
1 Einführung

Ein digitales Kommunikationssystem, das sicherlich viele Leser aus eigener Erfahrung kennen, zeigt Bild 1-1: Ein Computer ist über ein Modem mit einem Kommunikationsnetz verbunden und tauscht Daten mit einem anderen Computer aus. Damit dieses System seine Aufgabe erfüllen kann, wird eine Vielzahl von Verfahren und Technologien eingesetzt. Die wichtigste Funktion ist zunächst die Signalübertragung zwischen zwei Punkten. In einem digitalen Übertragungssystem repräsentieren die Signale binäre Symbole oder Bits. Die digitale Übertragungstechnik ist daher die Grundlage eines digitalen Kommunikationssystems, weil sie die Funktionen zur Bitübertragung bereitstellt. In unserem Beispiel kann die Kommunikation über viele verschiedene Übertragungssysteme erfolgen. Zwischen Modem und Kommunikationsnetz kommt je nach Anschlussart (z. B. Modem zur Einwahl in das Fernsprechnet, Kabelmodem zur Datenübertragung über das Kabelfernsehnetz usw.) eine Reihe von Übertragungsverfahren zum Einsatz. Innerhalb des Netzes, im so genannten Kernnetz oder Backbone, erfolgt die Übertragung in der Regel über Lichtwellenleiter, Richtfunk oder Satellit.

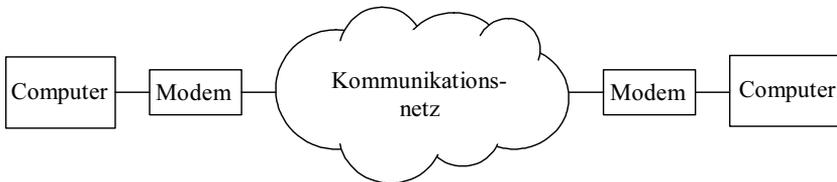


Bild 1-1: Ein digitales Kommunikationssystem

Das Kommunikationsnetz besteht neben Übertragungssystemen aus Vermittlungseinrichtungen. Letztere haben die Aufgabe, die Daten zum gewünschten Kommunikationspartner weiterzuleiten. Dabei gibt es zwei grundlegende Funktionsprinzipien: die Leitungsvermittlung und die Paketvermittlung. Die Leitungsvermittlung liegt unseren heutigen Fernsprechnetzen zu Grunde, während die Paketvermittlung die Basis des Internet ist.

Die gemeinsame Behandlung der Übertragungstechnik und der digitalen Netze soll es dem Leser ermöglichen, ein grundlegendes Verständnis für beide Themengebiete zu entwickeln und die wechselseitigen Abhängigkeiten zu erkennen. Dies wird erleichtert durch eine einheitliche Verwendung von Begriffen und Definitionen. Beispiele dienen außer der exemplarischen Vertiefung auch dazu, auf ausgewählte aktuelle Anwendungen und Entwicklungen hinzuweisen. Die Entwicklung, die Planung und der Betrieb von Kommunikationssystemen sind ohne den Einsatz von leistungsfähigen Messgeräten, Entwicklungs- und Simulationswerkzeugen nicht denkbar. Eine Arbeit mit diesen Werkzeugen setzt ein tiefgehendes Verständnis der Funktionsweise des Kommunikationssystems voraus. Die Kenntnis der Grundlagen ermöglicht das schnelle Einarbeiten in neue Verfahren, Arbeitsgebiete oder Werkzeuge.

Die folgenden Abschnitte geben einen ersten Überblick über die Themenschwerpunkte des vorliegenden Buches. Dies ist neben der digitalen Übertragungstechnik und den Kommunikationsnetzen auch die digitale Signalverarbeitung, die bei der Realisierung eines digitalen Kommunikationssystems eine wichtige Rolle spielt.

1.1 Digitale Übertragungssysteme

Ein allgemeines Modell eines digitalen Übertragungssystems zeigt Bild 1-2. Grundlegende Funktionsblöcke sind die Quellencodierung, die Kanalcodierung und vom spezifischen Übertragungsverfahren abhängige Funktionen wie die Modulation. Im Sender finden wir die Quellen- und Kanalcodierung sowie die Modulation. Der Empfänger besteht aus den entsprechenden Funktionen der Quellen- und Kanaldecodierung und der Demodulation. Sender und Empfänger sind über den Übertragungskanal – oder kurz Kanal – verbunden.

