6 Informationsübertragung

6.1 Historischer Überblick

Die (digitale) Nachrichtenübertragung war zunächst eine Weitverkehrstechnik (Morsen, Fernschreiber), die von den Normungsgremien der Postverwaltungen beherrscht wurde (damals CCITT, heute ITU; teilweise weitere Normen bei der ISO) mit entsprechend statischem Verhalten. Die Telegraphenleitungen waren vorwiegend auf analoge Sprachübertragung ausgerichtet (300-3600 Hz), so dass Datenübertragung nur darunter im Fernschreibbereich mit 75 bit/s üblich war. Insbesondere konnten unsymmetrische Signale mit Gleichstrom- oder -Spannungskomponenten nicht über größere Strecken übertragen werden, da Transformatoren zwischengeschaltet waren. Durch Einschalten von Induktivitäten in die Leitungen wurden darüber hinaus die hohen Frequenzen zugunsten des Sprachbandes benachteiligt (Pupinisierung). Diese Technik verhinderte bis in die 60er Jahre hinein eine schnelle Datenübertragung auf allgemeinen Telefonleitungen. Hinzu kamen sehr starke technische Restriktionen und prohibitive Preise der staatlichen Monopole.

Mit dem Einsatz von Computern entwickelte sich eine von der Weitverkehrstechnik unabhängige zweite Übertragungstechnik, gewissermaßen vom Kleinen in das Große, die man durchaus als Keimzelle der lokalen Netze ansehen kann (LAN).

Der klassische „Großrechner“ (im Gegensatz zum Taschenrechner oder der Addiermaschine) hatte eine Eingabeeinheit, in Abb. 131 als Kartenleser gekennzeichnet, und eine Ausgabeeinheit, in Abb. 131 als Drucker benannt. Jeweils ein Job oder „Auftrag“ konnte sequentiell von der Maschine bearbeitet werden.

Natürlich hatten Ein- und Ausgabegeräte „Schnittstellen“ zum Computer, diese waren aber von den Bedürfnissen der Rechnerhersteller geprägt, in der Regel proprietär, und nicht mit den CCITT-Schnittstellen der Weitverkehrstechnik kompatibel.

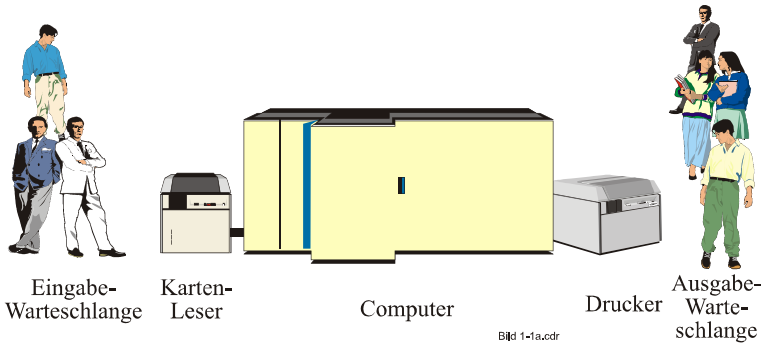

Abbildung 131: „Großrechner“ ohne Datenübertragungseinrichtungen

Mit der Beherrschung nebenläufiger Prozesse in Betriebssystemen setzte sich der Gedanke durch, mehrere Benutzer „gleichzeitig“ rechnen zu lassen. Parallel dazu wurden die Maschinen immer häufiger in Geschäftsprozessen eingesetzt, die eine Quasi-Echtzeitverarbeitung realisieren sollten, d.h. Buchungen wurden nicht mehr auf Lochkarten übertragen und nachts oder am folgenden Tag verrechnet, sondern direkt über die neue Terminaltechnologie in die Datenbank eingetragen. Das führte zu Rechnerstrukturen nach Abb. 132.

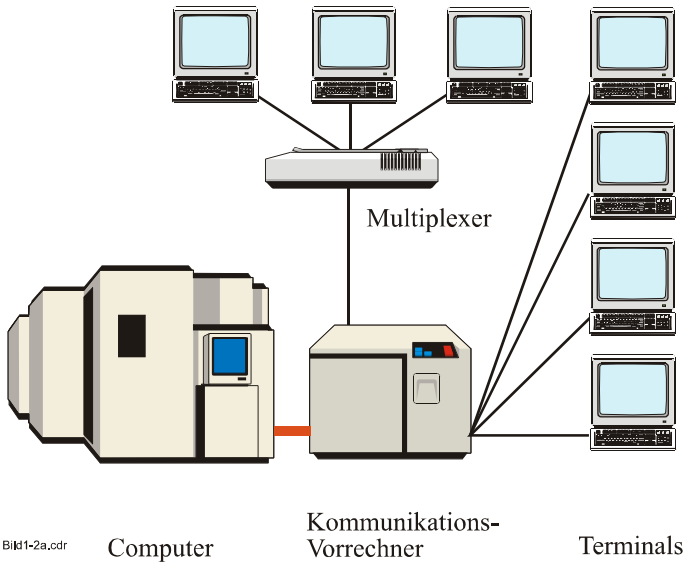

Abbildung 132: Computer mit Terminalnetz

Hierfür wurde ein Dialog-Vorrechner erforderlich, der die Kommunikationsprozesse der Terminals verwaltete und die notwendigen Schnittstellen hierfür bereit hielt. Natürlich kam man auf die Idee, die Terminals nicht nur in unmittelbarer Nachbarschaft des Rechners (10-20 m) aufzustellen, sondern wollte nun auch Terminals in anderen Gebäuden und Filialen betreiben können. Damit wurde man von den öffentlichen Übertragungsmechanismen abhängig und musste seine Schnittstellen an die CCITT-Normen anpassen. Das geschah über Modems und Multiplexer, welche die Datenströme mehrerer Terminals konzentrieren konnten (auf die damals ungeheure Geschwindigkeit von 9600 bit/s). Im Laufe der Entwicklung wurden die proprietären Lösungen gegenüber genormten Geräten (und marktbeherrschenden sog. Industrienormen) immer unwirtschaftlicher, so dass heute die Geräte überwiegend mit Standard-Schnittstellen versehen sind und von verschiedenen Anbietern bezogen werden können. Es ist heute für Hersteller kostengünstiger, die Fertigungstiefe zu reduzieren und bei Zulieferern einzukaufen.

6.2 Strukturierung der Übertragungstechniken

6.2.1 Physikalische und logische Strukturen

Wir wollen uns nun zunächst mit Strukturen von Übertragungswegen beschäftigen. Dazu wollen wir physikalische und logische Strukturen unterscheiden. Abb. 133 zeigt drei Klassen von physikalischen Verbindungen.

Die einfachste ist die Punkt-zu-Punkt-Verbindung, bei der zwei Geräte miteinander verbunden werden (Abb. 133a).

Die vollkommene Verbindungslösung liefert ein sog. Kreuzschienenverteiler (cross bar switch) nach Abb. 133b, mit dem n Gerätepaare gleichzeitig verbunden werden können, was allerdings sehr aufwendig ist (Komplexität $O = n^2$). Daher ist er nur bei einer kleinen Menge von Kommunikationspartnern einsetzbar.

Ein häufiger Anwendungsfall sind die sog. Wählleitungen nach Abb. 133c, bei denen n Kommunikationspaaren m Leitungen zur Verfügung stehen.

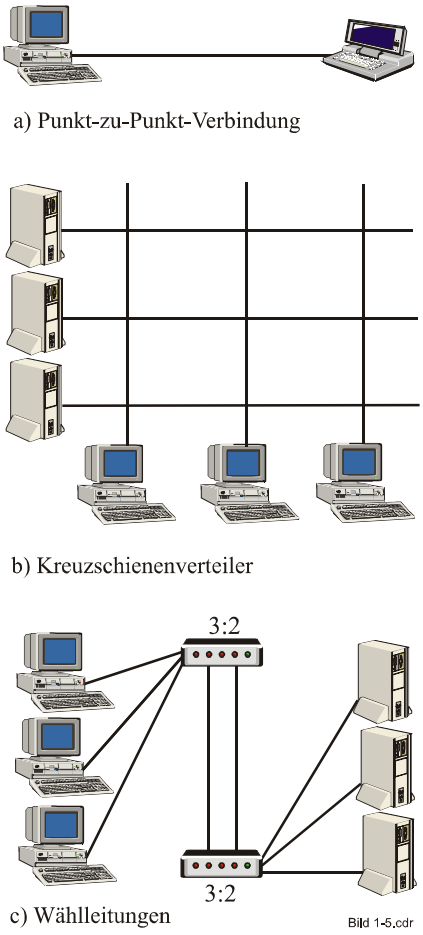

Abbildung 133: Physikalische Verbindungen

Neben den physikalischen Verbindungen gibt es sog. logische Verbindungen, bei denen bereits bestimmte Verhaltensmuster bei der Nutzung vorausgesetzt werden, die also nur in Zusammenhang mit einem Regelsatz verwendbar sind. Abb. 134 zeigt verschiedene derartige Strukturen.

Die Bus-Struktur nach Abb. 134a verbindet mehrere Geräte miteinander, die sich durch ihre Namen oder Adressen voneinander unterscheiden. Ein Sender legt Daten auf den Bus, die von allen Teilnehmern gelesen werden können, jedoch nur der Empfänger, dessen eigene Adresse mit der Zieladresse der Sendung übereinstimmt, kopiert die Information in seinen Puffer und verarbeitet sie. Ein spezielles Protokoll regelt den schreibenden Zugriff auf den Bus.

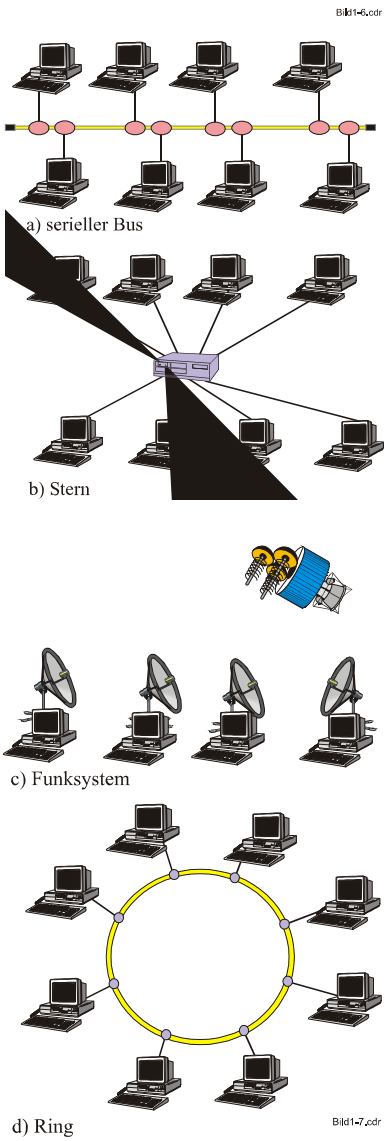

Abbildung 134: Logische Verbindungen

Die Daten können bitseriell auf dem Bus transportiert werden, z.B. beim inzwischen klassischen Baseband-Ethernet, dann spricht man von einem seriellen Bus, oder parallel wie etwa beim SCSI-Bus.

Macht man die Zuleitungen zum Bus sehr lang und den Bus sehr kurz, so kommt man zu einer Sternstruktur nach Abb. 134b. Derartige konzentrierte Sternknoten werden auch Hub (Konzentrationspunkt) genannt. Ähnlich arbeiten Funknetze nach Abb. 134c. Hier ist der Satellit der Hub. Modernere Funknetze mit *Access Points* statt des Satelliten und Reichweiten von 30 - 300 m haben dieselbe Struktur.

Schließlich haben sich noch Ringstrukturen nach Abb. 134d bewährt. Auch hier muss durch ein Protokoll sichergestellt werden, dass die Daten korrekt zwischen Sender und Empfänger transportiert werden.

