

Einführung in die Nachrichtentechnik

Kurzer geschichtlicher Abriss

- 1833 Gauß und Weber: Zeigertelegraph
- 1835 Morse : Morseapparat
- 1858 erstes Transatlantik- Tiefseekabel für Telegraphie
- 1876 Bell : erstes technisch brauchbare Telefon
- 1878 erste Vermittlungseinrichtung in New Haven CT
- 1889 Strowger : Strowgerwähler (Hubdrehwähler)
- 1901 Marconi : drahtlose Transatlantikverbindung
- 1907 Lee de Forest : steuerbare Elektronenröhre
- 1920 Carson : Untersuchungen zur Signalabtastung
- 1920 erste Experimente zur elektronischen Bildübertragung
- 1933 erste HiFi-Übertragung in Washington D.C. (15kHz, 80dB)
- 1939 Reeves : Erfindung der Pulsmodulation
- 1947 Bardeen, Brattain und Shockley : Erfindung des Transistors
- 1948 Shannon : Begründung der Informationstheorie
- 1948 Aufnahme regelmäßiger TV-Sendungen
- 1950 In den folgenden Jahren vollzieht sich die Entwicklung in immer schnelleren Tempo und bringt neue Techniken hervor, wie : die Lasertechnik, Nachrichtensatelliten, kommerzielle PCM-Übertragung und die PDH (plesiochrone digitale Hierarchie), geostationäre Satelliten, zellulare Mobilfunknetze, die CD, den GSM-Standard (Nachfolgestandard UMTS), die SDH und ATM (synchrone digitale Hierarchie und asynchroner Transfermodus) und viele weiteren Dinge

Die Entwicklung der Kommunikationstechnik (ab ca. 1950)

Verbesserungen der elektromechanischen Wähler - u.a. von Strowger - führten zum Ende des Jahrhunderts zur dritten Generation, direkt durch das **Impulswahlverfahren (IWW)** dekadisch ansteuerbaren **Drehwählern** und **Hebdrehwählern**. Hierbei wurden und werden durchaus heute noch mithilfe einer **Wählscheibe** Gleichstromunterbrechungen beim Rücklauf erzeugt - Standard ist heute jedoch das **Tastenfeld** [KR].

Eine nennenswerte Verbesserung bzgl. Baugröße und Gewicht, mechanischem Verschleiß der Kontakte, Stromaufnahme, Geschwindigkeit und Geräuschentwicklung führte in den fünfziger Jahren der **Edelmetallmotordreh-(EMD)-Wähler** ein, womit auch die Endstation der technischen Entwicklung mechanischer Koppelpunkte erreicht war. Parallel dazu wurde vor allem in den USA das **IWW** durch die **Mehrfrequenzwahl (MFV)** ersetzt, die rascheren Verbindungsaufbau und einfache Signalisierung auch während einer Verbindung zuläßt [FR]. Bald wurde das **MFV** auch in der BRD für die

Nebenstellentechnik Standard. Hier Anfang der Neunziger als Option für den Zugang zum analogen Telefonnetz angeboten, wird es vom ISDN überrannt werden.

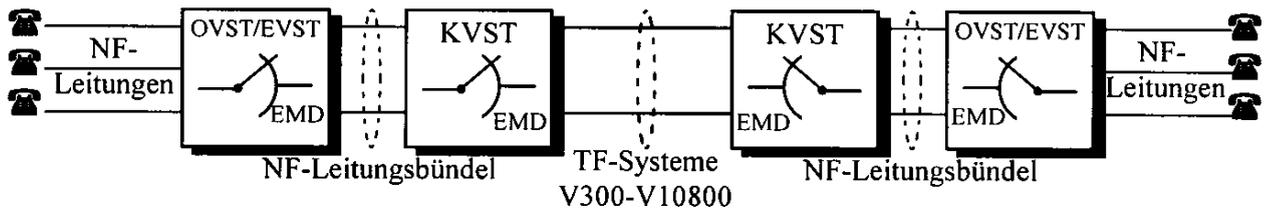


Abb. 1.1-1: Analoge Übertragungs- und Vermittlungstechnik.

Vor dem Einstieg in die Digitaltechnik präsentiert(e) sich die analoge Fernsprechtechnik (*Plain Old Telephone Service = POTS*) entspr. Abb. 1.1-1 durch [KA1.4]:

- **Analoge Niederfrequenzübertragungstechnik im Teilnehmeranschlußbereich**
Der Frequenzbereich des Sprachsignals im Teilnehmeranschlußbereich (Local Loop) entspricht direkt dem akustischen Frequenzbereich (Basisbandübertragungstechnik), wird dabei aber auf ca. 4 kHz Bandbreite begrenzt.
- **Analoge Trägerfrequenzübertragungstechnik zwischen VStn höherer Ordnung**
Um Leitungen zwischen den VStn höherer Ordnung mit großem Verkehrsaufkommen einzusparen, werden in den VStn die niederfrequenten Teilnehmeranschlußleitungssignale ESB-amplitudenmoduliert und die nicht mitübertragenen Träger ggf. in mehreren Stufen im Rasterabstand von 4 kHz bzw. ganzzahligen Vielfachen frequenzmultiplext. Die Zahl hinter dem V gibt dabei die vermittelbare NF-Kanalanzahl an.
- **Analoge Vermittlungstechnik** entsprechend der jeweiligen oben beschriebenen Stufe.

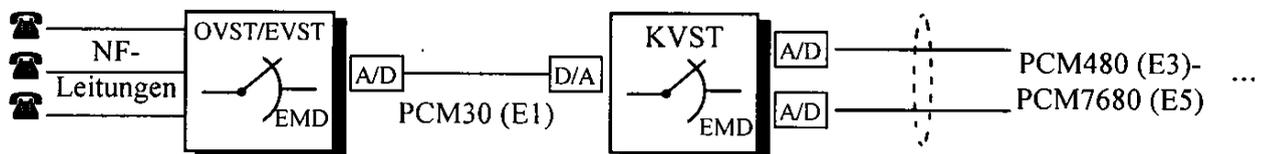


Abb. 1.1-2: Digitalisierung der Zwischenamtsübertragungstechnik.

In der ersten Stufe der Digitalisierung wurde die analoge Nieder- und Trägerfrequenz-Übertragungstechnik entspr. Abb. 1.1-2 zwischen den Ämtern durch **digitale Zeitmultiplextechnik PCM30** (E1, 2,048 Mbps; Pulsmodulation mit 30 Telefonkanälen) bis **PCM7680** (E5; 565 Mbps) ersetzt. Diese Digitalisierung hat ihre praktischen Anfänge zu Beginn der siebziger Jahre und wurde in der BRD 1998 abgeschlossen. Hierzu sind noch A/D- und D/A-Wandler zwischen den VStn nötig.

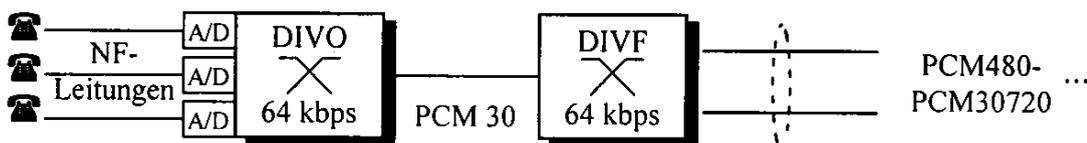


Abb. 1.1-3: Digitalisierung der Vermittlungstechnik.

Im Zuge der zweiten Stufe der Digitalisierung wurden entspr. Abb. 1.1-3 1984 die **digitale Fernvermittlung DIVF** und 1985 die **digitale Ortsvermittlung DIVO** eingeführt. Sie ersetzen durch rechnergesteuerte Raum- und Zeitmultiplexkoppelfelder die EMD-Wähler und ggf. noch vorhandene ältere Wählersysteme. Damit entfielen die teuren Hochgeschwindigkeits-A/D und D/A-Wandler und konnten auf der Teilnehmerseite im NF-Bereich (dafür allerdings in größerer Zahl) eingesetzt werden. Systemlieferanten sind SEL (System 12) und Siemens (EWSD). Auch diese Stufe ist in der BRD mittlerweile abgeschlossen und bildet das digitale **T-Net** der aus der ehemaligen Deutschen Bundespost hervorgegangenen Deutschen Telekom AG (DTAG).

Auf der fernübertragungstechnischen Seite wurden nach Feldversuchen (z.B. BERKOM) erste LWL-Übertragungsstrecken mit Multimode-, später mit Monomodefasern statt Koaxialleitern, eingesetzt (Kap. 11). Damit wurde der 2,488 Gbps-Bereich mit 30720 Telefonkanälen über eine Leitung erschließbar. Bereits seit 1987 werden hierzulande sämtliche neuen Fernübertragungsstrecken in Lichtwellenleitertechnik verlegt.

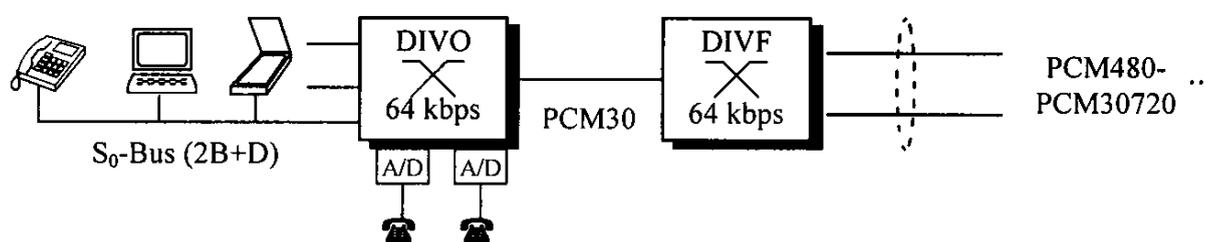


Abb. 1.1-4: Schmalbandige Digitalisierung des Teilnehmeranschlußbereichs.

In der dritten Stufe der Digitalisierung wird entspr. Abb. 1.1-4 seit 1989 dem Tln. der **direkte digitale Zugang** zum nun sog. **ISDN (Integrated Services Digital Network = Dienstintegrierendes Digitales Netz; DTAG: T-Net-ISDN; Kap. 4)** ermöglicht, indem digitale Telefone, aber auch jede andere Art von Endgeräten, die in den vorigen Versionen schon Zugang zum Telefonnetz über Modems hatten, direkt angeschlossen werden können. A/D- und D/A-Wandler sitzen jetzt im Telefon, Telecom-ICs wickeln die unteren Protokollfunktionen der Signalisierung zwischen Endgerät und Netz ab.

Zusätzlich sind Dienstmerkmale, 64kbps-Sprach- und Datenzugang, mehr Kanäle pro Anschluß etc. verfügbar. Analoge und andere digitale Nicht-ISDN-Endgeräte werden über Terminal-Adaptoren (TA) angeschlossen, analoge Telefone ggf. auch über analoge Teilnehmerschaltungen. Der Zugang ist jedoch i.allg. auf 64 kbps beschränkt (**Schmalband-ISDN = S-ISDN**). Das netzinterne Signalisierung wird von einem mächtigen rechnergesteuerten **Zentralkanal-Zeichengabesystem (ZGS#7; Kap. 7)** realisiert.

Diese Stufe der Digitalisierung ist nun technisch (nicht teilnehmerzahlmäßig) abgeschlossen, seit 1995 wird das **S-ISDN** - im folgenden kurz **ISDN** genannt - auch in den neuen Bundesländern flächendeckend angeboten - eine technische und organisatorische Meisterleistung, zumal dort mehrere Generationen Vermittlungstechnik - tlw. bis vor die zwanziger Jahre zurückreichend - durch modernste Digitaltechnik ersetzt wurden.

Die Digitalisierung hat parallel den mobilen Funk, der sich noch in den achtziger Jahren zumindest in der BRD im Dornröschenschlaf befand, integriert. Der **Mobilfunk** evolvierte ebenfalls von analogen Anfängen zu den heutigen Formen digitaler **GSM-Netze** (*Global System for Mobile Communications*; Abschn. 1.6, Kap. 10), bei uns als **D- und E-Netze**. Dies ebenfalls unter Integration von Daten- und Informationsdiensten. Dieser Markt weist enorme Zuwachsraten auf, da im Gegensatz zum Festnetz noch

keine Sättigung eingetreten ist und sich nach der Deregulierung die privaten Anbieter drängen. Aber auch auf der Teilnehmerseite der Festnetze ersetzen **schnurlose Telefone**, analog oder zunehmend digital nach dem **DECT**-Standard (Abschn. 1.6.2.2), das festverdrahtete Telefon. Auch das **Internet** (Abschn. 1.5, Kap. 6) mit seiner ursprünglich nur auf Datenverkehr paketorientierten Struktur, bietet nun Sprachkommunikation.

Die Entwicklung ist damit keineswegs beendet. Zum einen versuchen Dienstleister mit vorhandener Infrastruktur am Markt teilzuhaben und diese Ressourcen auch für die Telekommunikationstechnik zu nutzen. Das sind vor allem klassische Energieversorger, wie RWE, VIAG u.a., die massiv untersuchen, wie die 230V-Leitungen (**Power Line Communications = PLC**, Last Mile) zum Tln. zumindest schmalbandig für die Übertragungstechnik genutzt werden können, ohne daß die der DTAG gehörenden Teilnehmeranschlußleitungen gebührenpflichtig genutzt werden müssen. Vielversprechender erscheint hier das **Wireless Local Loop-(WLL)**-Konzept, das im Teilnehmeranschlußbereich, die Lücke zwischen **DECT** und **GSM-Mobilfunk** schließt.

Auf der High-End-Seite wird die Folgestufe des **Breitband-(B)-ISDN** als eine der Inkarnationen der **ATM-Technik** (Kap. 9) genutzt. Teilnehmeranschlußseitig werden ganze Systeme, wie (Breitband)-LANs (Kap. 8) oder breitbandige Einzelendgeräte, wie Hosts oder Bewegtbildsysteme mit Transparenz der Leistungsmerkmale angeschlossen. Videokonferenzen sind möglich, Multimedia-Terminals werden durch intelligente Netzstrukturen weltweit mit komplexen Datenbasen versorgt.

Bandbreiten können dynamisch zugewiesen werden und nutzen die Übertragungs- und Vermittlungsressourcen weit effektiver als zuvor. Offene Kommunikation ist angesagt, nachdem sich das von der ISO entwickelte OSI-Kommunikationsmodell (Kap. 2) auf allen Gebieten der Endgeräte- und Netzsteuerungstechnik durchsetzt. Breitbandigkeit integriert Rundfunk- und Fernsehtechnik, die zuvor meilenweit vom ursprünglichen Fernsprechnet entfernt waren, auch mit neuen Zugriffsfunktionen statt einfacher Verteilkommunikation.

ADSL-(Asymmetric Digital Subscriber Line)-Technik (Abschn. 9.10) nutzt konventionelle Telefonleitungen für bis zu 8/1,5Mbps-Datenübertragung Down/Upstream, benötigt jedoch einen extern zu implementierenden **Splitter**, der das höherfrequente Datenband vom niederfrequenten **POTS/ISDN**-Band trennt. Anwendungsgebiete sind **Internet** und **Video on Demand (VoD)**. Der Kompromiß **Universal ADSL (UADSL)** mit 1,5/0,384 Mbps kommt mit P&P-Modem ohne Installationsarbeiten beim Tln. aus und verspricht eine für den Netzbetreiber sehr kostengünstige Lösung.

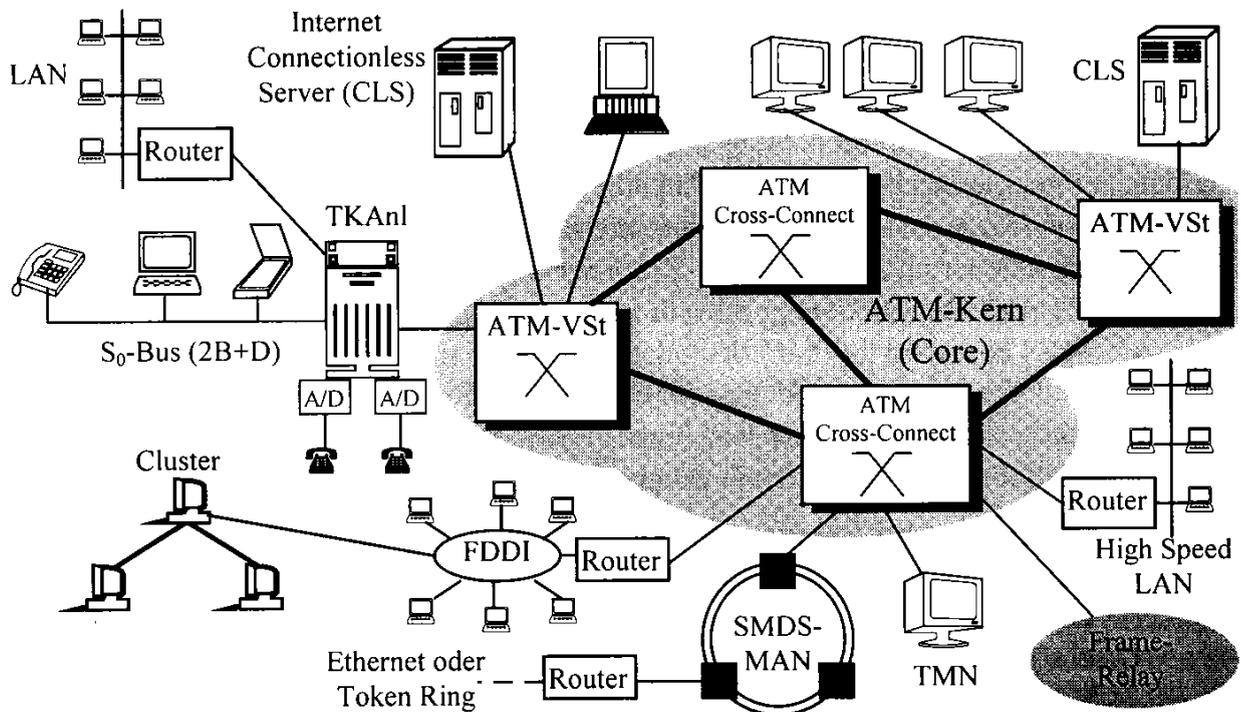


Abb. 1.1-5: Breitbandkommunikation über ATM-Netze mit ATM-Kern und Zugangnetzen.

Zu guter letzt werden Satellitenverbindungen für Fest- und Mobilnetze, aber auch für völlig andere Funktionen, wie das **Global Positioning System (GPS)** (Abschn. 1.7) zur Standortbestimmung und Verkehrsleitsysteme effektiv genutzt, so daß in dieser Stufe von der ursprünglichen Fernsprechtechnik, aus dem die größte Maschine der Welt evolviert ist, vom technischen Standpunkt nicht mehr viel zu spüren ist.

Und dennoch - die Fernsprechfunktion wird eine wichtige Kommunikationsart bleiben - und das Netz wird immer für diese Form der Kommunikation optimiert sein müssen. Europa wird dieser Entwicklung mit 12 - 18 Monaten folgen - Tendenz: verkürzend. Nach dem Gesetz von Moore verdoppelt sich die Rechnerleistung *erst* in 18 Monaten.

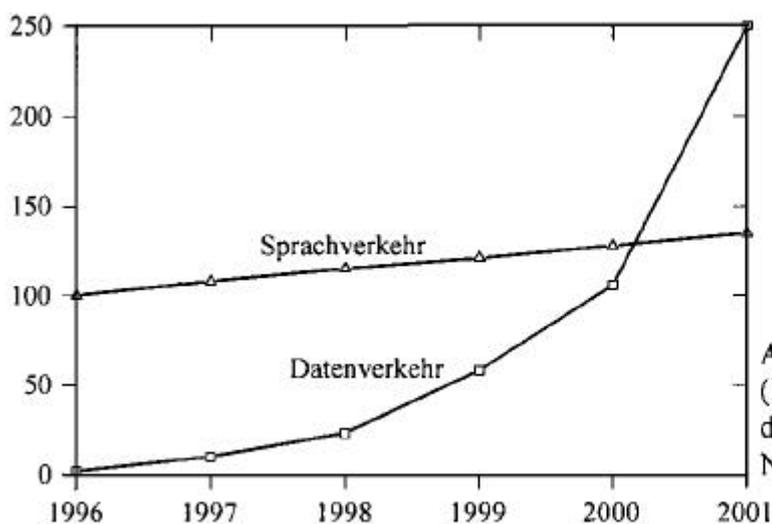


Abb. 1.1-6:
(Prognostizierte) prozentuale Zunahme
des Sprach- und Datenverkehrs in
Nordamerika.

Information, Dienste, Kommunikation, Netze

Kommunikation bedeutet Austausch von Information. Aus der Sicht des Benutzers bzw. Anwenders ist das wichtigste, was ein Netz zu erbringen hat, den für ihn sichtbaren *Kommunikationsdienst*, im folgenden kurz *Dienst* genannt. Ein Dienst bietet Kommunikationsmöglichkeiten, die durch eine bestimmte Klasse von Eigenschaften beschrieben werden [AL, KA2, SM]:

- **Basiseigenschaften**, die der Dienst immer erbringt
- **Optionale Eigenschaften**, die er in Abhängigkeit bestimmter Kriterien erbringt
- Eine **Mindestdienstgüte** (Quality of Service = QoS)
- **Dienstmerkmale**, die den Dienst komfortabel machen.

Ein Dienst ist dann benutzerfreundlich, wenn der Benutzer bei Dienstanwendung so wenig wie möglich über das dienstbringende Netz wissen muß.

Dienstkennzeichnung

Grundsätzlich können Dienste durch verschiedene Eigenschaftsklassen bzw. -typen unterschieden werden. Diese Typen können verschiedene Werte annehmen:

- **Informationsart: Sprache, Text, (Stand- und Bewegt-) Bild, Daten**
Diese vier werden oft auch als *Aggregatzustände der Information* bezeichnet. Genauso wie Materie verschiedene ineinander überführbare Aggregatzustände einnehmen kann, kann dieselbe Information als gesprochenes Wort vorliegen, niedergeschrieben sein, visualisiert werden oder z.B. durch Sprachspeicherung in Datenform vorliegen. Das geht zwar nicht für jeden Informationsinhalt, insofern der Vergleich mit der Materie manchmal hinkt, aber häufig. Die vier obigen Begriffe werden auch in den Farben rot, gelb, grün und blau zuweilen als ISDN-Logo verwendet.

Aus dieser Sicht ist eine andere Art der Informationsarteneinteilung die Klassifizierung in

- **Nutzinformation (User Information = U)**,
mit der im Prinzip jede der obigen vier gemeint sein kann.
- **Steuer- oder Signalisierungsinformation (Control Information = C)**,
z.B. beim Fernsprechen Hörer abheben/auflegen (OFF HOOK/ON HOOK),
Wahlzifferneingabe, Dienstmerkmalaktivierungen wie *Rufumleitung*.
- **Managementinformation (M)**,
mit der ein Netzbetreiber sein Netz konfiguriert, überwacht, wartet, Statistiken erstellt, Festverbindungen einrichtet und löscht, Beziehungen zu anderen Netzbetreibern, Dienst Anbietern und Kunden unterhält, etc.

- **Kommunikationsart:**
 - **Dialog:** Zwei oder mehr Kommunikationspartner tauschen individuell, bidirektional und simultan (→Echtzeitanforderungen) Informationen aus. Typische Dienste, die diese Kommunikationsart nutzen, sind Fernsprechen und Bewegtbildkommunikation, letztere meist in der Kombinationsform als Bildfernsprechen.
 - **Verteilkommunikation oder Rundsenden (Broadcast):** *Ein* Sender mit *vielen* Empfängern; unidirektional. Dienste sind Rundfunk und Fernsehen.
 - **Abrufkommunikation:** Ein Kommunikationspartner ruft individuell auch anderen Personen zugängliche Informationen ab; bidirektional unsymmetrisch, d.h. hohe Nutzbandbreite vom Informationsanbieter zum Individuum, geringe Signalisierungsbandbreite in umgekehrter Richtung. Dienste: Bildschirmtext (Btx), Fax-Abruf und *Video on Demand (VoD)* z.B. über ADSL).
- **Bandbreitenbedarf:**
 - **Konstant:** Praktisch alle Dialogdienste und Kommunikationsarten, bei denen der Zeitbezug des Ablaufs von Bedeutung ist.
 - **Burstartig, gering:** typisch für Fernmessung (Telemetrie) mit wenigen bps (Bit pro Sekunde).
 - **Burstartig, hoch:** Datenübertragung; in einem eng begrenzten Zeitraum Mbps, dann evtl. für Stunden keiner.
 - **Schmalbanddienste:** üblicherweise ≤ 64 kbps. Der Wert kommt aus der in Abschn. 1.3.1.2 begründeten Sprachdigitalisierung in Fernsprechqualität. Diese Bitrate stellt einen sog. Standard-Schmalband-Basiskanal dar. Auf ganzzahligen Vielfachen davon basieren praktisch alle Multiplexstrukturen. Die meisten Informationsarten und derzeitigen Anwendungen kommen noch mit dieser Bandbreite aus. Ausnahmen sind z.B. großflächige hochauflösende schnelle Bewegtbilder, Austausch großer Datenmengen, bandbreitenintensive Echtzeitkommunikation.
 - **Weitbanddienste:** $n \cdot 64$ kbps, wobei n eine kleine natürliche Zahl ist (z.B. $n = 2 \dots 30$, was max. ca. 2 Mbps entspricht). Hiermit kann Schmalbanddiensten eine höhere Qualität angeboten werden, z.B. bei Sprache ein höhere Analogbandbreite, bei Bildübertragungen eine bessere Auflösung oder mehr Farben.
 - **Breitbanddienste:** ca. >2 Mbps ... 10 Gbps (und darüber). Anwendungen bei hochqualitativen Bewegtbildübertragungen (z.B. HDTV mit 565 Mbps) und hierarchisch hochstehenden Multiplexstrukturen (z.B. 30720 Fernsprechverbindungen à 64 kbps über eine Leitung).

Eigenschaften von Netzen

Telekommunikationsnetze bestehen aus

- **Übertragungswegen:**
Teilnehmeranschlußleitungen, Netzknotenverbindungen, Querleitungen, Freiraum (z.B. Richtfunk- oder Satellitenstrecken, Wireless Local Loop) etc.
- **Übertragungseinrichtungen:**
Regeneratoren, Modulatoren/Demodulatoren, Leitungstreiber, optisch/elektrische und elektrisch/optische Wandler, Verwürfler (Scrambler) etc.
- **Vermittlungseinrichtungen:**
Früher: Dreh-, Hebdreh-, EMD-Wähler, Relais.
Heute: Elektronische Raum- und Zeitkoppelpunkte, Muldexe (Multi/Demultiplexer), Brücken, Router, Speicher, Steuerungen für Koppelpunkte, evtl. Gateways.
- **Endgeräten:**
Im ISDN z.B. allgemein als TE (Terminal Equipment), bei Datennetzen als DEE (Datenendeinrichtung) bezeichnet. Sie werden häufig nicht als unmittelbarer Bestandteil des Netzes gezählt. Ihre Anbindung an das Netz geschieht meist über spezielle Übertragungseinrichtungen, beim ISDN z.B. über NTs (Network Terminators; NTBA), bei Datennetzen über DÜEn (Datenübertragungseinrichtungen wie Modems). Letztere gehören zum Netz und damit eigentlich zur o.a. zweiten Gruppe.

Als **Übermittlung** bezeichnet man in diesem Zusammenhang die beiden Grundfunktionen eines solche Netzes: **Übertragung** und **Vermittlung**.

Telekommunikationsnetze können wie Telekommunikationsdienste durch verschiedene Eigenschaften beschrieben werden. Viele Netze weisen mehrere dieser Eigenschaften gleichzeitig auf:

- **Grad der Dienstintegration:**
 - **Dienstspezifische Netze (Dedicated Networks):**
Vertreter hierfür sind praktisch alle klassischen Netze: Fernsprechnet, Leitungsvermittelteres Datennetz, Paketvermittelteres Datennetz, Telexnetz etc.
 - **Diensteintegrierende Netze (Integrated Service Networks):**
(S)-ISDN, Breitband-ISDN (B-ISDN) in ATM-Technik, Internet.
- **Intelligentes Netz (Intelligent Network = IN):**
Architektur von ITU-T/ETSI, die die konsequente Trennung von **Verbindungssteuerung (Connection Control)** und **Diensteunterstützung** vorsieht. Entsprechend gibt es **dienstneutrale Vermittlungsknoten (Service Switching Point = SSP)** und **zentrale Dienststeuerungsknoten (Service Control Point = SCP;** s. auch Abschn. 1.8)

- **Geographische Ausdehnung:**
 - **Ortsnetze (Access Networks)**, an denen die Teilnehmer angeschlossen sind
 - **Fernnetze**, die in mehreren Hierarchiestufen Ortsnetze verbinden. Hierzu gehören auf internationaler Ebene auch Satellitennetze.
 - **Flächendeckende Netze** wie *Wide Area Networks (WAN)* und *Metropolitan Area Networks (MAN)*, z.B. als Zubringernetze für campusbeschränkte Privatnetze an öffentliche Netze.
- **Konfiguration**
 - **TKAnl (Telekommunikationsanlagen, engl.: Private Automatic Branch Exchange = PABX)**, die aus den früheren *Nebenstellenanlagen (NStAnl)* hervorgegangen sind, mit Zentralsteuerung und auf Fernsprechverkehr optimiert. Im allgemeinen auf Campusgelände beschränkt.
 - **Lokale Netze (Local Area Networks = LANs)** auf Datenverkehr optimiert und i.allg. auf Campusgelände beschränkt.
 - **CENTREX-Netze (Central Office Exchange)** bei der ein öffentlicher Netzbetreiber eine **TKAnl** in seinem Netz für einen Kunden konfiguriert, so daß dieser keine eigene **TKAnl**-Hardware mehr benötigt.
 - **Corporate Networks** sind diensteintegrierende Firmennetze, die ggf. weltweit **TKAnl** und **LANs** der Niederlassungen eines Unternehmens vernetzen.
 - **Virtual Private Networks (VPNs)** bilden typisch IN/Internet-basierte logische Netze im öffentlichen Netz mit ausgefeilter Sicherheitstechnik, in die sich autorisierte Personen von Anschlüssen des physikalischen Netzes einwählen.
- **Vermittlungsmethode:**
 - **Leitungsvermittelte od. Durchschaltenetze (Switched Circuit Network = SCN)**, bei denen der Informationsfluß kontinuierlich mit permanent fester Bandbreite über für die Dauer der Verbindung festgeschaltete Kanäle das Netz durchläuft (Fernsprechnet, bis 1997: Datex-L = Dx-L). Nach Verbindungsaufbau wird für die Nutzinformation keine Bearbeitungsleistung durch das Netz mehr benötigt.
 - **Paketvermittelte Netze**, bei denen dem Informationsfluß zwar anschlusmäßig eine feste Bitrate zugeordnet ist, aber *unterschiedlich lange* (frame-orientierte) oder *gleichlange und unterschiedlich häufige* (zellorientierte; cell-oriented) Datenpakete das Netz durchlaufen. Die Datenrate ist hier ein statistischer Mittelwert. Das Netz muß die Pakete in den Knoten (Packet Handler) unterschiedlich lange zwischenspeichern können. Da keine Kanäle in Form von sich zyklisch wiederholenden Zeitschlitzten einer Verbindung zugewiesen sind, spricht man im Gegensatz zu *leitungsvermittelten Verbindungen* von *virtuellen Verbindungen*.
 - **Festverbindungen**, z.B. Direkttrufnetze, aber auch in den o.a. Netzen können vom Netzbetreiber semipermanente (veraltet) oder permanente Verbindungen konfiguriert werden. **Datendirektverbindungen (DDV)**, **Standardfestverbindungen (SFV)** und **Internationale Mietleitungen (IML)** schalten für einen Kunden verschiedene Firmen-

standorte transparent (*Clear Channel*) zusammen. Vor allem *IML* können neben terrestrischen auch Satellitenverbindungen einbeziehen und erfordern einen international agierenden Dienstleistungsanbieter.

Ein weiteres Unterscheidungskriterium unterteilt paketvermittelte Netze in

– **Verbindungsorientierte Vermittlung:**

Die Verbindung läuft in den Phasen *Verbindungsaufbau*, *Nutzinformationsübertragung*, *Verbindungsabbau* ab. Auch wenn keine Information zu übertragen ist, haben alle an der Verbindung beteiligten Netzknoten Daten über die Durchschaltung dieser Verbindung gespeichert. Diese Vermittlungsart kennt also *Zustände*.

– **Verbindungslose Vermittlung:**

Typisch für LAN-Datenverkehr. Eine DEE sendet ein Datenpaket (Datagramm) an eine andere ohne sich vorher anzumelden. Vor und nach dem Weg des Datagramms durch das Netz besteht in den Vermittlungsknoten keine Informationsspeicherung über einen Kommunikationsbezug dieser beiden DEEn. Diese Vermittlungsart kennt *keine Zustände*.

• **Zugriffstechnik** der Endgeräte auf das Netz:

– **Zentralgesteuerte:**

mit Zugangssteuerung in den Netzknoten, typisch für öffentliche Netze. Netzknoten sind die Master, Endgeräte die Slaves.

– **Demokratische oder Statistische:**

ohne Zentralsteuerung, sondern in Form von Zugriffsalgorithmen, die die Endgeräte unmittelbar auf dem Übertragungsmedium abwickeln (*Medium Sharing*), typ. für Lokale Netze.

• **Mobilität der Netzkomponenten:**

– **Leitungsgebundene Netze** mit den **Übertragungsmedien:**

– **Verdrillte Kupferleitungen** (*Twisted Pair = TP*) für niedrige Bandbreiten ohne metallische Ummantelung (*Unshielded TP = UTP*), für höhere Bandbreiten ummantelte (*Shielded TP = STP*).

– **Koaxialleitungen** für höhere Bandbreiten.

– **Lichtwellenleiter** (LWL), für niedrige Bandbreiten in Plastikausführung, besser Quarzglas mit dickkernigem Stufenprofil (kbps bis Mbps); für hohe Bandbreiten Gradientenprofil-Multimodefasern (Hunderte Mbps) und höchste Bandbreiten Monomodefasern (viele Gbps, oder große Leitungslängen bis über 100 km und gleichzeitig Bandbreiten bis in den Gbps-Bereich). Die seit 1996/97 verfügbare *Dense Wavelength Division Multiplex*-Technologie (*DWDM*) vervielfacht diese Raten bis in den Tbps-Bereich.

– **Funknetze** mit dem Übertragungsmedium Freiraum. Dazu gehören

– **Festinstallierte** Netze, wie Rundfunk- und Fernsehnetze, geostationäre Satellitennetze.

- **Mobilfunknetze:** Beispiele: *C*-Netz, *GSM/DCS*-Netze (*D*, *E*). Hier sind eigentlich nur die Endgeräte (Mobile Stationen) mobil, das Netz selbst ist stationär. Eine Variante sind die schnurlosen Telefone, bei denen die an sich stationären Endgeräte in Fest- und Mobilanteil aufteilbar sind. Wirklich mobile Netze, bei denen auch die Vermittlung mobil sein kann, findet man eigentlich nur im militärischen Bereich. Vermittlungstechnisch vernetzte MEO- und LEO-Satelliten (*Iridium*, *TELDESIC*) könnte man auch hierzu rechnen.
- **Übertragungsbandbreite:**
Dieser Begriff resultiert aus dem im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Bandbreitenbedarf der Dienste und ist oft 1:1 abbildbar. Man unterscheidet daher Schmalbandnetze und Breitbandnetze. Ein Breitbandnetz kann aber auch für (64 kbps)-Schmalbanddienste sinnvoll sein, und zwar bei der Verwendung hoher Multiplexstufen (PCM30720; s.o.). Im allgemeinen sind unterschiedliche Technologien für Schmal- und Breitbandrealisierungen einzusetzen. Dort TTL- und CMOS-Technologie, hier ECL oder GaAs-FETs.
- **Übertragungstechnik:**
Analoge und *digitale* Netze. Diese Begriffe sind eigentlich stark pauschalierend. Besser ist die Unterteilung in *analoge und digitale* (physikalische) *Signale*, *analoge und digitale Dienste*, sowie *Information*, deren Eigenschaften *nicht sinnvoll in analog und digital* unterteilbar ist. Diese Begriffsreihenfolge ist hierarchisch aufsteigend. Eine 1:1-Abbildung ist oft sinnvoll, aber nicht zwingend.
Analoger Dienst auf analogem Signal wird z.B. durch Fernsprechen im Fernsprechnetz repräsentiert,
digitaler Dienst auf digitalem Signal z.B. durch Textübermittlung im Datex-Netz.
Analoger Dienst auf digitalem Signal ist eine elementare Dienstleistung des ISDN für Fernsprechen,
digitaler Dienst auf analogem Signal: Textübermittlung mit Modem in analoge Schwingungen umgewandelt und über das Fernsprechnetz übertragen.
Die jeweils dazugehörige Information kann für Fernsprechen und Textübermittlung die gleiche sein, womit gezeigt ist, daß (in diesem Kontext!) *Information* die Attribute *analog* und *digital* nicht aufweist.
Weiterhin ist zwischen *asynchroner* (alt, langsam) und *synchroner* (neu, schnell) Übertragungstechnik zu unterscheiden. Im ersten Fall wird für jedes einzelne Zeichen ein momentaner Synchronismus hergestellt (vgl. hier nicht weiter besprochener Telex-Dienst), die Zeichenfolge gehorcht jedoch nicht einem synchronen Takt-raster, wie es bei der zweiten Zugriffsart der Fall ist. In Synchronnetzen können auch ursprünglich asynchron gesendete Signale z.B. durch *Überabtastung (Oversampling)* in synchrone umgewandelt werden.
- **Übertragungsrichtung:**
 - **Einwegkommunikation (Simplex = Sx):**
typisch für Verteilnetze wie Rundfunk und Fernsehen (Broadcast).
 - **Alternative Zweiwegkommunikation (Halbduplex = HDx):**
typisch für Meldenetze. Es kann zwar in beide Richtungen gesendet werden, aber nicht zu einem Zeitpunkt.

- **Simultane Zweiwegkommunikation (Vollduplex = Dx):**
typisch für heutige Telekommunikationsnetze. Es kann zu jedem Zeitpunkt in beide Richtungen gesendet werden. Streng genommen muß man für diesen Fall noch zwischen *Übertragungsrichtung* und *Kommunikationsrichtung* unterscheiden. Eine Fernsprechverbindung ist zwar *physikalisch vollduplex*, *kommunikationsmäßig aber halbduplex*: wenn einer redet, schweigt der Kommunikationspartner (meist).
- **Netztopologie:** die wichtigsten sind
 - **Stern** (bei Erweiterungen **Baum**),
 - **Ring** (bei Erweiterungen **Maschen**),
 - **Bus- oder Linien**,
 - **Mischformen** aller oben erwähnten.

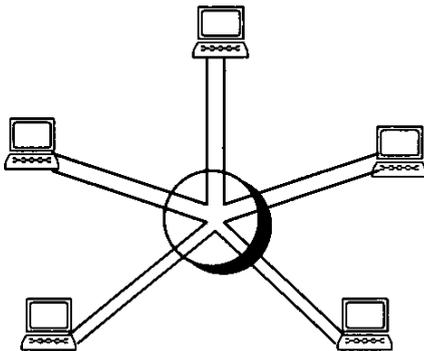


Abb. 1.2-1: Physikalische Stern- und logische Ringtopologie.

Es soll darauf hingewiesen werden, daß man oft zwischen *physikalischer* und *logischer* Topologie unterscheiden muß. Das Netz in Abb. 1.2-1 zeigt *physikalische Sterntopologie*, da im Knoten aber keine Zentrale Steuerung sitzt, weist es *logisch Ringtopologie* auf. Auch mit den anderen Topologien sind entsprechende Kombinationen möglich, typisch für LANs.

Das (analoge) Fernsprechnet

Seit Ende 1997 ist das Fernsprechnet der DTAG - nun als *T-Net* bezeichnet - intern vollständig digitalisiert. Seit 1994 besteht die Fernebene aus 23 vollvermaschten *DIVF* sowie regional aus ca. 500 *DIVO*. Die weitere Migration mit nun auch digitalen Teilnehmeranschlüssen ist das *T-Net-ISDN*. Beschrieben sei zunächst die klassische Struktur mit national vier Stufen.

Übertragungstechnisch besteht das (öffentliche) *Fernsprechnet (Public Switched Telephone Network = PSTN)* aus den Teilnetzen

- **Leitungsnetz**
mit der in Abschn. 1.1 vorgestellten NF-Technik auf den Teilnehmeranschlußleitungen, und aus TF-Technik oder PCM-Technik zwischen den Vermittlungsstellen.
- **Richtfunknetz** im Frequenzbereich von grob 0,2 - 40 GHz [KI, Pi]
- **Fernmeldesatellitennetz** im Frequenzbereich von grob 4 - 30 GHz.