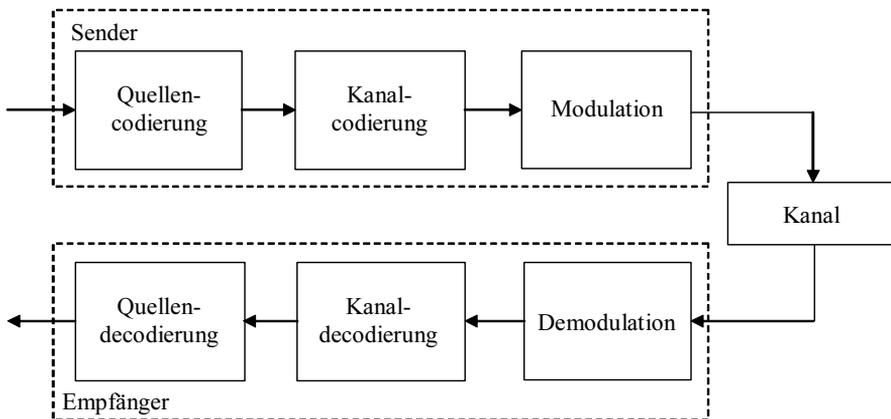


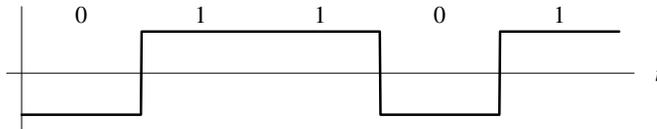
Bild 1-2: Elemente eines digitalen Übertragungssystems

Betrachten wir das System von "innen" heraus und beginnen mit dem Kanal. Der Kanal ist das physikalische Übertragungsmedium zwischen Sender und Empfänger. Dabei kann es sich z. B. um eine terrestrische oder satellitengebundene Funkstrecke, ein Telefonkabel, einen Lichtwellenleiter oder auch um ein Speichermedium wie die Compact Disc (CD) handeln. Der Kanal dämpft und verzerrt das vom Sender ausgehende Nutzsignal und es überlagern sich Störungen in Form eines Rauschsignals. Das Verhältnis der Leistung des Nutzsignals zur Leistung des Rauschsignals am Empfängereingang bezeichnet man als Signal-Rausch-Verhältnis. Eine weitere wesentliche Eigenschaft des Kanals ist dessen Bandbreite, d. h. die Größe des für die Übertragung nutzbaren Frequenzbereichs. Das Signal-Rausch-Verhältnis und die Bandbreite bestimmen die erzielbare Übertragungsrate. Diese wird meist in Bit pro Sekunde (bit/s) angegeben.

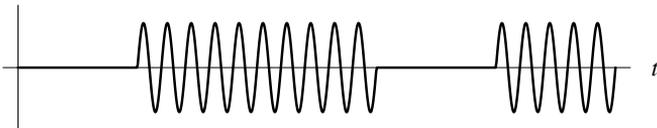
Der Block Modulation bildet die zu übertragende binäre Symbolfolge auf für den Kanal geeignete Signale ab. Modulation und Demodulation können auch Funktionen zur spektralen Formung des gesendeten Signals bzw. zur Entzerrung des Signals im Empfänger oder im Falle einer optischen Übertragung die elektrisch-optische Wandlung des Signals beinhalten. Der Begriff des Modems leitet sich aus der Modulation-Demodulation ab.

Bild 1-3 zeigt oben ein Basisbandsignal für die Bitfolge (0, 1, 1, 0, 1). Ein Basisbandsignal benötigt einen Übertragungskanal, dessen nutzbarer Frequenzbereich bis zu sehr niedrigen Frequenzen reicht. Wird das Basisbandsignal auf ein sinusförmiges Trägersignal aufmoduliert, so wird es zu höheren Frequenzen hin verschoben. Je nach Modulationsverfahren erhält man eines der unteren Signale in Bild 1-3. Dort sind drei grundlegende digitale Modulationsverfahren gezeigt. Bei der Amplitudenumtastung (Amplitude-Shift Keying, ASK) ändert sich die Amplitude in Abhängigkeit der zu übertragenden Symbolfolge. Bei der Phasenumtastung (Phase-Shift Keying, PSK) ändert sich entsprechend die Phase und bei der Frequenzumtastung (Frequency-Shift Keying, FSK) die Frequenz.