6.2.2 Protokollhierarchien

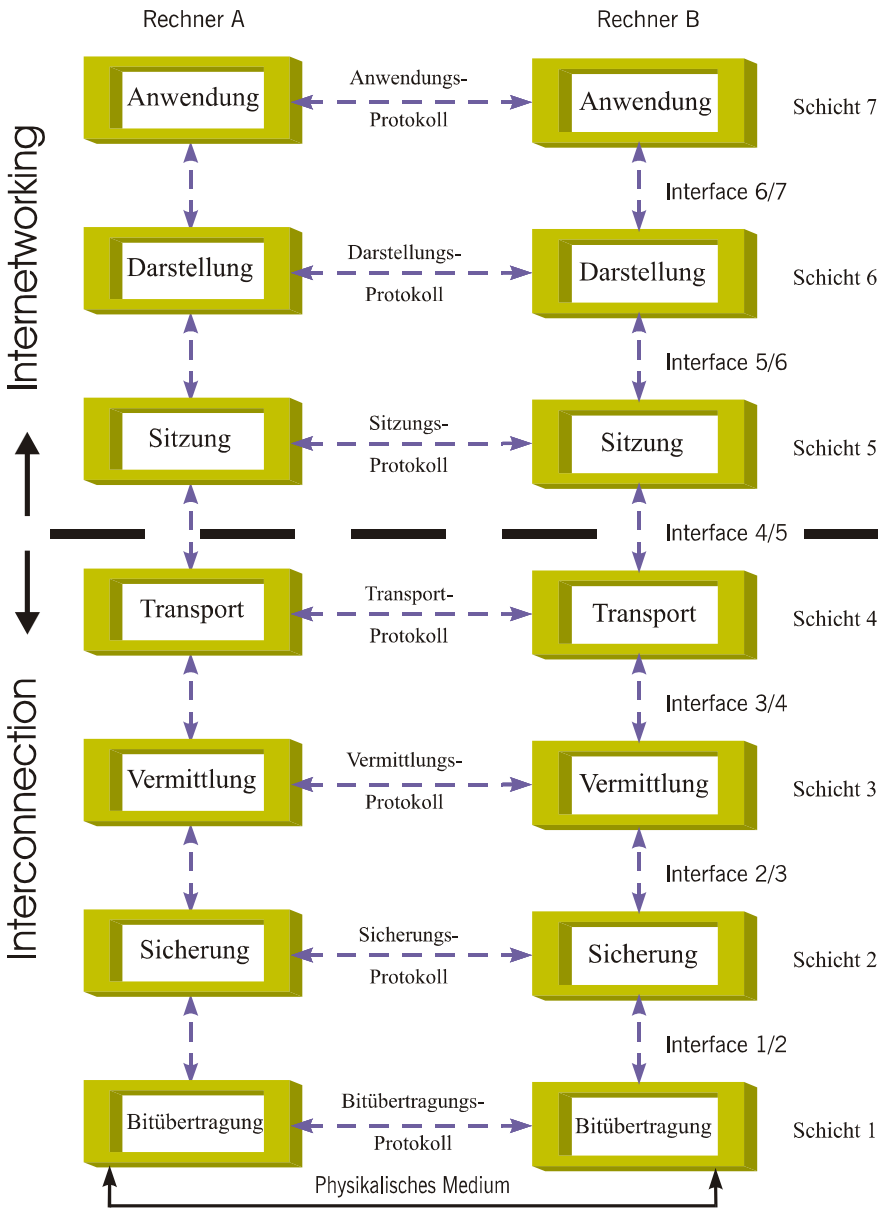

Abbildung 135: ISO-OSI-7-Schichtenmodell

Da auch bei einem simplen Dialog gewisse (Höflichkeits-?) Regeln eingehalten werden müssen, damit die Informationen zwischen den Partnern komplett übertragen werden können, hat man eine Reihe von Regeln für den Verkehrsablauf aufgestellt. Eine notwendige und hinreichende Menge solcher Regeln nennt man ein *Protokoll* (in Anlehnung an die Rituale der Diplomatie).

Protokolle sind vor etwa einem Jahrzehnt richtig in das Bewusstsein gerückt durch die Normung der ISO, die für die (Fern-)Datenübertragung eine siebenschichtige Protokollhierarchie genormt hat (*ISO-OSI-7-Schichten-Modell*) und gleichzeitig versuchte, die sieben Schichten durch genau definierte Funktionsbeschreibungen (mit Zustandsdiagrammen, Petrinetzen und verbalen Beschreibungen) in ihrer Funktion exakt festzulegen. Das ist bis zur Schicht 4 ganz brauchbar gelungen, war aber viel zu kompliziert, so dass sich heute weitgehend die heuristisch entstandene Protokoll-Suite des *Internets* unter dem Acronym TCP/IP durchgesetzt hat. Diese findet man auf Internet-Servern als eine Sammlung von Quasinormen, die RFCs (Request for Comments) genannt werden und von einem firmenunabhängigen Gremium, dem *Internet Consortium*, zusammengestellt werden.

Aus Gründen der Systematisierung und Modellierung wird das 7-Schichten-Modell der ISO heute häufig verwendet, die zugehörigen Protokolle jedoch weniger. Abb. 135 zeigt das ISO-Modell. Es leuchtet bei diesem Bild sofort ein, weshalb die Schichten 5-7 nicht normierbar sind. Die

Software- bzw. Betriebssystem-Hersteller haben unterschiedliche Rituale, Sitzungen zu steuern (Kommandosprachen bei UNIX, DOS, MacOS sind unterschiedlich), die Darstellungen sind verschieden (MS-Winsdows, X-Windows, Mac-Grafik, usw.) Und die Anwendungen haben ebenfalls nicht normierbare Benutzeroberflächen und Datenformate. Wir wollen uns daher nur mit den unteren Schichten beschäftigen, soweit sie gerade aktuell sind (was in 2 Jahren schon überholt sein kann).

6.3 Physikalische Übertragungsmedien

6.3.1 Kupferleitungen (twisted pairs)

Zunächst wollen wir uns mit den physikalischen Übertragungsmedien beschäftigen, d.h. mit Kabeln und Leitungen nach Abb. 136. Diese bilden gewissermaßen die Schicht 0 des ISO-Modells. Da sich verdrillte Kupferleitungen *(twisted pairs)* im Moment durchzusetzen scheinen, wollen wir ein wenig die Leitungstheorie für parallele Leitungen skizzieren, weil sich daraus wichtige Eigenschaften von Kabeln ableiten. Für Koaxialkabel lässt sich eine ähnliche Theorie aufstellen.

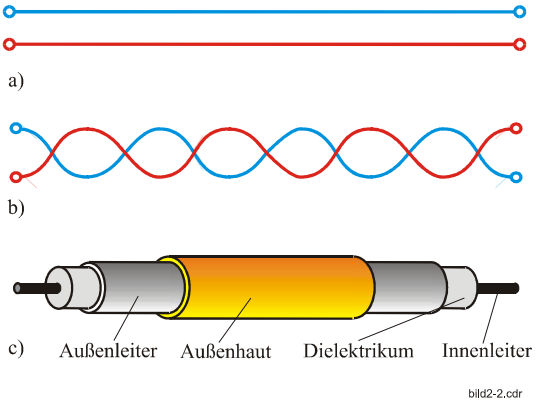

Abbildung 136: Kupferkabel:
a) Zweidraht-Leitung, b) Twisted-Pair-Kabel, c) Koaxial-Kabel

Wir betrachten ein paralleles homogenes Leitungspaar nach Abb. 137a und sein Ersatzschaltbild nach Abb. 137b mit den Impedanzbelägen, d.h. der Kapazität pro Längeneinheit $C' = \Delta C / \Delta l$, der Induktivität pro Längeneinheit $L' = \Delta L / \Delta l$, des Längswiderstands pro Längeneinheit $R' = \Delta R / \Delta l$ und des Leitwertes der Ableitung pro Längeneinheit $G' = \Delta G / \Delta l$. Mit Hilfe der Kirchhoffschen Gesetze lässt sich dann die folgende Differentialgleichung aufstellen:

$$-\frac{\partial u}{\partial l} = i \cdot R' + L' \cdot \frac{\partial i}{\partial t}, \qquad -\frac{\partial i}{\partial l} = u \cdot G' + C' \cdot \frac{\partial u}{\partial t}. \tag{132}$$

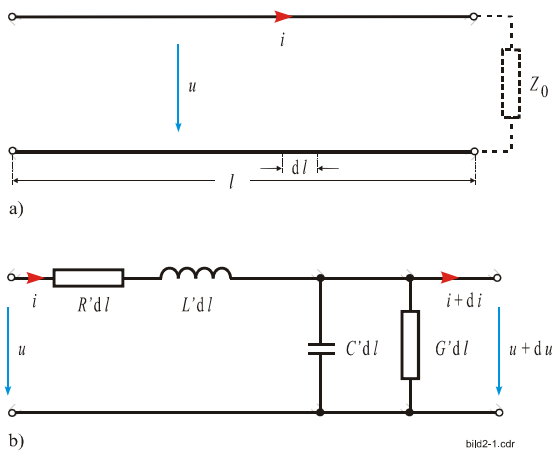

Abbildung 137: a) Zweidrahtleitung, b) Ersatzschaltbild

Durch erneutes Differenzieren und Einsetzen der unteren in die obere Gleichung erhalten wir eine lineare Dgl. 2. Ordnung für u bzw. durch umgekehrtes Einsetzen eine Dgl. für i., d.h.:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial l^2} = L'C' \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + (C'R' + G'L') \frac{\partial u}{\partial t} + G'R' \cdot u, \qquad \frac{\partial^2 i}{\partial l^2} = L'C' \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} + (C'R + G'L') \frac{\partial u}{\partial t} + G'R' \cdot i. \tag{133}$$

Diese beiden Dgls. sind bis auf die Variablennamen *u* bzw. *i* identisch. Es reicht also, eine von ihnen zu lösen. Die Theorie linearer Differentialgleichungen sagt nun, dass e-Funktionen Lösungsfunktionen sind. Mit dem Ansatz:

$$u = U_0 e^{(j\omega t - \gamma l)} \qquad \textbf{(134)}$$

erhält man nach einiger Zwischenrechnung (das *j* im Exponent ist hier die imaginäre Einheit j^2=-1. Um Verwechslungen mit dem Strom *i* zu vermeiden, schreiben Elektrotechniker hier *j*) für die komplexe Konstante γ, das *Übertragungsmaß*:

$$\gamma = (\alpha + j\beta), \quad \gamma = \pm\sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}. \qquad \textbf{(135)}$$

Die reelle Größe α wird *Dämpfungsmaß* genannt, die imaginäre Größe β *Phasenmaß*. Die Gl. (134) heißt auch *Telegraphengleichung*. Der Ansatz nach Gl. (135) beschreibt eine hinlaufende Welle für β>0 und eine zurücklaufende Welle für β<0. Wir betrachten kurz die hinlaufende Welle und stellen fest, dass der Phasenwinkel der Welle konstant bleibt, wenn der Imaginärteil im Ansatz nach Gl. (135) konstant bleibt, z.B. null ist:

$$\omega t = \beta l, \quad \text{d.h.} \quad \frac{l}{t} = v_{phase} = \frac{\omega}{\beta}. \qquad \textbf{(136)}$$

Daraus ergibt sich die Phasengeschwindigkeit v_{phase} der Welle auf der Leitung. Im Vakuum ist sie identisch mit der Lichtgeschwindigkeit *c*:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \approx 299800\,\text{km/s}. \qquad \textbf{(137)}$$

Ist der umgebende Raum mit einem Dielektrikum gefüllt, dessen relative Dielektizitätskonstante ε_r ist und mit einer magnetischen Abschirmung, z.B. einer Eisenlegierung mit der relativen Permeabilität μ_r, so reduziert sich die Phasengeschwindigkeit *v*:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{n} < c. \qquad \textbf{(138)}$$

D.h. mit Isolation und magnetischer Abschirmung umgebene Kabel haben geringere Phasengeschwindigkeiten als der leere Raum. Die Größe *n* nennt man auch *Brechungsindex*. Wichtig für die Informationübertragung ist jedoch die *Gruppengeschwindigkeit* v_{gr}, welche noch kleiner ist:

$$v_{gr} = \frac{\partial \omega}{\partial \beta} < v_{phase}. \qquad \textbf{(139)}$$

Eine weitere wichtige Größe bei Leitungen ist der sog. *Wellenwiderstand* Z_0:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R' + i\omega L'}{G' + i\omega C'}} \approx \sqrt{\frac{L'}{C'}}. \qquad \textbf{(140)}$$

Da sowohl der Bahnwiderstand *R'* als auch die Ableitung *G'* durch die Isolierung sehr klein sind, sind die Realteile unter der Wurzel vernachlässigbar, d.h. aber, der Wellenwiderstand normaler Kabel ist reell. Das gilt auch für Koaxialkabel, bei denen sich physikalisch nichts ändert, nur die Geometrie ist anders. Übliche Wellenwiderstände von Koax-Kabel sind 50-75Ω und von verdrillten Leitungspaaren 85-110Ω.

Eine am Ende offene oder kurzgeschlossene Leitung reflektiert die hinlaufende Welle vollständig. Wohin soll die eingespeiste Energie auch abfließen? Wird die Leitung jedoch am Ende mit dem (reellen!) Wellenwiderstand Z_0 abgeschlossen, so merkt die Welle gewissermaßen den Übergang nicht und wird in dem Widerstand in Wärmeenergie umgewandelt. Die für die Signalübertragung sehr störenden Reflexionen werden unterdrückt. Wenn andererseits ein Kabel irgendwo kurzgeschlossen oder gebrochen ist - auch das scharfe Abknicken von Kabeln kann den lokalen Wellenwiderstand verändern und zu Reflexionen führen - dann merkt man das sofort am fehlerhaften Verhalten des Netzes.

$$D = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_{ein}}{P_{aus}}, \quad = 20 \cdot \log_{10} \frac{U_{ein}}{U_{aus}}. \qquad \textbf{(141)}$$

Die Kabeldämpfung hängt von der Konstanten α und der Kabellänge ab. Generell gilt: Je größer ω desto größer α. Allgemein definiert man ein *Dämpfungsmaß D* .

Zwei Randbemerkungen zum Abschluss der Bemerkungen über Kupferkabel, die sich auf die Einstreuung magnetischer Felder beziehen. Ein Kabel mit Hin- und Rückleitung bildet eine große Induktionsschleife, in der vagabundierende *magnetische Felder* Störspannungen induzieren können. Daher werden Leitungspaare verdrillt; die Störspannungen, welche in benachbarten Drillschleifen induziert werden, kompensieren sich nahezu, da sich das Vorzeichen der Spannung zur Nachbarschleife hin umkehrt. Außerdem sind die Kabel durch Abschirmschläuche oft auch gegen *elektrische Felder* abgeschirmt (S. dazu Abb. 136).

Einen ähnlichen Effekt haben sog. *Erdschleifen*. Wenn ein signalverarbeitendes System an mehreren, räumlich getrennten Stellen geerdet wird, so können infolge der unkontrollierbaren Erdströme (z.B. durch in der Nähe vorbeifahrende elektrische Bahnen oder Aufzüge, die an benachbarte Erdungsschienen angeschlossen sind) erhebliche Spannungen in dem Kabel entstehen, die ein Daten-Netz stören können. Es ist also wichtig, ein System immer nur an einer zentralen Stelle zu erden. In Kabelverbindungen werden daher häufig Optokoppler zur sog. Potentialtrennung eingesetzt.

