

Universität Stuttgart

Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung

Prof. Dr.-Ing. P. Kühn

50. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten

**INTEGRATION VON
SPRACH- UND DATENKOMMUNIKATION
IN LOKALEN NETZEN**

von

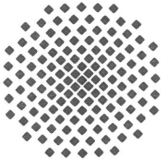
Klaus Sauer

1990

© 1990 Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung Universität Stuttgart

Druck: E. Kurz & Co., Druckerei + Reprografie GmbH., Stuttgart

ISBN 3-922403-60-3



Universität Stuttgart

Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung

Prof. Dr.-Ing. P. Kühn

50. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten

**INTEGRATION VON
SPRACH- UND DATENKOMMUNIKATION
IN LOKALEN NETZEN**

von

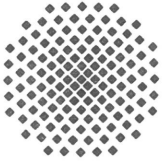
Klaus Sauer

1990

© 1990 Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung Universität Stuttgart

Druck: E. Kurz & Co., Druckerei + Reprografie GmbH., Stuttgart

ISBN 3-922403-60-3



University of Stuttgart

Institute of Communications Switching and Data Technics

Prof. Dr.-Ing. P. Kühn

50th Report on Studies in Congestion Theory

**VOICE AND DATA INTEGRATION
ON LOCAL AREA NETWORKS**

by

Klaus Sauer

1990

Voice and Data Integration on Local Area Networks

Abstract

This report deals with the performance analysis of voice and data integration schemes on Local Area Networks (LANs). A comparison of LAN access mechanisms which have been defined by the international standardisation committees is presented considering voice and data traffic, respectively. The properties of the well known LAN media access protocols Ethernet, Token Bus and Token Ring in terms of packet length, voice priority strategies and number of active voice connections are shown and discussed. The impact of voice reduction schemes, like silence suppression or ADPCM (Adaptive Delta Pulse Code Modulation), is also taken into account by detailed models.

An analytic approach for Token Passing systems with two priority classes and finite buffer capacities is developed. The approximative analysis is based on the conditional cycle time analysis in conjunction with the Markov chain approach and allows the calculation of the system characteristics for several voice integration schemes.

Chapter 1 Introduction

After a short introduction, considering general aspects of today's Inhouse communication, the requirements of Local Area Networks are given. Within the second part of this chapter the benefits and disadvantages of packetized voice transmission systems, especially LANs, are briefly discussed.

Chapter 2 Voice Integration on Local Area Networks

In the first section of this chapter the technique of packet switching and the basic principles of the ISO-reference model with respect to local area networks are introduced. The fundamental structures of local area networks, like topology, transmission technique and media access protocol are briefly explained.

The requirements of packetized voice transmission are described in the second part of this chapter. The tasks needed in the voice packetizer and voice depacketizer building blocks are summarized

and extended for the case of voice reduction schemes. The trade-off between voice packet loss and intelligibility of voice is discussed. A short introduction of synchronization mechanisms between voice packetizer and voice depacketizer completes this section. The third section is focusing on possible voice/data integration schemes which can be applied to CSMA/CD, Token Bus and Token Ring.

Chapter 3 Modeling of Voice and Data Sources and LANs

This chapter aims at the modeling aspects of packetized voice, especially with silence suppression. Three different voice source models are presented: one simple model represents packetized voice without silence suppression, another voice model takes into account the silence/talkspurt behaviour of a speaker. The most sophisticated voice source model includes the dependencies between the speakers of a conversation.

The second part addresses the modeling aspects of the different LANs, especially CSMA/CD, Token Bus and Token Ring which are applied to the performance analysis of voice and data integration.

Chapter 4 Comparison of Voice/Data Integration of Different LANs

In this chapter the effects of voice/data integration on the performance of the well-known LANs are investigated by detailed simulation programs. It is shown that the Token Ring LAN provides the best performance results carrying voice and data under several load conditions. The IEEE 802.5 Token Ring LAN offers the shortest waiting times for voice and data traffic in comparison to other Token Ring protocols for voice/data integration described in the literature. The Ethernet system does not provide several priority classes, thus the voice traffic has nearly the same behaviour as the data traffic and the total system throughput is strictly limited. For the Token Bus LAN with several priorities some unfairness problems caused by the timer controlled protocol can occur, this leads to blocking situations for the lower data traffic.

Using voice sources with silence suppression or voice redundancy schemes the performance results in terms of throughput can be increased more than twice as using 64 kbit digital voice coding. An optimum of the voice packet length for the investigated LANs is evaluated and due to the real time requirements of the voice transmission some constraints for the data traffic are presented.

Chapter 5 Analysis of Token Passing LANs with Voice Prioritization

In this chapter an analytic approach for Token Passing LANs with several voice prioritization strategies are derived. The models are based on a non-exhaustive polling system with finite buffer capacity and non-zero switchover times. Each station of the system is modeled by a subsystem consisting of two queues for voice and data, operating in a priority order. The analytic approach is based on the cycle time analysis with the extension of the voice prioritization schemes and the Markov chain approach. Results obtained from this approximative analysis can be used to estimate the quality of the voice integration schemes in terms of loss probabilities and mean waiting times for voice and data traffic. The accuracy of the analytic approach is validated by the results of the computer simulations presented in the previous chapter.

INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungen	4
Formelzeichen	5
Kapitel 1 Einleitung	7
1.1 Lokale Netze und ihre Einsatzgebiete	8
1.2 Problematik der Sprachübertragung in Lokalen Netzen	9
1.3 Überblick über die Arbeit	11
Kapitel 2 Sprachintegration in Lokalen Netzen	12
2.1 Lokale Netze	12
2.1.1 Allgemeines	12
2.1.2 Architektur	15
2.1.3 Technologie	18
2.1.4 Standardisierung	22
2.2 Anforderungen paketierter Sprachübertragung	23
2.2.1 Aufgaben der Sprachpaketier-Einheit	24
2.2.1.1 Sprachkodierung	24
2.2.1.2 Bitratenreduktion	24
2.2.1.3 Sprachpausenerkennung	26
2.2.1.3.1 TASI	26
2.2.2 Aufgaben der Sprachdepaketier-Einheit	28
2.2.2.1 Synchronisationsverfahren	28
2.2.2.2 Paketverluste	30
2.2.3 Laufzeitbeeinflussende Systemgrößen	32
2.3 Sprachintegrationskonzepte	34
2.3.1 Möglichkeiten bei standardisierten Lokalen Netzen	36
2.3.1.1 CSMA/CD	36
2.3.1.2 Token-Bus	36
2.3.1.3 Token-Ring	37
2.3.2 Spezielle Sprachintegrationskonzepte	37
2.3.2.1 Hybride LAN-Konzepte	38
2.3.2.2 Nebenstellenanlagen	38

Kapitel 3 Modellierung von Verkehrsquellen und Lokalen Netzen 39

- 3.1 Modellbildung unter verkehrstheoretischen Aspekten 39
- 3.2 Verkehrsmodelle für Sprachquellen 41
 - 3.2.1 Synchrones Sprechermodell 43
 - 3.2.2 Sprachquellmodelle unter Berücksichtigung des Sprachpausenverhaltens 44
 - 3.2.2.1 Sprachquellmodell eines Sprechers 48
 - 3.2.2.2 Sprachquellmodell einer Dialog-Verbindung 52
- 3.3 Verkehrsmodell für Datenquellen 56
- 3.4 Systemmodell der Lokalen Netze 57
 - 3.4.1 CSMA/CD 58
 - 3.4.2 Token-Bus 60
 - 3.4.3 Token-Ring 63

Kapitel 4 Systemverhalten bei Sprach-/Datenintegration 67

- 4.1 Zeittreue Simulation 68
- 4.2 Leistungsbeeinflussende Parameter 68
- 4.3 Vergleich und Leistungsbewertung der standardisierten Lokalen Netze 69
 - 4.3.1 Einfluß der Paketlänge 70
 - 4.3.1.1 Sprachpaketlänge 71
 - 4.3.1.2 Datenpaketlänge 73
 - 4.3.2 Einfluß der Sprachquellmodelle 79
- 4.4 Modifikationen des Token-Ring Zugriffsprotokolls 82
 - 4.4.1 Vergleich verschiedener Sprachintegrationsverfahren basierend auf Ringtopologien 84
 - 4.4.2 Leistungsbewertung der verschiedenen Sprachintegrationsverfahren 84

Kapitel 5 Analyse von lokalen Netzen mit Token-Zugriff und priorisierter Sprachübertragung 89

- 5.1 Modellierung und analytische Methoden 89
 - 5.1.1 Systeme mit zyklischer Abfertigung 89
 - 5.1.2 Voraussetzungen und Annahmen 91
- 5.2 Grundlagen des Berechnungsverfahrens 92
 - 5.2.1 Zustandsprozeß einer Datenwarteschlange bei Tokenankunft 92

5.2.1.1	Methode der eingebetteten Markoff-Kette	92
5.2.1.2	Zykluszeitanalyse	94
5.2.2	Bestimmung der Systemgrößen der Datenpriorität zu beliebigen Zeitpunkten	96
5.3	Analyse von Token Passing LANs mit zentraler Sprachpriorisierung	97
5.3.1	Modellierung der zentralen Sprachpriorisierung	97
5.3.2	Berechnung der Anzahl deterministischer Ankünfte in einem Zeitintervall	100
5.3.3	Algorithmus zur Bestimmung der Systemgrößen	103
5.3.4	Ergebnisse	107
5.4	Analyse von Token Passing LANs mit stationsinterner Sprachpriorisierung	109
5.4.1	Modellierung der stationsinternen Sprachpriorisierung	109
5.4.2	Algorithmus zur Bestimmung der Systemgrößen	110
5.4.3	Ergebnisse	113
Kapitel 6 Zusammenfassung und Ausblick		115
6.1	Zusammenfassung	115
6.2	Ausblick	116
Literaturverzeichnis		118

ABKÜRZUNGEN

ADPCM	Adaptive Delta Pulse Code Modulation
ANSI	American National Standards Institute
ATDM	Asynchronous Time Division Multiplexing
ATM	Asynchronous Transfer Mode
CCITT	Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CPBX	Computerized Private Branch Exchange
CRC	Cyclic Redundancy Check
CS	Circuit Switching, Durchschaltvermittlung
D	Konstant verteilte Phase
DQDB	Distributed Queue Dual Bus Metropolitan Area Network
DSI	Digital Speech Interpolation
ECMA	European Computer Manufactures Association
ED	End Delimiter
FCS	Frame Check Sequence
FDDI	Fiber Distributed Data Interface
FEC	Front-End-Clipping
FIFO	First-In, First-Out
HSLAN	High Speed Local Area Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISO	International Organization for Standardization
LAN	Local Area Network
LIFO	Last-In, First-Out
LLC	Logical Link Control Layer
MAC	Media Access Control Layer
MAN	Metropolitan Area Networks
MSC	Midspeech-Clipping
OSI	Open Systems Interconnection
PBX	Privat Branch Exchange
PCM	Pulse Code Modulation
PDU	Protocol Data Unit
PS	Packet Switching, Paketvermittlung
SD	Start Delimiter
SFD	Start Frame Delimiter
SM-Station	Sprach-Master-Station
TASI	Time Assignment Speech Interpolation

TRT	Token Rotation Time
TTRT	Target Token Rotation Time
VDF	Verteilungsdichtefunktion
VF	Verteilungsfunktion
ZV	Zufallsvariable

FORMELZEICHEN

Die typische Verwendung einiger Formelzeichen soll am Beispiel des Ankunftsabstandes dargestellt werden:

T_A	Zufallsvariable für den Ankunftsabstand
$E[T_A] = t_A$	Mittelwert
$VAR[T_A]$	Varianz
$c[T_A]$	Variationskoeffizient
$F_A(t)$	Verteilungsfunktion
$f_A(t)$	Verteilungsdichtefunktion
$f_A^R(t)$	VDF der Rückwärtsrekurrenzzeit
$f_A^V(t)$	VDF der Vorwärtsrekurrenzzeit
B_D	Verlustwahrscheinlichkeit der Datenpakete
B_V	Verlustwahrscheinlichkeit der Sprachpakete
B_{Vmax}	Maximale Verlustwahrscheinlichkeit der Sprachpakete
$E[T_{CM}]$	Mittelwert der modifizierten Zykluszeit
$E[T_{CVI}]$	Mittelwert der Sprachzykluszeit
$E[T_{WD}]$	Mittelwert der Datenpaketwartezeit
$E[T_{WV}]$	Mittelwert der Sprachpaketwartezeit
G	Anzahl der Stationen
L_D	Mittlere Warteschlangenlänge der Daten
L_{PV}	Anzahl von Nutzbits in einem Sprachpaket
L_V	Anzahl Nutzbits pro Sprachabstwert
N	Anzahl aktiver Sprachverbindungen
N_{max}	Maximale Anzahl aktiver Sprachverbindungen
p_0	Wahrscheinlichkeit, daß bei Tokenankunft kein Datenpaket in der Datenwarteschlange ist
p_k	Zustandswahrscheinlichkeiten der Datenwarteschlange
Q_V	Sprachquellkodierrate

q_v	Wahrscheinlichkeit, daß bei Tokenankunft ein Sprachpaket im Sprachspeicher ist
s_i	Speicherkapazität der Datenwarteschlange
s_v	Speicherkapazität des Sprachspeichers
T_C	ZV der Zykluszeit
T_{CO}	Dauer eines Leerzyklus
T_{CM}	ZV der modifizierten Zykluszeit
T_{CV}	Dauer eines Sprachzyklus
T_D	ZV des Ankunftsabstandes der Datenanforderungen
T_{DT}	ZV der Phasendauer Double Talking
T_H	ZV der Übertragungsdauer einer Datenanforderung
T_{MS}	ZV der Phasendauer Mutual Silence
T_{PV}	ZV der Bediendauer eines Sprachpaketes
T_S	ZV der Phasendauer Silence
T_{Stat}	ZV der Durchlaufzeit durch eine Station
T_T	ZV der Phasendauer Talkspurt
T_U	ZV der Tokenweitergabezeit
t_D	Verzögerung des ersten Sprachpaketes im Depaketierer
$t_{Fill-In}$	Dauer der Fill-In Zeit
t_G	Zeitverzug zwischen Eintreffen des ersten Abtastwertes beim Sender und Empfang des gesamten Sprachpakets beim Empfänger
t_{LMAX}	Maximale Signallaufzeit
t_n^-	Regenerationszeitpunkt
t_{Pack}	Konstanter Ankunftsabstand der Sprachpakete
t_{TD}	Verzögerungszeit eines Sprachpaketes vom Sprachquellkodierer zum Sprachquelldekodierer
$t_{\ddot{u}}$	Übermittlungsdauer
$t_{\ddot{U},D}$	Übermittlungsverzögerung eines Sprachpaketes
t_{verz}	Verzögerungszeit eines Sprachpaketes im Depaketierer
X	ZV der Anzahl eingeschobener Sprachzyklen

1 EINLEITUNG

Durch die Entwicklungen der letzten Jahre auf den Gebieten der Datenverarbeitung, Datenübermittlung und Datenspeicherung zeichnet sich ein deutlicher Trend zur Automatisierung und Integration unterschiedlichster Arbeitsprozesse ab. So werden zum Beispiel im Bereich der Prozessautomation computergesteuerte Maschinen, automatische Meßeinrichtungen und Prozeßrechner eingesetzt, die durch geeignete Kommunikationssysteme untereinander und mit anderen vor- oder nachgelagerten Bereichen (Lager, Arbeitsvorbereitung, Konstruktion) Informationen austauschen. Das angestrebte Ziel ist dabei die Schaffung flexibler Fertigungssysteme bzw. die computerintegrierte Fertigung (Computer Integrated Manufacturing, CIM).

Im Verwaltungs- und Bürobereich ist ebenfalls durch den Einsatz der Mikroelektronik eine Entwicklung hin zu funktional komplexeren Geräten festzustellen, die mehrere Aufgaben in sich vereinen (z.B. PC mit Btx- und Telefaxeinheit). Die bisher getrennten Bereiche der Verarbeitung und Übermittlung von unterschiedlichsten Informationen (Text, Bild, Daten, Sprache) wachsen zu einer integrierten Bürokommunikation zusammen.

Interne Kommunikationsnetze sind dabei von ganz besonderer Bedeutung, da sich durch die komplexeren Endgeräte und einer gleichzeitigen Verlagerung von zentralen Ressourcen auf leistungsfähige, dezentrale Einrichtungen ein erhöhter Nachrichtenaustausch zwischen den einzelnen Systemen ergibt. Seither wurde die innerbetriebliche Kommunikation mittels Nebenstellenanlagen (Private Branch Exchange, PBX) auf der Basis der klassischen Durchschaltvermittlung (Circuit Switching, CS) abgewickelt. Hauptmerkmal der Nebenstellenanlagen ist eine sternförmige Anordnung der Endgeräte um die zentrale Vermittlungsstelle. Mit der Einführung des diensteintegrierenden Digitalnetzes (Integrated Services Digital Network, ISDN) werden die bisher analog betriebenen Nebenstellenanlagen durch voll digitalisierte Nebenstellenanlagen ersetzt werden, wobei Leistungsmerkmale speziell für datenorientierte Anwendungen Berücksichtigung finden.