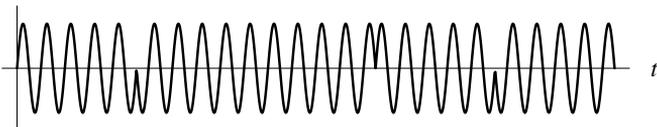
Basisband



ASK



PSK



FSK

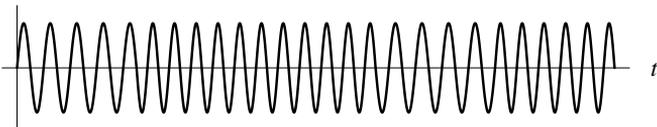


Bild 1-3: Grundlegende Modulationsverfahren

Bei den oben genannten Modulationsverfahren spricht man auch von Einträgerverfahren, da die zu übertragende Bitfolge auf ein Trägersignal aufmoduliert wird. Durch die Verfügbarkeit immer leistungsfähigerer digitaler Signalprozessoren können heute auch Mehrträgerverfahren mit bis zu mehreren tausend Unterträgern realisiert werden. In der Form von OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplex) werden Mehrträgerverfahren z. B. beim digitalen terrestrischen Fernsehen (Digital Video Broadcasting, DVB) und bei drahtlosen lokalen Rechnernetzen (Wireless Local Area Network, WLAN) eingesetzt.

Ein wichtiges Leistungskriterium eines Modulationsverfahrens ist die Bitfehlerwahrscheinlichkeit. Grundsätzlich kommt es durch das dem Nutzsignal überlagerte Rauschen bei der Übertragung zu Bitfehlern. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bit verfälscht wird, ist umso größer, je kleiner das Signal-Rausch-Verhältnis ist. Bild 1-4 zeigt einen typischen Verlauf der Bitfehlerwahrscheinlichkeit als Funktion des Signal-Rausch-Verhältnisses.

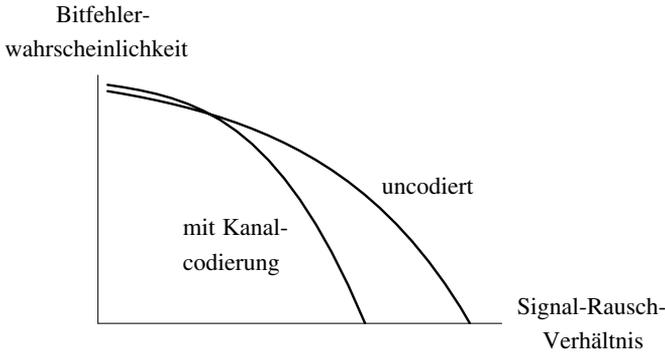


Bild 1-4: Bitfehlerwahrscheinlichkeit und Kanalcodierung

Mit Hilfe der Kanalcodierung lassen sich nun Bitfehler, die durch Störungen und auch durch Verzerrungen im Übertragungskanal verursacht werden, korrigieren. Dies geschieht, indem sendeseitig eine Zusatzinformation in Form von Redundanzbits zu der zu übertragenden Information hinzugefügt wird. Durch Auswertung der Redundanzinformation wird der Kanaldecodierer des Empfängers in die Lage versetzt, Bitfehler korrigieren zu können. Bild 1-4 zeigt die Verbesserung, die mit einer Kanalcodierung erzielt wird. Die Verbesserung drückt sich dadurch aus, dass bei gleicher Bitfehlerwahrscheinlichkeit mit Kanalcodierung ein geringeres Signal-Rausch-Verhältnis erforderlich ist als bei uncodierter Übertragung. Der steile Verlauf bei einem großen Signal-Rausch-Verhältnis ist typisch für digitale Übertragungssysteme. Er weist darauf hin, dass bei zunehmenden Störungen die Bitfehlerwahrscheinlichkeit stark ansteigt und die Übertragungsqualität schlagartig abnimmt. Wie man allerdings erkennt, schneiden sich die Kurven für codierte und uncodierte Übertragung. Links vom Schnittpunkt, also bei einem sehr kleinen Signal-Rausch-Verhältnis, ist die Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei codierter Übertragung sogar größer als bei uncodierter Übertragung. Dies ist auf die zusätzlich zu übertragende Redundanzinformation zurückzuführen.

