Rechnernetze

Vorlesungen 1991/1992/1993

Prof. Dr.-Ing. W. E. Proebster

Technische Universität München
Institut für Informatik
August 1992

Vorbemerkung

Die Vorlesung wird gehalten unter weitgehender Verwendung der gleichnamigen, von Hern Prof. Siegert/ Herrn Prof. Hegering/ Herrn Prof. Jessen entwickelten Vorlesung. Der Zweck der Vorlesung ist die Urteilsfähigkeit zu Rechnernetzen (Auswahl, Benutzung) und die Grundlagen für die Entwicklung und den Betrieb von Rechnernetzen zu vermitteln.
Die Vorraussetzungen der Vorlesung sind das Grundstudium (und nützlich sind die Vorlesungen: Betriebssysteme, Rechnerarchitektur, Systemprogrammierung).

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **5**

1.1 Grundbegriffe und Beispiele 5

1.2 Verbindungsstrukturen 15

1.2.1 Mehrprozessorsysteme 16

1.2.2 Direkte Kanalkopplung 16

1.2.3 Kopplung über peripheren Speicher 17

1.2.4 Kopplung über Datenfernübertragungsstrecke 17

1.2.5 Kopplung über private/öffentliche Fernnetze (WANs) 19

1.2.6 Kopplung über lokale Netze (LANs) 19

1.3 Rechnernetze, verteilte und distribuierte Systeme 21

1.4 „Logische“ und physische Struktur des Netzes 22

1.5 Anforderungen an Kommunikationsnetze 24

1.5.1 Besonderheiten von Netzen/verteilten Systemen 24

1.5.2 Anforderungen 25

1.5.3 Protokolle und Nachrichten 25

1.5.4 Nachrichten 27

1.5.5 Nicht-Transport-Dienste 28

1.6 Charakterisierung von Kommunikationsbeziehungen 32

1.7 Zum Entwurf von Rechnernetzen 34

2 Verbindungsstrukturen **37**

2.1 Vermittlung 37

2.2 Leistungsmaße 43

2.2.1 Elementares 43
2.2.2 Durchsatz und Verweilzeit in Systemen 45
2.2.3 Genaueres zur Verweilzeit- und Durchsatzbegrifen in Rechnernetzen: 56
2.2.4 Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Wartbarkeit 64
2.2.5 Zielkonflikt 65
2.3 Nachrichtentransportzeit 66
2.3.1 Nachrichtentransportzeit im leeren Netz (eine „Bedienzeit“) 66
2.3.2 Nachrichtentransportzeit im belasteten Netz (eine „Verweilzeit“) 70

3 Wegbestimmung **81**

3.1 Wegbestimmung: Ziele, Überblick 81
3.2 Definitionen 84
3.3 SDF-Verfahren (engl.: *shortest delay first*) 85
3.4 Nicht-adaptive Verfahren : Feste Wegetafeln 88
3.5 Nicht-adaptive Verfahren: Flooding 89
3.6 Adaptive Verfahren: isolierte Wegebestimmung 89

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Grundbegriffe und Beispiele

Rechnernetz (engl.: *computer network*):

Ein Rechnernetz ist ein System aus mehreren, unter Umständen räumlich getrennten Rechnern. Diese Rechner sind miteinander über Nachrichtenwege verbunden. Unter Nachrichtenwegen versteht man:

1. Leitungen (engl.: *lines*)

   elektrische Leitungen
   - Telefonkabel
   - Breitbandkabel
   - Ethernetkabel ...

   optische Leitungen (Lichtleiter, engl.: *optical fibers*)
2. Mikrowellenverbindungen (engl.: *micro wave links*)
3. Erdgebundene Funkwege (Radio (engl.: *radio*))
4. Satelliten (engl.: *satellites*)

Auf den Nachrichtenwegen wird Daten(fern)übertragung (D(F)Ü, engl.: *data transmission*) ausgeführt, von Punkt zu Punkt oder von Punkt an Punkte (engl.: *broadcast*).

Beispiele für Rechnernetze

- Terminalnetze
- lokale Netze LAN, MAN
- Fernnetze WAN

Typische Anwendungen:

SWIFT
SITA
PROFS
SNA

Typische Betriebsarten:

- festgeschaltet
- mit Verbindungsaufbau
- Nachricht sucht sich Weg „selbst“

Beispiel für ein Rechnernetz: Zentralrechner des Informatik-Instituts Siemens 7860E
Stand 1986

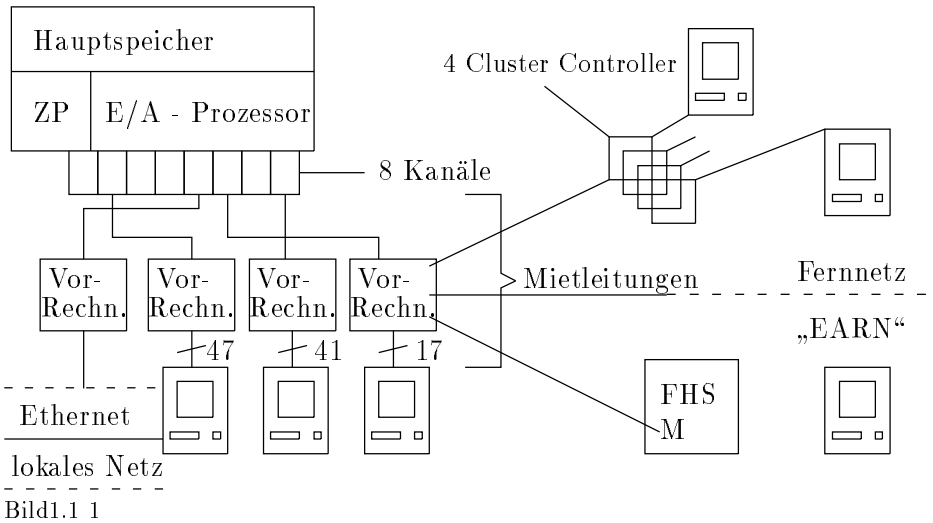


Bild1.1 1

Rechnernetz aus Verarbeitungsrechner und Vorrechnern (evtl. kaskadiert). Typisch hierarchischer Ansatz, seit etwa 1962, bestimmend für ältere Netzkonzepte (und deren Software!).

Vorrechner:
Gerätesteuerung, Datenumsetzung, Datenspeicherung, Konzentration des Nachrichtenverkehrs (engl.: *economy of scale*).

Kanal-Schnittstelle:
herstellerspezifisch, typisch byte-weise seriell

Terminal-Schnittstelle:
De Facto-Standards, bitweise seriell

Beispiel: Lokales Netz (LAN, engl.: *Local Area Network* **)**
Ab etwa 1976 meist gleichrangige Vernetzung von Rechnern auf einem/wenigen Grundstücken,

ein Unternehmen/Einrichtung, typisch Nachrichtenweg(e) großen Grenzdurchsatzes (Übertragungsrate, engl.: *transmissionrate*), z. B. 10 Mbit/s, Populär: „ETHERNET“.

Nochmals Informatik-Institut: Lokales Netz aus 5 Segmenten bestehend, funktionell wie eines wirkend („flaches“ Netz). Im Gesamtnetz ist jederzeit höchstens eine Übertragung möglich! Knapp 100 Anschlüsse sind vorhanden.

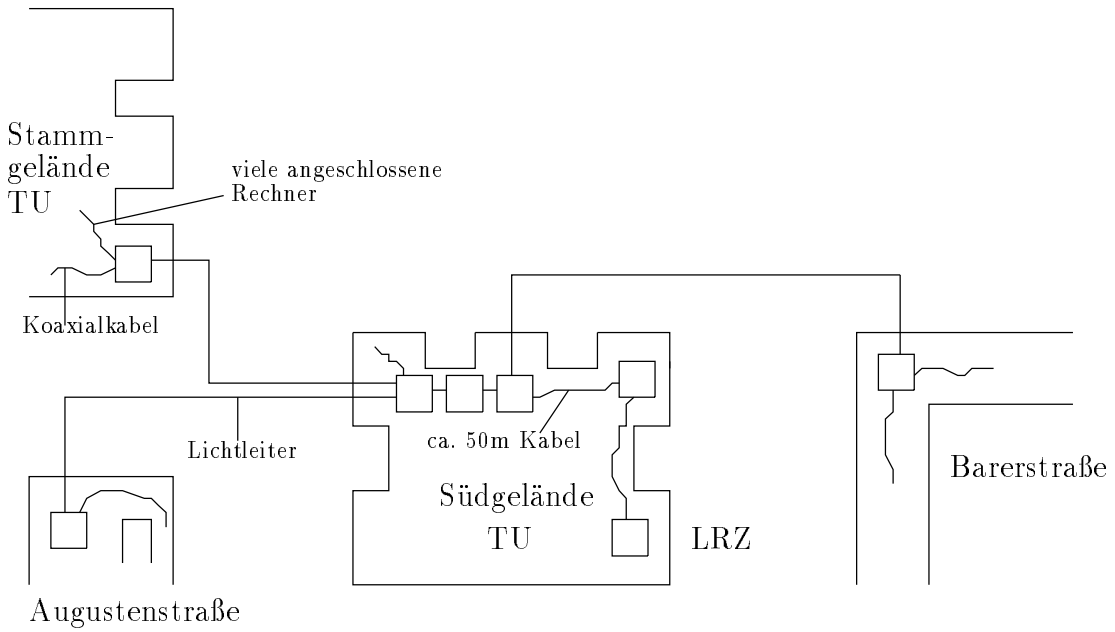


Bild 1.1 2

Nach Verkehrsbedürfnissen werden auch strukturierte lokale Netze benutzt: z. B. Universität Karlsruhe.

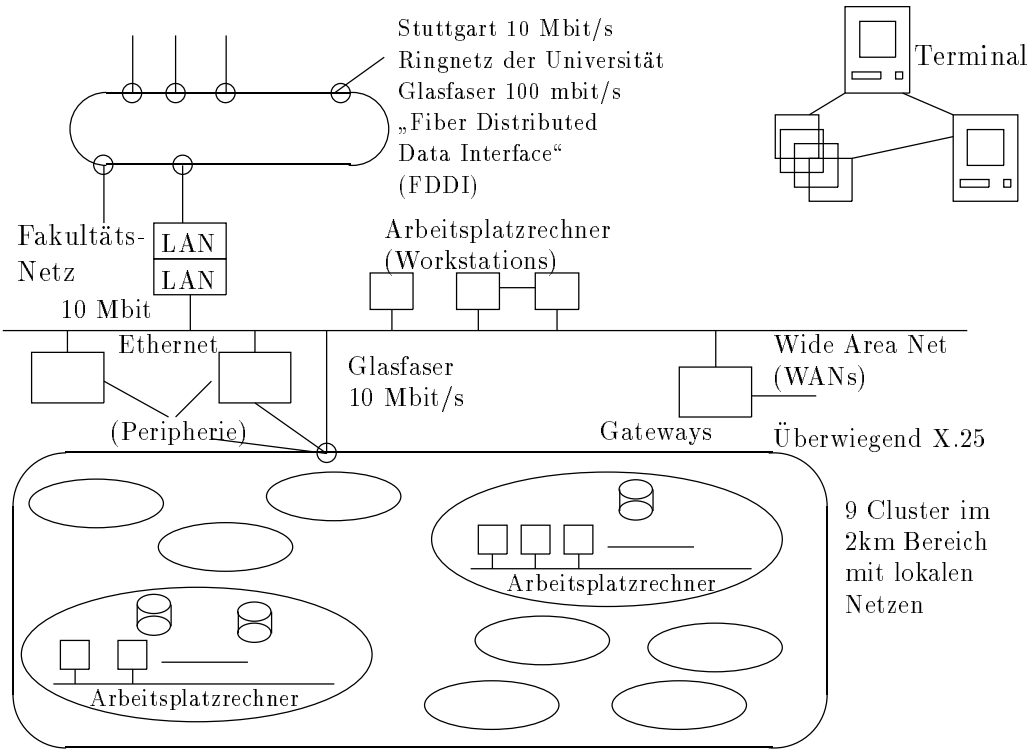


Bild 1.1 3

Beispiel: Fernnetz (WAN, engl.: *Wide Area Network* **)**

Verschiedene Einrichtungen als Kommunikationspartner, grundstücksübergreifendes Netz, viele Partner, weit verteilt.

→ (nach bisherigem Stand) Leitungen geringen Grenzdurchsatzes, meist 64 Kbit/s

→ öffentlicher Träger (engl.: *public carrier*) stellt Leitungen oder übernimmt sogar die Vermittlung, z. B. in der Bundesrepublik die deutsche Bundespost (DBP).

Vermittlung (engl.: *switching* **):**

Lenkung der Nachricht von Sender zu Empfänger, wichtig in Viel-Endpunkt-Kommunikationssystemen.

Klassisches Beispiel für ein Rechnernetz:

ARPANET, seit 1971

ARPA: engl.: *Advanced Research Project Agency des Department Of Defense*

Zusammenschluß von Hochschul(instituten) mit Forschungsaufträgen der ARPA (später DARPA (engl.: *Defense Advanced Research Projekt Agency*) und einschlägigen Industrieunternehmungen, von kommerziellen Unternehmen (Bolt, Beranek & Newman) betrieben.

Netz mit Teilstreckenvermittlung . Die Nachricht durchläuft jeweils eine Teilstrecke (engl.: *hop*) zu einem nächsten Knoten des Netzes, wird zwischengespeichert, geprüft, quittiert, weitergeleitet (engl.: *store and forward*).

→ gute Leitungsnutzung durch Überlagerung vieler Kommunikationsbeziehungen auf einer Leitung. Gute Wahrscheinlichkeit, daß erste Teilstrecke frei ist; keine (im Verhältnis zur

Nachrichtendauer lange) Prüfung, ob Gesamtstrecke sofort frei ist. Die Nachricht wird in „Pakete“ von 100 Bits zerlegt transportiert.

→ kürzere Verweilzeit (Laufzeit, engl.: *delay*) für 1. Zeichen und für die Gesamtnachricht, einfachere Pufferverwaltung in den Knoten. (Bild 1.1 5–7)

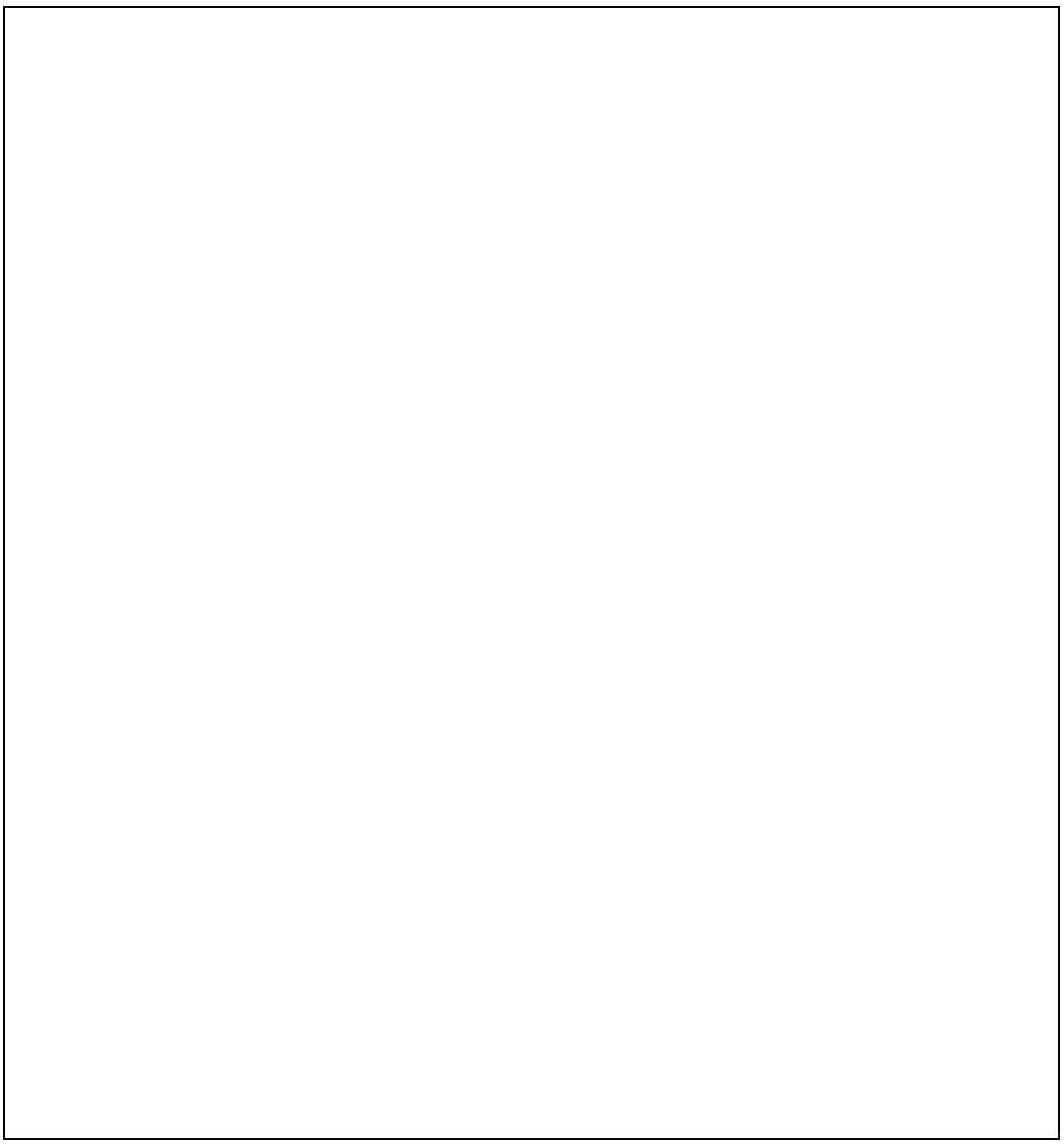


Bild 1.1 4 Teil a und b

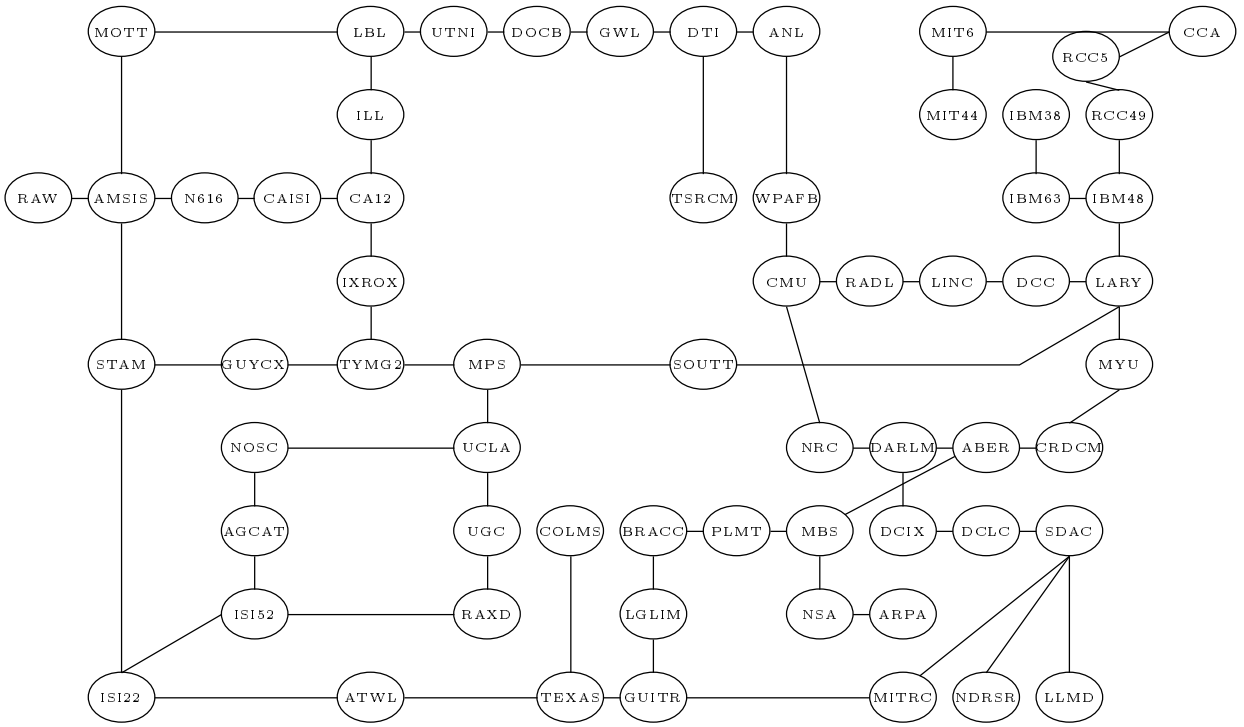
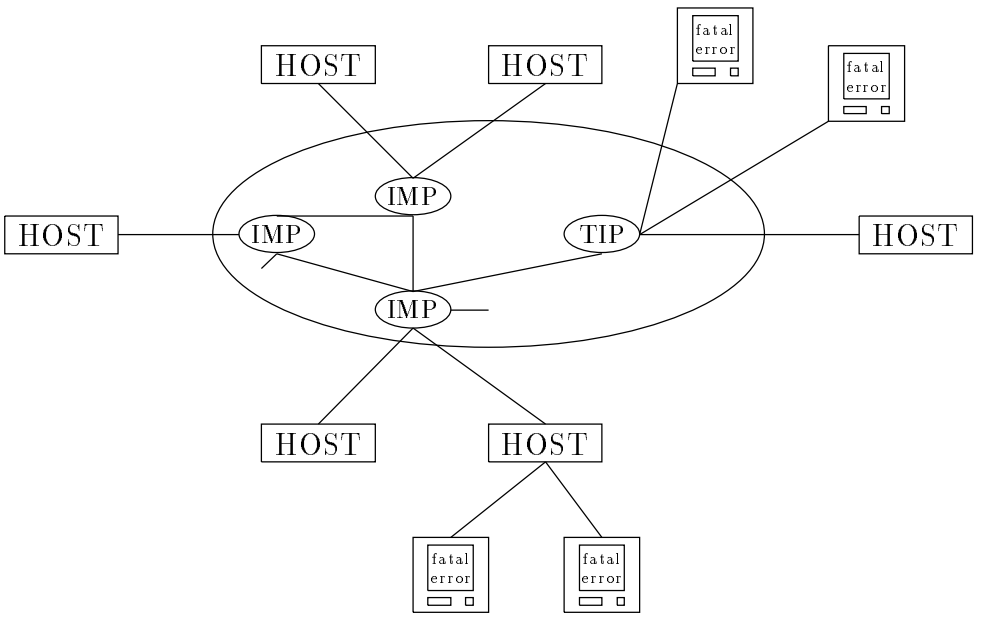


Bild 1.1 5



HOST:
Verarbeitungs-
rechner

IMP:
Interface
Message
Processor
(ein Prozeß-
rechner)

TIP:
Terminal
Interface
Message
Processor

Bild 1.1 7

Als Netzknoten fungieren nicht hosts, sondern nur gewidmete Rechner (IMPs (IMP: Interface Message Processor), TIPs (TIP: Terminal Interface Processor)). Mit den Leitungen (56 kbit/s, auch 230,4 kbit/s) bilden sie das Kommunikationssystem des Rechnernetzes
(engl.: *communication subnetwork*).

Zahlen: (Die Angaben beruhen auf Messungen von 1973-1975)

- mehr als 100 Knoten, mehrere hundert hosts
- im Mittel 2,3 Nachbarn je IMP/TIP
- Nachrichten wandern im Mittel nur 3,3 *hops* weit (lokale Verkehrskonzentration!)
- mittlere Nachrichtenlänge beträgt 234 Bits
- mittlere Paketzahl beträgt 1,12
- schwache Auslastung (106 Pakete/Tag)

ARPANET Pionierrolle für

- Paketnetz
- heterogenes Netz (hosts sind ca. 15 verschiedenen Systemfamilien entnommen)
- offenes Netz (bekannte, stabile, herstellerunabhängige Schnittstellen (gerade auch in der Kommunikationssoftware!))
- Protokollhierarchie

Viele Veröffentlichungen (daher von Professoren (über)geschätzt) und viele wissenschaftliche Ergebnisse wirkten gestaltend für Folgeprojekte:

- Kommunikationssystem Vorbild für genormte Paketnetze („X.25“-Netze, z. B. DATEX-P der DBP)
- ARPANET II-Kommunikationssoftware verbreitet sich mit UNIX als „TCP/IP“-Software (transport control protocol/ internet protocol), vorübergehender Konkurrent zur genormten ISO-OSI- Software (International Standardisation Organisation - Open System Interconnection) ab ca. 1982.