Neben der traditionell sehr stark ausgeprägten Sprachkommunikation steigt jedoch die text- bzw. grafikorientierte Kommunikation im innerbetrieblichen Bereich immer mehr an. Die zu vermittelnden Nachrichtenströme weisen damit sehr unterschiedliche Charakteristika auf; vom kontinuierlichen Sprachstrom bis hin zum büschelförmigen Datenverkehr. Die neuen Kommunikationsbeziehungen sind gekennzeichnet durch dezentrale, flexible Organisationsformen, die es erlauben, zwischen beliebigen Teilnehmern beliebige Informationsarten auszutauschen und eine effiziente Ausnutzung der verschiedenen Ressourcen garantieren. Deshalb werden in zunehmendem Maße innerbetriebliche Vermittlungssysteme, die ihre Vermittlungsfähigkeiten über das gesamte Netz

verteilen und dabei allen angeschlossenen Geräten ein einheitliches Transportsystem zur Verfügung stellen, eingesetzt.

1.1 Lokale Netze und ihre Einsatzgebiete

Ausgehend von reinen Datenverarbeitungsnetzen, die einen schnellen Datenaustausch zwischen Rechnern bzw. zwischen Rechnern und Endgeräten ermöglichen, haben sich seit Mitte der Siebziger Jahre breitbandige Datennetze, sogenannte Lokale Netze (Local Area Networks, LANs) entwickelt. Zur klaren Begriffsbestimmung haben die Standardisierungsgremien IEEE [74] und ECMA [40] folgende Kriterien für ein Lokales Netz festgeschrieben:

- Lokale Netze unterscheiden sich von anderen Datennetzen dadurch, daß sie für begrenzte räumliche Ausdehnungen (Bürogebäude, Fabrikgelände etc.) optimiert sind.
- Lokale Netze sind Datenkommunikationssysteme, die einen Übertragungskanal mit mittlerer bis großer Datenrate, kurzen Antwortzeiten und kleinen Fehlerraten zur Verfügung stellen, damit mehrere unabhängige Geräte miteinander kommunizieren können.
- Lokale Netze obliegen der Kontrolle und Nutzung nur durch eine private Organisation, im Gegensatz zu Weitverkehrsnetzen, die als öffentliche Netze von jedermann genutzt werden können.

Betrachtet man speziell die Größen Übertragungsrate und geographische Ausdehnung, so ist eine Einordnung der Lokalen Netze entsprechend Bild 1.1 möglich. Die Grenzen sind dabei fließend und werden augenblicklich durch weitere Entwicklungen um die Bereiche High Speed Local Area Networks (HSLANs) und Metropolitan Area Networks (MANs) erweitert. Die HSLANs zeichnen sich durch Übertragungsraten jenseits 100 Mbit/s aus; die MANs erlauben es, neben den höheren Übertragungsraten auch größere geographische Bereiche abzudecken und sind nicht notwendigerweise unter der Kontrolle eines einzigen Betreibers.

Lokale Netze werden bitseriell betrieben und sind in der geografischen Ausbreitung hauptsächlich von den übertragungstechnischen Faktoren wie Dämpfung, Reflexion oder Dispersion begrenzt; im Gegensatz dazu sind Multiprozessor-Systeme und schnelle Ein-/Ausgabekanäle bitparallele Übertragungskanäle und werden zur Überbrückung geringer Distanzen eingesetzt. Die Abgrenzung der Lokalen Netze zu Nebenstellenanlagen ist vor allem in den unterschiedlichen Vermittlungsverfahren zu sehen. Bestehende analoge und auch ISDN-fähige Nebenstellenanlagen benutzen die Leitungsvermittlung, die zwischen den beteiligten Endeinrichtungen für die gesamte Dauer der Verbindung einen unmittelbaren Übertragungsweg zur Verfügung stellen. Lokale Netze arbeiten in aller Regel nach dem Prinzip der Paketvermittlung (Packet Switching, PS), da die Vermittlungssteue-

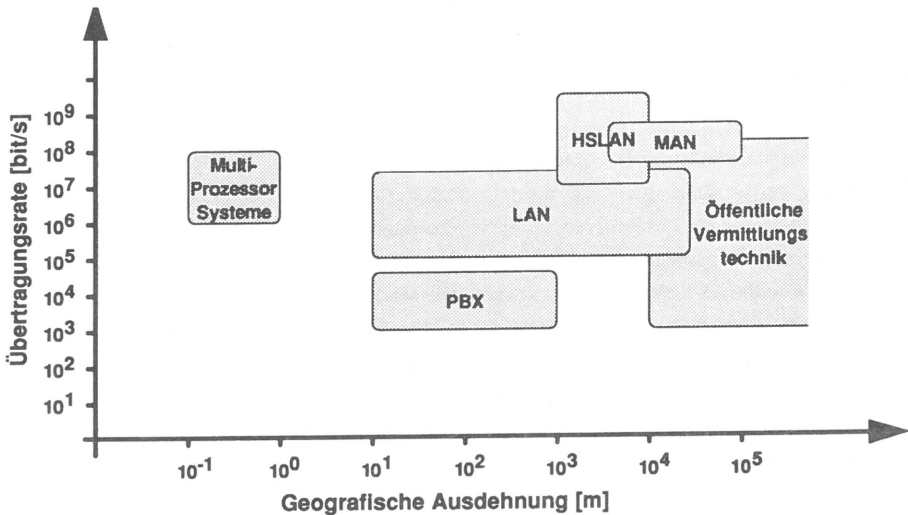


Bild 1.1: Abgrenzung verschiedener Kommunikationssysteme

rung über alle an dem Netz angeschlossenen Stationen verteilt ist und das vermittelnde Netz nur einen Übertragungskanal besitzt.

Einsatzgebiete für Lokale Netze sind überall dort zu sehen, wo multifunktionale Arbeitsplatzsysteme mit lokaler Speicher- und Verarbeitungskapazität miteinander kommunizieren und/oder Informationen von zentralen Einrichtungen über innerbetriebliche Kommunikationswege von heterogenen Endgeräten abgerufen werden sollen. So findet man Lokale Netze in Rechenzentren zur Vernetzung unterschiedlichster Rechensysteme, in der Büroautomatisierung zur Kommunikation von Arbeitsplatzrechensystemen untereinander und mit dedizierten Endeinrichtungen, sowie in der Prozessautomation zur Kopplung verschiedener Fertigungszellen, um einen flexiblen Informationsverbund zwischen den einzelnen Fertigungszellen zu ermöglichen. Die Anwendungen reichen dabei von File Transfer über Datenbankmanipulationen und Electronic Mail bis zu digitaler Sprach- und Bildkommunikation [74].