Am Eingang unseres Übertragungssystems in Bild 1-2 finden wir die Quellencodierung. Aufgabe der Quellencodierung ist es, die zu übertragende Nachricht mit einer möglichst geringen Anzahl von Bits darzustellen. Dazu wird die in der Nachricht enthaltene redundante Information minimiert. Die Trennung von Quellen- und Kanalcodierung geht auf die grundlegenden Arbeiten von C. Shannon aus dem Jahr 1948 zur Informationstheorie zurück.

1.2 Digitale Signalverarbeitung

Viele der in digitalen Übertragungssystemen verwendeten Funktionen im Bereich der Modulation/Demodulation und der Kanal- und Quellencodierung bzw. Decodierung werden in der Regel digital realisiert. Ein allgemeines digitales Signalverarbeitungssystem ist in Bild 1-5 gezeigt.

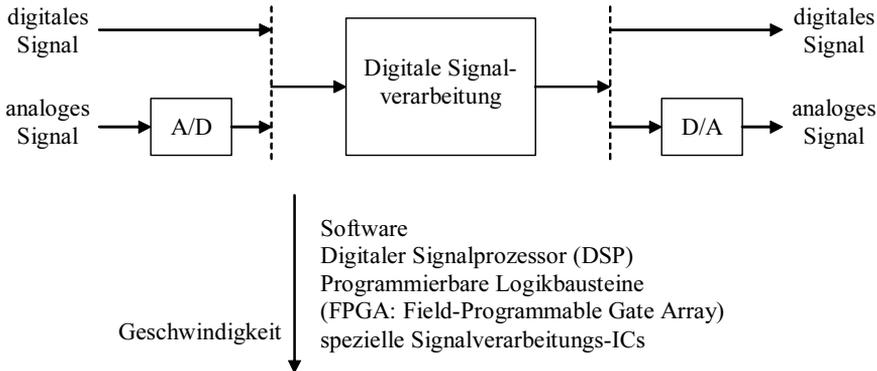


Bild 1-5: System zur digitalen Signalverarbeitung

Ein- und Ausgangssignale eines solchen Systems sind digitale, zeitdiskrete Signale. Ist ein Übergang von der analogen in die zeitdiskrete Welt erforderlich, so erfolgt dieser mit Hilfe eines Analog-Digital(A/D)- bzw. Digital-Analog(D/A)-Wandlers. Einen solchen Übergang finden wir beispielsweise am Empfängereingang des digitalen Übertragungssystems in Bild 1-2. Nach einer analogen Vorverarbeitung des Eingangssignals und der A/D-Wandlung erfolgt die weitere Signalverarbeitung (Demodulation und Decodierung) im digitalen Bereich.

Die grundlegenden Funktionen der A/D-Wandlung sind die Abtastung und die Quantisierung des analogen Signals (Bild 1-6). Durch die Abtastung des analogen Signals $x(t)$ mit der Abtastrate f_A erhalten wir das zeitdiskrete Signal $x(n)$. Die Punkte in der Darstellung von $x(n)$ markieren die äquidistanten Abtastwerte im Abstand $T_A = 1/f_A$. Unter Quantisierung versteht man die Abbildung der Abtastwerte auf eine endliche Anzahl von diskreten Werten, die beispielsweise mit einem digitalen Signalprozessor verarbeitet werden können.

