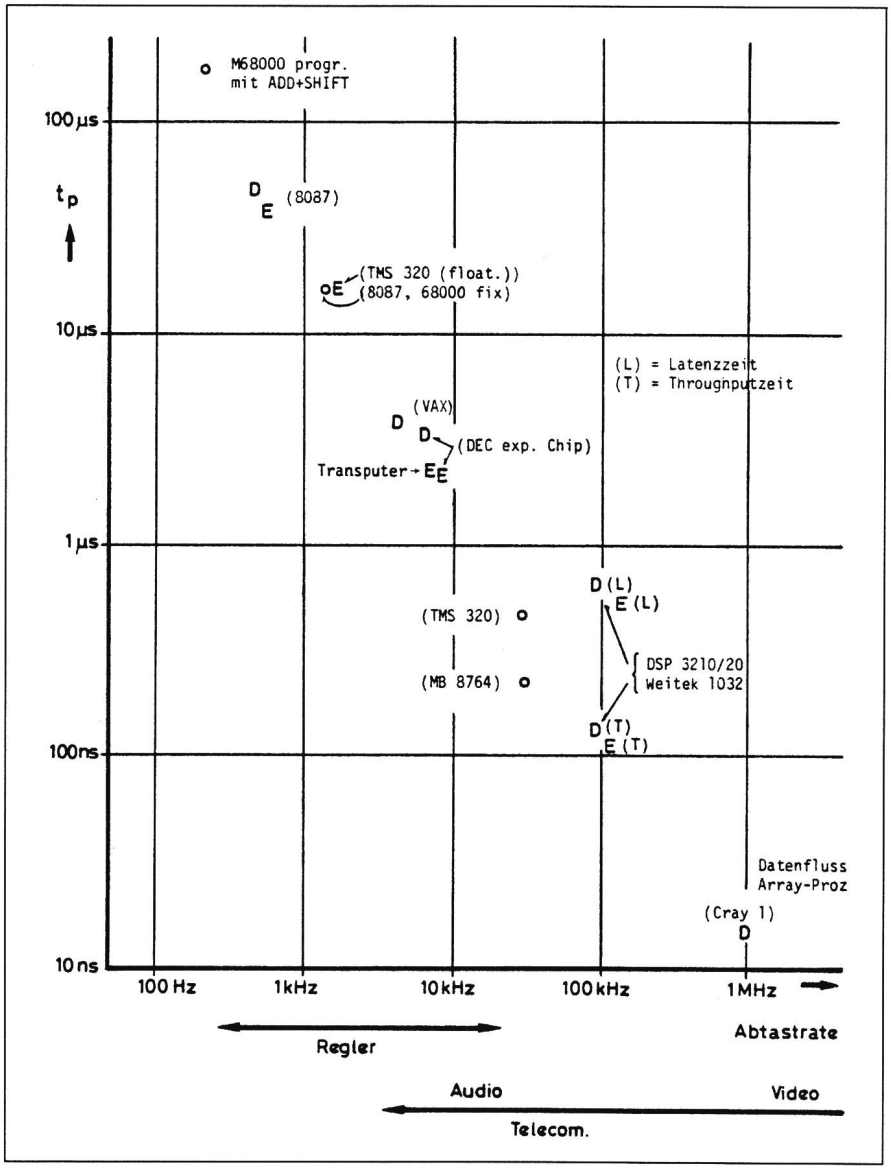

Fig. 5 Zeitbedarf der Operation «Multiplikation + Addition» (Gl. 5) für verschiedene Realisierungen

o Fixkomma 16×16 bit
E Gleitkomma, einfache Präzision
D Gleitkomma, doppelte Präzision
L Latenzzeit = absolute Signalverzögerung (Totzeit)
T Throughputzeit = relative Signalverzögerungszeit (Ausgabekadenz)

$$Y_i = a_0 X_i + [a_1 X_{i-1} + \underbrace{[a_2 X_{i-2} + (\ldots a_{n-1} X_{i-n+1})\ldots]}_{y_{i-2}}]$$

$$\underbrace{a_1 X_{i-1} \quad + \quad y_{i-2}}_{y_{i-1}} \qquad (4)$$

$$Y_i = a_0 X_i \quad + \quad y_{i-1}$$

zeigt, ist im vorliegenden Fall die Teiloperation

$$Y \leftarrow a_k \cdot X + Y \qquad (5)$$

n mal anzuwenden, um einen Abtastwert Y_i zu berechnen. Multiplikation mit anschliessender Addition ist somit die Grundoperation, für die ein Signalprozessor optimiert werden muss. Der dabei üblicherweise einzusetzende Hardwaremultiplier benötigt eine grosse Fläche auf der integrierten Schaltung, was das relativ späte Erscheinen solcher Prozessoren auf dem integrierten Schaltungsmarkt erklärt.