6.3.2 Lichtwellenleiter

Inzwischen sind Lichtwellenleiter (LWL) oder optische Fasern kaum teurer als Kupferleitungen und haben - insbesondere auf längeren Strecken - erhebliche Vorteile. Dazu gehören: geringe Dämpfung d<0,5 dB/km, hohe Bandbreiten, kein Übersprechen zwischen den Leitungen, Potentialfreiheit, $v_{signal} \approx c$, da der Brechungsindex der verwendeten Gläser bei n≈1,5 liegt, EMC-fest, d.h. gegen Teilchen- und Quantenstrahlung immun. Bisher gibt es noch keine kommerzielle „optische Logik“, d.h. die optischen Signale müssen zur Verarbeitung in elektrische umgewandelt werden und zur Übertragung wieder in Lichtimpulse. Dieses wird durch Halbleiter-Laser bzw. Phototransistoren realisiert.

Abb. 138 zeigt gebräuchliche LWLs. a) und b) sind übliche Kabel. Abb. 138c) zeigt das Prinzip der weitverbreiteten Multimodefaser. Da der Faserdurchmesser mit 125 µm oder 62,5 µm sehr groß gegen die Wellenlänge des Signals (Infrarot mit λ≈ 1350 nm) ist, können Lichtstrahlen bis zum Winkel der Totalreflexion sich auch schräg im Glas ausbreiten. Das führt zu einem Verschmieren des Signalimpulses, wie es an den beiden Enden des Kabels angedeutet ist. Damit ist

bei einer bestimmten Länge des Kabels die maximale Impulsfrequenz festgelegt, bei der der Empfänger ein Signal noch sicher erkennen kann.

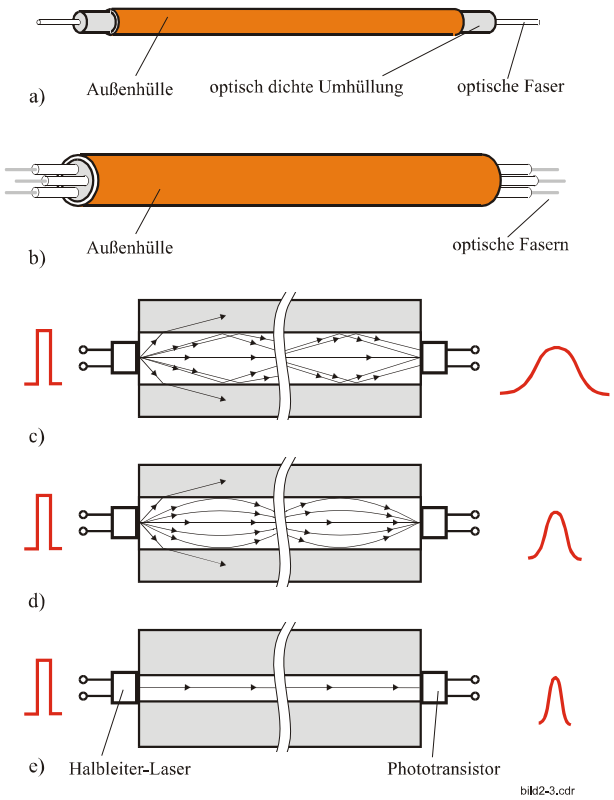

Abbildung 138: Lichtwellenleiter: a) und b) übliche LWL-Kabel, c) Multimode-Faser, d) Gradientenfaser, e) Monomode-Faser

Abb. 138d) zeigt die sog. Gradientenfaser, deren Brechungsindex über dem Querschnitt sich von außen nach innen vergrößert. Dadurch werden die nach außen gerichteten Strahlen nach innen zurückgebeugt. Damit verbunden ist eine querschnittsabhängige Phasengeschwindigkeit, d.h. die Strahlen laufen innen langsamer als außen, so dass sich die Signalverbreiterung längs der Faser weniger bemerkbar macht. Diese Fasern haben also höhere Bandbreiten als Multimodefasern.

Abb. 138e) zeigt schließlich die sog. Monomode-Faser. Hier liegt der Faserradius bei $r<4\mu m$. Dadurch gibt es nur noch eine quasi ebene Wellenfront. Da hier der elektromagnetische Wellencharakter des Lichts auf den umgebenden Mantel einwirkt, verschleift ein Impuls längs des Weges ebenfalls, aber weit weniger als bei den anderen Fasertypen. Im Weitverkehr werden daher ausschließlich Monomode-Fasern eingesetzt. Zur weiteren Erhöhung der Bandbreite einer Faser werden neuerdings mehrere „Farbimpulse“, d.h. Infrarot verschiedener Wellenlängen, gleichzeitig übertragen, die dann auf der Empfängerseite mit optischen Filtern getrennt werden können.

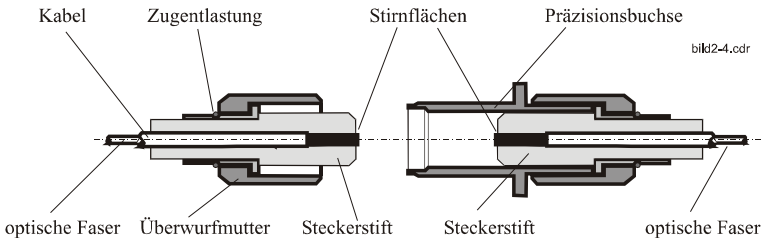

Abbildung 139: Lichtwellenleiter-Steckverbindung

Interessant ist noch, dass man Lichtwellenleiter wie normale Kabel mit Steckern versehen kann, wenn diese besonders plan geschliffene Enden haben. Abb. 139 zeigt ein solches gebräuchliches Steckerpaar. Natürlich gibt es Verluste an so einer Stoßstelle, diese sind aber überraschend gering (D < 1 dB).

6.3.3 Funkstrecken

Es gibt zwei grobe Klassen der Funk-Datenübertragung: Satellitenverbindungen und terrestrische. Beide arbeiten heute im cm- und mm-Wellenbereich (900 MHz - 1,9 GHz).

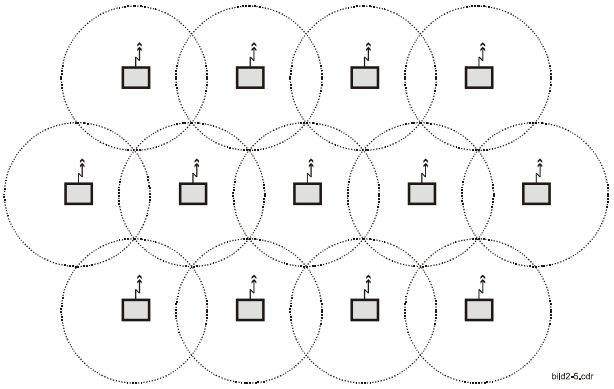

Abbildung 140: Zelluläres Sender-/Empfänger-Funknetz

Bei der ersten Klasse bilden (geostationäre) Satelliten Relaisstationen, um die Erdkrümmung zwischen Sender und Empfänger zu überwinden, da die Wellenausbreitung in diesen Frequenzbereichen optisch erfolgt und nicht, wie bei Langwellen der Erdkrümmung folgt. Diese Signalübertragung geschieht zwar auch mit Lichtgeschwindigkeit, wegen des merkbaren Abstands Satellit - Erde von ca. 36.000 km und der Frequenzumsetzung im Satellit von Empfangen auf Senden gibt es jedoch deutlich merkbare Verzögerungen von 20-50 ms.

Terrestrische Verbindungen im Mittel- und Kurzwellenbereich sind wegen der geringen Bandbreiten langsam und werden heute nur für Sonderzwecke eingesetzt (*Aloha*-Ausbildungsnetz in Hawaii).

Mit mm-Wellen lassen sich quasioptische Punkt-zu-Punkt-Verbindungen über einige 20 km herstellen (abhängig von der Geometrie, der Antennengrößen, des Wetters). Die gegenwärtig erreichbaren Bandbreiten liegen bei 2-10 Mbit/s. Will man einen Bereich flächendeckend überstreichen, so muss man eine zellulare Struktur nach Abb. 140 aufbauen, genauso wie bei den Funk-Telefonnetzen.

Seit Neuestem gibt es sog. *WLAN*s, Funk-LANs im lokalen Bereich, die nach dem Prinzip des Ethernet arbeiten und mit 11 bzw. 54 Mbit/s als Summen-Datenraten vergleichbar schnell sind. Sie senden mit geringer Leistung (max. 100mW) und haben in Gebäuden Reichweiten von ca. 30m, im Freien je nach Richtantenne bis zu einigen km.

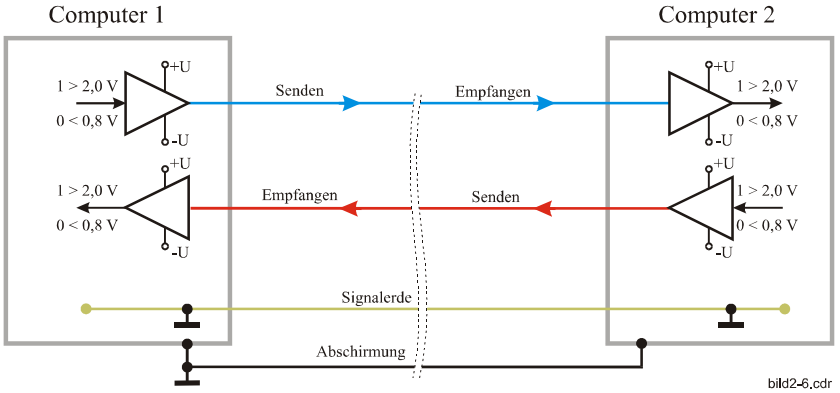

Abbildung 141: Vereinfachte serielle V.24-Schnittstelle

6.3.4 Serielle und parallele Übertragung

Auf kurzen Strecken kann man Daten byteparallel übertragen, auf längeren Strecken ist der Aufwand zu hoch, dort gibt es nur *bitserielle* Übertragungsprotokolle. Als Beispiel für die serielle Übertragung (auf Schicht 1 des ISO-OSI-Modells) sei hier in Abb. 141 die *V.24* (oder in USA *RS-232*) -*Norm* vereinfacht dargestellt, die für langsame serielle Übertragungen üblich ist (z.B. auch als sog. serielle Schnittstelle eines PCs).

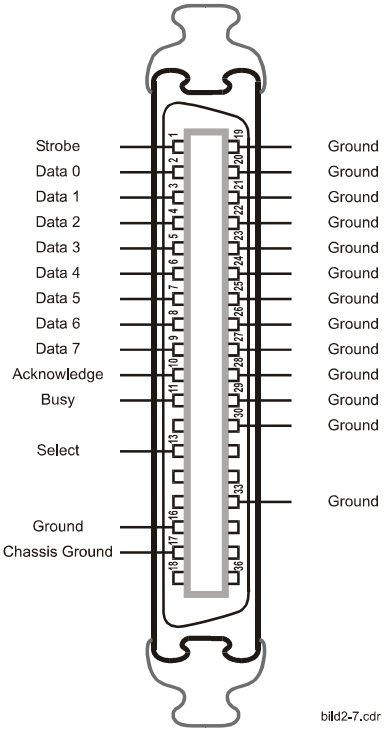

Abbildung 142: Parallele Centronics-Schnittstelle

Sowohl die Kabelart, die Steckerbelegung als auch die elektrischen Signalpegel und die Codierung sind für diese Norm genau festgelegt. Diese Verbindung, bei der beide Kommunikationspartner gleichzeitig senden und empfangen können, heißt *voll-duplex*. Kann nur Einer senden und muss der Andere zuhören, bis der Sender aufhört, so heißt das *halbduplex*.

Werden mehrere Bits auf jeweils eigenen Drähten parallel übertragen, so spricht man von einer *parallelen Übertragung*. Ein Beispiel ist etwa die parallele Druckerschnittstelle (oder Centronics-Schnittstelle) eines PCs nach Abb. 142 mit einer Datenbreite von 8 Bit.

Bei beiden Schnittstellen gibt es neben den eigentlichen Datenleitungen noch Steuerleitungen (in Abb. 11 z.T. weggelassen, da häufig unbenutzt), d.h. hier sind die ISO-Schichten 0-2 nicht zu trennen.

6.3.5 Störungen der Signalübertragung

In Abb. 143 sind die typischen Signalverformungen infolge der Dämpfung und verschiedener Störungen für elektrische Leitungen zusammengestellt. Durch Dämpfung längs des Kabelweges wird die Amplitude kleiner, die Begrenzung der Bandbreiten führt zu Überschwingern (Gibbssches Phänomen), bei Laufzeitverzerrungen (dispergierende Übertragung) verzerrt sich die Signalkurve, längs des Übertragungsweges gibt es Einstreuungen von Störungen durch Nebensprechen und elektromagnetische Störfelder, hinzu kommt das Eigenrauschen der Verstärker. Diese Effekte überlagern sich und liefern ggfls. falsch erkannte Bits.

