Informatik-Spektrum (1984) 7: 221–236

Informatik Spektrum

© Springer-Verlag 1984

# Über Vor- und Nachteile der Datenpaketvermittlung im Vergleich zur Leitungsvermittlung

Bernhard Walke

Fachbereich Elektrotechnik der FernUniversität (GH) Hagen

**Zusammenfassung.** Der Beitrag erläutert einige wesentliche Unterschiede zwischen leitungs- und paketvermittelter Übertragung über Datennetze und begründet, unter welchen Umständen welche der Techniken kostengünstiger realisiert werden kann. Anschließend werden, unter dem Gesichtspunkt des Datenschutzes bei der Übertragung, die dafür in den Kommunikationsprotokollen notwendigen Vorkehrungen beschrieben. Es zeigt sich, daß die paketvermittelte Übertragung besonders schutzwürdiger Daten Einrichtungen in den Vermittlungsrechnern erfordert, die in öffentlichen Netzen nicht verfügbar gemacht werden können.

**Schlüsselwörter:** Daten-Paketvermittlung X.25, Leitungsvermittlung, Leistungs-/Kostenvergleich, Datenschutzmaßnahmen, Sicherheit bei der Kommunikation

**Summary.** After elaborating some substantial differences between line and packet switching for communication via data networks it is demonstrated, under which circumstances which technique performs more cost-effective. The aspect of data privacy during transmission is considered and some mechanisms are described to enhance the related communication protocols appropriately. It is demonstrated that transmission of highly sensitive data via packet switching networks requires provisions as part of the switching nodes, which are not available in public networks.

**Key words:** Packet switching X.25, Line switching, Cost performance comparison, Communications privacy provisions, Secure data communication

**Computing Reviews Classification:** C.2.0, C.2.2, C.4, D.2.0

## 0. Einleitung

Paketvermittlungs(PV)-Netze sind eine Ergänzung bestehender Datenübertragungsnetze. Ihr stürmisches Vordringen in Nordamerika und Europa erübrigt fast eine Diskussion ihrer Nützlichkeit. Grundprinzip der PV-Technik ist die Anwendung des statistischen Multiplexens der Netzleitungen zwischen Vermittlungsknoten, wobei

- auf Leitungen zwischen Netzknoten nacheinander Pakete verschiedener Quelle/Ziel-Verbindungen derart übertragen werden, daß auf aufeinanderfolgenden Leitungsabschnitten asynchrone Zeitschlitze belegt werden;
- Pakete in jedem Knoten auf einen freien Übertragungsplatz der Leitung zum nächsten Knoten warten dürfen, also keine Blockierung auftritt.

Dagegen existiert bei der digitalen Zeitmultiplex-Leitungsvermittlungs(LV)-Technik eine feste Zuordnung von Übertragungszeitschlitzen jedes Leitungsabschnittes zu Verbindungen, und die Übertragung auf jeder Quelle/Ziel-Verbindung ist synchron, d.h. es kann nicht gewartet werden.

Die bisherige technische Entwicklung der Datentechnik hat eine Vielfalt von unterschiedlichsten Endgeräten (Fernschreiber, verschieden intelligente Terminals, von Lochstreifen- und Lochkartengeräten bis hin zum Sichtgerät, Rechnerperipherie) und Rechnern hervorgebracht. Der fortschreitende Zusammenschluß der Daten-Verarbeitungs- und Endgeräte macht gegenseitige Absprachen und Anpassungen nötig, die in geschlossenen Bereichen noch überschaubar bleiben, beim Übergang zur offenen Kommunikation aber Einheitlichkeit verlangen [34]. Deshalb wurde mit der CCITT-Empfehlung X.25 eine Schnittstelle zwischen dem Teilnehmer-Endgerät und dem öffentlichen PV-Netz standardisiert. Abschnitt 1 gibt einen Überblick über wichtige Aspekte der Datenkommunikation. Leistungs- und Kostenvergleiche prognostizieren die Existenzberechtigung von LV und PV nebeneinander und insbesondere in integrierten Netzen. Die entsprechenden Arbeiten werden in Abschnitt 2 behandelt.

PV wirft gegenüber LV erheblich größere Probleme im Bereich des Datenschutzes auf, die in manchen Anwendungen auch durch Verschlüsselungsmaßnahmen nur unbefriedigend gelöst werden können. Abschnitt 3 diskutiert Lösungsansätze.

# 1. Überblick

Dieser Abschnitt behandelt wichtige Gesichtspunkte der Datenübertragung nach dem PV-Verfahren und stellt Beziehungen zum LV-Verfahren her.

## *1.1. Netz-Aspekte*

*Geschlossene Lösungen (Privatnetze).* Typisch für diese Systeme ist, daß nur Rechner und Endgeräte eines Herstellers verbunden werden können. Einige dieser Netze verfügen neuerdings über die Schnittstelle X.25, um den Zugang über öffentliche Netze zu ermöglichen. Wegen der Verteilung der Kommunikationsfunktionen (Steuern, Überwachen, Wiederanlaufen, Zwischenspeichern usw.) auf verschiedene Komponenten sind spätere Änderungen erschwert.

Beispiele für geschlossene Bereiche sind die privaten Datennetze der verschiedenen Rechnerhersteller, beispielsweise

- Systems Network Architecture (SNA) von IBM [37]
- TRANSDATA von Siemens
- Distributed Communication Architecture (DCA) von Sperry Univac [38]
- Distributed Systems Environment von Honeywell [36]
- Distributed System Network (DSN) von Hewlett Packard
- Digital's Network Architecture (DNA) von Digital Equipment [39] für DECNET [35]
- Communication Network Architecture (CNA) von SEL/ITT
- Network Program (NP) von Control Data [40]
- XODIAC von Data General [40]
- Nixdorf Communication Network (NCN) [40]
- N20DS von Philips [40]

*Offene Lösungen (Gemeinschaftsnetze).* Für die offene Kommunikation zwischen Produkten unterschiedlicher Hersteller sind am Netzrand (zwischen Datenendeinrichtung DEE und Datennetz) Anpassungen an netzeinheitliche Standards nötig. Die Datenübertragungsdienste im Netz müssen transparent sein, d. h. die an der Netzeingangs-Schnittstelle eingegebenen Steuer- und Informationsdaten müssen an der Netzausgangs-Schnittstelle unverfälscht erscheinen.

*Warum PV-Netze.* Prognosen über die Marktentwicklung in Europa sagen bis weit über das Jahr 1985 eine Reihe von uneinheitlichen Datenendgeräte-Typen voraus [1]. Die heute beobachtbare weltweite Nutzung von PV-Netzen wird die Entwicklung der Datenendgeräte beeinflussen und damit den Bestand der PV-Netze stabilisieren.

Als wesentlicher Vorteil der PV-Technik gilt die Fähigkeit, durch Anpassungsfunktionen freizügigen Verkehr zwischen verschiedenartigen Endgeräten und Rechnern zu ermöglichen. Darüber hinaus werden die bestehenden Fernmeldenetze um zusätzliche Dienstmerkmale auf der Basis logischer Kanäle ergänzt. Im einzelnen werden meistens folgende Vorteile der PV-Technik gegenüber fest geschalteten bzw. vermittelten Datennetzen genannt [2]:

- Erweiterte Kompatibilität zwischen den Teilnehmern durch genormte Protokolle im Bereich des Datentransports,
- Gewinn an Flexibilität in Richtung offener Systeme,
- Erweiterung der Kommunikationskreise,
- neue, bisher nicht vorhandene Leistungsmerkmale des Datennetzes wie etwa Geschwindigkeitswandlung durch das Netz, Prozedurwandlungen durch Anpassungen im Netz und Vielfachnutzung einer Anschlußleitung mit mehreren logischen Kanälen,
- Flußsteuerung mit Garantie eines vereinbarten Datendurchsatzes,
- gesicherte Übertragungsverfahren im Netz,
- wirtschaftliche Anwendungen durch adäquate Betriebsmittelausnutzung und Verzicht auf Vorhaltung festgeschalteter Netze,
- Trend zur Vereinheitlichung im Bereich der höheren Protokolle für spezielle Anwendungen,
- Trend zur Kostenreduzierung.

*Nachteile der PV-Technik.* Während bei der Leitungsvermittlung Quelle und Ziel nur *Nutzdaten* austauschen, erfordert die PV-Technik die Übertragung von *Zusatzdaten* für Statusmeldungen, zur Flußsteuerung und zur Adressierung von Paketen. Dieser Zusatzverkehr kann 20% des Nutzverkehrs ausmachen [16]. Für die Übertragung großer zusammenhängender Datenmengen ist die PV-Technik weniger geeignet. Der Vermittlungsaufwand ist bei PV deutlich größer als bei LV.

*Zusatzleistungen bei Leitungswähl-Netzen.* PV-Netze setzen ein Datenübertragungsnetz voraus und betreiben dieses mit Hilfe von überwiegend durch das CCITT genormten *Protokollen*. Die Leistungsmerkmale von PV-Netzen sind im Prinzip auch durch Leitungsvermittlungsnetze erzielbar, die mit Zusatzfunktionen ausgestattet sind (value-added carrier). Beispiele dafür sind das Advanced Communications System (ACS) von AT & T [4] und ein ähnlicher von Nippon Telegraph & Telephone Public Corporation angekündigter Dienst [5]. Die Wählleitungen als Grundlage des Übertragungsnetzes werden dabei fest zwischen seinen Vermittlungsknoten geschaltet. Nach Bedarf werden zusätzliche Leitungen belegt. Als Basisdienst wird PV angeboten. Die Zusatzleistung besteht in Geschwindigkeits- und Prozedurumsetzungen für die Teilnehmer.

*Merkmale von heutigen Datennetzen.* Heutige Datenübertragungsnetze werden fast ausschließlich auf der Basis von für analoge Sprachübertragung konzipierten Netzen realisiert. Dies erfordert, in der Regel am Netzrand beim Endgerät, eine Modem (Modulator/Demodulator) genannte Einrichtung zur Umsetzung der digi-

**Tabelle 1.** Merkmale von Datennetzen (nach [15])

| Merkmal | Festnetz | Leitungsdurchschaltenetz | Paketvermittlungsnetz |
|---|---|---|---|
| *Verbindungstyp* | | | |
| Physikalische Verbindung | fest | Wählverbindung (Direktruf, Kurzwahl, Adreßwahl) | – |
| Logische Verbindung | – | – | Permanente virtuelle Verbindung, Wählverbindung (Kurzwahl, Adreßwahl) |
| *Güte* | | | |
| Nachrichtenlaufzeit | extrem kurz | extrem kurz | kurz |
| Übertragungsgüte | $10^{-6}$ bis $10^{-7}$ | $10^{-6}$ bis $10^{-7}$ | $\approx 10^{-11}$ |
| Verbindungsaufbaudauer | – | $<1$ s | $<1$ s |
| Verfügbarkeit | Einzelverbindung | Umwege möglich | Umwege möglich |
| Überwachung im Netz (Prüfschleifen) | ja | ja | ja |
| Leitungskonzentration | eigene Einrichtungen | ja | ja |
| *Funktionen* | | | |
| Sammelanschluß | – | ja | ja |
| Mehrkanalanschluß | – | – | ja |
| Geschlossene Teilnehmerbetriebsklassen | – | ja | ja |
| Anschlußkennung | – | nur bei DÜ-Prozedur | ja |
| Gebühreninformation, Hinweisgabe | – | nach Netzstandard | ja |
| Geschwindigkeitswandlung | – | mit Zusatzeinrichtungen möglich | ja |
| Prozedurwandlung | – | | ja |
| Anpassung von Datenendgeräten | – | | ja |

talen Signale des Endgerätes in analoge Signale für die Übertragung im Netz. Insbesondere für höhere Datenraten (von 4,8 kbit/s an) stellen Modems einen spürbaren Kostenfaktor dar, der mit der Einführung des dienstintegrierten digitalen Netzes ISDN (integrated services digital network) völlig verschwinden wird. Dieses Netz wird digitale Teilnehmerschnittstellen für Sprach- und Datenübertragung haben.

Tabelle 1 stellt Merkmale zukünftiger Datennetze nebeneinander, wie sie vom Teilnehmer als erbrachter Dienst feststellbar sind. Die Merkmale sind, bis auf Mehrkanalanschluß, alle sowohl in LV- wie PV-Netzen realisierbar, vorausgesetzt, LV-Netze werden entsprechend ausgestattet.

*Leistung und Kosten bzw. Gebühren von Datennetzen.* Aus Tabelle 1 wird nur wenig deutlich, daß die erbrachten Dienste netzintern bei LV- bzw. PV-Netzen auf sehr unterschiedliche technische Weise erbracht werden, woraus – je nach Datenübertragungsanwendung – sehr unterschiedlicher netzinterner Übertragungs- und Vermittlungsaufwand resultiert. Unterschiedlicher Aufwand müßte, bei entsprechender Kalkulation, auch zu unterschiedlichen Preisen führen, was die heutige Gebührenpraxis der öffentlichen Träger (PTT) von Datennetzen nicht unbedingt bestätigt [3, 5, 21, 22]. Stattdessen begünstigt die Gebührenpolitik der PTT überwiegend (durch entfernungsabhängige Tarife) Anwendungen der Datenverarbeitung über PV-Netze.

Der Schwerpunkt dieses Beitrags liegt auf dem Leistungs- und Kostenvergleich von LV und PV, wie er sich anhand des Kapazitätsbedarfs an Übertragungs- und Vermittlungsleistung führen läßt. Die entsprechenden Ergebnisse waren auch eine wichtige Rechtfertigung für die Einführung der PV-Technik durch die verschiedenen Netzträger. Diesem Trend ist schließlich das CCITT durch Vorlage von Standards gefolgt. Kritiker der Gebührenpolitik der PTTs bemängeln, daß die theoretischen Ergebnisse in der Praxis nicht immer bestätigt werden. Hier spielen offenbar auch marktpolitische Gesichtspunkte eine Rolle.

*Trends für Datennetze.* Theoretische Untersuchungen [6, 8] haben gezeigt, daß in Zukunft sowohl Leitungsvermittlungs- als auch PV-Netze von der Kostenseite und vom Zeitverhalten her ihre Berechtigung haben werden. Auf lange Sicht wird man wohl integrierte Netze in Zeitmultiplex-Technik haben, in denen leitungsvermittelte Sprach- und Datenkanäle (als synchroner Verkehr) neben Kanälen von PV-Netzen (asynchroner Verkehr) in demselben Übertragungszeitrahmen existieren, wobei das PV-Netz dynamisch (nach seinem Verkehrsaufkommen) mehr oder weniger Kanäle belegt. Vermittlungsknoten dieses Netzes können sowohl Leitungen als auch Pakete vermitteln [9–11, 19].

Standards für ein derartiges ISDN befinden sich noch im Entwurfsstadium [41], jedoch besteht bereits Einigkeit über viele wesentliche Merkmale [42, 43]. Man rechnet heute mit der schrittweisen Einführung des ISDN in der 2. Hälfte der 80er Jahre.

*Paketierte Sprache in Datennetzen.* Erfahrungen aus dem TASI-Projekt [12, 43] legen es nahe, die akzeptablen Ergebnisse bei der Übertragung von paketierter Sprache auf Bündeln mit sehr vielen Leitungen (50 bis 100 Sprachkanäle) mit der Datenpaket-Übertragung zu kombinieren. Dadurch werden die hohen, aber wenig genutzten Kapazitätsanforderungen der Sprachübertragung kostengünstig erfüllbar, denn momentan freie Kapazität kann für die Datenpaket-Übertragung genutzt werden [13, 14].