Netzhierarchie

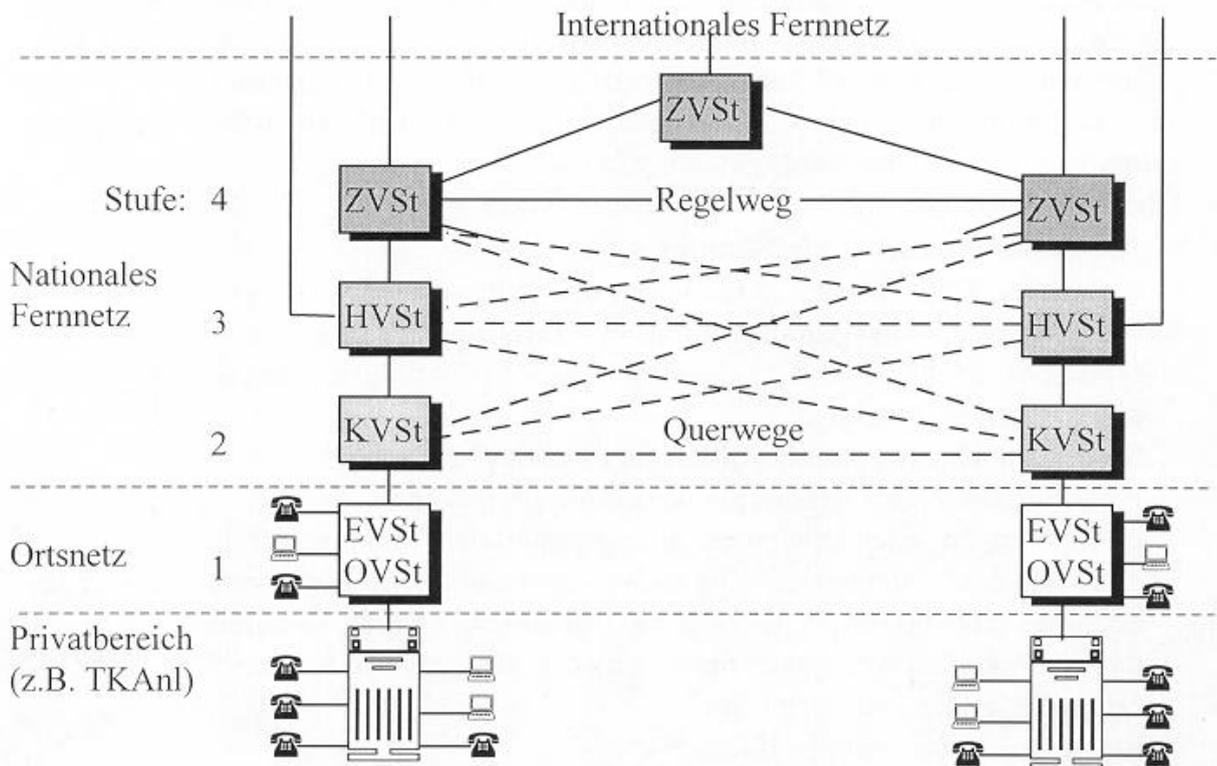


Abb. 1.2-2: Vierstufige Hierarchie des nationalen analogen Fernsprechnetzes. Im T-NET-(ISDN) wird die Ortsnetzebene 1 von DIVO realisiert, die nationale Fernebene 2 - 4 von DIVF.

Übertragungstechnisch besteht das (öffentliche) *Fernsprechnet* (*Public Switched Telephone Network = PSTN*) aus den Teilnetzen

- **Leitungsnetz** mit der in Abschn. 1.1 vorgestellten NF-Technik auf den Teilnehmeranschlußleitungen, und aus TF-Technik oder PCM-Technik zwischen den Vermittlungsstellen.
- **Richtfunknetz** im Frequenzbereich von grob 0,2 - 40 GHz [KI, Pi]
- **Fernmeldesatellitennetz** im Frequenzbereich von grob 4 - 30 GHz.

Das nationale Netz ist entsprechend Abb. 1.2-2 *hierarchisch* mit vier Stufen aufgebaut. Dies manifestiert sich im Rufnummernsystem, bei dem üblicherweise für den ländlichen Bereich vier Vorwahlziffern gewählt werden müssen. Die Kennzahlvergabe ist also *netzgebunden*, d.h. aus der Stelle und dem Wert einer Vorwahlziffer kann man (meist) eindeutig auf die VStn schließen. Ist die Vorwahlzifferanzahl geringer, handelt es sich um *verdeckte VStn*, wenn VStn mehrerer Hierarchiestufen in einem Gebäude, was bei Städten oft der Fall ist, untergebracht sind [GE2, SI, SR].

Bei einer gegebenen Hierarchiestufe können bei dieser Kennzahlvergabe i.allg. entsprechend unserem Dezimalsystem bis zu zehn VStn der nächstniedrigen Stufe zugeordnet sein. Manchmal ist es aufgrund geographischer Verteilungen der Tln. sinnvoll, mehr als zehn VStn der nächstniedrigen Stufe anzuschließen, dann handelt es sich um Doppel-VStn und die Kennzahlvergabe ist ebenfalls anders gestaltet.

Bei netzgebundener Ortsnetzkenzahlvergabe entspricht die Ziffernreihenfolge dem Stellenwert des im folgenden angegebenen VSt-Typs. Die höchste Stufe bilden die

- **Zentralvermittlungsstellen (ZVSt)**,
von denen es *acht* gibt, und die in großen Städten, wie Düsseldorf (2), Frankfurt (6) oder München (8) untergebracht sind. Auf dieser Ebene ist das Netz voll vermascht, in Bezug auf die darunterliegenden Ebenen ein Sternnetz höherer Ordnung.
- **Hauptvermittlungsstellen (HVSt)**
Wir erkennen aus der Abbildung, daß es aber auch direkte Querwege (auch Querleitungsbündel oder Direktwege genannt) zwischen ZVStn und ihnen nicht unmittelbar zugeordneten HVStn, verschiedenen HVStn, HVStn und KVStn, ja auch zwischen ZVStn und KVStn geben kann. Dies kann sinnvoll an Grenzen verschiedener VSt-Einzugsbereiche sein. ZVStn und HVStn können auch den unmittelbaren Zugang zum Internationalen Fernnetz ermöglichen, letztere besonders dann, wenn sie in der Nähe der Staatsgrenze liegen (die BRD hat immerhin neun unmittelbare Nachbarstaaten).
- **Knotenvermittlungsstellen (KVSt)**
- **Orts- und Endvermittlungsstellen (OVSt und EVSt)**
Nur hier sind die Tln. angeschlossen (**Central Office = CO**). EVStn sind OVStn, die einen unmittelbaren Zugang zu KVStn haben. OVStn, die keine EVStn sind, können die Fernebene nur über EVStn erreichen. Die mittlere Leitungslänge vom Tln.-Endverzweiger zur OVSt beträgt ca. 2,3 km.

Verbindungsaufbau

Wählt man zum Aufbau einer Verbindung eine 0 und dann eine Ziffer > 1 vor, so versucht das Fernsprechnetzt aus den nachfolgenden Ziffern zunächst die kürzestmögliche Wegstrecke unter Ausnutzung der o.a. Direktverbindungen zu finden (**alternative Verkehrslenkung**). Stehen hierfür Querwege zur Verfügung, stellt der kürzeste den **Erstweg** dar; ist hierüber z.B. aus Lastgründen keine Durchschaltung möglich, wird der nächstlängere **Zweitweg** versucht usw. Führt keiner der Querwege zum Erfolg, muß der **Letztweg** - der **Kennzahlweg** über die nächsthöhere Hierarchiestufe gewählt werden.

Klassische Dienste in öffentlichen Netzen

Datendienste

Als Da(ten)tel(e)dienste bezeichnet man im wesentlichen die Dienstgruppe, die es ermöglicht, Daten *transparent*, d.h. ohne weitere Bearbeitung im Netz, im

- **Fernsprechnetz (PSTN)**,
- **leitungsvermittelten Datennetz (Datex-L; DATA EXchange; allg. Circuit Switched Public Data Network = CSPDN)**, sowie im
- **paketvermittelten Datennetz (Datex-P = Dx-P; allg. Packet Switched Public Data Network = PSPDN)** zu übermitteln.

Die beiden letztgenannten bilden zusammen mit dem Telexnetz das **IDN (Integriertes Text- und Datennetz)** [AL, CO, GE2, KA1].

Datenübermittlung im Fernsprechnetz

Die ITU-T-Empfehlungen der **V-Serie** beschreiben entspr. Abb. 1.4-1 u.a. die Schnittstellen zwischen DEE, z.B. einem PC, und DÜE, hier ein Modem, die den Zugriff auf das Fernsprechnetz ermöglicht. Am Modem kann oft noch ein Telefon angeschlossen werden, so daß entweder telefoniert oder Datenverkehr auf der zweidrähtigen a/b-Leitung zum Netz gefahren werden kann. Schnittstellenleitungen und mechanische Eigenschaften werden in der Empfehlung V.24 beschrieben. Es handelt sich hier um *bitserielle* Datenübertragung, im Gegensatz zu *bitparalleler*, die z.B. bei der Centronics-Schnittstelle zu Druckern, als einer systeminternen Schnittstelle, üblich ist [TI1].

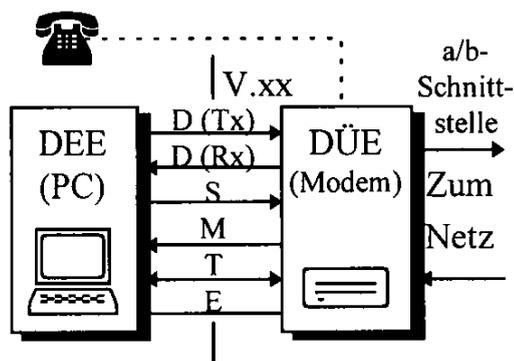


Abb. 1.4-1:
V-Schnittstellenkonfiguration zum Anschluß einer DEE über eine DÜE an das Fernsprechnetz.

Diese V-Empfehlungen untergliedern sich in Gruppen, von denen die wichtigsten sind:

- **Allgemeines (V.1 - V.8bis)**

legt grundlegende Parameter für die Datenübertragung über das Fernsprechnetz fest, wie Leitungspegel, Internationales Telegraphen-Alphabet 5 (IA5) für Zeichenübertragung, Begriffsdefinitionen, Prozeduren zum Start einer Sitzung.

- **Schnittstellen und Sprachband-Modems (V.10 - V.34)**

Hier finden sich wichtige konkrete Modem-Spezifikationen, unter V.15 der mittlerweile veraltete Akustikkoppler, V.17 für Faxanwendungen (G3) bis 14,4 kbps, V.24 mit der Liste der Definitionen für Leiterkreise zwischen DEE und DÜE. Der momentan wohl wichtigste Modemstandard ist V.34 mit Bitraten bis 33,6 kbps. V.25ter (jetzt: V.250) ist eine Empfehlung für die automatische serielle Wahl, die wesentliche Elemente des *AT*(ention)-Befehlssatzes (US-Industrie-Standard, entwickelt von der Fa. Hayes) enthält. Dieser **Hayes-Standard** stellt für die Modems neuerer Generation *die* Kommunikationssprache dar, mit der bestimmte Funktionen ausgeführt werden können. Dazu gehören *Änderungen der Voreinstellungen, Modemlautsprecher leise/laut, Wählen ignorieren etc.*

- **Weitband-Modems (V.36 - V.38)**

Die älteren V.36 und V.37 spezifizieren Modems für 60 - 108 kHz, also auf analogen TF-Leitungen, der neuere Standard V.38 eine DEE für 48/56/64 kbps für digitale Punkt-zu-Punkt-Mietleitungen.

- **Fehlerüberwachung (V.41 - V.43)**

spezifiziert Fehlerbehandlungsprozeduren, Datenkompression und Flußsteuerung. Aktuell ist V.42 von Bedeutung, die das in Abschn. 4.3 vorgestellte HDLC-Protokoll, hier in der Variante **LAPM (Link Access Procedure Modem)** beschreibt. V.42[bis] beschreibt ein damit häufig kombiniertes *Datenkompressionsverfahren*, das Kompressionsgewinne bis zum Faktor 3 ermöglicht. Man muß bei Modems, die diese Spezifikation(en) mit einbeziehen, darauf achten, daß die Anbieter hier oft einen um diesen oder ähnlichen Faktor höhere Bitrate angeben, die jedoch nur erreicht wird, wenn sowohl die Daten entsprechend komprimierbar sind als auch das Partnermodem diese Funktion aufweist.

- **Übertragungsqualität und Wartung (V.50 - V.58)**

mit Gerätebeschreibungen für Schleifentests und Rauschmessungen.

- **Simultanübertragung von Daten und anderen Signalen (V.61 - V.90)**

Aktuell wichtiger Standard V.90 (9/98) als digitales/analogen Modempaar zur Benutzung im öffentlichen Telefonnetz mit Bitraten bis 56 kbps DEE ← Netz (Downstream) und bis 33,6 kbps DEE → Netz (Upstream).

- **Zusammenwirken mit anderen Netzen (Interworking; V.100 - V.140)**

Hier geht es vor allem um Spezifikationen für das Zusammenwirken von Analogengeräten mit dem ISDN, welches in Kap. 4 behandelt wird.

Die Bitraten, mit denen auf öffentliche Datennetze zugegriffen werden kann, sind in der ITU-T-Empfehlung X.1 festgelegt und haben für das Fernsprechnet u.a. Werte nach Tab. 1.4-1. Bei der Art und Weise des Zugriffs ist außer diesen Geschwindigkeitsklassen zunächst das Modulationsverfahren von Bedeutung, das angibt, auf welche Weise der binäre Bitstrom von der DEE im Modem auf analoge Schwingungen umgesetzt wird [Gu, Scha].

ITU-T-Spezifikation(en)	Bitrate [kbps]	Modulationsverfahren	a/s	Übertragungsrichtung	Anwendung
V.17	2,4/7,2/9,6/12,0/14,4	QAM	s	HDx	G3-Fax
V.21	0,3	BFM	a/s	Dx	DÜ
V.22[bis]	0,6/1,2/[2,4]	PDM[QAM]	a/s	Dx	DÜ
V.23	0,6/1,2	BFM	a	HDx m.H. 75bps	altes Btx
V.26[bis, ter]	1,2/2,4	PDM	s	HDx m.H. 75bps	DÜ veraltet
V.29	2,4/4,8/7,2/9,6	QAM+PDM	s	HDx/Dx	DÜ veraltet
V.32(alt) [bis; terbo(neu)]	2,4/4,8/[7,2]/ 9,6/[14,4;19,2]	QAM	a/s	Dx	DÜ, Fax
V.33	2,4 ... 14,4	QAM+PDM	s	Dx	DÜ
V.34	2,4 ... 33,6	QAM+PDM	a/s	Dx unsymmetrisch	DÜ aktuell

Tab. 1.4-1: ITU-T-Modem-Spezifikationen der V-Serie. Es bedeuten: a/s = a/synchron, BFM = Binäre Frequenz-, QAM = Quadratur-Amplituden-, PDM = Phasendifferenzmodulation.

Weiterhin ist zwischen *asynchronem* und *synchronem* Zugriff entsprechend den Erläuterungen in Abschn. 1.2.2 zu unterscheiden. Die Übertragungsrichtung kann je nach Spezifikation aus der Gruppe Sx evtl. mit Rück- oder Hilfskanal (m.H.) von einigen zehn bps, HDx oder Dx sein. Tab. 1.4-1 gibt eine Übersicht über die heute noch und die aktuellen gebräuchlichen Modem-Spezifikationen. Neuere Standards, wie K.56flex (56 kbps) und V.90 sind oft (noch) nicht kompatibel und können dann nur im V.34-Modus betrieben werden.

Sonstige wichtige Modemstandards stellen die *Duplex-Microcom Networking Protokolle 1 - 10 (MNP)* der US-Fa. Microcom dar, von denen heute die Versionen 4 - 10 von Bedeutung sind. Die DEE-Schnittstelle ist asynchron ausgeführt, die Leitungsschnittstelle synchron. Zusätzlich wird ab Version 5 Einzeldatenkompression zur Steigerung der effektiven Datenrate um max. 200% eingesetzt.

Heutige Modems sind üblicherweise keineswegs auf die Datenübertragung zwischen PCs beschränkt, sondern dienen, neben der Realisierung der meisten obigen Schnittstellenstandards in einem Gerät, gleichzeitig als G3-Telefax- und Btx-Transceiver zum PC. Es gibt sie preiswert für oft kaum 100 DM als externe Standalone-Geräte oder als PC-Einsteckkarten. Hierfür müssen sie SW-Schnittstellen zu Standard-Betriebssystemen, wie Windows oder MacOS aufweisen, damit der Benutzer mit den ihm gewohnten Masken (z.B. Pull-Down- oder Pop-Up-Menüs) auf Einstellungen und Funktionen zugreifen kann.

Anhand dieser Zusammenstellung ist erkennbar, daß aufgrund des parallel zur Entwicklung des ISDN noch vorhandenen Potentials der Analogtechnik und in Anbetracht der in der BRD relativ hohen Grundkosten für die beiden obligaten B-Kanäle, die im Privatbereich eigentlich selten gleichzeitig gebraucht werden, zu erwarten ist, daß sich auch für PC-Anwender das Eindringen des ISDN in den Privatbereich verzögern wird. Dies auch im Hinblick auf ADSL, das zwar den Schmalbandanschluß keineswegs obsolet macht, aber mit dem PSTN-Anschluß umfassend kombiniert.

Datenübermittlung im leitungsvermittelten Datennetz

Die ITU-T-Empfehlungen der *X-Serie* spezifizieren hier die Schnittstelle zwischen DEE und DÜE. Aufgrund der Tatsache, daß das Fernsprechnet heute jeden Geschäfts- und Privat-Tln. erreicht, auf das IDN jedoch praktisch nur von geschäftlich genutzten Anschlüssen zugegriffen wird, ist die Verbreitung dieser X-Schnittstellen erheblich geringer als die der V-Schnittstellen und insbes. kein Wachstumsmarkt [TI2, TI3].

Das Dx-L-Netz wurde vor allem auch benötigt, um Erfahrungen mit digitalen Netzen zu gewinnen, die in die Konzeption des ISDN eingeflossen sind. Das Dx-L hat damit ausgedient, sein Betrieb wurde mittlerweile eingestellt.

Datenübermittlung im paketvermittelten Datennetz (Dx-P)

Die Paketvermittlungstechnik unterscheidet sich von der leitungsvermittelten Technik dadurch, daß einzelne Datenblöcke höherer Schichten (z.B. eine DIN A4-Seite Text mit ca. 2 kB bis 10 kB) in Form von Paketen mit einem Kopf (Header) zur Steuerung und meist noch mit einem Schwanz (Trailer) zur Datensicherung verpackt werden. Die unterschiedlich langen Pakete werden dann auf synchronen Bitpositionen durch das Netz vermittelt, sind aber nicht zyklisch wiederholten Zeitschlitzten zugeordnet. Im Gegensatz zur leitungsvermittelten Technik müssen Packet-Handler im Netz jedes Paket separat aufnehmen, auf Korrektheit überprüfen und weiterleiten, was entsprechende Prozessorleistung und Zwischenspeicher benötigt (s. auch Abschn. 6.2).

Diese Übermittlungsmethode ist effizient für burstartigen Verkehr, wie er für DEE in Gegensatz zu Sprachverkehr charakteristisch ist: Daten kommen *stoßweise gehäuft*, mit langen Pausen zwischen den Bursts, im Gegensatz zur *gleichmäßig dahinplätschernden* PCM-Bitstrom. Der Datex-P-Dienst wurde 1981 nach einjähriger Probezeit in der BRD in das IDN integriert, wobei die VStn SL 10 der Fa. Northern Telcom zum Einsatz kommen. Betreiber ist heute die T-Data, eine 100%ige DTAG-Tochter.

Auch hierfür sind die Bitraten in der Empfehlung X.1 festgelegt. Bedeutung haben heute die Raten 1,2/2,4/4,8/9,6/12,0/14,4/19,2/28,8 und 48 kbps bis zu 1,92 Mbps. Die Tln.-Netzschnittstelle wird in der Empfehlung X.25 spezifiziert, weitere Empfehlungen in diesem Umfeld sind ebenfalls in Abschn. 6.2 nachlesbar.

In der BRD sind folgende Dienstangebote noch - aber u.a. infolge der ATM-, Frame Relay- und Internet-Konkurrenz deutlich abnehmend - von Bedeutung [Schu]:

- **DATEX-P10H:**

Synchroner Standard-X.25-Hauptanschluß (H) als Ein- oder Mehrkanalanschluß von 2,4 kbps ... 1,92 Mbps.

Neben diesem Hauptanschluß gibt es noch eine Reihe weiterer Anschlussformen, die den unterschiedlichen Anwendungen entsprechend angepasst sind.

Standarddienste

Standarddienste (Telematikdienste, Teleservices) sind im Gegensatz zu den zuvor besprochenen **Übermittlungsdiensten (Bearer Services)** solche, deren höhere OSI-Schichten durch ein Normungsgremium, z.B. ITU-T und damit evtl. in Varianten vom öffentlichen Netzbetreiber, festgelegt sind. Für die Übermittlungsdienste muß dieser im Gegensatz dazu lediglich die Übertragungs- und Vermittlungskapazität bereitstellen, der Inhalt der Daten ist für das Netz transparent.

Standarddienste im Fernsprechnet

Telefax:

Der seit 1980 angebotene Telefaxdienst gliedert sich in vier Gruppen mit unterschiedlicher Auflösung und Übertragungsrate. Technische Bedeutung für das Fernsprechnet hat heute nur noch die in der ITU-T-Empfehlung T.4 spezifizierte Gruppe 3 (G3-Fax), von der Geräte für wenige hundert DM mittlerweile den Privatbereich massiv erschließen. Es existiert kaum ein aktueller Informationsservice, der nicht unter Faxabruf erreichbar wäre. Die in den T.563/T.6/T.62-Empfehlungen spezifizierten G4-Geräteeigenschaften weisen dagegen eine direkte ISDN-S₀-Schnittstelle auf.

Ein G3-Gerät bzw. -Fax-Modem benötigt zur Übertragung einer DIN A4-Seite ca. eine Minute, die Vorlagen werden mit 7,7 Zeilen/mm bzw. 3,85 Zeilen/mm Vertikal- und 8 Pixels/mm Horizontalauflösung abgetastet und mittels eines **Modifizierten Huffman-Codes (MHC)** übertragen. Die Modulation erfolgt heute typisch nach V.17, die Standardbitrate neuerer Geräte beträgt 14,4 kbps. Fax-Modems und PC-Karten mit integrierter Faxfunktion funktionieren i.allg. nur, wenn der PC eingeschaltet ist. Dienstanbieter ermöglichen die kostenlose Konversion in E-Mails unter Akzeptanz von Werbung. Technische, den Telefaxdienst betreffende Spezifikationen finden sich in den ITU-T-Empfehlungen:

T.0:	Klassifizierung von Fernkopierern	T.10:	Telefax-Übertragung
T.22/23:	Testvorlagen für Telefax	T.30:	Prozeduren für
F.160/170/180:	Internationale Telefaxdienste		Telefax-Übertragung

Um effizienten Telefax-Verkehr zu gewährleisten, ist eine ordentliche Datenkompression auf der Senderseite und entsprechende Expansion auf der Empfängerseite wichtig, um die benötigte Übertragungsdauer zu reduzieren. Jede sinnvolle Fax-Vorlage besteht aus z.B. weißen zusammenhängenden Flächen (Textdokument), die immer dieselbe Pixelinformation enthalten. Bei der zeilenweisen Abtastung entstehen also lange Sequenzen mit Bitmustergruppen gleicher Information. Der Huffman-Code wandelt diese Codewörter fester Länge in solche variabler Länge um, wobei die häufig vorkommenden mit wenigen Bits, die selten vorkommenden mit mehr Bits umcodiert werden.

Der hier verwendete *MHC* bzw. die Verbesserung, der *Modifizierte Read Code (MRC)* für G4-Fax ist also ein einzelzeichenkomprimierendes Verfahren. Bei reiner Textübertragung würde dies z.B. bedeuten, daß statt aller Buchstaben im 7- bzw. 8 Bit-ASCII zu codieren, das im deutschen am häufigsten vorkommende *e* mit weniger Bits, das seltene *y* mit mehr Bits codiert würde. Ein solchermaßen codiertes Dokument kommt mit insgesamt deutlich weniger Bits als das unkomprimierte aus.

Bildschirmtext/Datex-J/T-Online

Bildschirmtext (Btx oder Videotex) war ursprünglich als Abrufdienst dazu konzipiert, mittels einer speziellen Btx-Tastatur über das Fernsprechnet Information von Datenbasen auf dem Fernsehbildschirm darzustellen. Diese werden von entsprechenden Anbietern in Form von Btx-Seiten in Btx-Rechnern der DTAG oder von Privatanbietern gespeichert. Dieses Konzept stammt noch aus der Zeit der Home-Computer. Heute ist Btx nach Überarbeitung etwas für den PC und wird, wie o.a., über integrierte Daten/Btx/Fax-Modems realisiert [DJ, Eh].

Das System wurde 1976 von dem Engländer Sam Fedida vorgestellt und in England 1980 unter den Bezeichnungen *Prestel* und *Viewdata* eingeführt. Im Juni 1984 wurde der Dienst unter dem Namen Btx in der BRD eröffnet. Nach anfänglich im Vergleich zum Ausland (z.B. in Frankreich: *télétext*) zurückhaltender Akzeptanz verbesserte sich diese deutlich nach Umstellung auf das Datex-J(edermann)-System auf mehr als 500 000 Tln. im Jahr 1994.

Ursachen sind im wesentlichen praktisch die Nullkosten des Btx-Decoders im integrierten Modem von anfänglich über 1000,- pro Steckkarte, der bundesweit einheitliche Zugang, gesamte Führung über das Fernsprechnet/ISDN, verbesserte Zugriffsmöglichkeiten sowie Zugänge zu anderen Diensten, wie Telex, Telebox (entsprechend MHS X.400; s. Abschn. 6.4), Senden von Nachrichten an Telefax- und Cityruf-Empfänger.

Die angebotenen Dienste lassen sich im wesentlichen in die Klassen *transparente Datendienste*, *Informationsdienste* und neuerdings *interaktive Online-Dienste* unterteilen (T-Online, auch als Zugang zum Internet; s. Abschn. 1.5). Das DxJ-Netz besteht aus über 200 regionalen Netzknoten (DxJ-VStn). An diesen sind *Externe Btx-Hosts (ER)* als Informationsbasen angeschlossen. Beispielsweise steht in einem *ER* (Server) der Katalog eines Versandhauses elektronisch zur Verfügung, und eine Online-Bestellung kann mit ihm abgewickelt werden. Zahlreiche Btx-Seiten werden als Kopien in den DxJ-VStn bereitgehalten, so daß viele Informationsanforderungen bereits auf dieser Ebene abgewickelt werden können.

Telebox400:

wurde 1984 erstmals als eine Realisierung von Electronic Mail nach ITU-T X.400 (Message Handling System = MHS; s. Abschn. 6.4) angeboten. Die meisten Telebox-Zugänge wurden über das Fernsprechnet erreicht, gleichwohl sind aber Zugänge über das IDN möglich, so daß jeder mit jedem unabhängig vom Netzanschluß kommunizieren kann. Das Standardgerät für den Zugriff ist der PC mit einer genormten Benutzeroberfläche. Jeder Tln. erhält eine eigene Identität und Paßwort (Account) [Kr.6].

Die DTAG stellt im MHS-Sprachgebrauch einen Anbieter eines öffentlichen Versorgungsbereichs (*Administration Management Domain = ADMD*) mit Zentrale in Mannheim dar. Eine *ADMD* stellt Mitteilungsübermittlungsdienste auch anderen *MDs*, z.B. privaten (dann: *PRMD*) oder ausländischen nationalen Anbietern bereit. *Telebox400* wird zunehmend durch das SMTP des Internet obsolet.

Temex:

steht für *TEleMetry EXchange* und wurde seit 1986 als öffentlicher Dienst für das Fernwirken mit Dienstanbieteranschlüssen und Dienstanutzeranschlüssen mit regionaler Begrenzung angeboten. Dazu gehören

- **Fernanzeigen**, d.h. jedwede Art von Alarmen (Feuer, Einbruch, Erdbeben)
- **Fernmessen**, d.h. Ablesen von Zählern (Gas, Wasser, Strom)
- **Fernschalten**, d.h. Ein- und Ausschalten von Geräten (Heizung, Licht, Sensoren)
- **Ferneinstellen**, z.B. Verkehrsleitsysteme, wie verkehrsflußabhängige Geschwindigkeitsbeschränkungen; Fahrspuren sperren, freigeben, Richtung ändern.

Für einen bestimmten Dienst polt die jeweilige Temexzentrale die ihr zugeordneten Außenstationen an, wobei die Fernsprechleitungen ggf. parallel zu Fernsprechverbindungen simplex oder duplex im Frequenzband um 40 kHz frequenzgemultiplext genutzt werden (*Data over Voice = DoV*). Entsprechend den o.a. unterschiedlichen Funktionen gibt es verschiedene Anbieter- und Nutzeranschlüsse, die sich bzgl. Verbindungsart (evtl. auch über das IDN), Nachrichtenumfang und Pollingfrequenz unterscheiden.

Der Temex-Dienst als solcher wurde inzwischen eingestellt, Funktionen werden tlw. von Mobilfunknetzen (s. Abschn. 1.6) übernommen.

Standarddienste in den Datex-Netzen

Ein wichtiger Standarddienst, der in der BRD über Dx-L abgewickelt wurde, ist der 1980 auf der Hannovermesse vorgestellte und ab 1981 angebotene *Teletex-Dienst* mit der einheitlichen Bitrate von 2,4 kbps. In anderen Ländern kann dieser Dienst über das Fernsprechnet oder über das Paketnetz (s.u.) abgewickelt werden. *Teletex*, auch als *Bürofernschreiben* bezeichnet, verwendet einen ausgiebigen ASCII-Schriftzeichensatz. Es sind auch Umsetzer für Telex mit entspr. reduzierten Funktionen in Betrieb.

Für Dx-P sind Zusatzdienste erwähnenswert, die für Rechenzentren mit Großrechnern (Mainframes, Hosts) Standards darstellen. Dazu gehören IBM 2780/3780 (**P42H**), Siemens 8160 (**P33H**) bzw. DEEn IBM 3270 und kompatible (**P32H**). In Klammern ist jeweils die in der BRD festgelegte Bezeichnung angegeben, zu der jeweils eine Untermenge der X.1-Bitraten gehört. Leistungsmerkmale, wie *Mehrfachanschluß*, *Virtuelle Wähl- oder Festverbindungen*, *CUGs* und *Gebührenübernahme* können bei Bedarf konfiguriert werden.

Das Internet

Das **Internet** ist das Telekommunikationsobjekt, das seit Beginn der neunziger Jahre wohl am meisten Furore macht und das mittlerweile eine Durchdringung unserer Privatsphäre erreicht, wie zuvor nur Telefon, Rundfunk und Fernsehen. Die hier angebotenen Dienste scheinen die Inkarnation der Informationsgesellschaft als postindustriellen Cyberspace per se zu realisieren. Alles was speicher-, abfrag- oder kommunizierbar ist, kann durch den **Internet**-Zugang erreicht werden. Ganz neue Wirtschaftszweige bilden sich aus [GI, GO, QU, SCHE.6, ie].

Online-Dienstanbieter (**Internet Service Provider = ISP**), allen voran *America Online (AOL)* und *CompuServe* in den USA, wo auch die **Internet**-Idee herkommt, und in der BRD der Nach-Btx-DTAG-Dienst *T-Online* bieten mittlerweile hier über acht Millionen geschäftlichen und auch privaten Nutzern mit deutlich wachsender Tendenz den Zugang zu den begehrten Informationen an. Schätzungen zufolge verdoppelt sich der **Internet**-Verkehr derzeit alle neun Monate. Kein Unternehmen, kein Informationsdienst, der nicht sein *http://www.***.de* zum an browsen seiner **Website** angibt.

Die wirtschaftliche Bedeutung der rasanten Entwicklung wird durch das Einrichten eigener Computer-Börsensegmente, z.B. in Form der Hochtechnologie-Börse *NASDAQ* in den USA, unterstrichen. Hier finden sich **ISP**, wie *AOL*, Anbieter von **Internet**-Suchmaschinen (*Yahoo!*) usw. Der Internet Stock Index *ISDEX* mit den 50 größten **Internet**-Dienstleistern (*Go2Net, GeoCities, Excite, DoubleClick, Lycos, @Home, Mindspring, Exodus, Amazon.com, AOL/Netscape, Inktomi ...*) stellt mittlerweile ein gleichwertiges Barometer der US-amerikanischen Wirtschaft, wie die *Schornstein-Aktien* des *Dow-Jones-Index* des Wall Street Journal, dar. Mit die erfolgreichsten Unternehmen am deutschen Börsensegment *Neuer Markt* sind Firmen, die Telekommunikationsdienste und -geräte (*MobilCom, TelDaFax, Teles ...*) und **Internet**-Software, -Dienste, **E-Commerce** (*Brokat, Cybernet, Data-Design, Intershop, Infomatec ...*) anbieten. Ganze Fonds (*CGMI*) setzen sich nur aus **Internet**-Unternehmen zusammen.

Insbesondere Suchdienste, wie *Yahoo!*, *Excite* oder *Lycos* finanzieren sich praktisch ausschließlich durch Werbung, und schmälern so mittlerweile bereits Werbeeinnahmen öffentlicher und privater Fernsehsender.

Über die Informationsbeschaffung hinaus bietet das **Internet** unter anderem

- **Foren, Konferenzen, Chats, Newsgroups**
bei denen man sich an Diskussionen zu allen möglichen (und unmöglichen) Themen beteiligen kann (engl.: to chat = schnattern),
- **Electronic Mail** • **Teleworking** • **Werbung, Firmenpräsentation**
- **Home Banking** • **Fernsprechen (CTI)** • **allgemeiner Datentransfer**
- **E-Commerce** • **E-Publishing** • **Teleteaching**

Surfen ist das Hinundherspringen zwischen verschiedenen Anwendungen oder Links. Doch das Credo des Profis lautet: *Wo andere surfen, da schlagen wir Wellen.*

Das **Internet** ist kein physikalisches Netz in dem Sinne wie das Fernsprechnet oder die Datexnetze, sondern ein Funktionalnetz oder logisches Netz. Netzattribute, wie sie

in Abschn. 1.2.2 vorgestellt wurden, sind wenig aussagekräftig. Das Netz als *vermascht* und damit als höhere Topologieform zu bezeichnen, grenzt schon an Strukturierung: *chaotisch* bis *anarchisch*, da aus derzeit mehr als geschätzten 500 000 physikalischen Netzen mit 150 - 200 Megateilnehmern bestehend, wäre angebracht.

Somit gehört das **Internet** nicht einer Betreibergesellschaft und verfügt auch nicht über eine dienst- und netzumfangende Management-Struktur. Diese wird nur von den Online-Diensten für deren Einzugsbereich angeboten.

Physikalisch kann jedes Netz mit hinreichender Kapazität, Öffentlichkeit und **TCP/IP**-Transparenz Bestandteil des **Internet** sein. So ist praktisch in allen Ländern der Zugang zu **Internet**-Funktionen - zumindest für den Privatbereich - über das jeweilige Fernsprechnetz, mit großem Zuwachs auch das ISDN, dominant. Aber auch Kabelmodems nach der mittlerweile von ITU-T anerkannten **Data Over Cable Service Interface Specification (DOCSIS)** ermöglichen dem Privatanutzer mit bereits vorhandenem Kabelfernsehanschluß die Breitbandnutzung, während **ADSL** Breitbandigkeit als Overlay auf der POTS/ISDN-Anschlußleitung bietet.

Entsprechend sind auch die Voraussetzungen für den Zugang: der PC mit Standard-Betriebssystem (Windows oder Apple), das Modem mit min. 14 400 bps, die Frontend-SW des Online-Anbieters der Wahl. Allen **Internet(s)** gemeinsam ist der Zugang auf den OSI-Schichten 4/3 über das in Abschn. 6.3 erläuterte **TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol)**.

Auf Corporate Networks beschränkte Funktionalität eines **Internet** bietet das **Intranet**, indem **Internet**-Elemente, wie die **TCP/IP**-Protokollsuite und gängige **Browser**-Benutzeroberflächen firmenintern zur Informationsverteilung (Telefonnummern, Projektvernetzung, Reisekostenabrechnung, Speiseplan der Kantine ...) benutzt werden. **Firewalls** in Form entsprechender Softwarepakete schützen die internen Daten vor unberechtigtem externem Zugriff und Veränderung, z.B. durch Viren. Auch hier schießen spezialisierte Unternehmen wie Pilze aus dem Boden (z.B. *Utimaco*).

Intranet-Anwendungen werden durch die objektorientierte Programmierung in der komplexen Programmiersprache **Java** der Fa. *Sun Microsystems* (J. Gosling) für interaktive Anwendungen plattformunabhängig. So können im Idealfall in **Java** entwickelte Anwendungen mit **Clients** über Novell-, Unix- oder Windows-NT-Netze auf Oracle-, Sybase- oder Informix-Datenbanken zugreifen [FI, HE, JO, SCHA, Ei].

Historie

Die Anfänge waren der geglaubte Bedarf an dezentraler Kommunikationsinfrastruktur des Pentagon in den Zeiten des Kalten Krieges. Ein kriegführendes Land wäre schwachmatt, wenn die Kommunikation lahmgelegt ist, und diese Gefahr war bei den damaligen (sechziger Jahre) zentralgesteuerten Netzen groß. Dazu wurde 1969 von der militärischen **Advanced Research Project Agency** der Vorläufer **ARPANET** entwickelt.

Auszutauschende Nachrichten werden gemäß dem *TCP/IP* paketiert und suchen sich ihren Weg selbständig unter Ausnutzung alternativer Leitweglenkung bei Knotenausfall oder Streckenüberlastung durch das Netz gleichberechtigter Knoten. 1972 wurden auf diese Art 40 amerikanische Universitätsgroßrechner vernetzt und konnten so außer Informationsaustausch auch ihre Kapazitäten teilen. Bald kamen neue Funktionen, wie die o.e. *E-Mail* hinzu.

Da Militärs jedoch gerne unter sich bleiben, bauten die Wissenschaftler nach den gleichen Mechanismen ihr eigenes *USENET (USER NETWORK)*, basierend auf dem *UUCP*-Protokoll zur Kommunikation von Rechnern mit UNIX-Betriebssystem. Die Verbreitung blieb bescheiden, da in der Vor-OSI-Zeit jeder Rechnerhersteller seine eigenen Varianten anbot und Inkompatibilität im Glauben von *Kundenabhängigkeit = resultierende Gewinnmaximierung* kultivierte.

1986 wurden in den USA durch die *NSF (National Science Foundation)* die wichtigsten Universitäten mittels Breitbandleitungen in Form des *NSFNET* vernetzt, einbezogen wurde das USENET und mittlerweile andere vergleichbare Netze. Einheitlich wurde das *TCP/IP* verwendet und 1989, als der Kalte Krieg (hoffentlich) endgültig ad acta gelegt wurde, das ARPANET von den Militärs freigegeben und alles zusammen zum *Internet* integriert.

Das bedeutete noch keineswegs, daß es jetzt für Benutzer einfach war, auf das *Internet* zuzugreifen. Von irgendwelchen Protokollen auf mittleren Schichten sieht und versteht er - jetzt allmählich auch in Europa zum *User* migriert - herzlich wenig. Die fehlende einheitliche Benutzeroberfläche war die Zugangsverriegelung. Der nächste Innovationsschub kam aus Europa: 1989 wurde vom Europäischen Forschungszentrum für Kernphysik in Genf (CERN) das *World Wide Web (WWW)* ins Dasein gerufen, zunächst nur mit der Absicht, daß die Forscher bequem ihre Daten austauschen konnten.

Der Schlüssel nahm die Form eines Mausclicks an, Icons aus den ersten grafischen Benutzeroberflächen von Betriebssystemen der Mittachtziger (Apple Macintosh, ATARI 520 ST) geboren, waren die Pointer auf die Informationslabyrinth der Welt.

Zugang zum Internet

Wer kommunizieren will, braucht eine Adresse. Das gilt für die Post, für das Telefon - und auch für das *Internet*, und zwar für den Kunden (*Client*) und den Dienstanbieter (*Provider*) bzw. dessen *Server*. Sie manifestierte sich bis etwa 1997 in der Protokollversion 4 in einer weltweit eindeutigen 32Bit- - entsprechend 4 durch Punkte getrennte Oktetts - langen *IP-Adresse*, vergeben in Europa von RIPE/NCC in Amsterdam. So wie die Telefonnummer in Vorwahl und Tln.-Nr. strukturiert ist, können *Internet*-Nummern für lokale Netze z.B. in einen Netzwerkanteil (N) und in einen Maschinenanteil (m) aufgespalten werden.

Diese Adreßstrukturen sind in drei Klassen unterteilt: A = N.m.m.m, B = N.N.m.m, C = N.N.N.m, die wiederum bestimmte Zahlenwerte annehmen dürfen. Die *Ns* bilden die *netid*, die *ms* die *hostid*. Wer welche Nummernstruktur erhält, hängt vom Aufbau seiner Rechnerinfrastruktur ab; es können Unterstrukturen gebildet werden. Jedes N kann nur einen Unterbereich von physikalisch 256 möglichen Werten annehmen, weshalb A- und B-Adressen schon lange alle vergeben sind und mit Protokollversion 6 ein neues Adressierungssystem eingeführt wurde: Acht Doppeloktett, zur syntaktischen Unterscheidung vom alten System durch Doppelpunkte statt Punkte getrennt.

Schon das alte, und erst recht das neue Adressierungssystem machen ein *Surfen* unmöglich: nennenswerte Teile der *Internetzeit* gingen durch Eintippen, Suchen, Korrigieren verloren, weshalb ein *Domain Name System (DNS)*-Service dem User für die gewünschte Anwendung eine i.allg. anders strukturierte Klartextadresse aus dem *Internet-Domain Name Space (Name: sollte als engl. Begriff interpretiert werden)* anbietet, und sie ggf. in die eigentliche *IP-Adresse* umsetzt (RFC 1034/5). Mit einem *Browser*, wie dem *Microsoft-Internet Explorer* oder *Netscape-Navigator* zur Ansteuerung des *WWW* unter Windows geht das z.B. über entsprechende grafische Menüs.