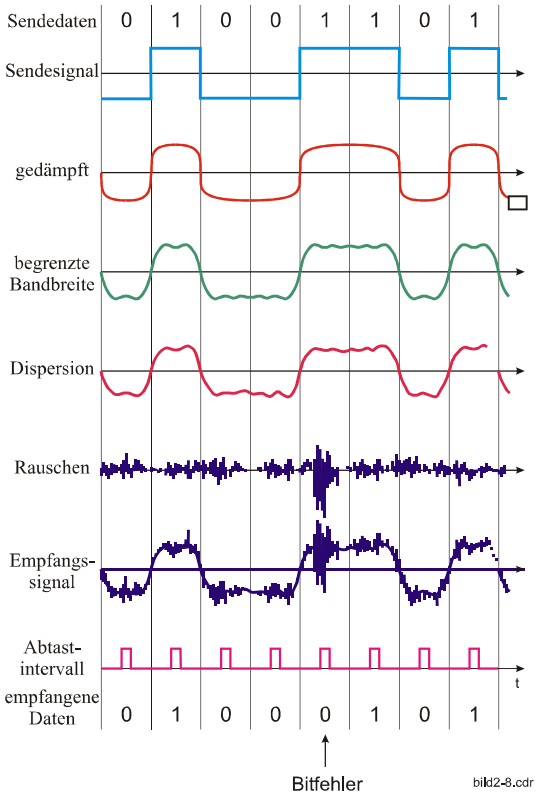

Abbildung 143: Signalstörungen bei der Übertragung

6.3.6 Modulationsverfahren

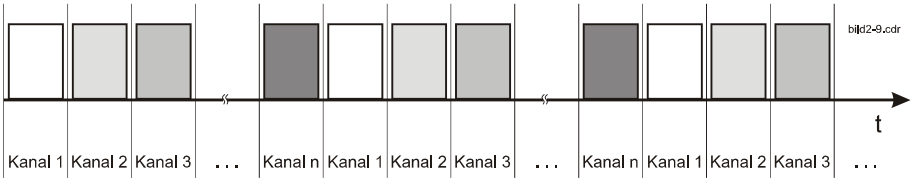

Abbildung 144: Zeitmultiplex

Besonders bei Fernverbindungen will man die nutzbare Bandbreite von Kabeln möglichst gut ausnutzen, um mehrere Verbindungen quasiparallel abzuwickeln. Hierfür gibt es zwei grundsätzliche Verfahren: Zeitmultiplex und Frequenzmultiplex.

Beim Zeitmultiplex wird die Leitung während eines Zeitintervalls (time slot) einem Übertragungskanal zugeordnet, im darauf folgenden einem anderen usw., bis nach n Intervallen sich alles wiederholt.

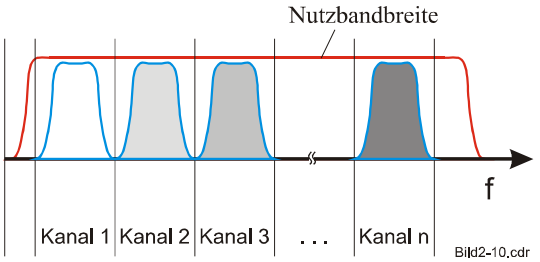

Abbildung 145:Frequenzmultiplex

Jedes Zeitsignal lässt sich mit Hilfe der Fourier-Transformation in ein Frequenzgemisch zerlegen und durch die Fourier-Rücktransformation lassen sich Frequenzgemische in Zeitfunktionen umrechnen:

$$U(f) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)\cdot e^{-2\pi jft}\,\mathrm{d}t,$$
$$u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} U(f)\cdot e^{+2\pi jft}\,\mathrm{d}f. \qquad \textbf{(142)}$$

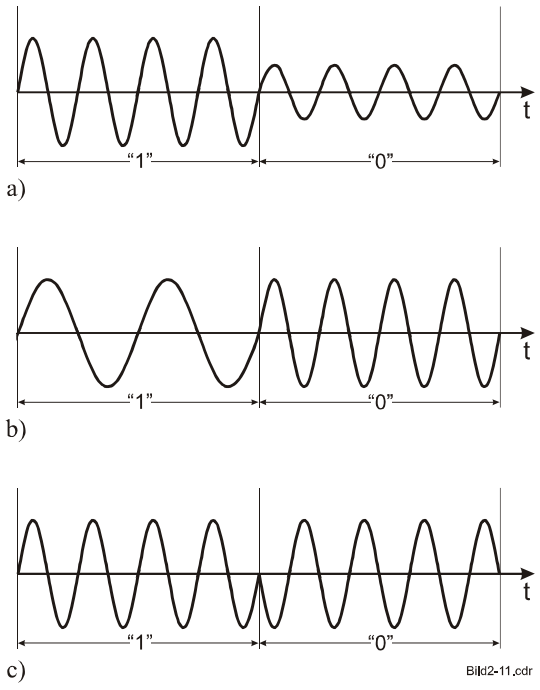

Abbildung 146: Modulationsarten:
a) Amplitudenmodulation,
b) Frequenzmodulation,
c)Phasenmodulation

Man teilt dann die verfügbare Übertragungsbandbreite B in Teilbänder auf, auf denen jeweils ein Übertragungskanal abgewickelt wird. Im Funkverkehr werden auch komplexere Verfahren über breitere Bänder mit hoher Störsicherheit verwendet (spread spectrum transmission).

Wir wollen nun die grundlegenden Modulationsverfahren kurz skizzieren. Eine Sinusschwingung ist durch drei Größen charakterisiert: Frequenz, Amplitude und Phasenwinkel. Entsprechend gibt es drei grundsätzliche Modulationsverfahren, die in Abb. 146 gezeigt sind. In der Praxis verwendet man nicht nur binäre Codes, sondern z.B. auch quaternäre mit 4 Zuständen (4 Amplituden oder 4 Frequenzen oder 4 Phasensprünge von 90˚).

6.3.7 Wellenlängen-Multiplex

Eine moderne LWL-Multiplextechnik, die zu einer besseren Ausnutzung der Lichtwellenleiter-Kapazität führt, ist *WDM* (wavelength division multiplexing). Bei der WDM-Technik werden unterschiedliche Lichtwellenlängen zur parallelen Übertragung von mehreren Signalen genutzt. An Wellenlängen nutzt die WDM-Technik die Lichtwellenlängen der optischen Fenster bei 850 nm, 1300 nm und 1550 nm. Die gleichzeitige Übertragung kann sowohl in einer Übertragungsrichtung erfolgen aber auch in entgegen gesetzten Richtungen. Dem Prinzip nach wird jedes zu übertragende Signal einer Lichtfrequenz aufmoduliert. So können bei der Benutzung von drei Lichtfrequenzen (“Farben”) gleichzeitig drei Signale übertragen werden.

Das optische Koppelelement, der Wellenlängen-Multiplexer, bündelt die verschiedenen Lichtwellenlängen und überträgt den gesamten Lichtstrom, der alle diskreten Wellenlängen enthält, über einen Lichtwellenleiter zum Empfangsort, wo er mittels Filtertechniken in die einzelnen Kanäle separiert wird. Bei fester Übertragungsgeschwindigkeit v stimmt WDM mit FDM (Frequency Division Multiplexing) überein, weil $v = f*\lambda$ ist.

6.4 Techniken und Protokolle in lokalen Netzen (LANs)

6.4.1 Schicht 1 des ISO-Modells (Pegel und Codes)

Lokale Netze werden heute überwiegend mit der *Ethernet-Technologie* (IEEE 802.3) betrieben. Diese ist inzwischen von dem IEEE und der ISO genormt. Daneben existieren weniger verbreitete Technologien, wie Token Ring (ursprünglich von IBM) und Vines (von Banyan). Da letztere lange proprietär waren, ist ihre Verbreitung geringer.

Wir beschränken uns auf die Ethernet-Netze. Ursprünglich mit Koaxial-Kabeln nach Abb. 6c) betrieben (in zwei Varianten: Baseband-Ethernet „10Base5" mit fingerdicken Kabeln von max. 500 m Länge und „Cheapernet“ mit dünnen Koax-Kabeln „10Base2" und 185 m Gesamtlänge mit max. 30 Stationen), wird heute überwiegend „Twisted Pair“-Kabel nach Abb. 136 b) verwendet. Brutto-Übertragungsraten sind 10, 100 und seit 1998 auch 1000 Mbit/s (Gigabit-Ethernet). Die Kodierung auf dem Kabel erfolgt im *Manchester-Code* (s. Abb. 147 für 10 Mbit/s). Eine Signaltransition von -2,05 V auf 0 V in der Mitte des Zeitintervalls wird als „1" interpretiert, die negative Transition in der Mitte als „0". Eine Modulation findet nicht statt.

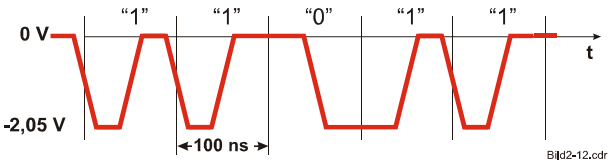

Abbildung 147: Manchester Coding auf dem Ethernet

Die Daten werden auf dem Kabel als *Pakete* oder *Rahmen* (frames) verschickt, d.h. sie werden gebündelt und mit Empfänger-Adresse, Absender-Adresse, Steuerinformation und einer Fehlerkorrektur versehen. Abb. 148 zeigt das Rahmenformat für die 10 Mbit/s-Koaxialkabel. Die 0/1-Sequenz der Preamble dient der Aufsynchronisierung des Empfängers auf den Sender, da nie beide vollkommen synchron getaktet werden. Der Starting Frame Delimiter (SFD) markiert den Beginn der Nutzinformation. Anschließend werden Ziel- und Absender-Adresse angegeben,

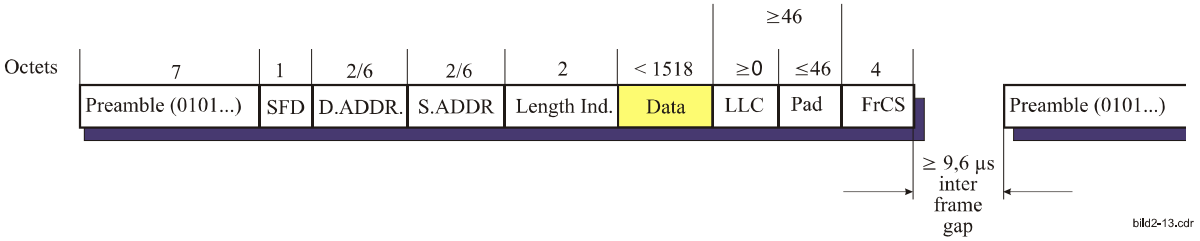

Abbildung 148: Rahmenformat für Ethernet nach IEEE 802.3

dabei wird unterschieden, ob es sich um globale oder lokale Adressen handelt.

Letztere haben 2 Octets (Bytes) Länge, die anderen 6. Das Längenfeld (Length Ind.) gibt an, wie lang die Nutzinformation ist. Im LLC-Feld (Link Level Control) steht Steuerinformation, die an die darunter liegende MAC-Schicht abgegeben wird. Im Padding-Feld werden ggfls. Füllbytes eingetragen, damit die Rahmenlänge nicht zu klein wird. Die Frame Check Sequence (FSR) wird nach einem Hamming-Code aus den davor liegenden Informationen (ab der Zieladresse) berechnet und erlaubt die Rekonstruktion der Information bei bestimmten Fehlerarten. Zwischen den Rahmen muss eine Lücke von mindestens 9,6µs bleiben.

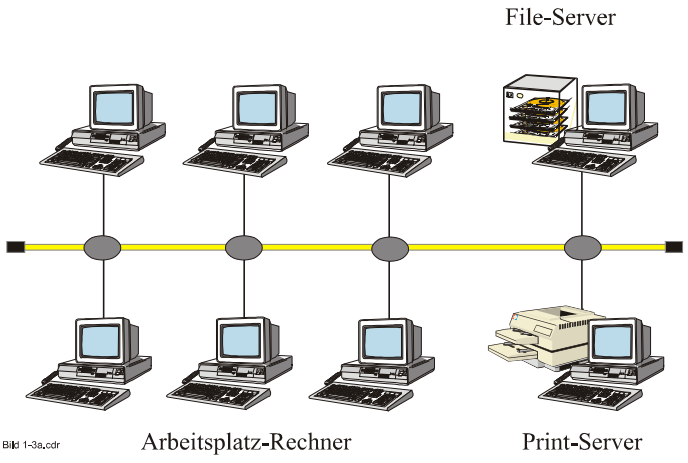

Abbildung 149: Klassisches Baseband-Ethernet

Auf dieser OSI-Schicht 1 ist auch der Zugriffs-Mechanismus festgelegt. Alle Geräte am Netz hören dieses permanent ab, reagieren aber (im korrekten Gebrauch) nur auf Rahmen mit der eigenen Adresse als Zieladresse und kopieren diese in ihre Empfangspuffer.

Statt des ausgedehnten Kabels (Backbone) kann man auch einen Konzentrator mit mehreren Anschlüssen verwenden, der dann *Hub* (Nabe oder Angelpunkt) oder *Repeater* genannt wird (diese Konstruktion nennt man auch *collapsed backbone*).

Abb. 150 zeigt eine Twisted-Pair-Topologie und das prinzipielle Schaltbild. Die Twisted-Pair-Technologie erlaubt max. 100m lange verdrillte Doppeladern (ohne Anzapfung, wie bei Koax-Kabeln) und kann neben der Basis-Bandbreite von 10 Mbit/s auch die 10-fache Bandbreite von 100 Mbit/s bei passender Elektronik übertragen.

Im Ethernet dürfen alle Stationen gleichberechtigt senden. Daher müssen Verkehrsregeln die Zugriffsrechte steuern. Dieses geschieht durch das *CSMA/CD-Protokoll* (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection). Abb. 151 zeigt das (vereinfachte) Flussdiagramm des Verfahrens.