*Technologische Trends und ihr Einfluß*. Nach dem heutigen Stand der Technik werden Vermittlungsknoten sowohl leitungs- als auch paketvermittelter Netze voll elektronisch, rechnergesteuert ausgeführt. Die Separierbarkeit in einzelne Teilaufgaben beim Vermittlungsvorgang begünstigt den Einsatz verteilter Intelligenz im Vermittlungsknoten, wie sie preisgünstig mit den Mikroprozessoren verfügbar ist. Der Kostenschwerpunkt bei der Datenübertragung verlagert sich damit eindeutig auf die Übertragungskanäle; und deshalb strebt man zunehmend (durch Mischung verschiedener Verkehrsarten und durch Speicherfähigkeit der Netzknoten) ihre bessere Auslastung an [20]. Dieser Gesichtspunkt spielt besonders in Ländern mit größerer geographischer Ausdehnung eine Rolle, bekommt in Europa aber mit dem Anwachsen von internationalem Datenverkehr zunehmend auch Gewicht.

*Normung*. Mit Fragen der Nachrichtenübertragung und -aussendung befassen sich neben den Post- und Telegraphie-Verwaltungen

CCITT – Comité Consultatif International de Télégraphie et Téléphonie
CEPT – Conférence Européenne des Postes et Télecommunications

auch Behörden sowie Hersteller- und Benutzerorganisationen, z. B.

ISO/TC 97/SC6 – International Standardisation Organisation (Technical Com. 97/Subcom. 6)
DNA – Deutscher Normenausschuß
FNI – Fachnormenausschuß Informationsverarbeitung (im DNA)
INWG – International Network Working Group
ECMA – European Computer Manufacturer Association

Die Normung bei dem CCITT hat einen Stand erreicht, der die wesentlichen Grundfunktionen von PV-Netzen festlegt. Diese sind (s. Abb. 1, 2):

X.25 – Protokoll (= Schnittstellenbeschreibung) am Netzrand zwischen Datenendeinrichtung (DEE) und Datenübertragseinrichtung (DÜE). Die DEE kann über einen Rechner (PAD = packet assembly disassembly facility) zur Prozedur-Umsetzung vom Start-Stop zum Paketmodus angeschlossen sein.
X.28 – Protokoll zwischen einer Start-Stop-DEE und einer PAD.
X.3 – Funktionen und Parameter der PAD.
X.29 – Protokoll zwischen Paket-DEE und PAD.
X.75 – Protokoll zwischen internationalen PV-Netzen, das dort die Regeln von X.25 weiter vollzieht.
X.87 – Leistungsmerkmal von PV-Netzen, das die Einrichtung von geschlossenen Netzen für Teilnehmergruppen erlaubt und den Zugang zu Teilnehmern des offenen Netzes verhindert.
X.121 – Internationales Numerierungsverzeichnis für öffentliche Datennetze; dient deren eindeutiger Identifizierung.

Diese Normen sind einerseits offen für Ergänzungen, decken andererseits aber noch nicht alle Problemkreise ab. Es fehlt insbesondere eine Norm für den Anschluß von synchronen DEE, die nicht im Paketmodus arbeiten, an das PV-Netz (s. Abb. 2). Die Darstellung komplexer Netze mit ihren Funktionen, Hauptbausteinen

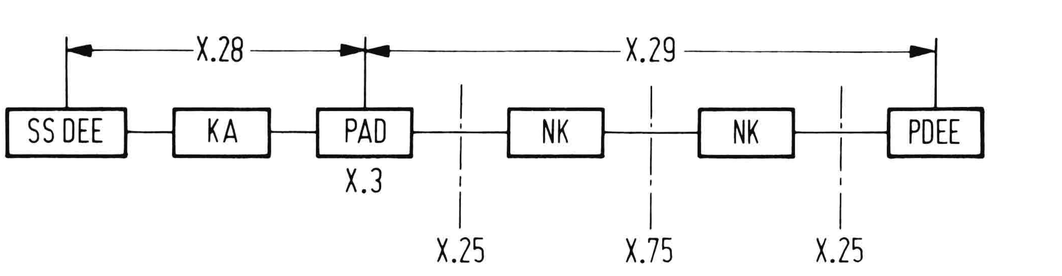


**Abb. 1.** Verbindung einer asynchronen (= Start/Stop) Datenendeinrichtung (SSDEE) mit einer Datenendeinrichtung im Paketmodus (PDEE) und zugehörige CCITT-Empfehlungen X.– –. KA = Datenkanal im Daten- oder Fernsprechnetz, PAD = Rechner zur Prozedur-Umsetzung, NK = Knoten des PV-Netzes

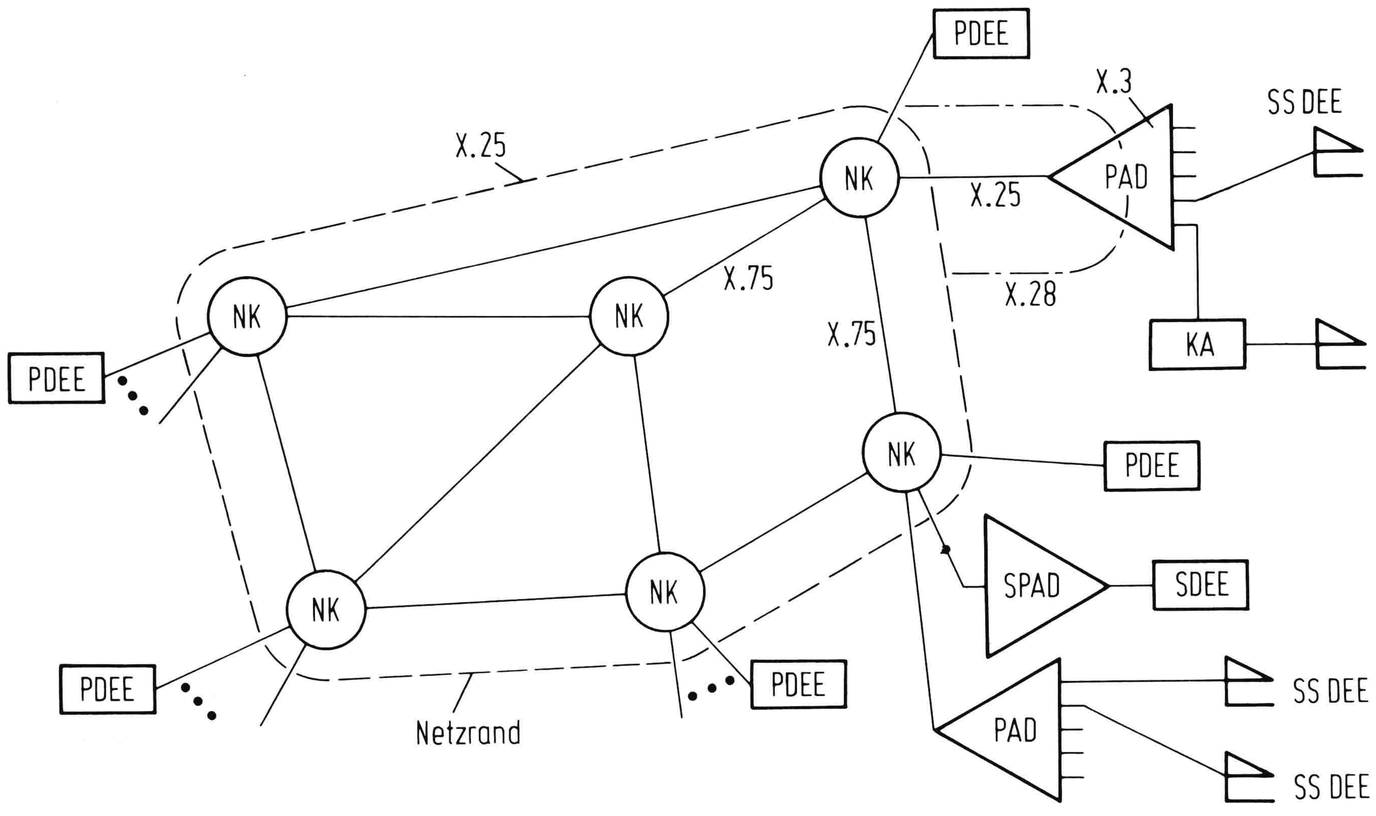


**Abb. 2.** Möglichkeiten des Betriebs von Start-Stop(SS)- und Synchron(S)-Datenendeinrichtungen (DEE) an einem PV-Netz. Synchron-PADs sind noch nicht genormt und deshalb außerhalb des Netzes vorzusehen [5]. SPAD = Synchron-PAD, NK = Netzknoten

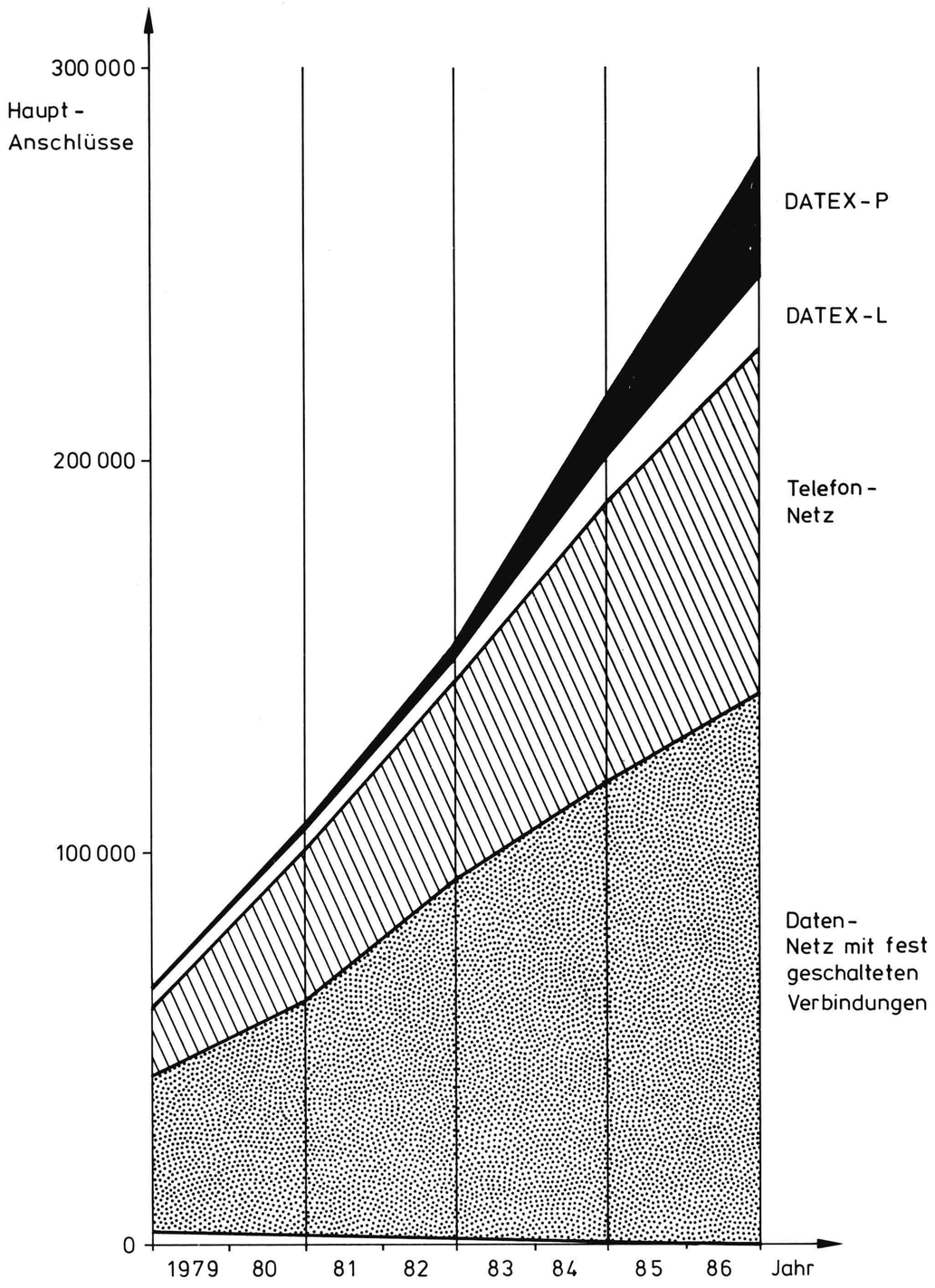


**Abb. 3.** Bisherige und geschätzte Entwicklung der Zahl von Hauptanschlüssen an den Datennetzen der Deutschen Bundespost (Quelle: [45])

und Zwischenbeziehungen setzt entweder Absprachen über zu verwendende Sätze von Elementen voraus oder muß sich mit starken Vereinfachungen begnügen.

*Offene Datennetze in Deutschland.* Die deutsche Bundespost bietet seit Mitte 1980 einen PV-Dienst (Datex-P) an, der – gestützt auf schon vierjährige Erfahrung des Datapac-Netzes von Northern Telecom (Kanada) – von Anfang an als komfortabel ausgestattet bezeichnet werden konnte. Endgeräte mit Start-Stop und mit bestimmten Basic-Mode-Prozeduren können über netzeigene Anpaßrechner angeschlossen werden. Eine gut lesbare Beschreibung ist in dieser Zeitschrift erschienen [44]. Die bisherige Akzeptanz durch Benutzer und das erwartete Wachstum, gemessen in der Zahl von Hauptanschlüssen über den Jahren, zeigt Abb. 3 (aus [45]). Im Mai 1982 gab es 1200 Hauptanschlüsse am Netz [46].

Zu berücksichtigen ist dabei, daß der Standard X.25 erst im Oktober 1976 durch das CCITT verabschiedet wurde und daß die Hersteller von Rechnern und Endgeräten nur zögernd begonnen haben, die Schnittstelle in ihren Produkten zu implementieren (vgl. [57]).

Gemessen an den mehr als 23 Mio. Telefonteilnehmern sind alle Datenteilnehmer zusammen nur eine Minderheit von weniger als 1%. Ihre Ansprüche an die Übertragungsleistung des Netzes lassen sich heute in den weitaus meisten Fällen mit einer Übertragungsrate von 9,6 kbit/s befriedigen [46]. Diese Gründe sind maßgeblich dafür, daß das geplante ISDN sich vor allem an den Bedürfnissen der Sprachübertragung orientiert, wofür zwei gegengerichtete Kanäle mit 64 kbit/s Datenrate benötigt werden. Mit dieser Rate lassen sich fast alle heute bekannten Datenübertragungs-Anwendungen leicht abdecken.

*Ungelöste Probleme.* Als problematisch und theoretisch nicht gelöst wird die optimale Flußsteuerung (einschließlich Zugangssteuerung und Routing) in Datennetzen angesehen [17, 18]. Die bekannten Verfahren arbeiten nur suboptimal und lassen dabei (insbesondere in sehr großen Netzen) vorhandene Übertragungskapazitäten teilweise noch ungenutzt. Dies ist jedoch kein paketvermittlungsspezifisches Problem, sondern tritt auch bei leitungsvermittelten Datennetzen auf. Nur sind die Möglichkeiten zur Optimierung in PV-Netzen größer.

## *1.2. Protokolle*

### 1.2.1. Protokolle für die Datenübermittlung

Die bisher vorgestellte Übersicht gibt einen Gesamteindruck. In den nachfolgenden Abschnitten werden einzelne angesprochene Komponenten, Probleme und Techniken ausführlich beschrieben und diskutiert.