In der Kommunikationstechnik haben wir es in der Regel mit einer Echtzeitverarbeitung der Daten zu tun, bei der die Signalverarbeitungsfunktionen in einer fest begrenzten Zeit ausgeführt werden müssen. Während man im Audibereich mit Abtastraten von einigen 10 kHz arbeitet, findet man in digitalen Übertragungssystemen Abtastraten bis zu 100 MHz und darüber hinaus. Beispielsweise muss bei der Filterung eines Audiosignals, das mit 44,1 kHz abgetastet wurde (diese Abtastrate wird bei der Audio-CD verwendet), die digitale Filterfunktion alle $1/44,1 \text{ kHz} = 22,67 \mu\text{s}$ einen neuen Ausgangswert berechnen. Bei einer Abtastung mit 100 MHz stehen dagegen nur 10 ns für die Verarbeitung eines Abtastwertes zur Verfügung.

Für die Realisierung der digitalen Signalverarbeitungsfunktionen steht daher eine Reihe von Optionen zur Verfügung, die sich in der Verarbeitungsgeschwindigkeit unterscheiden wie in Bild 1-5 angedeutet. Dabei werden oft auch Kombinationen eingesetzt, beispielsweise eine Vorverarbeitung mit einem programmierbaren Logikbaustein, die mit einer Redu-

zierung der Abtastrate verbunden ist, und eine weitere Verarbeitung mit einem digitalen Signalprozessor.

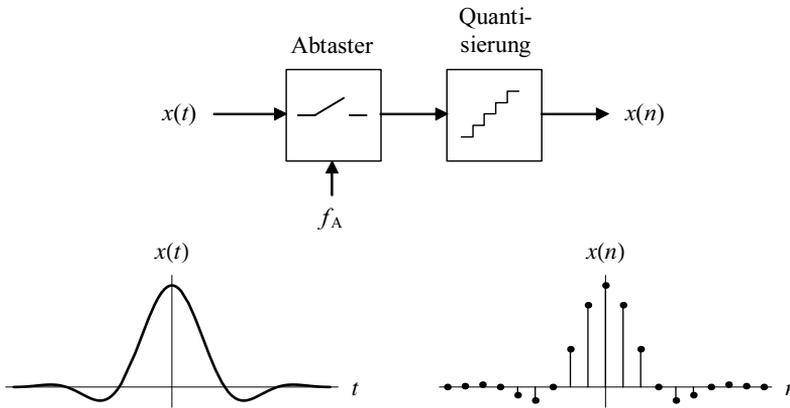


Bild 1-6: Ein zeitdiskretes Signal entsteht durch Abtastung eines analogen Signals

1.3 Digitale Netze

Ein Kommunikationsnetz besteht aus Übertragungssystemen, Vermittlungseinrichtungen und Endgeräten (Bild 1-7). Die Übertragungssysteme im Kernbereich des Netzes bezeichnet man als Transportnetz. Der Teil des Netzes von der letzten Vermittlungseinrichtung bis zum Teilnehmeranschluss wird als Anschluss- oder Teilnehmernetz bezeichnet (die "Last Mile" im englischen Sprachgebrauch). Gateways ermöglichen die Kommunikation zwischen verschiedenen Netzen, beispielsweise zwischen einem Fernsprechnetz und einem Datennetz.