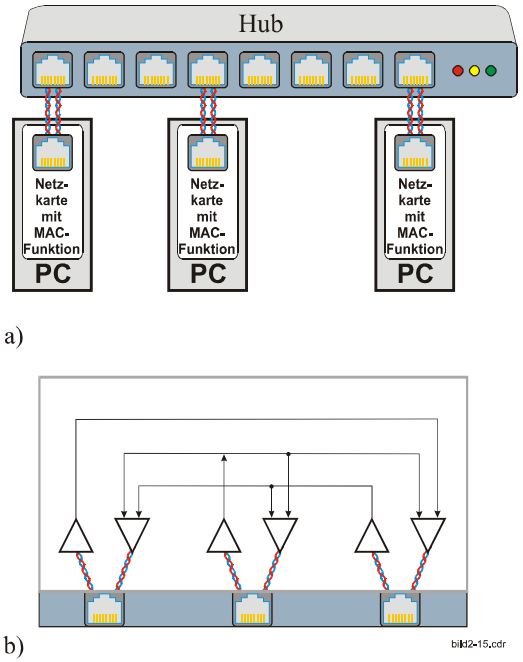

Abbildung 150: Hub-Konfiguration: a) Topologie, b) Repeater-Schema

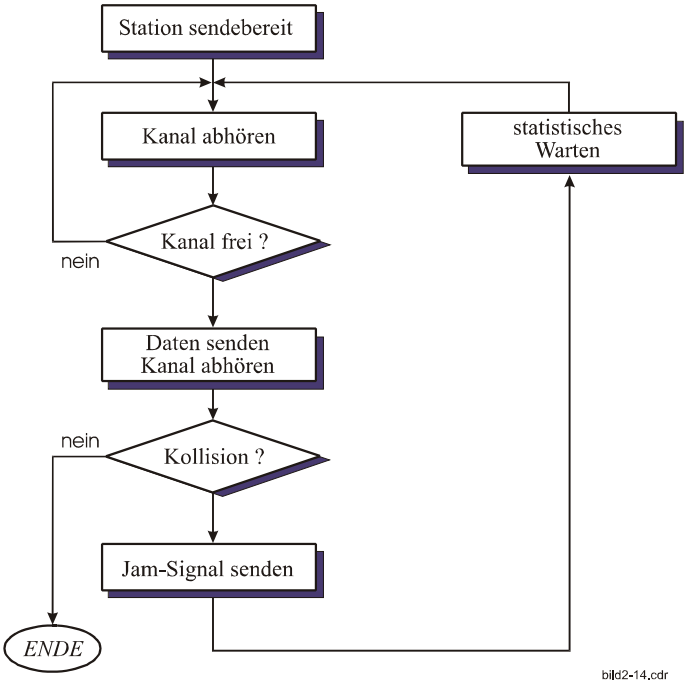

Abbildung 151: Vereinfachtes CSMA/CD-Verfahren

Für den Sendewunsch wird der Kanal ständig abgehört (Prinzip *LBT* listen before talking). Ist das Medium frei (im Inter Frame Gap von Abb. 147), dann beginnt die Sendung. Während der Sendung wird gleichzeitig abgehört. Ist auf der Leitung ein anderes Signal als das selbst gesendete, so wird eine Kollision erkannt (Jam) und die Sendung abgebrochen, da offenbar weitere Stationen im *Inter Record Gap* gesendet haben.

Nach einem Pseudo-Zufalls-Algorithmus (*Backoff Strategie*) mit Alterungsmechanismus wird dann eine gewisse Zeit gewartet, bevor ein weiterer Sendeversuch gestartet wird. Bei geringem Verkehr ist dieses Verfahren sehr effektiv, jede gescheiterte Übertragung erhöht jedoch den Verkehr, so dass die Kollisionen mit zunehmenden Sendewünschen exponentiell anwachsen.

6.4.2 Schicht 2 des ISO-Modells

In Abb. 152 sind die *Internet-Protokolle* der ISO-OSI-Modellierung bis zur Schicht 4 gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass die OSI-Schichten mit realen Protokollen nicht immer zur Deckung zu bringen sind. In den lokalen Netzen setzt auf die Schicht 1 gewissermaßen eine Schicht 2a auf, die *MAC-Schicht* (Media Access), welche in den Netzkarten der Geräte als Firmware implementiert ist. Auf dieser sitzt (quasi als 2b-Schicht) die *LLC-Schicht* (Logical Link Control), in welcher drei Arten von Datenverkehr abgewickelt werden: *Unbestätigter Datagramm-Dienst LLC 1* (hierbei werden Datagramme, z.B. E-Mail-Sendungen in das Netz eingespeist, ohne dass zum Empfänger vorher eine Verbindung aufgenommen wurde), *verbindungsorientierter Dienst LLC 2* (Verbindungsaufbau, Datentransfer, Verbindungsabbau), *quittierter Datagramm-Dienst LLC3* (quasi Einschreiben mit Rückschein).

Aus technischen Gründen (Signallaufzeiten, Dämpfung usw.) sind die Kabellängen begrenzt. Um längere lokale Netze zu versorgen, sind spezielle Elektroniken erforderlich. Die einfachsten sind

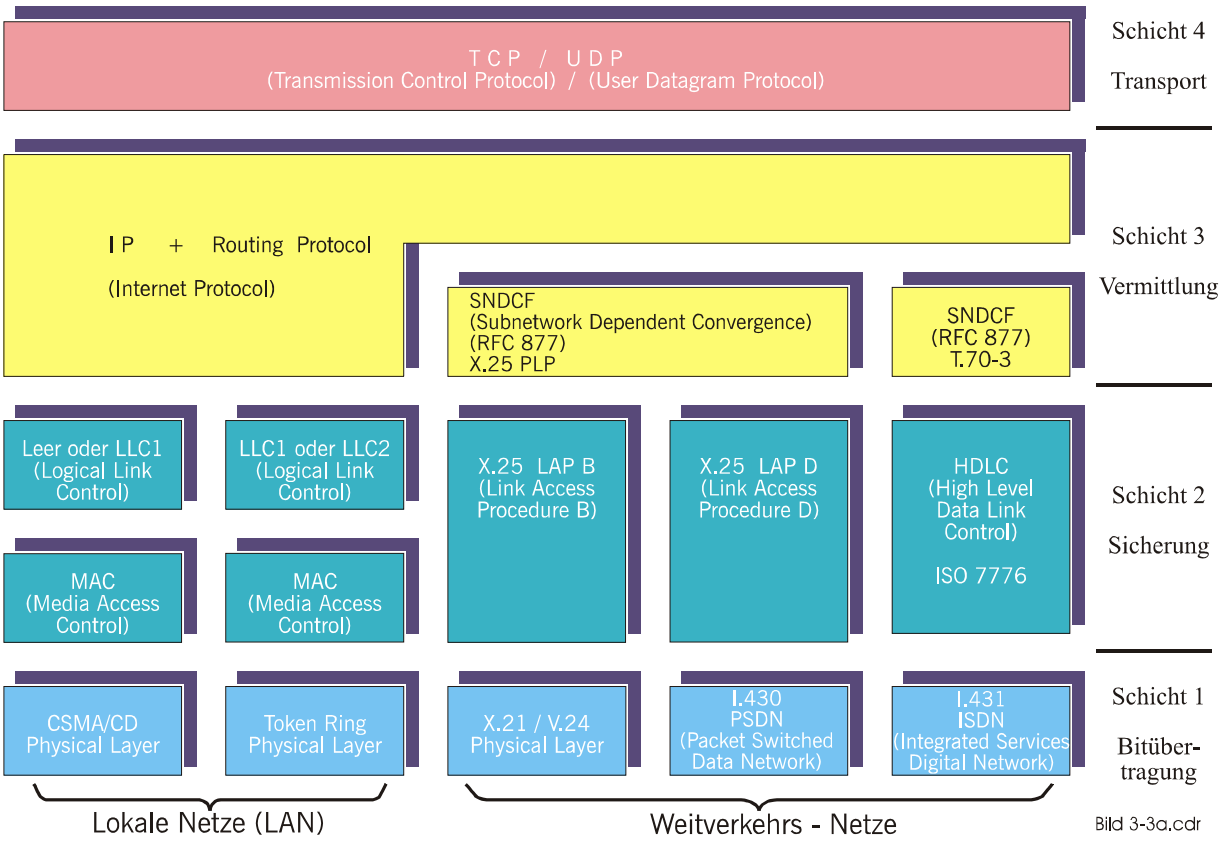

Abbildung 152: Internet-Protokoll, das auf verschiedene untere Schichten aufsetzt.

die bereits genannten Repeater. Sie haben lediglich eine Verstärkungs- und Signal-Regenerierungsfunktion. Sie übertragen alle Pakete vom Eingang auf den Ausgang. Sie arbeiten also auf Schicht 1 des ISO-OSI-Modells.

Etwas aufwendiger sind die Geräte, die auf der MAC-Schicht (Schicht 2a) arbeiten. Sie heißen *Bridges* und haben Adressenspeicher, in die die Adressen der Endgeräte auf den jeweiligen Netzanschlüssen eingetragen werden. Das geschieht entweder von Hand (programmiert) oder *selbstlernend* dadurch, dass automatisch alle Absenderadressen vorbeilaufender Pakete an einem Anschluss (Port) in die Adresstabelle für diesen Port eingetragen werden. Ein Schema zeigen die Abb. 153 und 154.

6.4.3 Die Schichten 3 und 4 des ISO-Modells

In lokalen Netzen reichen diese Übertragungsschichten i.d.R. aus. In größeren Netzen, wie im Weitverkehr, sind weitere Schichten notwendig.

Das am weitesten verbreitete Protokoll auf den Schichten 3 und 4 ist das *Internet-Protokoll* (auch TCP/IP genannt). Es wird nicht nur im Weitverkehr sondern auch in zunehmendem Maße in

lokalen Netzen verwendet, da diese immer größer und komplexer werden und die Abgrenzung zu Weitverkehrsnetzen nicht logisch sondern historisch ist.

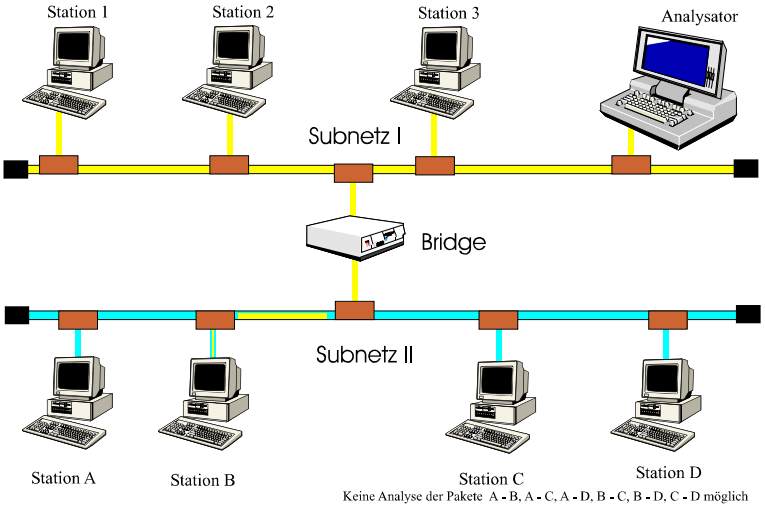

Abbildung 153: Zwei Netzsegmente, durch eine Bridge mit einander verbunden; der Analysator im Subnetz I sieht die Frames von Subnetz II nicht.

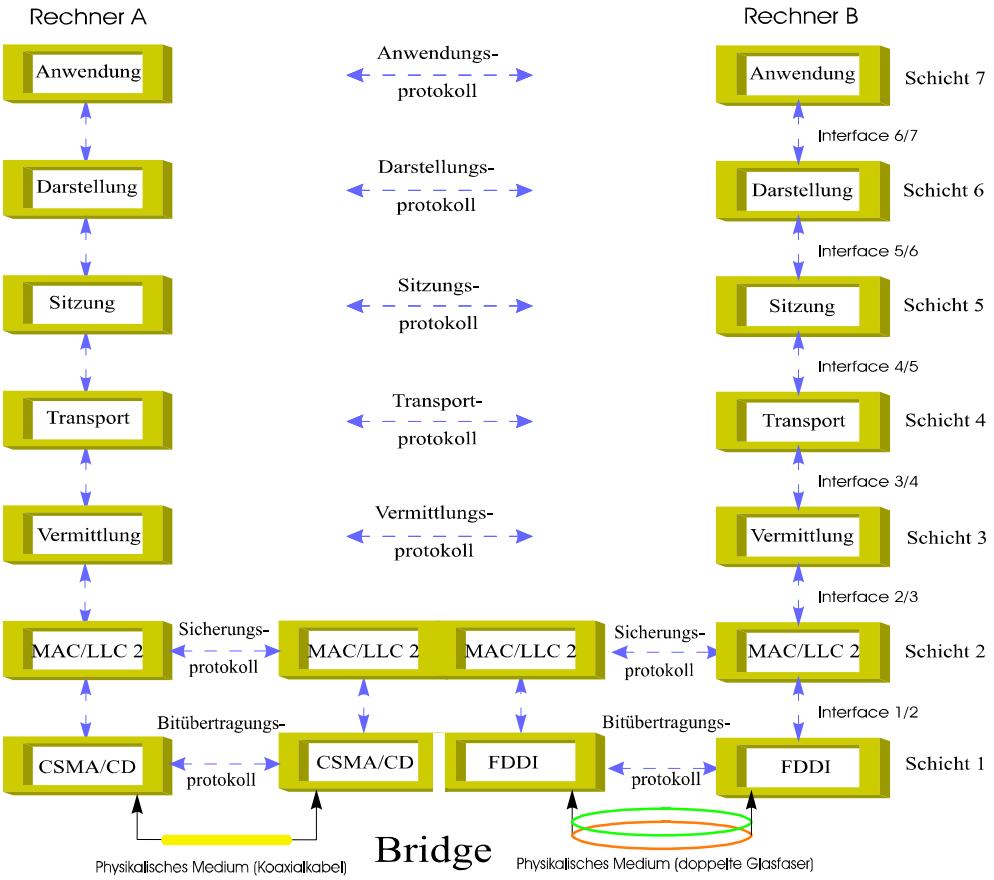

Abbildung 154: Beispiel für Bridging im ISO-OSI-Modell mit Baseband-Ethernet und FDDI-Ring auf Schicht 1

Es leuchtet unmittelbar ein, dass das Ethernet-Protokoll bei sehr vielen Stationen am Netz unbrauchbar wird, da ständig das gesamte Netz mit Information überschwemmt wird, die nur für einen Empfänger bestimmt sind. Also muss ein Protokoll eingesetzt werden, das eine Nachrichtenkanalisierung erlaubt. (Das Bridging auf Schicht 2 ist bei großen Netzen nicht effektiv genug).