Die Datenübermittlung wird in allen Ländern durch staatliche oder beauftragte Fernmeldebetriebsgesellschaften wahrgenommen, während die angeschlossenen Datenendeinrichtungen (DEE) in Privatbesitz sind. Das erfordert Absprachen zwischen den Benutzern sowie Herstellern von DEE und den Datennetzbetreibern, wobei sich das CCITT in Abstimmung mit der ISO um die Festlegung von technischen Einzelheiten dieser Schnittstelle kümmert. Die bedeutsamsten Empfehlungen des CCITT für die Datenkommunikation über öffentliche Netze sind (anstelle von *Schnittstellenbeschreibungen* spricht man auch von *Protokollen*):

Serie V: Datenübertragung über das Fernsprechnetz
Serie X: Datenübertragung über Datennetze

Neben den Originalunterlagen des CCITT (1972: „Grünbücher", 1976: „Orangebücher", 1980: „Gelbbücher") findet man deutschsprachige Übersetzungen aller Datenübertragungs-Standards der V.- und X.-Serie in [47] und Ergänzungsbänden desselben Verlages.

Einzelne Mitglieder der V.-Serie beschreiben etwa den Leistungspegel für Datenübertragung, das Internationale Alphabet, die Struktur von Signalen dieses Alphabets, Übertragungsgeschwindigkeiten für synchrone Datenübertragung, elektrische Eigenschaften oder Definitionen von Schnittstellenleitungen zwischen DEE und DÜE, Modems, Meß-, Prüf- und Anzeigegeräte usw. Einzelne Mitglieder der X.-Serie beschreiben etwa

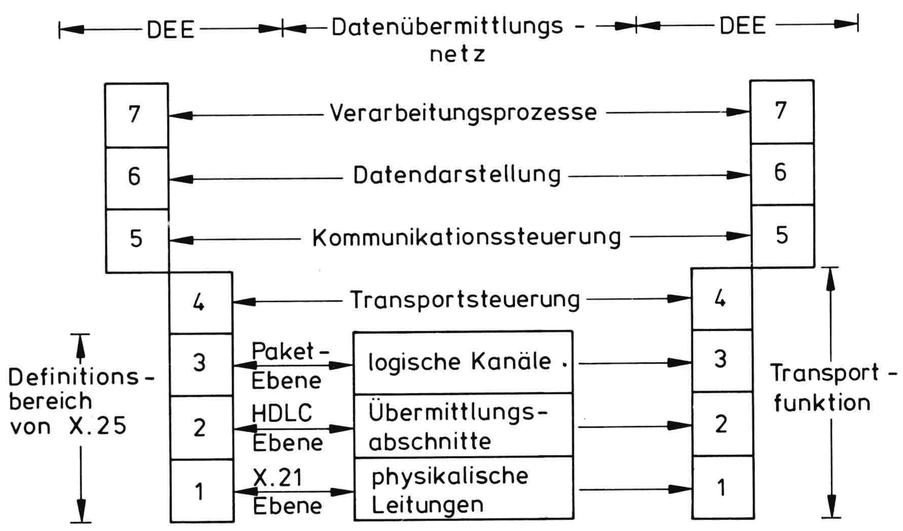


**Abb. 4.** Schematische Darstellung der hierarchischen Struktur von Datenübermittlungsprotokollen nach dem Architekturmodell für „offene" Kommunikationssysteme" der ISO

Geschwindigkeitsklassen und Leistungsmerkmale, Schnittstellen zwischen DEE und DÜE bei Start-Stop- oder Synchronverfahren. Definitionen für Schnittstellenleitungen, Schnittstelle zwischen DEE und DÜE bei Paket-Modus, Kennwerte für Multiplex-Schemata, Schaltkennzeichensysteme, Netzparameter, Dienstsignale usw.

## 1.2.2. Das ISO-Modell

Datenübertragung zwischen zwei Teilnehmern ist ein Vorgang, der logisch in Teilfunktionen gliederbar ist (vgl. das ISO-Referenzmodell in Abb. 4). Danach verkehren Verarbeitungsprozesse in verschiedenen Datenendeinrichtungen (DEE) logisch miteinander, indem sie sich – in geordneter Reihenfolge – der nach dem ISO-Modell in Schichten gegliederten Funktionen der jeweils eigenen DEE bedienen.

Funktionen einer Ebene $N$ sind generell Dienstnutzer der tiefer liegenden Ebene $N-1$ und Diensterbringer für die darüber liegende Ebene $N+1$. Man spricht von *Dienstprotokollen* und meint damit den Satz von Regeln für den Kommando- und Datenaustausch zwischen benachbarten Schichten derselben DEE. Als *Ebenenprotokoll* (z. B. Ebene- $N$-Protokoll) werden der Satz von Kommandos und die zugehörigen Datenstrukturen bezeichnet, welche die Kommunikation zwischen Funktionen in Ebenen gleicher Numerierung (z. B. $N$) *verschiedener* DEE festlegen. Anstelle von Ebenen spricht man auch von Schichten (layer of protocol).

Die Funktionen innerhalb einer Ebene untergliedert man noch in sog. (Protokoll-) Instanzen, wobei eine Instanz alle Funktionen einer bestimmten Ausprägung des entsprechenden Ebenen-Protokolls umfaßt. Alle Instanzen in einer Schicht jeder DEE werden durch den zugehörigen Schichtmanager verwaltet [56].

Während man sich bzgl. der (standardisierten) Verarbeitungsprozesse vorstellen kann, daß sie einen Datenübertragungsdienst für eine nicht im ISO-Modell erfaßte höhere Ebene erbringen, fällt die Ebene 1 aus dem Rahmen: Ihre in den beiden kommunizierenden DEE realisierten Instanzen verkehren direkt miteinander unter Zwischenschaltung einer Datenübertragungsleitung. Beschreibungen des (weitgehend endgültigen) Entwurfs des ISO-(Basis-) Modells, Stand Nov. 1980, findet man in [48, 56]. Die Aufgaben der einzelnen Ebenenprotokolle sind in der Literatur ausführlich beschrieben (z. B. [44, 48, 49]).

In Abb. 4 sieht man, daß die Protokollebenen 1 bis 3 jeder DEE netzbezogen sind: Sie verkehren logisch mit den entsprechenden Protokoll-Ebenen der Netzeingangsknoten. Netzintern, von Knoten zu Knoten, werden dieselben oder sehr ähnliche Ebenenprotokolle angewendet.

Je nach Anwendungsfall sind die einzelnen Ebenen-Protokolle unterschiedlich gestaltet: Unterstellt man ein PV-Netz nach Standard X.25, dann richtet die Vermittlungsebene 3 eine virtuelle Verbindung zwischen den beiden DEE ein (vgl. Abschn. 1.3). Sie ordnet dabei alle der entsprechenden Kommunikationsbeziehung zwischen den DEE zugeordneten Kommandos und Daten abschnittsweise (auch zwischen den Knoten im Netz) der Verbindung zu, indem sie je Abschnitt einen logischen Kanal festlegt. Zwischen den Leitungsabschnitten des Netzes werden Pakete über Puffer der Netzknoten „speichervermittelt".

Eine DEE kann gleichzeitig bis zu 4096 verschiedene Kommunikationsbeziehungen unterhalten. Jede läuft über eine eigene virtuelle Verbindung und hat bei deren Einrichtung eine eindeutige logische Kanalnummer erhalten.

Daten verschiedener logischer Kanäle bzw. virtueller Verbindungen derselben DEE werden durch das Ebene-3-Protokoll im Zeitmultiplex-Verfahren an die Ebene 2 weitergegeben. DEE gemäß Standard X.25 können also Multiplexfunktionen für sehr viele Endgeräte bzgl. des PV-Netzes wahrnehmen. Deshalb spricht man von der Möglichkeit des Mehrkanalanschlusses einer X.25-DEE (vgl. Tabelle 1).

Die Bitsicherungs-Ebene 2 wendet das Datenübertragungsprotokoll HDLC (*h*igh-level *d*ata *l*ink *c*ontrol) abschnittsweise auf den Übermittlungsabschnitten zwischen den DEE und den Knoten des Netzes sowie netzintern an und multiplext dabei Datenblöcke verschiedener virtueller Verbindungen und zugehöriger Kommunikationsbeziehungen. Diese Blöcke werden der Ebene 1 zur Übertragung übergeben.

Die Bitübertragungsebene 1 sendet/empfängt Bitfolgen des entsprechenden Leitungsabschnittes gemäß Standard X.21 (ohne Verwendung des zugehörigen Signalisier-Protokolls). Diese Ebene berücksichtigt ausschließlich die physikalischen Eigenschaften des Übertragungsmediums und kennt keine Datenstrukturen, sondern nur Bitfolgen.

Unterstellte man anstelle eines PV-Netzes ein LV-Netz mit der DEE-Schnittstelle X.21 und wollte das ISO-Modell bzgl. der Datentransportfunktionen des Netzes diskutieren, dann wäre die Vermittlungsebene 3 mit dem Signalisier-Protokoll von X.21 belegt und würde eine physikalische Verbindung zwischen den DEE herstellen, die in den beteiligten Knoten des Netzes

„durchgeschaltet" würde. Die Bitsicherungs-Ebene 2 wäre leer, weil LV-Netze sog. transparente Kanäle verfügbar machen, die wie eine „nackte" Datenübertragungsleitung verwendbar sind und vom Benutzer mit beliebig wählbarer Übertragungsprozedur betrieben werden können. Die Bitübertragungs-Ebene 1 hätte dieselben Funktionen wie bei PV nach X.25.

Das ISO-Modell hat sich inzwischen so sehr durchgesetzt, daß alle namhaften Hersteller von geschlossenen Netzen sich genötigt fühlen zu demonstrieren, daß ihre Kommunikationssoftware „schon immer" modularisiert war und „weitgehend" dabei dem ISO-Modell entspricht (z. B. [58]).

Zusammenfassend zum Thema Datenübertragungs-Protokolle kann man sagen, daß trotz der beschriebenen Anpaßfunktionen an das PV-Netz (insbesondere seine Schnittstelle X.25) eine freizügige Kommunikation jedes Teilnehmers mit jedem anderen technisch nicht ohne weiteres möglich ist. Das PV-Netz und die daran angepaßten Prozeduren erledigen ja nur einen Teil der für Datenübertragung nötigen Funktionen, wie sie im Ebenen-Modell in Abb. 4 dargestellt sind. Bezüglich der höheren Ebenen 4 bis 7 passen zunächst nur jene Geräte zueinander, die schon vor Einführung der PV-Technik untereinander verkehren konnten; typisch dafür sind Geräte desselben Herstellers. Man kann hier für einige Anwendungen die Einführung von Normen erwarten. Zuständig ist nicht das CCITT, sondern nationale und internationale Normungsgremien.

## *1.3. Abläufe bei der Datenübertragung in leitungsvermittelten Netzen und von virtuellen Wählverbindungen in PV-Netzen (Laufzeitbetrachtungen)*

Nun wird der zeitliche Ablauf bei der Übertragung einer Nachricht bekannter Länge über ein leitungs- bzw. paketvermitteltes Netz auf dem festen Weg nach Abb. 5 verglichen.

### 1.3.1. Leitungsvermittlung

*Im Schritt 1* (Abb. 6) wird die Verbindung im Handshaking-Verfahren von Host H aus über die Leitung L1, den Knoten N1, die Leitung L2 usw. aufgebaut. Für den Vermittlungsvorgang ist pro Knoten ein Zeitbedarf ST vorgesehen. Die begrenzte Ausbreitungsgeschwindigkeit auf den Datenleitungen ist durch eine von der Leitungslänge LL abhängige Signallaufzeit SV auf jedem Leitungsabschnitt Li berücksichtigt. Alle Daten benötigen (je nach Umfang) eine gewisse Zeit, bis sie den Host oder einen Knoten vollständig verlassen haben oder bis sie beim Empfänger am Ende des Leitungsabschnitts eingelaufen sind. Diese Dauer ist durch die Stärke der schraffierten Balken berücksichtigt, die also ein Maß für die übertragene Datenmenge ist.

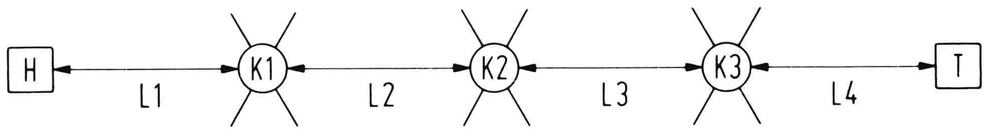


**Abb. 5.** Übertragungssystem, bestehend aus Host H, Datenleitung Li, Vermittlungsknoten Kj und Terminal T ($i = 1$ bis 4; $j = 1$ bis 3)

*Im Schritt 2* wird auf dem bereits verfügbaren Kanal ohne Vermittlungsverzögerungen eine Quittung für den Verbindungsaufbau vom Terminal T zum Host H gesandt. (Neuere Signalisierverfahren, z. B. gemäß CCITT Empfehlung SS. 7, bauen die durchgeschaltete Verbindung nicht schon in Schritt 1 auf, sondern erst mit der Quittung in Schritt 2. Der Zeitbedarf ist dann so, wie in Schritt 2 in Abb. 7 gezeigt.)

Unmittelbar nach Ankunft der Quittung sendet H *im Schritt 3* seine Nachricht zusammenhängend über die durchgeschaltete Leitung ab. Neben der Signallaufzeit der Leitung geht nur die Datenmenge in den Zeitbedarf ein.

*Im Schritt 4* wird die korrekt empfangene Nachricht, ebenfalls auf der durchgeschalteten Leitung, zurück quittiert. Der gesamte Zeitbedarf beträgt im Beispiel etwa 820 ms. Im Beispiel wurde für die Signalisierung zum Verbindungsauf/abbau ein Kanal gleicher Übertragungsrate unterstellt wie für die Datenübertragung. Das muß in der Anwendung nicht unbedingt erfüllt sein.