Beispiel für einen *Name* ist *Rechner.Abtteilung.Firma.Land*. Rechts steht die *Top Level Domain*, links daneben die *Second Level Domain*, die beide von dem *IP*-adreßvergebenden Gremium *IANA* wegen der weltweiten Gültigkeit festgelegt werden. In der BRD ist praktisch immer *Land = de*, es gibt aber auch andere Strukturen, wie *.org* (Normungsorganisationen, wie ITU-T und ETSI), und vor allem in den USA *.com* (commercial), *.edu* (education = Bildung; Universitäten) oder *.gov* (government; Regierungsstellen). Hierzulande ist das *Deutsche Network Information Center (DE-NIC)* die Vergabestelle für *Domain-Names* unterhalb der *Top-Level-Domain .de*. Genauso wie in Abschn. 1.2.3.2 das Wahlverfahren der Fernsprechtechnik mit dem ziffernweisen Abbilden der Vorwahlnummern auf die einzelnen Netzhierarchien beschrieben wurde, geht es hier mit dem Versenden von *Internet*-Datagrammen, nur daß die Richtung der Schreibweise umgekehrt ist - wie bei der Briefpost.

Die Funktion der *Name*-Umsetzung kann jedoch praktisch niemals innerhalb eines Rechners, auch nicht z.B. innerhalb eines LAN, an dem der Rechner angeschlossen ist, ausgeführt werden. Jedes System müßte ja die vollständigen *Names* und *IP-Adressen* führen - datenvolumenmäßig und ganz abgesehen von der Dynamik des *Internet* ein unmögliches Unterfangen. Daher geschieht diese i.allg. verbindungsbaubegleitend: kennt ein die Verbindung fortführender Knoten mit zugehörigem *Name-Server* die gewünschte *IP-Adresse* zu einem benötigten Namensanteil nicht, wird eine Anfrage an den ihm immer bekannten hierarchisch nächsthöheren *Name-Server* über dessen *Name Resolver* gestellt. Hier finden sich die Daten in *Resource Records*.

Kann auf diese Art die Adreßabbildung nicht durchgeführt werden, z.B. weil bei neuen oder gerade entfernten Diensten noch nicht alle *Name-Server* aktualisiert sind, kann bei Direkteingabe einer bekannten *IP-Adresse* der Anwendungsserver immer noch erreicht werden.

Anwenderdienste

Eigentlich will der User ja nicht ins *Internet*, sondern er will sich eine Anwendung zunutze machen. Dazu braucht er ein Anwenderprogramm (z.B. *Telnet*), von dem es die auf seinem PC laufende Client-Variante gibt, auf dem Server, der die gewünschten Informationen bereithält, die Server-Variante. Beide greifen auf die ihnen jeweils unterlegte Netzwerk-Software zu, hier auf das *TCP/IP* über eine Winsocket-Schnittstelle, und diese wieder auf das eigentliche Netz.

Dieses *Client/Server*-Prinzip unterscheidet sich deutlich von dem klassischen, noch im vorangegangenen Jahrzehnt dominanten *Terminal/Host*-Prinzip: bei ersterem geschieht die Anwendungsdiensterbringung durch eine vernünftige Intelligenzverteilung zwischen Client und Server. Insbesondere ist ersterer auch für mächtige Lokalfunktionen geeignet - eben typisch für einen PC. Demgegenüber kann ein Terminal von alleine praktisch gar nichts, sondern nur Steuerbefehle an einen Zentralrechner übermitteln, auf dem sämtliche Funktionen ablaufen - oft bis zur Darstellung der Bildschirmzeichen durch Reflexion der zum Host geschickten Zeichen.

Von diesen Anwenderprogrammen seien die wichtigsten hier vorgestellt:

- **Ping** dient dem Anklopfen, ob überhaupt eine Verbindung herstellbar ist.
- **Telnet** (*Terminal Emulation* über das *Netz*; Abschn. 6.3.4.1) ermöglicht den interaktiven Zugriff auf den Partnerrechner.
- **FTP** (*File Transfer Protocol*; Abschn. 6.3.4.2):
Dateitransferprogramme mit zugehörigen Protokollen werden benötigt, um Dateien (z.B. wissenschaftliche Veröffentlichungen oder ganze Bücher) von Servern zum Client zu ziehen - oder umgekehrt, z.B. der Transfer einer Homepage. Dateien sind oft komprimiert und können mit entsprechenden Tools lokal expandiert werden.
- **Gopher**:
heißt eine amerikanische Wühlmaus, und ist gleichzeitig ein Wortspiel auf *Go for it*. Das Suchprogramm stellt praktisch den in die Welt verlängerten Arm des Suchprogramms des PC-Betriebssystems für die internen lokalen Dateien dar.
- **E-Mail** (Abschn. 6.4):
bereits vorgestellt und eigentlich eine *FTP*-Variante, nur daß der Inhalt persönlicher Natur ist und zwischen Clients bzw. zwischen deren Mailboxen ausgetauscht werden kann. *E-Mail*-Adressen haben die Struktur <Persönlicher Name oder Nickname>@<Internet-Name>. Der *Klammeraffe* @ ist ein stilisiertes *at* (engl.: *bei*).
- **IRC** (*Internet Relay Chat*)
online mit *Emoticons* [:-) = ☺, :-)) = ☺☺, ;-), :-(= ☹, :-< = ☹☹, :-| = ☹, :->, >:->, :-x] und seltsamer Syntax und Semantik - füllt die Taschen der Provider.
- **News**:
Newsgroups im USENET (Diskussionsgruppen) machen die Welt zum Stammtisch. Man kann *nur zuhören* (Lurks), etwas *am schwarzen Brett zur Diskussion stellen, auf etwas antworten* (Follow Ups erzeugen). NNTP sorgt für die Verteilung der zu einer Newsgroup gehörenden Daten auf die richtigen Server.

- **RCMD (Remote CoMmanD)**
macht von dem in Abschn. 2.6.3.7 vorgestellten ROSE-Dienst Gebrauch und erlaubt die Ausführung von Funktionen auf anderen Rechnern (z.B. ein Numerik-Programm auf einem Universitätsrechner, das lokal nicht vorhanden ist oder womit der PC überfordert wäre). Ergebnisse erhält der Client via **FTP**.
- **WAIS (Wide Area Information Server)**
sind auf bestimmte Themengebiete spezialisiert und enthalten primär text-, aber auch bild- und tonbasierte Dokumente.
- **Archie, Veronica**
heißen die nach Comics-Figuren benannten Beschreibungs-Datenbanken aller Dateien auf mehr als 1000 **FTP**-Servern. Sie helfen zusammen mit **Gopher** bei der Suche nach Dateien.
- **Finger, Whois, Verzeichnis (Directory)** nach X.500 (Abschn. 6.5)
geben Auskünfte über *User* eines Rechner oder eines Gebiets.
- **KIS (Knowbot Information Service):**
ist ein intelligenter Suchdienst, der einen Meta-Server beauftragt, der selbst keine Verzeichnisdaten führt, sondern auf verschiedene Weise Information anderer Server besorgt. Von hier läßt sich einheitlich auf **Finger, Whois** und X.500 zugreifen.
- **Talk:**
dient zur Direktkommunikation mit anderen Netzwerkteilnehmern. Es ist das direkte Pendant zum Fernsprechen, während **E-Mail** im Vergleich dazu der Funktion eines Anrufbeantworters entspricht.
- **VoIP (Voice over Internet Protocol; Abschn. 6.3.5):**
ermöglicht bei ggf. reduzierter Sprachqualität preiswertes Fernsprechen über das **Internet**, da Gebühren nur bis zum Einwahlknoten anfallen.

Mit Abstand größte Bedeutung hat innerhalb kurzer Zeit das bereits erwähnte **World Wide Web** erlangt:

World Wide Web (WWW)

der **Hypertext(-media)-Navigator** mit **HTTP (Hypertext Transfer Protokoll; RFC 2068)**, der die meisten der oben vorgestellten Anwendungen mit Hilfe eines Web-Clients in Form eines **Browser**-Programmpakets (z.B. *Microsoft-Internet Explorer*, *Netscape-Navigator*) lesbar macht und auf die Maske der jeweils vorhandenen Betriebssystem-Benutzeroberfläche (z.B. Windows oder Mac) abbildet. Organisationen, Unternehmen und zunehmend Privatpersonen stellen sich und Informationen über Zugänge zu ihren Datenbasen dem *User* über **Homepages** vor.

Zugriffe auf das **Internet** via **WWW** sind durch entsprechenden Vorsatz zum eigentlichen Namen kenntlich: *http://<Name>*. *http* kennzeichnet das zu verwendende Anwendungsprotokoll und der **:** dahinter schließt den Protokollnamen ab. Steht hier stattdessen z.B. *ftp*, wird das o.a. Dateitransferprotokoll aktiviert. *//* bedeutet, daß nun der Hostname folgt, z.B. *et.fh-trier.de*. Optional kann nun eine Portnummer (s. Abschn. 6.3) folgen und dann ein Pfad, bei dem die Zweige durch einzelne **/** getrennt sind. Beim

browsen in einer *Homepage* über *Hyperlinks* baut sich in der Eingabezeile des *Browser* der Pfadname automatisch auf. In Wirklichkeit wird hierdurch der *Uniform Resource Locator (URL; RFC 1738)*, das ist die Adresse des Ziel-Hypertext-Dokuments auf einem Netzwerkservers, die sich hinter diesem *Link* verbirgt, aktiviert, und es wird eine Verbindung zu diesem Server hergestellt. Der *URL* ist also ein netztransparentes Dateinamenkonzept der Struktur *Protokoll, Hostadresse, Verzeichnis, Dateiname*.

Hypertexte sind Multimedia-Dokumente (Text, Audio, Graphik, Video) mit Querweisen zu anderen Dokumenten, abgefaßt in der Layoutsprache *Hypertext Markup Language* des W3-Konsortiums (*HTML*; aktuell: Version 4.0) mit scharfer Trennung von Syntax (editierbarer ASCII) und Semantik (Web-Darstellung) [se]. Anklicken eines farblich abgesetzten Worts oder Icons auf der *Webseite* öffnet einen *Link*, dessen gegenüberliegendes Ende an jedem Ort der Welt liegen kann. Wer *HTML* beherrscht, kann eine *Homepage* auf seinen Rechner herunterladen, diese als ASCII-Datei editieren, und so zur eigenen *Homepage* modifizieren. Einfacher ist dies meist mit dem *Netscape Composer* oder *Microsoft Frontpage Express*, mit allerdings eingeschränkter Kompatibilität. Ursache hierfür ist die noch starke Dynamik der Sprachspezifikation, bei der treibende Kräfte mehr diese Marktführer als das W3-Konsortium sind [w3].

Cascading Style Sheets (CSS) unterstützen *HTML* in komfortabler Objekt-Formatierung. Das *Common Gateway Interface (CGI)* ermöglicht, Programme im *WWW* bereitzustellen, die aus *HTML*-Dateien aufgerufen werden können, und die selbst *HTML*-Code erzeugen und an einen *Browser* senden können (dynamisches *HTML*). Interaktive Einbettungen, z.B. eine 3D-Rotation mit der Maus, werden in *Java* realisiert, kleine Lokalanimationen als *Applets* in der *Java*-unabhängigen Netscape-Sprache *Java Script*. Letztere werden nicht - wie eben *Java*-Programme - kompiliert, sondern als Quelltext zur Laufzeit interpretiert, also ähnlich wie Batchdateien bzw. Shellscripts. Dazu besitzen moderne *WWW-Browser* die entsprechende Interpreter-Software.

Ein Problem dieser Multimediadokumente sind die oft mit dem Herunterladen anfallenden großen Datenmengen, die im Noch-Analog-Zeitalter mit immer noch bescheidenen Bitraten zu Wartezeiten im Minutenbereich führen. Wird am *Browser* (IE) *Internetoptionen - Erweitert - Multimedia - Bilder anzeigen* deaktiviert, wird bei Grafiken nur ein Ersatz-Icon mit dem Bildnamen dargestellt. Anklicken lädt dann die reale Grafik nach. Noch kritischer sind Audio- und Video-Icons. Um diese darzustellen, reicht oft die Standard-*Browser*-Software nicht aus, sondern es werden zusätzliche Software-Pakete (Plugins), wie *Lview*, *mpeg-play* oder speziell *MP3*, benötigt.

Zwei nützliche Tools, die oft zum Darstellen heruntergeladener Internet-Dateien benötigt werden, sind zum einen der *Acrobat-Reader* (aktuelle Version: 4.0) der Fa. *Adobe*, der unter <http://www.adobe.com/acrobat> heruntergeladen werden kann. Mit ihm kann man Dateien vom Typ *.pdf* (*Portable Document Format*) lesen, in dem Organisationen ihre Informationen publizieren. Navigationsfunktionen innerhalb eines solchen Dokuments sind optimal gestaltet. Das zweite Tool ist das Kompressions/Expansionsprogramm *WinZip* (aktuelle Version: 7.0) der Fa. *Winzip*, das unter <http://www.winzip.com> heruntergeladen werden kann. Mit ihm kann man Dateien zum Typ *.zip* komprimieren und expandieren. *Gezippte* Dateien nehmen oft nur 20% des ursprünglichen Speicherplatzes ein. *pdf*-Dateien sind bereits stark komprimiert.

Struktur des Internet der DTAG

In der Bundesrepublik ist die DTAG-Tochter *T-Online* derzeit größter Provider. Ihr Netz besteht aus flächendeckenden [Schu.6]

- **IP-Backbones** mit über 70 Netzknoten, die vermittlungstechnische Routing-Funktionen wahrnehmen, als auch die u.a. Access- und Backbone-Router enthalten. Knapp 20 der Netzknoten in den großen Städten sind mit multiplen 34Mbps-Leitungen der PDH vermascht, zu den Außenbereichen beträgt die Bitrate 2 Mbps. Eine Aufrüstung des Kerns auf synchrone 155Mbps-Leitungen der Synchronen Digitalen Hierarchie (SDH; s. Abschn. 9.6) ist im wesentlichen abgeschlossen.
- Zugangssystemen zum Kunden-Router in Form von **Access-Routern**, die als digitale Mietleitungen oder leitungsvermittelte ISDN-Leitungen realisiert sind.
- Verbindungen zu anderen nationalen und internationalen Providern und Datenaustauschpunkten. **Backbone-Router** verbinden die Teilnetze international über separate Backbones, z.B. für die DTAG der *Ebone* (European Backbone) München-Paris mit 4 Mbps, *Sprint-Net* von Frankfurt/M zum NAP-NY (New York Network Access Point) mit 45 Mbps usw.

Der operative Netzbetrieb wird von einem **Network Operation Center (NOC)** auf der Basis des in Abschn. 7.3 erläuterten Telekommunikations-Management-Netz TMN gesteuert. Hier erfolgt das Management der

- Konfiguration, d.h. des Aufbaus der Netztopologie,
- Verbindungen, d.h. der Anschlußleitungen,
- Router, d.h. der o.a. **Access-** und **Backbone-Router**,
- Peering, d.h. des Informationsaustauschs mit anderen Providern (z.B. AOL),
- **Server**, die dem Benutzer die o.a. Dienste, wie **FTP**, **E-Mail** ... bereitstellen,
- Performance, d.h. Überwachung der Leitungsauslastung,
- Fehler- und Störungen, • Abrechnung,
- Sicherheit, • Kommunikation mit anderen **NOCs** der DTAG.

Auf der Basis Netware 4 der Fa. Novell bietet die DTAG über ihren Backbone für Unternehmen zur Realisierung von Corporate Networks den Dienst **Intralink** mit **Internet-Zugang**, **E-Mail**, **Firewalls** und Betrieb von **Web-Servern**.

Mobilfunk

Die Technik der Mobiltelekommunikation ist genauso wie das Internet für sich gesehen ein abendfüllendes Thema und wird hier zunächst im Überblick wiedergegeben, eine Vertiefung findet sich in Kap. 10. Neben dem hier besprochenen terrestrischen Mobilfunk, der die Grundlage der Funktelefonnetze bildet, gibt es noch maritime (Schifffahrt) und aeronautische (Luftfahrt) Mobilfunksysteme. Für die Geschäfts- und Privatwirtschaft sind von besonderer Bedeutung:

- **Funktelefone**
der jedermann zugänglichen *GSM-D*- und *DCS-E*-Netze, bis Ende 2000 noch das ältere *C*-Netz.
- **Schnurlose Telefone und Funk-NStAnl**,
wie *CT1*, *CT1+*, *CT2*, mittlerweile praktisch abgelöst durch *DECT*.
- **Mobiler Bündel/Datenfunk** wie *CHEKKER*, *MoDaCom*, *MobiTex*.
- **Funkrufsysteme (Paging-Systeme)**, wie *Cityruf*, *SCALL*, *Skyper*, *ERMES*.
Andere Systeme sind entweder nur beschränkten Personenkreisen zugänglich (z.B. Behörden), oder nur für spezielle Anwendungen gedacht [DA, EB, TU, Ey, Ke, Re].

Funkfernsprechen

Die historische Entwicklung der Funktechnik hat ihre Ursprünge in der theoretischen Vorhersage der Existenz elektromagnetischer Wellen durch James Clerk Maxwell im Jahre 1864, deren praktischem Nachweis durch Heinrich Hertz 1887, der sie für nicht modulierbar hielt, und 1900 dem Aufbau der ersten Funkverbindung über 100 km durch Marconi - ein Jahr später nach Amerika. 1918(!) wurde auf der Bahnstrecke Berlin-Zossen erstmals von Eisenbahnwagen funktelefontiert, 1926 wurde ein solcher Dienst auf der Strecke Berlin-Hamburg angeboten.

A-, B- und C-Netz

Die älteren Funkdienste arbeiteten amplitudenmoduliert im LW-, später im MW-Bereich, jedoch erst die in den fünfziger Jahren erschlossene UKW-Technik mit Frequenzmodulation ermöglichte hinreichende Bandbreiten und Kanalkapazitäten. 1958 wurden verschiedene nationale bis dato separate Funknetzsysteme zum *A-Netz* zusammengefaßt. Das System arbeitete handvermittelt im Bereich von 156 - 174 MHz mit einem Nachbarkanalabstand von 50 kHz und 10 W Sendeleistung. Es wurde 1977 wegen technischer Veralterung eingestellt und der Frequenzbereich dem *B-Netz* zugeschlagen ($\rightarrow B_2$).

1972 wurde das Selbstwähl-**B-Netz** für fahrende Tln. eingeführt und war ca. 1978 flächendeckend. Es arbeitete im Bereich von 146 - 156 MHz mit effizienterem 20kHz-Kanalabstand. Der Versorgungsradius einer Station betrug ca. 25 km. Teilnehmer in Luxemburg, Österreich und den Niederlanden konnten erreicht werden. Die maximale Tln.-Anzahl betrug 1986 ca. 27 000. Das Netz wurde 1994 außer Betrieb genommen.

Das seit 01.05.86 gleich flächendeckend angebotene **C-Netz** ist im Gegensatz zu den Vorgängern zellularer Natur. Das heißt, ein Tln. wird automatisch beim Verlassen des Einzugsbereichs einer VSt an die nächste weitergereicht (Zellwechsel = **Handover**), während bei den älteren die Verbindung abgebrochen wurde. Dazu sendet das **Handy** permanent Signalisierungsinformation aus. Weiterhin dient 0161 als einheitliche Zugangskennzahl, d.h. ein rufender Tln. muß den Aufenthaltsort des gewünschten Partners nicht kennen; die Suche wird vom Netz übernommen (**Roaming**). Die Übertragungstechnik wird im Frequenzbereich 450 - 455,74 und 460 - 465,74 MHz in Form einer Phasenmodulation (also noch vollständig analog) mit einem maximalen Frequenzhub von 4 kHz abgewickelt.

Die Signalisierung zwischen Funk-VStn und mit VStn, denen Fest-Tln. zugeordnet sind, erfolgt über IKZ 50, die zwischen Funk-VStn auszutauschenden Tln.-Daten über einen ZZK nach dem ZGS#7 (s. Kap. 7) mit einem besonderen *Mobile User Part*. Zusätzlich hat man mit allerdings tlw. dürftiger Performance Zugang zu Datennetzen mit Nichtfernsprechendgeräten. Mit 330 000 vor allem geschäftlichen Tln. Mitte 1998 ist das **C-Netz** kein dem (Fest)-Telefon vergleichbares Massenprodukt, seine Einstellung ist für Ende 2000 angekündigt. Anders verhält es sich bei den digitalen **GSM/DCS-Netzen** (**D-** und **E-Netze** in der BRD):

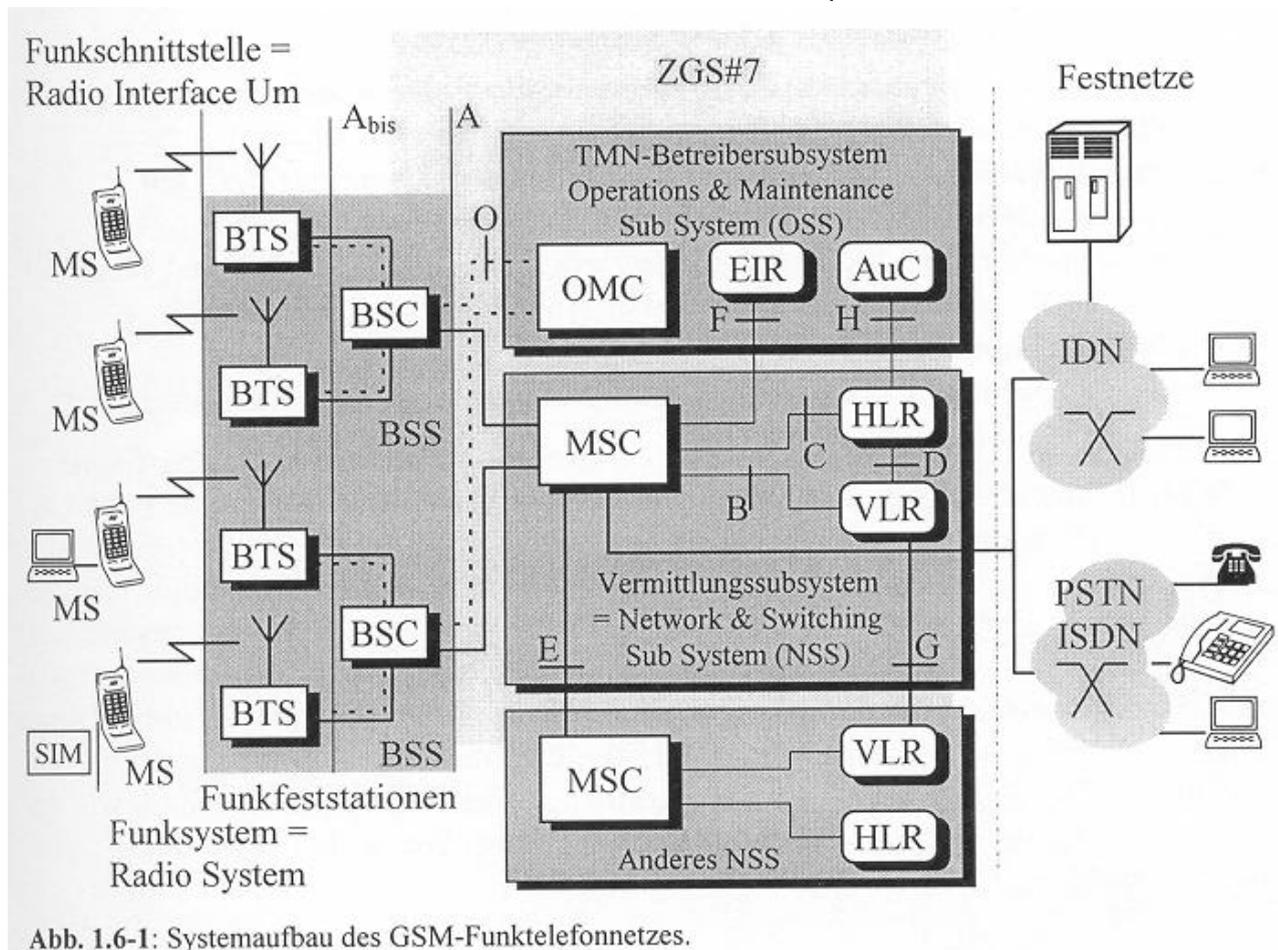
GSM900- und DCS1800-Netze

D- und **E-Netze** mit über 20 Millionen Teilnehmern boomen in vergleichbarer Weise wie das Internet. Dies dank fallender Hardware-Preise für die **Handys**, massiver Konkurrenz und damit fallender Tarife, Tarifdiversifizierung (Grund/Verbindungsgebühr, Xtra-Card etc.) und Dienstediversifizierung. Weltweit nimmt derzeit die Zahl der **Handy**-Besitzer täglich um 250 000 zu, ITU-T schätzt daß ca. 2006 die Anzahl der Mobilfunk- diejenige der Festnetzanschlüsse überschreitet.

Mit dem Eindringen der Digitaltechnik in die Festnetze, zunächst in Form des IDN, danach als ISDN und nun als B-ISDN wurden die Anstrengungen verstärkt, deren Vorteile auch auf die Funktechnik, und vor allem auf die Funkfernsprechtechnik als 2. Generation zu übertragen. 1982 wurde innerhalb des Normungsgremiums CEPT die Projektgruppe **GSM** (*Groupe Special Mobile*; jetzt: *Study Group Mobile* = **SGM**) zum Entwurf eines europäischen Mobilfunksystems ins Leben gerufen. **GSM** steht jetzt für **Global System for Mobile Communications** [Mu, Sche].

Der europäische Ministerrat stellte 1987 für die beiden Senderichtungen die Frequenzbereiche von 890 - 915 und 935 - 960 MHz zur Verfügung. Darin sind 124 Kanäle mit je 200 kHz Bandbreite untergebracht. Jeder Kanal führt acht TDMA-Zeit-schlitzte im Rahmen von netto $8 \cdot 577 \mu s = 4,615 \text{ ms}$ Rahmendauer.

Die Normungen wurden unter Einbezug der Industrie weitergeführt und 1990 vom mittlerweile aus CEPT hervorgegangenen ETSI [Ro] übernommen. Die technischen Empfehlungen wurden am 7.12.89 verabschiedet. Nichtbehördliche Organisationen wurden als Betreiber zugelassen, in der BRD zunächst DeTeMobil (**D1**; Zugang über 0171) und Mannesmann (**D2**; Zugang über 0172). 1991 liefen Feldversuche, 1992 wurde der kommerzielle Betrieb aufgenommen. **GSM**-Netze sind ähnlich wie das (Fest)-ISDN zwar für Sprachübertragung optimiert, bieten aber vor allem mit dem Kurznachrichtendienst **Short Message Service (SMS)** auch vernünftige, der heutigen Zeit angepasste Zugangsmöglichkeiten für Nichtfernsprechdienste (Fax, Kurznachrichten, Btx, DÜ-L, DÜ-P) und Zusatzdienste (Gebührenanzeige, Ruf-Weiterleitung, Mobilbox, Über- oder Unterschreiten eines Börsenkurses, ...).



Das *Digital Cellular System* um 1800 MHz (*DCS1800*), in der BRD als *E-Plus-Netz* von Veba und Thyssen betrieben, steht mit *1W-Handys* und kleineren Funkzellen (Stadt: 1 km, Land: 8 km) in der BRD mittlerweile flächendeckend zur Verfügung. Seit Oktober 98 betreibt Viag Interkom zusätzlich das *E2-Netz*.

Entsprechend Abb. 1.6-1 besteht ein *GSM-Netz* aus folgenden Komponenten:

- **Mobile Station (MS):**
das Funktelefon mit Einschubkarte (**Subscriber Identity Module = SIM**) zur Teilnehmeridentifizierung.
- **Funkfeststation (Base Station Subsystem = BSS),**
die den sicheren Datenaustausch zwischen den *MS* und dem Netz mit Abwickeln der Funkverbindung zwischen *MS* und *BTS* realisiert. Die *BSS* ist unterteilt in
 - **Base Transceiver Station (BTS)** als reinem Funksende- und Empfangsteil.
Sie bedient physikalisch unmittelbar die **Funkschnittstelle**.
 - **Base Station Controller (BSC)** als Steuerungsteil für einen oder mehrere *BTS*s
Er verwaltet die Funkschnittstellenkanäle und stellt logische Funktionen, wie die Auswertung der Feldstärkemessungen und Verkehrs Bündelung von den *BTS*, bereit.
- **Vermittlungssystem (Network & Switching Sub System = NSS)** mit
 - **Funkvermittlung (Mobile Service Switching Center = MSC)**
mit den klassischen Vermittlungsfunktionen, die auch in einem reinen Festnetz benötigt werden.
 - **Heimatdatei (Home Location Register = HLR)**
mit statischen Tln.-Daten, wie Dienste, Zugangs- und Nutzungsberechtigungen.
 - **Besucherdatei (Visitor Location Register = VLR)**
mit den Temporärdaten aller Tln. im Einzugsbereich des Besucher-*MSC*, speziell dem momentanen Aufenthaltsort.
- **Zentrale Betriebstechnik (Operation & Maintenance Center = OMC)** mit
 - **Authentikationszentrale (Authentication Center = AuC)**
zur Authentikation des Tln. über das Netz mittels der Chipkarte und Bereitstellung der Verschlüsselung von Information auf der Funkschnittstelle.
 - **Endgeräteerkennungsdatei (Equipment Identity Register = EIR)**
mit der Information über die zum Betreiber-Netz gehörenden Endgeräte.

Die logischen *GSM*-Kanäle sind in die Gruppen **Verkehrskanäle (Traffic Channels = TCH)** für die Nutzdaten und mehrere **Kontrollkanäle (Control Channels = CCH)** zur Signalisierung und Schnittstellensteuerung unterteilt.

Die Tarifierung dieser Mobilfunknetze setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Da ist zunächst das **Handy** selbst, das man gemeinsam mit der Chipkarte u.U. für DM 1,- erhält, um die Schwelle zum Einstieg zu reduzieren. Den Warenwert von ca. DM 400,- erfährt man, wenn man das **Handy** ohne Chipkarte erwirbt. Hinzu kommt eine Freischaltgebühr von ca. DM 50,-, eine monatliche Grundgebühr von ca. DM (0,-) ... 20,- ... DM 300,- und die eigentlichen Verbindungsgebühren, die von der Tarifgestaltung des Anbieters bestimmt werden. Diese Werte sind einer steten Dynamik unterworfen.

Schnurlose Telefone und Funk-Nebenstellenanlagen

Schnurlose Telefone (ST; Cordless Telephones = CT) sind im geschäftlichen sowie Privatbereich seit Anfang der neunziger Jahre dank stark gefallener Preise ein Renner. Gegenüber den Mobiltelefonen erfolgt die Einspeisung in das Festnetz durch einen Festteil, der im Besitz des Mobilteiligners ist und daher zum Betrieb nur eine geringe Entfernung vom Mobilteil aufweist (max. ca. 300 m) [Be, Ey, LO.10].

CT-Standards

Folgende Generationen sind unterscheidbar:

1. **CT0**: Feste Frequenzen um 1,6/47 MHz, 8 Kanalpaare, 10 - 40 mW
Einsatz in den USA, UK und Frankreich. Kein eigentlicher Standard; Ende der siebziger Jahre von der Federal Communications Commission (FCC; USA) festgelegt. Wegen des Frequenzbereichs, der geringen Kanalanzahl und der nicht eindeutigen Zuordnung von Mobil- und Festteil Probleme mit der Abhörsicherheit. Weiterhin hohe Störstrahlung, daher in der BRD keine Zulassung.
2. **CT1**: Frequenzbereich von 914 - 916/959 - 961 MHz, 40 Kanalpaare, 10 mW
verbessert: **CT1+** von 885 - 887/930 - 932 MHz, 80 Kanalpaare, 10 mW
CT1 wurde 1983 von CEPT festgelegt und behebt wesentliche Probleme des **CT0**-Standards. Es wurde bald durch **CT1+** mit seinem Kanalraster von 25 kHz und analoger Frequenzmodulation abgelöst. Mobil- und Festteil identifizieren sich eindeutig über Kennzeichenaustausch.
3. **CT2**: Frequenzbereich von 864,1 - 868,1 MHz, 40 Kanalpaare, 10 mW
als ETSI-Standard arbeitet mit einem 100kHz-Kanalraster, digitalem **Frequency Division Multiple Access = FDMA**-Zugriffsverfahren kombiniert mit **Time Division Duplex (TDD; Ping Pong)**, einer Bitrate von 72 kbps und ADPCM-Sprachcodierung statt PCM. **CT2**-Geräte erlauben als **Telepoint**-System das Fernsprechen mit dem Mobilteil in der Umgebung von 50 - 150 m um meist in öffentlichen Telefonzellen untergebrachten **birdie**-Stationen, die sich an Orten starker Personenkonzentration befinden. Der Einzugsbereich ist also etwa der gleiche, wie der der Heimstation ↔ Mobilteil. Der seit ca. 1991 eingesetzte Standard wird seit 1996 außer Betrieb genommen und ersetzt durch den einheitlichen Standard:

Digital Enhanced Cordless Telecommunications (DECT)

DECT (**E** stand ursprünglich für *European*) als 4. Generation soll dem Teilnehmer die optimale Mobilität beim Fernsprechen im Heim anbieten. Die Standardisierung wurde seitens des ETSI (EN 300 175-x) im Sommer 1992 abgeschlossen und **DECT**-Anlagen erfreuen sich zunehmender Beliebtheit. Im Gegensatz zu den **CT**-Standards ist eine direkte Verbindung unter den Mobilteilen möglich. **DECT** spezifiziert so eine Funk-NStAnl. **CT2** ließ zwar bereits bis zu neun Mobilteile an einer Basisstation zu, eine

unmittelbare Verbindung untereinander war jedoch noch nicht möglich. Mit einem Mobilteil ist die Basisstation für unter 200,- DM zu haben [Br, Sche].

Der genutzte Frequenzbereich von 1880 - 1900 (... 1937) MHz wird durch zehn HF-Träger von jeweils 1728 kHz Bandbreite belegt. Jeder Träger führt wiederum 24 (Voll)-Zeitschlitz, die ähnlich PCM30 zyklisch umlaufen. Jeder Mobilteil hat durch **FDMA** auf jeden freien Zeitschlitz jeden Kanals auch während der Verbindung freien Zugriff.

Der Frequenzbereich ist nicht in zwei Duplexzonen mit entsprechendem Trägerabstand unterteilt, sondern der Zugriff geschieht wie bei CT2 über das in Abschn. 4.2.5 für die TKAnl-U_{p0}-Schnittstelle im Grundsatz beschriebene Ping-Pong-Verfahren, das 12 Zeitschlitz für eine Richtung, die anderen 12 für die Gegenrichtung nutzt, woraus 120 Duplexkanäle resultieren. Jeder Zeitschlitz hat eine Nettonutzbitrate von 32 kbps (ADPCM-Sprache) und eine Signalisierungsbitrate von 6,4 kbps. Abhörsicherheit wird durch einen komplexen Scrambler gewährleistet. Die mittlere Sendeleistung pro Kanal liegt typisch bei 10 mW, die Reichweite im Freien bei ca. 300 m, in Gebäuden mit ca. 50 m deutlich darunter.

Bei der **Luftschnittstellen-Definition (Common Air Interface = CAI)** wurde auf weitgehende Universalität und Kompatibilität zu allen derzeit bedeutenden Netzen geachtet: PSTN, ISDN, Dx-L/P, LAN, Paging-Netze (u.a. Personensuchanlagen), GSM-Netze. Die **GAP-CAI (Generic Access Profile)** sichert herstellerunabhängig Kompatibilität mit Mobilitätsfunktionen öffentlicher Netze, z.B. **UPT**.

Anwendungen findet **DECT** auch bei **Telepoint**-Diensten, **Wireless Local-Loop**-Diensten zwischen benachbarten Gebäuden, drahtlosen NStAnl in einem Gebäude, drahtlosen LANs mit Adapter z.B. vom PC zum **DECT**-Netz. Im Prinzip handelt es sich hier bereits um ein zellulares System, bei dem sich etliche **GSM**-Funktionen wiederfinden. So wird der gerade benutzte Kanal permanent auf seine Qualität überwacht und bei Bedarf ein **Handover** ausgeführt, **Roaming** hingegen wird aufgrund der geringen Reichweite nicht benötigt.

Datenfunk und Bündelfunk

Der **Datenfunk** unterscheidet sich von den obigen Funknetzen, daß Sprachübertragung ausgeschlossen ist. Beim **Bündelfunk** ist die Anzahl der zur Verfügung stehenden Kanäle i.allg. deutlich kleiner als die Anzahl der Tln., die diese nutzen könnten. Das System ist also blockierend und wird in der Fernsprechtechnik auf den höheren Hierarchieebenen grundsätzlich aus ökonomischen Gründen angewendet. Es funktioniert so lange gut, wie die Anzahl der Tln., die ein System zur gleichen Zeit nutzen wollen, gering bleibt. Der **Betriebsfunk** stellt eine relative frühe Variante der Mobilkommunikation für einen jeweils eingeschränkten Personenkreis dar, z.B. die Kommunikation der Nachtwächter auf einem Firmengelände, Taxifunk, Feuerwehr.

Fast eine Million ortsfeste und mobile Funkgeräte verteilen sich in Deutschland auf über 100 000 private Einzelnetze mit nur ca. 550 Sprachkanälen. Netzbetreiber sind i.allg. auch die Nutzer. Oft steht einer Hundertergruppe nur ein Kanal mit ca. 15 km Reichweite zur Verfügung, was aber den Vorteil hat, daß dieser Kanal jenseits dieses Radius' wiederverwendet werden kann. Folgende Systeme sind heute von Bedeutung:

- **CHEKKER**

Das *Bündelfunk*-Prinzip wird mit **CHEKKER** auf die Betriebsfunktechnik übertragen. Betreiber war bis Ende 1998 die DTAG und **CHEKKER** steht grundsätzlich jedermann zur Verfügung. Genutzt werden mit einem Duplexabstand von 10 MHz die Frequenzbereiche von 410 - 418 und 420 - 428 MHz in einem Kanalraster von 12,5 kHz halbduplex, mit analoger phasenmodulierter Sprachübertragung im Bereich von 0,3 - 2,55 kHz, digitaler Signalisierung von 1,2 kbps mittels FFSK (Fast Frequency Shift Keying) von 1,2 - 1,8 kHz. Der Aktionsradius liegt bei ca. 50 km, in bestimmten Gebieten auch darüber und ist damit größer als bei älteren Systemen (< 15 km). Darüberhinaus ist der Zugang zu öffentlichen Fernmeldenetzen möglich. Stark wachsend ist derzeit der Einsatz von **CHEKKER** zur LKW-Flottensteuerung von Transportunternehmen.

- **Mobiler Datenfunk (MOBILE DATA COMMUNICATIONS = MODACOM)**

erlaubt als Zellulernetz seit 1993 bidirektionale Datenübermittlung zwischen Hosts und mobilen oder tragbaren DEEn sowie mobilen DEEn untereinander. Im Gegensatz zu den unten vorgestellten Funkruf-Diensten ist *MoDaCom* voll dialogfähig. Das Netz sichert die permanente Send- und Empfangsbereitschaft der DEEn durch die Übertragung von Statusmeldungen, bietet Leistungsmerkmale wie *Dx-P-Zugang* an, *CUGs*, *Mailboxdienst (Modacom-Box)*, *Roaming* und *Handover* [Fe, Schm].

Die Daten werden im Frequenzbereich von 410 - 430 MHz mit einem Duplexabstand von 10 MHz in einem 12,5 kHz-Kanalraster mit 32 Kanälen nach dem US-Industriestandard *DataTAC* mit dem *Radio Data Link Access Protocol = RD-LAP* der Fa. Motorola paketiert mit 9,6 kbps FSK-moduliert übertragen, der Kanalzugriff geschieht über DSMA (Digital Sense Multiple Access).

Wichtige vom Betreiber vorgesehene Einsatzgebiete sind *Ferndiagnose*, *Zugriff auf zentrale Datenbanken und Informationssysteme*, *Übermittlung von Verbrauchsdaten von mobilen Meßstellen*, *Dateitransfer*, *Einbruchssicherung*, *GPS-Anbindung* etc. Der Paketzustellservice *UPS* organisiert z.B. hiermit seine Paketzustellung.

- **MobiTex**

wurde von der Fa. Ericsson gemeinsam mit der schwedischen Telekom für paketvermittelten Datenfunk entwickelt. In der BRD wird *MobiTex* seit 1995 mittler-

- **ERMES (2)**

steht im Gegensatz zu den o.a. nationalen Funkrufdiensten für *Enhanced* (früher: *European*) *Radio Message System*. Der von dem ETSI standardisierte und seit Ende 1992 in der BRD verfügbare Dienst arbeitet im Frequenzbereich von 169,4 - 169,8 MHz mit einer Übertragungsrate von 6,25 kbps. Die Cityruf-Endgerätetypen werden in verbesserter bzw. erweiterter Form angeboten. Dazu kommen Leistungsmerkmale, wie

- Nachrichtennumerierung zur Erkennung verlorengegangener Rufe
- Prioritätsruf mit zwei Klassen
- Übertragungszeit < 2,5 Minuten von der Auftragsvergabe bis zum Empfang
- Einsatz als *Transparentdaten-Empfänger (TD = Rufklasse 3)*

sowie etliche optionale Dienstmerkmale (*Rufumleitung*, *Rufwiederholung*, *Nachrichtenspeicherung mit zeitversetzter Aussendung* etc.).