Die Figur 5 zeigt die typischen Ausführungszeiten für die Operation (5) in verschiedenen Computerstrukturen. Dabei ist als Beispiel eines primitiven Festkomma-Rechenwerks (16×16 bit) ein 16-Bit-Prozessor nach klassischer Art mit Additions- und Schiebeoperationen ausprogrammiert worden (M68000 progr. mit ADD und SHIFT). Typische moderne 16-Bit-Prozessoren (8087, 68000) arbeiten bei Verwendung ihrer mikroprogrammierten Multiplikationsbefehle etwa 10mal schneller, während die Geschwindigkeit von Signalprozessoren (TMS 320, MB 6764), deren Hardwarearchitektur spezifisch für die Operation (5) ausgelegt ist, nochmals 1,5 bis 2 Grössenordnungen höher liegt. Zur Lösung der Filtergleichungen werden in komplizierten Fällen in zunehmendem Masse Gleitkomma-Rechenwerke eingesetzt, um auch bei grösseren Komplexitäten die numerischen Probleme einfacher beherrschen zu können. In Figur 5 sind deshalb auch die Zahlen für entsprechende Gleitkommaoperationen eingetragen. Besonders erwähnenswert sind die Chipsätze DSP 3210/20 und Weitek 1032, mit denen Geschwindigkeiten bis 8 Millionen Operationen (5) pro Sekunde erreicht werden. Auf der Horizontalachse sind typische Anwendungsbereiche der jeweiligen Strukturen angegeben, wobei Verarbeitungsalgorithmen mit mehreren Operationen pro Systems-Abtastschritt angenommen sind.

Ausserhalb der Nachrichtentechnik sind Regleralgorithmen typische digitale Signalverarbeitungsaufgaben, für die solche Prozessoren eingesetzt werden. Eine ausführliche Darstellung über Signalprozessoren findet sich in diesem Heft [11], einige Anwendungen in [12].

Neben den prozessorartigen Strukturen sind zahlreiche Funktionseinheiten nach Mass integriert worden (z.B. Fast-Fourier-Transformation), die eine noch optimalere Anpassung der Hardware ans jeweilige spezielle Verarbeitungsproblem darstellen. Ein Beispiel dieser Art wird im Artikel von *R. Küng* [13] in diesem Heft besprochen.

5. Hat die analoge Schaltungstechnik ausgedient?

Angesichts der unbestreitbaren Vorteile der Digitaltechnik und der enormen Fortschritte ihrer hardwaremässigen Implementation stellt sich die Frage nach dem zukünftigen Platz der Analogtechnik. Zweifellos wird der Trend in Richtung digitaler Verarbeitung weitergehen; selbst zahlreiche Gebiete der Unterhaltungselektronik im Audio- und Videobereich sind bekanntlich auf dem Weg zu digitalen Lösungen (z.B. Compact Disc).

Digitale Signalverarbeitung ist jedoch unter Beachtung unserer eingangs gemachten Einschränkung des Signalbegriffs nur innerhalb der Arbeitsbereiche der zugehörigen Wandler (analog/digital und digital/analog) praktizierbar. Dieses Feld ist in den letzten Jahren immer grösser geworden; die Figur 6 zeigt die heutigen Grenzen kommerziell erhältlicher Wandler, wobei als Ordinate das durch das Quantisierungsgeräusch bedingte Signal-Rausch-Leistungsverhältnis, als Abszisse die halbe Abtastfrequenz aufgetragen ist. Vergleicht man diese Kurven mit der geschätzten Grenze der Analogtechnik, so bleibt ein ansehnliches Gebiet der Hochfrequenztechnik für die kontinuierliche (analoge) Signalverarbeitung übrig. Ebenso sind die Sensorverstärker, die die ursprünglich kontinuierlichen Signale auf das «Wandlerniveau» anheben, sowie meistens die Anti-Aliasing-Filter analog. Oft schliesst der Leistungsverbrauch, der bei den heute üblichen digitalen Signalniveaus (5 V) bedeutend höher liegt als bei entsprechenden analogen Lösungen, die digitale Verarbeitung aus. Ausserdem lohnt sich bei sehr kleinen Systemen ohne hohe Genauigkeitsansprüche der Wandleraufwand in den digitalen Bereich nicht.

Schliesslich wird der Schaltungstechniker in der Praxis, insbesondere bei den schnellen Digitalsystemen, nicht nur mit 0/1-Niveaus, sondern auch mit zeitkontinuierlichen Signal-