### 1.3.2. Paketvermittlung

In einem PV-System ist, ähnlich wie bei der Leitungsvermittlung, zunächst eine Verbindungsaufbau-Phase (jetzt einer virtuellen Verbindung) nötig. Entsprechend

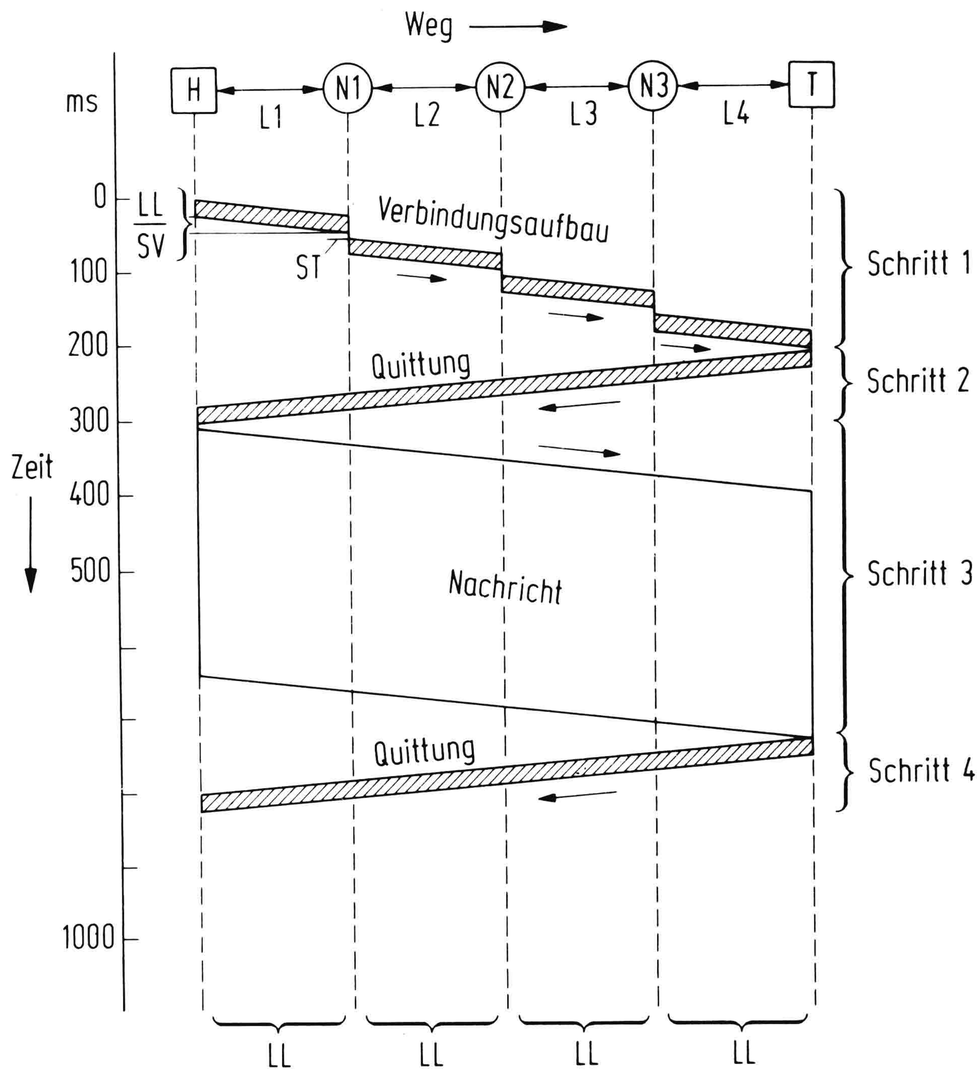


**Abb. 6.** Weg/Zeit-Diagramm bei einem konventionellen leitungsvermittelten System mit elektronischer Vermittlung (nach [23]). ST = Vermittlungszeit-Bedarf im Knoten, LL = Leitungslänge [m], SV = Signallaufzeit [m/s], LL/SV = Zeitbedarf für die Signalausbreitung zwischen zwei Knoten

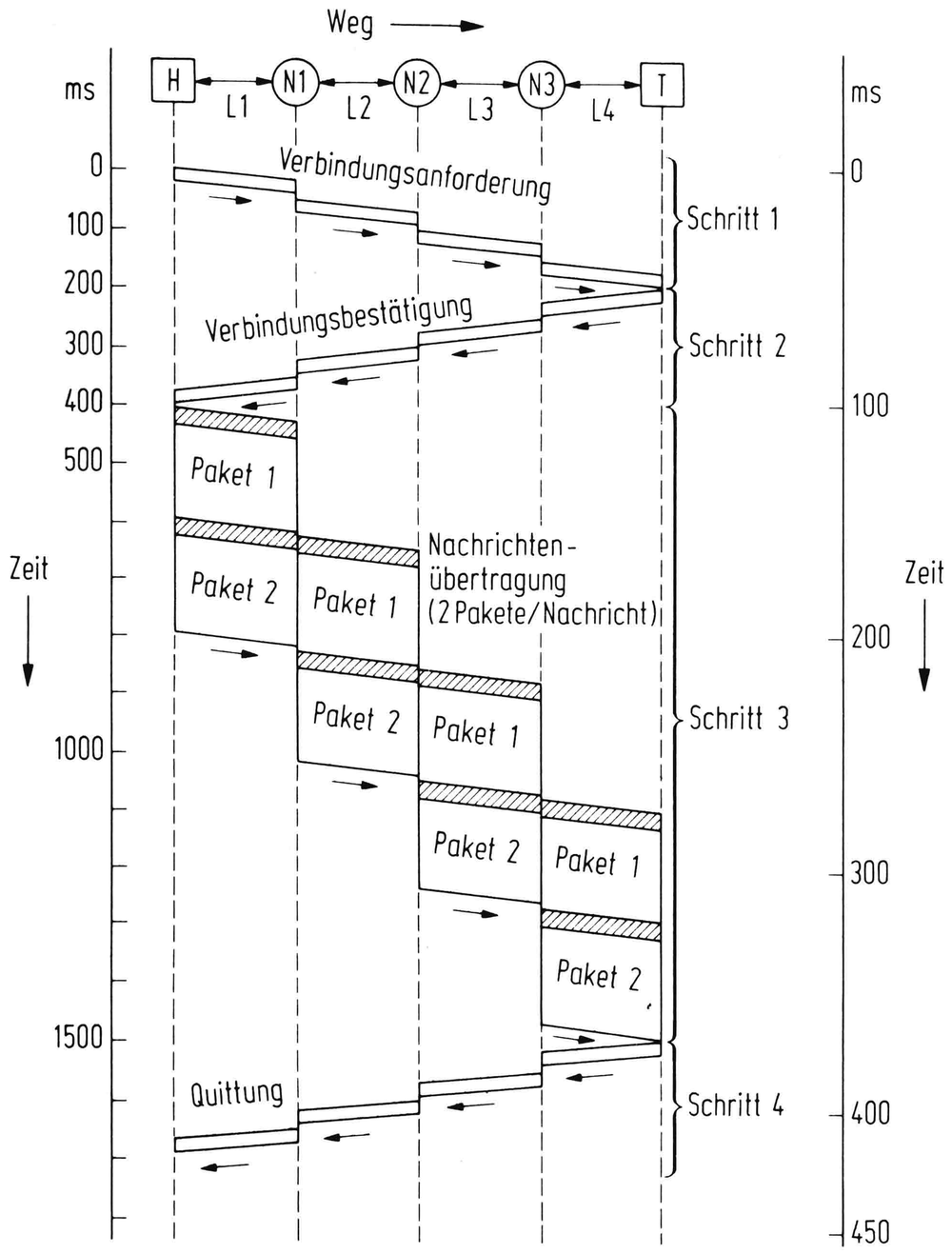


**Abb. 7.** Weg/Zeit-Diagramm bei einem PV-System mit gleicher Leitungsdatenrate wie in Abb. 6 nach [23] und bei vierfach schnelleren Übertragungskanälen Li (rechte Zeitskala). (Da die Signallaufzeit konstant und unabhängig von der Datenrate ist, ist ihr Einfluß nur bezüglich einer der beiden Zeitskalen richtig dargestellt. Der Fehler bezüglich der anderen Skala ist aber vernachlässigbar klein.)

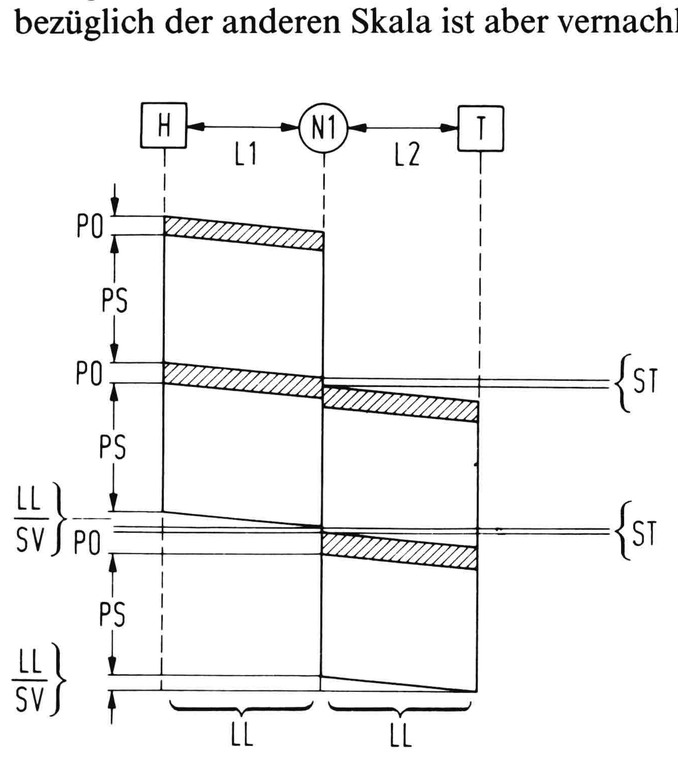


**Abb. 8.** Parameter, die bei PV-Technik in die Übertragungslaufzeit eingehen (nach [23]). PO [s] = Zeitbedarf für die Übertragung des Paket-Kopfes, PS [s] = Zeitbedarf für die Übertragung der Nutzdaten des Paketes zwischen zwei Knoten. Weitere Abkürzungen wie in Abb. 6

Abb. 7 wird *im Schritt 1* ein Verbindungsanforderungs-Paket von Knoten zu Knoten bis zum Ziel weitergeleitet. Pro Knoten wird für den Vermittlungsvorgang die Zeit ST benötigt (Abb. 8). Leitungslänge LL und Signallaufzeit SV ergeben zusammen auf jedem Leitungsabschnitt Li den Zeitbedarf für die Signalausbreitung. Schritt 1 der Verbindungsaufbauphase verläuft bei Leitungs- und Paketvermittlung analog. Dagegen gibt es bereits Unterschiede *im Schritt 2*. Die Verbindungsbestätigung findet bei PV-Technik keine durchgeschaltete Leitung vor, sondern wird als Paket von Knoten zu Knoten zurückgesandt.

*Schritt 3* umfaßt die Datenphase. Eine Nachricht wird in (hier zwei) Pakete zerteilt, jedes Paket hat einen Kopf mit Steuerinformation und einen Nutzdatenteil. Die Nutzdatenteile der beiden Pakete in Abb. 7 enthalten zusammen die in Abb. 6 zusammenhängend übertragene Nachricht. Neben dem Zeitbedarf für die Signalausbreitung, der unabhängig von der Vermittlungstechnik ist, kommen bei PV gegenüber Leitungsvermittlung drei weitere Zeitanteile hinzu:

- die Vermittlungszeit ST je Knoten (unwesentlich),
- der Zeitbedarf für die Übertragung der Paket-Köpfe (meist prozentual gering),
- der erhebliche Zeitbedarf für das etappenweise (von Knoten zu Knoten) Weiterreichen einzelner Pakete, wobei jeder Knoten bezüglich jedes Paketes die Zeit PS abwarten muß (Abb. 8), bevor die fehlerfreie Ankunft des Paketes gesichert ist und der Vermittlungsvorgang beginnen kann.

In Abb. 7 beobachtet man, daß auf den vier Leitungsabschnitten L1 bis L4 schon für das erste Paket die Dauer $4 \times (PO + PS + ST)$ verstreicht. Das zweite Paket (und falls nötig, noch weitere Pakete) benötigt zusätzlich die Dauer $1 \times (PO + PS + ST)$. Das etappenweise Aufsammeln von Paketen verbraucht also erheblich mehr Übertragungszeit gegenüber Leitungsvermittlung, wo *insgesamt* die Dauer $2 \times (PS + 3ST)$ benötigt wird.

*Schritt 4* umfaßt die Quittungsphase für die Nutzdaten, die ebenfalls in PV-Technik abgewickelt wird.

Der gesamte Zeitbedarf beträgt in Abb. 7 bei Voraussetzung derselben Übertragungsrate der Leitungen wie in Abb. 6 etwa 1,7 s und ist mehr als doppelt so groß wie bei Leitungsvermittlung. Man muß bei diesem Vergleich jedoch beachten, daß die Datenübertragungsrate von Leitungen im PV-Netz in der Regel deutlich größer ist als für einen Datenkanal (unter mehreren verfügbaren zwischen Knoten) eines leitungsvermittelten Netzes. Beispielsweise kann sie im PV-Netz 19,2 kBd sein, während im leitungsvermittelten Netz nur 4,8 kBd verwendet werden. Dann wäre die Zeitskala in Abb. 7 mit ¼ zu multiplizieren und es ergäbe sich ein gesamter Zeitbedarf von 1,7/4 = 425 ms (vorausgesetzt L4 hat auch diese Datenrate).

In Abb. 7 beobachtet man, daß die Übertragung verschiedener Pakete auf unterschiedlichen Leitungsabschnitten zeitlich überlappt ablaufen kann. Das ist besonders ausgeprägt dann der Fall, wenn eine Nachricht aus vielen Paketen besteht. Die Paketgröße ist (in Grenzen) ein wählbarer Parameter. Bei Zerteilung einer Nachricht in viele kleine Pakete entstehen entsprechend viele Paketköpfe, die als Verwaltungsinformation den

ursprünglichen Umfang der Nachricht erhöhen und die Übertragungsdauer vergrößern.

Es gibt also bezüglich der kleinsten Nachrichtenübertragungs-Dauer eine optimale Paketgröße: Existierende PV-Netze (z. B. Datapac [7]) benötigen im Mittel (bei Übertragungsleistungen von 9,6 kBit/s im Netz) für den Verbindungs*aufbau* 1,20 s, für den Verbindungs*abbau* 0,99 s und verzögern Daten beim Transport über das PV-Netz im Mittel um 0,48 s.

Bei Übertragungsleistungen von 48 kBit/s im Netz von Euronet werden lt. Messung 90% aller Verbindungen in weniger als 0,5 s aufgebaut und 90% aller Pakete in weniger als 1 s übertragen [52]. Interessant ist auch, daß weit überwiegend sog. kurze Verbindungen von ca. 65 s Dauer gemessen wurden. Zum Vergleich: Ferngespräche des Geschäftsverkehrs dauern in der Hauptverkehrsstunde im Mittel 150 s.

Die genannten Verbindungsauf- und -abbauzeiten entsprechen denen von modernen Leitungsvermittlungs-Netzen, wenn nur wenige Vermittlungsstellen (eine oder zwei) beteiligt sind [25]. In der Datenphase haben leitungsvermittelte Netze deutlich geringere Verzögerungen. Diese Eigenarten der beiden Netztypen machen sie für spezielle Benutzerkreise besonders geeignet.

## 2. Leistungs- und Kostenaussagen für Leitungs- und Paketvermittlungsnetze unter gegebenen Voraussetzungen

In der Literatur gibt es eine Reihe von Leistungs- und Kostenvergleichen der Leitungsvermittlungs- (LV) und PV-Techniken. Eine der ersten Arbeiten [24] war eine Studie der japanischen Fernmeldeindustrie, aus der bereits hervorging, daß sowohl für LV wie für PV besonders geeignete Datenübertragungsanwendungen existieren. Nachfolgende Arbeiten, deren Ergebnisse z. T. hier noch behandelt werden, erschienen 1975 bis 1978 [6, 8, 26, 27]. Alle diese Untersuchungen ergeben eindeutig, daß PV besonders für die Übertragungsbedürfnisse von interaktivem Verkehr (zwischen Terminal und Host) und allgemeiner auch für die Übertragung von Nachrichten kurzer Länge über (bevorzugt) feste virtuelle Verbindungen (im Gegensatz zur virtuellen Wählverbindung) geeignet ist. LV dagegen eignet sich besonders für die Übertragung zusammenhängender langer Nachrichten.

Obwohl es Teilnehmergruppen gibt, die eindeutig von der Art der zu übertragenden Nachrichten her besonders gut durch ein LV- oder PV-Netz bedient werden könnten, scheint es auch einen Bedarf nach Netzen zu geben, die *beide* Verkehrsarten leistungs- und kostengünstig übertragen können. Man denke nur an X.25-Anschlüsse mit Mehrfachausnutzung, an denen sowohl interaktive Teilnehmer als auch Stapelstationen (etwa Lochstreifenleser) angeschlossen sein können (vgl. [49]).

Typisch für alle genannten Vergleiche ist, daß Netze mit sehr vielen Teilnehmern betrachtet werden. Die betrachteten Übertragungsentfernungen zwischen den Teilnehmern entsprechen eher amerikanischen als deutschen Verhältnissen. Man kann jedoch sagen, daß die Ergebnisse weitgehend unabhängig von den gemachten Annahmen allgemein gültig sind.