International Mobile Telecommunications (IMT-2000)

IMT-2000 mit der europäischen Variante *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)* der 3. Generation befinden sich in der Normungsphase in den Händen von ITU, ETSI, ANSI und weiteren Gremien. *IMT-2000* ersetzt aktuell das wenig markante *Future Public Land Mobile Telecommunications Systems (FPLMTS)*. Hier werden die strengen Unterteilungen der vorangegangenen Abschnitte nicht mehr zu finden sein. Angepeilt sind wegen der benötigten Bandbreiten und des zu erwartenden Verkehrsaufkommens noch höhere GHz-Frequenzen als beim DECT-Standard: 1885 - 2025, später 2110 - 2200 MHz. Ein erster Schritt ist das o.a. *DCS1800*.

Die Integration muß alle Festnetze, außerdem Intelligente Netze (IN), B-ISDN in ATM-Technologie, aber auch Satellitenzugriff, CT- und WLL-Technologie mit einbeziehen. Dies nicht nur für das Fernsprechen, sondern auf alle heutigen und zukünftig denkbaren Multimedia-Dienste optimiert - das ganze nicht europa-, sondern weltweit. In der 2002 abgeschlossenen *UMTS Phase 1* werden erwartet [Hi.10]:

- Datenraten von 2 Mbps Inhouse, 384 kbps für Fußgänger, 144 kbps in Fahrzeugen,
- Hochqualitative Sprache mit niedrigen Bitraten (wenige kbps),
- Verbesserte komfortable Adressierungsmechanismen,
- Nahtloser Übergang im Haus, außer Haus und entfernt vom Haus,
- *Dual Mode/Band GSM/UMTS* in einem Netz,
- *Roaming* zwischen *GSM*- und *UMTS*-Netzen.

Zur Effizienzsteigerung müssen auf der technischen Seite neue Wege gegangen werden. Es wird an neuen Kanalzugriffsverfahren gearbeitet: *Advanced Time Division Multiple Access (ATDMA)* sowie *Code Division Multiple Access (CDMA)*, letzteres ein Verfahren, das sein Ursprünge schon in den Siebzigern hat und jetzt in komplexen Varianten durch die VLSI-Entwicklung technisch realisierbar scheint.

Ein weiteres wichtiges Leistungsmerkmal in diesem Zusammenhang ist die *weltweite persönliche Rufnummer (Universal Personal Telecommunications = UPT)*, möglichst lebenslang und unabhängig vom jeweiligen Dienstleistungsanbieter. Dabei können folgende Mobilitätsarten unterschieden werden:

- **Terminal-Mobilität (Handover-Fähigkeit)**,
bei der der Tln., wie bei den Mobilnetzen der 2. Generation, entsprechend der Zellularität des Netzes VSt-Einzugsbereiche während der Verbindung ohne Verbindungsunterbrechung bereisen kann, und die
- **Persönliche Mobilität (Roaming-Fähigkeit)**,
bei der der Tln. sich an jedem Netzanschluß jedes an diesem System beteiligten (intelligenten) Netzes weltweit einloggen kann, und dem gesamten Netz damit bekannt ist, wo er sich befindet.

Satellitenkommunikation

Das endgültige Zusammenwachsen der weltweiten Telekommunikation ist ohne Satelliten nicht denkbar. Vor allem die Mobilfunktechnik, aber auch Festnetze und besonders das Internet profitieren von Satelliten. UMTS, UPT und IMT-2000 des vorigen und das Intelligente Netz (IN) des folgenden Abschnitts kommen ohne Satelliten nicht aus. Microsoft-Besitzer Bill Gates plant ein eigenes Satellitennetzwerk um große Teile des Internet-Festnetzes international zu ersetzen [DO1, DO2, MA, He2].

Die historische Entwicklung der Satellitenkommunikation verläuft vom

- 1942: Start der ersten V2-Rakete über 190 km über den
- 1957: russischen *Sputnik*-Satelliten in 250/950 km Höhe
- 1962: aktiver Nachrichtensatellit *Telstar 1*
- 1965: kommerziell genutzter geostationärer Satellit *Early Bird (Intelsat 1)*
- 1989: *DFS-Kopernikus* der DBP
- 1992: *INTELSAT VII* mit 30 000 Fernsprech- und mehreren Fernsehkanälen
- 1998: Start der ersten von 66 *Iridium*-Satelliten für direkte Kommunikation mit dem Handy ohne **Land-Erdfunkstelle (LES; engl.: *Satellite Earth Station = SES*)**. Handy-Antennen sind so kompakt, daß sie unmittelbar am Gerät befestigt sind und eingeklappt in die Hosentasche passen.

Satellitenstarts erfolgen heute mit Ariane-Raketen oder Shuttles. Einmal im All, empfängt der Satellit die (**LES**)-Signale auf einer **Uplink**-Frequenz und reflektiert sie über einen **Transponder** auf einer anderen **Downlink**-Frequenz auf seine Ausleuchtzone (**Footprint**). Vor allem die Fernsehtechnik kann so ihre Programmvielfalt nur über Satelliten dem Nutzer mit preiswerten Parabolantennen näherbringen. Vor allem sind hier in Mitteleuropa die vier Astra-Satelliten zu nennen.

Technische Randbedingungen

Unabhängig von seiner Funktion als Fernmeldesatellit sind für die Bahn des Satelliten zunächst die Keplerschen Gesetze der Planetenbewegung von Bedeutung. Demnach besteht auf der elliptischen Bahn mit dem Erdmittelpunkt in einem Brennpunkt dauernd ein Gleichgewicht zwischen Gravitations- und Zentrifugalkraft. Das dritte Keplersgesetz bestimmt den Zusammenhang zwischen Umlaufzeit T und Bahnradius r zu $T \sim r^{3/2}$. Je näher sich der Satellit der Erde auf seiner Ellipsenbahn befindet, desto schneller muß er sich bewegen, um nicht herabzufallen.

Da die **LES** eine permanente Verbindung zum Satelliten braucht, ist eine geostationäre (synchrone) Umlaufbahn (**GEO = *Geosynchronous Earth Orbit***) erwünscht. Dazu muß die Bahn möglichst kreisförmig sein (Koinzidenz von **Perigäum** und **Apo-gäum**), Satellitenflugrichtung und Erddrehrichtung müssen gleich sein, Äquatorialebene und Satellitenbahnebene sollen nur gering voneinander abweichen und die Satellitenumlaufzeit T sollen 24 h betragen. Aus den Keplersgesetzen errechnet sich hierfür eine Äquatorialhöhe von 35 786 km. Da die BRD schon recht weit nördlich liegt, ergeben sich hieraus flache Wege durch die Atmosphäre mit Signallaufzeiten bis zu 275

ms, die bei Echtzeitverbindungen (Fernsprechen, Videokonferenzen) ins Gewicht fallen. Drei Satelliten unter 120° im **GEO** genügen zur Ausleuchtung der gesamten Erdoberfläche.

Geostationäre Satelliten stehen aus verschiedenen Gründen dennoch nicht stationär auf einem Platz, sondern weisen eine Drift auf, die etwa ein Quadervolumen von der Grundfläche des Saarlands nicht überschreiten darf ($0,1^\circ$). Aufgrund dieses Toleranzfensters ist die Satellitenanzahl auf der Synchronbahn beschränkt. Ihre Anzahl beträgt mittlerweile weit über 200 mit zahlreichen militärischen und auch Schrottsatelliten.

Abhilfe schaffen rasch umlaufende **LEO = Low Earth Orbit**-Satelliten in ca. 1000 km Höhe. Wenn hiervon mehrere zur Verfügung stehen, kann eine **LES** dauernd umgeschaltet werden. Vorteile sind wegen des geringeren Erdabstands geringere Signaldämpfung und -laufzeiten, komplizierter die Vernetzung, Steuerung (Restatmosphäre), Umswitchen (Handover) bestehender Verbindungen, teurerer die Satellitenmenge und Raketenstarts. Eine Mittelstellung zwischen **GEO** und **LEO** nehmen **MEO = Medium Earth Orbit**-Satelliten in ca. 10 000 km Höhe ein.

Wichtig zur technischen Realisierung der Übertragungstechnik sind gut bündelnde Antennen mit hohem Antennengewinn $G = 10 \log(\pi^2 D^2 \eta / \lambda^2)$. Er ist definiert als der Faktor, um den die Leistungsdichte der Antenne höher als die Leistungsdichte des isotropen Kugelstrahlers mit $G = 1$ (0 dB) ist. Hierbei ist D der Reflektordurchmesser, η der Antennenwirkungsgrad und $\lambda = c/f$ die Wellenlänge mit c als Lichtgeschwindigkeit (300 000 km/s). Durch die Richtwirkung kann gezielt ein Gebiet, z.B. die BRD, ausgeleuchtet werden.

Frequenzen f liegen im hohen 100MHz-Bereich bis ca. 30 GHz. Oberhalb von 1 GHz werden quasioptische Richtstrahler eingesetzt. Eine typische **LES**-Antenne ist die Cassegrin-Antenne mit 2 - 30 m Durchmesser. Offset-Antennen mit gegenüber dem Strahlgang versetztem Speisehorn und Subreflektor erlauben kompakte Antennen für senkrechte Montage, die kaum durch Regen und Schnee beeinträchtigt werden.

Verluste, die G schmälern, sind u.a. Ausrichtfehler, Oberflächentoleranzen, Beugung, Ausleuchtwirkungsgrad, Abschattung, Phasenfehler. Bandbreitenverdopplung wird durch Polarisierung erreicht, indem der Feldvektor der elektromagnetischen Wellen bei linearer Polarisierung vertikal und horizontal, und bei zirkularer Polarisierung rechts- und linksdrehend polarisiert wird. Kreuzpolarisation tritt als weiterer Verlust bei einer Entkopplungsdämpfung unterhalb von ca. 20 ... 30 dB auf. Rauschfreie analoge Sprachübertragung bedarf eines Signalstörabstands von mindestens 30 dB, Videosignale von 40 dB. Bei digitaler Übertragung transformiert sich ein endlicher Störabstand in eine bestimmte Bitfehlerrate (Bit Error Rate = BER).

Die verfügbaren Frequenzen werden durch bestimmte physikalische Gegebenheiten eingegrenzt: Ionosphäreinflüsse und kosmische Strahlen (Sonnenwind) sind oberhalb von 1 GHz vernachlässigbar, dafür müssen hier stark bündelnde Antennen eingesetzt werden. Oberhalb 5 ... 20 GHz beeinflusst die Troposphäre, also die Luftschicht unmittelbar oberhalb des Erdbodens mit ihren atmosphärischen Einflüssen (Regen, Schnee, Temperaturschwankungen) die Dämpfung. Dann soll der Elevationswinkel der **LES** möglichst groß sein können. Folgende Frequenzbänder werden genutzt; angegeben ist die Bezeichnung sowie die **Downlink/Uplink**-Frequenz in GHz: **L** (1,5/1,6), **S** (2/2), **C** (4/6), **K_u** (11/14) bzw. (12/14), **K** (12/18), **K_a** (20/30).

Einem Frequenzpaar ist ein *Transponder* zugeordnet, von denen der Satellit über mehrere verfügt. Beispielsweise verfügt ein *C-Band-Transponder* mit 500 MHz Bandbreite über 8 - 12 Sende- und Empfangskanäle mit einer Kanalbandbreite von 36 - 54 MHz. Das Eingangssignal wird über einen rauscharmen Verstärker einem Mischer zugeführt, der aus einem Oszillator mit einem Folgefilter die *Downlink*-Frequenz auf den Leistungsverstärker der Sendeantenne gibt.

Wichtig zur Minimierung der Sendeleistung für einen geforderten NF-Signal-Geräuschabstand ist die Wahl geeigneter Modulations- und Multiplexverfahren. Für Analogübertragung ist dies meist FM, für Digitalübertragung Phasensprungmodulationen, die allerdings eine größere Bandbreite als z.B. AM aufweisen. Zur Minimierung von Multiplexstörungen empfiehlt sich eine Aufteilung in wenige breitbandige HF-Träger statt vieler schmalbandiger, da diese wegen Übersprechens einen bestimmten Sicherheitsabstand nicht unterschreiten dürfen.

Für die BRD wichtige Systembetreiber sind *INTELSAT (INTERNATIONAL TELEcommunications SATellite Organization)* mit Sitz in Washington, die seit 1964 mittlerweile mehr als 25 Satelliten über den Weltmeeren betreibt. *EUTELSAT (EUROPEAN ...)* in Paris betreibt acht Satelliten zwischen 1° Ost und 36° Ost. Von besonderer Bedeutung ist

INMARSAT

steht für *INTERNATIONAL MARitime SATellite Organization* (Internationale Seefunksatelliten-Organisation) als Non-Profit-Betreibergesellschaft eines weltweit verfügbaren Mobilfunk-Satellitensystems, seit 1979 mit Sitz in London. Ursprünglich für die Schifffahrt gegründet, wird heute terrestrische Mobilkommunikation mit abgedeckt. Die BRD wird neben 80 weiteren Ländern von der *DTAG-INMARSAT* vertreten. An vier festgelegten Positionen über dem Ozean befindet sich das *Raumsegment* aus 11 geostationären Betriebs- und Ersatzsatelliten. Die Satelliten leuchten den gesamten Globus, bis auf die Polkappen aus. Steuernde Bodenstationen (*LES*, z.B. der DTAG in Raisting) realisieren die Ankopplung an terrestrische Netze [Schu].

Das Dienstangebot ist vielfältig und die wichtigsten Dienste sollen vorgestellt werden:

- **INMARSAT-A:**

leitungsvermittelter Dienst der DeTeMobil zum Aufbau von Telefon-, Fax-, Daten- und vollduplexfähigen Telexverbindungen von mobilen Endgeräten (*MobSatAnl* = Mobile Satelliten-Kommunikationsanlage) zu jedem Anschluß der weltweiten öffentlichen Netze. Fax- und Datenübertragung erfolgen mittels Modem bis 9,6 kbps.

- **INMARSAT-A-HSD:**

schneller Datendienst bis 64 kbps im INMARSAT-A-Dienst. Das Dienstangebot umfaßt Simplexverbindung von der *MobSatAnl* zu einer Feststation am terrestrischen ISDN-Anschluß und als Duplexverbindung zwischen ISDN-Anschlüssen.

- **INMARSAT-B:**

Digitaler Satellitendienst seit 1993 zur Ablösung von *INMARSAT-A*. Dienstumfang: Telefon/Faxverbindungen mit automatischer Wahl, Datenübertragung bis 64 kbps, Datenabfrage Landstation - *MobSatAnl* und Datenmeldung *MobSatAnl* - Landstation in automatischer Wahl, dito Positionsabfrage und -meldung, *GMDSS-Teilnahme (Global Maritime Distress and Safety System: weltweites Seenot- und Sicherheitsfunksystem)*.

- **INMARSAT-C:**

Digitaler Dienst von DeTeMobil mit bittransparenter Simplex-Telexübertragung sowie paketorientierter X.25-Datenübertragung bis 600 bps. Durch die Datenzwischen-speicherung in den *LES* und das ARQ-Sicherungsprotokoll (Automatic Request for Retransmission) ist die Datensicherheit auch bei kurzer Unterbrechung der Satellitenverbindung gewährleistet. Netzzugänge bestehen zum Telexnetz und Datex-P.

- **INMARSAT-M:**

Digitaler Dienst, der seit Anfang 1993 den veralteten analogen Dienstes *INMARSAT-A* in gleicher Funktionalität ablöst. Weiterhin ergeben sich wegen verringerter Geräteabmessungen und Gewichts neue Anwendungsmöglichkeiten in der Schifffahrt (Yachten) sowie im internationalen Straßenverkehr.

- **INMARSAT-P:**

soll ab 1999 das sog. *SPCN (Satellite Personal Communications Network)* realisieren. Zehn neue Betriebs- und zwei Einsatzsatelliten auf *MEO*-Bahnen ermöglichen als Mobiltelefonsystem (mit persönlicher Rufnummer) weltweit den Zugang zum internationalen Telefonsystem. *Dual-Mode-Handys* erlauben zusätzlich und vorrangig die Kommunikation im terrestrischen GSM. Kommt die GSM-Verbindung nicht zustande, wird die *INMARSAT-P*-Verbindung automatisch aufgebaut.

Iridium

Dieses satellitengestützte globale zellulare Mobilfunksystem der Fa. Motorola ging 1998 in Betrieb. Es ermöglicht das erdumspannende Angebot von Telefon-, Fax-, Personenruf-, Datenübertragungs- und Ortungsfunkdiensten. Ursprünglich war vorgesehen, mit 77 *LEO*-Satelliten den Einsatz von Endeinrichtungen ähnlich *GSM-Handys* zu ermöglichen. Wenn diese Satelliten den Erdball umkreisen, sieht dies ähnlich wie das elektrisch neutrale Iridiumatom mit seinen 77 Elektronen aus. Nach einer Systemoptimierung werden nur noch 66 aktive und 7 Reservesatelliten benötigt [LO.10].

Bei *Iridium* bewegt sich sowohl der Tln. als auch das Netz, letzteres allerdings wohldefiniert. Die Teilnehmerbewegungen sind jedoch aufgrund der immer sehr viel höheren Satellitengeschwindigkeit vernachlässigbar. Die Verbindungen zwischen Teilnehmer und Satelliten werden im *L-Band* mit 48 unabhängigen *Beams* pro Satellit entspr. $66 \cdot 48 = 3168$ *Funkzellen* abgewickelt. Sie erfolgen direkt ohne terrestrische Zwischenstufe. Neu ist, daß die Satelliten auch unmittelbar untereinander kommunizieren, also im All Vermittlungsfunktionen wahrnehmen. Diese Verbindungen, sowie zu weltweit 20 *LES* mit Vermittlungsfunktionen zum Festnetz laufen über das *K_a-Band*.

Iridium-Satelliten bewegen sich auf 6 Orbits mit je 11 Satelliten in 760 km Höhe, wobei Orbit 1 und 6 23° Abstand zueinander aufweisen und Orbits 2 - 5 31,4°. Der Winkel zu einem Teilnehmergerät beträgt so stets mindestens 8°. Die *Beams* unterschiedlicher Sendeleistung und mit 400 - 600 km Durchmesser streichen mit ca. 450 km/min über die Erdoberfläche hinweg, weshalb im Mittel pro Verbindung alle Minute ein *Handover* ansteht. Hier sind *Beam/Beam-Handover* desselben Satelliten und *Satellit/Satellit-Handover* zu unterscheiden. Sie sind allerdings einfacher als im *GSM*-Netz abzuwickeln, da die Tln. quasi stationär sind und wegen der definierten Bewegung der Satelliten schon beim Verbindungsaufbau bekannt ist, wann und wohin ein *Handover* zu erfolgen hat.

Ein Problem sind die Polarregionen: in deren Nähe überschneiden sich die *Beams* verschiedener Satelliten stärker als in größerem Abstand, weshalb *Beams* temporär abgeschaltet werden müssen. Von den 3168 *Zellen* sind nur 2150 gleichzeitig aktiv. *Iridium* verwendet wie *GSM* die Zugriffskombination FDMA/TDMA und codiert Sprache mit nur noch 4,8 kbps. Aus diesen Daten ist leicht zu errechnen, daß die *GSM*-Teilnehmerkapazität nicht zu erreichen ist. Das primäre Ziel von *Iridium* ist daher die Versorgung von Gebieten geringer Telekommunikations-Infrastruktur oder überlasteter terrestrischer Mobilfunknetze. Für 2000 werden weltweit ca. 1,5 Mio. Tln., im Maximalausbau 2008 ca. 3 Mio. Tln. erwartet. Als Gesamtkosten sind 3,4 Mrd. \$ taxiert.

Global Positioning System (GPS)

GPS ist ein weltweites Satellitensystem zur hochgenauen Ortung, Navigation und Zeitverteilung. *GPS*-Satelliten ermöglichen eine 24stündige, ständige Bestimmung von Position, Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung mobiler Objekte an jedem beliebigen Punkt der Erde. Das *GPS* ist das modernste und bzgl. seiner Genauigkeit leistungsfähigste Navigationsverfahren und steht allen Anwendern uneingeschränkt, kostenlos und weltweit zur Verfügung [KU, MA, He1].

Europa, speziell die EU, versucht sich derzeit, durch den Aufbau des *Global Navigation Satellite System (GNSS)* *GPS*-unabhängig zu machen.

Das *GPS* wurde in den 70er und 80er Jahren im Auftrage des US-Verteidigungsministeriums entwickelt und errichtet, und war, wie das Internet, ursprünglich nur zur militärischen Nutzung vorgesehen. 1984 wurde ein Teil zur zivilen Nutzung freigegeben, allerdings mit geringerer Genauigkeit als für den militärischen Bereich, Vollausbau erfolgte 1992.

Das *MEO-Raumsegment* besteht aus 21 mit $T = 12$ h auf sechs Bahnen in 20 230 km Höhe umlaufenden Betriebs- und drei Ersatzsatelliten. Die Bahnen sind gegenüber dem Äquator um 55° geneigt und so festgelegt, daß an jedem Ort immer mindestens vier Satelliten gleichzeitig angepeilt werden können.

Zur Informationsübertragung wird das *L-Band* von *INMARSAT* mit $f_1/f_2 = 1575,42/1227,60$ MHz verwendet, so daß *INMARSAT*-Empfänger zur Inanspruchnahme des *GPS* genutzt werden können. f_1 ist Träger des freien Zugangs-*C/A-Codes*

(*Clear Acquisition*), f_2 des militärisch genutzten geschützten *P-Codes (Protected Code)*. Neben den Codes ist den Trägerfrequenzen Navigationsinformation aufmoduliert, die die Borduhren korrigiert, sowie *Almanach-* und *Ephemeriden-*Daten enthält.

Ein Satellit verfügt dazu über vier hochgenaue Atomuhren mit einer spezifischen *GPS-Zeit*, da in der Weltzeit (*Universal Time Coordinated = UTC*) Schaltsekunden eingefügt sind, die in der *GPS-Zeit* nicht verarbeitet werden können. *GPS-Zeit* und *UTC* weisen ca. 10 s Schlupf auf, der mit der Navigationsnachricht zum *GPS-Empfänger* übertragen wird, *GPS-Uhren* weichen maximal um 30 ns von der *GPS-Zeit* ab. Die Resonanzfrequenz einer der vier Uhren dient im Satelliten zur Erzeugung der Grundfrequenz von 10,23 MHz, aus der u.a. die Trägerfrequenzen und der *C/A-Code* gebildet wird. *GPS-Empfänger* erhalten die Zeitunterschiede durch Korrekturdaten, die wiederum den Bodenstationen entstammen.

Zur Referenz-Positionsbestimmung errechnen fünf terrestrische Kontrollstationen die jeweilige Satellitenentfernung und übermitteln sie an die Hauptstation in Colorado Springs/USA. Hier werden die Bahn- und Korrekturdaten ermittelt und über die Kontrollstationen wieder zu den Satelliten übertragen. Dazu muß jeder Satellit mindestens einmal am Tag von vier Kontrollstationen gleichzeitig gesehen werden.

Damit ein *GPS-Empfänger* zunächst herausfinden kann, welche Satelliten sichtbar sind und optimale Konstellationsvoraussetzungen zur Positionsbestimmung liefern, nutzt er *Almanach-Daten* mit Bahn- und Uhrenparameter, Satellitenkennung und -status. Aus den *Ephemeriden*, die die tägliche Position von Sonne, Mond und Planeten angeben, errechnet er sodann die exakte Satellitenposition. Diese Daten beschreiben Form und Lage der Satellitenbahnen, die z.B. durch den Strahlungsdruck der Sonne beeinflusst werden. Bei Sichtkontakt zwischen *GPS-Empfänger* und Satellit kann durch Vergleich der Empfängerzeit mit der Satellitenzeit mittels der Lichtgeschwindigkeit die Signallaufzeit bestimmt werden. Die Linie äquidistanter Abstände zwischen einem *GPS-Empfänger* und genau einem Satelliten bildet einen Kreis auf der Erdoberfläche mit dem Satelliten über dem Mittelpunkt. Bei drei empfangenen Satelliten stellt der eindeutige Schnittpunkt aller drei Kreise die gesuchte *GPS-Empfängerposition* dar.

Eine 3D-*GPS-Positionsbestimmung* (z.B. für Flugzeuge) ist für 95% der zivilen Anwendungen genauer als 100 m. Da dies den Militärs für zivile Nutzer zu genau ist, werden die Satellitensignale künstlich durch einen sog. *S/A-Code (Selective Availability)* verrauscht. Zur Positionsbestimmung eines KFZ in einer Stadt, dessen Fahrer die nächste Abfahrt ermitteln möchte, ist dies i.allg. zu ungenau. Abhilfe schafft *DGPS (Differential GPS)* durch einen *GPS-Referenzempfänger* an einem exakt vermessenen terrestrischen Standort. Dieser ermittelt permanent Korrekturdaten aus dem Unterschied seiner mittels *GPS* errechneten und der bekannten Position, die er über das *Radio Data System = RDS* auf Langwelle oder Mobilfunk abstrahlt. Kann der *GPS-Empfänger* auch diese speziell codierten Daten verarbeiten, ist die o.a. Genauigkeit erreichbar.

In der BRD betreibt die DTAG *DGPS* seit Anfang 1997 als *ALF-Service (Accurate Positioning by Low Frequency)*. Ein LW-Sender in Mainflingen sendet alle drei

Sekunden auf 122 kHz die Korrekturdaten, die bundesweit zu einer Positionsgenauigkeit von besser als 5 m führen. Anwendung findet das **GPS** so in der Steuerung von Lkw-Flotten mittels **GSM-Netz** oder **MoDaCom**, Schifffahrt, Luftfahrt, Land- und Forstwirtschaft, Landvermessung, Geschwindigkeitsmessungen sowie bei Polizei- und Rettungsdiensten.

GPS-Mehrkanal- und -Multiplexempfänger unterscheiden sich durch die Anzahl der Empfangskanäle und Art der Satellitenverbindung. Ein Mehrkanalempfänger benötigt zur 2D-Ortsbestimmung mindestens drei Satelliten, also zumindest drei parallelverarbeitete Empfangskanäle. Ein fünfkanaliger Empfänger ist unkritischer beim Umschalten eines Kanals auf einen anderen Satelliten. Preiswertere Multiplexempfänger können ihren einzigen Empfangskanal sequentiell auf die einzelnen sichtbaren Satelliten schalten und navigieren entsprechend träger.

GPS-Empfänger bestehen im wesentlichen aus Empfangs-, Signalverarbeitungs-, Ausgabe- und Bedienteil. Die zur Navigation errechneten Daten können auf einem Display angezeigt, oder über eine Schnittstelle zur Weiterverarbeitung an ein komplexeres Navigationssystem, z.B. Auto-PC mit Land/Straßenkarte ausgegeben werden.

Das Intelligente Netz (Intelligent Network: IN)

ITU-T hat sich dieses Themas unter der Q.1200-Serie angenommen. Was macht nun ein Netz *intelligent*? Dieser spezifische Begriff ist abzugrenzen gegenüber der normalen Intelligenz, die heute ein digitales rechnergesteuertes Netz dank der Intelligenz dieser Rechner ohnehin schon hat - dies wiederum gegenüber mechanisch gesteuerten Netzen aus der Gründerzeit. Aber auch eine mechanische Steuerung bedeutet bereits Intelligenz gegenüber der Handvermittlung [BI.10, GE1, te].

Ein *Intelligentes Netz* ist ein dienstunabhängiges Telekommunikationsnetz. Das bedeutet, daß im Gegensatz zum reinen ISDN Intelligenz aus den Vermittlungsknoten entnommen wird und in separate Knoten über das Netz verteilt wird, deren Aufgabe nicht die Vermittlungstechnik ist. Dies stellt dem Netzbetreiber die Mittel zur Verfügung, das Netz effizient zu entwickeln und zu steuern. Neue Funktionalitäten können rasch im Netz implementiert werden. Einmal eingeführt, können Dienste auf einfache Weise den Kundenanforderungen angepaßt werden.

Konstellation der Geschäftspartner im IN

Funktional können nach der *IN*-Philosophie verschiedene Interessengruppen identifiziert werden, die das *IN* intelligent machen und seine *Konstellation* über die Grundnetze weit hinaushebt:

- **Netzbetreiber (Carrier):**

der klassische Inhaber des physikalischen Leitungs- und Vermittlungsnetzes, z.B. die *DTAG*, *DeTeMobil*, *Viag Interkom*. Sie treten auch selbst als **Dienstanbieter** auf. Ein separater **Netz-Operator** kann wiederum für diesen die Netzverwaltung übernehmen, das *IN (SCPs)* selbst kann einem anderen **Netzbetreiber** als dem Leitungsnetzbetreiber gehören.

- **Dienstanbieter (Service Provider):**
z.B. die Firmen *Computel*, *Talkline*, *Debitel*, bieten wiederum **Dienstteilnehmern** Dienstleistungen an. Dies besonders im GSM-Mobilfunk, wie Vertrieb von Telefontkarten und Mobiltelefonen, Gebührenabrechnung, Kundenbetreuung und Verwaltung von Mobilfunkdiensten. **Dienstanbieter** haben auch den direkten Kundenkontakt und können so das Aufkommen neuer Dienstbedürfnisse an die **Dienstteilnehmer** zurückmelden.
- **Dienstteilnehmer (Service Subscriber):**
der B-Tln. als Kunde des **Dienstanbieters**, der ggf. mehrere Vertragsverhältnisse mit diesem hat, z.B. die *BHW-Bank*, der Börsensender *ntv* oder der *Otto-Versand*.
- **Dienstnutzer (Service User):**
der A-Tln. als Kunde des **Dienstteilnehmers**, der auf das *IN* zugreift: *Sie* oder *ich*.
- **Produktlieferant (Product Supplier):**
bieten wiederum allen Beteiligten genormte Komponenten: dem **Netzbetreiber** die **SSPs** und **SCPs**, dem **Dienstanbieter** sowie dem **Dienstteilnehmer** spezifische Software, ggf. auch Hardware (z.B. *Call-Center* der Fa. *Micrologica*), und dem **Dienstnutzer** Endgeräte (Telefax-Gerät, Handy, Laptop mit GSM-Schnittstelle), z.B. *Siemens*, *Ericsson*, *Nokia*.

Dienste im IN

Ein Beispiel haben wir oben beim Mobilfunk schon kennengelernt - die technische Realisierung der *Terminal-Mobilität* und die *Persönliche Mobilität*. Ein weiteres praktisches Beispiel ist der in der BRD unter der Vorwahl 0130/0800 erreichbare **freecall**, bei dem ein Unternehmen weltweit unter Kostenübernahme durch den **Dienstteilnehmer** erreicht werden kann (engl.: **Freephone** oder **Toll Free Service**). Mit dieser unternehmenseinheitlichen Nummer ist im Gegensatz zur herkömmlichen Verbindung nicht ein physikalischer Anschluß verbunden, sondern in Abhängigkeit des Ortes des **Dienstnutzers** wird z.B. zur jeweils nächstgelegenen Geschäftsstelle weiterverbunden. Beim Verbindungsaufbau wird also nicht ein Anschluß adressiert, sondern eine Funktion.

Dazu sind komplexe Datenbasen (**Network Information Databases = NIDs**) notwendig, die zentral die Abbildung 800er-Nummer ↔ Ort des **Dienstnutzers** ↔ Ort der nächstgelegenen Geschäftsstelle vornehmen. Diese **NID** ist einem **Dienststeuerungspunkt (Service Control Point = SCP)** zugeordnet, der, bevor der eigentliche Vermittlungsvorgang zur physikalischen Rufnummer durchgeführt wird, angesprochen werden muß. Hier wird also die Umwertung vorgenommen und die Ursprungs-VSt erhält die physikalische Nummer zurück. Die eigentlichen vermittlungstechnischen Funktionen werden im **Dienstvermittlungspunkt (Service Switching Point = SSP)** durchgeführt.

SSP und **SCP** sind funktional scharf getrennt - was jedoch nicht bedeutet, daß sie nicht im gleichen Gebäude untergebracht sein können. Ja es kann sich sogar im Einzelfall um jeweils einen einzigen Rechner handeln, in dem diese Funktionen als unterschiedliche Programme abgelegt sind, die gar noch im Multitasking-Betrieb umeinander abgewickelt werden. Das in Kap. 7 beschriebene ZGS#7 bietet heute die Möglichkeiten zu dieser funktionalen Trennung mithilfe der TCAPs (Transaction Capabilities).

Aufgrund der Tatsache, daß *freecall* auch im analogen Telefonnetz angeboten wird, ist erkennbar, daß Intelligenz nicht durchgehende Digitalisierung voraussetzt. Sie wird dadurch jedoch erleichtert. Als weitere Beispiele wären zu nennen:

- **Universal Number (UN; Service180x)** bei dem allerdings der *Dienstnutzer* oder/und der *Dienstteilnehmer* in Abhängigkeit der Ziffer *x* zur Kasse gebeten wird. Dazu gehören ärztliche Notdienste, Telesupport (Hot Line) usw. Ähnlich bietet der
- **Tele Info Service (TIS; Service190x/0900)** Hotlines für Gewinnspiele, Sport, Börse, Stellenangebote, Wetter etc. Hier können per Tastendruck gezielt Informationen abgefragt werden.
- **Tele Voting Service (TVS; Service 137)** für Abstimmungen.
- **Tele Dialog Service (TDS; Service 138)** dienen der Demoskopie, Marktforschung, Zuschauerbefragung etc.
- **Vanity-Numbers** erlauben Namenwahl bei Telefonen mit Tasten, die neben den Ziffern auch Buchstaben aufweisen (2/ABC, 3/DEF ...). In den USA ist ein Blumenversandservice z.B. über 0800FLOWERS erreichbar, in der BRD wird dieser Dienst nun unter der Vorwahl **0700** für jedermann angeboten.
- **T-Net-Box** realisiert einen aktiven Anrufbeantworter im Netz, der seinen Besitzer eigenständig nach Eingang einer Nachricht weltweit anrufen kann. Das Einrichten der Box erfolgt über eine einheitliche *freecall*-Nummer und Benutzerführung.

In den USA werden u.a. folgenden Dienste erprobt bzw. befinden sich in der Spezifikationsphase:

- **Routing by Day of the Week:** in Abhängigkeit des Wochentags wird ein kommender Ruf zu verschiedenen Rufnummern geleitet, z.B. zu einem Wochenendhaus.
- **Routing by Time of Day:** in Abhängigkeit des Tageszeit wird ein kommender Ruf zu verschiedenen Rufnummern geleitet.
- **Work at Home Billing:** bei Telearbeit werden gehende Rufe von zuhause dem Gebührenkonto des Arbeitgebers belastet, evtl. für einen vordefinierten Satz von Rufnummern.
- **Holding Room:** Passagiere von Transportgesellschaften (Flugzeug, Bahn) informieren ihre Angehörigen auf Kosten der Gesellschaft über Verzögerungen.

Weitere Funktionen des *IN* sind die Unterstützung der Netzverwaltung sowohl durch den *Netzbetreiber* als auch den *Dienstanbieter*. Zum einen soll es möglich sein, neue Dienste (hier: Mehrwertdienste) rasch einzuführen, aber auch eingeführte einfach zu modifizieren, sowie bereits bereitgestellte *NIDs* einfach ändern zu können. Man kann sich vorstellen, daß bei einem weltweit agierenden Großunternehmen mit *Free-phone* praktisch täglich Umkonfigurierungen vorgenommen werden müssen. Das Ganze wird unterstützt von einem komplexen *Telekommunikations-Management-Netz (TMN; s. Abschn. 7.3)*.

Zudem werden diese Dienste natürlich auch in anderen Ländern angeboten, in den USA z.B. unter der mittlerweile auch in der BRD zugänglichen 800er-Vorwahl, und hier müssen diese *SCPs* in der Lage sein, die Informationen in ihren *NIDs* kontinuierlich und im Bedarfsfall auszutauschen. Das ist eine völlig separate Funktion von dem

im konkreten Fall anfallenden eigentlichen Vermittlungsvorgang. Diese Funktionalität wird unter dem Schlagwort *Service Logic Interpreter (SLI)* erfaßt, in dem die Ablaufsequenzen festgehalten werden, die zur Dienstleistung und Verwaltung des intelligenten Mehrwertdienstes notwendig sind.

Am Beispiel der o.e. Dienste sind dies neben dem Auffinden der passenden Dateien und darin der Datensätze, die Übermittlung derselben beim konkret anfallenden Vermittlungsvorgang, aber auch die korrekte Ansteuerung der Gebührenzähler. Weiterhin gehört dazu die sog. *Intelligente Peripherie (Intelligent Peripherals)*, die Ansagen (*Digital Announcement System = DAS*) erzeugen, Text to Speech-Wandlungen, Spracherkennungen oder Benutzerführungen (die nicht selten schiefgehen) etc. durchführen kann.

Aktuelle Entwicklung und Probleme im IN

Nicht zuletzt wird jedoch erwartet, daß ein vergleichbares Dienstleistungsangebot nicht nur für *Unternehmen* angeboten wird, sondern auch daß sich der *Privatmensch* der Zukunft vom Netz ein komplexes Dienstleistungsangebot bereitstellen läßt. Dazu werden sog. *Functional Components (FCs)* definiert, die eine bestimmte Funktion des *IN* realisieren. Die individuellen Kombinationsmöglichkeiten der *FCs* realisieren in ihren verschiedenen Ausprägungen die auf den jeweiligen Tln. individuell zugeschnittenen Möglichkeiten.

In einer Zukunft, von der erwartet wird, daß der PC so selbstverständlich ist, wie Telefon und KFZ, sollte es möglich sein, daß der Tln. diese Netzeinstellung im Rahmen der vom *Dienstleister* vorgegebenen Möglichkeiten selbst konfiguriert. Dazu gehört z.B., daß der *Dienstleister* dem Kunden die Möglichkeit anbietet, bestimmte Rufnummern kostengünstiger zu erreichen als andere. Dies möchte der Tln. vielleicht regelmäßig dynamisch ändern, wofür die Methode über Antragsformulare nicht eben die zeitangepasseste ist.

Eine Eingabe am PC mit einem vom *Dienstleister* auf die jeweilige Betriebssystemoberfläche angepaßten Menü läßt die Umkonfigurierung mal eben in der Mittagspause durchführbar erscheinen. Ein anderes Beispiel wäre der Abruf des Gebührenkonto-Datei der letzten vier Wochen als Tortengrafik oder Histogramm. Da sich mit der Liberalisierung des Marktes die *Dienstleister* nun drängeln, findet auch hierzulande eine scharfe Trennung zwischen dem *Netzbetreiber* des physikalischen Netzes und dem *Dienstleister* statt. Das Netz ist dazu nun in der Lage, vor der Ortsvorwahl eine Netzvorwahl auszuwerten (z.B. 01019 für MobilCom).

Für reinen Sprachverkehr ermöglichen zwischen Telefon und Steckdose geschaltete Tarifmanager-Boxen (*Least Cost Router*) für weniger als DM 100,- dynamisch per Call (*Call by Call*-Verfahren), die Verbindung über den jeweils kostengünstigsten *Dienstleister* abzuwickeln, indem die Box dessen Netzvorwahl automatisch der gewählten Rufnummer voranstellt. *Preselection-Kunden* erreichen ihren Primäranbieter unter der Standard-Rufnummer. Gegen eine monatliche Gebühr erfolgt der Update

über die Anschlußleitung, da *Dienstanbieter* entstehen und vergehen, und im Zuge massiven Konkurrenzdrucks sich immer neue Tarifkombinationen herausbilden. Wer bereit ist, Werbeeinblendungen in ein Telefongespräch zu akzeptieren, kann mancherorts gar kostenlos telefonieren, wenn dies nicht gerade wieder ein Gericht verbietet. Anderswo wird monatlich vom *Dienstanbieter* unter seinen Kunden ein KFZ verlost.

Der Preis der Freiheit sind verworrene Tarife mit Minutenfallen bei der Abrechnung, umständliche Anmeldeverfahren, Qualitätsminderung durch überlastete Leitungen oder indem die ersten Gesprächssekunden verlorengelassen, bescheidene Services.

Mit diesen Ausführungen wurden nun schon die Grenzen der Bestandsaufnahme, um die es ja in diesem einführenden Kapitel gehen sollte, erreicht. Als nächstes soll nun das grundlegende theoretische Gerüst vorgestellt werden, das die abstrakte und konkret realisierbare Strukturierung von Telekommunikationsnetzen jedweder Art erst ermöglicht: das OSI-Referenz-Modell.

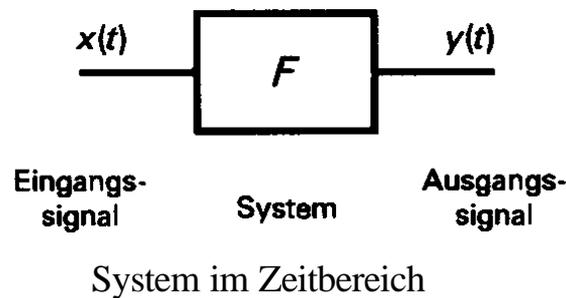
Einführung in die Nachrichtentechnik

Teil II

Nachrichtentechnische Grundlagen

Nachrichtentechnische Grundlagen

Signale und Systeme



Allgemeiner Fall:

$$y(t) = Tr\{x(t)\}$$

Linearität:

Mit $x_1(t) \rightarrow y_1(t)$ und $x_2(t) \rightarrow y_2(t)$

gilt immer auch $a \cdot x_1(t) + b \cdot x_2(t) \rightarrow a \cdot y_1(t) + b \cdot y_2(t)$

Zeitinvarianz:

Mit $x(t) \rightarrow x(t-t_0)$

gilt immer auch $y(t) \rightarrow y(t-t_0)$

Gedächtnis:

Bei einem System ohne Gedächtnis ist $y(t_0)$ nur von $x(t_0)$ abhängig. Hat das System Gedächtnis so haben auch Werte von $x(t)$ für $t < t_0$ auf $y(t_0)$ Einfluß.