1.2 Problematik der Sprachübertragung in lokalen Netzen

Die Übertragung von Sprachsignalen wird im öffentlichen Fernsprechnetz z.Z. analog, mit der flächendeckenden Einführung des ISDN voll digital zwischen den Endteilnehmern durchgeführt. Die Übertragung erfolgt dabei leitungsvermittelt, d.h. während der gesamten Verbindungsdauer ist ein physikalischer Übertragungskanal zwischen den Endteilnehmern durchgeschaltet. Der kontinuierli-

che Strom der Sprachsignale wird dabei aufgrund der endlichen Signallaufzeit um einen konstanten Wert verzögert.

Bei Lokalen Netzen findet die Übertragung paketvermittelt statt. Die in digitaler Form vorliegenden Nachrichten werden dabei in Blöcke unterteilt (*Paketierung*) und als adressierte Pakete bitseriell übertragen. Will man ein Lokales Netz zur Sprachübertragung nutzen, so treten neben den Verzögerungen aufgrund der endlichen Signallaufzeit weitere Verzögerungen auf, die signifikant und ggf. störend für eine Sprachübertragung sein können. Die senderseitige Paketierung und die empfangsseitige Depaketierung führen zu zusätzlichen festen Verzögerungen. Der größte Nachteil paketierter Sprachübertragung mittels Lokaler Netze ergibt sich aufgrund der stochastischen Paketlaufzeiten. Durch die dezentrale Vermittlungssteuerung bei Lokalen Netzen treten senderseitig Wartezeiten auf, die statistischen Schwankungen unterliegen. Der kontinuierliche Sprachfluß wird dadurch gestört, und es kann zu Sprachverzerrungen kommen.

Trotz dieser Probleme sprechen jedoch zwei maßgebliche Gründe für eine Sprachübertragung in Lokalen Netzen. Zum einen ist mit dem Anschluß multifunktionaler Endgeräte an Lokale Netze die Forderung verbunden, neben Daten- auch Sprachübertragung zu unterstützen (vgl. hierzu [73]), zum anderen enthält die natürliche Sprache einen hohen Redundanzanteil durch Pausen zwischen Silben, Worten und zwischen ganzen Sätzen. Dieser Pausenanteil beträgt pro Sprecher ca. 60% (siehe [14]) und kann bei der Übertragung durch geeignete Verfahren (*Sprachpausenreduktion*) herausgefiltert werden. Damit kann eine bessere Auslastung des Übertragungskanals erfolgen; der kontinuierliche Sprachstrom wird zudem durch diese Sprachpausenreduktion büschelförmig und eignet sich somit für die Übertragung durch ein paketvermittelndes System.

Aus der Sicht des Netzbetreibers ist es in einem Lokalen Netz nicht notwendig und auch nicht unmittelbar möglich, eine Sprachübertragung als solche zu identifizieren oder gar auszuschliessen. Denn für den Übermittlungsdienst sind die an der Netzzugangseinheit angebotenen Nachrichten nur zu übertragen; eine Steuerung der Endgeräte obliegt dem Anwender. Eine Sprachübertragung sollte vielmehr im Sinne eines diensteintegrierenden Netzgedankens über dasselbe Lokale Netz vermittelt werden, das auch alle anderen Datenübertragungen vermittelt.

Um den Anforderungen einer paketierte Sprachübertragung gerecht zu werden, muß ein Lokales Netz geeignete Mechanismen zur Reduzierung der Laufzeitschwankungen der einzelnen Sprachpakete besitzen. Darüberhinaus sollten die Empfangseinrichtungen Verfahren besitzen, die auftretende stochastische Laufzeitschwankungen ausgleichen können.

1.3 Überblick über die Arbeit

Nach der Einführung in den Problembereich paketierter Sprachübertragung soll Kapitel 2 einen Überblick über die Architektur und die Betriebsmerkmale von Lokalen Netzen verschaffen. Des Weiteren sollen die besonderen Anforderungen einer paketierten Sprachübertragung über Lokale Netze beleuchtet werden. Systemkonzepte für die Integration von Sprach- und Datenkommunikation in LANs mit dem Schwerpunkt auf standardkonforme Lösungsansätze schließen dieses Kapitel ab.

Im dritten Kapitel wird die Modellierung der Verkehrsquellen und der standardisierten Lokalen Netze unter verkehrstheoretischen Aspekten durchgeführt. Ausgehend von bekannten Messungen wird ein dialogbezogenes Sprachquellmodell entwickelt, das sowohl das Sprachpausenverhalten eines Sprechers als auch die Korrelationen zwischen beiden Gesprächsteilnehmern berücksichtigt. Vergleiche mit bekannten Sprachquellmodellen zeigen dabei z.T. signifikante Unterschiede. Ein weiterer Schwerpunkt des dritten Kapitels ist die einheitliche Modellierung standardisierter LANs, um vergleichende Aussagen über deren Systemverhalten bei der Integration von Sprach- und Datenkommunikation zu erhalten.

Das vierte Kapitel befaßt sich mit dem Systemverhalten der verschiedenen Lokalen Netze bei Sprachintegration. Mittels zeittreuer Simulation wird eine Leistungsbewertung durchgeführt, wobei der Einfluß der leistungsbestimmenden Parameter wie Paketlänge und Sprachquellmodell gezeigt werden. Unterschiedliche Prioritätsmechanismen bei Token Passing LANs werden eingeführt und im Hinblick auf das fünfte Kapitel eingehend aufbereitet.

Das fünfte Kapitel widmet sich ganz den analytischen Methoden zur Berechnung von Token Passing LANs mit priorisierter Sprachübertragung. Die Basis bildet dazu eine iterative Zykluszeitanalyse, die jeweils für die verschiedenen Prioritätsverfahren modifiziert wird. Die aus der approximativen Analyse bestimmbaren Systemgrößen werden den simulativ gewonnenen Größen gegenübergestellt, um die gute Übereinstimmung zu zeigen.