Heute existieren in den USA viele verschiedene Wissenschaftsnetze

Abkürzungen:

MILNET	Military Network (eines von Hunderten!)
NSFNET	National Science Foundation Network
CSNET	Computer Science Network
SERCNET	Science Engineering Research Council Network
JANET	Joint Academic Network
RARE	Reseaux Associes Pour La Recherche Europenne
DFN	Deutsches Forschungsnetz
HMI/BERNET	Hahn-Meitner-Institut-Netz/Berliner-Netz
COSINE	Cooperation Of Open Interconnection Nets In Europe
SPAN	Space Physics Analysis Network
BITNET	Because It's Time Network
EARN	European Academic & Research Network
VNET	Virtual Network
USENET	User's Network
EUNET	European Unix Network
UUCP	Unix To Unix Copy
SNA	System Network Architecture
INTERNET	Nachfolge zu ARPA-Net

Die Wissenschaftsnetze sind an Verkehrsvolumen und Teilnehmerzahl klein gegenüber den kommerziellen Netzen.

Die Entwicklung von wissenschaftlichen Netzen:

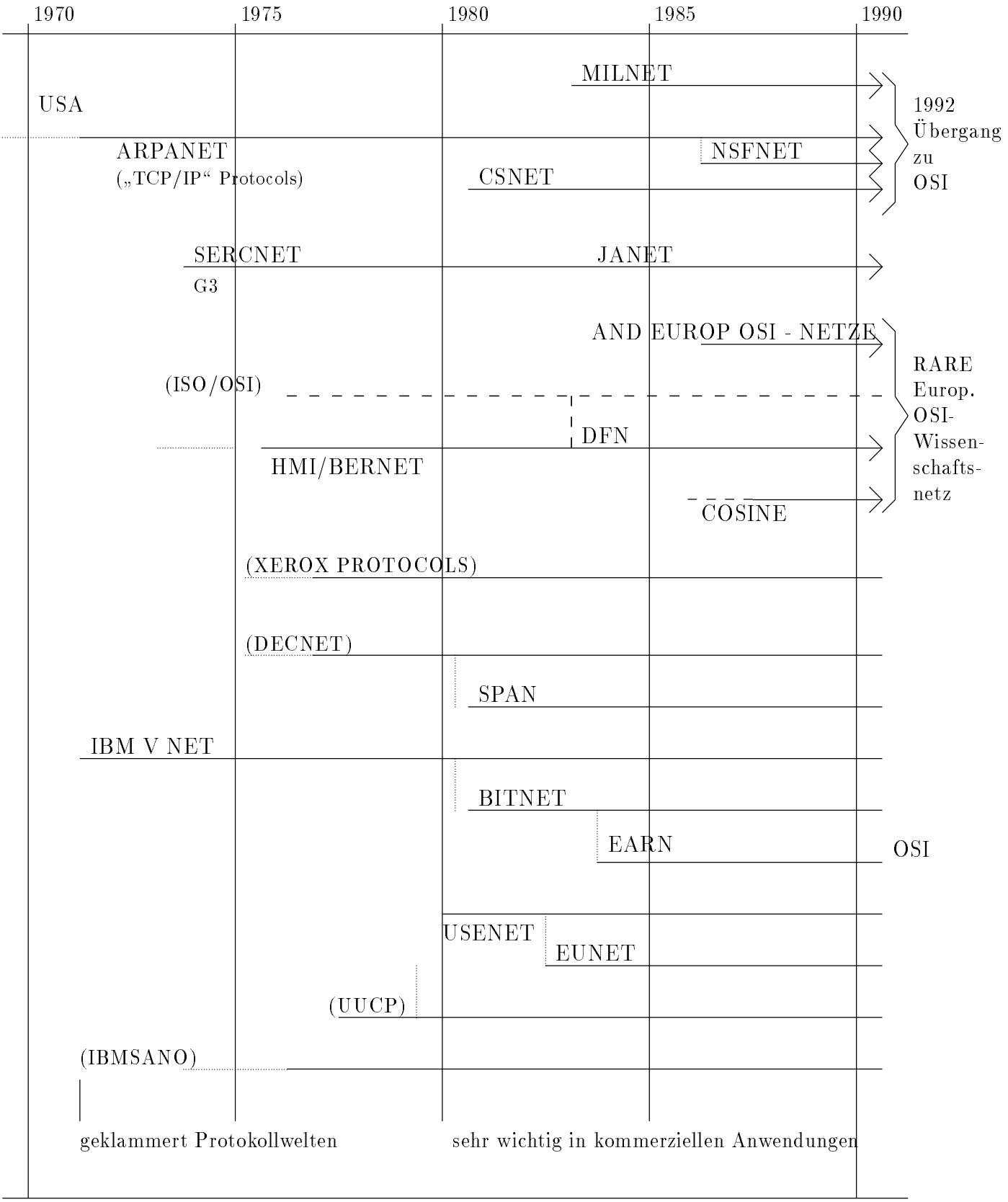

1970
1975
1980
1985
1990
MILNET
USA
1992
Übergang
zu
OSI
ARPANET
(„TCP/IP“ Protocols)
NSFNET
CSNET
SERCNET
G3
JANET
AND EUROP OSI - NETZE
RARE
Europ.
OSI-
Wissen-
schafts-
netz
(ISO/OSI)
DFN
HMI/BERNET
COSINE
(XEROX PROTOCOLS)
(DECNET)
SPAN
IBM V NET
BITNET
EARN
OSI
USENET
EUNET
(UUCP)
(IBMSANO)
geklammert Protokollwelten
sehr wichtig in kommerziellen Anwendungen

Bild 1.1 8

Deutsches Forschungsnetz (DFN)

— kein Forschungsvorhaben, sondern Kommunikationsinfrastruktur für die Wissenschaft

— (bislang) kein eigenes physisches Netz, sondern Kommunikation über

- DATEX-P (DBP)
- regionale Netze aus DBP-Leitungen und Knotenrechnern (NRW, Berlin)

— DFN benutzt konsistenten Satz von Kommunikationssoftware für 15 verschiedene Betriebssysteme, so weit wie möglich nach internationaler Norm (OSI), entwickelt teilweise im Auftrag des DFN, finanziert durch Bundes-minister für Forschung und Technologie

— regionale Netze aus DBP-Leitungen und Knotenrechnern (NRW, Berlin)

— DFN finanziert auch Investitionen, Pilotbetrieb, Entwicklung neuer Netzanwendungen in der Wissenschaft z. B. Breitband (Bewegt-Bild-Kommunikation)

— Formal: DFN Verein von 125 Wissenschaftseinrichtungen

— DFN auch Interessenvertreter, → DBP, Herstellern, Staat, ausländische „Netze“

Für ein Jahrzehnt bestand eine etablierte Trennung von Fernnetzen und lokalen Netzen:

Fernnetze (WANs)	Lokale Netze (LANs)
weit 10..10 000 km	nah 0,01...1 km
viele juristische Personen	eine juristische Person
post/public carrier	Privat-Technik
kleiner Grenzdurchsatz	grosser Grenzdurchsatz
gestört, unsicher	ungestört, sicher

Beginnt wieder zu zerfallen: Lichtleiter bieten Grenzdurchsätze wie in LAN
digitale Nebenstellenanlagen erbringen LAN-Funktionen
private Anbieter kommen und bringen (ISDN-)Posttechnik Homogene Kommunikationsprotokolle in beide Welten

Wozu Rechnernetze ?

1. Kommunikation zwischen Personen
   — elektronischer Briefverkehr (engl.: *mail, messages*)
   — elektronische Konferenzen (engl.: *conferencing*) bisher Texte, künftig mit Computerdaten, Video, Audio gemischt Telekooperation, Arbeit im verteilten Team
2. Dateizugriffe (Gemeinsame Datenbestände)
   — Dateitransfer (engl.: *file transfer, FT*)
   — Dateizugang (engl.: *file access*)

3. Benutzung entfernter Verarbeitungsrechner (gleichartig: Lastausgleich, kaum wirtschaftlich, andersartig: spezial, Hochleistungsrechner)
   - — Stapelfernverarbeitung (engl.: *remote job entry, RJE*)
   - — Ferndialog (engl.: *remote logon*)
4. Kooperation von Programmläufen (→ verteilte Anwendungen)
   - — *(remote) inter process communication*, IPC noch in den Anfängen
5. Zugang zu entfernten Dienstleistungen; geboten von spezialisierten „server“
   - — Datei-Server
   - — Druck-Server
   - — Mail-Server
   - — Computation-Server
6. Steigerung der Zuverlässigkeit durch Vernetzung mit Aushilfs-Rechensystem durchaus schwierig:
   - — Vernetzung selbst unzuverlässig und verletzbar
   - — bei Zusammenbruch ist seitens des Aushilfs-Systems Zustand kaum aufzunehmen. Also: Wiederaufsetzen auf vorsorglich ausgetauschten Bearbeitungsständen; träge

In wenigen Jahren werden Rechnernetze allgegenwärtig sein, dabei sind erhebliche Auswirkungen auf folgende Bereiche möglich: Arbeitsstile, Heimarbeit, Kooperationsneigung, Ausgleich der Informiertheit ?

1.2 Verbindungsstrukturen

Rechnerkopplung

vgl. auch: Vorlesung Rechnerarchitektur, insbesondere Abschnitt 1.4 !

Wozu Rechner koppeln ?

— Kommunikation zwischen Rechnern, die (bzw. Personen, deren Rechner) notwendigerweise an verschiedenen Orten stehen (Hauptgrund für Rechnernetze!)

— mehr Zuverlassigkeit: d.h. Wahrscheinlichkeit, daß im Zeitraum bis t Funktion korrekt erbringbar. Verfügbarkeit: d.h. Wahrscheinlichkeit, daß im Zeitpunkt t Funktion korrekt erbringbar

— mehr Grenzdurchsatz: damit Verkleinerung der Wartezeiten *(single server/multiserver queue)*

— Ausgleich schwankender Anforderungen

— Zugang zu sonst nicht gebotenen Funktionen

1.2.1 Mehrprozessorsysteme

Rechnersysteme mit mehreren Prozessoren mit gemeinsam zugreifbarem Hauptspeicher (nicht in Rechnernetzen) (Bild 1.2 1)

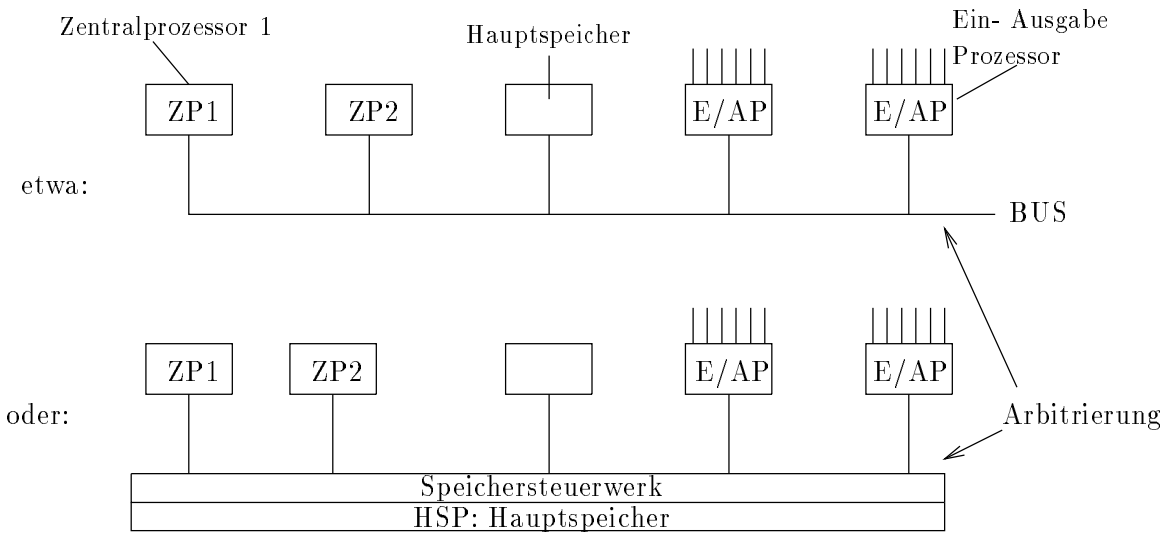


Bild 1.2 1

Bus:
gemeinsamer, zeitteilig benutzter Nachrichtenweg: heute typisch für kleine und mittlere Rechner, auch LANs häufig: ETHERNET
In Rechnern (Zentralbus): viele (z.B 50) parallele Leitungen, 50...2000 Mbit/s
In Lokalen Netzen: eine Leitung, z.B 10 Mbit/s

Zweck:

— Leistungssteigerung an Familienobergrenze

— fehlertolerante Systeme mit schnellem *Back-Up*

— hochparallele Systeme (Forschungsobjekt!)

1.2.2 Direkte Kanalkopplung

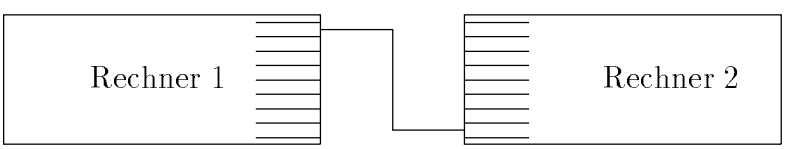


Bild 1.2 2

Kanäle bieten byte-serielle Übertragung, i.. a. Leitungsbündel, bis 50...100 km, 0,2...5 Mbit/s.

Zweck:
Haupt/Vorrechner-Kopplung.

1.2.3 Kopplung über peripheren Speicher

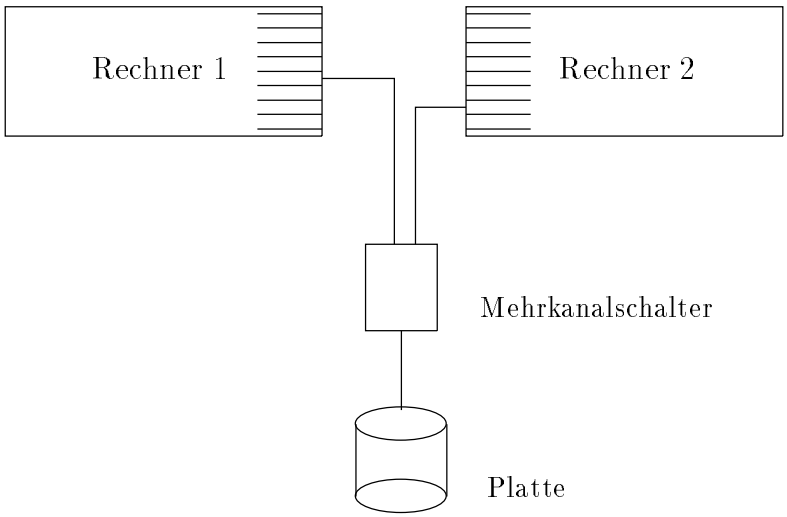


Bild 1.2 3

Leistungsdaten wie bei 1.2.2

Zweck:

— Arbeitsteilung an gemeinsamen großen Datenbeständen

— fehlertolerante Systeme mit mittelschnellem Back-Up

1.2.1 ist kein Rechnernetz

1.2.2 und 1.2.3 werden nicht in dieser Vorlesung behandelt

1.2.4 Kopplung über Datenfernübertragungsstrecke

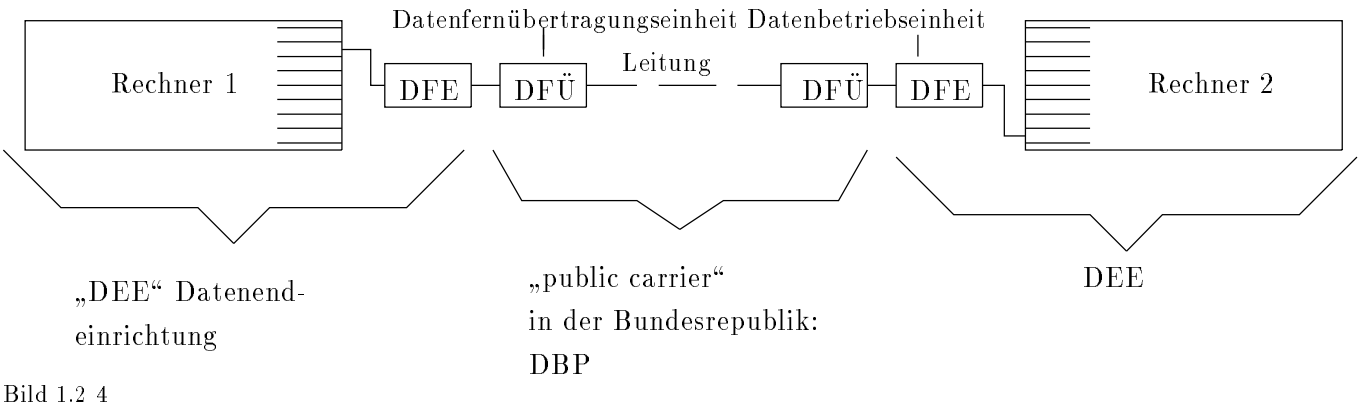


Bild 1.2 4

Vorwiegend serielle Übertragung zwischen den Datenübertragungseinheiten: auch Steuersignale! D.h. durch zeitliche Stellung, besondere Codierung gekennzeichnet: *inband signalling*

Dagegen Schnittstelle mit mehreren Leitungen, bedeutungsspezialisiert, zwischen DFE und DFÜ: *outband signalling*

DFE passt DFÜ an Zentraleinheit an (also ein *controller*, „Gerätesteuerwerk")

Modem: Mo dulations - Dem odulationseinheit: Paßt digitale Geräte an analoge Übertragungsstrecke an.
Codec: Co dierungs - Dec odierungseinheit: Paßt analoge Geräte an digitale Übertragungsstrecke an.

Datendienste der Deutschen Bundespost

1. (Datenübertragung im) Fernsprechnetz:
   Allgegenwärtig, 20 Millionen Anschlüsse in der Bundesrepublik; nur Tonfrequenzbereich, deshalb sind „Modems" erforderlich: Binärzeichen durch Tonfrequenzsignale. Langer Verbindungsaufbau, hohe Störrate, bis etwa 4,8 kbit/s brauchbar, Gebühren sind zeit- und entfernungsabhängig.

2. Festverbindung:
   (auch: „Standleitungen", HFD „Hauptanschluß für Direktruf")
   Ebenfalls Modems erforderlich, lohnend nur bei guter Auslastung; Störrate kleiner, da Vermittlungsstellen umgangen werden; Grenzdurchsatz 4,8 ; 9,6 ; 19,2 ; 48 ; 64 kbit/s; 2 ; 34 ; 140 Mbit/s. Gebühren sind abhängig von Zeit, Entfernung, Grenzdurchsatz und Volumen. DBP scheint auch Einmalkosten (Investition) und laufende Kosten (Wartung) zu akzeptieren.
   Nach übertragenem Volumen wichtigster Dienst !

3. DATEX-L:
   Digitales vermittelndes Netz (Vollstrecken/ „leitungsvermittelt"). Langer Verbindungsaufbau, geringe Störrate, Gebühren abhängig von Zeit, Entfernung und Grenzdurchsatz.

4. DATEX-P:
   Digitales vermittelndes Netz (Teilstreckenvermittlung für in Pakete zerlegte Nachrichten: „Paketvermittlung"). Ca. 30 000 Teilnehmer, Grenzdurchsatz bis 48 kbit/s, Gebühren sind abhängig (im wesentlichen) von Volumen. Ein value added service VAN (engl.: *value added network*), ab 1991 nicht mehr Postmonopol.
   DBP behält Monopol für:

   — grundstücksüberschreitende Leitungen
   — Fernsprechverkehr (technisch künftig schwerhaltbar!)

5. ISDN (engl.: *integrated services digital network*):
   Digitales, leitungsvermittelndes Netz, das das Fernsprechnetz ersetzt und viele Dienste integriert: Fernsprechen, Bildfernsprechen, Fernkopieren, Rechnerkommunikation. Doppelte Grundgebühr, Sondergebühren für Sonderdienste im Vergleich zu Fernsprechen. 64 kbit/s je Hauptanschluß. Noch in Pilotphase, allgemeine Einführung in den Neunziger Jahren. Dürfte auch DATEX-L unnötig machen.
   Erweiterung: Breitband-ISDN (2 MByte/s), wahrscheinlich ab 1995.

6. TELEX (Fernschreibwählnetz, 50/100 bit/s)
   Weicht TELETEX-Netz, 2400 bit/s, zwischen elektronischen Schreibmaschinen.
   Ca. 100 000 Teilnehmer zusammen.

7. BTX (Bildschirmtext)
   Standbild-Fernsehen mit digitalem Rückkanal (Bildselektion, Eingabe)

Leitungen:

Typ	verdrillte Kupferleitung	Koaxialkabel „Basisband“	„Breitband“	Glasfaser	Mikrowellen-verbindung terrestrisch	Mikrowellen-verbindung Satellit
Verstärker-distanz mindestens	bei 1 Mbit/s 1 km bei 10 kbit/s: 30km	5 km	30 km	80 km	100 km	20000 km
Grenzdurch-satz (Übertra-gungsrate)	bis etwa 1Mbit/s	20 Mbit/s	500 Mbit/s	2 Gbit/s	500 Mbit/s	100 Mbit/s
Bitfehlerrate	ca. 10^{-5} stark umgebungs-abhängig	10^{-7}	10^{-9}	10^{-11}	10^{-7}	10^{-7}
abhörsicher	kaum	gut schwierig	gut	sehr gut	nein	nein
Installation	einfach	mäßig	mäßig schwierig	schwierig	mäßig schwierig	sehr schwierig

Basisband-Prinzip:

Nutzung der Leitung für eine Übertragung zugleich, meist unter Zulassung von Gleichspannungsanteil (schwierigere Verstärkertechnik). So: digitale Postnetze, ETHERNET. Fernsprechen (keine Gleichspannung → Modem) ISDN.

Breitband-Prinzip:

Gleichzeitige Nutzung der Leitung für viele , in der Frequenz versetzte Übertragungen. So: Rundfunk, Fernsehen, Trägerfrequenz/Mikrowellennetz der DBP (z. B. 1024 Ferngespräche über einen Kanal).

Funktionell wird Basisbandprinzip durch Zeitmultiplex dem Breitbandprinzip äquivalent.