Dazu teilt man das Netz in einzelne (logische oder physikalische) Segmente (in manchen Protokoll-Hierarchien *Domains* genannt) auf, die eigene Namen haben und die als Teil der Netzadressen angesehen werden. Ein Beispiel für eine derartige Strukturierung ist der Straßenname in einer Postadresse. Damit können die Pakete gezielt in die Straße geliefert werden und der Zusteller muss nicht erst alle Häuser in der Stadt abfragen, ob dort der Empfänger wohnt. Derartige Wegsteuerungen heißen *Routing* und die entsprechenden Geräte *Router* (sprich „Rauter“).

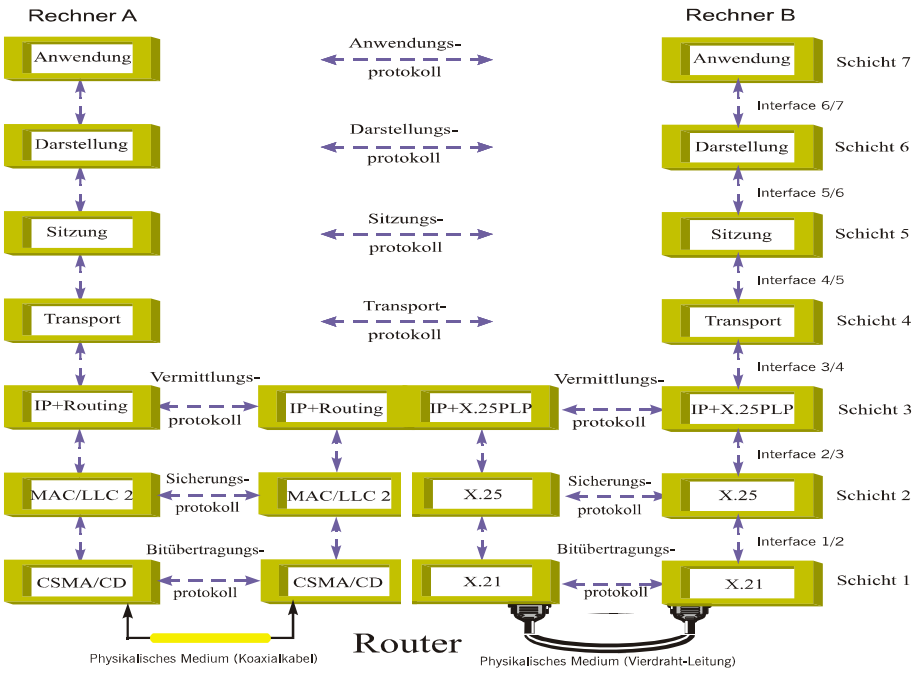

Abbildung 155: Beispiel für Routing im ISO-OSI-Modell mit Baseband-Ethernet und X.21-WAN-Protokoll auf Schicht 1

Routing findet auf der Schicht 3 des ISO-OSI-Modells statt. Dementsprechend sind auf dieser Vermittlungs-Schicht das Internet-Protokoll und das Routing-Protokoll angesiedelt. Abb. 155 zeigt das Schema im 7-Schichten-Modell. Beispielhaft ist hier der Übergang in das X.21/X5-Weitverkehrsnetz dargestellt. Routing ist ein komplizierter Vorgang, wenn er über mehrere Router führt und womöglich parallele Wege im Netz möglich sind. Dazu sind weitere Protokolle, wie das *ARP* (Address resolution protocol) und Strategien, wie der *Spanning Tree Algorithmus* zu realisieren.

Daneben setzt sich in zunehmendem Maße ein weiteres Protokoll durch, das in die Reihe der Ethernet-Protokolle gehört und mit Twisted-Pair-Kabeln und 100 Mbit/s bzw. mit Glasfasern und 1 Gbit/s arbeitet. Das ursprüngliche (bis zu 500 m lange) Baseband-Ethernet-Kabel schrumpft hierbei auf eine Elektronik (Layer-3-*Switch*) mit vielen Anschlüssen (Ports) zusammen, auch solche Strukturen werden *Collapsed Backbone* genannt. Diese Geräte schalten direkt auf Schicht 3 Pakete von einem Port zum anderen, so dass die Kollisionsverwaltungsmechanismen überflüssig sind, sofern der Switch die Daten nur schnell genug intern transportiert. Der interne Datenpfad selbst ist daher sehr schnell und als Kreuzschienenverteiler angelegt. Die Summen-

datenraten solcher *Backplanes* oder *Switching Fabrics* liegen je nach Preis bei bis zu 320 Gpps (Giga packages per second) mit steigender Tendenz, wobei ein Package bis zu1400 Bytes enthält. Da infolge fehlender Kollisionen und fehlender Broadcasts der Durchsatz in „geswitchten" Netzen um Größenordnungen besser ist, als in den Busstrukturen der Koaxial-Kabel, und darüber hinaus viele ältere Gebäude mit Telefonkabeln der „Twisted-Pair"-Qualität ausgestattet sind, haben sich diese Switches innerhalb eines Jahres zu Marktfavoriten in lokalen Netzen entwickelt. Naturgemäß ist ein Switch viel teurer als der auf Schicht 1 arbeitende Hub, obwohl er äußerlich ähnlich aussieht.

In jeder Schicht wird das Nachrichtenpaket der darunter liegenden Schicht samt seiner Schichtadressierung und Sicherungscodierung erneut mit einer Sicherungscodierung und der Schichtadressierung eingewickelt, so dass ein Zwiebelmodell entsteht. Angesichts des Aufwands und des Zeitverlusts durch diese mehrfachen ähnlichen Mechanismen versucht man, das Schichtenmodell zu vereinfachen und Zwischenschichten zu überspringen. In absehbarer Zeit wird es wohl sog. *IP-Switches* geben, die die unteren Schichten 1,2 und 3 integrieren.

Internet-Datagramm-Format

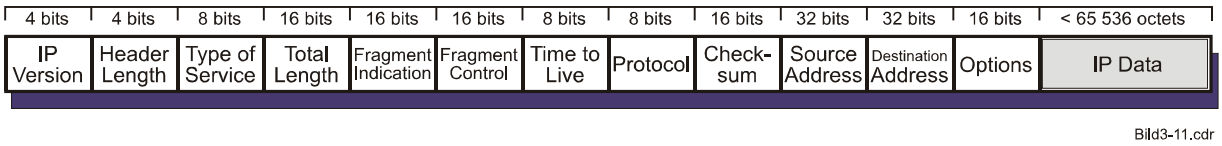

Abbildung 156: Internet-Datagramm-Format

Als Beispiel für ein IP-Paket möge Abb. 156 betrachtet werden. In dem Feld „IP-Data" befindet sich nun ein komplettes Datenpaket der darunter liegenden Schicht, z.B. ein Ethernet-Frame, der seinerseits ähnlich aufgebaut ist (s. Abb. 138). In allen Datenübertragungsmechanismen mit Paketübertragung besteht die Notwendigkeit der *Fragmentierung* des Datenstroms. Daher ist ein Fragmentierungszähler erforderlich, damit die Daten beim Empfänger wieder in der richtigen Reihenfolge zusammengesetzt werden können, da die Möglichkeit besteht, dass sich einzelne Pakete bei der Übertragung überholen.

An der Länge des *Headers* eines Paketes erkennt man, dass Übertragungsprotokolle mit kurzen Paketlängen einen erheblichen Overhead haben und damit die effektive Übertragungsrate drücken.

6.4.4 Adressierung im Internet

Wir wollen noch kurz auf Adressfragen eingehen, da diese infolge der Schichtung manchmal Verwirrung stiften. Dabei wird als Beispiel IP über Ethernet gewählt.

Schicht:	Protokoll-name	Adressbeispiel	Erläuterung
1/2 :	Ethernet	08:00:5a:51:19:53	08:00:5a ist der Hersteller IBM, Rest ist lfd. Nr.
3/4 :	IP	136.199.8.191	sog. Class-B-Netz, „136.199" ist die Uni Trier, „8" das Subnetz „acht“, „191" der Endknoten mit der Adresse „136.199. 8.191"
	IP RZPC65		„Name“ des Endknotens
4-7:	IP/WWW	uni-trier.de	Internetname des Class-B-Netzes 136.199.*.*

Auf der Ethernet-Schicht werden Adressen (im Prinzip) vom Hersteller vorgegeben (12 Byte), daher hat jeder Netzknoten mit Ethernet-Karten weltweit (im Prinzip) eine andere Adresse. Auf den höheren Schichten sind die Adressen zwangsläufig in der System-Software angesiedelt und dadurch manipulierbar. Daher ist es nützlich, wenn Benutzer im Netz keinen Zugriff auf das Betriebssystem ihres oder anderer Rechner oder sonstiger Netzknoten haben, was „Cracker“ zu umgehen versuchen.

Man unterscheidet im Internet (sehr große) Class-A-Netze mit Adressen, wie 101.*.*.*, (mittlere) Class-B-Netze mit Adressen, wie 123.66.*.* und (kleine) Class-C-Netze mit Adressen, wie 77.235.13.*.

Natürlich müssen auch die Internet-Adressen und -Namen (weltweit) einzigartig sein, wenn es kein Chaos im Internet geben soll. Daher werden diese von internationalen Agenturen wie IANA (Internet Assigned Numbers Authority) in USA, RIPE (Réseaux IP Européen) in Paris oder den Providern, wie dem DFN-Verein vergeben, die sich gegenseitig absprechen.

Die Zahl der Internet-Adressen ist auf 8 Byte beschränkt, daher ist ein „IPV6" in Erprobung, das mit 12-Byte-Adressen arbeitet und auch in anderen Eigenschaften an neue Anforderungen angepasst wird z.B. zeitkritische synchrone Dienste für Sprache und Video. IPV6 in noch in der Entwicklung. Ob es sich durchsetzt, kann heute nicht beurteilt werden.

Für die Abbildung der Namen auf die Internet-Adressen gibt es eine Menge von *Nameservern*, die baumartig strukturiert sind, wie Abb. 157 zeigt. An der Spitze stehen 13 „Rootserver“, überwiegend in den USA, die identische Daten halten und wissen, welches die zuständigen Nameserver für die nächstniedrigeren Domain-Ebenen sind. Jeder Knoten im Netz, der kein Blatt ist, besitzt einen „Default Name Server“ und i.d.R. mehrere „Secondary Name Servers“ mit Kopien der Adressen. Bei einem Sendewunsch eines Blattes wird zuerst bei einem lokalen Nameserver (per Broadcast) die Internet-Adresse des Empfängers abgefragt.

Der Nameserver hat sie entweder im Cache oder fragt auf der nächst übergeordneten Ebene nach, bis sich ein Nameserver meldet und die Adresse der angefragten Domain zurück liefert. Diese

wird dann an den anfragenden Endknoten gesendet, worauf dieser seine Pakete mit der richtigen IP-Adresse in das Netz schickt. Die Nameserver halten die Adressen der eigenen Domain und im Cache die letzten angefragten Namen, die nach einigen Stunden wieder gelöscht werden.

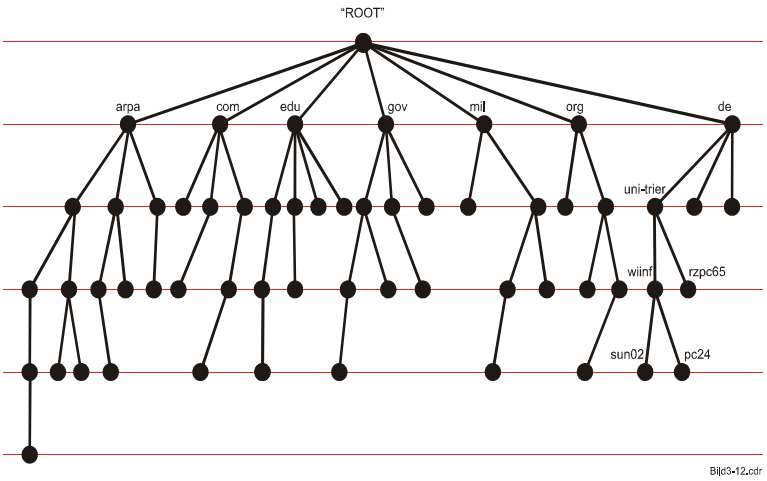

Abbildung 157: Struktur des Domain Name Server Raums

Nicht nur Name-Server sondern auch andere - z.B. File-Server - werden häufig über Protokolle, die *Broadcasts* verwenden, im Netz angesprochen. Bei kleinen Netzen ist das unschädlich. Da diese „Rundsprüche“ aber von Routern und Switches im Netz durchgelassen werden müssen, kann in großen Netzen ein erheblicher Datenverkehr generiert werden, der durch sorgfältige Netzplanung (Abriegeln der Domänen nach außen und Zugriffsbeschränkungen auf Server außerhalb der eigenen Domäne) in Grenzen gehalten werden muss.