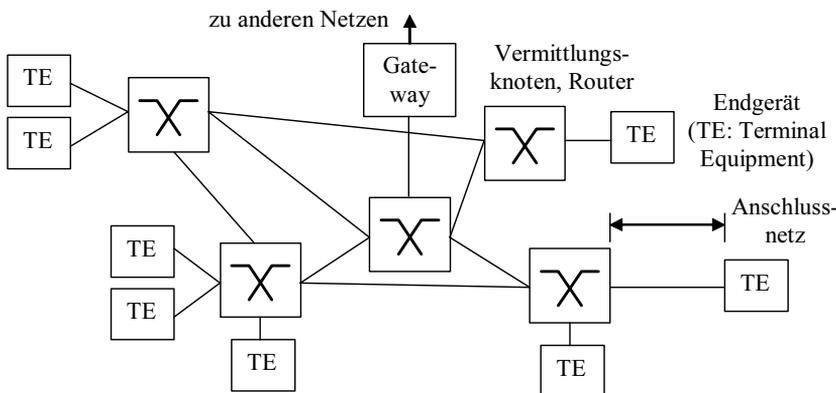


Bild 1-7: Ein Kommunikationsnetz

Die Übertragungssysteme stellen die Funktionen zur Bitübertragung zwischen zwei Punkten bereit. Während man bei einem Übertragungssystem mit einem Sender und einem Empfänger von einer Punkt-zu-Punkt-Übertragung spricht, greifen in vielen Kommunikationssystemen mehrere Sender auf ein gemeinsam genutztes Übertragungsmedium zu (Bild 1-8). So ist z. B. beim Mobilfunk der gemeinsame Übertragungskanal durch den verfügbaren Frequenzbereich innerhalb einer Funkzelle oder bei lokalen Rechnernetzen (IEEE 802.3 Local Area Network, auch als Ethernet bekannt) durch das Koaxial- oder Zweidrahtkabel gegeben. Damit diese Sender sich nicht gegenseitig stören, ist ein Mehrfachzugriffsverfahren erforderlich.

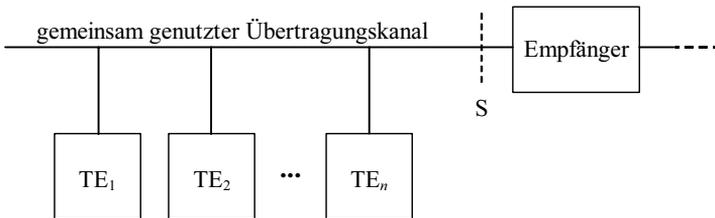


Bild 1-8: Mehrfachzugriff durch Endgeräte TE_1 bis TE_n auf einen Kanal

Zwei weitere Begriffe sind im Zusammenhang mit Kommunikationsnetzen von Bedeutung: Schnittstellen und Protokolle. Eine Schnittstelle, in Bild 1-8 mit S bezeichnet, definiert mechanische Eigenschaften wie z. B. Kabeltyp oder Steckerverbindung, elektrische Eigenschaften wie z. B. Spannungspegel und die Struktur der Signale. Eine Struktur kann in Form eines Übertragungsrahmens gegeben sein, in dem die Bedeutung der einzelnen Bits festgelegt ist (z. B. Bits, die den Rahmenanfang markieren oder dem Fehlerschutz dienen). Protokolle definieren die Datenformate (die Syntax), die die kommunizierenden Geräte austauschen, und deren mögliche Aktionen und Reaktionen (die Semantik). Damit Systeme unterschiedlicher Hersteller miteinander kommunizieren können, müssen Schnittstellen und Protokolle standardisiert werden (siehe Anhang 3).

Die Vermittlungseinrichtungen haben die Aufgabe, zwischen Endgeräten, die miteinander kommunizieren wollen, einen Übertragungsweg bereitzustellen. Man unterscheidet zwischen zwei grundsätzlichen Vermittlungsprinzipien, der Leitungsvermittlung und der Paketvermittlung. Bei der Leitungsvermittlung wird zwischen zwei Endgeräten eine Verbindung mit fester Übertragungskapazität aufgebaut. Nach diesem Prinzip arbeitet das Telefonnetz. Bei der Paketvermittlung werden Datenpakete zwischen den Endgeräten übertragen. Sendet ein Endgerät keine Pakete, so wird auch keine Übertragungskapazität im Netz belegt. Dieses Prinzip liegt dem Internet zu Grunde.

Vermittlungseinrichtungen und Endgeräte sind in der Regel dienstespezifisch, d. h. für das Telefonnetz und das Internet werden jeweils eigene Vermittlungseinrichtungen (im Falle des Internets spricht man von Routern) und Endgeräte benötigt. Das Transportnetz ist dagegen dienstunabhängig. Auch im Bereich der Anschlussnetze versucht man, die vorhandene Infrastruktur (z. B. den Anschlussbereich des Fernsprechnetzes oder das Kabelfernnetz) für möglichst viele Dienste zu nutzen.

Im Bereich der Netze werden zunächst allgemeine Funktions- und Entwurfsprinzipien betrachtet. Dazu gehören Verfahren der zuverlässigen Datenübertragung, d. h. der Schutz gegen Übertragungsfehler, und Grundlagen der Dimensionierung. Ein weiterer Schwerpunkt wird auf die Dienstgüte (Quality of Service, QoS) und das Verkehrsmanagement

gelegt. Dieser Bereich konzentriert sich naturgemäß auf paketvermittelnde Netze, da hier eine Reihe von Maßnahmen erforderlich ist, um Dienste mit unterschiedlichen Qualitätsanforderungen zu übertragen.