1.2.5 Kopplung über private/öffentliche Fernnetze (WANs)

(wird nicht betrachtet)

1.2.6 Kopplung über lokale Netze (LANs)

vgl. hierzu die Beispiele in 1.1

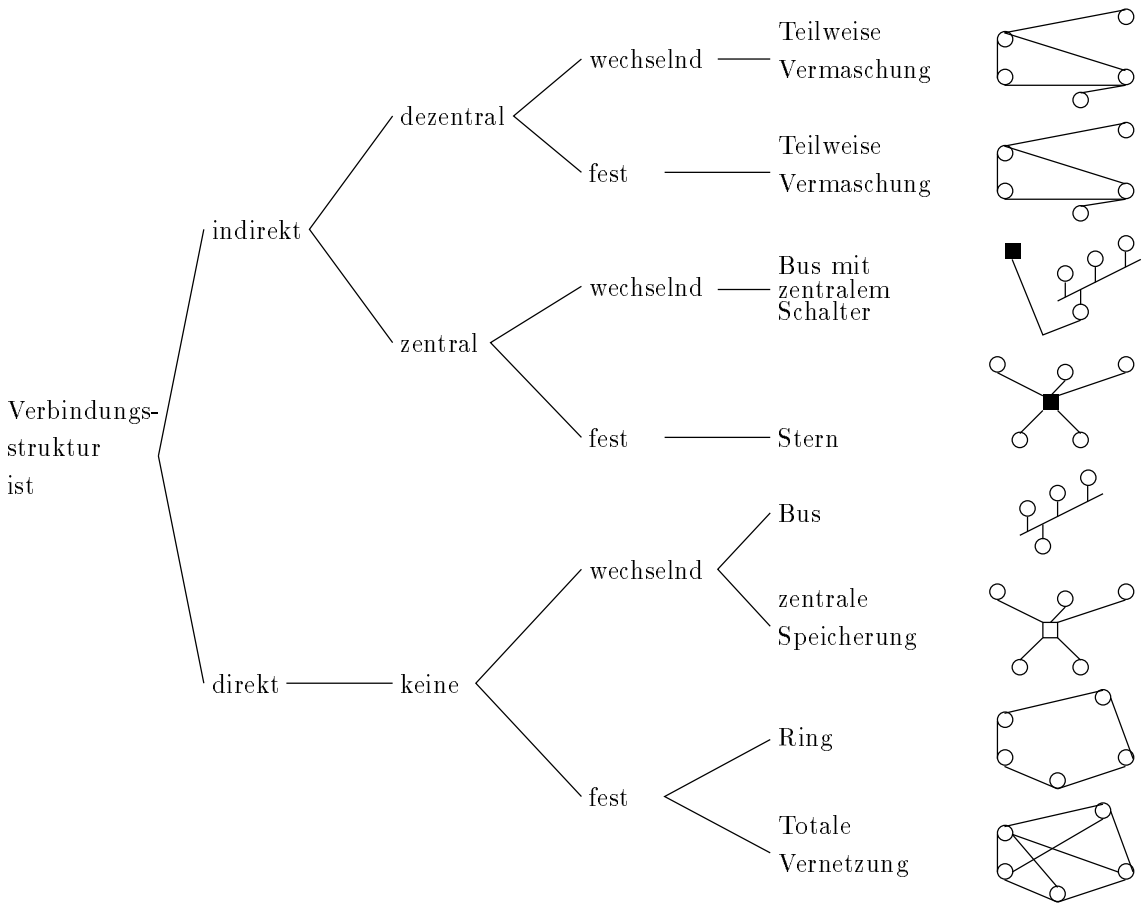


Bild 1.2 5

Taxonorie von Anderson/Jensen. Angreifbar; schillernde Bedeutung der Leitungswidmung (ausschließlich/fest einem Sender-Empfänger-Paar zugeordnet; exklusive („einfache“)Funktion)

1.3 Rechnernetze, verteilte und distribuierte Systeme

Wichtiger, schillernder Begriff: verteiltes System.

Wir spalten auf:

1. verteiltes System
2. distribuiertes System (Siegert,Hegering).

Ein System ist **verteilt** wenn die Kommunikationsmechanismen zwischen den Elementen des Systems nicht erlauben, im Betrieb den Gesamtzustand des Systems zu ermitteln. Dabei ist der Systemzustand die Menge der Elementzustände.

Grund dafür ist z. B.: Der Zustand ändert sich bereits in der Zeitspanne, die seine Erfassung braucht. Ein aktueller Zustand ist nicht beschaffbar. Sind die Nachrichtenlaufzeiten zwischen den Elementen unbekannt, dann kann man auch keinen vergangenen oder künftigen Systemzustand gewinnen!

Das Problem der Ermittlung auch nur eines vergangen oder künftigen Systemzustandes ist auch nicht durch synchrone Uhren in den Elementen zu lösen, da das System diese nicht synchronisieren kann!
→ Nachteile bezüglich Effizienz, Kommunikation, Diagnose (Problem für Fehlertoleranz!)

Offenbar kann dasselbe System nach Definition von Elementen und Zuständen „verteilt“ und „unverteilt“ sein:

z. B. ist ein Rechnernetz

— unverteilt bezüglich Konfiguration, planmäßigem Betriebszustand

— verteilt bezüglich Hauptspeicherinhalten, Befehlszähler ...

Ein System ist **distributiert**, wenn

— es aus einer Menge von Funktionseinheiten (FE) besteht, die Benutzeraufträge durch kooperative Autonomie bearbeiten (z. B. Benutzeraufträge zerfallen in Teilaufträge an verschiedene FE)

— FE sind räumlich entfernt und der Benutzer kennt den Ort der FE nicht.

Distribuierte Systeme müssen folgendes enthalten:

1. ein Netzbetriebssystem, das Aufträge den FE bzw. Orten zuteilt; möglicherweise sind die FE selbst Rechner, haben lokale Betriebssysteme . Entsprechend sind
2. Netzcompiler möglich, distribuierte Laufzeitsysteme, distribuierte Datenhaltungen; und natürlich
3. Kommunikationsfunktionen zwischen den FE!

Die Distribuierung wird durch Verteiltsein des Systems (kein konsistenter Gesamtzustand) erschwert!

Beispiel:

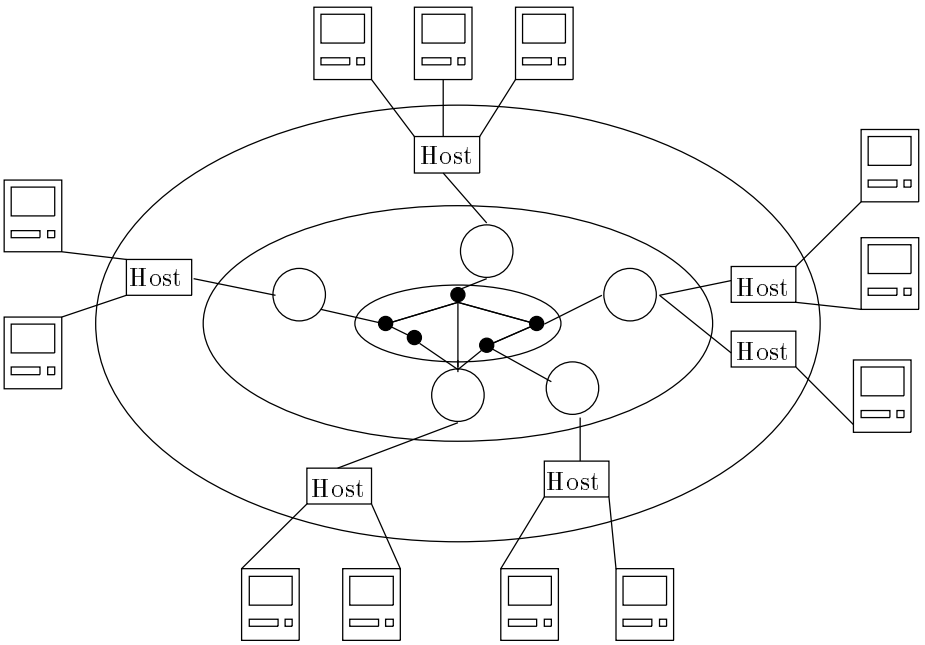


Bild 1.3 1

S1: kann (muss nicht) ein distribuiertes System umreissen. Heute: noch sehr selten.
S2: Kommunikationsnetz (engl.: *communication subsystem*). Transportiert Objekte, die zwischen S1 und S2 liegen an einen angegebenen Ort.
S3: Transportnetz (connection network): Menge virtueller Wege.

1.4 „Logische“ und physische Struktur des Netzes

Die logische Struktur [Logik: die Theorie wahrer Aussageformen], besser: **funktionale Struktur** des Netzes wird durch Zerlegung in Funktionen und deren Beziehung gewonnen, etwa:

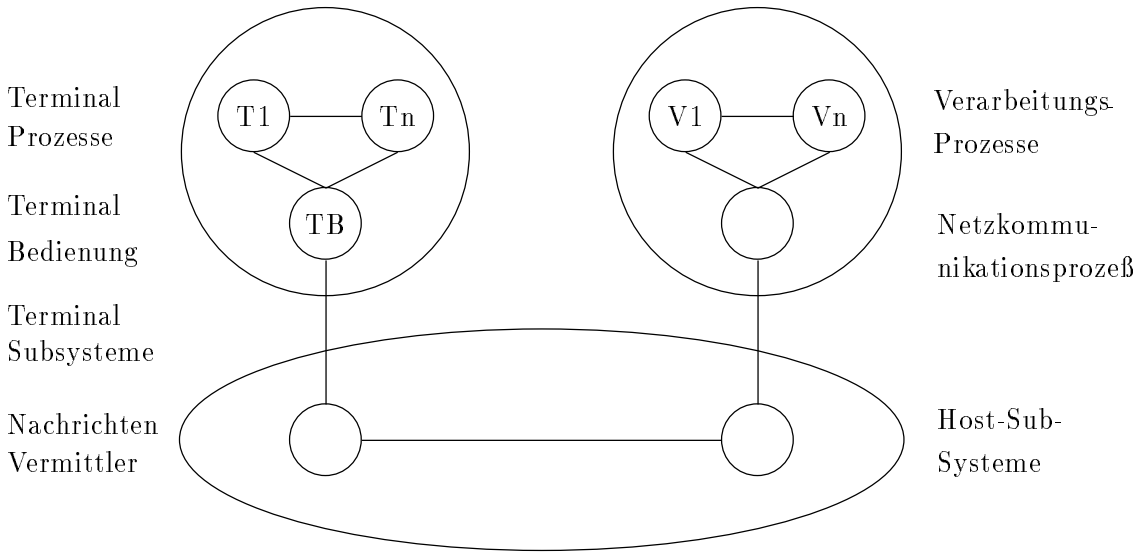


Bild 1.4 1

Die funktionale Struktur sollte die erste Betrachtungsebene des Entwerfens sein!

Die **physische Struktur** des Netzes wird durch Zerlegung in physische Funktionseinheiten gewonnen. So könnte dasselbe Beispiel so aussehen:

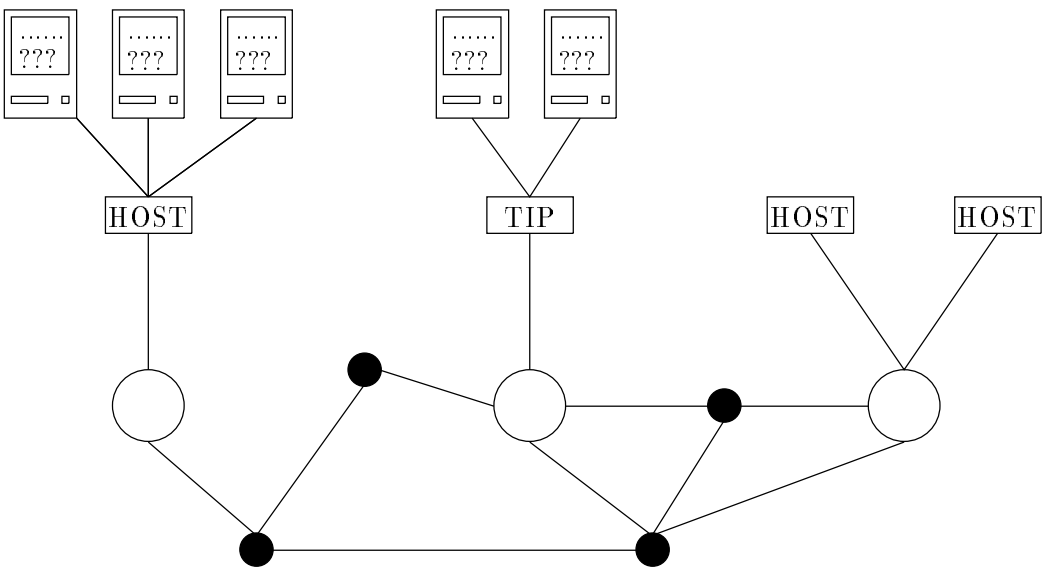


Bild 1.4 2

Der Netzentwurf ist weitgehend der Entwurf einer funktionalen Struktur aus funktionalen Anforderungen, einer physischen Struktur aus Anordnungs- und Verkehrsanforderungen und die Festlegung der Abbildung der funktionalen auf die physische Struktur (evtl. dynamisch vom System änderbar!).

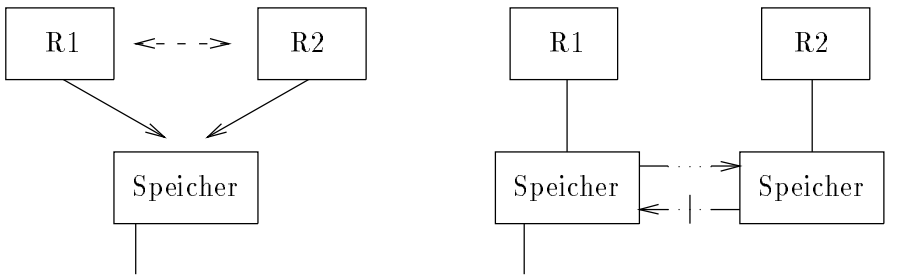
1.5 Anforderungen an Kommunikationsnetze

(Kommunikationsnetze als Untereinheit (Schnitt S2) eines Rechnernetzes!)

1.5.1 Besonderheiten von Netzen/verteilten Systemen im Verhältnis zu konzentrierten Systemen (einzelne Rechner)

Für Netze bzw. verteilte Systeme gilt:

1. Räumliche Trennung
   - keine (schnellen) gemeinsamen Speicher
   - separate Adreßräume
   - keine synchronen Uhren
   - Kommunikation nicht über gemeinsame (*shared*) Variable, sondern über Nachrichten!



gemeinsame Variable, beiderseitig schreib/lesbar — Konzentrierte Systeme

Kommunikationsvariable einseitig schreib/lesbar — Rechnernetze / verteilte Systeme

Bild 1.5 1

2. Autonomie der Knoten des Netzes
   - keine Synchronität (soweit nicht durch Nachrichten - in grober zeitlicher Körnung - herbeigeführt)
   - verschiedene lokale Ziele, Strategien, Fehlerbehandlungen, ...
   - Fehlerabschottung erleichtert, Diagnose auf Netzebene erschwert
   - kein im Bertrieb ermittelbarer Netzzustand („→ verteiltes System“).
3. Nachrichten im Netz
   - verzögert (schwankend)
   - verloren
   - verfälscht
   - du(multi)pliziert (nach Verlust einer Quittung/auf alternativen Wegen/ durch Netzmißbrauch)

— durch Fehler oder aus Mißbrauch generiert

4. Heterogenität der Knoten

— Datenformate/ Algorithmen/ Sprachen/ Geräte/ Strategien/ Strukturierung.

1.5.2 Anforderungen

1. Adressierbarkeit:
lokale/globale Namen dann Umsetzung in Adressen/Weginformation erforderlich:
name server im Netz, *routing tables*
Adressen (mangelnde Objektverschieblichkeit)
Weginformation (perspektivistisch; ändert sich bei Fehler/Umkonfiguration)

2. Verschiedene Datenklassen im Netz:
normal - Vorrang (expedited data)
normal - asynchrone Signale - Synchronisationen (z. B. wait signal)
in konzentrierten Systemen über verschiedene, gewidmete Wege, z. B. Datenpfade, Unterbrechungsleitung, Quittungsleitung.
im Netz typisch auch einer „Leitung“!

3. Korrekte Nachrichtenübertragung (gesendete Nachricht erreichen unverfälscht genau einmal genau die beabsichtigten Empfänger)

— trotz technischer Störungen

— trotz absichtlicher Schädigung

— trotz Asynchronität der Sender/ Empfänger (Nachricht unerwartet / Empfänger ruht)

1.5.3 Protokolle und Nachrichten

Im Netz: (Nutz-)Nachrichten und Nachrichten, die Kommunikation(-szustände) beschreiben/aushandeln.

Protokoll ist eine Spezifikation der Syntax und Semantik und Folgegesetzmäßigkeit von Daten, die gleichrangige Instanzen am Netz austauschen.

Typische Strukturierung von Kommunikationsfunktionen durch lineare Hierarchie (Schichtung).

Etwa: Kommunikation zweier entfernter Prozesse über Netz mit indirekter Übermittlung:

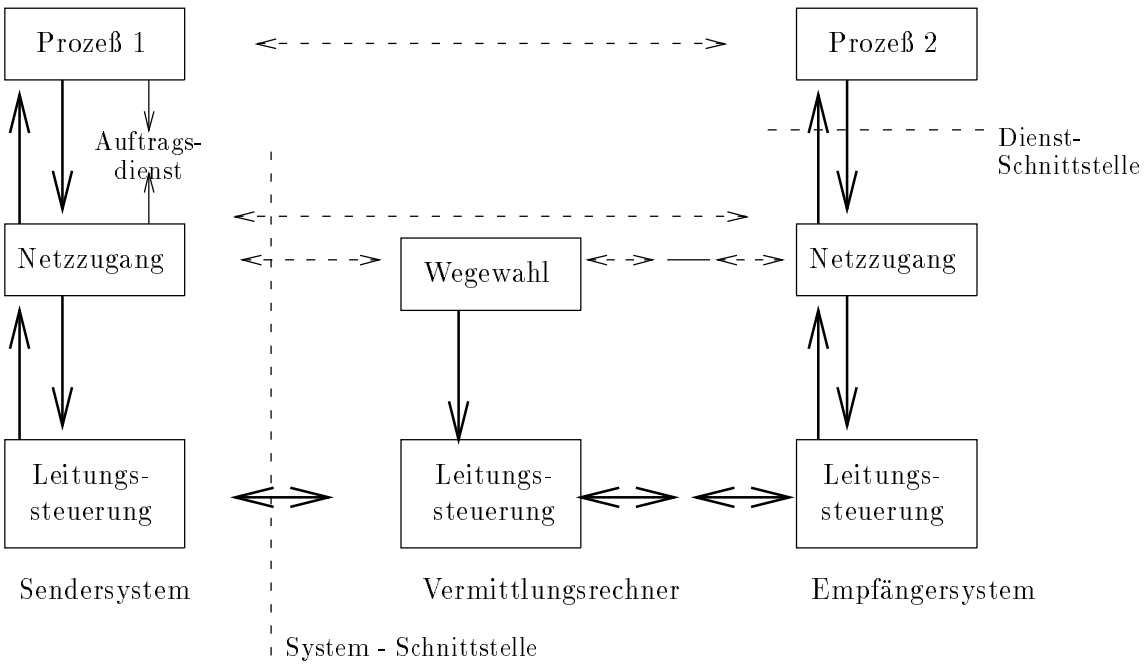


Bild 1.5 2

Der Schichtung von Funktionen entspricht eine Schichtung von Protokollen:

Prozeß/Prozeß-Protokoll

Netzzugangs-Protokoll

Leitungs-Protokoll gleichrangiger Instanzen

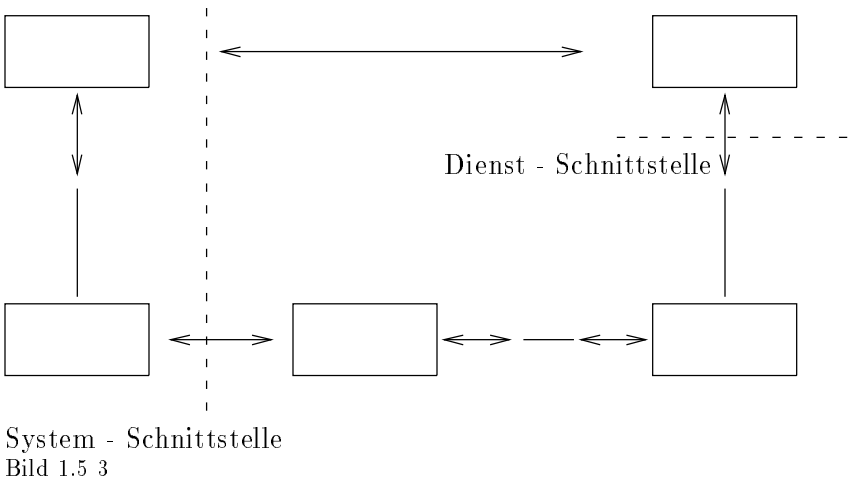


Bild 1.5 3

Schichtung von Kommunikationsinstanzen(-Protokollen) populäre Perspektive seit dem OSI-Rerferenz-Modell der ISO (1980). Zweck: Strukturierung als Grundlage für Normung

OSI: Open System Interface

ISO: International Standardisation Organisation

Auch ungenormte Kommunikationssysteme lassen sich annähernd nach dem OSI-Referenz-Modell strukturieren.

ISO (und andere!) arbeiten seit Anfang der 70er Jahre an Normung der System-Schnittstellen (Protokolle). Ziel: offene (Hersteller/Rechensystemunabhängige) Kommunikation

Daneben gewisse Ansätze zur Normung von Dienst-Schnittstellen. Ziel: Software-Portabilität

Eine Protokollspezifikation enthält z. B. Festlegungen zu

— Syntax der Datenobjekte:
Zeichen, Datei, Auftragsbeschreibung, Paket, Block (Formate, Struktur, Code)

— virtuellem Kommunikationsmedium:
Prioritäten, Reihenfolgeerhaltung

— Kommunikationsabläufen:

Steuerung (master/slave, contention (Verstopfung), ...)

Nachrichtenfluß

- Simplex: eine Richtung
- Halbduplex: beide Richtungen im Wechsel
- Duplex: beide Richtungen zugleich

Fehlerbehandlung, engl.: *recovery*, Synchronisation

— Auswirkung der Nachrichten (Semantik)

1.5.4 Nachrichten

Nachricht ist kontextabhängig:

1. Information von Quelle an Senke (Sender/Empfänger)
2. Bei der Übermittlung in einem elementaren Schritt behandelte Datenstruktur:

Prozeß:	Nachricht	verschiedenes Zerlegen, Zusammenfügen (engl.: *reassembly*), Reihenfolge, Quittung möglich.
Netzzugang:	Segment	
Knotenrechner:	Paket	
Leitungstreiber:	Block	

Nachricht besteht aus

1. Nachrichtenkopf (engl.: *header*): Empfänger (Name, Adresse, Weg), Sender, Nachrichtennummer, Länge, Sendezeit,...
2. Nachrichtenrumpf (engl.: *body*, text): Nutzinhalt wird nur vom Empfänger ausgewertet

3. Nachrichtenabschluß (engl.: *trailer*): Datensicherungsteil (Prüfbits)

Bemerkung

Vorspann (*header*) und Nachspann (*trailer*) bilden Rahmen (engl.: *frame*)

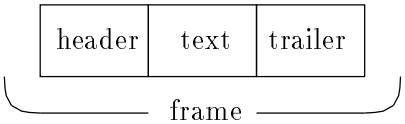


Bild 1.5 4a

Die Hierarchie von Kommunikationsinstanzen schafft im allgemeinen eine Verschachtelung von frames:

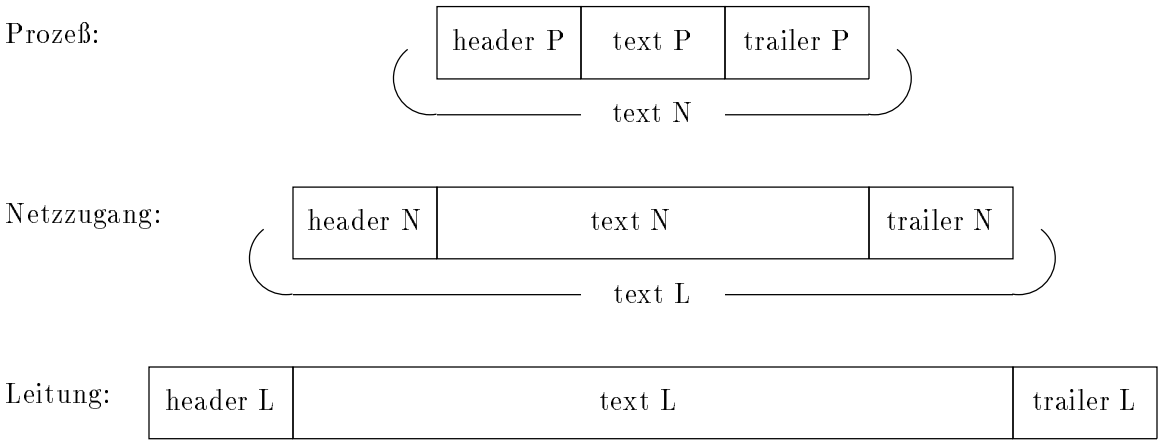


Bild 1.5 4b

„Zwiebelschalenstruktur“
Texte dürfen beliebige Bitmuster sein!
„Transparenz“ der Text-Ebene.
Prinzip führt zu Transport-*Overhead*.
Eventuell legt man Rahmen mehrerer Schichten zusammen.