### *2.1. Allgemeingültige Leistungs- und Kosten-Bewertung von Nachrichten-, Paket- und Leitungsvermittlungs-Netzen*

Die folgenden Vergleiche betreffen drei mögliche Übermittlungsverfahren in Datennetzen, nämlich Nachrichtenvermittlung (NV, message switching), Paketvermittlung (PV, packet switching) und Leitungsvermittlung (LV, circuit switching).

#### 2.1.1. Ergebnisse von Nippon Electric und der Kyoto University

Die bei der vergleichenden Bewertung verschiedener Vermittlungstechniken meistzitierte Arbeit [6] stammt von einer japanischen Forschergruppe. Sie betrachtet ein Modell mit einer Folge von Vermittlungsknoten mit dazwischen liegenden Übertragungsleitungen und berechnet die mittlere Übertragungsdauer $V$ und den Durchsatz $D$ als Funktion der Nachrichtenlänge und der Verkehrsaufteilung im Netz. Letztere äußert sich darin, daß die betrachteten Knoten neben dem Durchgangsverkehr auch lokal erzeugten bzw. abgehenden Verkehr haben. Die analytischen Lösungsausdrücke sind nachvollziehbar. Generell wird festes Routing im Netz angenommen. Die Vermittlungszeiten in den Knoten werden vernachlässigt.

Bei nach der NV-Technik vermittelnden Netzen ist angenommen worden, daß die zu übermittelnden Nachrichten zusammen mit zusätzlicher Verwaltungsinformation (= Nachrichtenkopf) übertragen werden und daß zwischen den Netzknoten abschnittsweise quittiert wird. Quittungen haben gegenüber Nachrichten Priorität bzgl. der Übertragungsreihenfolge. Die Kommunikation zwischen den Netzteilnehmern erfolgt über feste virtuelle Verbindungen.

Bei nach der PV-Technik vermittelnden Netzen wurde angenommen, daß Pakete eine variable Länge mit dem Mittelwert $L_m$ und Maximalwert $L_{p(max)}$ haben, daß die Übertragungsdauer auch den Zeitbedarf zum Zusammenfassen der übertragenen Pakete zur ursprünglichen Nachricht enthält und daß feste virtuelle Verbindungen benutzt werden.

Bei nach der LV-Technik vermittelnden Netzen wurde angenommen, daß die Verbindung nach dem PV-Verfahren aufgebaut wird (vgl. Abb. 7), wobei für die Phasen Verbindungsanforderung, -bestätigung und -auslösung jeweils ein separat vorhanden unterstellter Signalisierungskanal belegt wird, der Teil eines als Wartesystem (kein Verlust) realisierten Signalisiersystems ist.

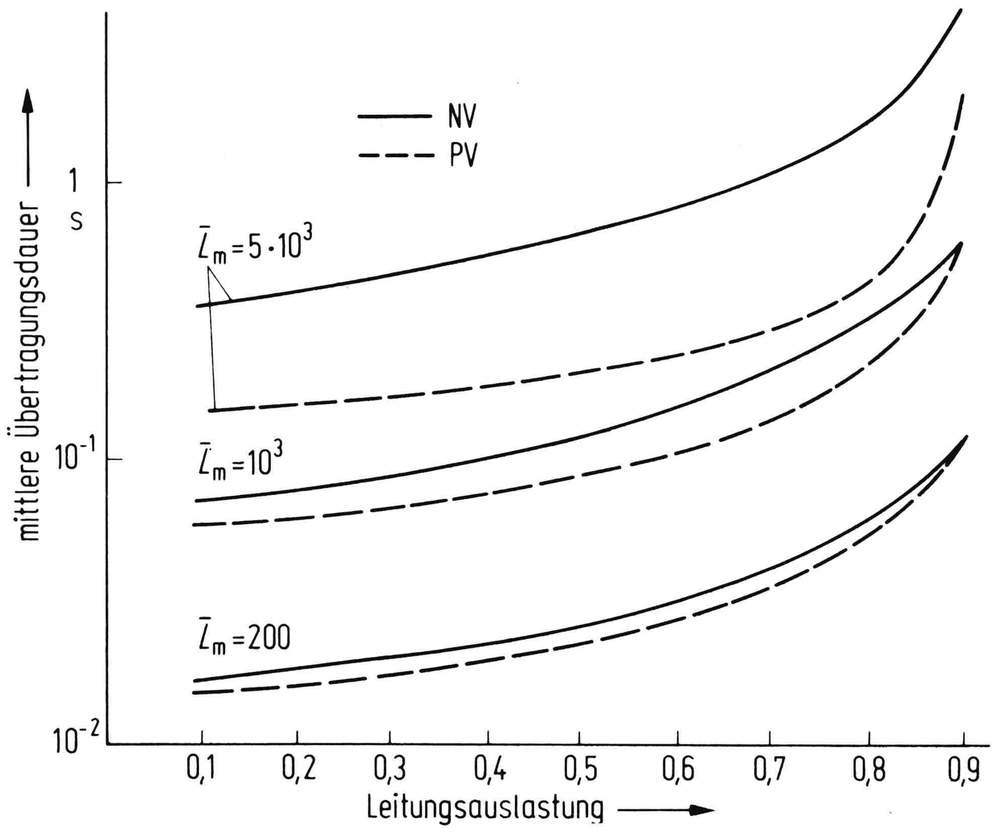


**Abb. 9.** Mittlere Übertragungsdauer als Funktion der Leitungsauslastung bei Nachrichten- und Paketvermittlung ($L_m$ = mittlere Nachrichtenlänge). Die maximale Paketlänge (bei PV) ist $L_{p(max)} = 10$ kBit, die Nachrichten- bzw. Paket-Kopflänge ist 50 Bit

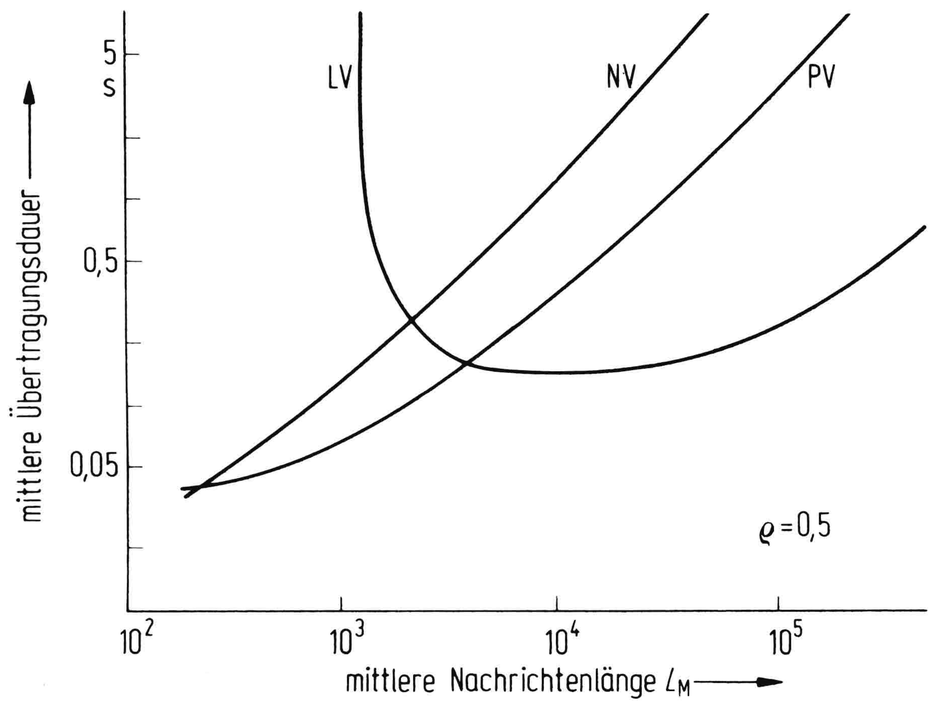


**Abb. 10.** Mittlere Übertragungsdauer als Funktion der Nachrichtenlänge bei fester Leitungsauslastung $\rho = 0{,}5$. Verwaltungsaufwand bei NV und PV für Köpfe bzw. Signallänge bei LV ist 50 Bit ($L_{p(max)} = 1$ kBit)

Das Verkehrsaufkommen wird für alle drei Vermittlungstechniken als gleich angenommen. Die folgenden Ergebnisse gelten für

- Übertragung über vier Knoten,
- 48 kBit/s bei NV und PV,
- 2,4 kBit/s für Signal und Datenkanäle bei LV,
- symmetrischen Netzverkehr,
- exponentiell verteilte Nachrichtenlänge.

Abbildung 9 zeigt, daß (unabhängig von der Leitungsauslastung) PV bezüglich der mittleren Übertragungsdauer immer günstiger ist als NV. Bedingt durch ihre Streuung treten selbst bei kleiner mittlerer Nachrichtenlänge manchmal lange Nachrichten auf, die dann die mittlere Übertragungsdauer bei NV größer als bei PV werden lassen.

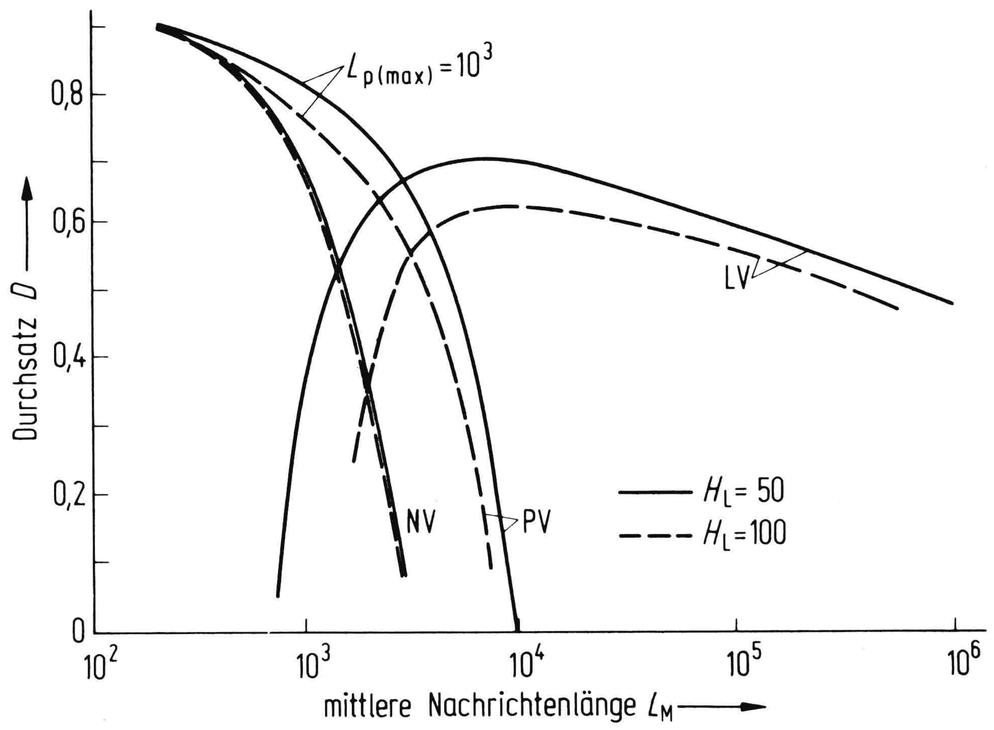


**Abb. 11.** Durchsatz des ersten Knotens der betrachteten Vermittlungsstrecke als Funktion der Nachrichtenlänge. $H_L$ = Verwaltungs- bzw. Signalisierungs-Bits pro Paket bzw. Nachricht

Abbildung 10 zeigt, daß PV unabhängig von der mittleren Nachrichtenlänge immer besser ist als NV. Für LV gilt, daß für kleine Nachrichtenlängen der Wartezeitanteil für dann häufige Signalisierung stark zunimmt. Deshalb erweist sich LV hier als unvorteilhaft. Bei großer Nachrichtenlänge ist LV am besten. Aus Abb. 11 ersieht man, daß der Durchsatz mit wachsender mittlerer Nachrichtenlänge zunächst bei PV und danach (ab $L_m = 5 \cdot 10^3$ Bit) bei LV am größten ist. NV ist immer ungünstiger als PV. Der Einfluß der Anzahl von Verwaltungsbits $H_L$ jeder Vermittlungstechnik ist abzulesen. Für PV und NV ist eine mittlere Übertragungsdauer von 0,2 s vorgegeben. Bei LV ist der Durchsatz für den Fall angegeben, daß die Verbindungsaufbaudauer als Funktion der Leitungsauslastung noch nicht im steilen Kurvenast ist, sondern nur 90% der bei der Polstelle ablesbaren Auslastung beträgt [6].

Die dargestellten typischen Eigenschaften von NV, PV und LV hängen bezüglich des gegenseitigen Leistungsvergleichs nach [6] praktisch nicht von den gewählten Übertragungsleistungen der Leitungen ab, soweit man übliche Werte auswählt. Es gibt offenbar, abhängig von den zu übertragenden Nachrichtenlängen, sowohl bezüglich der mittleren Übertragungsdauer als auch des maximalen Durchsatzes ein optimales Vermittlungsverfahren.

Die Autoren von [6] folgern, daß es leistungs- und kostengünstig sein muß, hybride Netze zu entwickeln, welche die Vorteile von PV und LV vereinen und je nach Bedarf verfügbar machen.

Beispiele für kommerzielle hybride Netze sind Infoswitch der Canadian Northern/Canadian Pacific [28] und das M 3200 Netz der Computer Transmission Corporation [19, 29, 30]. Letzteres ist ein digitales integriertes Netz mit Zeitmultiplex-Übertragung.

## 2.1.2. Weitere Ergebnisse des IBM-Forschungslabors

In einer späteren Arbeit [31, 32] wurde das eben behandelte Modell geringfügig erweitert, so daß auch virtuelle Wählverbindungen bei PV einbezogen werden können. Außerdem wird hier die Kapazität des Signalisierungskanals adaptiv dem Verkehrsaufkommen angepaßt, so daß LV auch für kurze Nachrichten (mit hohem Aufwand für Verbindungsauf/abbau-Verkehr) attraktiver wird. Die Annahmen sind wie oben, mit den Ausnahmen, daß die maximale Paketlänge 2 kBit beträgt und die Signalinformation bei LV bzw. der Paketkopf 100 Bit Umfang hat.

Abbildung 12 zeigt die mittlere Übertragungsdauer von kurzen Nachrichten mit 1 kBit Länge als Funktion der Nutzdaten-Auslastung einer Übertragungs-Strecke über einen Zwischenknoten. PV mit virtuellen Wählverbindungen (switched virtual circuit; SVC) benötigt durchweg mehr Wartezeit als mit fester virtueller Verbindung (permanent virtual circuit; PVC). Das liegt am Zeitbedarf für den Verbindungsaufbau. Auch die Polstelle liegt für PVC weiter rechts (bei größerer Nutzauslastung der Fernstrecken) als bei SVC, denn hier gibt es Verbindungsauf/abbau-Aufwand. Für LV ergibt sich eine kleinere mittlere Übertragungsdauer als bei PV. Zwar wird der Verbindungsaufbau abgewickelt wie bei SVC, aber dann können die Daten verzögerungsfrei (im Gegensatz zu PV) übertragen werden. Die gestrichelte Kurve für LV geht davon aus, daß während des Bestehens einer Verbindung *zwei* Nachrichten mit je 1 kBit Länge übertragen werden, zwischen denen eine Pause liegt, während der die Leitung nicht genutzt wird. Die Pausendauer ist wie die Nachrichtenlänge verteilt (s. Abb. 16 oben).