2 SPRACHINTEGRATION IN LOKALEN NETZEN

2.1 Lokale Netze

Zu Beginn der Siebziger Jahre wurden in verschiedenen Forschungsabteilungen Konzepte entwickelt, die hochratige Kommunikationsnetze für interaktive Terminal-Host Verbindungen bei begrenzter räumlicher Ausdehnung vorsahen [28]. Neben unterschiedlichen Übertragungsmedien und Topologien wurden unterschiedliche Mechanismen zur Steuerung des Zugriffs auf das gemeinsame Übertragungsmedium vorgeschlagen [106,113,131].

2.1.1 Allgemeines

Als Vermittlungsprinzip hat sich bei Lokalen Netzen das *Paketvermittlungsprinzip* durchgesetzt. Es handelt sich dabei um eine spezielle Ausprägung des Speichervermittlungsverfahrens (Store and Forward) [123]. Nachrichten werden dabei anhand einer im Nachrichtenkopf angegebenen Zielinformation abschnittsweise von Vermittlungsstelle zu Vermittlungsstelle durch das Datennetz geschleust. Ein über die gesamte Dauer der Verbindung durchgeschalteter Übertragungsweg existiert nicht.

Das Paketvermittlungsprinzip setzt voraus, daß die zu übertragende Nachricht in Pakete unterteilt ist, wobei jedes Paket zusätzlich eine Paketkopfinformation enthält. In diesem Paketkopf ist die Adresse der Vermittlungsstelle eingetragen, die das Paket erhalten soll. Die Vermittlung der Nachrichten erfolgt durch Auswerten dieser Zieladresse im Paketkopf. Dazu speichert jede Vermittlungsstelle die empfangenen Pakete und wertet die Paketkopfinformation aus (Datagramm Verbindung).

Bei einer *Datagramm Verbindung* werden die einzelnen Nachrichtenblöcke unabhängig von einander jeweils nach der mitgeführten Adressinformation vermittelt. Daneben existiert noch das *virtuelle Verbindungsprinzip*, das einen Verbindungsauf- und -abbau voraussetzt. Hierbei wird u.a. der Weg durch das Vermittlungsnetz festgelegt, über den alle Pakete dieser Verbindung geführt werden. Dazu wird mittels logischer Kanalnummern die Wegelenkung in den einzelnen Netzknoten durchgeführt. Das virtuelle Verbindungskonzept garantiert eine Reihenfolgesicherung der einzelnen übertragenen Pakete und unterstützt die Datenflußsteuerung zur Einhaltung eines geforderten Datendurchsatzes.

Bei Lokalen Netzen sind die einzelnen Vermittlungsstellen durch einen Übertragungskanal großer Bandbreite miteinander verbunden. Die gemeinsame Nutzung des Übertragungswegs durch alle Vermittlungsstellen erfolgt durch geeignete Multiplextechniken. Man unterscheidet dabei zwei Prinzipien:

- *Kanalmultiplextechniken*, die jeder Verbindung einen Kanal konstanter Bandbreite exklusiv zuweisen. Die Zuteilung kann dabei im Zeitmultiplex, im Raummultiplex oder im Frequenzmultiplex erfolgen. Kennzeichen aller Kanalmultiplextechniken ist ein garantierter kontinuierlicher Nachrichtenfluß zwischen Sender und Empfänger;
- *Nachrichtenmultiplextechniken*, die Nachrichten in einzelnen Blöcken mit variabler Bitrate übertragen. Die Nachrichtenblöcke werden zeitlich verschachtelt, somit ist kein kontinuierlicher Nachrichtenfluß zwischen Sender und Empfänger garantiert.

Aufgrund des engen Zusammenhangs zwischen Multiplextechnik und Vermittlungsverfahren bieten sich bei Lokalen Netzen Nachrichtenmultiplextechniken an, da sie sich optimal mit dem Paketvermittlungsprinzip kombinieren lassen. Die Nachrichten werden dazu in Blöcke mit variabler oder konstanter Länge unterteilt und jeweils um ein Steuerfeld (Header) erweitert. Dieses Steuerfeld enthält je nach Verfahren Adreßinformation, Verbindungsnummer, Reihenfolgenummer und weitere Protokollsteuerinformation. Im allgemeinen wird jeder Nachrichtenblock durch ein Kontrollfeld erweitert, das eine Prüfsumme enthält, um Fehlererkennung oder Fehlerkorrektur durchzuführen (Bild 2.1).



Bild 2.1: Prinzipieller Aufbau eines Nachrichtenblocks

Nachrichtenblöcke variabler Länge werden zusätzlich durch Begrenzungsfelder eingeschlossen, um Anfang und Ende eines Nachrichtenblocks zu erkennen. Die Begrenzungsfelder bestehen aus Bit-

kombinationen, die innerhalb des Rahmens (Frame) nicht auftreten dürfen. Das zeitliche Verschachteln der Nachrichtenblöcke auf dem Übertragungskanal erfolgt asynchron (Asynchrones Zeitmultiplex, Asynchronous Time Division Multiplex, ATDM). Durch die variable Nachrichtenblocklänge ergibt sich ein sogenanntes *statistisches Multiplexen* der einzelnen Nachrichtenblöcke (Pakete) auf dem Übertragungskanal (Bild 2.2a).

Werden Pakete einer festen Länge benutzt (Segmente), können die Begrenzungsfelder pro Nachrichtenblock entfallen, wenn eine Synchronisation in Form einer Zeitrahmenstruktur auf dem Kanal verwendet wird. Jedes Segment benötigt zur Übertragung genau einen Zeitschlitz (Slot) des vorgegebenen Zeitrahmens. Freie Slots sind durch eine entsprechende Kennung markiert, und neue Ver-

bindungen mit variabler Bitrate können diese freien Slots belegen (Bild 2.2b). Die Übermittlung von Segmenten gleicher Länge nach dem asynchronen Nachrichtenmultiplex und dem virtuellen Verbindungsprinzip wird auch als Asynchronous Transfer Mode (ATM) bezeichnet.