1.5.5 Nicht-Transport-Dienste

Rechnernetze müssen weitere Dienste erbringen, über Transport von Benutzer-Daten hinaus:

1. Informationsdienste für Netzbenutzer
2. Netzsteuerung/Verwaltung (engl.: *network management*)
3. Informationsdienste für Netzoperateur
4. Dienste für Kooperation von Netzen

Informationsdienste für Netzbenutzer:

1. Information über entfernte Verarbeitungsrechner (*hosts*)
   - — planmäßige Betriebszeit
   - — Betreiber
   - — Hardware/Software: Art, Umfang, Version, aktuelle Verfügbarkeit, Tarife, Beratungs- funktionen (help), Manuale, Lernpropramme, Berater, ...
   - — aktuelle Mitteilungen des Rechenzentrums
   - — Operateur (Name, Adresse, evtl. Dialog)
   - — aktuelle Auslastung/Wartezeit
   - — Nachrichten für den Benutzer
   - — Zustand eigener Aufträge/Dateien
   - — Beschwerdenbriefkasten
2. Information über das (Kommunikations-)Netz
   - — Menge der nutzbaren Rechner: Namen/Adressen
   - — Menge der erreichbaren Personen: Namen/Adressen (beides sind Aufgaben eines name-servers, evtl. mit Personen/host-Information verquickt)
   - — (Konfiguration des Netzes)
   - — Netzdienste
   - — Zugang zu Nachbarnetzen
   - — Betriebszustand
   - — Neuigkeiten
   - — *help*
   - — Dialog mit Netzoperateur
   - — Beschwerdenbriefkasten

Netzsteuerung/Verwaltung (engl.: *network management*):

Funktionen können/müssen auf Moduln der Kommunikationssoftware verteilt sein, andere Funktionen sind zentral.

6 Grundfunktionen:

1. Abrechnung
2. Konfigurationsverwaltung
3. Fehlermanagement
4. Sicherheitsmanagement
5. Leistungsmangement

6. Betriebsmittelsteuerung

1. Abrechnung (engl.: *accounting*)

— Zwiespalt zwischen verursachergerechter Abrechnung/ Pauschalisierung/ Nulltarif (Kommunikationsförderung)

— im einzelnen schwierige Realisierung (Problem der nicht synchronen Uhren, nicht zuordbare Betriebsmittel)

— typische Kategorien: Anschaltzeit, Zahl der Sendungen, Volumen, Entfernung (selten!), auf host benutzte Dienste

2. Konfigurationsverwaltung (engl.: *configurations management*)

— Buchführung über Soll-Netz
Knotenrechner: ...
Leitungen: ...
Verarbeitungsrechner: ...

— aktuelles Ist-Netz (Verfügbarkeit, ...)

— Ein/Ausschleusen von Komponenten

— Fernbedienung (Operating, Software laden; auch im Zusammenhang mit Diagnose, Wiederanlauf)

3. Fehlermanagement (engl.: *fault management*)

typisch neben dem Betrieb! Fernwirkung!

— Nicht-lokale Fehler:

- Entdecken, Melden
- Diagnostizieren
- Eindämmen
- Prozesse wiederanlaufen lassen
- Beheben, Melden
  typisch: Reproduktion unsicher/unmöglich

— Registrierung der nicht-lokalen (und kommunikationsorientierten lokalen) Fehler

— Testhilfen für Diagnose: Verfolgung von Nachrichten

- durch Echo-Test (Nachricht wird an Zwischen-Stationen zum Sender „reflektiert“)
- Registrierung der Nachricht an vorbestimmten Plätzen
- Zwischenstationen schreiben Notiz über Passieren der Nachricht und hängen diese ihr an

Fehlermanagement fußt auf umfangreichen Vorkehrungen im Netz, z. B.

— Prüfungen der Nachrichten, weitere Prüfungen in den Protokollen

— defensive Schnittstellen

— Redundanz (Leitungen, Knotenrechner, Prüfungen)

— periodischen Tests durch Nachrichtengeneratoren.

Man kann sehr gute Zuverlässigkeitswerte erreichen, z. B. DATEX-P der DBP.

4. Sicherheitsmanagement (engl.: *security management*)

Sicherheit: Schutz gegen Mißbrauch

Grundprobleme:

— Geheimhaltung von Nachrichten
lösbar durch Verschlüsselung (engl.: *encryption*)
Standardverfahren vorhanden, wichtige Entwicklung in den beiden letzten Jahrzehnten.

— Geheimhaltung von Kommunikationsbeziehungen
lösbar durch Adressverschlüsselung und (viele) dummy- Nachrichten

— Verhinderung von Verfälschung, Löschung, Wiederholung von Nachrichten
lösbar über Verschlüsselung, Prüfzeichen, Numerierung

— Verifikation des Absenders (digitale Unterschrift)

- Versicherung für den Empfänger
- Festlegung des Absenders auf die Nachricht (!) auch auf Verschlüsselung rückführbar

Insgesamt besteht das Sicherheitsrisiko bei Netzen nicht so sehr im Risiko der Nachrichtenübertragung oder der Netzkomponenten, sondern im Zugang zu schlecht gesicherten Daten !

5. Leistungsmanagement (engl.: *performance management*)

- Messungen: Verweilzeit und Umfang von Nachrichten (etwa wie *accounting*), Auslastung von Leitungen, Knotenrechnern, Häufigkeit von Dienstbenutzungen (*file transfer, dialog, mail, ...*)
- Statistik für Netzentwicklung und Tarifierung
- Trendanalyse/Prognose
- Sensitivitätsanalyse (wie wird eine Leistungsgröße wovon beeinflußt?)

6. Betriebsmittelsteuerung (engl.: *resource management*)

1. Wegbestimmungsverfahren (→ Abschnitt 3)

2. Priorisierung

Informationsdienste für Netzoperateur:

Ausgewählte Teile der Managementinformationen (Konfiguration, Fehler, Sicherheit, Leistungen). Netzoperateur muß Einwirkungsmoeglichkeiten haben und unter Umstaenden Zugang zu Benutzern.

Dienste für Kooperation von Netzen:

Gegenseitiger Zugang zu wichtiger Managementinformation (in standardisierter Form!) ist Voraussetzung für Kooperation: Konfiguration, Abrechnung, Leistung, Sicherheit, Fehlerbehandlung. Besondere Knotenrechner bilden den Übergang einer Protokollwelt zur anderen: *gateways*.

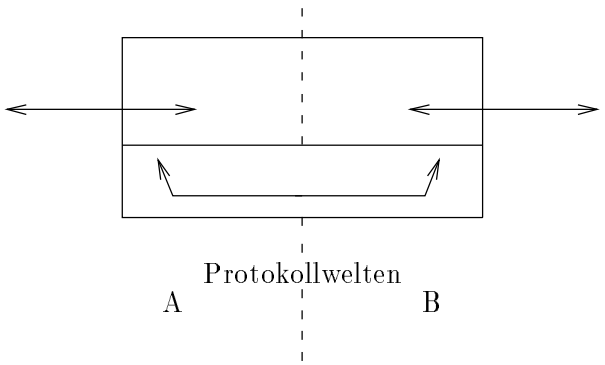


Bild 1.6 1

1.6 Charakterisierung von Kommunikationsbeziehungen

Teilnehmerzahl:

2: eine Quelle/eine Senke (engl.: *point to point*)

>2: eine Quelle/viele Senken (engl.: *multipoint, broadcast*)

>2: viele Quellen/Senken (engl.: *conference*)

Informationstyp:

Text, Audio (Sprache, Musik, ...), Video, Graphik (Standbild, Bewegtbild), Messwerte, ...
austauschorientierte Datenstrukturen wichtig!

Datenfluß:

einseitig („Verteilkommunikation“: Radio, TV)
beidseitig auf niederen Ebenen oft unterschieden: simplex, halbduplex, duplex

Steuerung:

explizite Steuerung: Sendeaufruf/Empfangsaufruf (*master, slave*)
Gleichberechtigung (Konkurrenzbetrieb: contention, Konfliktauflösung notwendig)

Verbindungsdienst:

- verbindungsorientiert: Existenz und Empfangsbereitschaft des Empfängers wird garantiert: z. B. Telefon, Fernschreiben, X.25 (layer 1,2,3 , *connection oriented* packet, CCITT)
- nachrichtenorientiert: Nachricht wird ohne Garantie über Empfänger (Zustand) transportiert: z. B. Briefe, Datagramme.

Verbindungsorientierung lohnend, wenn Verbindungsaufbau/abbau kurz im Verhältnis zur Dauer der Übertragungsphase ist. Kann *frame-Overhead* reduzieren.

Transaktionstypen

- Dialog (*conversational time sharing, interactive mode*):
  kurze Nachrichten, Ausgabestrom oft größer als Eingabestrom, Verquickung mit Graphik/windowing. Kurze Reaktionszeiten! „$\leq$ 2 s“ (meist nicht am Netz erreicht).
  Beispiel: Text/Programmentwicklung, einfache Buchungssysteme.
- Nachfragesysteme (engl.: *retrieval-, inquiry systems*):
  kurze Eingaben, oft lange Ausgaben, suchaufwendig, längere Reaktionszeiten akzeptiert (2 ...20 s). Fachinformationssysteme, Literatur-Recherchen, Bibliotheken, Krankenversicherungen, Kundenhistorien (Versicherungen, ...), Konferenzen
- Eingabesysteme (engl.: *data entry, data collection*)
  oft große Eingaben, ggf. selten. Aus Quittung keine direkte Reaktion ersichtlich, z. B. Bestellungen, Wareneingang, Rechnungsstellung.
- Buchungssysteme (oft „Transaktionssysteme“ im engeren Sinne):
  Koordination am gemeinsamen Datenbestand entscheidend. Platzbuchung, Bankwesen; kurze Antwortzeit wichtig.

Stapelfernverarbeitung (engl.: *remote job entry*):

Programm/Daten-Übermittlung oder Aufruf (beim fernen Rechner). Ablaufphase mit evtl. Status-Abfrage/Information. Ausgabephase mit erneuter, rückwärtiger Übermittlung. Bearbeitungszeiten von Minuten bis Stunden, entsprechend große *turn-around*-Zeiten werden akzeptiert.

Nachrichtenverteilung (engl.: *message switching*):

Auslieferungszeiten Minuten bis Stunden.

wichtige Funktionen: *forwarding, multipoint*-Briefe.

Sehr populär in Wissenschaftsnetzen, Weiterentwicklung → Bürokommunikation.

Rechner/Rechner- Kommunikation (zw. Betriebssystemen/Prozessen):

Fernladen, Fernsteuerung, Ferndiagnose, Wiederanlauf; Software*updates*. Allgemeine Prozeßkommunikation für distribuierte Anwendungen.

Schwach entwickelt, oft hohe Reaktionszeitforderungen!

Realzeit-Datenerfassung (engl.: *realtime data log***):**

Datensammel(rechner) geben i.a. schubweise Daten ab zur Verarbeitung. Enge Verquickung mit Fernsteuerung. Anwendungen: Fernexperimente; Fernüberwachung (TEMEX-Dienst der DBP), rechnerintegrierte Fertigung (CIM: engl.: *computer integrated manufacturing*)

In den kommenden 10 Jahren rapide Erweiterung der Transaktionsforderungen durch

— weitere Verbilligung von Hochleistungsplatzrechnern, Graphikorientierung

— billige Breitbandkommunikation auf Glasfaser

- Bewegtbildkommunikation
- Billige Massentransporte von Daten über Fernleitungen substituieren Datenträger an den einzelnen Terminalstationen
- Multimedia-Kommunikation
- „Telekooperation“ zwischen Personen

1.7 Zum Entwurf von Rechnernetzen

Entwurf (engl.: *design*) ist die Festlegung der Eigenschaften eines bislang nicht bekannten Systems derart, daß gegebene **Anforderungen** (engl.: *requirements*) erfüllt werden, unter Verwendung zulässiger Mittel für die Realisierung des Systems (Sprache, Komponenten, ...); letztere können im weiteren Sinne ebenfalls als Anforderungen angesehen werden.

Die Anforderungen begrenzen die Lösungsmenge (engl.: *solution set*) innerhalb des durch die **Variablen**/Freiheitsgrade des Entwurfs aufgespannten Entwurfsraumes (engl.: *design space*). Solche Variablen können qualitativ (Strukturen, Operationsprinzip) oder quantitativ sein(Grenzdurchsatz, Fehlerrate, Kosten, ...) in der Lösungsmenge wird ein Optimum gesucht (z. B. Leistung oder Kosten), dies ist Ergebnis des Entwurfs

Typisch bei Rechnernetzen:

Anforderungen:

- Anwendungen
- Netzdienste
- Verweilzeit (bei gegebenen Durchsatz)
- Kosten
- Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit
- Sicherheit
- Zahl und Ort der Teilnehmer
- Belastung (Durchsatzmatrix, siehe Kapitel 2)

- Kompatibilität ...

Variable:

- Netztopologie
- Leitungen
- Vermittlungstechnik
- Protokolle
- Funktionsverteilung

Praktisch können auch Variable durch Anforderungen vorbestimmt sein !

Etwa: genormte Protokolle verwenden.

Wenige und ziemlich elementare Entwurfsprobleme sind behandelt worden:

1. Verweilzeit - minimale Verteilung des Nachrichtenflusses bei gegebenem Netz
2. Verweilzeit - minimale Bestimmung der Übertragungsraten bei bekannten Kostenfunktionen
3. Kostengünstige Anordnung von Konzentrator- Rechnern (Vorrechner) in Terminalnetzen

Solche Probleme sind verhältnismäßig unbedeutend angesichts der Fülle von Entwurfsvariablen, insbesondere zu Funktionsverteilung und Gestaltung der „höheren“ Kommunikationsfunktionen.

Kapitel 2

Verbindungsstrukturen

2.1 Vermittlung

Vermittlung (engl.: *switching***):**

Lenkung der Nachricht von Sender zu Empfänger; dies ist eine wichtige Aufgabe in Kommunikationssystemen mit vielen Endpunkten.
Verschiedene Formen:

1. Auswahl relevanter Nachrichten am Empfänger - Netzabschluß, durch Adresse oder durch Zeitpunkt, bzw. Frequenzband; häufig in LANs.
2. Wegschaltung in Zwischenstationen, dann **indirekte** Ubertragung; meist wird „Vermittlung“ so eingeschränkt verstanden. Typisch für Fernnetze (WANs).

Kommunikationssysteme, die Vermittlung im weiteren Sinn (d.h. der Empfänger selektiert z.B. aus einem Bit-Strom die für ihn bestimmte Nachricht) leisten, heißen auch **Wählsysteme** (dazu nicht expliziter Wählvorgang wie bei Fernsprechen erforderlich!). Daneben Festverbindung (Punkt zu Punkt: gewidmete Verbindung).

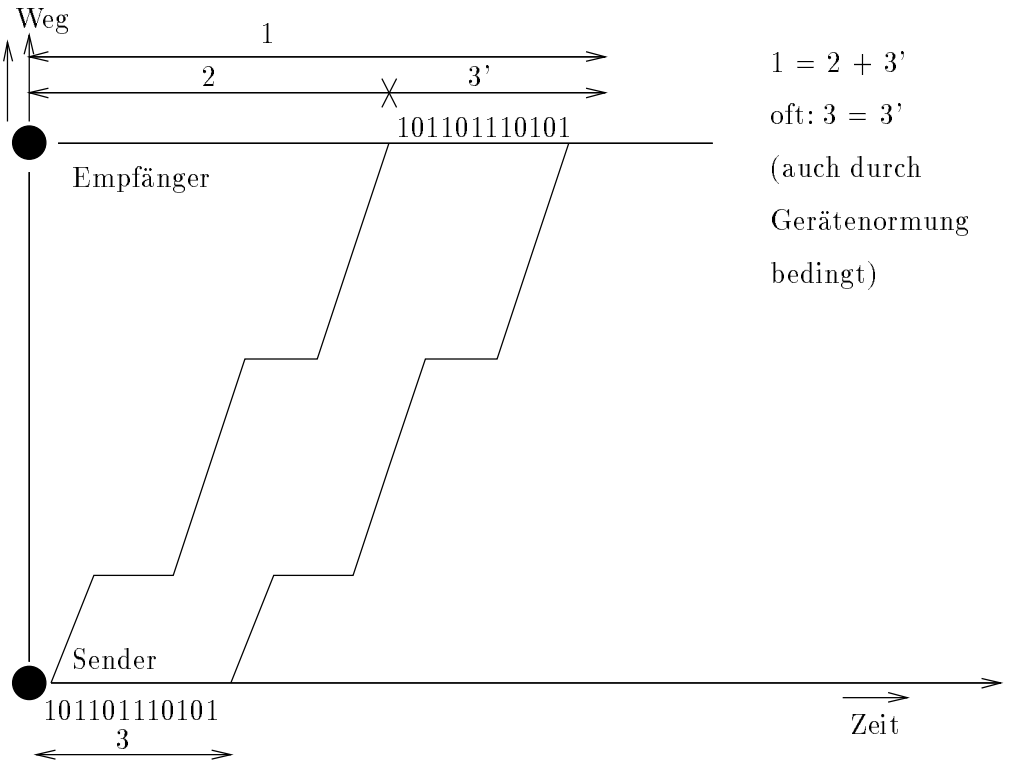


Bild 2.1 1

1: Zeitdauer vom Senden des 1. Bits der Nachricht bis Empfangen des letzten Bits: Verweilzeit der Nachricht auf der „Leitung“, Verzögerung (engl.: *message delay*)

2: Zeitdauer von Senden des 1. Bits der Nachricht bis Empfangen des 1. Bits: Verweilzeit des 1. Bits auf der Leitung, (Signal-)**Laufzeit**, nach unten begrenzt durch die endliche Ausbreitungsgeschwindigkeit (engl.: *propagation delay*)

3: Zeitdauer vom 1. Bit bis letzten Bit an einem Ort (3: Sender, 3': Empfänger): **Nachrichtendauer**, Übertragungszeit.

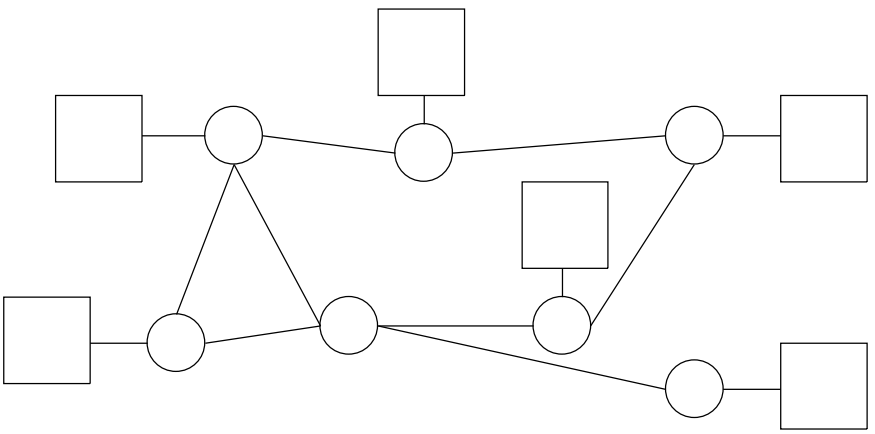


Bild 2.1 2

Leitungsvermittlung (engl.: *line switching*) auch Vollstreckenvermittlung oder Durchschaltvermittlung genannt.

Vor Übertragen einer Nutznachricht wird Pfad aus physikalischen Leitungen vom Sender zum Empfänger aufgebaut, der für die Kommunikationsbeziehung exklusiv genutzt werden kann, bis zum Abbau; d.h. keine Behinderung durch Konkurrenten (Warten!), Laufzeit ist nun durch Ausbreitungsgeschwindigkeit bedingt. Auslastung der Leitungen hängt vom Senderverhalten ab! Bei Dateitransfer gut, bei Dialog dürftig. Gleicher Durchsatz auf dem Pfad, Leitungen gleichen Grenzdurchsatzes typisch.

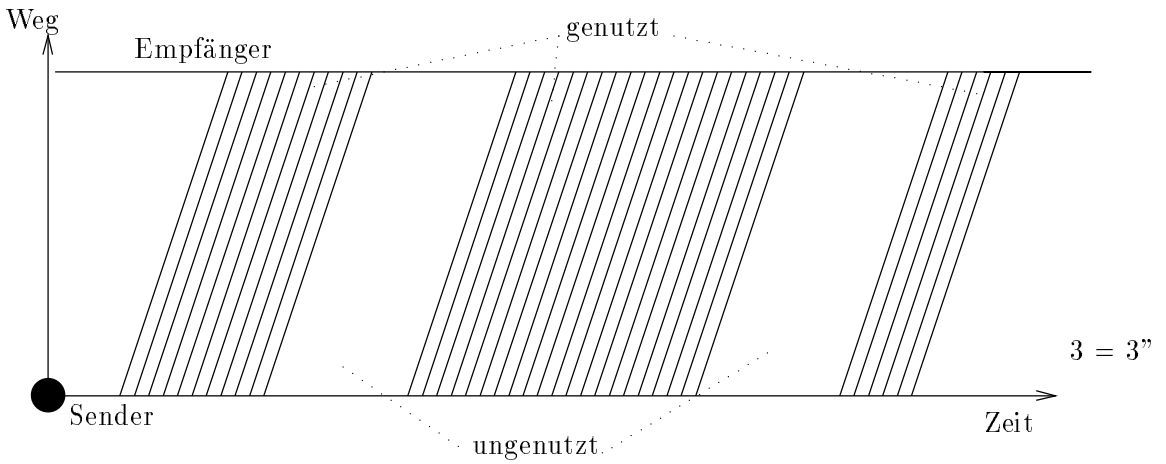


Bild 2.1 3

Beispiel: Fernsprechen, Datex-L, ISDN

Teilstreckenvermittlung (engl.: *store and forward*):

Die zum Transport bestimmte Dateneinheit läuft jeweils über eine Teilstrecke zum nächsten Knoten, wird dort zwischengespeichert, nach vollständigem Empfang wird **gewartet**, bis eine geeignete Leitung frei ist, über die die Nachricht weitergeschickt wird.

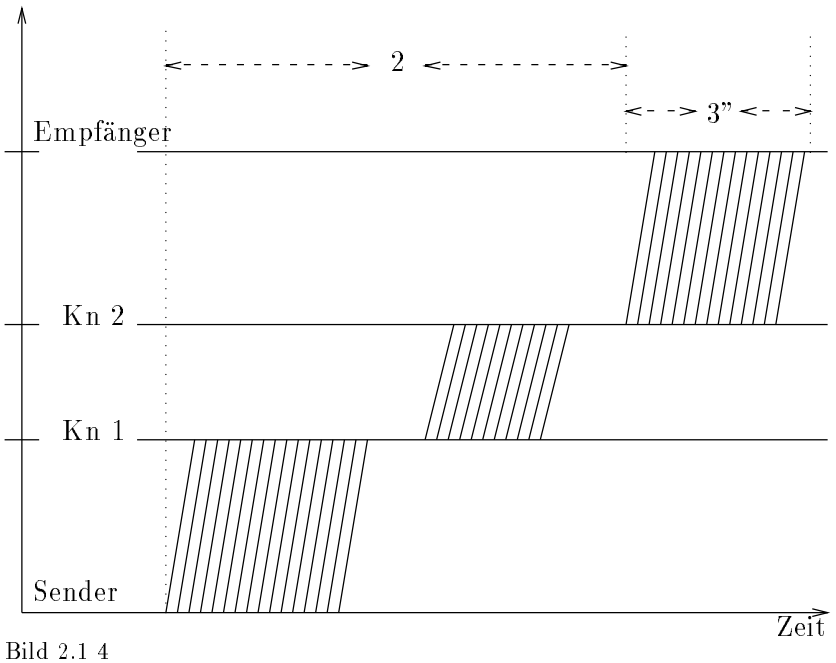


Bild 2.1 4

Nachteile der Teilstreckenvermittlung:

1. Laufzeit (2) **stark** gestreckt durch
   - — Aufnehmen der Dateneinheit an Zwischenknoten (Kn1, Kn2)
   - — lokale Verarbeitung (engl.: *local processing*)
   - — Warten auf freie Teilstrecke
2. Knotenrechner aufwendig

Vorteile der Teilstreckenvermittlung:

1. bessere Teilstreckenausnutzung: die Knotenrechner packen Dateneinheiten anderer Kommunikationsbeziehungen in die unbenutzten Zeiten. Bessere Auslastung auch bei stoßweiser Kommunikation! Senkt die anteiligen Leitungskosten.
2. *Economy of Scale*: die Transportkosten je Bit sind umso kleiner, je höher der Grenzdurchsatz der Leitung ist. Durch die Vereinigung vieler Kommunikationsbeziehungenauf wenige Hochleistungsleitungen sinken die Kosten.
3. Durchsatzanpassung: Die Zwischenspeicherung erlaubt Anpassung des Bitdurchsatzes an den Grenzdurchsatz, vgl. Kn1-Kn2: „schnelle“ Strecke. Damit bedarfsgerechte Dimensionierung der Teilstrecken möglich. Höherer Bitdurchsatz bedeutet geringere Nachrichtendauer!
4. Dynamische Anpassung der Nachrichtenwege bei Stau oder Ausfällen möglich

Zwei Formen der Teilstreckenvermittlung nach gewählten Dateneinheiten:

1. Dateneinheit ist Nachricht:
   Nachrichtenvermittlung (engl.: *messageswitching*)
   Nachteil: Starke Ausweitung der Laufzeit bei vielen Teilstrecken; schwieriges Speichermanagement, evtl. bei langen Nachrichten Zwischenspeicherung auf Hintergrundspeicher, lange Wartezeiten wegen großer Streuung der Nachrichtendauern (M/G/1-Modell), keine wirksame Priorisierung möglich.
   Beispiel: SITA-Netz

   1 Symbol: M: Markow.

   2 Symbol: G: General.

   3 Symbol: Zahl der Bedienstationen.

   4 Symbol: Warteschlangen-Disziplin

   5 Symbol: Pufferkapazität

2. Dateneinheit ist Paket": z.B. 1kbit
   Paketvermittlung (engl.: *packet switching*)
   Nachteil: Leitfaden in jedem Paket
   Vorteil: kürzere Laufzeit, einfaches Speichermanagement, kürzere mittlere und (bei Priorisierung) minimale Wartezeiten.
   Beispiel: ARPA-Netz, X.25-Netze (z.B. DATEX-P)

In einem gewissen Zusammenhang mit der Unterscheidung Voll-/Teilstreckenvermittlung steht die der verbindungsorientierten (engl.: *connection oriented service*) / nicht verbindungsorientierten (engl.: *connectionless service*) Kommunikationsbeziehung.