Kausalität:

Ein System ist kausal, wenn nur zurückliegende und gegenwärtige Eingangssignale Einfluß auf das momentane Ausgangssignal haben. Reagiert ein System auf ein Signal, bevor dieses am Eingang auftritt sprechen wir von akusalem Verhalten. Solche Systeme sind physikalisch unreal aber manchmal mathematisch bequemer zu beschreiben.

Stabilität:

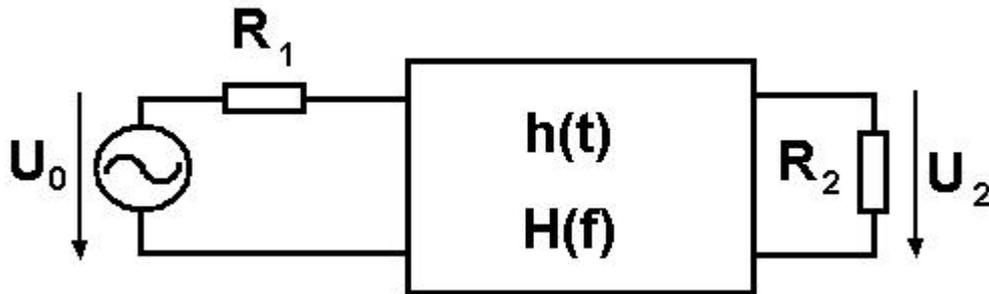
BIBO-Stabilität bedeutet, *bounded input – bounded output*, das heißt

mit $|x(t)| \leq M < \infty \forall t$

gilt auch $|y(t)| \leq N < \infty \forall t$.

Übertragungsverhalten eines Zweitores

$$y = x(t) * h(t); y = u_2, x = \frac{1}{2}u_0, u_2(t) = \frac{1}{2} \cdot u_0(t) * h(t)$$



$$U_2(f) = \frac{1}{2} \cdot U_0(f) \cdot H(f)$$

Definition:

$$H(f) = 2 \cdot \frac{U_2(f)}{U_0(f)}, h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} H(f) \cdot e^{j2\pi ft} \cdot dt$$

Mit dieser Definition folgt

$$\frac{P_2(f)}{P_{1\max}(f)} = \frac{\frac{|U_2(f)|^2}{R_2}}{\frac{|U_0(f)|^2}{4 \cdot R_1}} = |H(f)|^2 \cdot \frac{R_1}{R_2}$$

speziell mit $R_1 = R_2 = R$ gilt der einfache Zusammenhang

$$\frac{P_2(f)}{P_{1\max}(f)} = \frac{\frac{|U_2(f)|^2}{R}}{\frac{|U_0(f)|^2}{4 \cdot R}} = |H(f)|^2$$

Dämpfungsfunktion:

$$D(f) = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_0(f)}{U_2(f)} = \frac{1}{H(f)}$$

Übertragungsmaß:

Mit $H(f) = |H(f)| \cdot e^{j \arg\{H(f)\}}$

folgt $g(f) = a(f) + jb(f) = \ln\{D(f)\} = -\ln\{H(f)\}$

die Betriebsdämpfung $a(f) = -\ln\{|H(f)|\}$, gemessen in N (Neper)

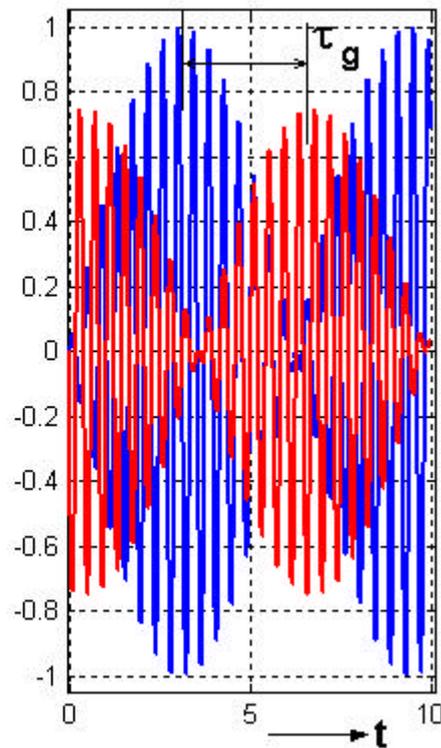
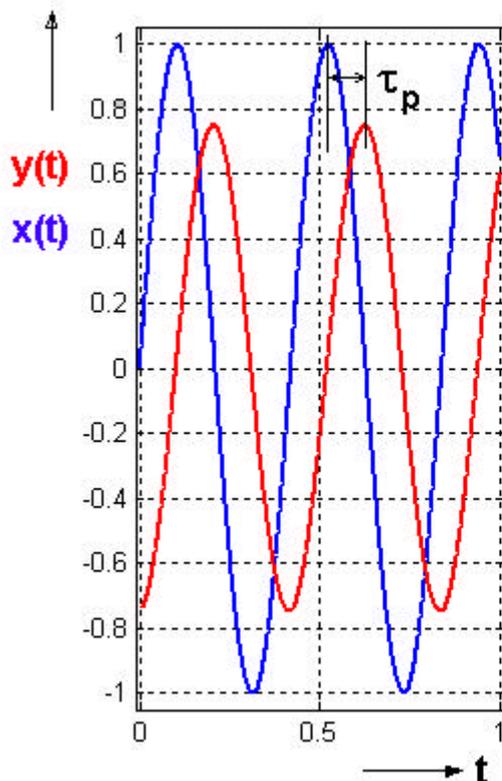
$$a(f) = -20 \cdot \lg\{|H(f)|\}, \text{ gemessen in dB (dezi Bel)}$$

und

die Betriebsphase $b(f) = -\arg\{H(f)\} = -j(f)$ im Bogenmaß

Phasen- und Gruppenlaufzeit:

$$t_{ph}(f) = -\frac{j(f)}{2 \cdot p \cdot f} \quad \text{bzw.} \quad t_{ph}(f) = -\frac{1}{2 \cdot p} \cdot \frac{dj(f)}{df}$$



Logarithmierte Verhältnisgrößen

Logarithmierte Verhältnisgrößen zu Basis e

Wird die Basis e benutzt, werden die Verhältnisgrößen mit der (pseudo-) Einheit „Neper“ gekennzeichnet. Das Neper wird nur für Spannungs- oder Stromverhältnisse eingesetzt.

$$A = \ln\left(\frac{F_1}{F_2}\right)N$$

Diese Größen werden nur noch selten benutzt, da Messgeräte für Dämpfungen oder Verstärkungen immer in dB (Dezibel) geeicht sind.

Logarithmierte Verhältnisgrößen zu Basis 10

Wird die Basis 10 benutzt, werden die Verhältnisgrößen mit der (pseudo-) Einheit „Bel“ gekennzeichnet. Da das Bel (B) aber praktisch eine zu große Einheit ist, nimmt man ein Zehntel dieses Maßes, das „Dezibel“ (dB) zur Grundeinheit. Sie werden immer für die Beschreibung von Leistungsverhältnissen eingesetzt.

$$A = 10 \lg\left(\frac{P_1}{P_2}\right)dB$$

Natürlich ist es möglich, Leistungen durch Ströme oder Spannungen auszudrücken und

$$A = 10 \lg\left(\frac{U_1^2}{U_2^2} \cdot \frac{R_2}{R_1}\right)dB \quad \text{oder} \quad A = 10 \lg\left(\frac{I_1^2}{I_2^2} \cdot \frac{R_1}{R_2}\right)dB \quad \text{zu schreiben.}$$

Für den wichtigen Fall, dass $R_1 = R_2 = R$ gilt, wird daraus einfach

$$A = 20 \lg\left(\frac{U_1}{U_2}\right)dB \quad \text{oder} \quad A = 20 \lg\left(\frac{I_1}{I_2}\right)dB$$

Für die Umrechnung von Neper in Dezibel und umgekehrt gilt dann

$$1N = 20 \lg(e)dB = 8,686dB \quad \text{und} \quad 1dB = \frac{1}{20 \cdot \lg(e)}N = 0,115N$$

Verwendung logarithmierter Verhältnisgrößen in der Praxis

Der Bezeichnung „dB“ können noch Zeichen hinzugefügt werden, die nähere Informationen enthalten, z. B. über die Bezugsgröße. In der Nachrichtentechnik sind folgende Pegel von besonderer Bedeutung:

Absolute Pegel

- ◆ dBm – Leistungspegel, bezogen auf 1 mW (entspricht 0,775 V an 600 Ω)

$$\begin{aligned} 0 \text{ dBm} &\hat{=} 1 \text{ mW} \\ 30 \text{ dBm} &\hat{=} 1 \text{ W} \\ -30 \text{ dBm} &\hat{=} 1 \mu\text{W} \end{aligned}$$

- ◆ dBW – Leistungspegel, bezogen auf 1 W
- ◆ dBu – Spannungspegel, bezogen auf 0,775 V
- ◆ dBV – Spannungspegel, bezogen auf 1 V
- ◆ dB μ V – Spannungspegel, bezogen auf 1 μ V

$$0 \text{ dB}\mu\text{V} \hat{=} 1 \mu\text{V}$$

$$60 \text{ dB}\mu\text{V} \hat{=} 1 \text{ mV}$$

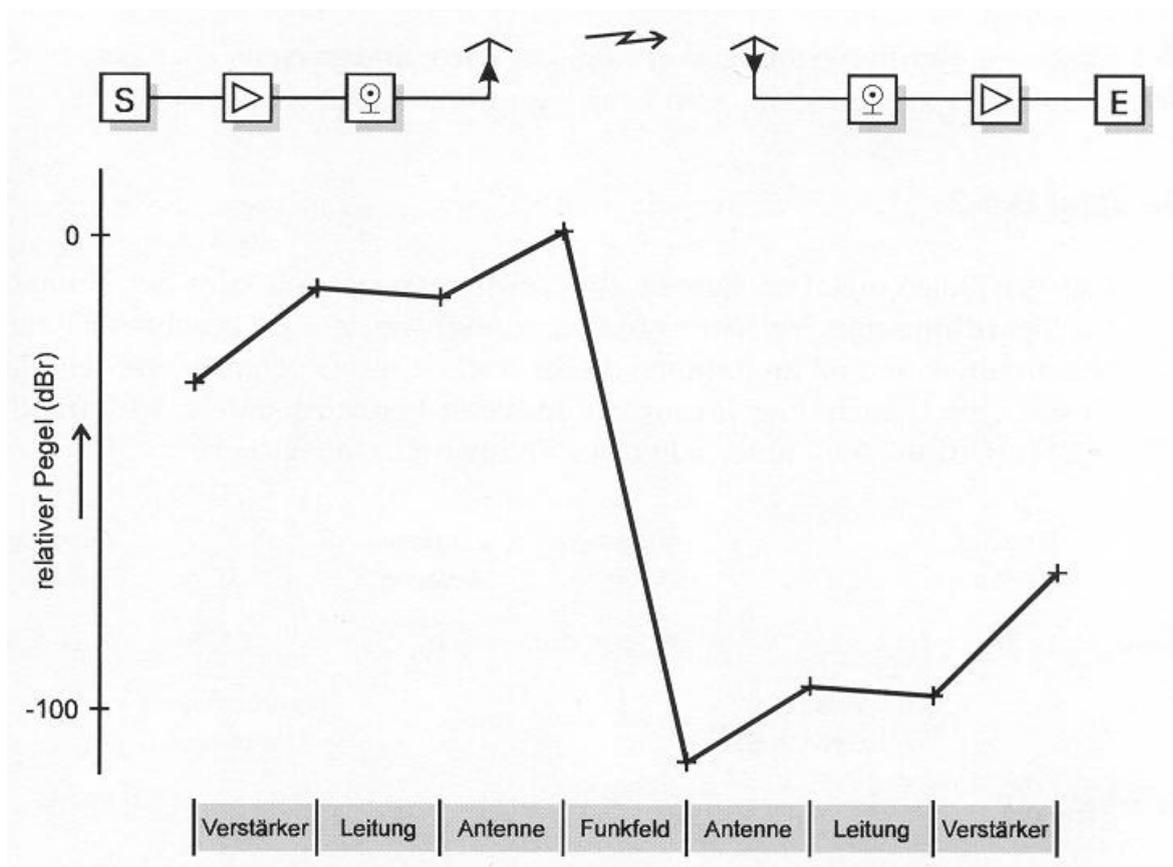
$$-60 \text{ dB}\mu\text{V} \hat{=} 1 \text{ nV}$$

- ◆ dBK – „Temperaturpegel“, bezogen auf 1 K
- ◆ dBHz – „Frequenzpegel“, bezogen auf 1 Hz

Relative Pegel

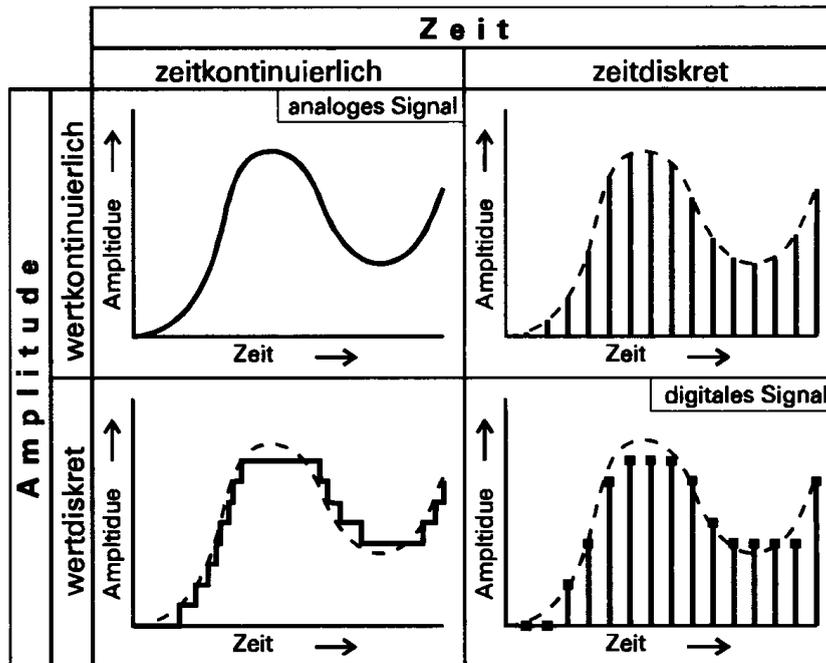
- ◆ dBr – charakterisiert die betrachtete Stelle eines Übertragungssystems – Bezugspunkt ist in der Übertragungstechnik oft der Anfang der Fernleitung
- ◆ dBc – bezogen auf den Träger (*Carrier*) des Signals

Beispiel

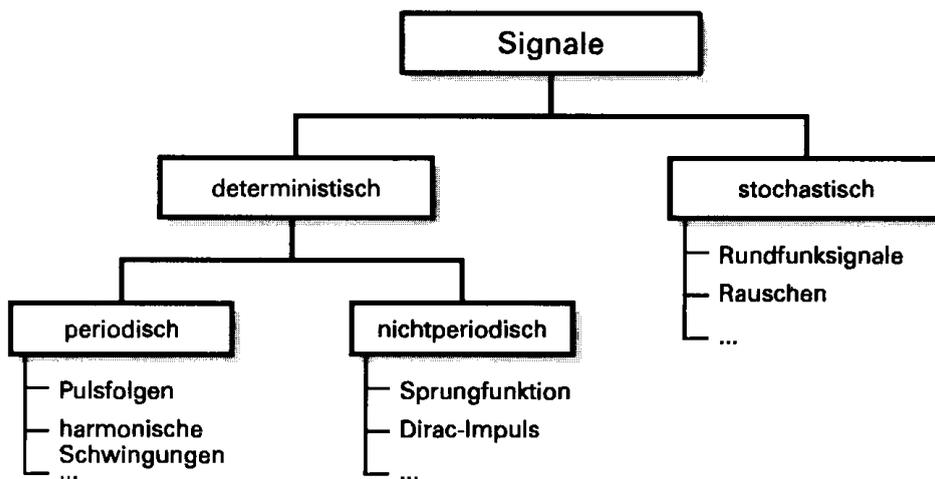


Verlauf des relativen Pegels im Verlauf einer Übertragungsstrecke

Signalklassifizierungen



Zeitfunktionen – kontinuierlich / diskret



Deterministische und stochastische Signale

Leistungs- und Energiesignale:

Ausgangspunkt sind (mittlere) Leistung und (Gesamt-)Energie eines Signals

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T s^2(t) dt \quad \text{und} \quad E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt$$

Signale für die gilt: $P \leq M < \infty$ nennt man **Leistungssignale**.

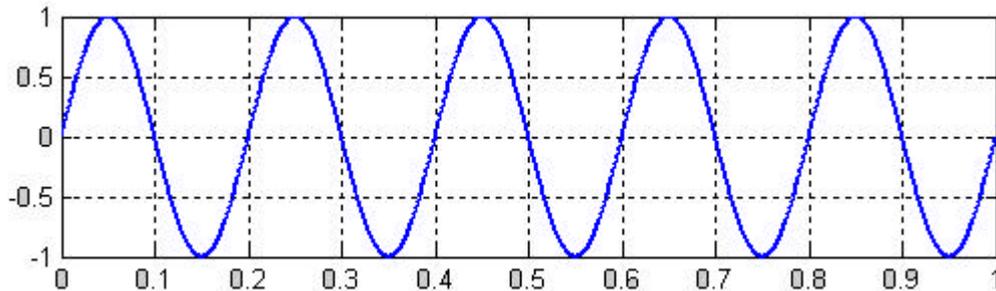
Ist $P = 1$ sprechen wir von einem normierten Leistungssignal.

Signale für die gilt: $E \leq N < \infty$ nennt man **Energiesignale**.

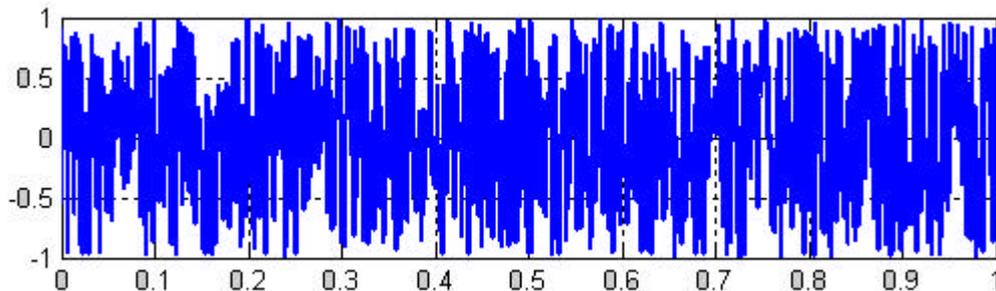
Beispiele:

Leistungssignale: periodische Signale, stochastische Signale

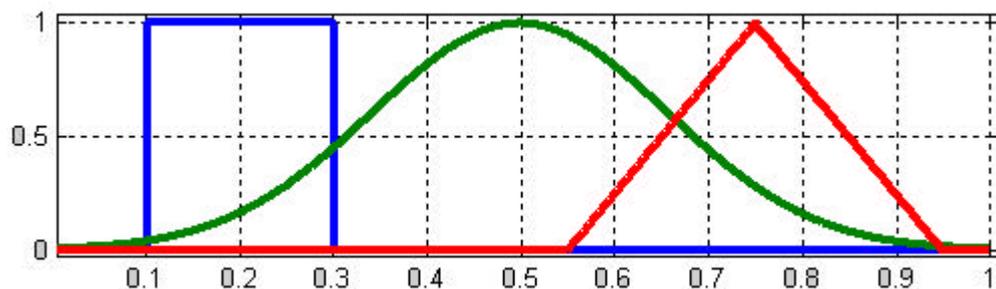
$P = 0.5$



$P = 1/3$



Energiesignale: verschiedene Impulse endlicher Amplitude und Dauer



Leistung- und Energiedichtespektrum:

Für die Übertragung von Nachrichtensignalen ist die spektrale Verteilung der Energie bzw. der Leistung ein entscheidendes Merkmal. Aussagen darüber lassen sich mit Hilfe der Fourieranalyse gewinnen.

Wir betrachten zunächst nur deterministische Signale. Handelt es sich um ein periodisches Signal, können wir das Leistungsdichtespektrum aus der Fourierreihe ableiten. Für das Amplituden/Phasenspektrum eines (deterministischen) Leistungssignals gilt:

$$s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} c_k \cdot e^{jk2\pi f_0 t} \quad \text{mit} \quad c_k = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} s(t) \cdot e^{-jk2\pi f_0 t} dt$$

Mit den Amplituden $|c_k|$ dieses Linienspektrums kann man das Leistungsdichtespektrum (in diesem Fall Leistungsspektrum) angeben:

$$\Phi^{(P)}(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_k|^2 \cdot \mathbf{d}(f - kf_0)$$

Die (mittlere) Leistung P des Signals berechnet sich als Summe aller Linienleistungen:

$$P = \frac{1}{T_0} \int_{-\frac{T_0}{2}}^{\frac{T_0}{2}} s^2(t) dt = \sum_{k=-\infty}^{\infty} |c_k|^2$$

Im Gegensatz zum Linienspektrum des periodischen Leistungssignals liegt bei den impulsförmigen Energiesignalen ein kontinuierliches Amplitudendichtespektrum vor:

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \cdot e^{-jk2\pi f_0 t} dt$$

Dessen Betragsquadrat stellt das Energiedichtespektrum dar:

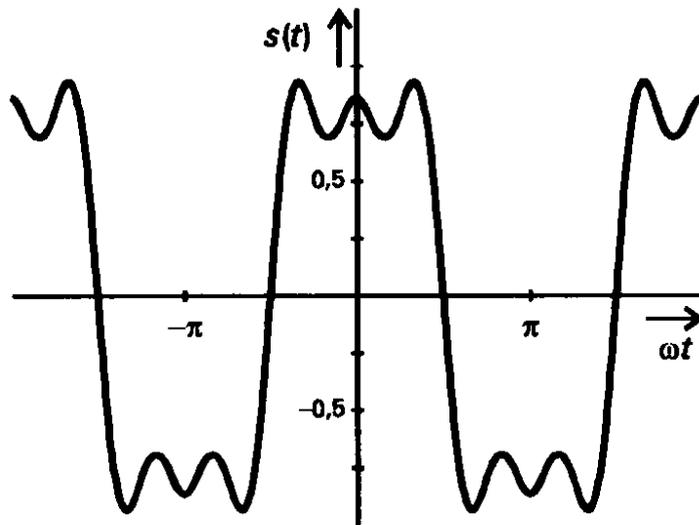
$$\Phi^{(E)}(f) = S(f) \cdot S^*(f) = |S(f)|^2$$

Die Gesamtenergie E des Signals berechnet sich zu

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df$$

Beispiel für ein Leistungssignal:

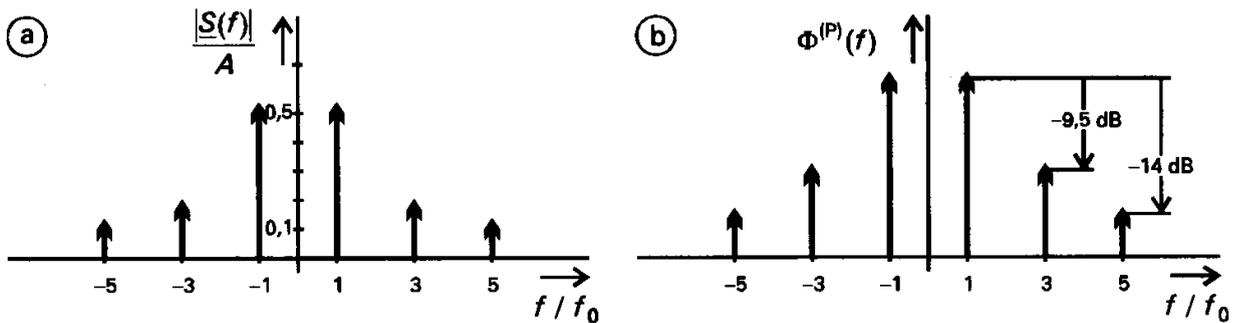
$$s(t) = A \cdot \left\{ \cos(\omega_0 t) - \frac{1}{3} \cos(3\omega_0 t) + \frac{1}{5} \cos(5\omega_0 t) \right\}$$



Zeitverlauf des Signals $s(t)$

Die Linienamplituden sind:

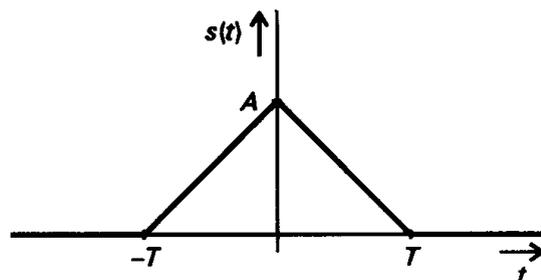
$$c_1 = c_{-1} = \frac{A}{2}, c_3 = c_{-3} = -\frac{A}{6}, c_5 = c_{-5} = \frac{A}{10}, c_k = 0 \text{ sonst.}$$



Amplitudenspektrum (a) sowie (logarithmisches) Leistungsdichtespektrum (b) des Signals $s(t)$

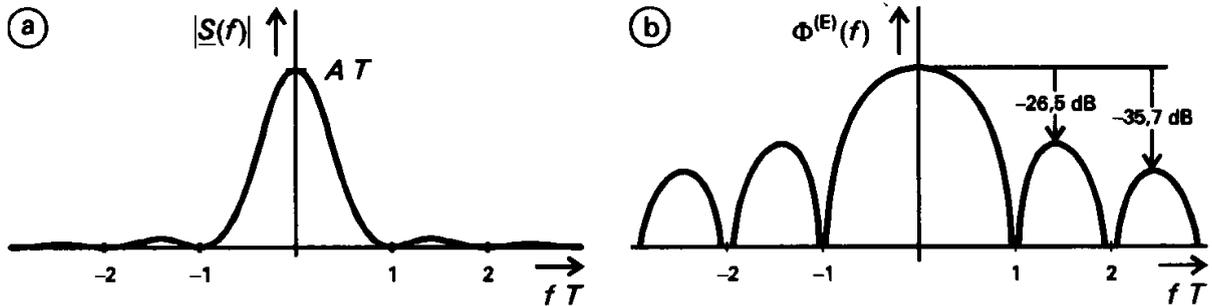
Als Energiesignal untersuchen wir den Dreiecksimpuls $s(t) = \Lambda(t/T)$ der Dauer von $2T$.

$$s(t) = \begin{cases} A(1 - \frac{|t|}{T}), & |t| \leq T \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$



$$\underline{S}(f) = \text{FT}\{s(t)\} = AT \text{si}^2(\pi f T)$$

$$\Phi^{(E)}(f) = |\underline{S}(f)|^2 = A^2 T^2 \text{si}^4(\pi f T)$$

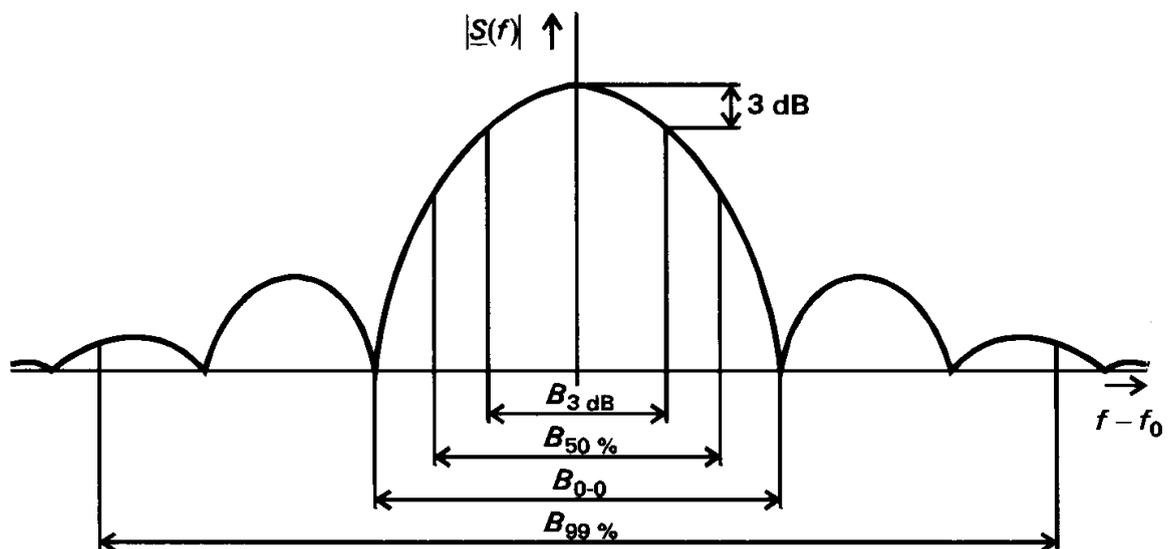


Amplitudenspektrum (a) sowie (logarithmisches) Energiedichtespektrum (b) des Signals $s(t)$

Die Energie des Signals bestimmt sich zu

$$\begin{aligned} E &= \int_{-\infty}^{\infty} s^2(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} |\underline{S}(f)|^2 df \\ &= \frac{2}{3} A^2 T^3 \end{aligned}$$

Die Bandbreite eines Signals:



Zur Definition der Bandbreite

Anhand des (mit logarithmischer Ordinate dargestellten) Leistungsdichtespektrums in Abb. werden hier die verbreitetsten Bandbreitendefinitionen vorgestellt, wobei f_0 die Mittenfrequenz bezeichnen soll.

$B_{3\text{ dB}}$	Abstand zwischen den Frequenzen, bei denen die Leistungsdichte um 3 dB gegenüber dem Maximalwert abgefallen ist.
$B_{50\%}$	Bandbreite, innerhalb derer 50 % des gesamten Leistungsinhalts des Signals enthalten ist (auch $B_{0,5}$).
B_{0-0}	Abstand zwischen den ersten Nullstellen im Spektrum.
$B_{99\%}$	Bandbreite, innerhalb derer 99 % des gesamten Leistungsinhalts des Signals enthalten ist (auch $B_{0,99}$).

Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung und zufällige Signale

Grundbegriffe der Wahrscheinlichkeitsrechnung

Zufallsexperiment	Es wird zunächst ein <i>Zufallsexperiment</i> betrachtet, also ein Experiment mit zufälligem Ausgang, das eine diskrete Menge von möglichen Ergebnissen, die <i>Ergebnismenge</i> $\mathbf{A} = \{A_1, A_2, \dots\}$ liefert. Ein Beispiel für ein solches Zufallsexperiment ist das Würfeln, die Ergebnismenge ist dann die Menge der möglichen Würfelresultate: $\mathbf{A} = \{1, 2, \dots, 6\}$. Wenn bei der Durchführung des Experimentes ein bestimmtes Ergebnis A_i eintritt, spricht man von einem <i>Ereignis</i> , beim Würfeln ist beispielsweise das Eintreten des Würfelresultates "6" ein Ereignis. Ereignisse können auch als Vereinigung mehrerer möglicher Ergebnisse definiert werden: Das Ereignis "gerade Zahl" tritt ein, wenn ein Ergebnis aus der Menge der Ergebnisse $\{2, 4, 6\}$ eintritt. Zur Unterscheidung werden Ereignisse wie das Auftreten des Würfelresultates "6" als <i>Elementarereignisse</i> bezeichnet. Elementarereignisse sind dadurch gekennzeichnet, daß sie immer paarweise unvereinbar (disjunkt) sind.
Ereignis	
Elementarereignis	

relative Häufigkeit

Führt man das Experiment N -mal durch und tritt dabei das Ergebnis A_ν n_ν -mal auf, dann ist die *relative Häufigkeit* dieses Ereignisses gegeben durch:

$$h(A_\nu) = \frac{n_\nu}{N}.$$

Offensichtlich gilt

$$0 \leq h(A_\nu) \leq 1.$$

sicheres Ereignis

Die Vereinigung aller Ergebnisse nennt man das *sichere Ereignis* $S = \cup_\nu A_\nu$. Für die Häufigkeit des sicheren Ereignisses gilt offenbar:

$$h(\cup_\nu A_\nu) = h(S) = 1.$$

Beim Experiment "Würfeln" würde das sichere Ereignis lauten: $S = \cup_{\nu} A_{\nu} = \{1, \dots, 6\}$ ("irgendeine ganze Zahl von 1 bis 6").

Analog zum sicheren Ereignis nennt man ein Ereignis, das mit relativer Häufigkeit Null eintritt, das *unmögliche Ereignis*. Beim Würfeln wäre z.B. das Ereignis "Eine Zahl größer 6 oder kleiner 1" ein unmögliches Ereignis.

Es wird nun die relative Häufigkeit zweier unvereinbarer Ereignisse $A_{\mu} \cup A_{\nu}$ betrachtet, etwa der Ereignisse "1" oder "3" beim Würfeln. Die Häufigkeit, mit der eines der beiden Ergebnisse eintritt, entspricht offensichtlich der Summe der Häufigkeiten der beiden einzelnen Ereignisse und damit deren relativen Häufigkeiten:

$$h(A_{\mu} \cup A_{\nu}) = \frac{n_{\mu} + n_{\nu}}{N} = h(A_{\mu}) + h(A_{\nu}).$$

Aus diesen Beobachtungen hat man den Begriff *Wahrscheinlichkeit* in Anlehnung an die relative Häufigkeit geprägt. Da man die Wahrscheinlichkeit mathematisch nicht als Grenzwert der Häufigkeit rechtfertigen kann – man kann wegen der Zufälligkeit der Ereignisse nicht beweisen, daß sich ab einer bestimmten Anzahl von Versuchen die Ergebnishäufigkeiten nicht ändern – wählt man eine *axiomatische Definition der Wahrscheinlichkeit*, die auf ihrer Zweckmäßigkeit gründet. Wahrscheinlichkeit wird den Ereignissen A_{ν} als ein Maß zugeordnet mit Eigenschaften, die denen der relativen Häufigkeiten entsprechen:

Wahrscheinlichkeit

axiomatische
Definition

Definition **Wahrscheinlichkeit**

1. Für die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses A_{ν} gilt

$$0 \leq P(A_{\nu}) \leq 1.$$

2. Für das sichere Ereignis S , d.h. die Vereinigung aller möglichen Ereignisse, gilt:

$$P(S) = P(\cup_{\nu} A_{\nu}) = 1.$$

3. Für disjunkte (unvereinbare) Ereignisse A_{μ} und A_{ν} gilt:

$$P(A_{\mu} \cup A_{\nu}) = P(A_{\mu}) + P(A_{\nu}).$$

Das Problem, die Wahrscheinlichkeiten $P(A_{\nu})$ für reale Ereignisse A_{ν} anzugeben, bleibt bei der axiomatischen Definition der Wahrscheinlichkeit ausgeklammert. Den Übergang von der relativen

Gesetz der großen Häufigkeit zur Wahrscheinlichkeit $P(A_\nu)$ beschreibt das *Gesetz der großen Zahlen*, das für die Differenz zwischen der relativen Häufigkeit eines Ereignisses nach N Experimenten $h_N(A_\nu)$ und der Wahrscheinlichkeit $P(A_\nu)$ angibt:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P(|P(A_\nu) - h_N(A_\nu)| \leq \epsilon) = 1.$$

Die Wahrscheinlichkeit, daß der Unterschied zwischen der relativen Häufigkeit und der Wahrscheinlichkeit kleiner als eine beliebig kleine Schranke ϵ ist, konvergiert also für wachsendes N gegen Eins.

Bei n *disjunkten gleichwahrscheinlichen Ereignissen* A_ν läßt sich die Wahrscheinlichkeit direkt durch eine Plausibilitätsbetrachtung ermitteln: Da die Summe aller Wahrscheinlichkeiten gleich Eins sein muß, ist die Wahrscheinlichkeit eines der gleichwahrscheinlichen Ereignisse $P(A_\nu) = 1/n$.

Hängt die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses mit der anderer Ereignisse zusammen, dann kann man sie in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeiten der bedingenden Ereignisse formulieren. Die Wahrscheinlichkeit für ein Ereignis B unter der Bedingung, daß ein Ergebnis A mit $P(A) > 0$ eingetreten ist, wird als *bedingte Wahrscheinlichkeit* oder *a-posteriori Wahrscheinlichkeit* $P(B|A)$ bezeichnet (im Gegensatz zur *a priori-Wahrscheinlichkeit* $P(B)$) und berechnet sich gemäß

$$P(B|A) = \frac{P(A \cap B)}{P(A)},$$

wobei $P(A \cap B)$ die Verbundwahrscheinlichkeit ("A und B") ist. Als Beispiel sei wieder ein Würfelexperiment angeführt: Bezeichnet B das Würfelereignis "4" und A das Ereignis "gerade Zahl", dann ist $P(B|A) = (1/6)/(1/2) = 1/3$. Der Zusammenhang zwischen der a priori-Wahrscheinlichkeit $P(B)$ und der a posteriori-Wahrscheinlichkeit $P(B|A_\nu)$ wird auch durch den *Satz von der totalen Wahrscheinlichkeit* hergestellt. Für ein beliebiges Ereignis B und eine Menge paarweise disjunkter Ereignisse A_ν mit $P(\bigcup_\nu A_\nu) = 1$ gilt:

$$P(B) = \sum_\nu P(B|A_\nu) \cdot P(A_\nu).$$

Formuliert man aus (1.161) eine zweite Gleichung, indem man die Ereignisse A und B vertauscht, und löst jeweils nach der Verbundwahrscheinlichkeit auf, dann erhält man

$$P(A \cap B) = P(B) \cdot P(A|B) = P(A) \cdot P(B|A).$$

Daraus ergibt sich mit dem Satz von der totalen Wahrscheinlichkeit (Gl. 1.162) der *Bayessche Satz*:

Bayes'scher Satz

$$P(A_\nu|B) = \frac{P(B|A_\nu) \cdot P(A_\nu)}{\sum_\nu P(B|A_\nu) \cdot P(A_\nu)}.$$

Als Sonderfall ist die *statistische Unabhängigkeit* zweier Ereignisse anzusehen: Zwei Ereignisse werden als statistisch unabhängig bezeichnet, wenn die bedingte Wahrscheinlichkeit $P(B|A)$ gleich der *a priori*-Wahrscheinlichkeit ist, $P(B|A) = P(B)$, das bedingende Ereignis A also keinen Einfluß auf $P(B)$ hat. Dann wird aus (1.163):

statistische
Unabhängigkeit

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B).$$

Zufallsvariable, Verteilung und Dichte

Für die mathematische Behandlung von Zufallsexperimenten ist die Abbildung der Ergebnisse auf Zahlen notwendig. Zu diesem Zweck werden Zufallsvariablen eingeführt:

Definition Eine Zufallsvariable (ZV) ist eine Zahl x , die dem Ergebnis eines Zufallsexperiments zugeordnet wird, also eine Funktion des Zufallsergebnisses.

Zufallsvariable

Den Wert x_i einer Zufallsvariable für ein bestimmtes Ergebnis A_i nennt man auch die *Realisierung der Zufallsvariablen* x . Man unterscheidet *diskrete Zufallsvariablen*, also solche, die nur diskrete Werte annehmen können, und *kontinuierliche Zufallsvariablen*, die beliebige Werte in einem Intervall annehmen können. Beschreibt man beispielsweise das Ergebnis eines Münzwurfs mit der Zufallsvariablen x und ordnet den Seiten (Wappen bzw. Zahl) die Werte $x_1 = 1, x_2 = -1$ zu, dann handelt es sich um eine diskrete Zufallsvariable. Als Beispiel für eine kontinuierliche Zufallsvariable mag der tatsächliche Ohm'sche Widerstandswert eines elektrischen Widerstands dienen. Bei Normierung auf den Nennwert würde der Wert der Zufallsvariable x_i bei Widerständen mit bis zu 1% Abweichung vom Nennwert (1-prozentigen Widerständen) im Intervall $[0,99; 1,01]$ liegen.

diskrete/ konti-
nuierliche ZV

Die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Zufallsvariable x einen Wert kleiner x annimmt, wird als *Wahrscheinlichkeitsverteilung* (auch: Verteilung, Verteilungsfunktion) $F_x(x)$ bezeichnet:

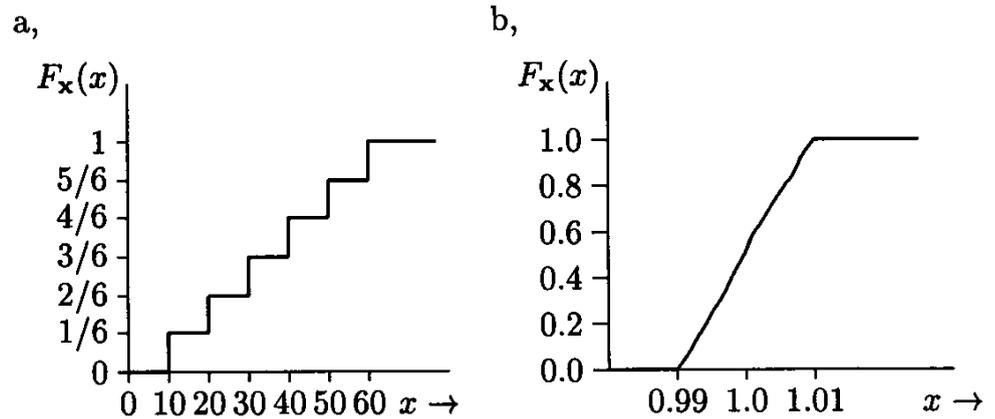
Wahrscheinlich-
keitsverteilung

$$F_x(x) = P(x \leq x).$$

Betrachtet man beispielsweise ein Würfelexperiment und definiert als Zufallsvariable x das Zehnfache des Würfelergebnisses, dann ergibt sich die in Abb. 1.14a, dargestellte Wahrscheinlichkeitsverteilung $F_x(x)$. Eine mögliche Wahrscheinlichkeitsverteilung einer

kontinuierlichen ZV, die nur Werte im Intervall $[0, 99; 1, 01]$ annehmen kann (1-prozentige Widerstände), ist in Abb. 1.14b, gezeigt.