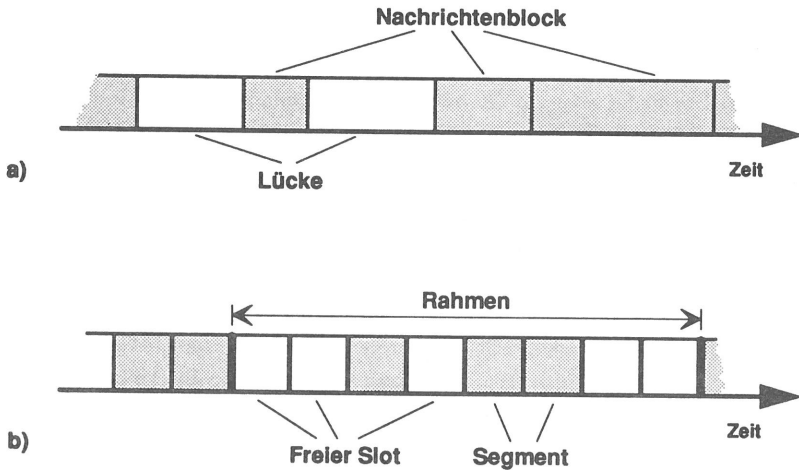


Bild 2.2: Nachrichtenmultiplextechniken

a) ATD mit variabler Nachrichtenblocklänge

b) ATD mit fester Nachrichtenblocklänge

Beide asynchrone Multiplexvarianten werden bei Lokalen Netzen eingesetzt und unterstützen aufgrund ihrer Funktionalität das Prinzip der Paketvermittlung. Die daraus resultierenden Vorteile einer Paketvermittlung im Gegensatz zur Durchschaltvermittlung sind:

- eine bessere Ausnutzung des Übertragungskanals durch Nachrichtenmultiplexen
- Nachrichtenabhängige Steuerung und Kontrolle (in Form einer nachrichtenabhängigen Priorisierung oder einer nachrichtenabhängigen Fehlerbehandlung)
- Einfache Realisierung von Verteildiensten und Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen
- Endeinrichtungen mit unterschiedlichsten Datenraten können direkt über ein paketvermittelndes System Nachrichten austauschen

Paketvermittelnde Systeme sind Wartesysteme, die senderseitig Nachrichtenblöcke speichern, bis die Pakete im statistischen Multiplexbetrieb den Übertragungskanal zugeteilt bekommen. Gerade dieser asynchrone Zeitmultiplexbetrieb führt jedoch zu Verzögerungen und insbesondere zu Streuungen in den Verzögerungszeiten durch das System. Damit sind Systeme auf der Basis der Paketvermittlung nicht unbedingt für Echtzeit-Anwendungen, wie z.B. Sprachkommunikation, geeignet.

2.1.2 Architektur

Die Architektur eines Kommunikationssystems beschreibt die funktionale Zerlegung der Kommunikationsvorgänge im Gesamtsystem. Das Gesamtsystem umfaßt dabei die eigentlichen Verarbeitungsinstanzen, zwischen denen letztendlich die Kommunikation abläuft, die Endsysteme, welche die Verarbeitungsinstanzen beinhalten, Transitsysteme, die eine Verbindung zwischen den Endsystemen erlauben und die Übertragungsstrecken zwischen den einzelnen Systemen.

Mit dem Basis-Referenzmodell für die Kommunikation offener Systeme (OSI-Referenzmodell, OSI, Open Systems Interconnection) [75] läßt sich die Kommunikationsarchitektur in sieben Schichten gliedern (Bild 2.3). Jede Schicht erbringt dabei Dienste, die von der darüberliegenden Schicht zur Erfüllung deren Funktionalität vorausgesetzt wird. Ein Dienst definiert Objekte und Operationen auf diesen Objekten, z.B. eine Verbindung bzw. den Auf- oder Abbau einer Verbindung. Ein Dienst erstreckt sich dabei über mehrere Systeme (Stationen), wobei die Funktionalität