6.5 Weitverkehrsnetze (WANs)

In den letzten Abschnitten haben wir uns bereits mit dem Internet beschäftigt und weltweite Betrachtungen angestellt. Tatsächlich lassen sich lokale Netze und Weitverkehrsnetze systematisch nicht trennen, da die Algorithmen und Probleme sich gleichen. Im Wesentlichen ist die Unterscheidung historisch begründet, wobei die Weitverkehrsnetze aus den Fernmeldenetzen hervorgegangen sind. Dementsprechend sind andere Normen gültig und es müssen Schnittstellen zwischen den Technologien vorhanden sein. Auch hier ist die technische Entwicklung sehr dynamisch und was heute aktuell ist, kann morgen veraltet sein. Im Folgenden wollen wir einige aktuelle Technologien betrachten. Dabei beschränken wir uns auf die unteren Schichten des ISO-OSI-Modells, da die oberen (z.B. die Internet-Suite) sich nicht von lokalen Netzen unterscheiden.

6.5.1 Analoge Modems

Modems (Modulator-Demodulator) dienen dem Weitverkehr über (asynchrone) Telefonnetze oder über (synchrone) Standleitungen, bzw. von der Telekom geschaltete feste virtuelle Verbindungen. Um Datenübertragung über Telefonleitungen zu betreiben, muss man sich an die dort üblichen Normen halten, z.B. innerhalb der Bandbreite von 300Hz-3400Hz mit seinen Signalen bleiben. Weiterhin müssen Modems die normalen Wählvorgänge im Telefonnetz beherrschen, um entfernte Partner anzuwählen und selber angewählt zu werden.

Um über die begrenzte Bandbreite vernünftige Datenströme zu schleusen, wird eine komplizierte Modulation angewendet, die eine Mischung aus Phasen- und Frequenzmodulation ist.

Moderne Modems testen die Leitungsqualität und schalten bei zu hohen Fehlerraten automatisch auf Protokolle mit geringeren Übertragungsgeschwindigkeiten und robusteren Fehlerkorrekturverfahren um, manche sogar nach gewisser Zeit wieder zu schnelleren Verfahren zurück. Die Normung der diversen Protokolle liegt bei der ITU-T und umfasst die Schichten 1 und 2. Das gängige Protokoll heißt V.34 mit bis zu 28,8 kbit/s. Wird durch Datenkompression (mit V.42bis) der tatsächliche Datenstrom reduziert, so lassen sich höhere Übertragungsraten bis 57 kBit/s (je nach Art der übertragenen Daten) erreichen.

ISDN und möglicherweise xDSL machen der Modemübertragung über analoge Leitungen inzwischen massiv Konkurrenz.

6.5.2 ISDN

ISDN (integrated services digital network) ist ein Dienste integrierendes Weitverkehrs-Digitalnetz. ISDN integriert verschiedene Dienste: Telefon, Telefax , Teletex , Datex-J, Bildtelefonie und Datenübermittlung.

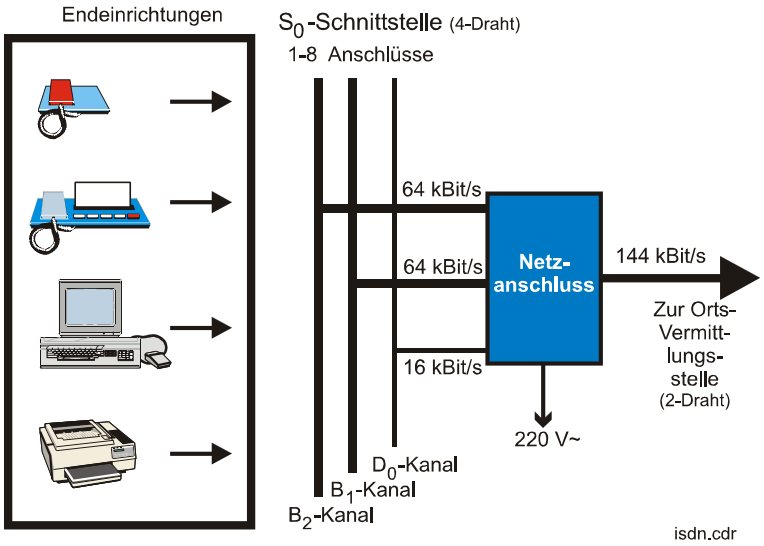

Abbildung 158: ISDN-Struktur auf Hardware-Ebene

Der *Basisanschluss* hat eine sog. S_0-Schnittstelle, bestehend aus zwei Basiskanälen (B-Kanäle) mit je 64 kbit/s, sowie einem Steuerkanal (D-Kanal) mit 16 kbit/s. In den beiden B-Kanälen können gleichzeitig zwei unterschiedliche Dienste mit einer Bitrate von 64 kbit/s über eine Leitung bedient werden.

Neben dem ISDN-Basisanschluß gibt es den Primärmultiplexanschluß mit der S_{2M}-Schnittstelle. Dieser besteht (im Euro-ISDN) aus 30 B-Kanälen und zwei D-Kanälen (64 kbit/s) und stellt eine Netto-Nutzdatenrate von 30 x 64 kbit/s, entsprechend 1,92 Mbit/s zur Verfügung. Die Nutz- und Steuersignale werden in einem Zeitrahmen, dem sog. 2-Mbit/s-Rahmen, zusammengefasst. Der Primärmultiplexanschluß hat eine Gesamtübertragungsrate von 2,048 Mbit/s (E1-System im Euro-ISDN). In USA besteht der Primärmultiplexanschluß aus 23 B-Kanälen und einem D-Kanal, was einer Nutzdatenrate von 1,544 Mbit/s entspricht (DS -Übertragungsschnittstelle).

ISDN unterscheidet zwischen drei Verbindungsarten: Die leitungsvermittelte Verbindung über den B-Kanal mit dem 1TR6-Protokoll und Euro-DSS-1-Protokoll, die paketvermittelte Verbindung über den B-Kanal mittels DSS-1 sowie die paketvermittelte Verbindung über den D-Kanal mit dem Euro-DSS-1. Weiterhin lassen sich mehrere S_0-Schnittstellen bündeln, so dass die maximale Übertragungsgeschwindigkeit im Euro-ISDN bei der einer S_{2M}-Schnittstelle von 1,92 Mbit/s (30 S_0-Schnittstellen parallel) liegt.

6.5.3 ADSL

ADSL (asymmetrical digital subscriber line) ist ein Übertragungsverfahren für die Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung über normale Telefonverkabelungen. Das zu übertragende Signal wird in diverse Teilsignale unterteilt, die über verschiedene Trägerfrequenzen beispielsweise mittels einer diskreten Mehrtonmodulation (DMT) übertragen werden. Zu diesem Zweck wird bei ADSL das zur Verfügung stehende Frequenzband in Teilbänder für die Übertragung von Videodaten und Telefonverkehr unterteilt, wobei beide Frequenzbänder unterschiedliche Bandbreiten haben - daher auch dieBezeichnung asymmetrisch - und die durch ein Sicherheitsband getrennt sind.

Mit ADSL sind Übertragungen bis zu 6 Mbit/s über normale Telefonkabel realisierbar, für die bidirektionale Übertragung steht ein zweites Frequenzband mit Übertragungsgeschwindigkeiten bis zu 640 kbit/s zur Verfügung. Daher im Namen das “asymmetrisch”. ADSL wird für interaktives Fernsehen im Endgerätebereich und neuerdings in Testbeds für die schnelle Datenübertragung eingesetzt. Die Entfernung bis zum nächsten Knoten kann für Übertragungsgeschwindigkeiten über 1,5 Mbit/s 4 km betragen, darunter 6 km. ADSL wurde von der ANSI (American National Standards Institute) in T1E1.4 und auch von dem ETSI (European Telecommunication Standards Institute) in drei Versionen genormt, die sich hinsichtlich der Codierung ,der Entfernung und der Übertragungsgeschwindigkeit unterscheiden. ADSL 1 nutzt zur Codierung QAM (Quaternäre Amplitudenmodulation). Es bietet Übertragungsgeschwindigkeiten von 1,536 Mbit/s, zusätzlich einen Steuerkanal mit 16 kbit/s. ADSL 2 arbeitet mit DMT (Discrete Multitone Technology) und kann mit MPEG-2 (Moving Picture Experts Group Coding 2) komprimierte Videosignale mit 3,072 Mbit/s und 4,608Mbit/s übertragen. Darüber hinaus steht ein Steuerkanal mit 640 kbit/s zur Verfügung. Dieses Verfahren kann bis zu Entfernungen von 3 km eingesetzt werden. ADSL 3 eignet sich für Entfernungen bis zu 1,8 km und Übertragungsgeschwindigkeiten bis zu 6,144 Mbit/s.

6.5.4 HDSL / SDSL

HDSL (high bitrate digital subscriber line) ist ein Übertragungsverfahren für die Vollduplex-Übertragung mit Übertragungsgeschwindigkeiten von 1,544 Mbit/s auf T-1-Leitungen bzw. 2,048 Mbit/s auf E-1-Leitungen. HDSL kann ebenso wie die anderen xDSL-Verfahren (ADSL , SDSL , VDSL) auf herkömmlichen UTP-Kabeln zwischen Ortsvermittlung und Kunde übertragen werden, es werden allerdings zwei oder drei Adernpaare benötigt. Dieses Übertragungsverfahren ermöglicht eine Überbrückung von bis zu 5 km. Als Leitungscode wird die 2B/1Q-Codierung (2 Bit => quaternäres Signal, z.B. 4 Phasensprünge zu 90˚) verwendet.

SDSL (single line digital subscriber line) gehört zu den weniger bekannten xDSL-Verfahren, wie ADSL , HDSL und VDSL, und ähnelt im wesentlichen dem HDSL-Verfahren. Wie HDSL ist SDSL ein Verfahren für Vollduplex-Übertragungen mit symmetrischen Übertragungsgeschwindigkeiten von 1,544 Mbit/s (T-1-Leitung) bzw. 2,048 Mbit/s (E-1-Leitung). Zur Übertragung wird allerdings im Gegensatz zu HDSL nur ein zweiadriges UTP-Kabel benötigt. Die maximale Entfernung liegt bei 3,5 km. Die Standardisierung von SDSL befindet sich in der Entwicklung.

6.5.5 VDSL

Die *VDSL*-Technik (very high speed digital subsciber line) befindet sich noch in der Entwicklung. Sie stellt eine Ergänzung zu ADSL dar, hin zu höheren Übertragungsgeschwindigkeiten. Mit VDSL werden im Downstream, also vom Knoten zum Anwender, Übertragungsgeschwindigkeiten von 13 Mbit/s bis zu 52 Mbit/s über ein UTP-Kabel über 1,5 km respektive 330 m erreicht. Die Übertragungsgeschwindigkeiten für den Upstream liegen zwischen 1,5 Mbit/s und 2,3 Mbit/s.

6.5.6 SDH

SDH (Synchronous Digital Hierarchy) (in USA als ähnliche Norm *SONet* => Synchronous Optical Network) ist ein 1988 vom ITU standardisiertes Übertragungssystem, das im Bereich der Weitverkehrsnetze die derzeit bestehende, konzeptionell veraltete Übertragungsinfrastruktur, auf der Basis von PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy) (Plesiochron => synchron innerhalb festgelegter zeitlicher Toleranzen) ablöst. Für diese Hochgeschwindigkeitsnetze war auch der Name B-ISDN (Breitband-ISDN) gebräuchlich.

Die Netzwerkmanagement-Funktionen (z.B. zur Bereitstellung logischer Übertragungskanäle besonderer Dienstgüte) werden über speziell für diesen Zweck reservierte Kanäle (ECC , Embedded Control Channel) übertragen.

SDH ist eine flexible Multiplexstruktur mit folgenden Vorteilen. Erstens können Bitrahmen mit niedrigeren Übertragungsgeschwindigkeiten von beispielweise 2 Mbit/s und verschiedener Verkehrsarten, wie ATM, in einem Übertragungsrahmen höherer Hierarchie gebündelt werden. Zum anderen bietet das SDH-relevante Netzwerkmanagement kürzere Bereitstellungszeiten und eine höhere Übertragungsqualität.

Die derzeit eingeführten SDH-Systeme basieren auf drei verschiedenen Hierarchien: der amerikanischen und der japanischen, die jeweils von einem 24-Kanalsystem und einer Übertragungsgeschwindigkeit von 1,544 Mbit/s (C-11) ausgehen sowie der europäischen, die von der ITU in den Empfehlungen G.707, G.708, G.709 festgelegt wurde, und auf 30 Kanälen basiert. Die Übertragungsgeschwindigkeit beträgt 2,048 Mbit/s (C-12). Für die Informationsübertragung verwendet SDH sog. STM-Module (Synchronous Transport Module), die zwischen den Netzknoten transportiert werden und in die virtuelle Container (VC) eingelagert sind. Diese virtuellen Container übernehmen den Ende-zu-Ende-Transport der Daten. Das Grundelement STM-1 hat eine Übertragungsrate von 155,52 Mbit/s. Die höheren Übertragungsgeschwindigkeiten werden immer aus einem ganzzahligen Vielfachen der Grundrate gebildet und liegen derzeit bei 622 Mbit/s, 2,5 Gbit/s und 10 Gbit/s. In einigen Jahren wird 40 Gbit/s erwartet.