Besonders hohe Anforderungen haben in dieser Hinsicht Echtzeiddienste. Ein Beispiel für einen Echtzeiddienst ist die Sprachübertragung. Nach der Abtastung, Quantisierung und Quellencodierung benötigt ein Sprachsignal je nach verwendetem Sprachcodec (Codec: Codierer-Decodierer) eine Bitrate von 6 bis 64 kbit/s. Der Bitstrom wird im Endgerät pakettiert und über das Netz zum Empfänger übertragen (Bild 1-9). Dieser hat die Aufgabe, aus den eingehenden Paketen wieder den sendeseitigen Bitstrom zu gewinnen. Im Netz kommt es nun zu Paketverlusten und die Pakete erfahren unterschiedliche Laufzeiten. Nur solange die Verluste und die Laufzeiten unterhalb bestimmter Grenzen liegen, können sie im Empfänger ausgeglichen werden und der Dienst arbeitet zufrieden stellend.

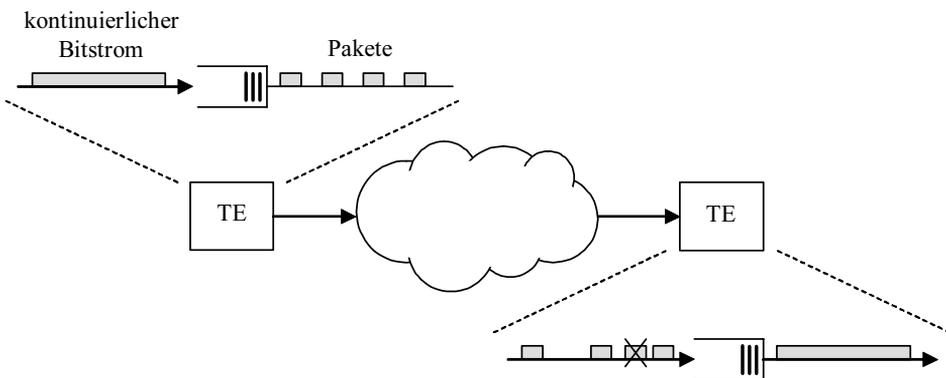


Bild 1-9: Echtzeiddienste und Paketvermittlung

Nach den wichtigsten Prinzipien werden anschließend die technischen Grundlagen des ISDN (Integrated Services Digital Network), von ATM (Asynchronous Transfer Mode) und von IP (Internet Protocol) behandelt. Der Ansatz, die zu Grunde liegenden Prinzipien vorab und unabhängig von spezifischen Netzen zu behandeln, beruht darauf, dass diese Prinzipien in allen Netzen wiederzufinden sind, auch wenn sich deren spezifische Umsetzungen in Bezeichnungen und Details unterscheiden mögen.

Es mag sich hier die Frage stellen, warum ATM heute in einem grundlagenorientierten Buch behandelt werden sollte. Tatsächlich wurden grundlegende Verfahren des Verkehrsmanagements für ATM entwickelt, die gegenwärtig in ähnlicher Form auf das Internet übertragen werden. Mit ATM wurde das Ziel eines diensteintegrierenden Netzes verfolgt, in das die Erfahrungen aus leitungsvermittelnden und paketvermittelnden Netzen eingeflossen sind. Während die Leitungsvermittlung für die Datenübertragung nicht optimal ist, unterstützt die Paketvermittlung Echtzeiddienste (z. B. Sprache und Video) nicht idealer Weise. Das Ziel, beides in einem Netz effizient zu integrieren, führte zu einer beträchtlichen Komplexität des Verkehrsmanagements. Dies war bei ATM so und kann gegenwärtig beim Internet im Zuge der Sprachübertragung (Stichwort "Voice over IP") beobachtet werden. Der erneute Ansatz, ein diensteintegrierendes Netz auf der Basis von IP zu schaffen, wird unter dem Begriff "Next Generation Networks" subsumiert.