Typisch:

Auf Elementarebene keine Verbindungsorientierung (das Bit reist ohne Versicherung, willkommen zu sein). Auf höherer Ebene (Dialog, Prozeß-Steuerung) ist die Verbindungsorientierung oft zwingend.

Leitungsvermittlung beinhaltet Verbindung

Vermittlung muß vor Kommunikation Verbindung aufbauen, Existenz
zurückmelden; dann besteht erst exklusive Strecke; später Abbau der Verbindung;
u.U. schlechte Auslastung!

1. Zwischenankunftszeit-Wahrscheinlichkeit-Dichte Funktion

2. Bedienzeit-Wahrscheinlichkeit-Dichte Funktion

Bei Paketvermittlung ist beides in Gebrauch, verbindungsorientierte und verbindungslose Kommunikation.

Beispiele dafür sind:

Datagramm-Dienst: Nicht verbindungsorientiert (ARPA- Netz). Das Netz übernimmt und transportiert Pakete ohne Vergewisserung über den Empfänger. Günstig bei Kurznachrichten, wenn Empfangsbereitschaft selbstverständlich, Leitdaten im Rahmen jeden Pakets, unabhängige Wegewahl, Überholung möglich. (im allgemeinen notwendige Verbindungsorientierung durch Instanzen außerhalb des Kommunikationsnetzes!)

Virtual channel-Dienst: Verbindungsorientiert (Normalfall in X.25-Netzen)

Paketvermittlung

Das Netz erhält zunächst ein Verbindungs-Eröffnungs-Paket; dieses wählt Weg, reserviert Speicher, erkundet Empfänger, startet Rücknachricht. *Dann erst* Nutzpakete, alle auf demselben Weg, uber dieselben Speichersegmente (daher u.U. weniger Verzögerung!), Reihenfolge bleibt gewahrt.

Bemerkung:

Es gibt keine absolute Überlegenheit

Leitungsvermittlung	Streckenvermittlung
aber jeweils besonders günstig, wenn	
-Laufzeit klein gegen Nachrichtendauer	-Laufzeit groß gegen Nachrichtendauer
-gleichmäßige Auslastung	-stoßweise Auslastung
-Leitung billig	-Leitung teuer (z. B. da großer Grenzdurchsatz)
-geringe Zahl gleichzeitiger Kommunikationsbeziehungen	-große Zahl gleichzeitiger Kommunikationsbeziehungen

und ähnlich ist es auch mit

Datagramm	Virtual Channel
jeweils besonders günstig, wenn	
-häufig Verbindungsorientierung wertlos ist	-Verbindungsorientierung sowieso notwendig ist
-seltene, kurze Nachrichten	-viele Pakete je Nachricht
-Reihenfolge wertlos	-Reihenfolge zwingend
-Laufzeit groß gegen Dauer der Kommunikationsbeziehung	-Laufzeit klein gegen Dauer der Kommunikationsbeziehung

2.2 Leistungsmaße

2.2.1 Elementares

Ganz allgemeine Begriffe, findet man ebenso in anderen Vorlesungen von Herrn Prof. Jessen, z.B. in Rechnerarchitektur, Verkehr in Rechnersystemen.

Funktionseinheit FE (engl.: *functional unit*):

Nach Aufgabe oder Wirkung abgrenzbares Gebilde.

System (engl.: *task*):

Funktionseinheit, bestehend aus (kooperierenden) Funktionseinheiten.

Auftrag (engl.: *task*):

Verpflichtung einer Funktionseinheit zu einer Handlung.

Verweilzeit t_v (engl.: *sojourn time*):

Die Verweilzeit eines Auftrags in der ihn ausführenden Funktionseinheit ist die Zeitdauer von Auftragsübergabe/Übernahme bis Ende der durch den Auftrag verlangten Handlung.

Bedienzeit t_b (engl.: *service time*):

Minimum der Verweilzeit bei $f \rightarrow 0$, (also Versuch, einen Nettozeitbedarf eines Auftrags ohne Einblick in die Funktionseinheit und den Ablauf der Handlung zu definieren!).

Füllung f (engl.: *population*):

Die Füllung f ist die Zahl der Aufträge, die aktuell ihre Verweilzeit in der betrachteten Funktionseinheit zubringen.
$f = 0$ Die Funktionseinheit ist **frei**.
$f > 0$ Die Funktionseinheit ist **beschäftigt**..
Wir nehmen hier stets an, daß für eine Funktionseinheit FE $f \leq 1 \rightarrow$ serieller Betrieb. (Für ein System, das aber aus mehreren solchen FE besteht, kann $f > 1$ sein ! Siehe späteres Beispiel !)

Kapazität k (engl.: *capacity*):

Die Kapazität k einer Funktionseinheit: (Durch Art der Aufträge bestimmte) maximale Füllung der Funktionseinheit.

$f = k \rightarrow$ die Funktionseinheit ist **belegt**.
$k = 1 \rightarrow$ **exklusive** (einfache) Funktionseinheit.

Durchsatz d (engl.: *throughput*):

Der Durchsatz d einer Funktionseinheit ist die Zahl, der in einem Zeitintervall beendeten Aufträge, geteilt durch die Dauer dieses Zeitintervalls.

Grenzdurchsatz c (engl.: *maximum throughput*):

Der Grenzdurchsatz einer Funktionseinheit ist ein (durch die Art der Aufträge bestimmter) maximaler Durchsatz einer Funktionseinheit.

Auslastung ρ (engl.: *utilisation*):

Die Auslastung ist das Verhältnis von Durchsatz zu Grenzdurchsatz (ρ=d/c). Bei exklusiven Funktionseinheiten ist die Auslastung (d.h. k=1) zugleich der Zeitanteil, in dem die Funktionseinheit belegt ist.

Little's Formel

Füllung **F**
Verweilzeit **Y**
Durchsatz **D**

seien **E[F], E[Y], E[D]** Zufallsvariable, die vom Betrachtungsintervall (t_1, t_2); ($t_2 \geq t_1$) unabhängig und endlich sind.
Dann ist der Erwartungswert der Zahl der Auftragsankünfte gleich dem der Fertigstellungen (Flußgleichgewicht) und es gilt:
$\mathbf{E[F] = E[Y] \times E[D]}$

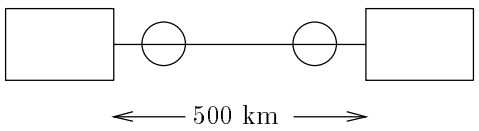
Füllung **f**
Verweilzeit der fertiggestellten Aufträge **y**

mögen die Mittelwerte **f, y** haben in einem Betrachtungsintervall (t_1, t_2); ($t_2 \geq t_1$) mit $f(t_1) = f(t_2) = 0$
Dann kommen im Intervall so viele Aufträge an, wie fertig werden.

$\mathbf{f = y \times d}$
d Durchsatz im Betrachtungsintervall

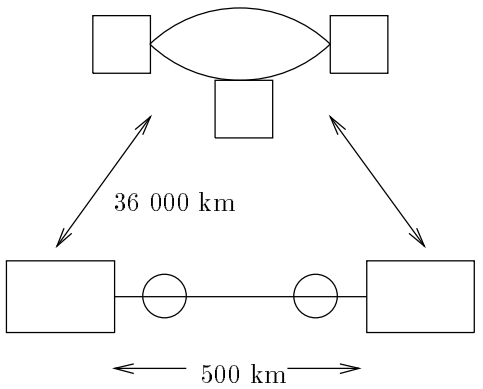
Beispiel zu Little's Formel:
Über eine für unsere Übertragung exklusiv genutzte „Leitung" übertragen wir Bits mit Durchsatz E(D) = C (Grenzdurchsatz)

Fall A: Telefonleitung



C = 2400 Bits/s

Fall B: Satellitenkanal



C = 2 MBits/s

Bild 2.2 1

Laufzeit:

Telefonleitung	Satellitenkanal
t_L = Länge der Strecke / Ausbreitungsgeschwindigkeit	
Ausbreitungsgeschwindigkeit(mit v_0 = Lichtgeschwindigkeit = 3000 000 km/s):	
$v = 0{,}3 \times v_0$	$v = v_0$
$\rightarrow t_L = 5{,}5$ ms	$\rightarrow t_L = 240$ ms
t_L ist Verweilzeit des Auftrags „Übertrage 1 Bit"	
E[D] = C = 2400 bit/s	E[D] = C = 2 Mbit/s
Verweilzeit eines Bits ist Laufzeit t_L:	
$Y = t_L = 5{,}5$ ms	$Y = t_L = 240$ ms
Füllung der „Leitung" ist Zahl der gleichzeitig transportierten Bits:	
$E[F] = E[Y] \times E[D] = t_L \times c$	
$= 5{,}5$ ms $\times$ 2400 bit/s	$= 240$ ms $\times$ 2Mbit/s
= 13,2 bit	= 480 000 bit

befinden sich zu jedem Zeitpunkt „in der Leitung"

Zwei Bemerkungen:

1. F, Y sind hier konstante Größen (Die Erwartungswert-Beziehung gilt für sie trotzdem).
2. Genaugenommen ist Y = t_L + Dauer eines Bits (Letzter Anteil:
   1/(2400 bit/s) = 0,4 ms/bit 1/(2 Mbit/s) = 0,5 μs/bit)
   (müßte oben noch hinzugezählt werden, ist aber unbedeutend für den Satellitenkanal)

Schnell berechnen wir noch den Platzbedarf eines Bits:

Platzbedarf eines Bits auf der Übertragungsstrecke:
p = Dauer $\times$ Geschwindigkeit = $1/c \times v = v/c$

Telefonleiung:	Satellitenkanal:
v = 90 000 km/s	v = 300 000 km/s
c = 2,4 kbit/s	c = 2000 kbit/s
$\rightarrow$ p = 37,5 km	$\rightarrow$ p 0,15km

c = 2,4 kbit/s c = 2000 kbit/s P = 37,5 km P = 0,15 km **

2.2.2 Durchsatz und Verweilzeit in Systemen

vgl. Rechnerarchitektur, Verkehr in Rechnersystemen

Gegeben ist ein System S aus M Funktionseinheiten FE_i $(1 \leq i \leq M)$, das Aufträge A bearbeitet, wobei A wiederum aus Teilaufträgen TA besteht, die jeweils eine (oder mehrere) FE in Anspruch nehmen.

Der Auftrag A „besucht“ die FE des Systems, und zwar die Funktioneinheit FE_i b_i-mal:
Besuchszahl b_i.

Die Aufträge haben im System S **Verweilzeiten Y_S** und den **Durchsatz D_S**

Das System habe eine **Füllung F_S**; die **Erwartungswerte** für die Füllung $E[F_S]$, für die Verweilzeit $E[Y_S]$ und für den Durchsatz $E[D_S]$ seien beschränkt und zeitkonstant.
Also gilt: $E[F_S] = E[Y_S] \times E[D_S]$. (Little)

Welchen Charakter haben die Funktionen
$E[Y_S]$ als Funktion von $E[F_S]$
$E[D_S]$ als Funktion von $E[F_S]$

Die Funktionen haben folgende Gestalt: (Bild 2.2 2)

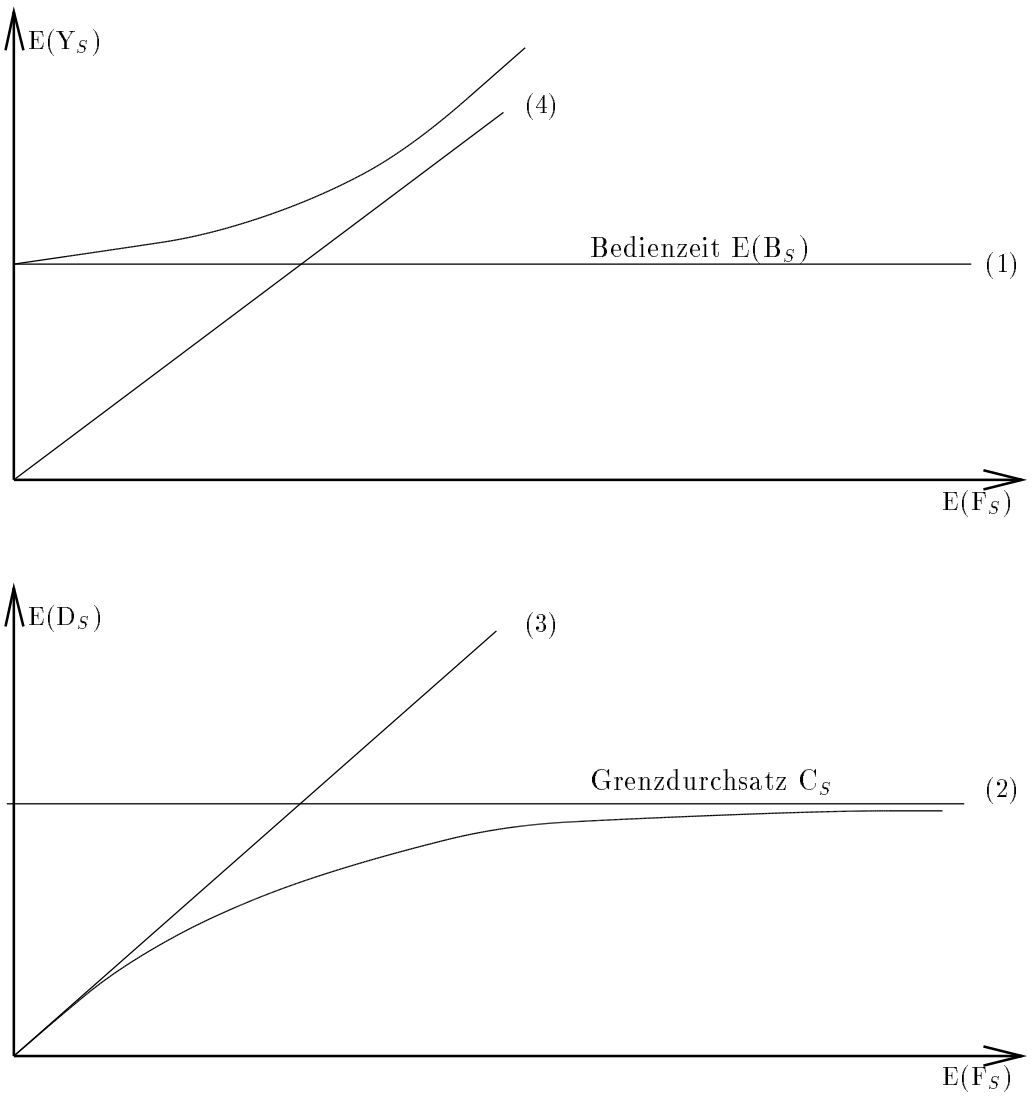


Bild 2.2 2

Die Funktionen sind je zweifach durch Asymptoten (1), (2), (3), (4) begrenzt

1. den Erwartungswert der Bedienzeit $E[B_S]$
2. den Grenzdurchsatz C_S der Aufträge A im System S

Es ist klar, daß beide Bilder über Little's Formel zusammenhängen:

$$E[Y_S] = \frac{E[F_S]}{E[D_S]} \qquad E[D_S] = \frac{E[F_S]}{E[Y_S]}$$

Die Verweilzeit ist immer größer als die Bedienzeit:
$$E[Y_S] \geq E[B_S] \rightarrow E[D_S] \leq \frac{E[F_S]}{E[B_S]} \qquad (1)$$

Der Durchsatz ist immer kleiner als der Grenzdurchsatz:
$$E[D_S] \leq C_S \rightarrow E[Y_S] \geq \frac{E[F_S]}{C_S} \qquad (2)$$

Begründung der Asymptoten:
Bei kleiner Füllung ($E[F_S] \rightarrow 0$) bedient jede Funktionseinheit einen an sie gerichteten Teilauftrag ohne Verzug (typisch so in Rechensystemen/Rechnernetzen; nicht typisch an der Verkehrsampel!) (Asymptote (3)).

$E[Y_S]$ ist dann minimal und heißt natürlich $E[B_S]$, **Bedienzeit** des Systems (Asymptote (1)).

Insbesondere kann der Auftrag A durch eine Serie von Teilaufträgen an jeweils eine FE erledigbar sein. Dann ist der Erwartungswert der Bedienzeit des Gesamtsystems:

$$E[B_S] = \sum_{i=1}^{m} b_i \times E[B_i]$$

Dabei ist $E[B_i]$: Erwartungswert der Bedienzeit eines Teilauftrags an FE_i.
Für größere $E[F_S]$ tritt Wartezeit ein: FE_i bedient einen Teilauftrag deshalb nicht, weil sie mit **anderen** Aufträgen beschäftigt ist. „Unser" Teilauftrag muß warten (meist bedeutet das, daß auch unser Auftrag wartet). Also steigt $E[Y_S]$ mit $E[F_S]$, aber auch $E[D_S]$ steigt zunächst (Asymptoten (2) und (4)).

An jeder FE_i herrscht Durchsatz $E[D_i] = b_i \times E[D_S]$ (prozentuale Besuchszahl b_i).
Wie alle technischen FE, haben auch unsere Funktionseinheiten Grenzdurchsätze C_i.

Damit ist der Erwartungswert des Durchsatzes des Systems

$E[D_S] = \frac{E[D_i]}{b_i}$ beschränkt sich durch $\min(\frac{C_i}{b_i})$ und wir nennen $C_S = \min(\frac{C_i}{b_i})$

den **Grenzdurchsatz** des Systems.

Eine FE_i mit minimalem C_i/b_i heißt **Engpaß** (engl.: *bottleneck*) von S bezüglich der betrachteten Aufträge.

Interessant ist noch der Asymptotenschnittpunkt für die Füllung f_S^*.

$f_S^* = E[B_S] \times C_S$ (Aus (1) und (2))

f_S^* trennt (grob) zwei Bereiche:

1. $E[F_S] \ll f_S^*$: die Aufträge behindern sich kaum, bei steigender Füllung wächst die Verweilzeit nur wenig, der Durchsatz aber noch fast linear.
2. $E[F_S] \gg f_S^*$: die Aufträge behindern sich stark am Engpaß; bei Vergrößerung von $E[F_S]$ tritt kein Durchsatzwachstum ein, $E[Y_S]$ wächst linear.

f_S^* heißt *Sättigungsfüllung.*

In vielen Systemen wächst die Inanspruchnahme der FE überproportional mit $E[F_S]$. Hierzu gehören insbesondere „Overheadeffekte“:

Eine oder meherere FE werden für die Verwaltung (oder andere füllungsabhängige Effekte) so stark beansprucht, daß der Grenzdurchsatz rückläufig ist. Damit sinkt auch der Durchsatz mit steigendem $E[F_S]$, die Verweilzeit wächst!

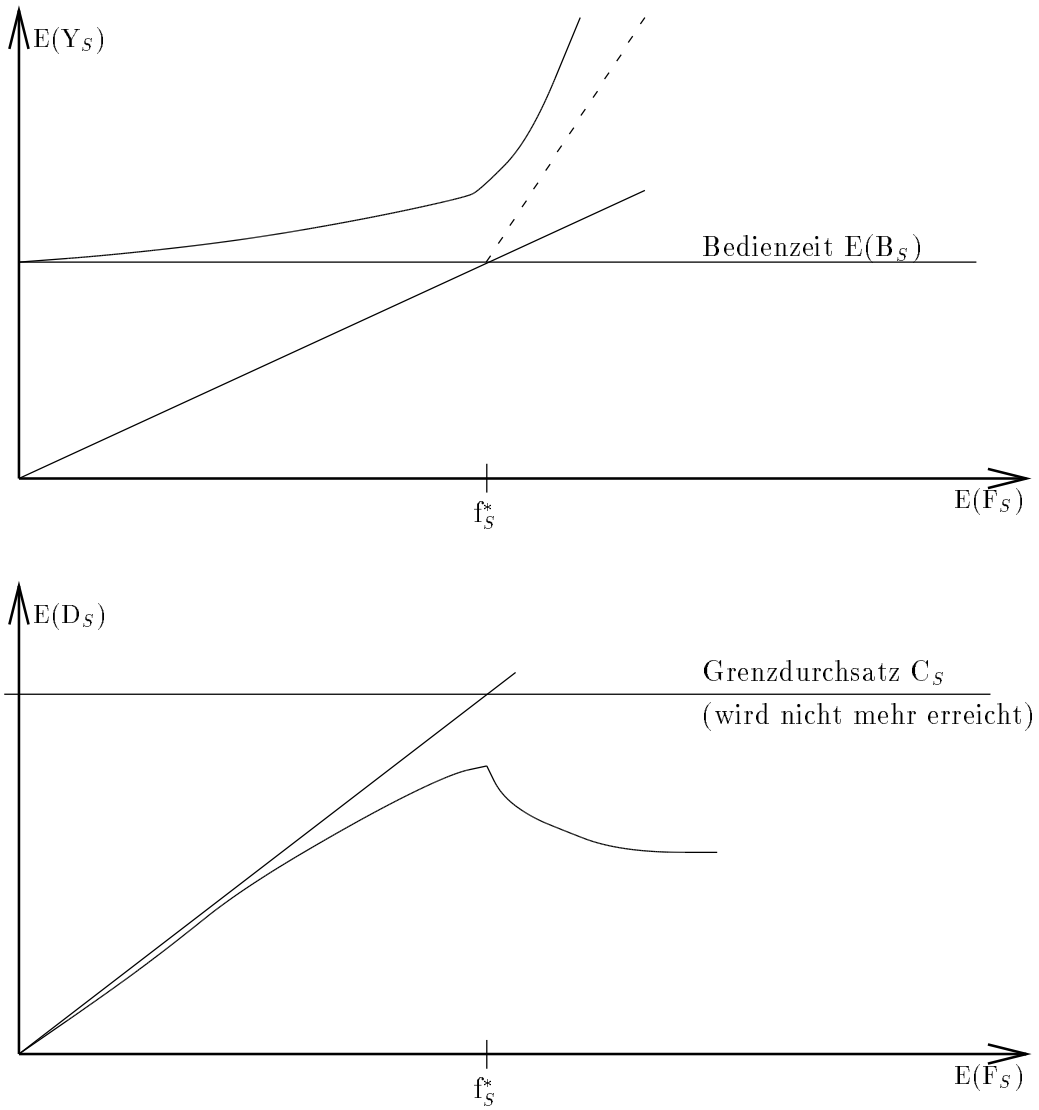


Bild 2.2 3

In teilstreckenvermittelnden Netzen treten bei großer Füllung Fehler in der Pufferzuteilung auf, die zum Vernichten von Nachrichten führen; der Grenzdurchsatz sinkt.