Abbildung 1.14
Wahrscheinlichkeitsverteilungen bei diskreten (a,) und kontinuierlichen (b,) ZVn



Da $F_x(x)$ eine Wahrscheinlichkeit ist, gilt

$$0 \leq F_x(x) \leq 1,$$

und damit bei reellen Zufallsvariablen x auch

$$F_x(-\infty) = 0 \quad \text{und} \quad F_x(\infty) = 1.$$

Außerdem ist $F_x(x)$ eine monoton steigende Funktion, so daß gilt:

$$F_x(x_2) \geq F_x(x_1) \quad \text{falls} \quad x_2 > x_1.$$

Die Wahrscheinlichkeit, mit der der Wert der ZV x zwischen x_1 und $x_2 > x_1$ liegt, läßt sich direkt aus der Verteilung, nämlich aus der Differenz $F_x(x_2) - F_x(x_1)$ ablesen:

$$P(x_1 < x \leq x_2) = F_x(x_2) - F_x(x_1).$$

Bei diskreten Zufallsvariablen ergibt sich für $F_x(x)$ stets eine Treppenfunktion, wobei die Sprunghöhe an einer Stelle x_0 der Wahrscheinlichkeit $P(x = x_0)$ entspricht (vgl. Abb. 1.14a).

Wahrscheinlichkeitsdichte

Als *Wahrscheinlichkeitsdichte* (oft auch: *Verteilungsdichte*) $f_x(x)$ wird die Ableitung der Verteilung $F_x(x)$ eingeführt:

$$f_x(x) = \frac{dF_x(x)}{dx},$$

oder in integraler Form:

$$F_x(x) = \int_{-\infty}^x f_x(\xi) d\xi.$$

Da $F_x(x)$ monoton steigt, kann $f_x(x)$ nicht negativ werden

$$f_x(x) \geq 0,$$

und aus der Definition der Wahrscheinlichkeitsverteilung folgt, dass $F_x(\infty) = 1$ ist:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_{\mathbf{x}}(\xi) d\xi = 1.$$

Die Dichte diskreter Zufallsvariablen wird durch die Ableitung der Treppenfunktion zu einer Summe von Dirac-Impulsen, wobei deren Gewichte den Auftrittswahrscheinlichkeiten der zugehörigen Werte $P(\mathbf{x} = x_i) := P(x_i)$ der Zufallsvariablen entsprechen:

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \sum_i P(x_i) \cdot \delta(x - x_i).$$

In Abb. 1.15 sind die Wahrscheinlichkeitsdichten zu den Verteilungen in Abb. 1.14 dargestellt.

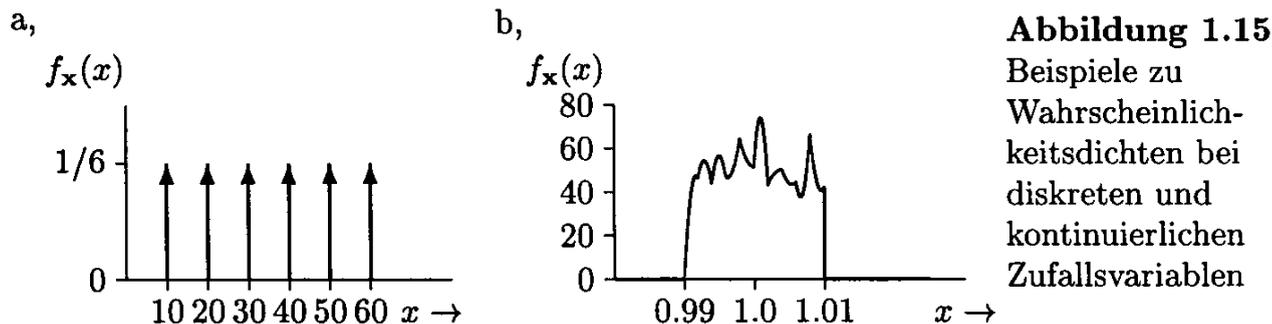


Abbildung 1.15
Beispiele zu Wahrscheinlichkeitsdichten bei diskreten und kontinuierlichen Zufallsvariablen

Die Wahrscheinlichkeit, daß der Wert einer Zufallsvariablen zwischen x_1 und $x_2 > x_1$ liegt, läßt sich bei der Dichte durch Integration über das Intervall $(x_1, x_2]$ der Dichte $f_{\mathbf{x}}(x)$ ermitteln. Damit ist die Wahrscheinlichkeit, daß eine Zufallsvariable \mathbf{x} genau einen Wert x_0 annimmt, immer Null, wenn nicht die Dichte $f_{\mathbf{x}}(x)$ bei $x = x_0$ einen Dirac-Impuls aufweist.

Einige Verteilungen und Dichten

Binomialverteilung. Eine (diskrete) Zufallsvariable \mathbf{x} ist binomialverteilt, wenn für seine $N + 1$ möglichen Werte $k = 0, \dots, N$ gilt:

$$P(\mathbf{x} = k) = \binom{N}{k} p^k \cdot (1 - p)^{N-k} \text{ mit } 0 < p < 1.$$

Für den linearen Mittelwert und die Varianz gilt:

$$m_{\mathbf{x}} = n \cdot p \quad \text{bzw.} \quad \sigma_{\mathbf{x}}^2 = n \cdot p(1 - p).$$

Gleichverteilung. Bei einer *gleichverteilten diskreten Zufallsvariable* treten alle Ereignisse gleich häufig ein. Sind N Ereignisse möglich, ist die Auftrittswahrscheinlichkeit für jedes Ereignis $1/N$. Die Verteilung $F_{\mathbf{x}}(x)$ ist entsprechend eine Treppenfunktion mit

gleichverteilte
diskrete ZV

gleichen Stufenhöhen und die Dichte $f_{\mathbf{x}}(x)$ eine Summe von N Dirac-Impulsen mit dem Gewicht $1/N$. (Vgl. Würfelexperiment).

Eine in einem Intervall *gleichverteilte kontinuierliche Zufallsvariable* ist dadurch gekennzeichnet, daß in diesem Intervall die Wahrscheinlichkeitsdichte $f_{\mathbf{x}}(x)$ eine positive Konstante ist, deren Wert dem Inversen der Intervallbreite entspricht. Entsprechend nimmt die Verteilung $F_{\mathbf{x}}(x)$ in diesem Intervall linear zu. Ist die Zufallsvariable \mathbf{x} im Intervall $-\Delta < x \leq \Delta$ gleichverteilt, dann gilt (vgl. Abb. 1.16):

$$f_{\mathbf{x}}(x) = \begin{cases} \frac{1}{2\Delta} & \text{für } -\Delta < x \leq \Delta \\ 0 & \text{sonst} \end{cases},$$

$$F_{\mathbf{x}}(x) = \begin{cases} 0 & \text{für } x \leq -\Delta \\ \frac{1}{2\Delta}(x + \Delta) & \text{für } -\Delta < x \leq \Delta \\ 1 & \text{für } x > \Delta \end{cases}.$$

Normalverteilung (Gauß-Verteilung). Eine normalverteilte oder Gauß-verteilte kontinuierliche Zufallsvariable wird durch ihre Dichte geschlossen beschrieben:

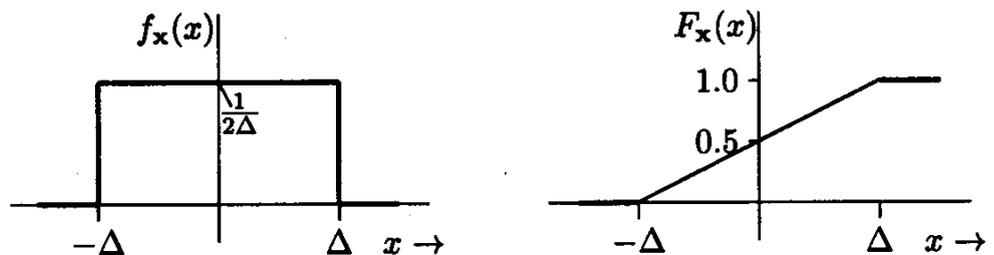
$$f_{\mathbf{x}}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_{\mathbf{x}}} e^{-(x-m_{\mathbf{x}})^2/2\sigma_{\mathbf{x}}^2}.$$

Parameter der Normalverteilung sind der lineare Mittelwert $m_{\mathbf{x}}$ und die Streuung $\sigma_{\mathbf{x}}$

Gaußsches Fehlerintegral

Das Integral über die Dichte, also die Verteilung $F_{\mathbf{x}}(x)$, wird als *Gaußsches Fehlerintegral* – in der Regel auf $m_{\mathbf{x}} = 0, \sigma_{\mathbf{x}} = 1$ normiert – in Tabellen niedergelegt, z.B. [1.1]. Unterschiedliche Integrationsgrenzen führen zu verschiedenen Bezeichnungen, z.B. erf, erfc.

Abbildung 1.16
Dichte und Verteilung einer gleichverteilten kontinuierlichen ZV



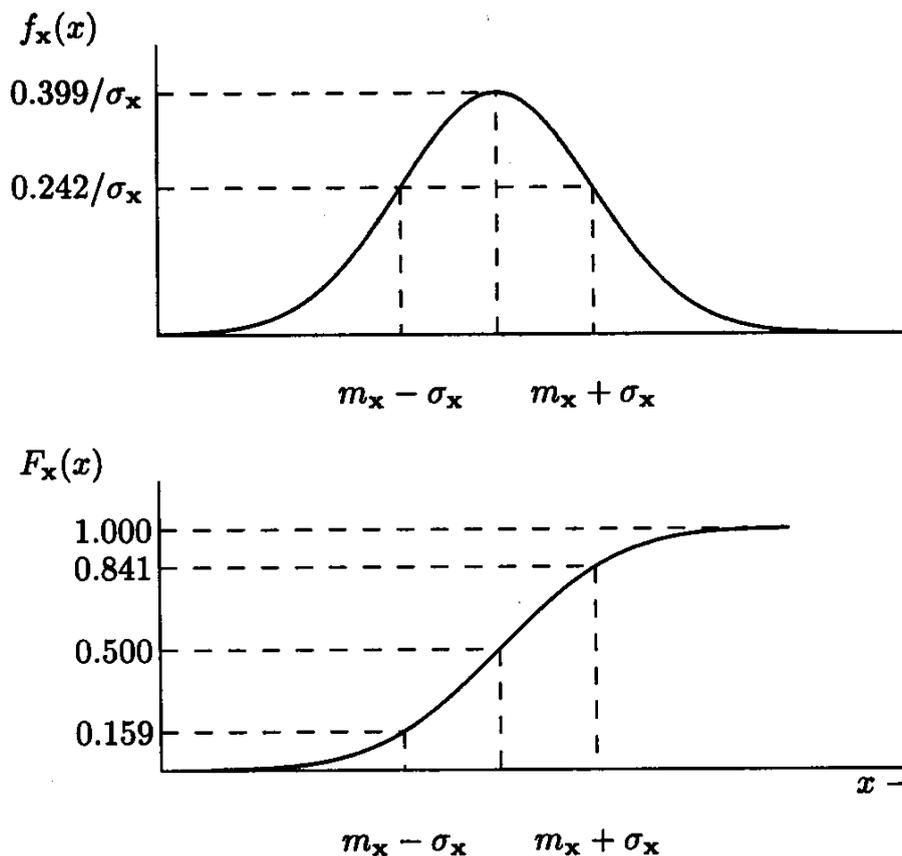


Abbildung 1.17
Dichte und Verteilung einer normalverteilten kontinuierlichen ZV

Die Bedeutung der Normalverteilung leitet sich unter anderem aus dem *zentralen Grenzwertsatz* ab, der besagt, daß die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer Summe von N statistisch unabhängigen Zufallsvariablen im allgemeinen für wachsendes N einer Gauß-Verteilung zustrebt.

zentraler
Grenzwertsatz

Mehrdimensionale Wahrscheinlichkeitsverteilungen und -dichten

Analog zur eindimensionalen Wahrscheinlichkeitsverteilung $F_x(x)$ bzw. Wahrscheinlichkeitsdichte $f_x(x)$ werden für mehrere Zufallsvariablen sogenannte Verbundverteilungen und Verbunddichten definiert (auch: gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung bzw. gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichte). Es wird hier nur der zweidimensionale Fall betrachtet, für höherdimensionale Verteilungen und Dichten gilt Entsprechendes.

Ausgangspunkt sind sogenannte *Verbundereignisse*, also Ereignisse, die durch das gemeinsame Eintreten mehrerer Ereignisse bestimmt werden. Die *Verbundverteilung* (gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung) für zwei Zufallsvariablen x und y wird aus der Wahrscheinlichkeit abgeleitet, daß gleichzeitig $x \leq x$ und $y \leq y$ eintreten:

Verbundereignis
Verbundverteilung

$$F_{xy}(x, y) = P(x \leq x \cap y \leq y).$$

Die Verbundverteilung hat alle Eigenschaften einer eindimensionalen Verteilung: Wenn man beispielsweise die Variable x festhält, dann erhält man eine Funktion, die bei Variation von y zwischen $-\infty$ und $+\infty$ monoton steigt und Werte zwischen 0 und 1 annimmt. Da dies für alle Werte von x erfüllt ist und auch bei Vertauschung von x und y gilt, ist $F_{\mathbf{xy}}(x, y)$ stets monoton steigend in x und y mit Werten zwischen 0 und 1.

Die *Verbunddichte* (gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichte) *Verbunddichte* wird durch partielle Ableitung aus der Verteilung gewonnen:

$$f_{\mathbf{xy}}(x, y) = \frac{\partial^2 F_{\mathbf{xy}}(x, y)}{\partial x \partial y}.$$

Als Umkehrbeziehung gilt entsprechend:

$$F_{\mathbf{xy}}(x, y) = \int_{-\infty}^y \int_{-\infty}^x f_{\mathbf{xy}}(\xi, \eta) d\xi d\eta.$$

Auch die Verbunddichte verhält sich wie eine eindimensionale Dichte, wenn man eine Variable festhält und die andere variiert. Sie ist entsprechend überall nichtnegativ und für das Integral gilt

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f_{\mathbf{xy}}(\xi, \eta) d\xi d\eta = 1.$$

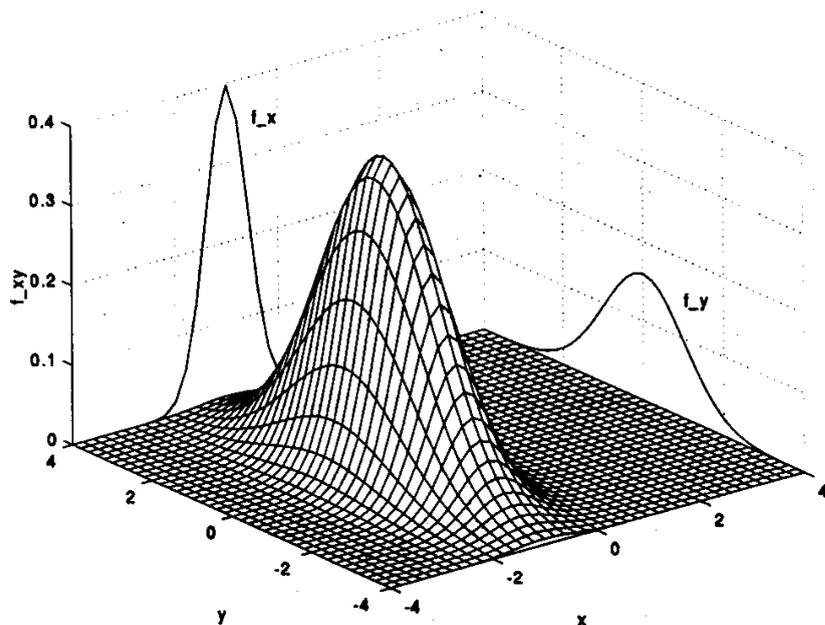
Die Einzeldichten $f_x(x), f_y(y)$ ergeben sich als sogenannte *Randdichte* *Randdichten* dadurch, daß man eine Variable festhält und die

andere integriert:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_{\mathbf{xy}}(x, \eta) d\eta = f_x(x),$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} f_{\mathbf{xy}}(\xi, y) d\xi = f_y(y).$$

Abbildung 1.18
Beispiel für eine
zweidimensionale
Verbunddichte
 $f_{\mathbf{xy}}(x, y)$ mit
Randdichten
 $f_x(x), f_y(y)$



Erwartungswerte:

Nicht immer sind zur Beschreibung von Zufallsvariablen die Verteilungen bzw. Dichten notwendig, oft zieht man kompaktere Größen, sogenannte *Erwartungswerte* oder *Momente* vor, die als Mittelwerte über der Menge der Zufallsergebnisse aufzufassen sind. Allgemein lautet der Erwartungswert zu einer Funktion $g(\mathbf{x})$ der Zufallsvariablen \mathbf{x} :

Erwartungswerte,
Momente

$$E\{g(\mathbf{x})\} = \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) f_{\mathbf{x}}(x) dx.$$

Von besonderer Bedeutung ist die Linearität (vgl. Gl. 1.7) des Erwartungswertoperators, die praktisch immer die Vertauschung mit anderen linearen Operatoren wie etwa Fourier-Transformation und Faltung erlaubt. Durch spezielle Wahl der Funktion $g(\mathbf{x})$ definiert man verschiedene besondere Erwartungswerte:

Linearer Mittelwert (1. Moment) $m_{\mathbf{x}}$ oder $m_{\mathbf{x}}^{(1)}$: Mit $g(\mathbf{x}) = \mathbf{x}$ wird

$$m_{\mathbf{x}}^{(1)} = m_{\mathbf{x}} = E\{\mathbf{x}\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_{\mathbf{x}}(x) dx.$$

Für diskrete Zufallsvariablen wird das Integral über die Dirac-Impulse $\delta(x - x_i)$ zur Summe, und die Gewichte an den Stellen x_i entsprechen den Auftretswahrscheinlichkeiten $P(\mathbf{x} = x_i) := P(x_i)$:

$$m_{\mathbf{x}} = E\{\mathbf{x}\} = \sum_i x_i \cdot P(x_i).$$

Ist der lineare Mittelwert $m_{\mathbf{x}} = 0$, so wird die Zufallsvariable \mathbf{x} **mittelwertfrei** als *mittelwertfrei* bezeichnet.

Quadratischer Mittelwert (2. Moment) $m_{\mathbf{x}}^{(2)}$: Mit $g(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^2$ ergibt sich

$$m_{\mathbf{x}}^{(2)} = E\{\mathbf{x}^2\} = \int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f_{\mathbf{x}}(x) dx.$$

Für diskrete Dichten gilt

$$m_{\mathbf{x}}^{(2)} = \sum_i x_i^2 \cdot P(x_i).$$

Der quadratische Mittelwert wird oft als mittlere Leistung interpretiert.

Varianz (2. zentrales Moment) σ_x^2 : Sie beschreibt die mittlere quadratische Abweichung vom linearen Mittelwert $m_x^{(1)}$ und ergibt sich aus $g(x) = (x - m_x)^2$:

$$\sigma_x^2 = E \left\{ (x - m_x)^2 \right\} = \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)^2 f_x(x) dx.$$

Für diskrete Dichten gilt:

$$\sigma_x^2 = \sum_i (x_i - m_x)^2 P(x_i).$$

Aus der Linearität des Erwartungswerts folgt die Eigenschaft:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= E \left\{ (x - m_x)^2 \right\} = E \left\{ x^2 \right\} - 2m_x E \left\{ x \right\} + m_x^2 = \\ &= m_x^{(2)} - m_x^2. \end{aligned}$$

Die *Streuung* σ_x (*root mean square (RMS) value*) entspricht der Streuung positiven Wurzel der Varianz:

$$\sigma_x = +\sqrt{\sigma_x^2}.$$

Erwartungswerte lassen sich auch für *Funktionen mehrerer Zufallsvariablen* $g(x_1, \dots, x_N)$ angeben

$$E \left\{ g(x_1, \dots, x_N) \right\} = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} g(x_1, \dots, x_N) f_{x_1 \dots x_N}(x_1, \dots, x_N) dx_1 \dots dx_N,$$

wobei $f_{x_1 \dots x_N}(x_1, \dots, x_N)$ die oben eingeführte Verbunddichte der N Zufallsvariablen x_1, \dots, x_N ist.

Kovarianz C_{xy} : Sie beschreibt den Zusammenhang zweier Zufallsvariablen x, y wie folgt:

$$\begin{aligned} C_{xy} &= E \left\{ (x - m_x)(y - m_y) \right\} = \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x - m_x)(y - m_y) f_{xy}(x, y) dx dy. \end{aligned}$$

Für diskrete Zufallsvariablen lautet die Kovarianz

$$\begin{aligned}C_{\mathbf{xy}} &= E \{(\mathbf{x} - m_{\mathbf{x}})(\mathbf{y} - m_{\mathbf{y}})\} = \\ &= \sum_i \sum_j (x_i - m_{\mathbf{x}})(y_j - m_{\mathbf{y}}) \cdot P(x_i, y_j).\end{aligned}$$

Multipliziert man unter dem Erwartungswert aus und berücksichtigt $m_{\mathbf{x}} = E \{x\}$ und $m_{\mathbf{y}} = E \{y\}$, dann ergibt sich

$$E \{(\mathbf{x} - m_{\mathbf{x}})(\mathbf{y} - m_{\mathbf{y}})\} = E \{xy\} - E \{x\} \cdot E \{y\}.$$

Zwei Zufallsvariablen werden dann als *unkorreliert* bezeichnet, wenn die Kovarianz gleich Null ist: Unkorreliertheit

$$C_{\mathbf{xy}} = 0 \iff E \{xy\} = E \{x\} \cdot E \{y\}.$$

Durch Einsetzen der Bedingung für die statistische Unabhängigkeit (1.187) in (1.198) verifiziert man, daß statistisch unabhängige Zufallsvariablen immer unkorreliert sind. Umgekehrt folgt aus der Unkorreliertheit nicht die statistische Unabhängigkeit:

$$f_{\mathbf{xy}}(x, y) = f_{\mathbf{x}}(x) \cdot f_{\mathbf{y}}(y) \implies E \{xy\} = E \{x\} \cdot E \{y\}$$

Durch Normierung auf die jeweiligen Streuungen ergibt sich aus der Kovarianz der *Korrelationskoeffizient* $c_{\mathbf{xy}}$:

$$c_{\mathbf{xy}} = \frac{C_{\mathbf{xy}}}{\sigma_{\mathbf{x}}\sigma_{\mathbf{y}}} \text{ mit } -1 \leq c_{\mathbf{xy}} \leq 1.$$

Korrelations-
koeffizient

Bei unkorrelierten Zufallsvariablen ist $c_{\mathbf{xy}} = 0$. Der Maximalwert der Korrelation ist $|c_{\mathbf{xy}}| = 1$. Die Korrelation dient als Maß für einen statistischen Zusammenhang oft zur Überprüfung möglicher Kausalzusammenhänge, kann diese aber nicht begründen.

Eine weitere Eigenschaft zur Charakterisierung des statistischen Zusammenhangs ist die *Orthogonalität*:

Orthogonalität

$$E \{xy\} = 0.$$

Offensichtlich sind zwei Zufallsvariablen immer orthogonal, wenn sie unkorreliert sind und eine davon mittelwertfrei ist.

Grundbegriffe der Informationstheorie

Information, Entropie und Redundanz

Aus der täglichen Erfahrung wissen wir: Eine Information (Nachricht) hat einen Neuigkeitswert - sie ist überraschend. Tatsachen, die wir bereits kennen, stellen für uns keine Information dar. Diese Überlegung führt zur Wahrscheinlichkeit, denn Ereignisse mit geringem Informationsgehalt, d.h. Ereignisse die man erwartet, haben eine hohe Wahrscheinlichkeit. Umgekehrt haben unerwartete, überraschende Ereignisse, also Ereignisse mit einer kleinen Wahrscheinlichkeit, einen hohen Informationsgehalt. Informationsgehalt und Wahrscheinlichkeit stehen in gegenläufigem Zusammenhang.

Auf diese Erfahrung bauend entwickelte Claude E. Shannon 1948 einen mathematischen Informationsbegriff der folgende typische Fragestellung beantwortet:

„Eine diskrete (Nachrichten-) *Quelle* X mit dem Zeichenvorrat $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ sende pro Zeitschritt ein Zeichen. Die Wahrscheinlichkeit (probability) des i -ten Zeichens x_i sei p_i . Welchen Informationsgehalt hat das i -te Zeichen?“

Der Informationsbegriff fußt auf einer axiomatischen Definition

Axiom 1: Der Informationsgehalt I eines Zeichens $x_i \in X$ mit der Wahrscheinlichkeit p_i ist ein nichtnegatives Maß.

$$I(p_i) \geq 0$$

Axiom 2: Die Informationsgehalte unabhängiger Zeichen (x_i, x_l) mit der Verbundwahrscheinlichkeit $p_{i,l} = p_i \cdot p_l$ addieren sich.

$$I(p_{i,l}) = I(p_i) + I(p_l)$$

Axiom 3: Der Informationsgehalt ist eine stetige Funktion der Wahrscheinlichkeiten der Zeichen.

Anmerkung: Axiom 3 bedeutet, daß eine kleine Änderungen der Auftrittswahrscheinlichkeit nur zu einer kleinen Änderung des Informationsgehaltes führen soll.

Im zweiten Axiom wird aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten die Addition der Informationsgehalte. Dies führt direkt zur Logarithmusfunktion, die die Multiplikation in die Addition abbildet. Man definiert:

Der *Informationsgehalt* eines Zeichens mit der Wahrscheinlichkeit p ist

$$I(p) = -\text{ld}p \text{ mit } [I] = \text{bit.}$$

Es wird meist der Zweier-Logarithmus in Verbindung mit der Pseudoeinheit „bit“ verwendet. Übliche Schreibweisen sind auch $\log_2(x) = \text{ld}(x) = \text{lb}(x)$ mit ld für Logarithmus dualis und lb für binary logarithm.

Anmerkung: Die Umrechnung der log-Funktion zu verschiedenen Basen erfolgt mit: $\log_a(x) = \log_b(x) / \log_b(a) = \log_b(x) \cdot \log_a(b)$.

Der Informationsgehalt des sicheren Ereignisses ($p=1$) ist null. Mit wachsender Unsicherheit nimmt der Informationsgehalt stetig zu, bis schließlich im Grenzfall des unmöglichen Ereignisses ($p=0$) der Informationsgehalt gegen unendlich strebt. Der Informationsgehalt (6-3) spiegelt die eingangs gemachten Überlegungen wieder und erfüllt offensichtlich auch die Axiome 1 und 3.

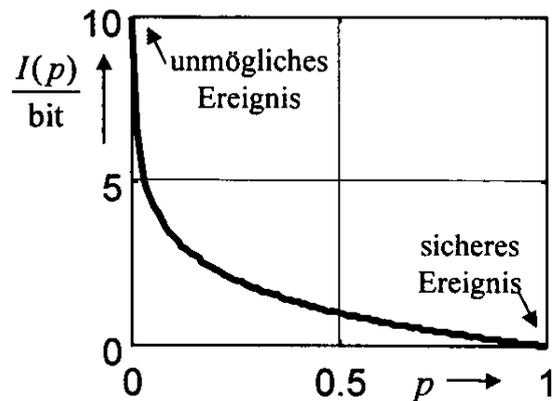


Bild 6-1: Informationsgehalt $I(p)$ eines Zeichens mit der Auftretswahrscheinlichkeit p

Der Informationsgehalt der Quelle kann nun als Erwartungswert der Informationsgehalte aller Zeichen bestimmt werden.

Man spricht vom mittleren Informationsgehalt oder in Anlehnung an die Thermodynamik von der Entropie der Quelle.

Für den einfachsten Fall einer (endlichen) *diskreten gedächtnislosen Quelle*, bei der die Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Zeichen nicht von den vorhergehenden Zeichen abhängen definiert man:

Eine diskrete, gedächtnislose Quelle X mit dem Zeichenvorrat (Alphabet) $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ und den zugehörigen Wahrscheinlichkeiten p_1, p_2, \dots, p_N besitzt die *Entropie*

$$H(X) = -\sum_{i=1}^N p_i \cdot \text{ld} p_i \text{ bit}$$

Das einfachste Beispiel einer diskreten gedächtnislosen Quelle ist die *Binärquelle* mit dem Zeichenvorrat $X=\{0,1\}$ und den Wahrscheinlichkeiten $p_0 = p$ und $p_1 = 1-p$. Ihre Entropie $H_b(p)$, auch *Shannonsche Funktion* genannt, ist

$$\frac{H_b(p)}{\text{bit}} = -p \cdot \text{ld} p - (1-p) \cdot \text{ld}(1-p)$$

Der Funktionsverlauf ist in Bild 6-2 zu sehen. Setzt die Quelle stets das Zeichen „1“ ab ($p=0$) ist die Entropie gleich null. Da man in diesem Fall weiß, daß die Quelle stets die „1“ sendet, gibt sie keine Information ab. Sind beide Zeichen gleichwahrscheinlich ($p=1/2$), so wird die Entropie maximal. Ein Beobachter, der die Aufgabe hätte, jeweils das nächste Zeichen vorherzusagen, würde im Mittel genauso häufig richtig wie falsch raten.

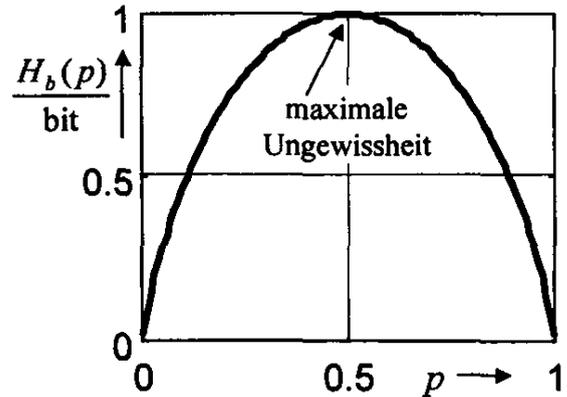


Bild 6-2: Entropie der Binärquelle

Die Entropie der Binärquelle nimmt im Maximum den Wert 1 bit an. Dies entspricht genau einer Ja/Nein-Entscheidung (Antwort) um das aktuelle Zeichen zu erfragen (Ist das Zeichen „0“?).

Die Entropie gibt allgemein eine Antwort auf die zwei Fragen:

- Wie viele Ja/Nein-Entscheidungen sind mindestens notwendig, um das aktuelle Zeichen zu erfragen?
- Wie viele Bits benötigt man mindestens, um die Zeichen der Quelle zu codieren?

Um die Bedeutung der Entropie aufzuzeigen, betrachten wir ein Zahlenwertbeispiel. In Tabelle 6-1 ist eine diskrete gedächtnislose Quelle mit sechs Zeichen beschrieben. Ihre Entropie beträgt ca. 2,25 bit.

Tabelle 6-1: Diskrete gedächtnislose Quelle mit dem Zeichenvorrat $X = \{a,b,c,d,e,f\} = \{x_1, \dots, x_6\}$, den Wahrscheinlichkeiten p_i , den Informationsgehalten $I(p_i)$ und der Entropie $H(X)$						
x_i	a	b	c	d	e	f
p_i	0.05	0.15	0.05	0.4	0.2	0.15
$I(p_i)$ / bit	4.32	2.74	4.32	1.32	2.32	2.74
$H(X)$ / bit	≈ 2.25					

Zunächst betrachte man in Tabelle 6-2 die einfache BCD-Codierung anhand des Zeichen-Index. Der BCD-Code ist ein Blockcode mit gleichlangen Codewörtern. Da sechs Zeichen vorliegen, müssen je Codewort 3 Bits verwendet werden.

Tabelle 6-2: BCD-Codierung der Zeichen nach ihren Indizes						
Zeichen	a	b	c	d	e	f
Codewort	001	010	011	100	101	110

Andererseits kann überlegt werden, wie groß die Entropie einer Quelle mit sechs Zeichen maximal sein kann.

Die Entropie einer diskreten gedächtnislosen Quelle mit N Symbolen wird maximal, wenn alle Symbole gleichwahrscheinlich sind (maximale Ungewißheit). Dieses Maximum ist der *Entscheidungsgehalt* (des Zeichenvorrats) der Quelle.

$$H_0 = \text{ld}N \text{ bit}$$

Der Entscheidungsgehalt einer diskreten gedächtnislosen Quelle mit 6 Symbolen ist 2,58 bit. Dem steht im Beispiel die Entropie von 2,25 bit gegenüber.

Die Differenz aus dem Entscheidungsgehalt einer Quelle und ihrer Entropie wird *Redundanz* bzw. *relative Redundanz* genannt.

$$R = H_0 - H(X) \quad \text{bzw.} \quad r = 1 - \frac{H(X)}{H_0}$$

Die Entropie besagt im Beispiel, daß im Mittel 2,25 Ja/Nein-Entscheidungen notwendig sind und deshalb die Zeichen der Quelle im Mittel mit 2,25 Bits codiert werden können. Ein Verfahren, das einen in diesem Sinne aufwandsgünstigen Code liefert, wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

Quelle mit Gedächtnis

Bei realen Quellen (Sprache, Bild- oder Toninformation) hängen die emittierten Symbole von den Vorausgegangenen ab und sind keine unabhängigen Ereignisse. Ein Modell für solche Prozesse bilden *Markoffketten*. Wir wollen hier die Verhältnisse für den einfachsten Fall, einer Markoffkette 1. Ordnung untersuchen, bei der das emittierte Symbol vom Vorgängersymbol abhängt. Hat eine solche Kette n verschiedene Symbole, können insgesamt n^2 verschiedene Folgepaare auftreten, für die wir wieder die Entropie, in diesem Falle die sogenannte Paarentropie $H(XY)$ berechnen können. Dabei ist x das vorausgehende und y das nachfolgende Symbol aus den n Symbolen des Quellalphabets. Für die Wahrscheinlichkeit, das ein Paar (x_i, y_j) auftritt, ergibt sich

$$P(x_i, y_j) = P(y_j | x_i) \cdot P(x_i) .$$

Damit kann jetzt $H(XY)$ als Erwartungswert für die Information eines Paares berechnet werden.

$$H(XY) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P(x_i, y_j) \cdot \text{ld}(P(x_i, y_j)) \quad (\text{gemessen in bit/Paar}).$$

Mit dem Ausdruck für die Paarwahrscheinlichkeit können wir weiter schreiben

$$H(XY) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [P(y_j | x_i) P(x_i) \cdot \text{ld}(P(y_j | x_i)) + P(y_j | x_i) P(x_i) \cdot \text{ld}(P(x_i))] .$$

Der erste Teil der Summe liefert, wenn man beachtet, dass $\sum_{i=1}^n P(x_i) = 1$ gilt

einen Ausdruck, den man als die bedingte Entropie $H(Y|X)$ bezeichnet und der den Erwartungswert für die Information des zweiten Zeichens im Paar angibt, wenn das Zeichen X vorausgegangen ist.

$$H(X | Y) = - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P(y_j | x_i) \cdot \text{ld}(P(y_j | x_i))$$

Beachtet man weiter, dass ebenfalls $\sum_{j=1}^n P(y_j | x_i) = 1$ gilt, so liefert der zweite Teil der Summe einfach

$$H(X) = - \sum_{i=1}^n P(x_i) \cdot \text{ld}(P(x_i)) \quad \text{die Entropie für ein Zeichen allein.}$$

Es gilt also

$$H(XY) = H(X) + H(Y | X),$$

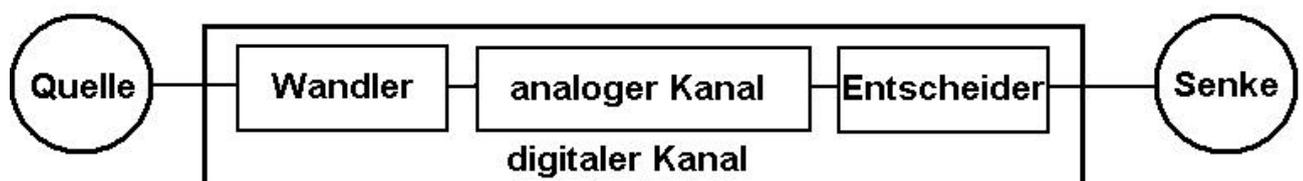
wobei $H(X) = H$ und $H(Y|X) \leq H$ gilt. Gleich H ist die bedingte Entropie nur, wenn die Y unabhängig von den X sind. Davon ausgehend kann man für $H(Y|X)$ auch schreiben

$$H(Y | X) = H(Y) - H(X; Y),$$

wobei $H(X; Y)$ die Synentropie, das heißt, der Entropieverlust durch die Abhängigkeit der Zeichen Y von den Zeichen X ist.

$$H(X; Y) = - \sum_{i,j} P(x_i, y_j) \cdot \text{ld} \left(\frac{P(x_i) \cdot P(y_j)}{P(x_i, y_j)} \right)$$

Nachrichtenkanäle



Ein (diskreter) Nachrichtenkanal besteht aus einem Eingang, an dem alle T Sekunden ein Symbol $x_i \in X$ angelegt wird, und aus einem Ausgang, an dem alle T Sekunden ein Symbol $y_i \in Y$ herausgegeben wird. Man nennt X das Eingangsalphabet und Y das Ausgangsalphabet - oft sind beide Alphabete identisch. Im allgemeinen sind die statistischen Verknüpfungen zwischen den Ein- und Ausgängen des Kanals invariant gegenüber einer Zeitverschiebung - der Kanal also stationär. Wir setzen dies stets voraus.

In vielen Fällen hängt die Statistik des Ausgangssymbols außer vom momentanen Eingangssymbol auch von der Vergangenheit des Kanals (d.h. von vorangegangenen Ein-

und Ausgangswerten am Kanal) ab. Läßt sich die bedingte Wahrscheinlichkeitsmatrix $P(Y | X)$ in Abhängigkeit von k vorangegangenen Ein-/Ausgangswerten angeben, so spricht man von einem (diskreten) **Kanal mit einem Gedächtnis k -ter Ordnung**. Für die Modellierung eines solchen Kanals sind k Zustandsvariablen und die jeweils zu jedem Zustand gehörigen bedingten Übergangswahrscheinlichkeiten $P(Y | X)$ erforderlich.

Im einfachsten Fall ist der Kanal gedächtnislos - d.h. er besitzt nur einen Zustand. Bei einem solchen **gedächtnislosen Kanal** sind die Ausgangswahrscheinlichkeiten durch die bedingte Wahrscheinlichkeitsmatrix $P(Y | X)$ festgelegt. Nimmt man an, daß die Quelle am Eingang eines solchen Kanals stationär ist, so ist, wenn man die Eingangsquelle mit dem Kanal wiederum als eine neue Quelle betrachtet, diese auch stationär.

Beispiel

Das Eingangsalphabet X und das Ausgangsalphabet Y sind durch

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}, \quad m \in \mathbb{N}$$

und

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}, \quad n \in \mathbb{N}$$

angegeben.

$P(y_j | x_i)$ ist die Wahrscheinlichkeit dafür, daß das Symbol y_j am Kanalausgang empfangen wird, wenn das Symbol x_i am Kanaleingang gesendet wird.

Die Kanalmatrix sieht wie folgt aus:

$$P(Y | X) = \begin{bmatrix} P(y_1 | x_1) & P(y_2 | x_1) & \dots & P(y_n | x_1) \\ P(y_1 | x_2) & P(y_2 | x_2) & \dots & P(y_n | x_2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ P(y_1 | x_m) & P(y_2 | x_m) & \dots & P(y_n | x_m) \end{bmatrix}$$

Ein wichtiges Merkmal einer beliebigen Kanalmatrix ist, daß die Zeilensumme gleich eins ist, z.B. für die erste Zeile gilt:

$$\sum_{i=1}^n P(y_i | x_1) = P(Y | x_1) = 1,$$

weil $\{Y | x_1\}$ ein sicheres Ereignis ist, d.h. daß irgendein $y_i \in Y$ sicher empfangen wird, wenn das Symbol x_1 gesendet wird.

Gilt bei einem gedächtnislosen Kanal mit jeweils q Ein- und Ausgängen für die bedingte Wahrscheinlichkeitsmatrix $P(Y | X)$, die den Kanal charakterisiert,

$$P(y_j | x_i) = \begin{cases} 1 - p & \text{für } i = j \\ \frac{p}{q-1} & \text{für } i \neq j \end{cases}$$

wobei $0 \leq p \leq 1$, so spricht man von einem **symmetrischen Kanal** mit der Fehlerwahrscheinlichkeit p .