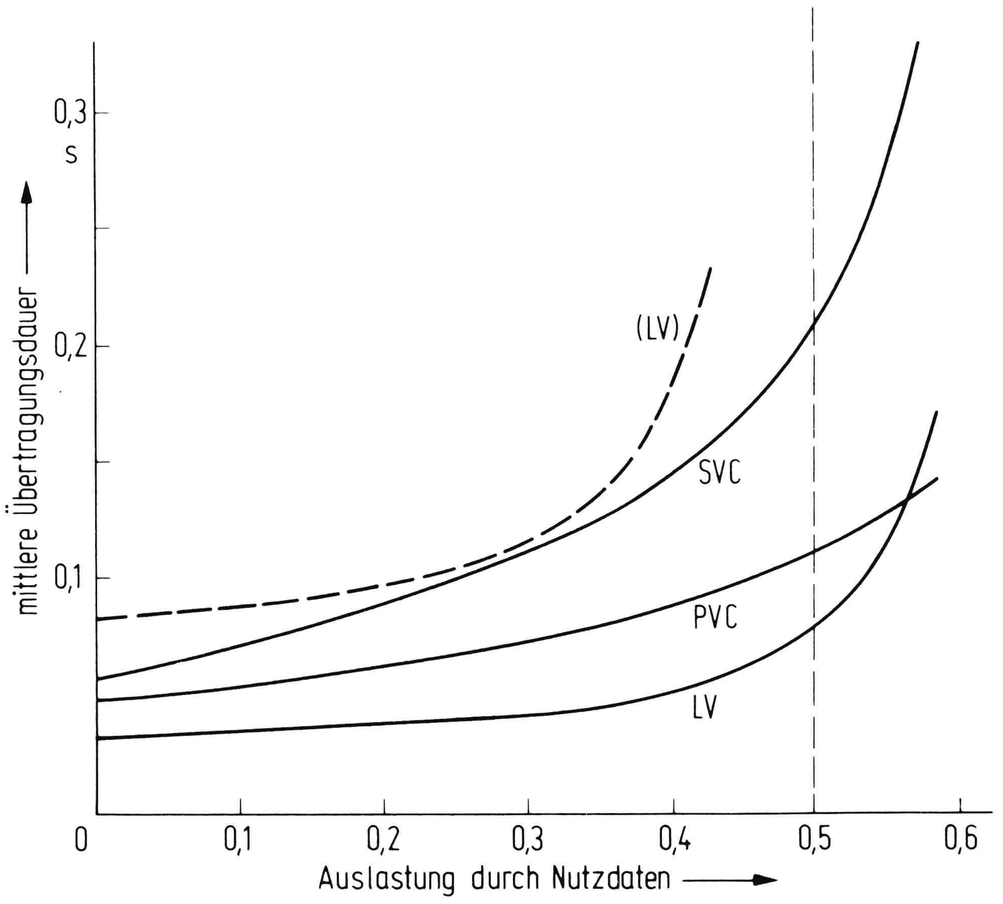


**Abb. 12.** Mittlere Übertragungsdauer als Funktion der Nutzauslastung der Fernleitungen bei PV (SVC/PVC = virtuelle Wähl/Fest-Verbindung). Mittlere Nachrichtenlänge 1000 Bit, maximale Paketlänge 2 kBit

Die wichtigsten Ergebnisse dieses Vergleichs [32] zeigen Abb. 13 und 14. Die mittlere Wartezeit ist dort über der Nachrichtenlänge in Abhängigkeit vom gewählten Vermittlungsverfahren dargestellt. Abb. 13 gilt für 50%ige Nutzauslastung der Fernleitungen. Optimiert man die Anzahl der für den Verbindungsauf/abbau bei LV benötigten (in den Abb. angegebenen) Signalisierungs-Kanäle, so ergibt sich auch für kurze Nachrichten bis zu 600 Bit eine Überlegenheit von LV gegenüber PV. In Abb. 10 war diese Kanalanzahl fest, und deshalb schnitt dort LV deutlich schlechter ab. Virtuelle Wählverbindungen sind immer ungünstiger als LV. Auch dieses Ergebnis ist wichtig! Für kurze Nachrichten (< 600 Bit) ist PV mit festen virtuellen Verbindungen (PVC) optimal. Die Gerade $L_m/C$ zeigt die Zugriffsdauer zum Netz unter der Annahme, daß die Leitung der Sende-DEE eine Kapazität von 2,4 kBit/s hat. Unterstellt man bei LV 2,4 kBit/s und bei PV deutlich schnellere Abnahme-Leitungen am Netzausgang, so kann die Ende-zu-Ende-Übertragungsdauer durch Addition der mittleren Wartezeiten dieser Geraden und der betreffenden Kurve bestimmt werden.

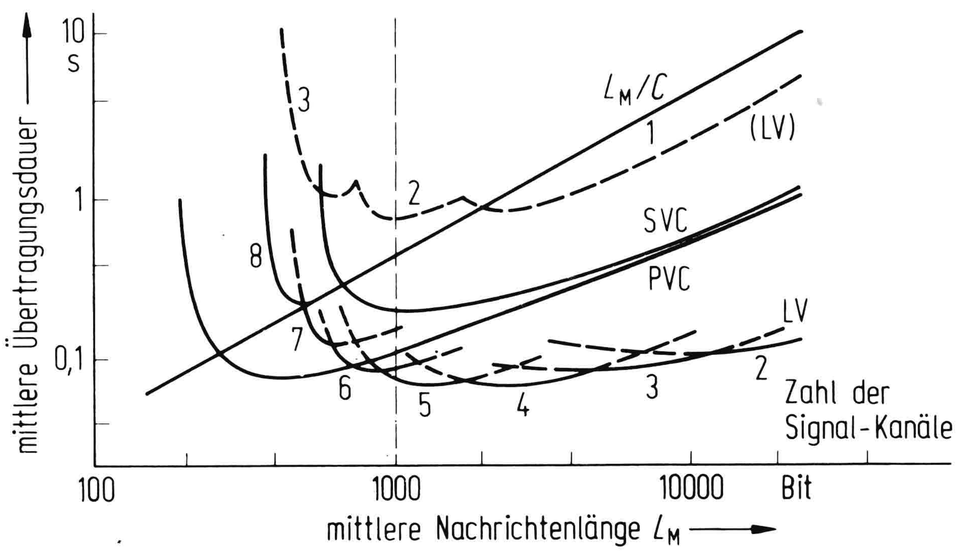


**Abb. 13.** Vergleich der Vermittlungstechniken bei veränderlicher Nachrichtenlänge. Für LV ist die Kurve angegeben, die sich bei optimaler Zahl der Kanäle für Signalisierung ergibt. Die Gerade $L_m/C$ zeigt den Übertragungszeitbedarf auf einer 2,4-kBit/s-Anschlußleitung. Die Leitungsauslastung der Fernebene ist 50%

Bei höherer Nutzauslastung (z. B. 75%) der Fernlei-

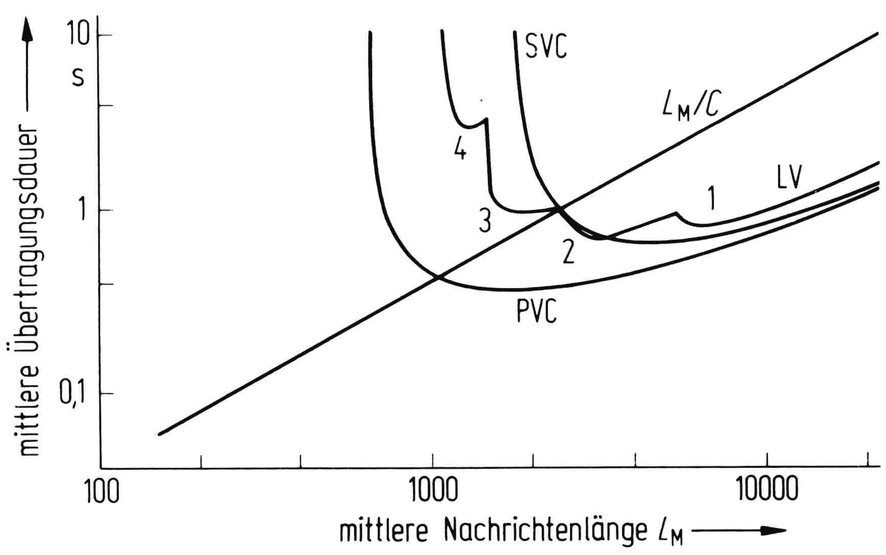


**Abb. 14.** Vergleich wie in Abb. 13, aber bei einer Nutzauslastung der Leitungen der Fernebene von 75%

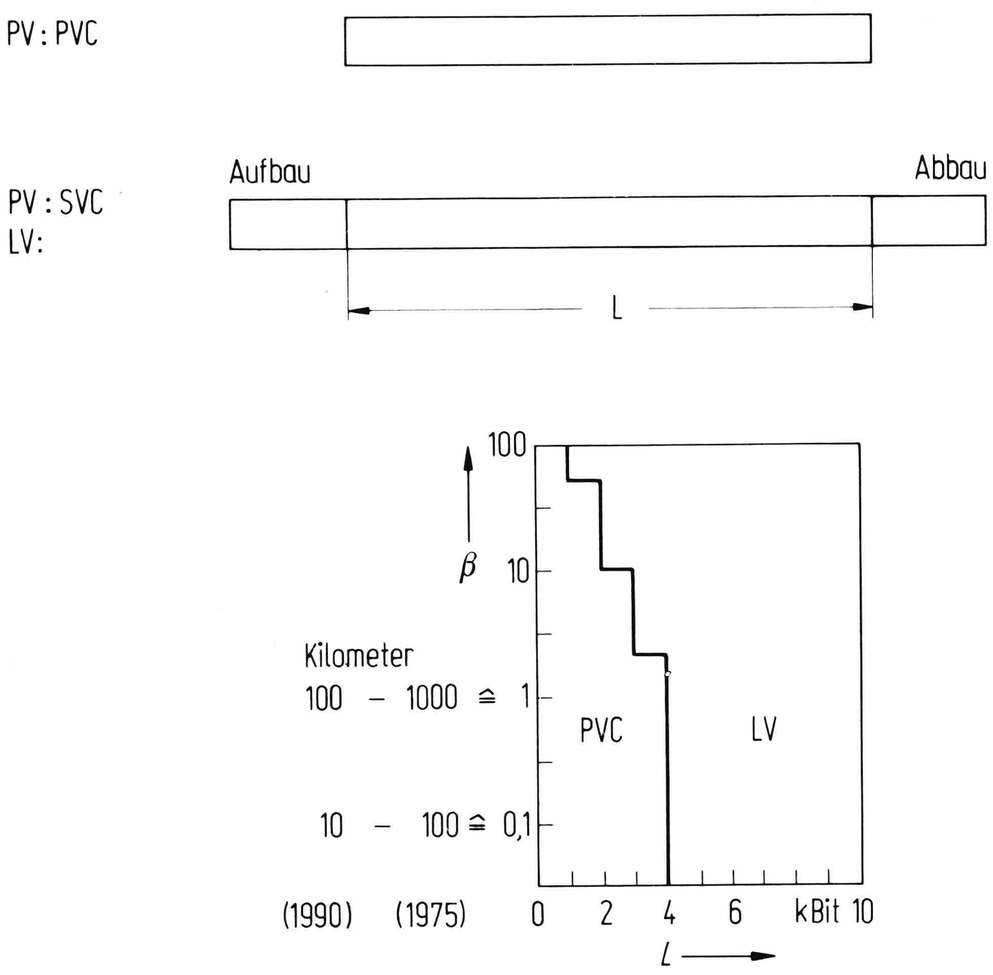


**Abb. 15.** Kostenvergleich für zusammenhängende Nachrichten der Länge $L$. Im oberen Bildteil sind die bei den verschiedenen Vermittlungstechniken zu übertragenden Daten dargestellt. $\beta$ ist das Verhältnis Kosten für die Übertragung einer Nachricht mit einem Paket (2 kBit) zu Vermittlungskosten (bei drei Knoten pro Übertragungsweg). Die kostengünstigen Bereiche für PV (in Version PVC) und LV sind angegeben

tungen ist, unabhängig von der Nachrichtenlänge, PV in der Version PVC immer besser als LV (vgl. Abb. 14). Solche Auslastungen sind typisch für PV-Netze und in LV-Netzen nur bei Wartemöglichkeit erzielbar.

## *2.2. Zusammenfassung der bisherigen Resultate*

Vom Kostengesichtspunkt aus haben beide Vermittlungsmethoden PV und LV heute und auch in Zukunft ihre Berechtigung:

- lange Nachrichten werden am besten durch LV-Netze übertragen,
- sehr kurze Nachrichten werden am besten durch PV-Netze übertragen,
- der Schnittpunkt bezüglich der Nachrichtenlänge, bei der die Übertragungstechnik gewechselt werden sollte, hängt sehr von der Kanalauslastung ab.

Kostenbetrachtungen können aus der Sicht des Netzbetreibers oder des Benutzers erfolgen. In [31, 32] wurden die Kosten aus Benutzersicht ermittelt, wobei Vermittlungs-, Speicherungs- und Übertragungskosten für Verbindungsauf/abbau und Datentransfer betrachtet wurden.

Im Gegensatz dazu wurden in [26, 27] die Kosten des Netzbetreibers betrachtet. Aus beiden Sichten ergeben sich integrierte Netze mit LV und PV nebeneinander als beste Lösung.

## *2.3. Verfeinerung des allgemeinen Leistungs- und Kostenvergleiches für realitätsnähere Annahmen*

In Erweiterung der bisherigen Modellierung des Datenverkehrs werden jetzt

- zwei Verkehrstypen behandelt, nämlich zusammenhängender und unterbrochener Verkehr,
- Kostenvergleiche nicht nur als Funktion der Nachrichtenlänge, sondern auch abhängig von der Übertragungsentfernung durchgeführt.

### 2.3.1. Zusammenhängende Nachrichten [33]

Abbildung 15 zeigt oben die Annahmen: Bei PV in der Version PVC (= Festverbindung) werden keine Signalisierdaten, sondern nur Daten der Verbindungsphase für die Dauer $L$ übertragen. Bei LV und PV in der Version SVC (= Wählverbindung) ist je Nachricht der Länge $L$ eine Verbindungsaufbau- und -abbauphase nötig. Im unteren Teil von Abb. 15 sieht man den Entfernungsfaktor $\beta$ (einer Verbindung über drei Vermittlungsknoten) als Funktion der Nachrichtenlänge $L$. PV in der Version SVC hat ähnliche Verbindungskosten wie LV, aber zusätzliche Paketübertragungskosten (Paketkopf), so daß LV grundsätzlich besser ist. Man sieht, daß PV in der Version PVC für kurze Nachrichten grundsätzlich kostengünstiger ist als LV. Mit zunehmender Entfernung wird bei fester Nachrichtenlänge unter Umständen LV günstiger als PV. Für lange Nachrichten wird (wegen der bei PV zu übertragenden Paketköpfe) LV kostenoptimal.

Dem Entfernungsfaktor $\beta$ sind tatsächliche Entfernungen in Kilometer zugeordnet, berechnet für 1975 und 1990. 1975 entspricht dem Wert $\beta = 1$ eine Entfernung von 1000 km. Unter der Annahme, daß (wie bisher) Übertragungskosten nur langsam sinken, während die Vermittlungskosten stärker abnehmen, kann man für 1990 schätzen, daß dann $\beta = 1$ einer Entfernung von 100 km entsprechen wird. Das heißt, LV wird für immer kürzere Entfernungen kostenoptimal. Für deutsche und ähnliche Verhältnisse sind wegen der kleineren Entfernungen PV-Netze deutlich länger attraktiv als beispielsweise in den USA.