Beispiel: asymptotische Abschätzung von Verweilzeit und Füllung in einem Paket vermittelnden Netz. [Jessen, Valk 1986]

Wir ändern die Perspektive: Die Durchsätze seien durch die Teilnehmer vorgegeben. Den Durchsatz geben wir in Paketen/s als Matrix $E[D_{S_{ij}}]$ an: $i,j \in \{A, B, C, D, E\}$

	nach j =						
von i =	A	B	C	D	E		$\sum_j$
A	0	7	12	2	1	Pakete/s	22
B	5	0	6	7	10	Pakete/s	28
C	8	4	0	2	4	Pakete/s	18
D	1	7	2	0	5	Pakete/s	15
E	3	9	5	4	0	Pakete/s	21
$\sum_i$	17	27	25	15	20		$\rightarrow \sum_{ij} E[D_{S_{ij}}] = 104$ Pakete/s

Zur Festlegung der Durchsätze der Funktionseinheiten des Netzes ist noch eine Wegewahl für die nicht direkt zu übermittelnden Pakete erforderlich:

A $\Leftrightarrow$ B führe über B
A $\Leftrightarrow$ C führe über B
C $\Leftrightarrow$ E führe über D

Damit ergeben sich die **Leitungsdurchsätze** $E[D_{ij}]$:

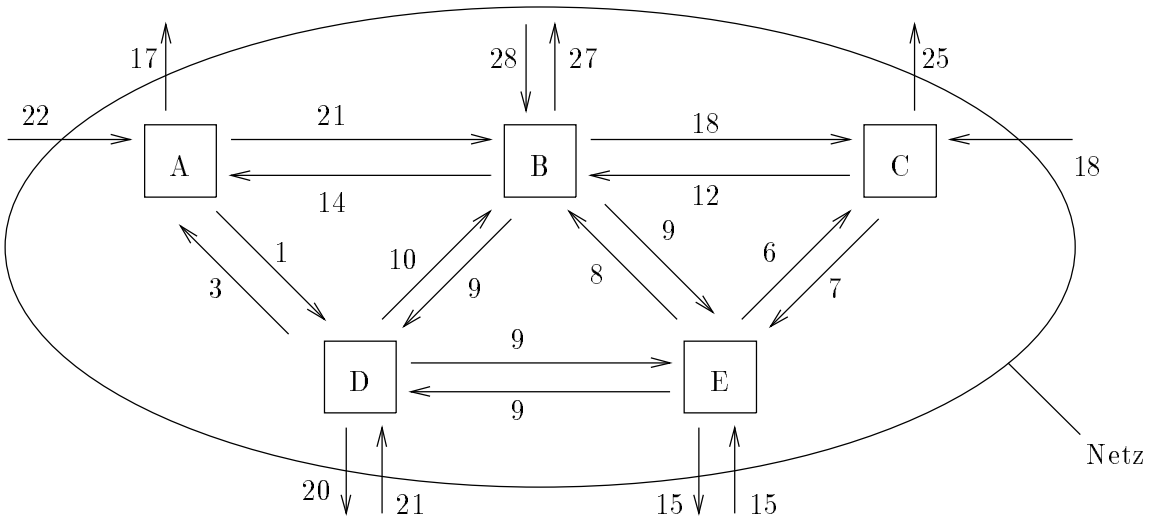


Bild 2.2 4

Die Erwartungswerte für die Knotendurchsätze $E[D_i]$ sind:
(z. B. für A: 22 + 14 + 3: Flußgleichgewicht): d. h. die Zahl der Eingangspakete ist gleich der Zahl der Ausgangspakete

$E[D_A] = 39$ Pakete/s
$E[D_B] = 78$ Pakete/s

$E[D_C] = 43$ Pakete/s
$E[D_D] = 39$ Pakete/s
$E[D_E] = 41$ Pakete/s
$\rightarrow \sum E[D_i] = 240$

Der Erwartungswert für den Netzdurchsatz ist dann (siehe oben):

$$E[D_S] = \sum_{ij} E[D_{Sij}] = 104 \,\text{Pakete/s}$$

Die Leitungen mögen alle gleichartig sein, ebenso die Knotenrechner.
Die Paketverweilzeiten bestehen aus:

1. Bedienzeit auf den Leitungen (Transportzeit), in unserem Beispiel angenommen zu $E[B_i] = 0{,}025$ s/Paket.
2. Bedienzeit auf Knotenrechnern, $E[B_i] = 0{,}005$ s/Paket.
3. Natürliche Wartezeiten vor Leitungen bzw. Knotenrechnern (d. h. in Eingangs-/Ausgangswarteschlangen der Knotenrechner).

Die **Besuchszahlen** sind:

$$b_{ij} = \frac{E[D_{ij}]}{E[D_N]} \qquad \text{für die Leitung } ij$$

$$b_i = \frac{E[D_i]}{E[D_N]} \qquad \text{für die Leitung } i$$

Die Summe der Leitungsbesuchszahlen gibt die im Mittel von einem Paket durchlaufene Anzahl von Leitungen an:

$$\sum_i \sum_j b_{ij} = \frac{\sum_i \sum_j E[D_{ij}]}{E[D_N]} = \frac{136}{104} = 1,31 \quad \frac{\text{Leitungen}}{\text{Paket}} \qquad \text{(siehe vorige Seiten)}$$

Es ist klar ist, daß die im Mittel von einem Paket durchlaufene Anzahl von Knoten:

$$\sum_i b_i = \frac{E[D_i]}{E[D_N]} = \frac{240}{104} = 2,31$$

sein muß (es wird ja stets ein Knoten mehr als Leitungen durchlaufen).

Nun können wir aus den Bedienzeiten der einzelnen Funktionseinheiten und ihren Besuchszahlen die Bedienzeit des gesamten Systems bestimmen:

$$E[B_S] = \sum_{i=1}^{M} b_i \times E[B_i]$$

Bei uns:

$$E[B_N] = \underbrace{\sum_i \sum_j b_{ij} \times E[B_{ij}]}_{\text{Gesamte Bedienzeit der Leitungen}} + \underbrace{\sum_i b_i \times E[b_i]}_{\text{Gesamte Bedienzeit der Knoten}}$$

Wir nehmen an, daß $E[B_{ij}]$ und $E[B_i]$ nicht von i, j abhängen:

$$E[B_N] = E[B_{ij}] \times \sum_i \sum_j b_{ij} + E[B_i] \times \sum_i b_i = 0,025s \times 1,31 + 0,005s \times 2,31$$

Der Erwartungswert der Bedienzeit des Netzes: $E[B_N] = 0{,}44$ s

Der Grenzdurchsatz C_N des Netzes folgt aus dem kleinsten Quotienten von

$$\frac{C_i}{b_i} \qquad \text{bzw.} \qquad \frac{C_{ij}}{b_{ij}}$$

C_i : Grenzdurchsatz der Knoten
C_{ij} : Grenzdurchsatz der Leitungen
b_i : Besuchszahlen der Knoten
b_{ij} : Besuchszahlen der Leitungen

Da Knotenrechner und Leitungen zu einem Zeitpunkt höchstens einen Teilauftrag „bearbeiten“, d. h. serieller Betrieb, folgt:

$$C_i = \underbrace{\frac{1}{E[B_i]}}_{\text{Erwartungswert der Knotenbedienzeit}} = 200 \quad \text{Pakete/s} \qquad \text{für die Knotenrechner}$$

$$C_{ij} = \underbrace{\frac{1}{E[B_{ij}]}}_{\text{Erwartungswert der Leitungsbedienzeit}} = 40 \quad \text{Pakete/s} \qquad \text{für die Leitungen}$$

Die Besuchszahlen von Knoten und Leitungen sind:

$$b_i = \frac{E[D_i]}{E[B_N]} \qquad b_{ij} = \frac{E[D_{ij}]}{E[B_N]}$$

Der kritische Knotenrechner (d. h. b_i maximal) ist B, die Besuchszahl von B ist (siehe S. 55) $b_B = 78/104 = 0{,}75$
Daraus folgt:

$$\frac{C_B}{b_B} = \frac{200/s}{0,75} = 267 \quad \text{Pakete/s}$$

Die kritische Leitung ist (d. h. b_{ij} maximal) ist AB, die Besuchszahl der Leitung AB ist (siehe S. 54) $b_{AB} = 21/104 = 0{,}20$

$$\frac{C_{AB}}{b_{AB}} = \frac{0,40/s}{0,2} = 200 \quad \text{Pakete/s}$$

Dies ist der Grenzdurchsatz des Netzes C_N , d. h. die kritische Leitung AB kann nur 200 Pakete/s befördern, der kritische Knoten B aber 267 bei einer Netzlast von 104 Paketen/s!!

Also ist **Leitung AB Engpass** und der **Grenzdurchsatz des Netzes $C_N = 200$ Pakete/s.**

Für das Zeichnen der Diagramme ist noch nützlich:

$$\underbrace{f_N^*}_{\text{Sättigungsfüllung des Netzes!}} = E[B_N] \times C_N = 0,44 \times 200 = 8,8 \quad \text{Pakete}$$

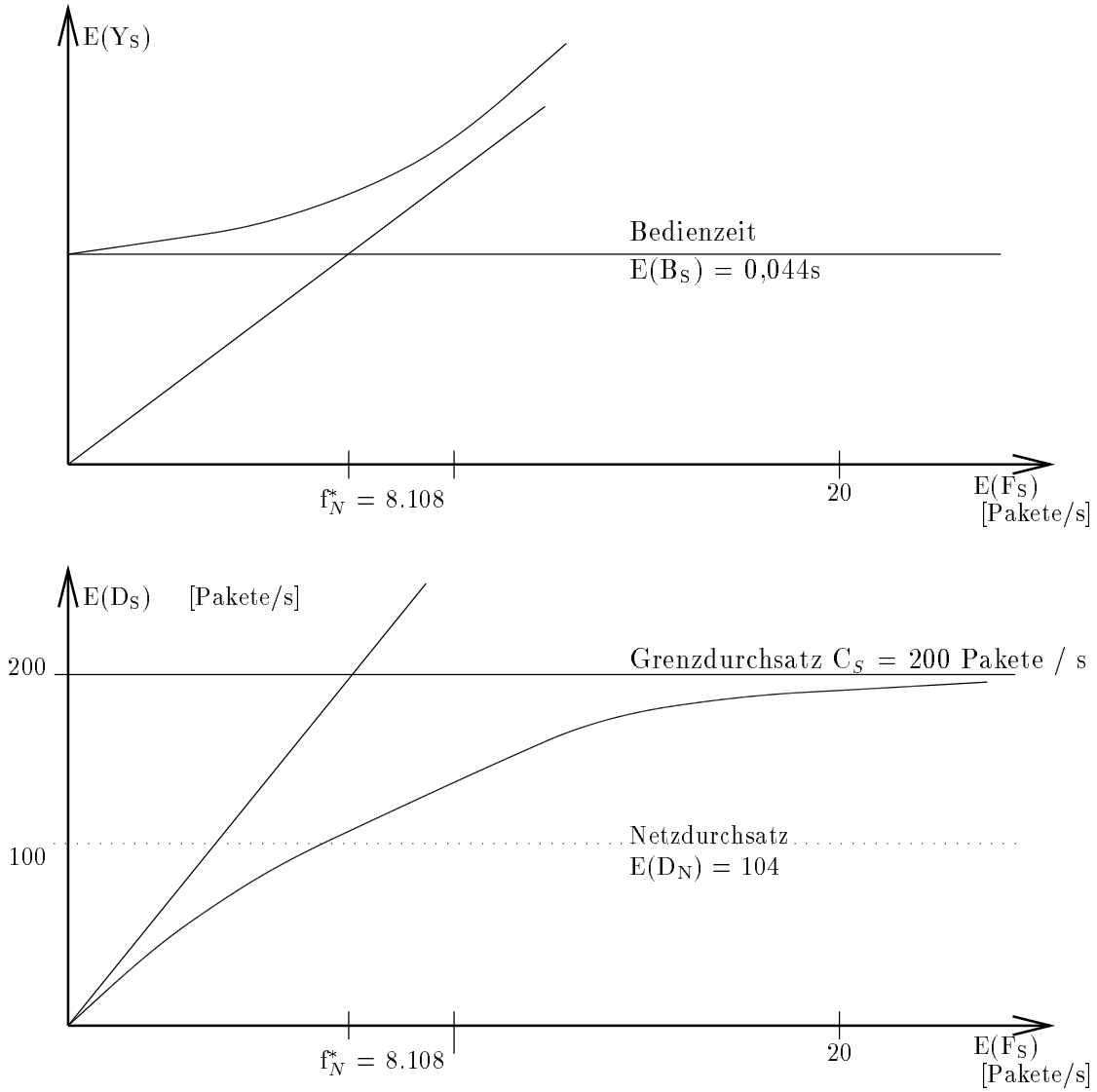


Bild 2.2 5

Unsere grobe Analyse sagt:
Das Netz ist etwa halb ausgelastet bei $E[D_N] = 104$ Paketen/s. Die Verweilzeit liegt wahrscheinlich nicht wesentlich über der Bedienzeit (d. h. minimalen Verweilzeit), vielleicht $E[Y_N] = 0{,}06$s.

Zur Verbesserung unseres Netzes nehmen wir uns **Wegewahl-Verfahren** vor und verteilen die Last um, d. h. Entlastung der Leitung AB von 21 auf 15 Pakete/s. Gleichzeitige Entlastung der Leitung BC von 18 auf 13 Pakete/s. Aber B bleibt kritischer Knoten mit 78 Paketen/s!

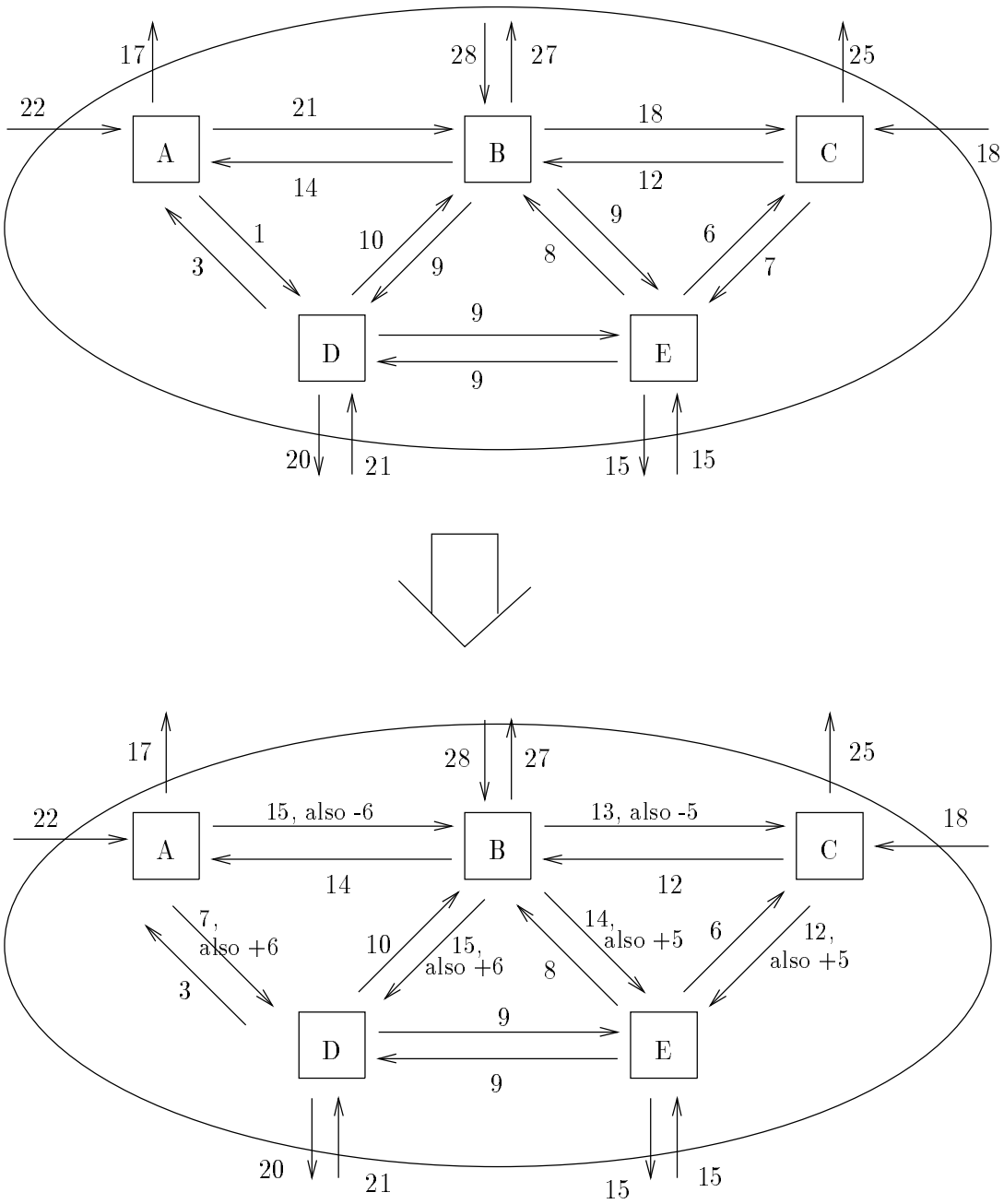


Bild 2.2 6

	A	B	C	D	E	$\sum$
A	X	15	/	/	7	22
B	14	X	13	14	10	51
C	/	12	X	6	/	18
D	/	8	12	X	9	29
E	3	15	/	9	X	27
						147

Die kritischen Leitungen sind AB und EB.

Ihre Besuchszahl ist: $b_{AB} = b_{EB} = 15 / 104 = 0{,}144$

Daraus folgt:

$$C_N = \frac{C_{AB}}{b_{AB}} = \frac{C_{EB}}{b_{EB}} = \frac{40/s}{0,144} = 277 \qquad \text{Pakete / s}$$

Der kritische Knotenrechner ist B mit 78 Paketen/s, und damit Engpaß. (s. S. 51) mit $\frac{C_B}{b_B} = 267$ Pakete/s. (d. h. in der alten Konfiguration war der Grenzdurchsatz des Netzes 200 Pakete/s, jetzt steigt er an auf 267 Pakete/s. Tatsächliche Last ist aber 104 Pakete/s)

Der Knoten B ist jetzt also Engpaß mit $C_N = 267$ Paketen/s.

Die Verbesserung des Grenzdurchsatzes haben wir mit einer Verschlechterung der Bedienzeit erkauft!

Die Pakete laufen im Mittel länger:

Jetzt ist:

$E[B_N] = E[B_{ij}] \times \sum_i \sum_j b_{ij} + E[B_i] \times \sum_i b_{ij} = 0,025s \times 1,41 + 0,005s \times 2,41$
$E[B_N] = 0,047s$

Also steigt die Sättigungsfüllung des Netzes ebenfalls an:
$f_N^* = E[B_N] \times C_N = 0{,}047$ s $\times$ 267 Pakete/s = 12,5 Pakete.

Im Vergleich (nur Asymptoten):

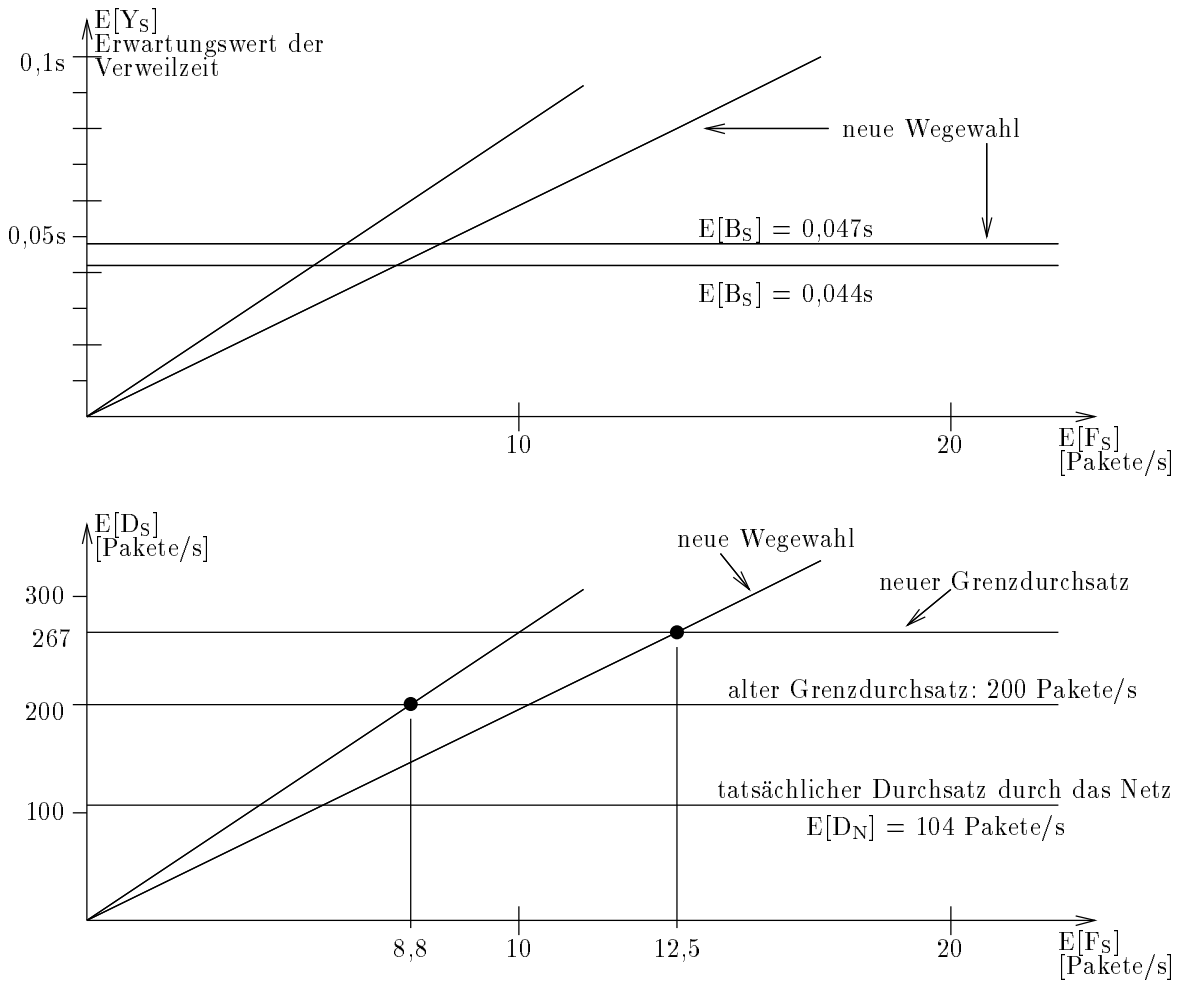


Bild 2.2 7

Da das Netz bei der neuen Wegewahl bei schwachem Verkehr etwas schlechtere Verweilzeiten, bei starkem Verkehr aber höheren Durchsatz erlaubt, setzen wir sie am besten nur bei starkem Verkehr ein!

⇒ **Nachbemerkung:**

Die Kurvenverläufe $E[Y_S]$ und $E[D_S]$ sind nur geraten! man kann aber qualitativ folgendes sagen:

1. sie liegen umso schlechter (weiter ab von den Asymptoten), je mehr die Bedienzeiten streuen. Vorteil der Paketvermittlung! → gleiche Bedienzeiten in den Knoten
2. wenn die Bedienzeiten streuen, dann umso schlechter je mehr (Fast-)Engpässe.
3. in mittlerem Verlauf kann man bessere Werte erreichen, wenn bei Konkurrenz kurze Aufträge bevorzugt werden. (gute Bearbeitungsstrategie !)

Übrigens kann man sie auch berechnen (in Sonderfällen) und durch (Simulations-) Experimente ermitteln.