Empfangsstrategien

Oft besteht bei der Datenübertragung die Aufgabe, aus einem empfangenen Symbol darauf zu schließen, welches Symbol gesendet wurde. Will man die **Fehlerwahrscheinlichkeit** bei der Auswahl minimieren, so sucht man beim Empfang eines Symbols y_j aus allen möglichen Sendesignalen x_i das Signal x^* aus, für welches gilt

$$P(x^* | y_j) \geq P(x_i | y_j).$$

Wegen $P(x | y) \cdot P(y) = P(y | x) \cdot P(x)$ erhalten wir

$$\frac{P(y_j | x^*) \cdot P(x^*)}{P(y_j)} \geq \frac{P(y_j | x_i) \cdot P(x_i)}{P(y_j)}$$

oder

$$P(y_j | x^*) \cdot P(x^*) \geq P(y_j | x_i) P(x_i).$$

Gleichung (4.22) zeigt, daß die Auswahl abhängig von der a priori Wahrscheinlichkeit $P(x_i)$ ist. Nimmt man an, daß die Eingangssymbole gleichwahrscheinlich sind, so erhält man als Kriterium

$$P(y_j | x^*) \geq P(y_j | x_i).$$

Dieses Entscheidungsverfahren wird als **Maximum-Likelihood-Verfahren** bezeichnet.

Kanalentropien

Nach (4.8) ist die Entropie der Eingangsquelle an einem Kanal

$$H(X) = - \sum_i P(x_i) \cdot \text{ld } P(x_i).$$

Die Eingangsquelle und der Kanal können zusammen wiederum als eine Quelle betrachtet werden, für deren Entropie gilt

$$H(Y) = - \sum_i P(y_i) \cdot \text{ld } P(y_i).$$

Wie bei den Markoff-Quellen können wir für einen Nachrichtenkanal auch Verbund- und bedingte Entropien definieren.

Die **Verbundentropie** des Kanals ist definiert als⁴

$$H(X, Y) = - \sum_{i,j} P(x_i, y_j) \cdot \text{ld } P(x_i, y_j).$$

Sie ist ein Maß für die in einem Ein/Ausgangssymbolpaar im Mittel enthaltene Information.

Die **Äquivokation** oder **Rückschlußentropie** ist definiert als

$$H(X | Y) = - \sum_{i,j} P(x_i, y_j) \cdot \text{ld } P(x_i | y_j).$$

Sie ist ein Maß für die im Mittel in einem Eingangssymbol für einen Beobachter, der den Ausgang kennt, enthaltene zusätzliche Information.

Die **Streuentropie** oder **Irrelevanz** ist definiert als

$$H(Y | X) = - \sum_{i,j} P(x_i, y_j) \cdot \text{ld } P(y_j | x_i).$$

Sie ist ein Maß für die im Mittel in einem Ausgangssymbol für einen Beobachter, der den Eingang kennt, enthaltene zusätzliche Information.

Die **Transinformation** ist entsprechend der Synentropie definiert als

$$H(X; Y) = - \sum_{i,j} P(x_i, y_j) \cdot \text{ld } \frac{P(x_i) \cdot P(y_j)}{P(x_i, y_j)}.$$

Aus der Definition sieht man, daß die Transinformation in X und Y symmetrisch ist, und man erhält

$$H(X; Y) = H(Y) - H(Y | X)$$

und

$$H(X; Y) = H(X) - H(X | Y).$$

4. Wir haben ein Komma zwischen den Symbolen gesetzt, um zu verdeutlichen, daß die Symbole nicht wie bei Symbolfolgen zeitlich nacheinander auftreten, sondern als Paare am Kanaleingang und Kanalausgang. $P(x, y)$ ist lediglich die Wahrscheinlichkeit, daß x und y gemeinsam auftreten. Deshalb ist $P(x, y) = P(y, x)$.

Die Transinformation ist entsprechend (4.30) ein Maß für die im Mittel in einem Ausgangssymbol enthaltene Information verringert um die Streuentropie. Wie bei den Markoff-Quellen gelten auch hier die Beziehungen

$$\begin{aligned} H(X, Y) &= H(Y | X) + H(X) \\ &= H(X | Y) + H(Y) \end{aligned}$$

und

$$H(X, Y) = H(X) + H(Y) - H(X; Y).$$

Gleichung (4.33) läßt sich wie folgt interpretieren. Die Verbundentropie der Ein- und Ausgangssymbole eines Kanals ist die Summe der Einzelentropien verringert um die Transinformation.

Der gesamte Sachverhalt ist im Bild 4.1 dargestellt. $H(X)$ ist die Eingangsentropie am Kanal. Sie besteht aus der Rückschlußentropie $H(X | Y)$, die im Kanal verloren geht, und der Transinformation $H(X; Y)$, die zum Kanalausgang gelangt. Der Kanal fügt die Irrelevanz $H(Y | X)$ dem Ausgang zu, so daß am Kanalausgang die Ausgangsentropie als die Summe der Transinformation und der Irrelevanz vorliegt. Die Verbundentropie des Kanals besteht aus der Rückschlußentropie, der Transinformation und der Irrelevanz.

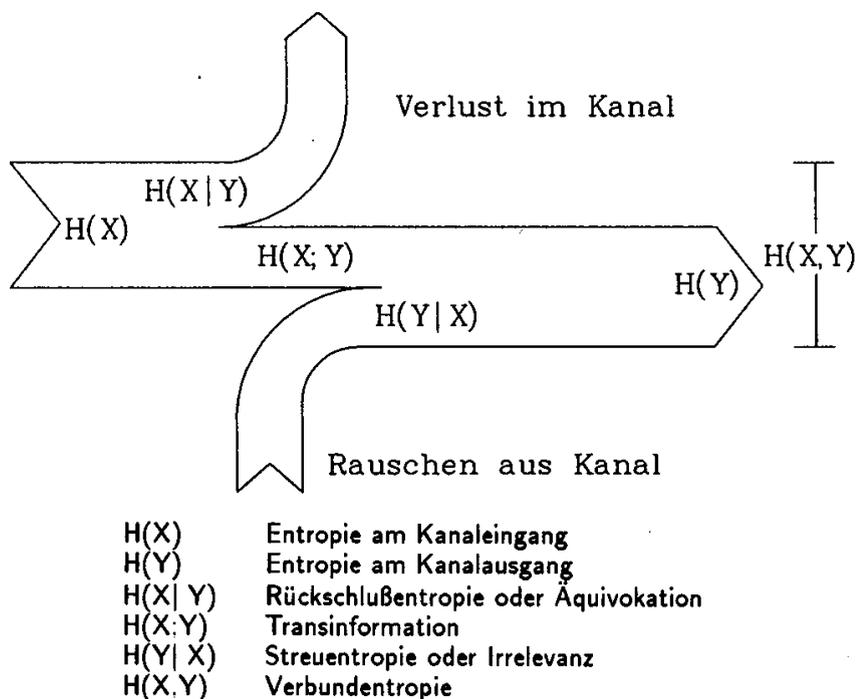


Bild 4.1: Die Entropien am Kanal

Transinformation und Kanalkapazität

Die Transinformation ist im allgemeinen eine Funktion sowohl der bedingten Wahrscheinlichkeiten $P(y_j | x_i)$, die den Kanal charakterisieren, als auch der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Kanaleingangssymbole $P(x_i)$. Bildet man das Maximum der Transinformation über alle möglichen (zulässigen) Eingangswahrscheinlichkeitsverteilungen, so erhält man eine von der Quelle am Eingang unabhängige Größe. Sie ist ein Maß für den Informationsgehalt, den ein Kanal maximal übertragen kann und wird deshalb die Kapazität des Kanals genannt. Die Kanalkapazität ist definiert als

$$C = \max_{P(X)} H(X; Y),$$

wobei das Maximum über alle zulässigen Eingangswahrscheinlichkeitsverteilungen zu bilden ist.

Ein solches Maximum existiert stets, denn die Transformation ist eine stetige Funktion der n -Variablen $P(x_i)$, und ihr Definitionsbereich ist beschränkt und abgeschlossen (wegen $P(x_i) \geq 0$ und $\sum P(x_i) = 1$).

Die Kanalkapazität sagt aus, wie viel bit an Information bei einem gegebenen Kanal maximal mit einem Zeichen übertragen werden können. Besitzt ein solcher Kanal einen Übertragungsbereich von $0 \leq f \leq f_g$ (Tiefpasskanal mit der Bandbreite $B = f_g$), kann maximal mit einer Zeichenrate $R_s = 2f_g$ übertragen werden. Für diesen Kanal gilt dann

$$C' [bps] = 2 \cdot f_g \cdot \max_{P(X)} \{H(X;Y)\}$$

Beispiel

Ein symmetrischer Kanal mit jeweils q Ein- und Ausgangssymbolen wird beschrieben durch

$$P(Y | X) = \begin{bmatrix} 1-p & \frac{p}{q-1} & \dots & \frac{p}{q-1} \\ \frac{p}{q-1} & 1-p & \dots & \frac{p}{q-1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{p}{q-1} & \frac{p}{q-1} & \dots & 1-p \end{bmatrix}.$$

Wir betrachten zunächst die Streuentropie $H(Y | X)$.

$$H(Y | X) = - \sum_{i=1}^q P(x_i) \cdot \left[\sum_{j=1}^q P(y_j | x_i) \cdot \text{ld} P(y_j | x_i) \right].$$

Die Summe der eckigen Klammern ist für jedes i gleich groß, weil die Elemente in jeder Zeile bis auf eine Permutation gleich sind. Somit ist

$$\begin{aligned} H(Y | X) &= - \sum_{i=1}^q P(x_i) \cdot \left[\sum_{j=1}^q P(y_j | x_i) \cdot \text{ld} P(y_j | x_i) \right] \\ &= -1 \cdot \left[(1-p) \text{ld} (1-p) + (q-1) \cdot \frac{p}{q-1} \cdot \text{ld} \frac{p}{q-1} \right] \end{aligned}$$

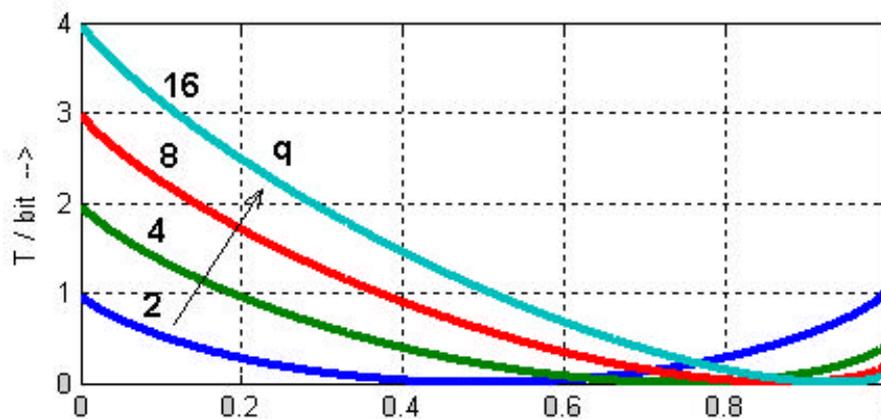
von $P(x_i)$ unabhängig.

Der Ausdruck $H(Y) - H(Y | X)$ wird maximal, wenn $H(Y)$ maximal wird. Das ist nur der Fall, wenn alle Symbole des Alphabetes Y gleichwahrscheinlich sind,

$$H(Y)_{\max} = \text{ld} q.$$

Die Kanalkapazität errechnet sich zu:

$$\begin{aligned} C &= \max H(Y) - H(Y | X) \\ &= \text{ld} q + \left[(1-p) \text{ld} (1-p) + p \cdot \text{ld} \frac{p}{q-1} \right]. \end{aligned}$$



Kontinuierliche Kanäle

Bisher haben wir diskrete Kanäle untersucht. Es ist aber auch möglich dieses Konzept auf kontinuierliche Kanäle auszudehnen. Shannon hat 1948 für den sogenannten AWGN (Additive White Gaussian Noise) Kanal gezeigt, dass sich dabei die Kanalkapazität zu

$$C' [bps] = B \cdot \text{ld} \left(1 + \frac{P_S}{P_N} \right)$$

bestimmt. Dieser Zusammenhang ist für die Informationsübertragung von grundlegender Bedeutung, da der AWGN-Kanal ein gutes Modell für die meisten Übertragungskanäle ist und die Shannonsche Kanalkapazität zum einen die physikalischen Grenzen aufzeigt, zum anderen aber auch das technisch Anzustrebende darstellt. Für Kanäle mit großem Signal-Rauschabstand (SNR Signal Noise Ratio / dB) gilt vereinfachend

$$C' [bps] = \frac{1}{3} \cdot B / \text{Hz} \cdot \text{SNR} / \text{dB} \quad \text{mit} \quad \text{SNR} / \text{dB} = 10 \lg \left(\frac{P_S}{P_N} \right) .$$

In der weiteren Darstellung wollen wir jetzt auch den Stich am C weglassen und auch für die mögliche Information pro Zeiteinheit einfach C schreiben. Die Shannonsche Gleichung zeigt:

- Die Kanalkapazität wächst beliebig, wenn der Störabstand beliebig erhöht wird
- Die Kanalkapazität strebt gegen einen Grenzwert, wenn die Bandbreite beliebig heraufgesetzt wird.

Der letzten Aussage wollen wir uns nun zuwenden. Ursache für dieses Verhalten ist die Abhängigkeit der störenden Rauschleistung von der Bandbreite. Für thermisches Rauschen gilt ganz allgemein

$$P_N = k \cdot T \cdot B = N_0 \cdot B$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J / K}$ Boltzmannkonstante

T = absolute Temperatur in [Kelvin]

B = Bandbreite in [Hz]

$N_0 = k \cdot T = P_N / B$ spektrale thermische Rauschleistungsdichte

Damit erhalten wir

$$C = B \cdot \text{ld} \left(1 + \frac{P_S}{N_0 \cdot B} \right) .$$

Wir wollen jetzt den Grenzwert C_∞ der sich ergibt, wenn wir B nach unendlich streben lassen. Zunächst wandeln wir den $\text{ld}(\)$ in den $\ln(\)$ und nutzen dann die Näherung $\ln(1+x) \approx x$ wenn $x \rightarrow 0$ strebt.

$$C_\infty = \lim_{B \rightarrow \infty} B \cdot \ln \left(1 + \frac{P_S}{N_0 \cdot B} \right) \cdot \frac{1}{\ln(2)} = \frac{P_S}{N_0 \cdot \ln(2)}$$

Dieser Grenzwert kann nicht überstiegen werden.

Bildet man den Quotienten P_s/C_∞ ergibt sich der Wert der Energie für ein bit an Information der für eine fehlerfreie Übertragung unbedingt aufgewendet werden muß. Es sind

$$E_{\text{bit}} = k \cdot T \cdot \ln(2) = 2,8 \cdot 10^{-21} \text{ Ws.}$$

Die Übertragung von Information erfordert Bandbreite, Energie und Zeit (und Geld). Für den Anwender ist vor allem die Informationsrate J als Effektivitätsmaß einer Übertragung von Interesse. Sie kann höchstens gleich C werden. Wichtig ist aber auch der Aufwand der pro 1bit getrieben werden muß in Bezug auf :

- Energieaufwand \rightarrow Energie pro 1bit
- Bandbreiteneffizienz \rightarrow spektrale Informationsrate [bit s⁻¹/Hz]
- Investitionskosten, Betriebskosten

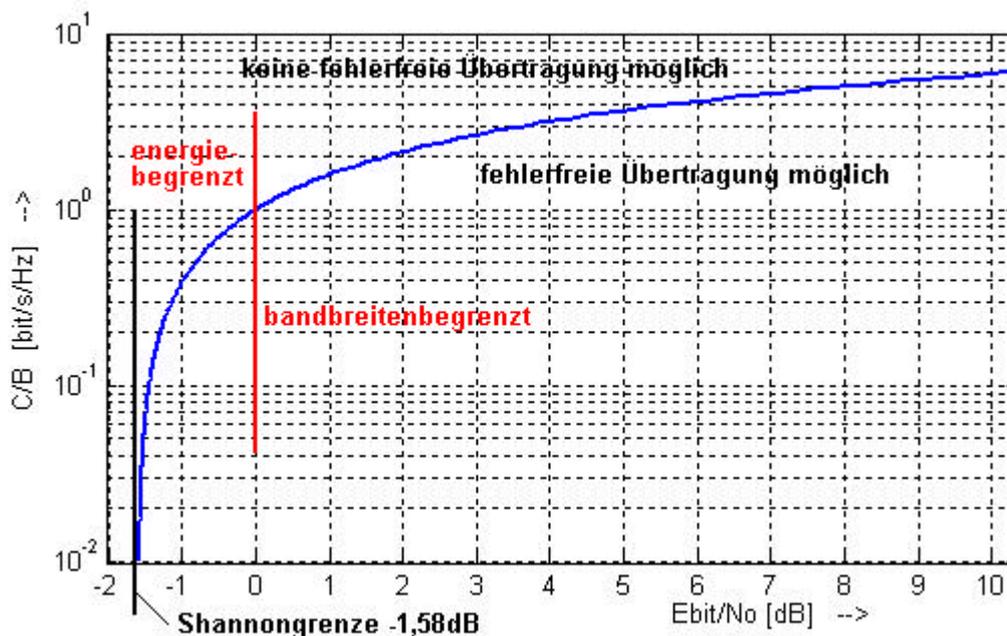
Den Energieaufwand setzt man häufig ins Verhältnis zur Rauschleistungsdichte

$$\frac{E_{\text{bit}}}{N_0} = \frac{P_s}{J} \cdot \frac{1}{N_0} \geq \frac{P_s}{C} \cdot \frac{1}{N_0} = \frac{P_s}{C \cdot k \cdot T}, \left[\frac{\text{Ws}}{\text{bit} \cdot \text{Ws}} \right] = [1]$$

Diese Größe ist dimensionslos und lässt sich in dB ausdrücken. Sie ist ein Maß für den Störabstand.

Untersuchen wir jetzt die spektrale Effizienz. J/B heißt spektrale Informationsrate und es gilt

$$\frac{J}{B} \leq \frac{C}{B} = \text{ld} \left(1 + \frac{C}{B} \cdot \frac{E_{\text{bit}}}{N_0} \right) \left[\frac{\text{bit}}{\text{s}} \right] \left[\frac{\text{s}}{\text{Hz}} \right]$$



Codierung

Quellcodierung

Eine Quelle wurde als Zufallsvariable eingeführt, die Buchstaben (Zeichen) eines endlichen Alphabets $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ mit den Wahrscheinlichkeiten $P(x_n)$ liefert. Die Darstellung der von der Quelle gelieferten Zeichen wird als **Quellencodierung** bezeichnet. Beispiele für Quellencodierungen liefern z.B. das ISO 7-Bit-Alphabet oder das Morse-Alphabet.

Es fällt auf, daß beim ISO 7-Bit-Alphabet die Längen $L(x_n)$ aller Codewörter gleich sind. Das trifft für das Morse-Alphabet nicht zu. Mit

$$L = \sum_{n=1}^N P(x_n)L(x_n)$$

bezeichnen wir die mittlere **Codewortlänge**. L wird wie die Entropie der Quelle $H(X)$ in bit/Zeichen gemessen.

Stellt innerhalb eines Codes **kein** Codewort den Beginn eines anderen Codewortes dar, besitzt der Code die **Präfixeigenschaft**. Er wird, da die einzelnen Codewörter dann nicht durch ein besonderes Zeichen (z.B. ein Komma) getrennt werden müssen, auch als **kommatafrei** bezeichnet.

Erfüllt ein Code die Präfixeigenschaft, kann die Decodierung durch einen Entscheidungsbaum vorgenommen werden: Wird ein Endknoten des Baums erreicht, ist ein gültiges Codewort gefunden. Sind in einem solchen binären Codebaum alle Endknoten durch gültige Codewörter belegt, gilt

$$\sum_{n=1}^N 2^{-L(x_n)} = 1.$$

Beispiel

Gegeben sei eine Quelle mit 10 Zeichen ($H_0 = 3,322$ bit/Zeichen) und

$$P(x_n) = \begin{cases} 0,4 & \text{für } n = 1 \\ 0,1 & \text{für } 2 \leq n \leq 4 \\ 0,05 & \text{für } 5 \leq n \leq 10 \end{cases}$$

Bild 4-1 zeigt den Codebaum für eine kommatafreie Binärcodierung der Zeichen. Für diesen Code gilt $L = 2,9$ bit/Zeichen.

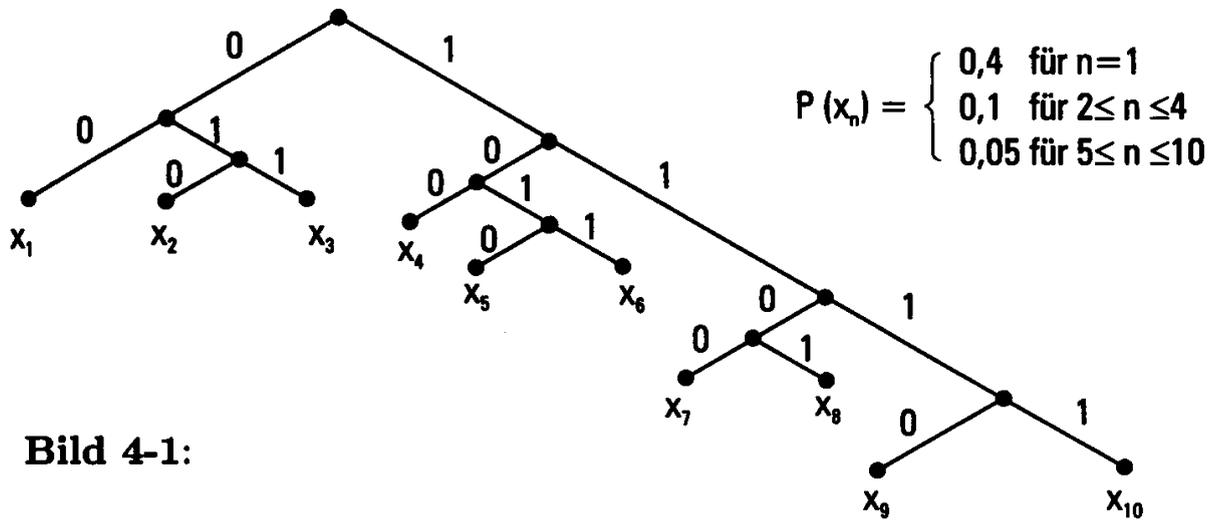


Bild 4-1:

Die Entropie dieser Quelle beträgt 2,822 bit/Symbol, damit ist die gewählte Codierung der Quelle mit $L = (0,4 \cdot 1 \cdot 2 \text{bit} + 0,1 \cdot 3 \cdot 3 \text{bit} + 0,05 \cdot 6 \cdot 4 \text{bit}) = 2,9 \text{ bit/Symb}$. Schon sehr dicht am möglichen Optimum, denn Ziel der Quellcodierung ist es, nicht mehr Aufwand (Wortlänge) zu betreiben, als es notwendig ist (Entropie der Quelle). Shannon hat nun gezeigt, dass folgende Aussagen gelten:

- Für jede Quelle und für jeden Code gilt, dass $H(X) \leq L$ ist.
- Für jede Quelle kann eine Codierung gefunden werden, für die die Aussage gilt $H(X) \leq L \leq H(X) + 1$.

Die zweite Aussage erlaubt es ein Verfahren zu denken, das $H(X) = L$ liefert. Es sagt aber nichts über die konkrete Form dieses Verfahrens aus.

Mit r wollen wir die Anzahl der Zustände eines Codesymbols bezeichnen, dann heißt ein Code

- **idealer Code** $L = H(X) / \text{ld}(r)$ gilt und
- **optimal** oder **kompakt**, wenn zwar $L > H(X) / \text{ld}(r)$ ist, aber bei dem gegebenen Codieralphabet kein kürzerer Code möglich ist.

Es gibt verschiedene Codiervorgänge, die optimale Codes liefern. Ein Beispiel dafür ist der **Huffman-Code**

Die Konstruktion eines Huffman-Codes setzt den Codebaum von den Endknoten her (also sozusagen von unten) zusammen. Dazu werden die Zeichen zunächst nach der Größe ihrer Auftretenswahrscheinlichkeiten

$$P(x_1) \geq P(x_2) \geq \dots \geq P(x_N)$$

geordnet. Die beiden Zeichen mit den kleinsten Auftretenswahrscheinlichkeiten sind gleich weit vom Ursprung des Codebaums entfernt, es gilt $L(x_{N-1}) = L(x_N)$. Wäre das nicht der Fall, bliebe einer der beiden Endknoten unbesetzt, was unmittelbar auf die Möglichkeit einer Codelängenreduzierung führt.

Das Huffman-Verfahren durchläuft über $N - 1$ Iterationen die beiden folgenden Schritte:

1. Die beiden Zeichen mit den kleinsten Auftretenswahrscheinlichkeiten werden durch ein Bit unterschieden und dann zu einem neuen Zeichen zusammengefaßt.
2. Die neuen Zeichen werden wieder nach fallender Auftretenswahrscheinlichkeit sortiert. Es ergeben sich zwei neue Zeichen mit kleinsten Auftretenswahrscheinlichkeiten.

Ein Huffman-Code ist nicht eindeutig.

Beispiel:

Bild 4.1-2 zeigt die Anwendung des Huffman-Verfahrens auf die in Tabelle 4.1-1 dargestellte Quelle. Die mittlere Codewortlänge ist hier $L = 2,83$ bit/Zeichen. Bild 4.1-3 zeigt den zugehörigen Codebaum.

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	
0,25	0,2	0,2	0,15	0,07	0,05	0,025	0,025	0,02	0,01	0,03
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_9	x_{10}	x_7	x_8	
0,25	0,2	0,2	0,15	0,07	0,05	0	1	0	1	0,05
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	
0,25	0,2	0,2	0,15	0,07	0,05	00	01	10	11	0,08
x_1	x_2	x_3	x_4	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_5	x_6	
0,25	0,2	0,2	0,15	00	01	10	11	0	1	0,12
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	
0,25	0,2	0,2	0,15	00	01	100	101	110	111	0,2
x_1	x_2	x_3	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_4	
0,25	0,2	0,2	000	001	0100	0101	0110	0111	1	0,35
x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_4	x_1	x_2	x_3	
000	001	0100	0101	0110	0111	1	0,25	0,2	0,2	0,4
x_2	x_3	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_4	x_1	
0	1	0000	0001	00100	00101	00110	00111	01	1	0,6
x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_4	x_1	x_2	x_3	
00000	00001	000100	000101	000110	000111	001	01	10	11	1,0
x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	$L=2,83$
01	10	11	001	00000	00001	000100	000101	000110	000111	

Der Huffman-Code ist ein kommafreier Code mit variablen Codewortlängen, der die kürzeste mittlere Codewortlänge für ein vorgegebenes Alphabet X und vorgegebene Auftretenswahrscheinlichkeiten $P(x_n)$ erreicht.

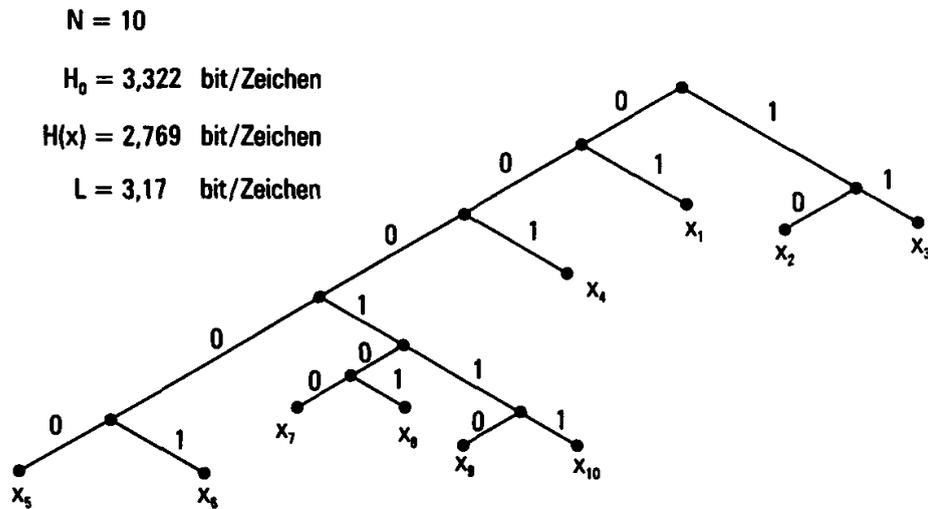
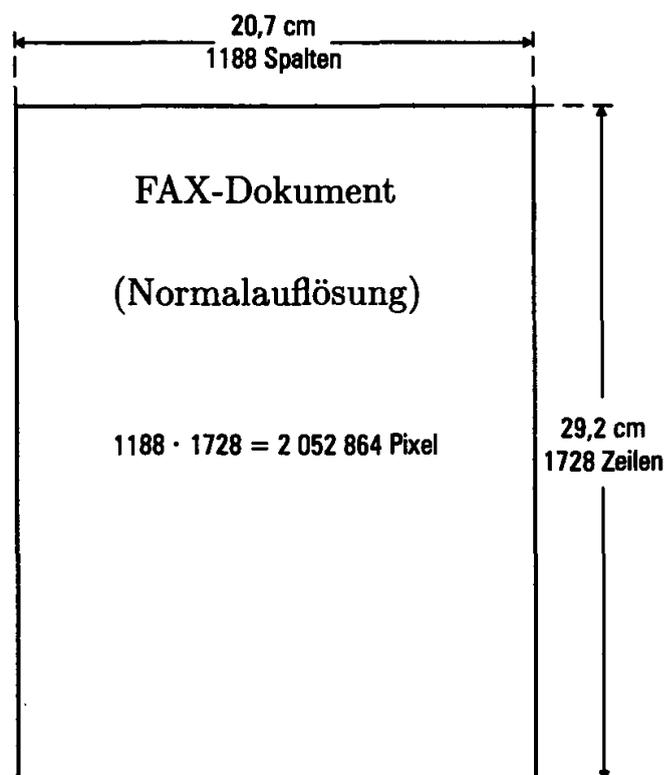


Bild 4.1-3: Codebaum zum Huffman-Code

Anwendung: Quellencodierung bei FAX

Per FAX wird ein zweidimensionales Dokument als Folge von Zeilen übertragen. Das Dokument wird dabei als Bild angesehen, das Abbildungen und Texte enthält. Es wird in Zeilen und Spalten quantisiert, so daß ein Gitter von Bildelementen, die als Pixel bezeichnet werden, entsteht.



Ein Standard DIN A4 Dokument ist 20,7 cm breit und 29,2 cm hoch. Die Normalauflösung beim FAX ist 1188 Pixel/Zeile bei 1728 Zeilen.

Es gibt auch einen hochauflösenden Standard mit 2376 Pixel/Zeile bei ebenfalls 1728 Zeilen.

Im Normalfall erfolgt also eine Auflösung einer DIN A4 Seite in 2052864 Pixel. Die Auflösung beim (allerdings farbigen) PAL-Fernsehstandard beträgt 720 Pixel/Zeile · 625 Zeilen = 450000 Pixel. D.h. die Anzahl der Pixel im FAX beträgt 4,56 mal die Anzahl der Pixel im Fernsehbild.

Der Inhalt eines FAX-Pixels ist eine Binärzahl S für Schwarz, W für Weiß. Eine Zeile besteht also aus einer Abfolge von 1188 Binärwerten. Dabei ist offensichtlich, daß häufig längere Serien derselben binären Wertigkeit im FAX auftreten.

Das von der CCITT (ITU-T) standardisierte Lauflängen-Codierverfahren dient der Informationskomprimierung. Es basiert auf einem modifizierten Huffman-Code, der in Tabelle 4.2-1 wiedergegeben ist. Der Code unterscheidet Serien von S und Serien von W . Die Länge jeder Serie wird durch ein zweigeteiltes Codewort wiedergegeben. Der erste Teil wird als **Makeup Codeword** bezeichnet, es enthält die wichtigeren Bits (MSB, most significant bits). Der zweite Teil heißt **Terminating Codeword**, in dem die weniger wichtigen Bits (LSB, least significant bits) stehen. Jeder Serie der Länge zwischen 0 und 63 wird eindeutig ein Huffman-Codewort zugeordnet, genauso jeder Serie der Länge $64 \cdot k$, $1 \leq k \leq 27$, ($64 \cdot 27 = 1728$). Der Code enthält zusätzlich ein eindeutiges END OF LINE (EOL) Zeichen, das gleichzeitig anzeigt, daß auf dieser Zeile kein schwarzes Pixel mehr folgt.

Beispiel:

Die aus 1188 Pixeln bestehende Zeile mit den Serien

200 W , 10 S , 10 W , 84 S , 884 W

soll nach Tabelle 4.2-1 codiert werden. Es ergibt sich

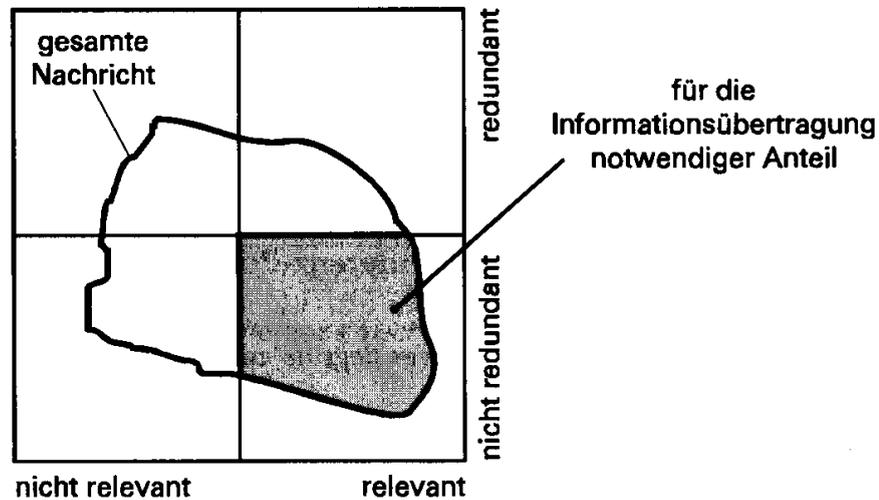
010111	10011	0000100	00111	0000001111	00001101000	000000000001
192 W	8 W	10 S	10 W	64 S	20 S	EOL

Zur Übertragung der 1188 bit der ursprünglichen Zeile werden nur 56 bit benötigt, der Kompressionsfaktor ist also 21,2.

Tabelle 4.2-1: Huffman-Code für die FAX-Übertragung nach CCITT,

Run length	White	Black	Run length	White	Black
Makeup codewords					
64	11011	0000001111	960	011010100	0000001110011
128	10010	000011001000	1024	011010101	0000001110100
192	010111	000011001001	1088	011010110	0000001110101
256	0110111	000001011011	1152	011010111	0000001110110
320	00110110	000000110011	1216	011011000	0000001110111
384	00110111	000000110100	1216	011011000	0000001110111
448	01100100	000000110101	1280	011011001	0000001010010
512	01100101	0000001101100	1408	011011011	0000001010100
576	01101000	0000001101101	1472	010011000	0000001010101
640	01100111	0000001001010	1536	010011001	0000001011010
704	011001100	00000010010121	1600	010011010	0000001011011
768	011001101	0000001001100	1664	011000	0000001100100
832	011010010	0000001001101	1728	010011011	0000001100101
896	011010011	0000001110010	EOL	000000000001	000000000001
Run length	White	Black	Run length	White	Black
Terminating Codewords					
0	00110101	000110111	32	00011011	000001101010
1	000111	010	33	00010010	000001101011
2	0111	11	34	00010011	000011010010
3	1000	10	35	00010100	000011010011
4	1011	011	36	00010101	000011010100
5	1100	0011	37	00010110	000011010101
6	1110	0010	38	00010111	000011010110
7	1111	00011	39	00101000	000011010111
8	10011	000101	40	00101001	000001101100
9	10100	000100	41	00101010	000001101101
10	00111	0000100	42	00101011	000011011010
11	01000	0000101	43	00101100	000011011011
12	001000	0000111	44	00101101	000001010100
13	000011	00000100	45	00000100	000001010101
14	110100	00000111	46	00000101	000001010110
15	110101	000011000	47	00001010	000001010111
16	101010	0000010111	48	00001011	000001100100
17	101011	0000011000	49	01010010	000001100101
18	0100111	0000001000	50	01010011	000001010010
19	0001100	00001100111	51	01010100	000001010011
20	0001000	00001101000	52	01010101	000001000100
21	0010111	00001101100	53	00100100	000000110111
22	0000011	00000110111	54	00100101	000000111000
23	0000100	00000101000	55	01011000	000000100111
24	0101000	00000010111	56	01011001	000000101000
25	0101011	00000011000	57	01011010	0000001011000
26	0010011	000011001010	58	01011011	0000001011001
27	0100100	000011001011	59	01001010	000000101011
28	0011000	000011001100	60	01001011	000000101100
29	00000010	000011001101	61	00110010	000001011010
30	00000011	000001101000	62	00110011	000001100110
31	00011010	000001101001	63	00110100	000001100111

Die bisher untersuchten Quellcodierungen sind so geartet, dass sie die in einer Nachricht enthaltene Redundanz reduzieren oder sogar ganz entfernen, sie erlauben es bei fehlerfreier Übertragung oder Speicherung die ursprüngliche Information wieder vollkommen herzustellen. In sehr vielen Fällen (Audiosignale, Bildsignale) enthalten Signale Anteile, die in der Senke (z.B. Mensch) ohnehin nicht erfasst werden können. Solche Anteile bezeichnet man als **Irrelevanz** einer Nachricht und es ist im Allgemeinen nicht erforderlich diesen Anteil mit zu übertragen



Die Nachrichtenebene

Die Übertragung einer so auf ihren Kerngehalt reduzierten Information ist jedoch kritisch, da sich Übertragungsfehler in diesem Fall weder erkennen noch korrigieren lassen. Daher wird einer quellencodierten Nachricht in aller Regel vor der Übertragung wieder Redundanz hinzugefügt, die nun allerdings algebraisch strukturiert ist, so daß man diese Redundanz im Empfänger für Zwecke der Fehlererkennung oder der Fehlerkorrektur einsetzen kann. Damit ist die Aufgabe der Kanalcodierung umrissen.

Kanalcodierung

Blockcodierung:

Die Kanalcodierung gestattet die Erkennung oder sogar die Korrektur von Fehlern, die bei der Übertragung binärer Datenwörter auftreten. Die Codierungstheorie bedient sich der Methoden der Arithmetik endlicher Algebren. Der Einfachheit halber beschäftigen wir uns daher hier mit Verfahren der bitweisen Codierung, die über der binären Algebra GF(2) arbeitet. Mit der

Addition	<table style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">+</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0</td> </tr> </table>	+	0	1	0	0	1	1	1	0
+	0	1								
0	0	1								
1	1	0								

und der Multiplikation	<table style="border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">·</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0</td> </tr> <tr> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">0</td> <td style="border: 1px solid black; padding: 2px 5px;">1</td> </tr> </table>	·	0	1	0	0	0	1	0	1
·	0	1								
0	0	0								
1	0	1								

ist über der Menge {0, 1} der Körper GF(2) erklärt. Körper sind Systeme in denen die arithmetischen Grundoperationen (+, −, ·, /) unbeschränkt ausgeführt werden können.

Senderseitig wird zur Codierung ein **Encoder** eingesetzt, dessen Gegenstück im Empfänger als **Decoder** bezeichnet wird.

Allgemeine Bemerkungen zur Kanalcodierung

Verfahren der Kanalcodierung werden eingesetzt, um bei gegebenem Signal-Rausch-Verhältnis (SNR, Signal to Noise Ratio) die Bitfehlerrate (BER, Bit Error Rate) zu senken. Als SNR_{bit} bezeichnet man das dimensionslose Verhältnis der Bitenergie zur Rauschleistungsdichte

$$SNR_{bit} = \frac{E_b}{N_0}$$

Die Wirksamkeit eines Kanalcodierungsverfahrens zeigt sich im Verhalten der BER über dem SNR_{bit} (Bild 5.1-1). Gegenüber der nicht codierten Übertragung ergibt sich ein **Codierungsgewinn**.

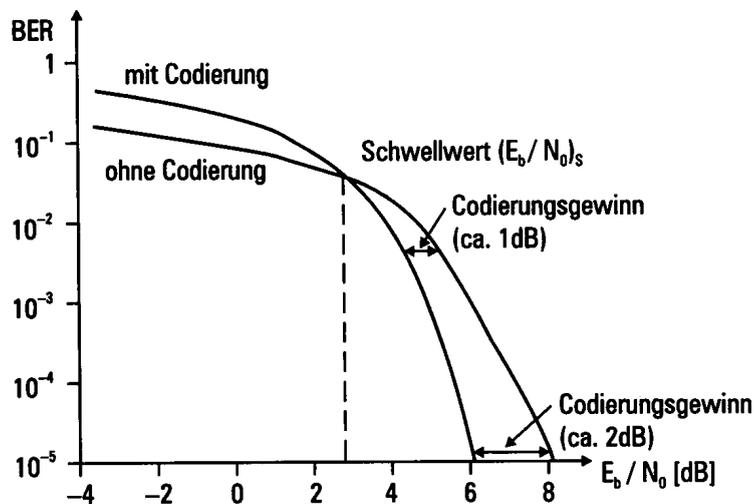


Bild 5.1-1: BER über SNR_{bit} und Codierungsgewinn

Für einen Code der bis zu t Fehler erkennen oder korrigieren kann, kann die **Restfehlerwahrscheinlichkeit** abgeschätzt werden durch

$$P_{F, \text{Rest}} \leq \sum_{i=t+1}^n \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i}.$$

Darin ist mit n die Länge der Codewörter bezeichnet. **Blockcodes** sind dadurch gekennzeichnet, daß sie ein k -bit-Datenwort in ein n -bit-Codewort transformieren. Sie werden auch als **(n, k) -Codes** bezeichnet. Ihre **Code-rate** ist

$$r = \frac{k}{n}.$$

Die Vorteile der Kanalcodierung werden erkauft durch

- erhöhten schaltungstechnischen Aufwand in Sender und Empfänger,
- zusätzliche Verzögerungen durch En- und Decoder-Durchlaufzeiten,
- eine um r verkleinerte (Netto-) Datenrate bei der Übertragung.