### 2.3.2. Unterbrochene Nachrichten

In diesem Fall besteht die Nachricht aus zwei durch eine Pause getrennte Datenübertragungen für je einen Block der Länge $B$ (vgl. Abb. 16). Da bei LV die Leitung während der Pause (die der Datenübertragung von einem Paket = 2 kBit entspricht) ungenutzt ist, ist PV in beiden Versionen PVC und SVC deutlich attraktiver. Mit zunehmender Blocklänge (und konstanter Pause) wird LV relativ kostengünstiger. Mit zunehmendem Entfernungsfaktor $\beta$ überwiegen die Übertragungsko-

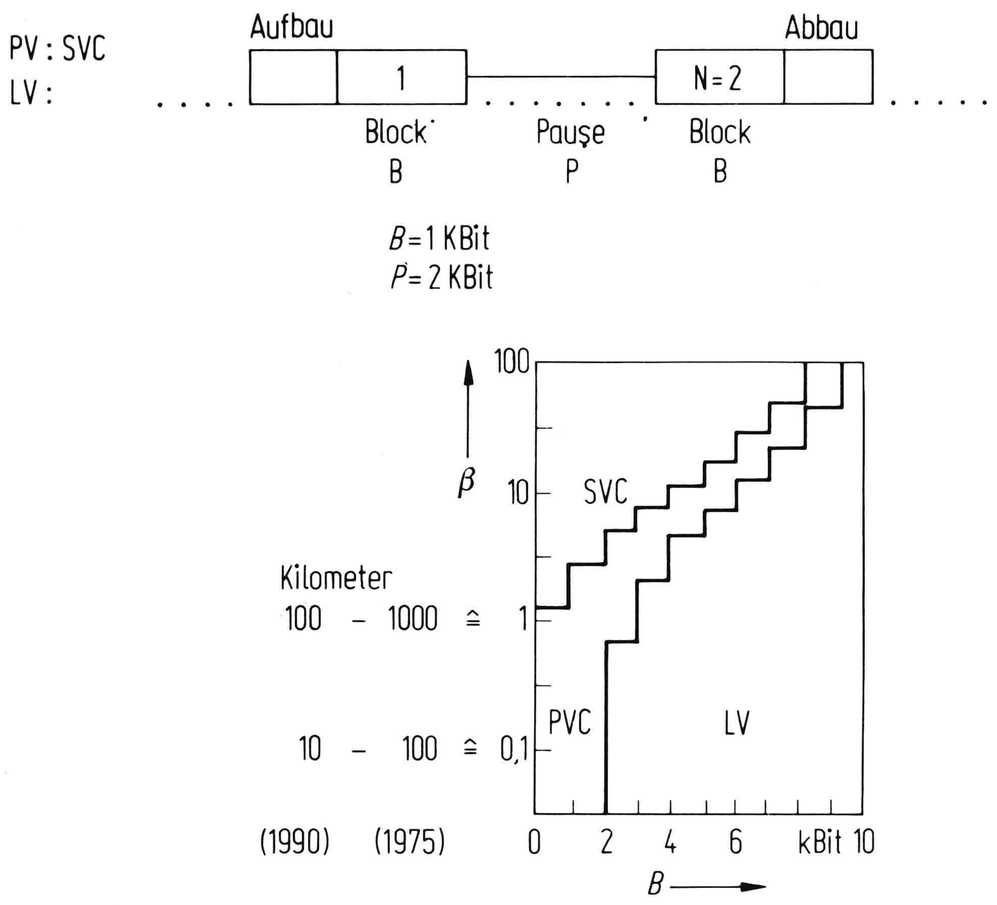


**Abb. 16.** Kostenvergleich für unterbrochene Nachrichten der Länge ($2B+P$). Im oberen Bildteil sind die zu übertragenden Daten bzw. die Pause dargestellt. Der untere Bildteil zeigt den Kostenvergleich

sten immer mehr, so daß sich die Pause zunehmend nachteilig für die Kosten bei LV auswirkt. PV wird dabei zunehmend kostengünstiger. Beim Vergleich von PVC und LV sollte man sich die zu SVC gehörende Trennlinie wegdenken. Sie hat Bedeutung, wenn SVC und LV verglichen werden sollen; dann sollte man sich die mit PVC bezeichnete Trennlinie wegdenken. Vergleicht man die Kosten von 1975 und 1990, dann wird PV für immer kürzere Entfernungen kostenoptimal.

## 3. Sicherheit bei der Datenkommunikation über LV- bzw. PV-Netze

In diesem Abschnitt werden unerwünschte Eigenschaften der PV-Technik angesprochen, die eine allgemeine Nutzung dieser Technik nur bei Vorliegen bestimmter Voraussetzungen bzgl. der Ausstattung der Vermittlungsknoten zulassen. Es geht um die Sicherheit der zu übertragenden Daten.

Die Datenübermittlung stellt gegenüber dem Fernsprecher weit härtere Forderungen, die ständig erfüllt sein müssen:

- Die vermittlungs- und übertragungsbedingte Fehlerrate muß deutlich kleiner sein,
- der Datenschutz muß gewährleistet sein,
- die Abhörsicherheit muß garantiert werden können.

Solche Forderungen lassen sich bei digitaler Übertragung leichter als bei analoger erfüllen, führen aber zu komplizierteren Verarbeitungsprozessen innerhalb des Netzes und erhöhen das Risiko von (un)beabsichtigten Fehlern.

Digitalisierte Daten werden zunehmend, nach ihrer Eingabe vom Menschen in ein Rechensystem, automatisch verteilt, verwaltet und verarbeitet, ohne wesentliche ständige Kontrolle durch Menschen. Die Frage nach der Sicherheit der Vermittlung an die richtigen Empfänger ist ohne die Verarbeitung schutzwürdiger Daten gegenstandslos. Beispiele schutzwürdiger Daten sind:

- Bilanzen von Firmen,
- Konten von Privatpersonen,
- Personaldaten,
- Bestell- und Lagerbestandsdaten von Firmen,
- militärische Daten.

Wir gehen davon aus, daß vermittelnde Einrichtungen softwaregesteuert arbeiten und Zugang zu Daten der Übertragungsphase haben. Die erste Annahme trifft für LV und PV zu, die zweite nur für PV.

### *3.1. Sicherheit bei der Datenkommunikation*

Sicherheit ist die Gewährleistung der (militärischen) Geheimhaltung aller Informationen und der Ausschluß einer Beeinträchtigung der Funktionen des Gesamtsystems (durch sicherheitsgefährdende Kräfte). Dies bedeutet Forderungen nach:

- Datengeheimhaltung (Schutz vor unerlaubter Informationsgewinnung),
- Datenintegrität (Schutz vor unerlaubter Informationsänderung),
- sicherer Kommunikation, insbesondere nach
  - Leitungs- und Ende-zu-Ende-Verschlüsselung,
  - Sicherung der Datenübertragung durch redundante Codes,
  - sicherer Vermittlung.

Solange kein Netz zwischen den beteiligten Datenendeinrichtungen (DEE) liegt oder nur die Übertragungsphase (zwischen Verbindungsauf- und -abbau) in LV-Netzen betrachtet wird, reichen die bekannten Verschlüsselungs- und Codierverfahren völlig aus.

Dies ist jedoch nicht in allen Fällen bei Anwendung der PV-Technik der Fall. Hier muß jedes Paket einzeln in jedem Netzknoten vermittelt werden, wobei zumindest der Paketkopf im Klartext vorliegen muß. Bezüglich der Verbindungsauf/abbau-Phase sind LV- und PV-Netze gleich sicher, wie später deutlich werden wird.

Schwachstellen für eine sichere Übertragung über PV-Netze bilden

- Interfaces (die Schnittstellen können falsch benutzt werden),
- Protokolle (die Regeln werden u. U. nicht eingehalten),
- Funktionseinheiten (die Funktionen werden u. U. nicht korrekt erfüllt).

Hier müssen auch die Gegenmaßnahmen ansetzen, um die gewünschte Sicherheit zu erreichen:

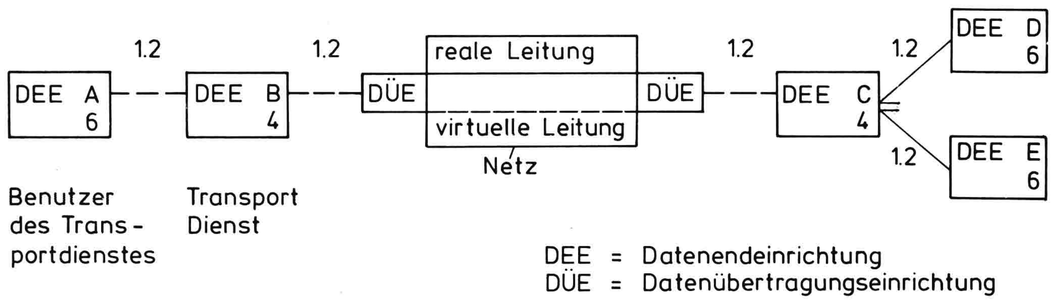


**Abb. 17.** Verteiltes System mit Datenübertragung. Die Zahlen in den Datenendeinrichtungen (DEE) und Datenübertragungs-Einrichtungen (DÜE) geben an, in welcher Ebene des ISO-Modells jeweils verschlüsselt wird

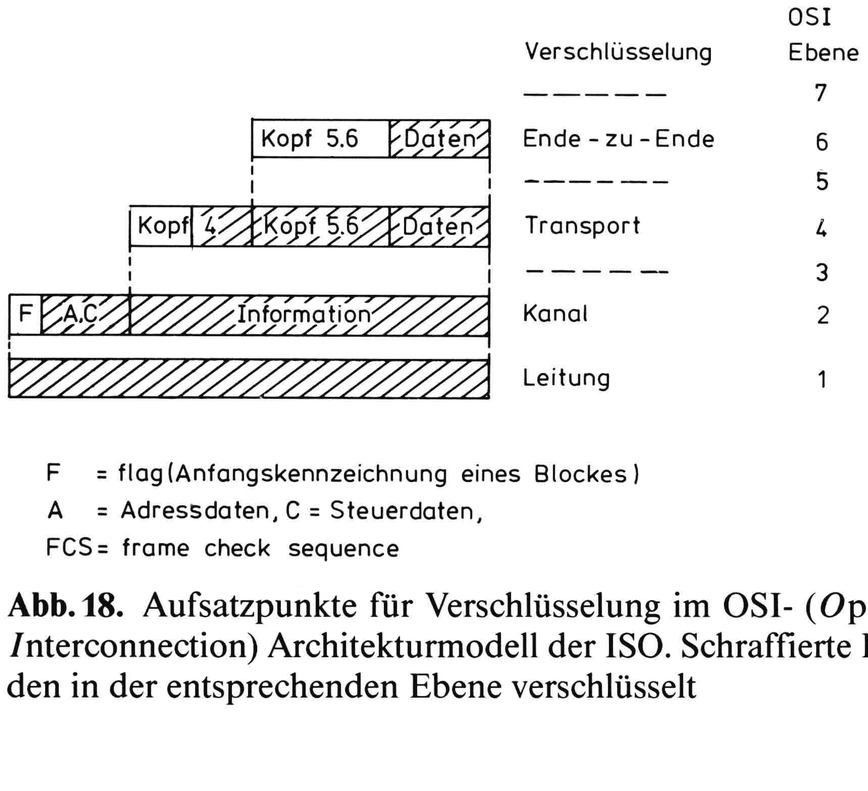


**Abb. 18.** Aufsatzpunkte für Verschlüsselung im OSI- (*O*pen *S*ystem *I*nterconnection) Architekturmodell der ISO. Schraffierte Daten werden in der entsprechenden Ebene verschlüsselt

- Bereitstellung sicherer Funktionseinheiten (Verifikation ihrer korrekten Arbeitsweise),
- Verifikation von Kommunikationsprotokollen bzgl. ihrer korrekten und sicheren Arbeitsweise,
- Isolierung von Systemteilen/Komponenten, Schichten und Funktionseinheiten und Einsatz von Schutzmechanismen zur Zugriffsüberwachung.

Für besonders sicherheitsgefährdete Anwendungen, z. B. in militärischen Datennetzen, werden diese Maßnahmen so weit wie möglich eingesetzt und ständig weiter entwickelt [51, 53, 55]. Für weniger sicherheitsempfindliche Anwendungen verzichtet man aus Kostengründen auf manche dieser Maßnahmen, hofft aber längerfristig auf die Mitbenutzung von Forschungs- und Entwicklungsergebnissen der militärischen Sicherheitstechnik für Datennetze. Zu den heute schon allgemein eingesetzten Maßnahmen zählt die Verwendung von verifizierten Transport-Protokollen und die Schichtung von Funktionen. Für die Berücksichtigung von Funktionen für die Ende-zu-Ende-Verschlüsselung in den entsprechenden Ebenenprotokollen des ISO-Modells hat sich eine so starke Anwendergruppe gefunden, daß dort Überlegungen zur Standardisierung laufen [50].

### *3.2. Ende-zu-Ende-Verschlüsselung (EZE-V)*

Datenkommunikation über Fernnetze findet immer zwischen zwei Partnern statt, und es ist plausibel, daß sie für sicherheitsempfindliche Daten eine Verschlüsselung, beginnend beim Absender und endend beim Empfänger, fordern. Entsprechend dem US-Standard FED-STD-1026 (Draft 2) sind fünf Sicherheitsziele zu beachten, die alle die Kompatibilität der Kommunikationspartner voraussetzen (deshalb ist ein EZE-V-Standard erforderlich):

1. Verhütung der Enthüllung von Klartext-Nachrichten,
2. Erkennung der betrügerischen Veränderung einer Nachricht,
3. Erkennung der betrügerischen Einfügung einer Nachricht,
4. Erkennung der betrügerischen Zerstörung einer Nachricht,
5. Erkennung der betrügerischen Wiederholung einer früher gültigen Nachricht.

Es wird ein EZE-V-Standard angestrebt, der diese fünf Bedrohungen beseitigt und doch freizügigen Verkehr der Endgeräte verschiedener Hersteller untereinander zuläßt. Dies bedeutet die Forderung nach der Integration entsprechender Regeln in die Protokolle des ISO-Modells.

Entsprechend Abb. 17 und 18 unterscheidet man Leitungs-, Kanal-, Transport- und EZE-Verschlüsselung. Leitungs- bzw. Kanal-Verschlüsselung wird eingesetzt, wenn physikalische Leitungen bzw. Multiplexleitungen zwischen Punkt-zu-Punkt- oder Mehrpunktverbindungen verwendet werden. Die Leitungen können privat oder Bestandteil öffentlicher Netze sein. Transport-Verschlüsselung wird zum Schutz virtueller Verbindungen in PV-Netzen zwischen den Datenendeinrichtungen (DEE) eingesetzt, wobei viele Leitungsabschnitte enthalten sein können.

EZE-V schützt den Nachrichtenaustausch zwischen Anwendungen in verschiedenen Prozessoren; z. B. sind in Abb. 17 DEE A ein Host, DEE B der zugehörige Kommunikationsrechner, DEE C eine Multiplex-Einrichtung für Terminals und DEE D bzw. E abgesetzte Terminals. Die Verschlüsselung von Daten der Ebene 6 schützt dagegen, daß DEE B bzw. DEE C Daten (un)beabsichtigt vertauschen und damit die Datensicherheit verletzen [50].

Aus Abb. 18 ist zu sehen, wie auf der Sendeseite mit zunehmender Aufbereitung für die Übertragung von Daten, ausgehend von der Ebene 7 (Verarbeitung), Adreß- und Steuerinformationen in den Ebenen 6 bis 2 zugefügt werden und welche Daten jeweils verschlüsselt werden dürfen. Die offen verbliebenen Daten werden jeweils von der darunter liegenden Ebene, die evtl. in einem separaten Gerät realisiert ist, benötigt, um arbeiten zu können. Beispielsweise übergibt sendeseitig Ebene 2 ihre HDLC-Blöcke mit unverschlüsselten Flags F an Ebene 1 und erkennt sie empfangsseitig an diesen Flags (Flags sind geschützte Bitfolgen, sechs 1-Bits).