2.2.3 Genaueres zur Verweilzeit- und Durchsatzbegrifen in Rechnernetzen:

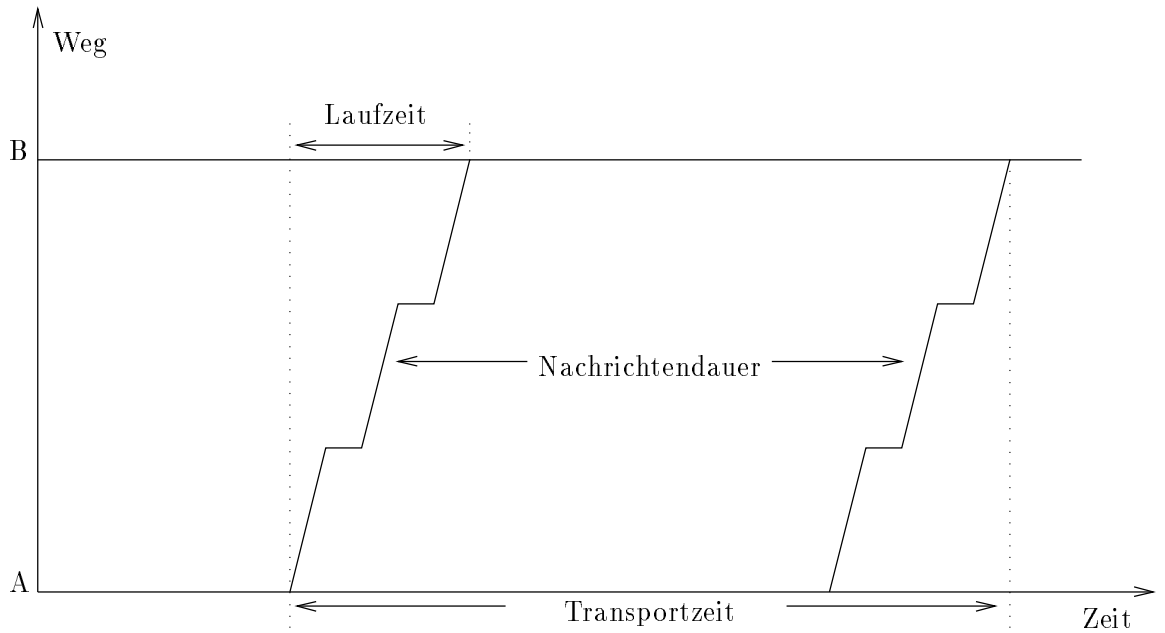


Bild 2.2 8

Laufzeit (engl: *message delay*)

Zeit, die die erste Signalflanke (das erste Bit) für den Weg vom Sender zum Empfänger braucht, enthält

- physikalische Ausbreitungszeit, (engl.: *propagation delay*)
- evtl. Knotenverarbeitungszeit, (engl.: *processing delay*)
- evtl. Wartezeit vor Knoten, Wartezeit vor Leitung, (engl.: *queueing delay*)

Laufzeit wird raumübergreifend definiert und ist daher in verteilten Systemen nicht beliebig genau bestimmbar!

$$\text{PhysikalischeAusbreitungszeit} = \frac{\text{Distanz}}{\text{v}}$$

$v = 0{,}3 \times v_0 \ldots v_0$
v_0 ist Lichtgeschwindigkeit: 3×10^5 km/s

	1000 km:	3 ...9 ms
d. h. die physikalische Ausbreitungszeit beträgt bei	1 km:	3 ...9 μs
	1 m:	3 ...9 ns

Nachrichtendauer:

Zeitdauer, bis alle Bits einer Nachricht an einem Ort durchgelaufen sind.
Nachrichtendauer nach unten begrenzt durch

Zahl der Bits n / Grenzdurchsatz C (Bits/s) = n/C
(C wird auf dem Übertragungsweg durch die Bandbreite begrenzt, vgl. später)

In Rechnernetzen typisch: C 50 bit/s, 300 bit/s, 1.2 kbit/s, 2.4 kbit/s, 4.8 kbit/s, 9.6 kbit/s, 19.2 kbit/s, 64 kbit/s, 2 Mbit/s, 10 Mbit/s, 34 Mbit/s, 100 Mbit/s.

Nachrichtendauer kann ausgeweitet sein (gegenüber n/C) durch

- Übertragung mit kleinerem Bitdurchsatz als C (Grenzdurchsatz)
- fremde Übertragungen im Zeitmultiplex
- durch andere Effekte (z.B. unzureichende Paketfolge)

Transportzeit:

Zeitdauer, die sich aus der Summe von Laufzeit und Nachrichtendauer ergibt:

- Laufzeit des 1.Bit + Nachrichtendauer beim Empfänger oder
- Laufzeit des letzten Bit + Nachrichtendauer beim Sender

(Komplizierung bei Überholung von Bits.)

Vom Benutzer oft interessant:
Antwortzeit für eine Transaktion:
Transportzeit hin + Verarbeitungszeit (beim Empfänger) + Transportzeit zurück

Durchsatz:

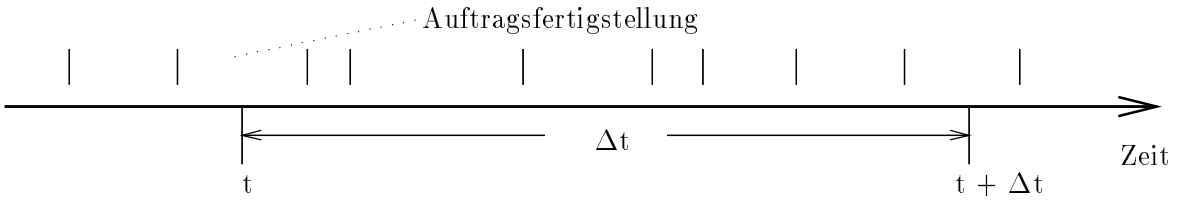


Bild 2.2 9

im Zeitintervall von t bis Δt

$$\mathrm{D}(t, t+\Delta t) = \frac{\text{Zahl der Auftragsfertigstellungen in}(t, t+\Delta t)}{\Delta t}$$

Es ist klar, daß der Durchsatz vom Fertigstellungsprozeß und von t und Δt abhängt. Ist der Fertigstellungsprozeß zufällig, dann ist auch der Durchsatz im Zeitintervall D(t, t + Δt) zufällig. Erwartungswert E[D(t, t + Δt)]. In Modellen ist der Durchsatz meist unabhängig von t, Δt angenommen: E[D].

Häufig wird die Grenzbetrachtung angestellt: $\lim_{\Delta t \to 0}(\mathrm{E}[\mathrm{D}(t, t+\Delta t)])$

Diese Größe heißt **Durchsatzrate** und läßt sich auch als zeitbezogene Wahrscheinlichkeit ausdrücken:

$$\lim_{\Delta t \to 0}(\mathrm{E}[\mathrm{D}(t, t+\Delta t)]) = \lim_{\Delta t \to 0}(\frac{\mathrm{P}[\text{Fertigstellung in } (t, t+\Delta t)]}{\Delta t}) = \delta(t)$$

δ(t) heißt Durchsatzrate, P ist Wahrscheinlichkeit
Unter folgenden Vorraussetzungen:
Oft wird δ(t) = konstant angenommen. Dann sind die Zeitabstände z zwischen den Fertigstellungen negativ-exponentiell verteilt,

$$\underbrace{\mathrm{P}}_{} \qquad [z \leq t] = \mathrm{F}_z(t) = 1 - e^{-\delta t}$$

Wahrscheinlichkeit P, daß Zeitabstände z kleiner sind als t

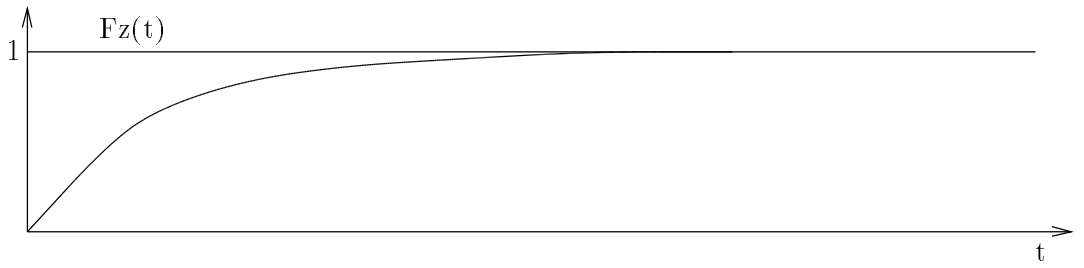


Bild 2.2 10

Dann ist auch E[D] konstant, und es ist $\mathrm{E}[\mathrm{D}] = \delta$.
Der mittlere Abstand zweier Fertigstellungen ist $1/\delta$ (z. B. Sekunden).
Der Durchsatz kann sich beziehen auf bit / Paket / Nachricht / Transaktion.

Nach Wunsch definieren wir

- Bitdurchsatz
- Paketdurchsatz
- Nachrichtendurchsatz
- Transaktionsdurchsatz
- ...

Zugang

Wie Grenzdurchsatz, kann man für eine Funktionseinheit (Leitung oder Netzknoten oder Empfänger) auch einen Zugang definieren. Besonders gebräuchlich ist die **Zugangsrate** λ(t)

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \left(\frac{\mathrm{P}[\text{Auftragsankunft während}(t, t+\Delta t)]}{\Delta t} \right)$$

Meist nimmt man $\lambda(\mathrm{t}) = \lambda$ zeitkonstant an. Dann sind die Zwischenankunftszeiten A mit

$$\mathrm{F_A}(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

negativ exponentiell verteilt.

In Rechnernetzen ist der Effekt wichtig, daß Aufträge nicht fertiggestellt werden. Dann lohnt e zwischen λ und δ zu unterscheiden.
Werden alle Aufträge fertiggestellt und sind Erwartungswerte von Durchsatz und Zugang gleich, ist $\lambda = \delta$

Bandbreite und Grenzdurchsatz

Auf einem beliebigen Übertragungsweg werden Signale mehr oder weniger

- geschwächt
- verzerrt
- mit Störungen vermischt.

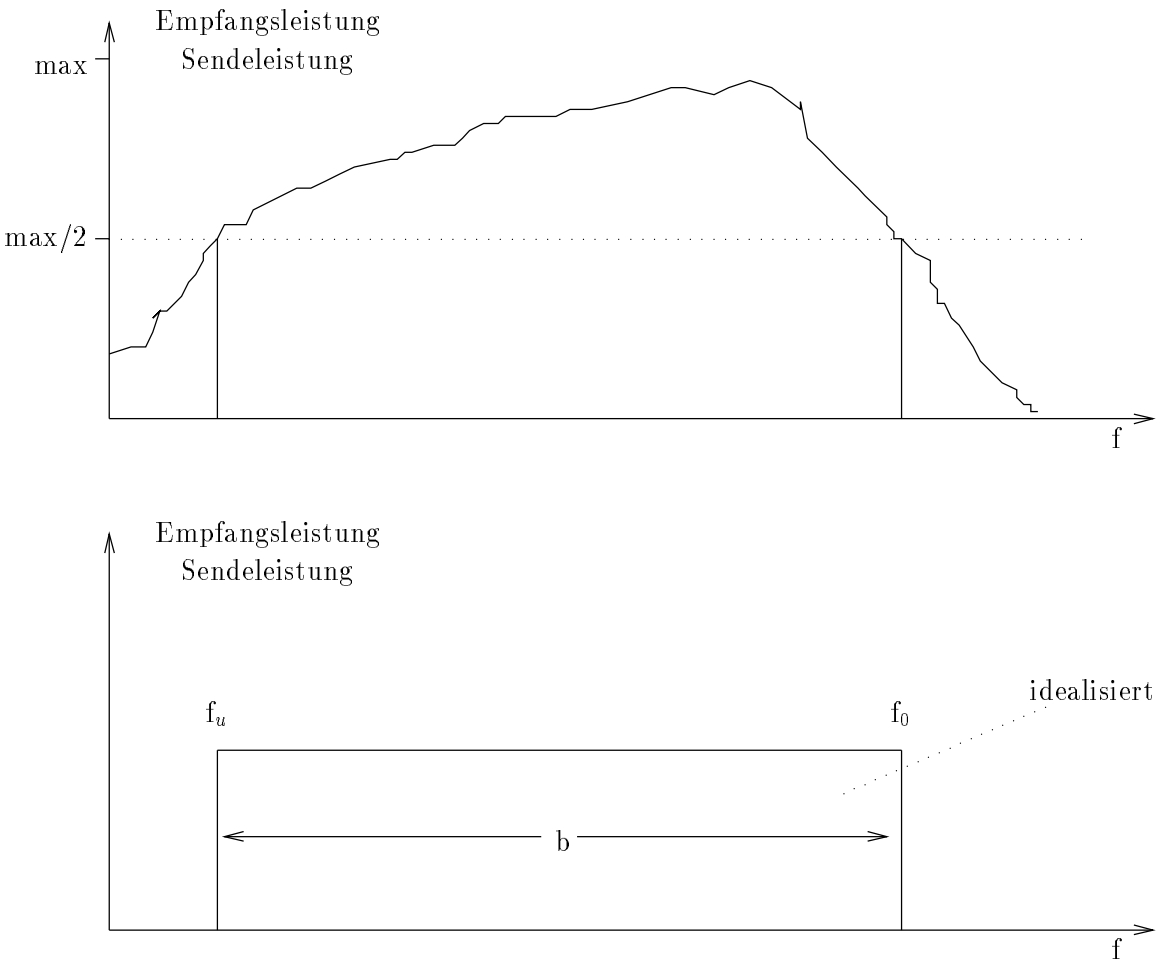


Bild 2.2 11

Nachrichtentechniker fassen ein Signal als eine Reihenentwicklung (unendlich vieler) Sinusschwingungen verschiedener Frequenz und verschiedener Amplitude auf („Fourier-Analyse"). Einen Übertragungsweg charakterisieren sie (u.a.) durch die Schwächung von Sinussignalen, abhängig von der Frequenz f. Wo nur noch die Hälfte der maximalen Empfangsleistung auftritt, liegt die obere bzw. untere **Grenzfrequenz** f_0 bzw. f_u. Sie nennen $f_B = f_0 - f_u$ **Bandbreite** engl.: *bandwidth*.

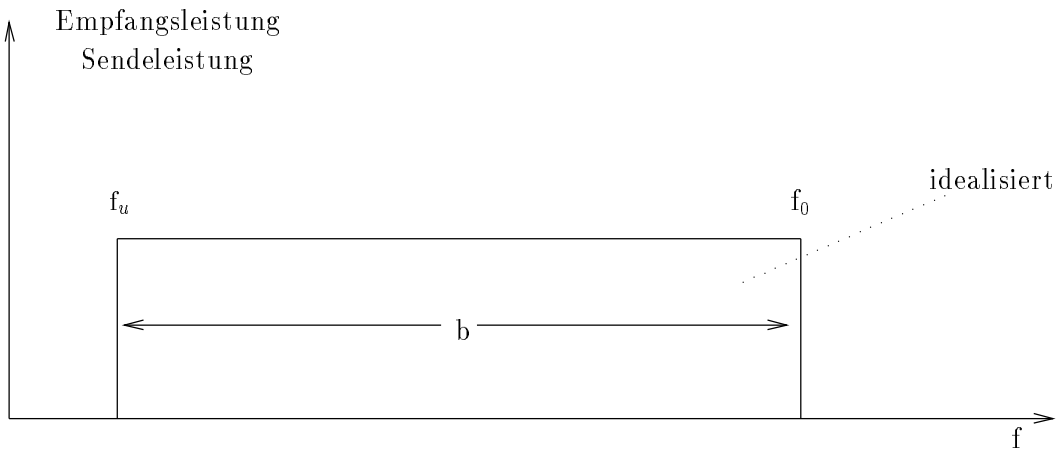


Bild 2.2 12

Die Nachrichtentechniker haben Verfahren entwickelt, ein Signal, dessen Sinuskomponeten zwischen den Frequenzen a und b liegen (Basisband), derart zu transformieren, daß diese zwischen x+a und x+b liegen. Diese Verfahren sind eindeutig umkehrbar und heißen **Modulation/Demodulation.** Folglich ist für die Brauchbarkeit eines Übertragungsweges nicht (f_0, f_u) wesentlich, sondern nur f_b = f_0 - f_u !

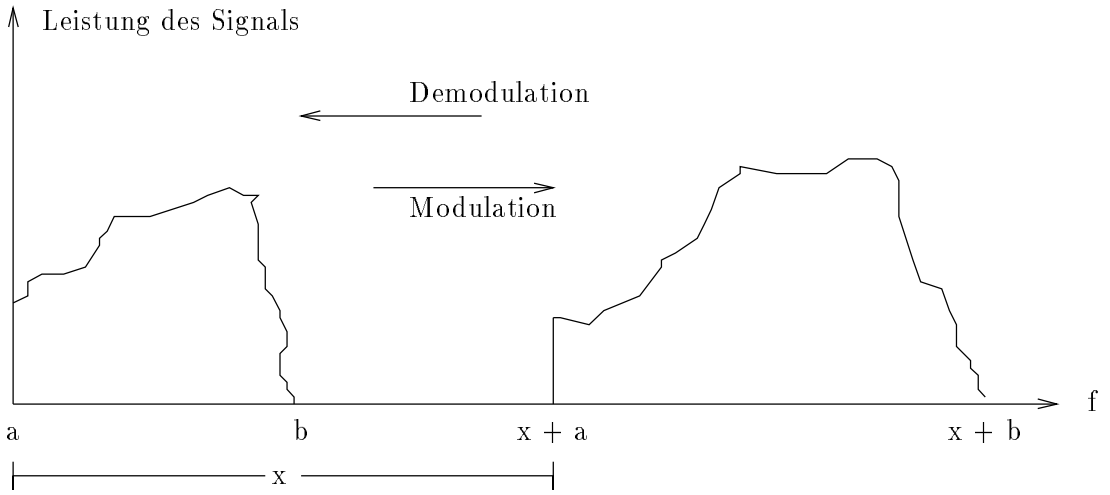


Bild 2.2 13

Ist die Bandbreite des Übertragungsweges für ein Signal zu klein, dann kann der Übertragungsweg den Signaländerungen nicht genügend schnell folgen (Trägheit).

Zwei Freiheitsgrade, um mehr Bits/s über den Übertragungsweg zu bekommen:

1. Bits enger setzen (wird durch Bandbreite begrenzt)
2. verschiedene Signalhöhen (Amplitudenmodulation) benutzen (wird durch Störsignale begrenzt)

Claude Shannon hat 1948 den bei geschicktester Codierung auf einem Übertragungsweg mit Bandbreite f_b, Signalleistung S, Störleistung N (Mittelwerte) erreichbaren bit-Grenzdurchsatz, (Kanalkapazität) gefunden:

$$C_{Bit} = b \times ld(1 + \frac{S}{N})$$

Dabei bedeutet bit: Informationsmaß, d. h. es werden nur solche Bits gezählt die nicht (aufgrund statistischer Kenntnisse) vom Empfänger vorhersehbar wären. Bei technischen Übertragungswegen ist C_{Bit} etwa $f_b \ldots 3f_b$, also wesentlich kleiner als C_{Bit}. Tabelle dazu siehe nächste Seite:

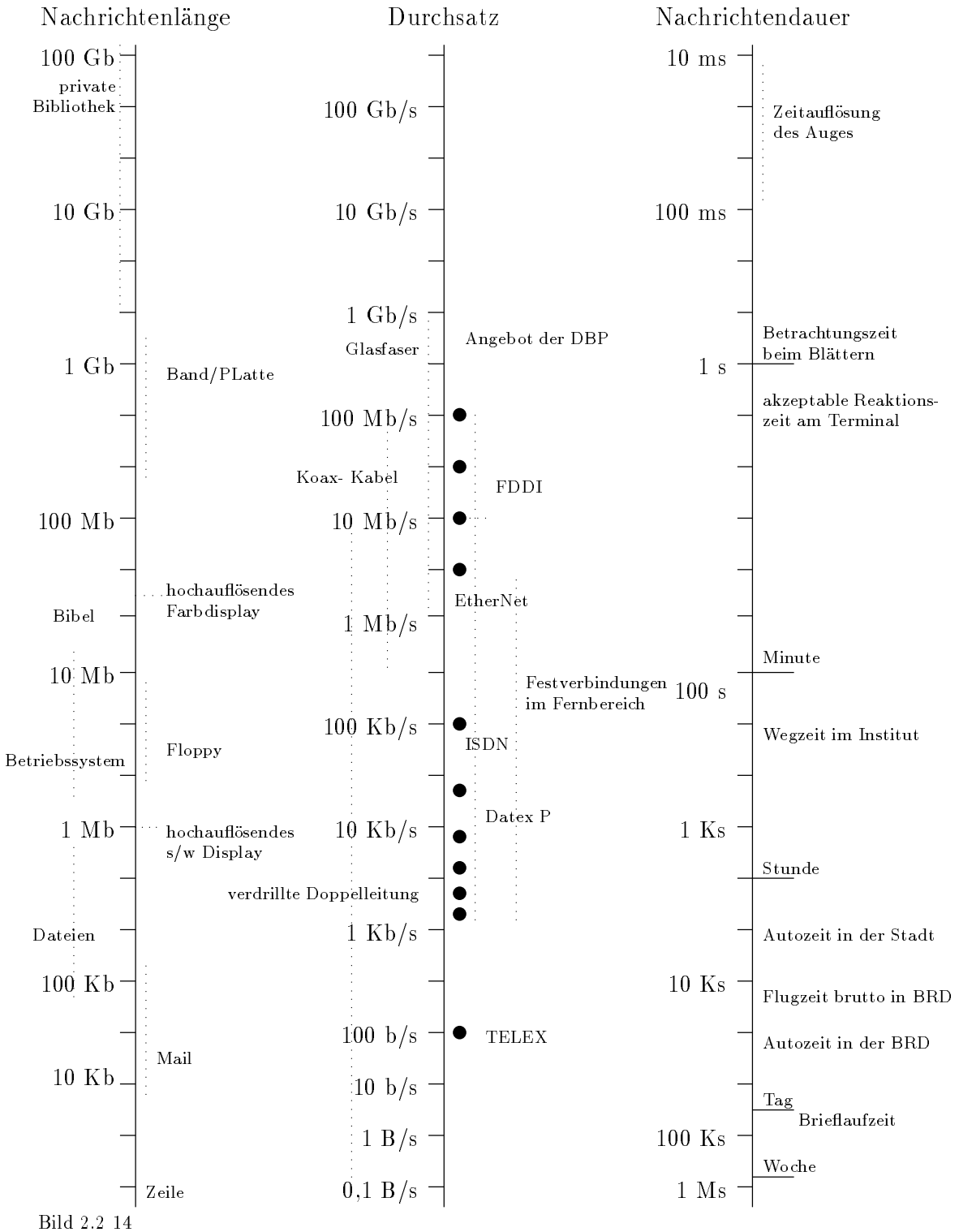

Nachrichtenlänge
Durchsatz
Nachrichtendauer
100 Gb
private Bibliothek
10 Gb
1 Gb
Band/PLatte
100 Mb
hochauflösendes Farbdisplay
Bibel
10 Mb
Floppy
Betriebssystem
1 Mb
hochauflösendes s/w Display
Dateien
100 Kb
Mail
10 Kb
Zeile
100 Gb/s
10 Gb/s
1 Gb/s
Glasfaser
Angebot der DBP
100 Mb/s
Koax- Kabel
FDDI
10 Mb/s
EtherNet
1 Mb/s
Festverbindungen im Fernbereich
100 Kb/s
ISDN
Datex P
10 Kb/s
verdrillte Doppelleitung
1 Kb/s
100 b/s
TELEX
10 b/s
1 B/s
0,1 B/s
10 ms
Zeitauflösung des Auges
100 ms
Betrachtungszeit beim Blättern
1 s
akzeptable Reaktions-zeit am Terminal
Minute
100 s
Wegzeit im Institut
1 Ks
Stunde
Autozeit in der Stadt
10 Ks
Flugzeit brutto in BRD
Autozeit in der BRD
Tag
Brieflaufzeit
100 Ks
Woche
1 Ms

Bild 2.2 14

2.2.4 Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Wartbarkeit

(engl.: RAL *Reliability, Availability, Serviceability*)

Zuverlässigkeit:

1. Allgemeine Bedeutung: Fähigkeit, die bestimmungsgemäße Funktion zu erbringen
2. Spezielle Bedeutung: (ebenso, aber im Zeitraum (0;t))
   Wahrscheinlichkeit: P[bestimmungsgemäße Funktion in (0;t) immer erbringbar] =: R(t)

Einen Fehler (engl.: *fault*) hat eine Funktionseinheit, die nicht fähig ist, ihre bestimmungsgemäße Funktion zu erfüllen.