Der SDH-Frame (STM) besteht aus neun Zeilen zu je 270 Bytes, davon 9 Bytes Overhead, was 2430 Bytes Länge bedeutet. Bei der Übertragung werden die Bytes zeilenweise nacheinander gesendet. Aus der Bitrate und der Anzahl der Bits pro Frame ergibt sich eine Framefolgefrequenz von 8 kHz bzw. eine Dauer von 125 µs. Jedes Byte eines Frames hat somit eine Übertragungsgeschwindigkeit von 64 kbit/s. Damit lassen sich also 2349 digitale Sprachkanäle quasiparallel übertragen. Die SDH-Spezifikation beschränkt sich auf die Beschreibung von Übertragungsrahmen auf der OSI-Schicht 1.

6.5.7 ATM

ATM (asynchronous transfer mode) benutzt zum Datentransport Datenpakete fester Länge, sogenannte *Zellen*, die sich wesentlich effizienter und schneller als Datenpakete mit variablen Längen in Vermittlungseinheiten verarbeiten lassen. Insgesamt gesehen, ist es ein sehr komplexes System für die unterschiedlichsten Anwendungen und wird sowohl im LAN als auch im WAN eingesetzt. Es erlaubt (trotz seines Namens) sowohl asynchrone Übertragung als auch garantierte isochrone Übertragung (z.B. für Sprache und Video) von Daten. Ein (dreidimensionales) Schichtenmodell zeigt Abb. 159.

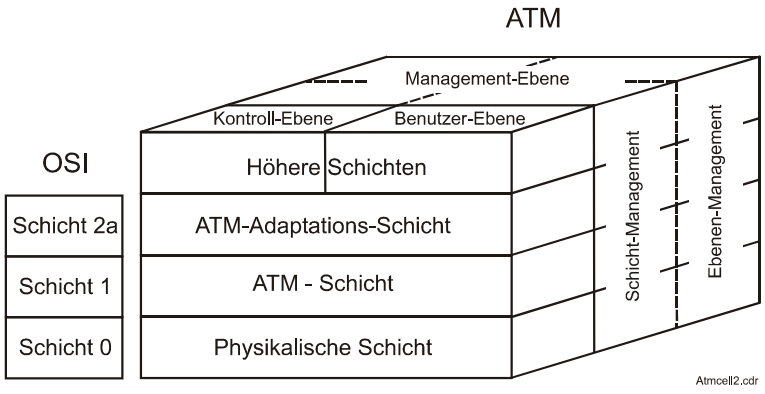

Abbildung 159: ATM-Schichten

ATM kann große Applikationsfelder wie z.B. Multimedia -Applikationen interaktives Fernsehen, Bildfernsprechen, Videomail abdecken und vor allem unterschiedliche Übertragungsgeschwindigkeiten und Netzausdehnungen realisieren. Diese Möglichkeiten bietet ATM aufgrund zweier hervorragender Eigenschaften: Zeittransparenz und Skalierbarkeit.

Die Normierung von ATM wird getragen von der ITU -TS (früher CCITT) Subgroup (SG) XIII und durch die ANSI -Arbeitsgruppe T1. Neben diesen beiden Gremien hat sich das ATM-Forum zur Aufgabe gemacht, die Einführung von ATM durch Interoperabilitäts-Spezifikationen zu beschleunigen.

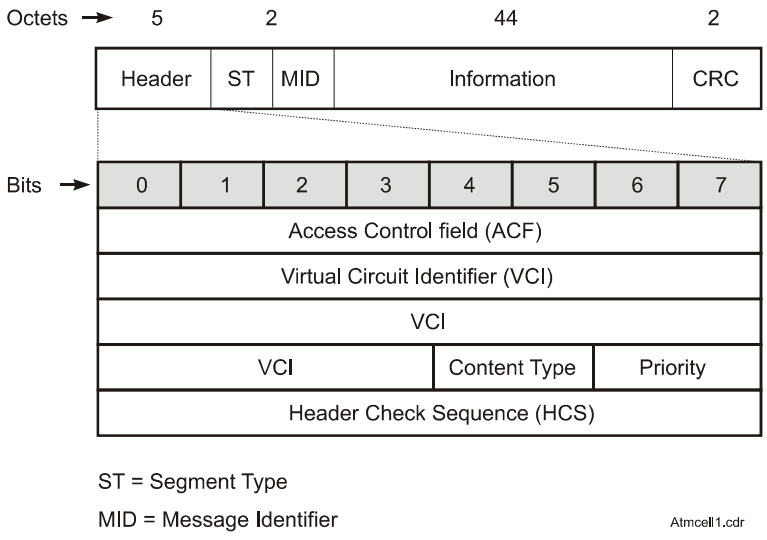

Abbildung 160: ATM-Zelle

Das Zellenkonzept ermöglicht massiv parallele Architekturen von Zellen-Vermittlungs-Einheiten, den sog. ATM-Schalteinheiten. ATM ist als eine der wenigen Technologien für Hochgeschwindigkeitsnetze in der Lage, Datenströme unterschiedlicher Bitraten flexibel zu übertragen und zu vermitteln. Im Weitverkehr wird ATM gegenwärtig über SDH-Leitungen abgewickelt. Der augenblickliche Stand sind Übertragungsgeschwindigkeiten von 2 Mbit/s, 34 Mbit/s, 155 Mbit/s, 622 Mbit/s. An 2,5 Gbit/s-Techniken wird gearbeitet.

Ein Datenstrom, der über das ATM-Netz gehen soll, wird zunächst unabhängig von seiner Bitrate in Datenpakete von 53 Byte Länge gepackt (44 Byte Nutzinformation) (s. Abb. 160). Die Übertragung erfolgt in synchronen Zeitschlitzen, ähnlich wie das Zeitmultiplex nach Abb. 144. Die ATM-Zellen können asynchron freie Zeitschlitze (Slots) belegen und werden den Übertragungskanälen nicht aufgrund der Position in einem festen Datenübertragungsrahmen zugeordnet.

Verschiedene Dienste in ATM können bestimmte Zeitkonditionen garantieren, wie es z.B. für Sprache erforderlich ist. Die einfachen Protokolle machen keine Fehlerkorrektur und sind daher schnell.

ATM eröffnet aufgrund seiner Architektur die Möglichkeit, Übertragungsgeschwindigkeiten bis nahe an die physikalischen Grenzen zu realisieren. Im Fall der Übertragung über Lichtwellenleiter steht dabei die enorme Übertragungsbandbreite von etwa 30 THz (10^{12} Hz) zur Verfügung. In Forschungslabors wurden schon ATM-Schalteinheiten mit Verarbeitungsgeschwindigkeiten bis zu 1 Tbit/s realisiert.

Infolge der vielfältigen Möglichkeiten von ATM sind die Vermittlungsgeräte komplex und daher teuer. Deshalb ist ATM im letzten Jahr (1998) von dem einfacheren Gigabit-Ethernet als Basis von lokalen Netzen überholt worden, zumal die damals verfügbaren Transportgeschwindigkeiten bei 1000 Mbit/s für Giga-Ethernet zu 155 Mbit/s für ATM bei günstigeren Preisen lagen. Da im Weitverkehr heute häufig SDH eingesetzt wird, ist ATM möglicherweise eine schon überholte Technologie, bevor sie überhaupt ausreifen konnte.

6.5.8 10-Gigabit-Ethernet

Im Juni 2002 ist ein neuer Standard für 10-Gigabit/s als Ethernet IEEE 802.3ae verabschiedet werden. Er soll vom Weitverkehrsnetz über LANs bis zur Gerätekopplung nutzbar sein und z.B. HIPPI (High Performance Parallel Interface) ersetzen können. Er betrifft nur die untersten Schichten des ISO-OSI-Modells und ist ab der Schicht 2 (MAC Layer) mit den anderen Ethernet-Normen identisch. Je nach Einsatzzweck sind 7 physikalische Schnittstellen vorgesehen, die auf Glasfasern basieren. Auch die Nutzung von Kupferkabeln wird untersucht. In Abb. 161 sind die untersten Schichten modelliert. 10-GBase-X steht für “extended”, also Stadt-Netze (MAN) bis 50 km, 10-GBase-R sind lokale Netze (LAN) und 10-GBase-W Weitverkehrsnetze (WAN). Auch die Verbindung mit Weitverkehrsprotokollen wie SDH

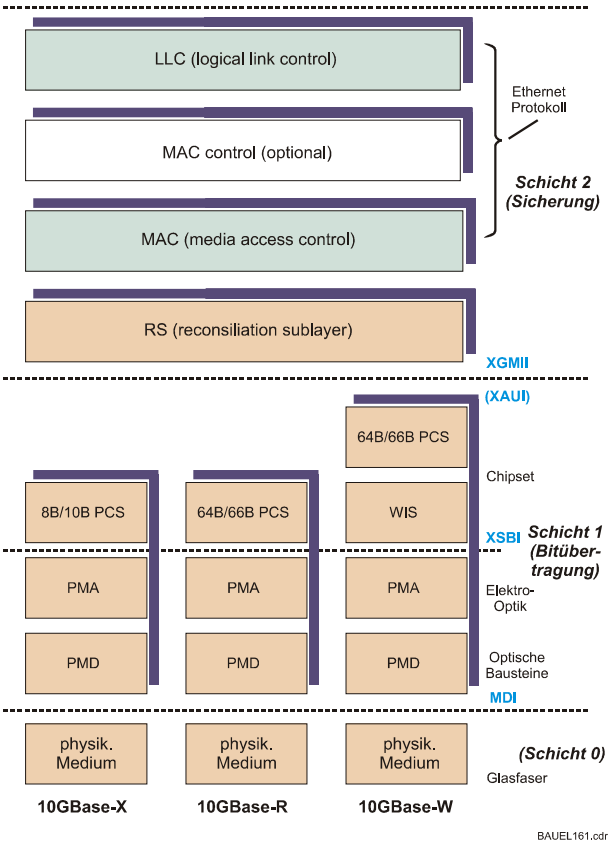

Abbildung 161: 10-Gigabit/s Ethernet (IEEE 802.3ae)

bzw. SONet ist vorgesehen, so dass hier ein einheitliches Protokoll von der Gerätekopplung bis zum Weitverkehr zu entstehen scheint. Da es sich um ein geswitchtes Netz handelt, entfallen auch hier die Kollisionsvorkehrungen.

6.6 Ausblick

Angesichts der rasanten Entwicklung im Bereich der Informationsübertragung ist jede Prognose recht fragwürdig. Die Übertragung von einfachen Texten (E-Mail mit 1 kB bis 10 kB Größe) allein ist längst nicht mehr interessant. Hierfür reichen die vorhandenen Modems samt Telefonleitungen aus. Heute gebräuchlich ist die Übertragung von Grafiken mit 100 kB bis 1 MB Größe, die schon wesentlich mehr Ressourcen benötigen. Musik-CDs sind ca. 650 MB groß, da dauert die Übertragung über ein modernes Modem mit 57 kbit/s schon 9.000 bis 10.000 Sekunden und Videos im MPEG-Format sind einige 10 bis 100 GB groß, also so nicht mehr übertragbar.

Die deutschen Hochschulen betreiben gegenwärtig *(2003)* über den *Deutsches Forschungsnetz e.V.* (DFN) ein Wissenschaftsnetz, das das G-WiN (Gigabit-Wissenschaftsnetz) mit SDH-Leitungen und Anschlussbandbreiten bis zu 2,4 Gbit/s mit Volumina bis zu 200 TByte/Monat für einzelne Hochschulen bereit stellt. Im Mai 1999 wurden im WiN insgesamt ca. 135 Tbyte übertragen. Im Jahr 2003 wurde die Schwelle von 1 PByte/Monat überschritten. Die Hochschulen haben aus der Vergangenheit einen jährlichen Zuwachsfaktor von 2,2 im Datenverkehr ermittelt. Sollten sich die erwarteten neuen Medien weiter durchsetzen, so ist mit deutlich höheren Zuwächsen zu rechnen, da die Übertragung von Bildern, Ton und Videos in *Teleteaching*, *Distance Learning* und *Videokonferenzen* erheblich höhere Datenraten und Datenmengen zur Folge hat als die gegenwärtig überwiegende Nutzung des WWW samt E-Mail und File-Transfer (ftp).

Diese Entwicklung wird sich auch im privaten Sektor durchsetzen, so dass Modems und ISDN nur noch eine kurze Lebensdauer haben und demnächst von ADSL/HDSL oder einer ähnlichen Technik ersetzt werden. Wesentlich ist dabei, dass die vergrabenen Telefonleitungen weiter benutzt werden können und die Vermittlungseinrichtungen der Telecom-Gesellschaften mit vertretbaren Kosten umrüstbar sind.

Im Bereich der Weitverkehrsleitungen wurden im Boom der neuen Medien zur Jahrtausendwende in großem Maße Glasfaserleitungen verlegt, so dass die Fernverkehrsgebühren rapide fallen. Insbesondere auf den Atlantikrouten herrscht ein scharfer Wettbewerb. Einige Firmen sind inzwischen deshalb auch schon in die Insolvenz gegangen.