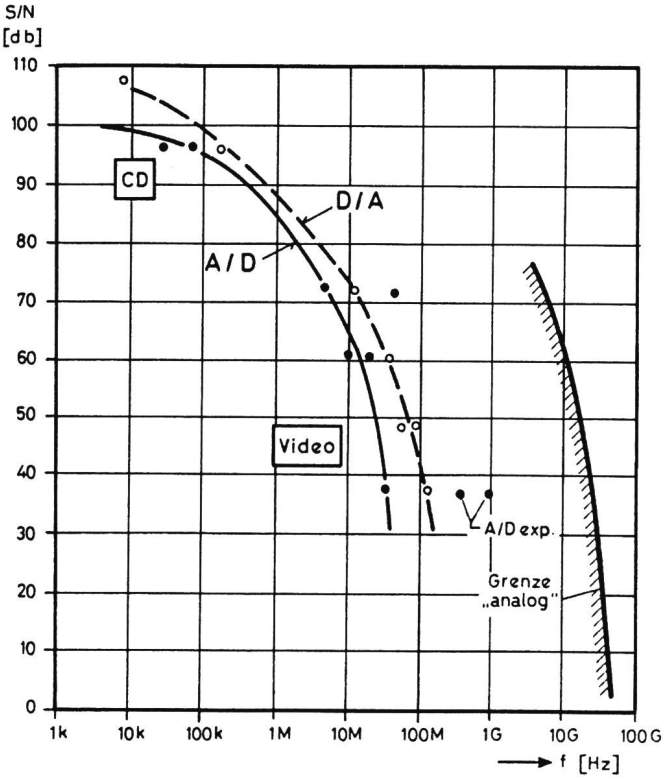

Fig. 6
A/D- und D/A-Wandler begrenzen das Einsatzfeld der digitalen Signalverarbeitung
Ordinate: Signal/Rauschverhältnis als Folge der Quantisierung
Abszisse: Verarbeitungsfrequenz (halbe Abtastfrequenz)
Grenze «analog»: geschätzte Grenzkurve für kontinuierliche Signale

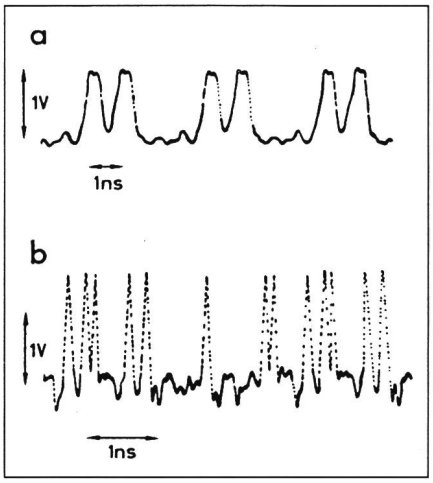

Fig. 7 Beispiel «analoger» Digitalsignale

a Bitstrom am Eingang eines Multiplexers mit 1,12 Gbit/s

b Bitstrom am Ausgang eines Multiplexers mit 7,84 Gbit/s

verläufen (Fig. 7) konfrontiert, die mittels schaltungstechnischer Massnahmen optimiert werden müssen, wenn auch nicht gemäss den Zielfunktionen der klassischen Analogtechnik. Diese sogenannten «analogen» Aspekte der digitalen Signale - man spricht dann oft von «analogen» Digitalsignalen -, die an vielen Trennstellen digitaler Verarbeitungskomplexe sichtbar werden, stellen insbesondere in Systemen mit hoher Arbeitsgeschwindigkeit anspruchsvolle Aufgaben an den Schaltungstechniker. Auch auf dem Gebiet der kontinuierlichen Signale warten somit immer wieder neue interessante Aufgaben auf eine Lösung.

Literatur

[1] *B.M. Oliver, J.R. Pierce* and *C.E. Shannon:* The philosophy of P.C.M. Proc. IRE 36(1948)11, p. 1324...1331.

[2] *C.E. Shannon:* Communication in the presence of noise. Proc. IRE 37(1949)1, p. 10...21.

[3] *J. Bardeen* and *W.H. Brattain::* The transistor, a semi-conductor triode. Physical Review 74(1948)–, p. 230...231.

[4] *W. Shockley:* The theory of p-n junctions in semiconductors and p-n junction transistors. Bell. Syst. Techn. J. 28(1949)3, p. 435...489.

[5] *A.W. Burks, H.H. Goldstine* and *J.v. Neumann:* Preliminary discussion of the logical design of an electronic computing instrument. US Army Ordnance Dept. Rep. 1946.

[6] *H. Nyquist:* Certain factors affecting telegraph speed. Journal of the American Institute of Electrical Engineers 43(1924)2, p. 124...130.

[7] *R.V.L. Hartley:* The transmission of information. Bell Syst. Techn. J. 7(1928)July, p. 535...563.

[8] *W. Guggenbühl:* Einige Probleme moderner Nachrichtensatelliten. Bull. SEV 61(1970)1, S. 19...35.

[9] *L.R. Rabiner* and *B. Gold:* Theory and application of digital signal processing. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1975.

[10] *A.W.M. van den Enden* and *A.M. Verhoeckx:* Digitale Signalverarbeitung. Theoretische Grundlagen. Bull. SEV/VSE 77(1986)11, S. 613...620.

[11] *H. Hanselmann:* Signalprozessoren in der Mess- und Regeltechnik. Bull. SEV/VSE 77(1986)11, S. 632...637.

[12] *A. Gunzinger:* Signalprozessoren - Systeme und Anwendungen. Bull. SEV/VSE 77(1986)11, S. 638...645.

[13] *R. Küng:* Echtzeit FFT. Bull. SEV/VSE 77(1986)11, S. 646...652.