Eine Störung (engl.: *malfunction*) ist eine unkorrekte Auftragserledigung. Sörungen sind Folge von Fehlern; in welcher Anzahl und Art Störungen auftreten, hängt stark von der Auftragslast ab!!

Fehler in Rechnernetzen:

1. Knotenrechner, DÜEs: übliche Rechnerhardware/Software-Fehler
2. Leitungen: über„sprechen“ mit Nachbarleitungen, Rauschen,
   Kontaktstörungen.
3. Fehler in übriger Elektronik/Elektromechanik (ältere Vermittlungsstellen)

Typisch dauern auch fluktuierende Fehler länger als ein Bit („burst“ Bündel - Charakteristik), z. B. Funkwege, Richtfunkstrecken.

Störungen sind im allgemeinen lastabhängig gemessen als:

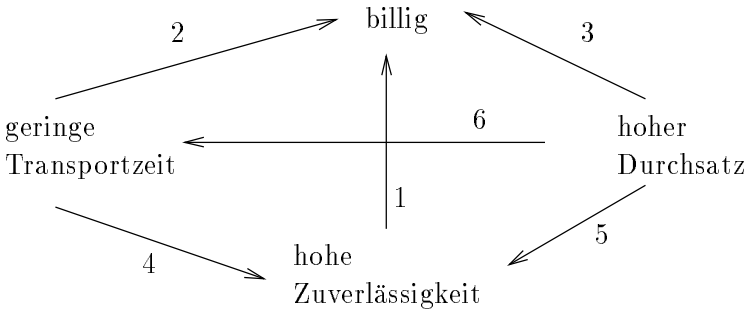
1. Bit„fehler“rate, Byte„fehler“rate, Paket„fehler“rate.
   Da Störungen leidlich selten auftreten (Bitfehlerrate $< 10^{-4}$, bis 10^{-9}), ist wegen burst-Charakteristik im allgemeinen Paketfehlerrate $\approx$ Bytefehlerrate $\leq$ Bitfehlerrate.
   Hängt ab von Leitungsart/Länge und von Fehlertoleranzverfahren, das auf die **Restfehlerrate** führt:
   - Fehlerkorrektur durch Codierung
   - Fehlerkorrektur durch Fehlererkennung und Wiederholung
2. wichtiger ist die **Verfügbarkeit**
   $V_{A,B}(t, t+\Delta t)$ = P[Netz transportiert in $(t, t+\Delta t)$ m Bytes korrekt von A nach B]
   $\geq \prod_{\text{alle Knotenrechner zwischen A und B}}$ P[Knotenrechner funktionsfähig in $(t, t+\Delta t)$]
   $\times \prod_{\text{alle Leitungen zwischen A und B}}$ P[Leitung funktionsfähig in $(t, t+\Delta t)$]
   $\times$ P[$(t, t+\Delta t)$ reicht für Übertragung von m Bytes]

„$\geq$“ in obiger Gleichung erklärt sich als Folge von Fehlertoleranz; Gewinn an Verfügbarkeit im allgemeinen auf Kosten von Δt.

Wartbarkeit:

bestimmt die Ausfallzeit (engl.: *downtime*) des Netzes (Fehlererkennungs-, -ortungszeit und Reparaturzeit).

2.2.5 Zielkonflikt



(Die Pfeile geben nur die Richtung der folgenden Argumentation an.)
Bild 2.2 15

1. Hohe Zuverlässigkeit: Gute Leitungen/Rechner, Redundanz, viele Prüfungen (→ Rohleistung muß höher sein!)
   → teuer!

2. Geringe Transportzeit: Leitungen großen Grenzdurchsatzes (Bandbreite), geringe Auslastung (dann kaum Wartezeiten)
   → teuer!

3. Hoher Durchsatz: mehrfache Leitungen, Leitungen großen Grenzdurchsatzes, schnelle Knotenrechner
   → teuer!

4. Geringere Transportzeit: Verzicht auf Prüfungen, Nachrichtenoverhead, Wiederholungen
   → unzuverlässig!

5. Hoher Durchsatz: Verzicht auf Prüfungen, Nachrichtenoverhead, Wiederholung
   → unzuverlässig!

6. Hoher Durchsatz: große Auslastung, große Pakete → hohe Transportzeit! (siehe Diagramm zu Little's Formel: mit steigendem Durchsatz sinkt Füllung)

2.3 Nachrichtentransportzeit

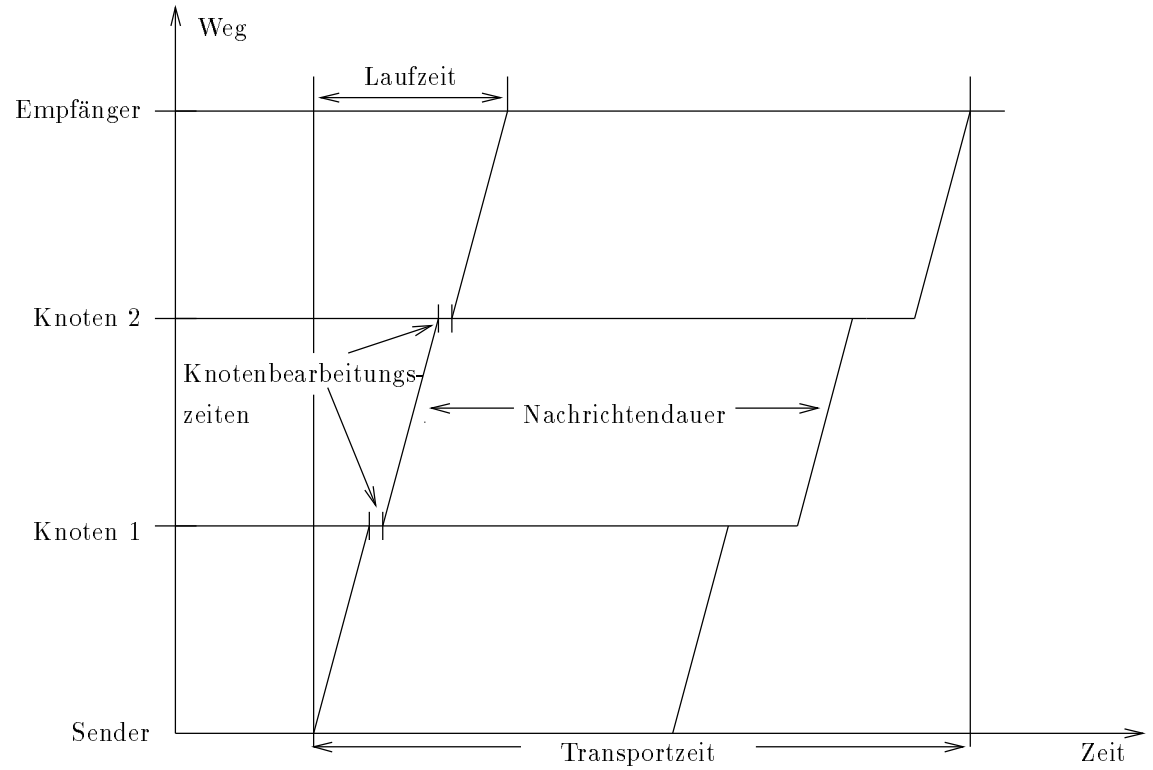


Bild 2.3 1

2.3.1 Nachrichtentransportzeit im leeren Netz (eine „Bedienzeit“)

1. Annahme: Leitungsschaltung

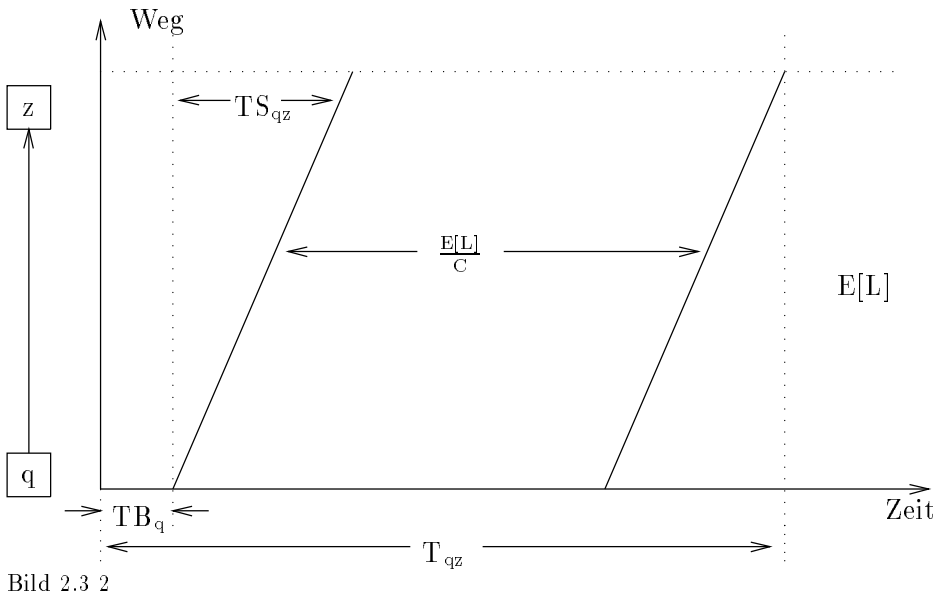


Bild 2.3 2

T_{qz} = Nachrichtentransportzeit von q nach z

TB_q = Knotenbearbeitungszeit in q

TS_{qz} = physikalisch bedingte Signallaufzeit

E(L) = Erwartungswert der Nachrichtenlänge

C = Grenzdurchsatz der Leitung

Da bei Leitungsschaltung (siehe oben) die Leitung reserviert ist, gilt dieselbe Transportzeit auch im belasteten Netz!

2. Nachrichtenvermittlung

(Datagramm)
Wir vernachlässigen der Einfachheit halber Knotenbearbeitungszeiten (d. h. nur Zwischenspeicherung im Knoten) und physikalische Signallaufzeit, und es seien noch alle Leitungen gleich!

Datagrammübertragung:

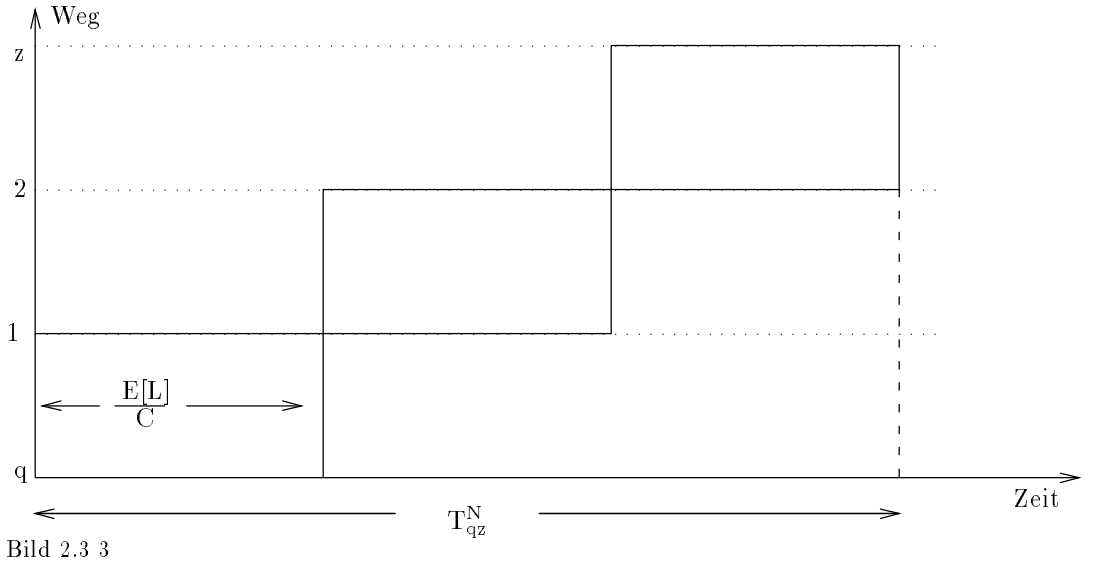


Bild 2.3 3

$$E[T^N_{qz}] = T^N(n) \approx n \times \frac{E[L]}{C} \qquad \text{leeres Netz}$$

Dabei n (im Bild: 3): n = — W_{qz} — (Zahl der einzelnen Wegstrecken von q nach z)
W_{qz} := i,j — Leitung (i,j) liegt auf Weg von KR_q nach KR_z

n Zahl der Leitungen, die die Nachricht von q nach z nacheinander durchläuft

L Nachrichtenlänge

C Grenzdurchsatz

T Transportzeit

Die Nachricht bestehe aus einem Nachrichtenkopf/schwanz der Länge L_K und dem Nutzdatenanteil (Text) der mittleren Länge L_D: E[L] = L_D + L_K, also

$$T^N(n) \approx n \times \frac{L_D + L_K}{C}$$

3. Paketvermittlung

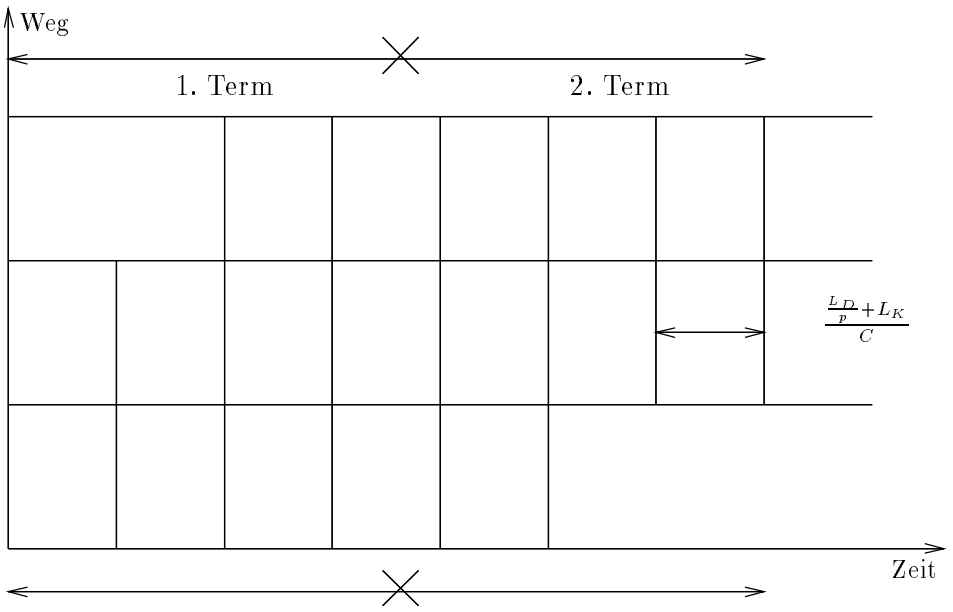


Bild2.3 4

p Pakete je Nachricht
Transportzeit für 1 Paket:

$$T^p(n) \approx n \times \frac{\frac{L_D}{p} + L_K}{C}$$

Nachrichtentextlänge im Mittel L_D. Jedes Paket hat Kopf/Schwanz!
Transportzeit der Gesamtnachricht:

$$T^p(n) = \underbrace{n \times \frac{\frac{L_D}{p} + L_K}{C}}_{1.\text{Term}} + \underbrace{(p-1) \times \frac{\frac{L_D}{p} + L_K}{C}}_{2.\text{Term}} =$$

$$= n \times \frac{\frac{L_D}{p} + L_K \times \frac{p}{p}}{C} + (p-1) \times \frac{\frac{L_D}{p} + L_K \times \frac{p}{p}}{C} =$$

$$= \frac{n(L_D + pL_K)}{Cp} + \frac{(p-1)(L_D + pL_K)}{Cp} = \frac{(L_D + pL_K)(n+p-1)}{Cp}$$

Im Vergleich: Nachrichtenvermittlung gegenüber Paketvermittlung:

$$T^N(n) = \frac{L_D + L_K}{C} \times n \qquad \text{Transportzeit für Nachrichtenvermittlung}$$

Mit

$$\delta = \frac{L_D}{L_K}$$

Text/Overhead- Verhältnis für Nachrichtenvermitlung ist das **Transportzeitverhältnis** Paketvermittlung/Nachrichtenvermittlung:

$$\alpha(\delta, n, p) = \frac{T^p(n)}{T^N(n)} = \frac{\frac{\frac{L_D}{L_K}+p}{\frac{C}{L_K}} \times \frac{n+p-1}{p}}{\frac{\frac{L_D}{L_K}+1}{\frac{C}{L_K}\times n}} = \frac{\delta + p}{\delta + 1} \times \frac{n + p - 1}{n \times p} \quad \begin{matrix} \geq \\ < \end{matrix} \quad 1!$$

aber $\frac{L_D}{pL_K}$ ist Text/Overhead - Verhältnis für Paketvermittlung!

Offensichtlich ist weder p=1 (Nachrichtenvermittlung) noch $p \to \infty$ (Paketvermittlung) günstig.
Kleines α: Vorteil der Paketvermittlung.
Suche nach optimaler Paketzahl durch Differenzieren nach p.

$$\frac{\partial \alpha(\delta, n, p)}{\partial p} = \frac{1}{\delta + 1} \times \frac{n + p - 1}{n \times p} + \frac{\delta + p}{\delta + 1} \times \frac{p - (n + p - 1)}{n \times p^2} \stackrel{!}{=} 0$$

$$\Rightarrow p_{\text{optimum}} = \sqrt{\delta \times (n-1)}; \qquad \alpha(\delta, n, p_{\text{optimum}}) = \frac{(\sqrt{\delta} + \sqrt{n-1})^2}{n \times (\delta + 1)}$$

α: Transportzeitverhältnis Paket/Nachrichtenvermittlung bei optimaler Paketzahl je Nachricht:

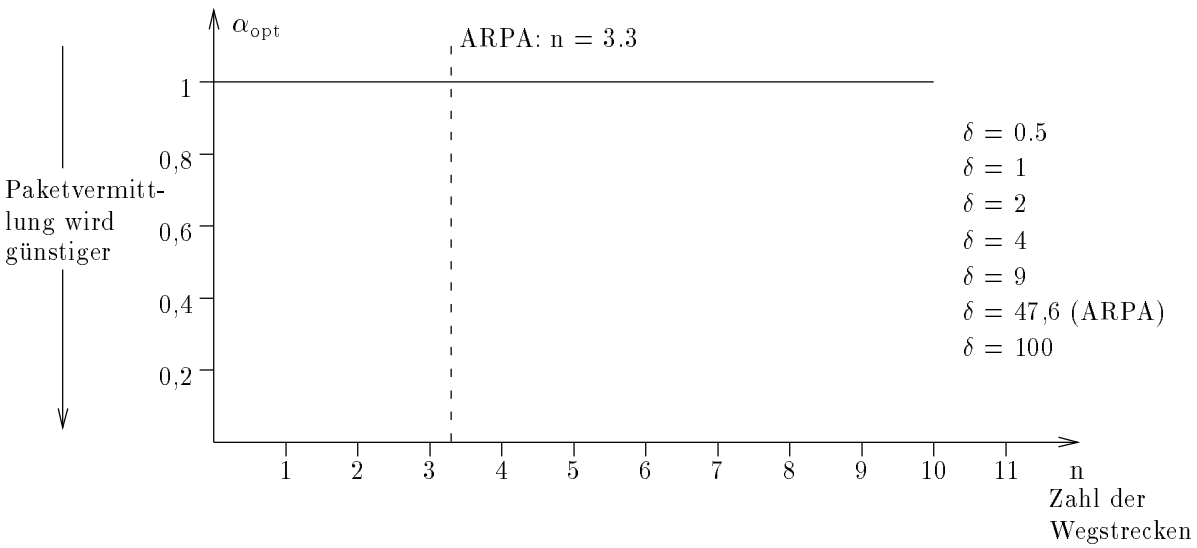


Bild 2.3 6

Beispiel: Maximale Nachricht im ARPA - Netz.

für $n = \overline{n}$;
$\overline{n}$ = mittlere Leitungszahl = 3,3.

L_D = 8000 bit, L_K = 168 bit (2,1 % Overhead) für Nachrichtenvermittlung

$$\delta = \frac{8000}{168} = 47,6$$

$$p_{opt} = \sqrt{\delta \times 3,3} = 10,5 \qquad \text{optimale Paketanzahl}$$

Mit p = 10 ist Paketlänge (L_D/p) 800 bit.
Transportzeitverhältnis α = 0,44; d. h. Datagramm benötigt mehr als die doppelte Zeit im Vergleich zur Paketvermittlung.
Overhead: 21 % = 800/168.

$$\alpha_{opt} = \frac{(\sqrt{\delta} + \sqrt{n-1})^2}{n \times (\delta + 1)}$$

2.3.2 Nachrichtentransportzeit im belasteten Netz (eine „Verweilzeit“)

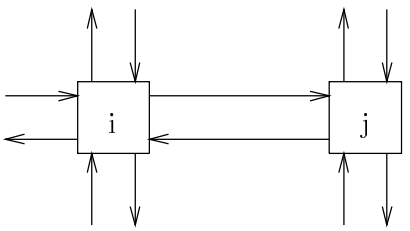


Bild 2.3 7

Knoten i, j mit angrenzenden Leitungen. i, j erhalten Nachrichten, lassen sie im allgemeinen warten, bevor sie sie prüfen und den weiteren Weg festlegen (**Knotenbedienzeit**); dann lassen sie sie weiter warten, bis die gewünschte Leitung sie überträgt (Transportzeit = **Bedienzeit der Leitung**). Verweilzeit (vor und im Knoten) := Wartezeit + Knotenbedienzeit (engl.: *nodal processing time*)

1. Knotenverweilzeit:
   1. Wartezeit der ankommenden Nachricht vor dem Knoten
   + 2. Verarbeitungszeit im Knoten (Knotenbedienzeit)
2. Leitungsverweilzeit:
   3. Wartezeit vor der Leitung
   + 4. Transportzeit auf Leitung (Leitungsbedienzeit)

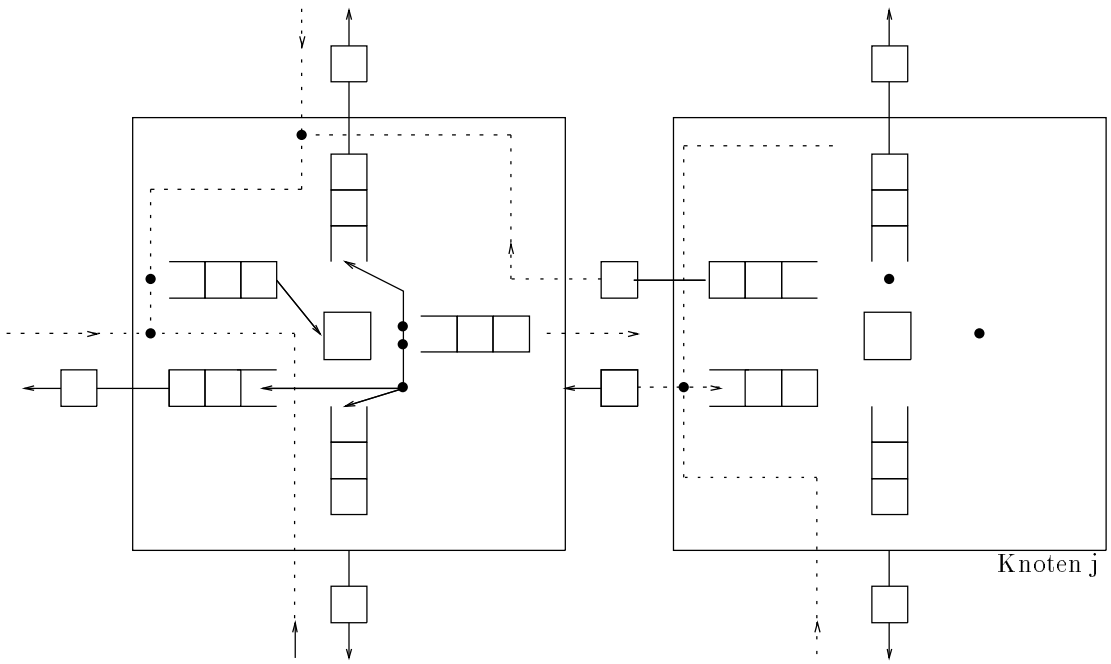


Bild 2.3 8