Systematische Blockcodes

Im folgenden werden **lineare** Blockcodes betrachtet, d.h. die $n - k$ **Paritycheckbits** sind Linearkombinationen der k Datenbits. Ein Blockcode ist **systematisch**, wenn seine n -bit-Codewörter so aufgebaut sind, daß an das k -bit-Datenwort das $(n - k)$ -bit-Paritycheckwort angehängt wird.

Der Encoder berechnet aus dem Datenwort \vec{d} das Codewort

$$\vec{c}^T = \vec{d}^T \overline{G},$$

worin \overline{G} die **Codegeneratormatrix** ist. \overline{G} hat die Form

$$\overline{G} = [\overline{T}_k \overline{P}].$$

\overline{T}_k ist die $k \times k$ Einheitsmatrix und \overline{G} spiegelt die Verknüpfungen zwischen Daten- und Paritycheckwörtern wider.

Beispiel:

$$\overline{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

definiert einen **$(7, 3)$ -Code**.

Der Code ist **systematisch**
und die Codewörter sind

\vec{d}^T	$\vec{c}^T = \vec{d}^T \overline{G}$
000	0000000
001	0011111
010	0100110
011	0111001
100	1001100
101	1010011
110	1101010
111	1110101

Alle Codewörter unterscheiden sich in mindestens 3 Komponenten.

Allgemein heißt die Anzahl der Komponenten, an denen sich zwei Codewörter unterscheiden, **Hammingabstand**. Für einen Code, mit dem t Bitfehler korrigiert werden können, muß notwendigerweise gelten, daß der minimale Hammingabstand d_{\min} zweier Codewörter die Ungleichung

$$d_{\min} \geq 2t + 1$$

erfüllt.

Der Decoder arbeitet mit der durch

$$\overline{H} = [\overline{P}^T \overline{I}_{n-k}]$$

definierten Paritycheckmatrix.

Beispiel:

Für \overline{G} aus dem vorigen Beispiel ergibt sich

$$\overline{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Der Decoder berechnet für das empfangene Wort \vec{r} das Produkt

$$\vec{s}^T = \vec{r}^T \overline{H}^T.$$

Ist \vec{r} ein Codewort \vec{c} , folgt mit dem Paritycheckwort \vec{c}_p :

$$\begin{aligned} \vec{s}^T &= \vec{c}^T \begin{bmatrix} \overline{P} \\ \overline{I}_{n-k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{d}^T & \vec{c}_p^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \overline{P} \\ \overline{I}_{n-k} \end{bmatrix} \\ &= \vec{d}^T \overline{P} + \vec{c}_p^T \overline{I}_{n-k} = \vec{c}_p^T + \vec{c}_p^T = \vec{0}^T \quad \text{mod 2.} \end{aligned}$$

Ist \vec{r} kein Codewort, existiert ein vom Nullwort verschiedenes **Fehlermuster** \vec{e} und ein Codewort \vec{c} , mit dem $\vec{r} = \vec{c} + \vec{e}$ gilt.

\vec{s} heißt **Syndrom**. Wenn $\vec{s} \neq \vec{0}$ gilt, liegt ein Übertragungsfehler vor.

Die Syndromdecodierung studieren wir an folgendem

Beispiel:

\overline{G} bzw. \overline{H} seien gegeben.

Wir verwenden dabei die beiden Matrizen G und H unseres Beispiels.

Wir senden das Codewort $\vec{c}^T = (1101010)$
 und empfangen $\vec{r}^T = (1111010)$,
 d.h. es ist $\vec{e}^T = (0010000)$.

Der Decoder berechnet $\vec{s}^T = \vec{r}^T \overline{H}^T = (1111)$.

Das ist die dritte Spalte der Paritycheckmatrix \overline{H} , also muß in \vec{r} das dritte Bit falsch sein.

Zyklische Blockcodes

Ein linearer (n, k) -Blockcode heißt **zyklisch**, wenn jede zyklische Verschiebung eines Codewortes wieder ein Codewort ist. Mit $\vec{c} = (c_1 c_2 \dots c_{n-1} c_n)^T$ sind dann auch $(c_2 c_3 \dots c_n c_1)^T$, $(c_3 c_4 \dots c_n c_1 c_2)^T$ usw. Codewörter.

Man kann zeigen, daß das Element der k -ten Zeile und n -ten Spalte der Generatormatrix \overline{G} eines zyklischen Codes eine 1 sein muß, \overline{G} also die Form

$$\overline{G} = \left[\begin{array}{cccc|c} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \dots \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & & & & \vdots & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & \dots & 1 \end{array} \right]$$

besitzt.

Wir betrachten im folgenden nur noch systematische, zyklische Codes und führen deren Polynomdarstellung ein über folgendes

Beispiel: Die Generatormatrix

$$\overline{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

definiert einen systematischen, zyklischen $(7, 3)$ -Code. Ihre Polynomform ist

$$\overline{G} = \begin{bmatrix} x^6 & - & - & x^3 & x^2 & x & - \\ - & x^5 & - & - & x^2 & x & 1 \\ - & - & x^4 & x^3 & x^2 & - & 1 \end{bmatrix} \leftarrow g(x)$$

und $g(x) = x^4 + x^3 + x^2 + 1$ ist das Generatorpolynom des Codes.

Jeder zyklische (n, k) -Blockcode besitzt ein **Generatorpolynom** der Gestalt

$$g(x) = x^{n-k} + \dots + 1,$$

das den Grad $n - k$ und immer den konstanten Summanden 1 hat. Mit Mitteln der Algebra beweist man folgenden

Satz:

Das Generatorpolynom $g(x)$ erzeugt genau dann einen zyklischen (n, k) -Code, wenn es Teiler von $x^n + 1$ ist.

Beispiel:

Wir suchen $(7, k)$ -Codes, benötigen also Teiler von $x^7 + 1$. Man kann nachrechnen, daß

$$x^7 + 1 = (x + 1)(x^3 + x + 1)(x^3 + x^2 + 1)$$

gilt und die Faktoren der rechten Seite irreduzibel sind. Durch

$$g(x) = (x + 1)(x^3 + x + 1) = x^4 + x^3 + x^2 + 1$$

wird also, wie wir eigentlich schon wissen, ein zyklischer $(7, 3)$ -Code definiert.

Die **Konstruktion zyklischer Codes** verläuft wie folgt:

1. Durch Auswertung der Hamming-Ungleichung (5.2-8) findet man eine geeignete (n, k) -Kombination für eine vorgegebene Fehlerkorrekturfähigkeit t .
2. Ein Teiler von $x^n + 1$ mit dem Grad $n - k$ wird als Generatorpolynom $g(x)$ benutzt.
3. Aus $g(x)$ wird die Generatormatrix \overline{G} berechnet.
4. Der so gefundene Code muß, da die Hamming-Ungleichung (5.2-8) nur eine notwendige Bedingung liefert, noch dahingehend untersucht werden, ob er die gewünschte Korrekturfähigkeit auch wirklich besitzt.

Praktisch entnimmt man einer Tabelle eine erprobte n, k -Kombination mit dem dazugehörigen erprobten Generatorpolynom.

Zur Generierung eines zyklischen Codes werden linear rückgekoppelte Schieberegister eingesetzt. Dazu werden Datenwort \vec{d} und Codewort \vec{c} zunächst

als Polynome geschrieben:

$$d(x) = d_1x^{k-1} + d_2x^{k-2} + \dots + d_{k-1}x + d_k$$

$$c(x) = c_1x^{n-1} + c_2x^{n-2} + \dots + c_{n-1}x + c_n.$$

Da $d(x)$ maximal den Grad $k - 1$ hat, besitzt $x^{n-k}d(x)$ maximal den Grad $n - 1$. Wir berechnen

$$\frac{x^{n-k}d(x)}{g(x)} = q(x) + \frac{r(x)}{g(x)}.$$

Die Division liefert ein Polynom $q(x)$ maximal $(k - 1)$ -ten Grades und einen Rest $r(x)$. Wegen $r(x) + r(x) = 0 \pmod{2}$ ist $x^{n-k}d(x) + r(x)$ durch $g(x)$ teilbar.

Da die Zeilen der Generatormatrix in Polynomform, sukzessive unter Beachtung der Regeln der linearen Algebra aus der letzten Zeile, die $g(x)$ enthält, konstruiert werden, stellt jede dieser Zeilen ein mit $g(x)$ multipliziertes Polynom dar. Daher gilt für das Codewortpolynom

$$c(x) = a(x)g(x).$$

Das Polynom $a(x)$ hat maximal den Grad $(k - 1)$, es gibt also genau 2^k verschiedene Polynome $a(x)$.

Da $x^{n-k}d(x) + r(x)$ durch $g(x)$ teilbar ist, gibt es also ein Codewort

$$c(x) = a(x)g(x) = x^{n-k}d(x) + r(x).$$

$x^{n-k}d(x)$ ist aber nichts weiter als ein Linksshift der Datenbits um $(n - k)$ Stellen. Da der Code systematisch ist, muß also

$$r(x) = \text{Rest} \left[\frac{x^{n-k}d(x)}{g(x)} \right] \text{ das Paritycheckwort sein.}$$

Beispiel:

$$g(x) = x^4 + x^3 + x^2 + 1$$

erzeugt einen zyklischen $(7, 3)$ -Code. Mit $\vec{d} = (0, 0, 1)^T$ und $n - k = 4$ folgt

$$d(x) = 1, \quad x^{n-k}d(x) = x^4$$

und daraus

$$r(x) = \text{Rest} \left[\frac{x^4}{x^4 + x^3 + x^2 + 1} \right] = x^3 + x^2 + 1.$$

\vec{d} wird also codiert in $\vec{c} = (0011101)^T$.

Die Gleichung, mit der der Rest einer Polynomdivision berechnet wird, kann als linear rückgekoppeltes Schieberegister mit $n - k$ Speicherzellen implementiert werden. Die Codierung des systematischen Datenworts \vec{d} (bzw. $d(x)$) geschieht dann wie folgt:

Die k Datenbits werden nacheinander in die $n - k$ Zellen des Schieberegisters eingeschrieben.

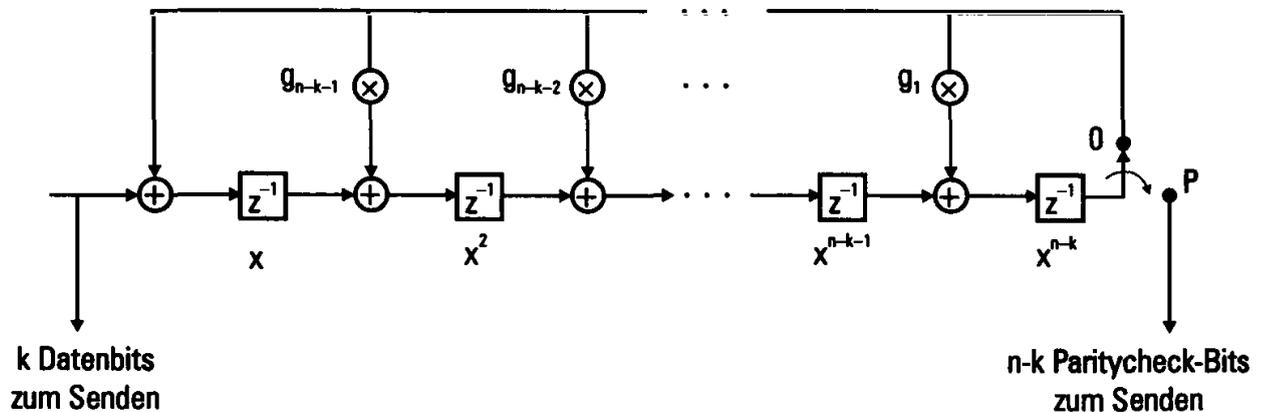


Bild 5.3-1: Schieberegister-Encoder

Der Schalter hinter der letzten Zelle ist in Stellung 0. Gleichzeitig mit dem Einschreiben in das Schieberegister werden die Datenbits gesendet. Sie bilden, da der Code systematisch ist, die ersten k Bits des Codewortes der Länge n . Das Schieberegister läuft nun (Schalterstellung immer noch 0) bis das k -te Datenbit die letzte Zelle verläßt. Die Faktoren g_i in den Rückkopplungszweigen sind 0 oder 1, je nachdem ob die entsprechenden Koeffizienten des Generatorpolynoms

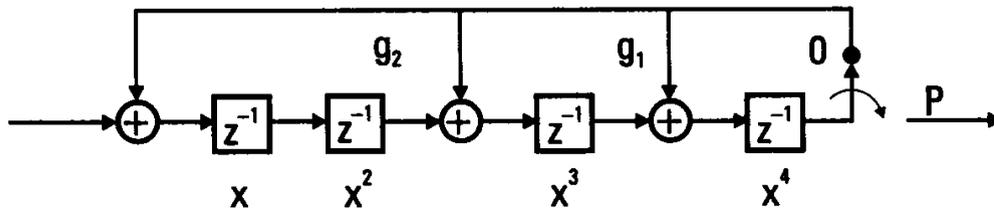
$$g(x) = x^{n-k} + g_1 x^{n-k-1} + \dots + g_{n-k-1} x + 1$$

0 oder 1 sind. Wenn das k -te Datenbit d_k die letzte Schieberegister-Zelle verlassen hat, stehen in den $(n - k)$ Speicherzellen die Bits des Paritycheckworts. Der Schalter wird in die Stellung P umgelegt und das Paritycheckwort wird zum Senden an das Datenwort angehängt.

Beispiel:

Das zu $g(x) = x^4 + x^3 + x^2 + 1$ gehörende Schieberegister ist in Bild 5.3-1 abgebildet.

Das Datenwort $\vec{d} = (001)^T$ generiert, wie in Bild 5.3-2 dargestellt, das Codewort $\vec{c} = (0011101)^T$.



(a) Codierer zum Generatorpolynom
 $g(x) = x^4 + x^3 + x^2 + 1$

Inhalt von Zelle	4	3	2	1
	0	-	-	-
	0	0	-	-
letztes Datenbit wird eingelesen	1	0	0	-
	0	1	0	0
	0	0	1	0
	0	0	0	1
letztes Datenbit verläßt das SR	1	0	1	1

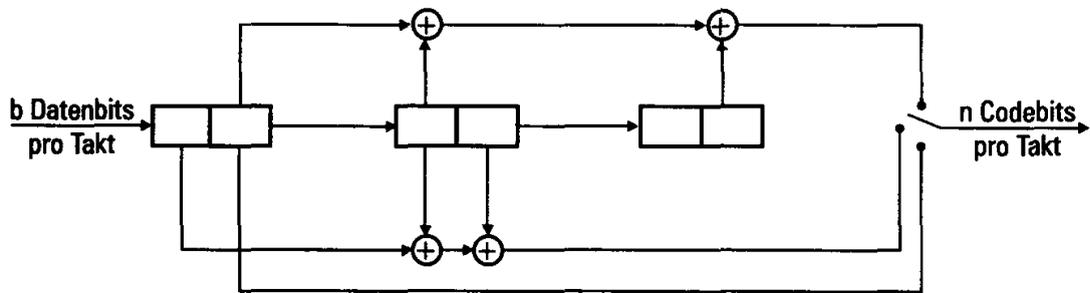
↓ Bitintervall

→ Paritycheck-Bits

Bild 5.3-2: Beispiel für einen Schieberegister-Encoder

Faltungscodierung:

Ein Faltungs-Encoder kann als Schieberegister mit Verknüpfungslogik angesehen werden. Jeweils $k \geq 1$ Bit werden zu einem Symbol zusammengefaßt. Diese Symbole werden anschließend taktweise in ein Schieberegister der Länge $L = b \cdot k$ eingegeben (Bild 6-1). $b = L/k$ heißt Eindringtiefe und L heißt Einflußlänge des Encoders. $r = k/n$ gibt die Coderate an.

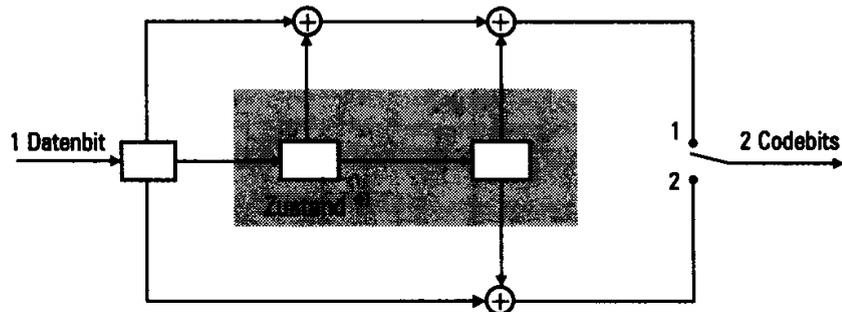


$k = 2$ Datenbits pro Takt $L = b \cdot k = 6$ Einflußlänge
 $n = 3$ Codebits pro Takt $r = k/n = 2/3$ Coderate
 $b = 3$ Eindringtiefe

Bild 6-1: Beispiel für einen Faltungs-Encoder

Wir setzen im folgenden $k = 1$ und machen uns die Faltungscodierung am in Bild 6-2 skizzierten Encoder klar. Stehen zu Beginn Nullen in den Schieberegister-Zellen gibt der Encoder auf

die Datenbits ... 0 1 0 1 1 0
 die Codebits ... 01 00 10 10 11 00 → t aus.



$k = 1$ $L = 3$ *) Zustandsnummer:
 $n = 2$ $r = 1/2$ 1. Bit rechts
 $b = 3$ Startbelegung: 0 0 0 2. Bit links

Bild 6-2: Standardbeispiel für einen Faltungs-Encoder

Darstellungen des Encoders

Zunächst einmal kann der Encoder aus Bild 6-2 in Form eines **Codebaums** (Bild 6.1-1) dargestellt werden.

Ist das Datenbit eine 0, wird nach oben gegangen, ist es eine 1 wird nach unten gegangen. Die Datenbits sind jeweils unter, die auszugebenden Codebits sind über dem Ast angegeben. Eine bestimmte Bitfolge führt auf genau einen Pfad durch den Baum. Der Baum wächst exponentiell mit dem Takt.

Die zweite Darstellung des Encoders ist sein **Zustandsdiagramm**: Es gibt 2^{b-1} Zustände, die durch den Inhalt der $b-1$ rechts stehenden Schieberegister-Zellen bestimmt sind. Die Zustandsnummer ergibt sich als Binärzahl aus dem von rechts nach links gelesenen Inhalt dieser $b-1$ Zellen. Der Inhalt der links stehenden Schieberegister-Zelle (das ist das aktuelle Datenbit) bestimmt den

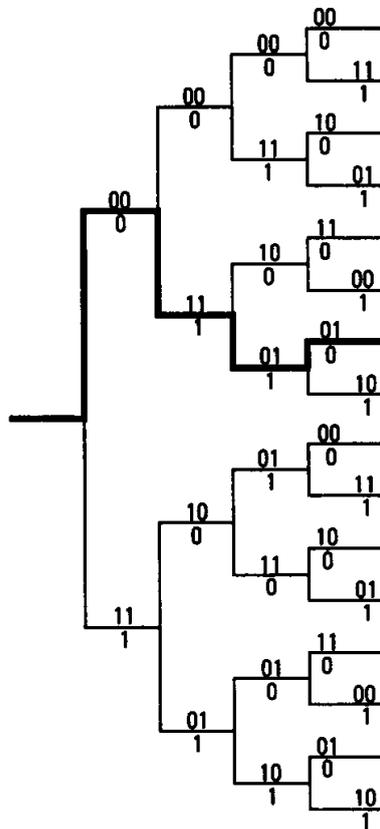


Bild 6.1-1: Codebaum für den Encoder von Bild 6-2

Übergang zum nächsten Zustand. Datenbits und Codebits sind an den Übergangspfeilen des Zustandsdiagramms angegeben, wobei die Codebits hier und in den folgenden Bildern in ihrer „natürlichen“ Reihenfolge (1. Bit links, 2. Bit rechts) notiert sind (Bild 6.1-2).

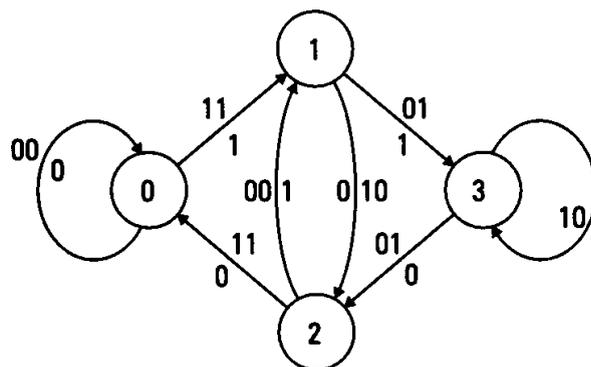


Bild 6.1-2: Zustandsdiagramm für den Encoder von Bild 6-2

Eine Kombination von Codebaum und Zustandsdiagramm stellt das **Trellisdiagramm** (Bild 6.1-3) dar:

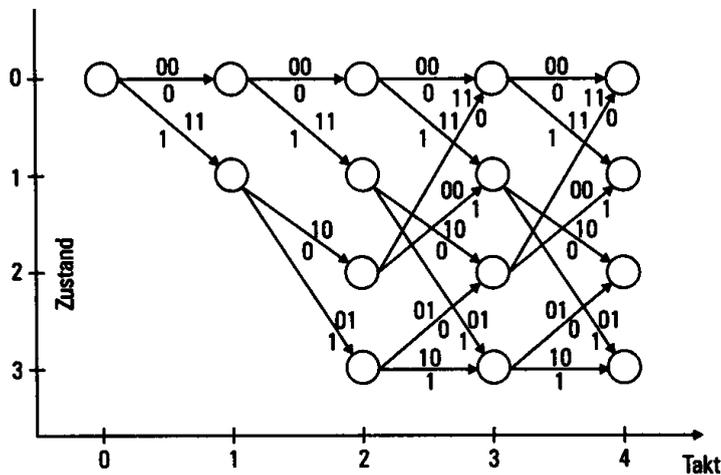


Bild 6.1-3: Trellisdiagramm für den Encoder von Bild 6-2

Darin werden taktweise die 2^{b-1} Zustände und die Übergangspfeile zwischen diesen dargestellt. Ist das nächste Datenbit eine 0 wird der obere, ist es eine 1 der untere Pfeil, der aus dem aktuellen Zustand herausführt, zum Übergang in den nächsten Zustand genutzt. Auch hier können an den Pfeilen sowohl das Datenbit als auch die auszugebenden Codebits abgelesen werden.

Decoder

Während der Block-Decoder n Codebits in k Datenbits zurückverwandelt, ist die Lage beim Faltungs-Decoder etwas komplizierter, da aufgrund des Encodierverfahrens zusätzlich zum aktuellen Datenbit vorhergehende Datenbits Einfluß auf die auszugebenden Codebits haben. Empfängerseitig muß also zu einer vom Demodulator an den Decoder abgegebenen Codebitfolge \vec{y} (Empfangsbitfolge) die Sendebitfolge gefunden werden, die höchstwahrscheinlich gesendet wurde. Die Anzahl der möglichen codierten Sendebitfolgen \vec{x} wächst allerdings exponentiell mit der Zeit (Codebaum, Bild 6.1-1). Wir nehmen für die folgende Betrachtung an, daß Sendebitfolge und Empfangsbitfolge dieselbe endliche Länge N haben. Die Entscheidung kann entweder aus Sicht des Empfängers oder aus Sicht des Senders getroffen werden:

Sicht des Empfängers: Die Entscheidung fällt für die Sendebitfolge \vec{x}' , die nach Empfang der Empfangsbitfolge die höchste Wahrscheinlichkeit hat.

$$P(\vec{x}'|\vec{y}) = \max_{\vec{x}} P(\vec{x}|\vec{y}).$$

Die Entscheidung fällt also nach dem maximum a posteriori (MAP-) Kriterium. Der Decoder wird als **MAP-Decoder** bezeichnet.

Sicht des Senders: Die Entscheidung fällt nach dem Maximum-Likelihood-Verfahren. D.h. für die gegebene Empfangsbitfolge \vec{y} wird diejenige Sendebitfolge \vec{x}' bestimmt, für die die bedingte Dichte $f(\vec{y}|\vec{x}')$ maximal wird:

$$f(\vec{y}|\vec{x}') = \max_{\vec{x}} f(\vec{y}|\vec{x}).$$

Der Decoder heißt **ML-Decoder**.

Im allgemeinen unterscheiden sich MAP- und ML-Decoder. Nimmt man aber an, daß alle möglichen **Sendebitfolgen gleichwahrscheinlich** sind (was bei vernünftiger Quellencodierung zumindest näherungsweise gilt), folgt über die Formel von Bayes

$$P(\vec{x}|\vec{y}) = \frac{f(\vec{y}|\vec{x}) \cdot P(\vec{x})}{f(\vec{y})}.$$

Da $P(\vec{x})$ eine Konstante und $f(\vec{y})$ unabhängig von \vec{x} ist, sind in diesem Fall **MAP- und ML-Decoder identisch**.

Liefert der Demodulator an den Decoder Bitfolgen, arbeitet der Decoder mit **Hard-Decision**. Es bietet sich in diesem Fall an, die Entscheidung über den Hammingabstand herbeizuführen. Der Abstand zwischen der Sendebitfolge \vec{x} und der am Demodulatorausgang vorliegenden Empfangsbitfolge \vec{y} (beide haben die Länge N) ist bei m Bitfehlern einfach $d(\vec{x}, \vec{y}) = m$. Die Entscheidung nach dem minimalen Hammingabstand ist der Entscheidung nach dem ML-Verfahren gleich: Für m Bitfehler in einer Bitfolge der Länge N gilt nämlich unter der Annahme eines symmetrischen Binärkanals

$$P(\vec{y}|\vec{x}) = p_b^m (1 - p_b)^{N-m},$$

wobei p_b die Bitfehlerwahrscheinlichkeit ist. Der Logarithmus ist monoton nicht fallend, also kann auch

$$\begin{aligned} \ln P(\vec{y}|\vec{x}) &= m \ln p_b + (N - m) \ln(1 - p_b) \\ &= m \ln \frac{p_b}{1 - p_b} + N \ln(1 - p_b) \end{aligned}$$

maximiert werden. Für $p_b < 0,5$ (was sicher eine sinnvolle Annahme ist), sind beide Summanden auf der rechten Seite < 0 und, da N eine Konstante ist, wird der Ausdruck für minimales m maximal.

Wird die Übertragung durch additives weißes Gaußsches Rauschen der Rauschleistungsdichte N_0 gestört, ist die Verteilungsfunktion der Empfangsbits y_n zunächst durch

$$f(y_n|x_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi N_0}} \exp \left\{ -\frac{|y_n - x_n|^2}{2N_0} \right\} \quad \text{für minimales } m \text{ maximal.}$$

gegeben. D.h. der Demodulator muß an dieser Stelle noch nicht unbedingt „hart“ auf Bits entscheiden: Er kann dem Decoder die Möglichkeit zur **Soft-Decision** geben. Werden die Bits nämlich (wie im symmetrischen Binärkanal) stochastisch unabhängig übertragen, gilt

$$f(\vec{y}|\vec{x}) = \prod_{n=1}^N f(y_n|x_n)$$

und für die Likelihoodfunktion ergibt sich hier

$$\begin{aligned}\ln f(\vec{y}|\vec{x}) &= \sum_{n=1}^N \ln f(y_n|x_n) \\ &= \sum_{n=1}^N \left[-\frac{1}{2} \ln(2\pi N_0) - \frac{1}{2N_0} |y_n - x_n|^2 \right] \\ &= -\frac{1}{2N_0} \sum_{n=1}^N |y_n - x_n|^2 + \text{const.}\end{aligned}$$

Der ML-Decoder entscheidet also für die Sendebitfolge \vec{x} , die der Empfangsbitfolge \vec{y} nach dem Euklid'schen Abstand am nächsten kommt. Gegenüber Hard-Decision kann man bei Soft-Decision mit einem um ca. 2,5 dB höheren Codegewinn rechnen.

Der Viterbi-Algorithmus

Faltungs-Decoder, die nach dem sequentiellen ML-Prinzip arbeiten, müssen also nur die Hamming- (Hard-Decision) oder die Euklid'schen Abstände (Soft-Decision) der Empfangsbitfolge zu allen möglichen Sendebitfolgen bestimmen und unter diesen Abständen den minimalen identifizieren. Für große Folgenlängen N ist das hier beschriebene Vorgehen nicht möglich, da die Anzahl der Vergleichspfade exponentiell mit N wächst.

So waren Faltungscodes praktisch nicht einsetzbar, bis 1967 Andrew J. Viterbi einen Algorithmus veröffentlichte, mit dem in jedem Takt nicht mehr 2^N sondern nur noch 2^{L-1} (L ist die Einflußlänge des Encoders) Vergleiche ausgeführt werden müssen.

Wir studieren den **Viterbi-Algorithmus** wieder an dem in Bild 6-2 dargestellten Beispiel eines Encoders. Zu diesem Encoder gehört das in Bild 6.1-3 angegebene Trellisdiagramm, in dem auffällt, daß ab dem dritten Takt in jeden Zustand jeweils zwei Pfade münden.

Der Einfachheit halber befassen wir uns zunächst mit der Hard-Decision-Decodierung. Der Viterbi-Algorithmus läßt sich einfach (s.u.) auf die Soft-Decision-Decodierung erweitern.

Kehren wir zu Bild 6.1-3 zurück und schreiben in die Knoten des Trellis zunächst bis zum zweiten Takt den Hammingabstand zwischen Empfangsbit- und (möglicher) Sendebitfolge. Ab dem dritten Takt münden in jeden Zustand zwei Pfade, von denen wir aber nur denjenigen weiterverfolgen, der gegenüber der Empfangsbitfolge den kleineren Hammingabstand hat. Zu diesem Vorgehen müssen zunächst zwei Bemerkungen gemacht werden:

1. Der Pfad, der beim Einmünden in einen Zustand gegenüber der Empfangsbitfolge den größeren Hamming-Abstand hat, wird in der Folge nie eine Chance haben, Teil des optimalen Decodier-Pfads zu werden, da der Hamming-Abstand eine mit dem Takt monoton nichtfallende Funktion ist.
2. Besitzen die in einem Zustand einlaufenden Pfade denselben Hammingabstand zur Empfangsbitfolge, wird die Entscheidung für einen der beiden durch das Los getroffen (oder beide Pfade werden weiterverfolgt).

Bild 6.3-1(a) zeigt das aus der Encodierung der Datenfolge 0 1 1 0 1 bei Start des Encoders (Bild 6-2) im Nullzustand sich am Decoder nach „Ausdünnung“ durch den Viterbi-Algorithmus ergebende Trellisdiagramm, wenn kein Übertragungsfehler aufgetreten ist. Die Sendebitfolge 0 0 1 1 0 1 0 1 0 0 ist dann identisch mit der oben im Bild angegebenen Empfangsbitfolge. Bild 6.3-1(b) zeigt das Vorgehen bei der Decodierung, wenn einfach vom fünften Takt aus der Pfad mit dem minimalen Hamming-Abstand bis zum nullten Takt zurückverfolgt wird. Die Bilder 6.3-1(c) und 6.3-1(d) zeigen das Vorgehen, wenn das erste und das fünfte Bit der Sendebitfolge falsch empfangen wurden. Der Decoder korrigiert in diesem Fall die Übertragungsfehler.

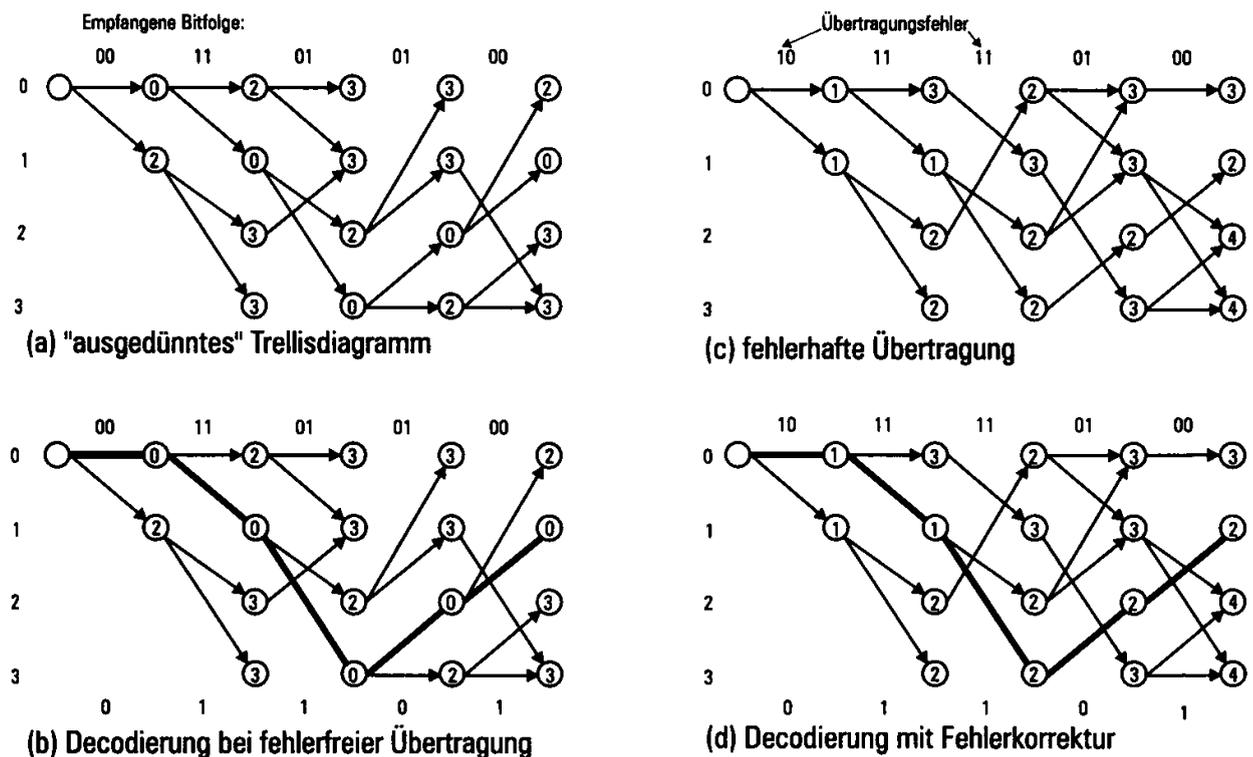


Bild 6.3-1: Viterbi-Algorithmus für ein Encodierungsbeispiel nach Bild 6-2

Der Faltungs-Encoder erzeugt im Prinzip eine beliebig lange Sendebitfolge. Der unmotivierte Abbruch des Decodierverfahrens, so wie wir es in unserem

Beispiel durchgeführt haben, zieht eine erhöhte Fehleranfälligkeit am Ende der Empfangsfolge nach sich. In der Praxis wird daher häufig so vorgegangen, daß durch das Einfügen von Nullen in den senderseitigen Datenstrom nach einer festen Anzahl von Informationsbits der Encoder in den Nullzustand gebracht wird. Von dort aus wird dann auch die Encodierung der nächsten Datenbitfolge begonnen. Für das Trellisdiagramm bedeutet dies, daß (wenn am Ende kein Fehler auftritt) alle Pfade im Nullzustand enden. Für unser Beispiel ist das in Bild 6.3-2 dargestellt.

Für den Fall der Soft-Decision-Decodierung werden statt der Bits die Matched-Filterausgänge \vec{y} direkt an den Decoder gegeben, der dann statt des Hamming-Abstands den Euklid'schen Abstand auswertet.

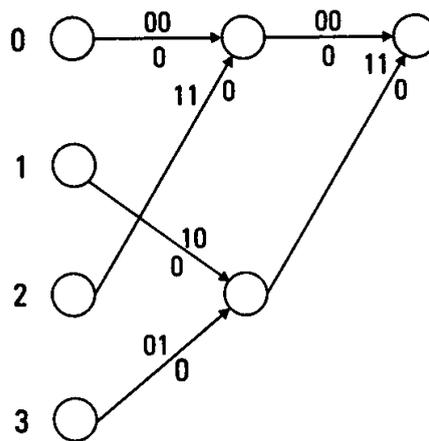


Bild 6.3-2: Auslaufen des Encoders (bzw. des Trellisdiagramms) in den Nullzustand

Korrektureigenschaften von Faltungscodes

Die Leistungsfähigkeit eines Faltungscodes bei gleichverteilten Bitfehlern hängt - wie bei den Blockcodes (siehe (5.2-8)) - von der Minimaldistanz zwischen Empfangsbitfolge und Sendebitfolge ab. Der Zusammenhang ist aber für Faltungscodes nicht so einfach wie für Blockcodes, insbesondere kann die Restfehlerwahrscheinlichkeit nicht mehr wie in (5.1-2) über die Binomialverteilung abgeschätzt werden. Die Restfehlerwahrscheinlichkeit hängt bei Faltungscodes nämlich nicht nur von der Anzahl sondern auch von der Position der Fehler im Bitstrom ab.

Die Bilder 6.4-1(a) bis 6.4-1(d) geben die Bitfehlerwahrscheinlichkeiten am Decoderausgang für die besten bekannten Faltungscodes mit den Raten $1/2$ und $1/3$ sowohl für Hard- als auch für Soft-Decision-Decodierung wieder. Dabei wurden BPSK-Modulation (vergleiche Kapitel 7) und ein AWGN- (Additive White Gaussian Noise) Kanal zugrundegelegt. Der zusätzliche Co-

diergewinn durch Soft-Decision-Decodierung liegt bei ca. 2,5 dB. Die Leistungsfähigkeit von Faltungscodes steigt mit wachsender Einflußlänge L des Encoders.

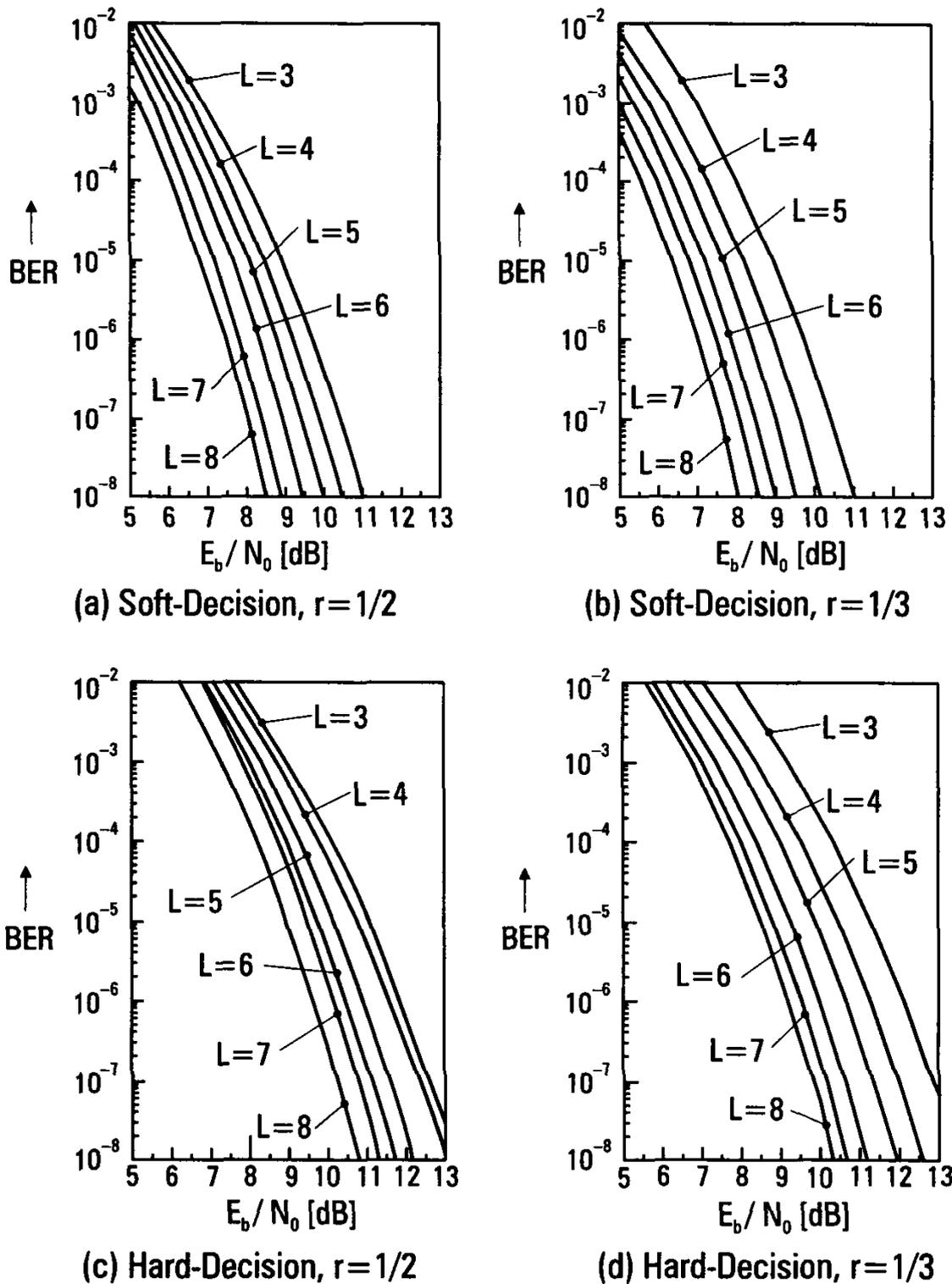


Bild 6.4-1: Leistungsfähigkeit von Faltungscodes, BPSK-Modulation, AWGN-Kanal, Bitfehlerraten am Decoderausgang