EZE-V befaßt sich wegen ihrer Anwendungsnähe mehr mit „Information“ als mit „Kommunikation“, je-

doch bestehen in der Vorgehensweise große Ähnlichkeiten zwischen Transport- und EZE-Verschlüsselung. Man erwartet deshalb die Entwicklung sehr ähnlicher Standards für beide Bereiche (vgl. [59]).

Heute existierende offene PV-Netze übertragen, was immer die DEE an der Netzschnittstelle anliefern, z. B. auch EZE-verschlüsselte Daten, die im Datenteil der Pakete vorliegen. Es scheinen also alle Sicherheitsprobleme der Datenübertragung auch bei PV gelöst zu sein.

### *3.3. Sichere Vermittlung*

PV-Technik erfordert im Vermittlungsknoten (= Rechner) das Speichern und Vermitteln von Paketen. Dieser Ablauf erfolgt Software-gesteuert und unterliegt deshalb (ungleich stärker als eine ausgetestete Hardwarelösung) dem Verdacht, fehlerhaft sein zu können. Vermittlungsrechner enthalten neben der Vermittlungssoftware weitere, meist deutlich umfangreichere Programme für Funktionen wie Netzwerkmanagement, Statistik, Abrechnung, Wiederanlauf usw., so daß man von „viel" Software sprechen kann.

Im Privatnetz sind Vermittlungsrechner oft durch weitere anwendungsbezogene Aufgaben belastet. Es erhebt sich die Frage nach der Sicherheit (vgl. die Definition oben) von Vermittlungsrechnern. Analysen haben gezeigt, daß Rechner grundsätzlich als sehr unsicher eingestuft werden müssen, denn ihre Schutzmaßnahmen sind durch geschultes, aber nicht berechtigtes Personal relativ leicht zu umgehen [51].

Man fordert deshalb für alle sicherheitsempfindlichen Anwendungen mit Datenübertragung über PV-Netze, daß die Vermittlungsrechner formal als korrekt nachgewiesene sichere Software besitzen [53]. EZE-V wird als eine von mehreren nötigen Sicherheitsmaßnahmen angesehen, die allein nicht ausreicht. Insbesondere fürchtet man das durch Dritte gesteuerte Abzweigen, Fehlleiten und Kopieren von Information sowie das gezielte „Außer-Betrieb-setzen" einzelner Funktionen. Deshalb hat sich ein Zweig des Software-Engineering gebildet, der die Herstellung von bzgl. der Sicherheitsforderungen korrekter Software der Vermittlungsrechner anstrebt [51]. Erste Ergebnisse dieser Arbeiten werden bereits in militärischen Datennetzen, z. B. dem Defense Data Network der US-Streitkräfte, genutzt [55].

Die für die Datenphase in PV-Netzen eben geschilderte Problematik hat auch Bedeutung für die Verbindungsaufbau- und -abbauphasen. Man umgeht das Problem der ständigen Benutzung von Vermittlungssoftware hier, indem man bei LV-Netzen permanente (Stand-) Verbindungen und in PV-Netzen permanente virtuelle Verbindungen benutzt. Streng genommen müßte man jedoch bei sehr sicherheitsempfindlichen Anwendungen garantieren können, daß solche Verbindungen nicht gezielt durch Maßnahmen von Netzteilnehmern beeinflußt, z. B. vermittlungstechnisch unterbrochen werden können. Solche Wünsche führen also ebenfalls zur Forderung nach korrekter Vermittlungssoftware und korrekten Protokollen, und zwar für LV-*und* PV-Netze.

Sicherheitsempfindliche Behörden/Organisationen verwenden für ihre Aufgaben private Datennetze, die durch hohen technischen Aufwand sicherer als offene Netze gemacht worden sind. Dies ist in der Tat der Grund dafür, daß es viel mehr private als offene PV-Netze gibt. Gemessen an den eben dargestellten Forderungen zur Gewährleistung von sicherer Datenkommunikation sind jedoch fast alle diese privaten Netze als unsicher einzustufen, denn sie sind nicht entsprechend den neueren sicherheitstechnischen Möglichkeiten ausgestattet (vgl. die in [60] zusammengestellten Forderungen an solche Netze). Der heutige sicherheitstechnische Stand erlaubt es nicht, alle bekannten Risiken durch kostengünstige Gegenmaßnahmen abzuwenden. Beispielsweise ist der Korrektheitsnachweis von großen Vermittlungsprogrammen heute noch weitgehend von Hand, mit noch unzureichender Unterstützung durch z. Zt. erst in Entwicklung befindliche Programme, möglich. Es gibt jedoch berechtigte Hoffnungen auf die Verfügbarkeit solcher „Tools" für die Produktion sicherer Software in den nächsten Jahren.

## Zusammenfassung der Aussagen von Abschnitt 3

Obwohl die PV-Technik mit dem US-ARPA-Netz, insbesondere aus Mitteln von sicherheitsempfindlichen Organisationen, erprobt und zu ihrem heutigen Stand entwickelt wurde und sich als leistungs- und kostengünstig erwiesen hat, können gerade die Ziehväter dieser Technik bis heute keinen rechten Nutzen daraus ziehen: Der Entwicklungs- und Betriebsaufwand für sichere Vermittlungsrechner ist bis auf weiteres so groß, daß die ursprünglich errechneten Kostenvorteile sich deutlich in das Gegenteil verkehren. Dieser Gesichtspunkt trifft jedoch für eine breite Schicht von Anwendern der Datenübertragung nicht zu: Sie können, frei von solchen Sorgen, durch Benutzung offener PV-Netze an deren Kostenvorteilen teilhaben.

Die Arbeit entstand während der Zugehörigkeit des Autors zum Geschäftsbereich Hochfrequenztechnik von AEG-Telefunken, Ulm.

## Literatur

1. Huber, J. H.: Prognose der zukünftigen Entwicklung des Datenverkehrs. NTZ *30,* 919 (1977)
2. Tietz, W.: Offene Kommunikationssysteme und Datenpaketvermittlung. NTZ *32,* 158 (1979)
3. Georg, R.: Datenkommunikationsnetze der DBP Übersicht und Auswahlkriterien. NTZ *32,* 166 (1979)
4. Norris, H.M.: Trends in data communications in the USA. Online V, 2. Fachkongreß der Online Seminare: „Fortschritt für Netzwerkarchitektur, Datensicherheit und Benutzerfreundlichkeit in Online Systemen" (22.–24. 1. 1979), Haus der Technik, Essen, Tagungsband (Kapitel 11 A)
5. Sarbinowski, H.: Nutzen öffentlicher Paketvermittlungsdienste, Online V, vgl. [4] (Kapitel 10 A) und NTZ *32,* 177 (1979)

6. Miyahara, H., Hasegawa, T., Teshigawara, J.: A comparative evaluation of switching methods in computer communication networks. Proc. ICC '75, p. 6.6, Int. Conf. on Communications 1975
7. Rybczynski, A.M., Weir, D.F.: Datapac X.25 service characteristics. Proc. 5th Data Communicat Symp. 1977, p. 4–50
8. Kümmerle, K., Rudin, H.: Packet and Circuit switching: cost/performance boundaries. Computer Networks, Vol. 2, S. 3 (1978)
9. Gitman, I., Frank, H., Occhiogrosse, B., Hsieh W.: Issues in Integrated network design. Proc. ICC '77, p. 38.1–36, Int. Conf. on Communications 1977
10. Fischer, M.J., Harris, T.C.: A model for evaluating the performance of an integrated circuit and packet switched multiplex structure. IEEE Trans. Comm. Vol. COM *24,* 195 (1976)
11. Miyahara, H., Hasegawa, T.: Integrated switching with variable frame and packet. Proc. ICC '78, p. 20.3.1, Int. Conf. on Communications 1978
12. Bullington, K., Fraser, J.M.: Engineering aspects of TASI. Bell Syst. Techn. J. *38,* 353 (1958)
13. Forgie, J.M., Nemeth, A.G.: An efficient packetized voice/data network using statistical flow control. Proc. ICC '77, p. 38.2–44, Int. Conf. on Communications 1977
14. Coviello, G.C.: Comparative discussion of circuit vs. packet switched voice. Proc. NTC '78, Nat. Telecomm. Conf., p. 12.1.1, 1978
15. Huber, J.F.: Siemens Paketvermittlungssystem EDX-P. Eine neue Technologie für neue Fernmeldedienste. Telecom rep. *1,* 325 (1978)
16. Bocker, P.: Möglichkeiten und Grenzen von Paketvermittlungsnetzen. Telecom rep. *1,* 110 (1978)
17. Kleinrock, L., Kermani, P.: A network algebra for the performance evaluation of interconnected computer networks. Proc. NTC '78, Nat. Telecomm. Conf., p. 44.1.1 1978
18. Kleinrock, L.: On flow control in computer networks. Proc. ICC '78 Int. Conf. on Communications, p. 2721, 1978
19. Bass, R. A.: The PACUIT system. A hybrid packet/circuit switch. Proc. EASCON 77, p. 8–3 A, 1977
20. Hughes, C.J., Atkins, J.W.: Virtual circuit switching for multiservice operation. Proc. ISS '79, Int. Switching Symp., p. 344, 1979
21. Johnson, T.: Kostenvergleiche bei neuen Datennetzen. NTZ *32,* 183 (1979)
22. Anonym: Überlegungen der DBP zur Einführung eines öffentlichen Paketvermittlungsnetzes, Fernmeldetechn. Zentralamt, Darmstadt 1978
23. Lazak, D.: User-oriented optimal packet sizes within packet switching systems. Angew. Inform. *6,* 259 (1979)
24. Itoh, K., Kato, T.: An analysis of traffic handling capacity of packet switched and circuit switched networks. Proc. Datacomm., p. 29, St. Petersburg/Florida 1973
25. Enderlein, W., Huber, J.F.: Datenverkehr in den Fernmeldenetzen der Deutschen Bundespost. Telcom rep. *1,* 55 (1978)
26. Esterling, R., Hahn, P.: A comparison of digital data network switching alternatives. Proc. NTC '75, Nat. Telecomm. Conf. 1975, Conf. Rec. Vol. 2, p. 42–8
27. Rosner, R.D., Springer, B.: Circuit and packet switching: A cost and performance tradeoff study. Comput. Networks *1,* 7 (1975)
28. Carleton, G.F., Pinkosy, J.F., Davies, R.M.: INFOSWITCH and INFODAT. Proc. World Telecomm. Forum, ITU, Genf 1975, p. 2.3.8.1
29. Gerla, M., DeStasio, G.: Integration of packet and circuit transport protocols in the TRAN data network. Proc. Computer Networks Protocols (Danthine, A., ed.), p. B 3.1, 1978
30. Klein, D.M., Frankel, S.: A hybrid circuit and packet switching system. Proc. NTC '76, Nat. Telecomm. Conf., p. 7.3.1, 1976
31. Kümmerle, K., Rudin, H.: Packet and circuit switching: Cost/performance boundaries. IBM Zürich Research Laboratory, Data Communication Center, RZ 805, Nr. 27122 (1976)
32. Kümmerle, K., Rudin, H.: Packet and circuit switching: A comparison of cost and performance, Proc. NTC '76, Nat. Telecomm. Conf., p. 42.5.1, 1976
33. Rudin, H.: Studies on the integration of circuit and packet switching. Proc. ICC '78, Int. Conf. on Communication, p. 20.2.1, 1978
34. Schröder, J.C.W.: Entwicklung und Wirtschaftlichkeit von Rechnerverbundnetzen. Info. Fachber. *3* (1976)
35. Wecker, S.: DECNET: A building block approach to network design. Proc. NTC '76, p. 7.5.1, 1976
36. Booth, G.M.: Honeywell distributed systems environment. Proc. ICCC '78, p. 347. Amsterdam: North-Holland 1978
37. Sussenguth, E.H.: Systems network architecture: A perspective, ibid., p. 353
38. McGovern, J.P.: DCA – a distributed communications architecture, ibid., p. 359
39. Conant, G.F.: Extending Digitals Networks Architecture to use X.25, ibid., p. 433
40. Anonym: Netzwerk Software. Computerwoche (14. März 1980)
41. CCITT Study Group XVIII, Report R8, March 1982 (Meeting of the Group of Experts on ISDN Matters, Munich 1982)
42. Frantzen, V.: Packet switched datacommunication services in the ISDN. Proc. 6th ICCC, London 1982, p. 25. Amsterdam: North-Holland 1982
43. Mosotto, C., DiPino, D.: The role of signalling and protocols in the emerging ISDN. Proc. ICC '81, Denver 1981, p. 19.3.1
44. Gabler, H., Tietz, W.: Datenkommunikation in den Fernmeldenetzen der Deutschen Bundespost. Info.-Spek. *4,* 11 (1981)
45. Tietz, W.: Terminal support in the Datex-P network. Proc. 6th ICCC, London 1982, p. 61. Amsterdam: North-Holland 1982
46. Runkel, D.: Experience with and performance measurements of the packet switching network in the Federal Republik of Germany, ibid., p. 253
47. Tietz, W. (Bearbeiter): CCITT Empfehlungen der V-Serie und der X-Serie: Datenübertragung. Heidelberg: Decker 1977
48. Jardin, R. des: Overview and status of the ISO Reference Model of Open Systems Interconnection. Comput. Networks *5,* 77 (1981)
49. Walke, B.: Zum Stand der Paketvermittlungstechnik (I): Übersicht, Protokolle, Leistungs- und Kostenbewertung. Wiss. Ber. AEG-Telefunken *53,* 111 (1980)
50. Elden, W.L.: Proposed ANSI level 4 transport encryption standard. Proc. Nat. Telecomm. Conf. '79, p. 32.41
51. Proc. 1st, 2nd, 3rd Seminar on the DoD Computer Security Initiative Programme, Nat. Bureau of Standards, Gaithersburg, July 1979/Jan. 1980/Nov. 1980
52. Haber, R.: EURONET DIANE – Erste Erfahrungen und zukünftige Entwicklungen. Info.-Spek. *5,* 38 (1982)
53. Saltzer, J.H., Schröder, H.D.: The protection of information in computer systems. Proc. IEEE, Vol. 63, p. 1278 (1975)
54. Popek, G.J., Kline, C.S.: Encryption and secure computer networks. Comput. Surv. *11,* 331 (1979)
55. Heiden, B., Duffield, H.C.: Defense data network. Proc. EASCON 1982, p. 61
56. Piatkowski, T.F.: The ISO-ANSI Open Systems Reference Model – A proposal for a systems approach. Comput. Networks *4,* 111 (1980)
57. Deaton, G.A., Franse, D.J.: SNA and X.25. Proc. 6th ICCC, London 1982, p. 877. Amsterdam: North-Holland 1982
58. Ahuja, V., Merkel, J.E.: Recent developments in system network architecture. Proc. Online Int. Conf. on Data Networks, 463. Northwood Hills, UK: Online Publ. 1980
59. Proposed Federal Standard 1025: Telekommunications: Interoperability and security requirements for use of the data encryption standard in the network and transport layers of data communications, June 1, 1981
60. Walke, B.: Software-Aspekte sicherer Datenkommunikation. Elektron. Rechenanl. *25,* 170 (1983)

Eingegangen 14. 4. 1983; in überarbeiteter Form 15. 11. 1983

Prof. Dr. B. Walke
Datenverarbeitungstechnik
FB Elektrotechnik
FernUniversität (GH) Hagen
Frauenstuhlweg 31
D-5860 Iserlohn