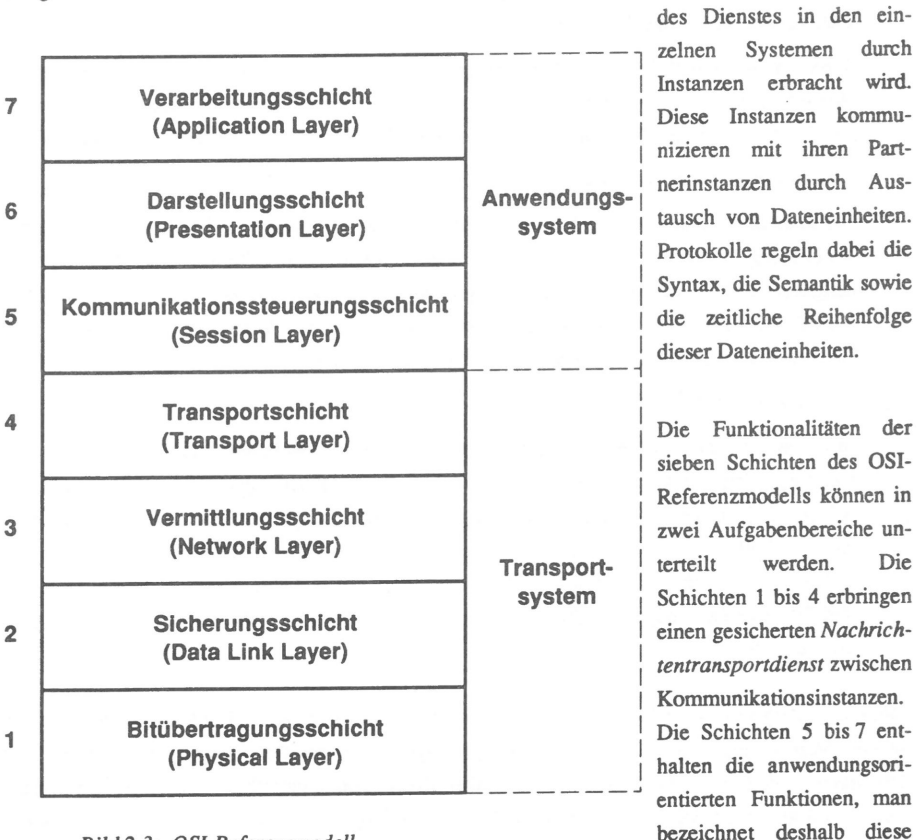


Bild 2.3: OSI-Referenzmodell

Schichten auch als *Anwendungssystem* [44]. Die Aufgaben umfassen u.a. die Dialogsteuerung (Schicht 5), die Auswahl der Datentypen und ggf. deren Transformation (Schicht 6) sowie die Identifikation und Autorisierung und die Vereinbarung von Anwendungsklassen (Schicht 7).

Die Funktionen des Anwendungssystems bauen auf dem Transportdienst auf, sie sind jedoch vollständig entkoppelt von der Art und Weise, wie dieser Transportdienst von den unterlagerten Schichten erbracht wird. Bei der Einordnung Lokaler Netze in das OSI-Referenzmodell sind deshalb nur die Schichten des Transportsystems relevant.

- *Bitübertragungsschicht* (Physical Layer)

In dieser Schicht werden die elektrischen, mechanischen, aber auch funktionellen Eigenschaften festgelegt, die zur reinen Bitübertragung über einen ungesicherten Nachrichtenkanal notwendig sind. Der Nachrichtenkanal selbst ist nicht Gegenstand des OSI-Referenzmodells.

- *Sicherungsschicht* (Data Link Layer)

Neben einer Datenflußsteuerung mit Reihenfolgesicherung erbringt diese Schicht eine gesicherte Nachrichtenübertragung auf den einzelnen Teilstrecken einer Verbindung. Funktionen zum Verbindungsauf- und -abbau werden außerdem in der Sicherungsschicht bereitgestellt.

- *Vermittlungsschicht* (Network Layer)

Die einzelnen gesicherten Teilstrecken einer Verbindung werden in dieser Schicht zu einer Verbindung zwischen den Endsystemen zusammengeführt. Dienste für den Verbindungsauf- und -abbau zwischen den Endsystemen, Leistungsmerkmale der Verbindung sowie Verkehrlenkung (Routing) und das Multiplexen mehrerer Verbindungen zwischen den Endsystemen werden durch die Vermittlungsschicht erbracht.

- *Transportschicht* (Transport Layer)

In dieser Schicht findet eine Abbildung der Endsystemverbindungen auf die durch das Anwendungssystem definierten Kommunikationsinstanzen (Teilnehmer) statt. In der Transportschicht können Teilnehmerverbindungen auf mehrere Endsystemverbindungen aufgespalten werden (Splitting) und eine Datenflußsteuerung und Fehlerkontrolle über das gesamte Transportsystem hinweg durchgeführt werden. Die Instanzen der Transportschicht existieren nur in den Endsystemen und stellen einen netzunabhängigen Datentransport für das Anwendungssystem bereit.

Die Einordnung Lokaler Netze in die OSI-Architektur macht eine Unterteilung der Sicherungs- sowie der Vermittlungsschicht in Teilschichten (Sublayers) sinnvoll. Der Zugang zum gemeinsamen Übertragungsmedium ist bei Lokalen Netzen über alle Stationen verteilt, dadurch sind die Schichten 1 und 2 abhängig von der verwendeten LAN-Technologie. Um mit dem OSI-Referenzmodell konform zu sein, wurde die Sicherungsschicht in zwei Teilschichten gegliedert, die *Kanalzugriffs-*

schicht (Media Access Control Layer, MAC) und die *logische Sicherungsschicht* (Logical Link Control Layer, LLC). Durch diese Aufteilung wird eine Entkopplung des technologiespezifischen Teils der unterschiedlichen Lokalen Netze erreicht. Unabhängig von dem verwendeten Zugriffsprotokoll stellt die logische Sicherungsschicht für alle Lokalen Netze dieselben Dienste, in Form dreier Dienstklassen, für die höheren Schichten bereit [78]:

- einen *verbindungslosen Dienst* (LLC Typ 1), der Protokolldateneinheiten (PDUs) ohne Quittung und ohne Flußsteuerung und Fehlerkontrolle übermittelt,
- einen *verbindungsorientierten Dienst* (LLC Typ 2), der eine virtuelle Schicht 2-Verbindung unterhält und die einzelnen PDUs über diese Verbindung flußgesteuert übermittelt,
- einen *quittierten, aber verbindungslos arbeitenden Dienst* (LLC Typ 3), der den sicheren Empfang quittiert und eine Reihenfolgesicherung der einzelnen Protokoll dateneinheiten sicherstellt.

Die Vermittlungsschicht hat innerhalb eines Lokalen Netzes keine Funktion, da aufgrund der dezentralen Kanalzugriffssteuerung bereits eine Adressierung auf der MAC-Schicht durchgeführt wird, d.h. die Schicht 2a erbringt bereits die Funktionalität der Verkehrslenkung. Soll jedoch eine Kopplung des LANs mit anderen Netzen erfolgen, ist eine einheitliche Schnittstelle zur Transportschicht zu garantieren. Bei der Kopplung heterogener Netze ist hierbei besonders eine Umsetzung von verbindungslosen auf verbindungsorientierte Dienste zu gewährleisten, deshalb unterteilt man die Vermittlungsschicht in 3 Teile:

- *Teilnetzzugangsschicht* (Subnetwork Access Layer); sie stellt den teilnetzspezifischen Dienst der Vermittlungsschicht zur Verfügung,
- *Teilnetzkonvergenzschicht* (Subnetwork Enhancement Layer); sie stellt die Funktionalität bereit, um die teilnetzspezifischen Dienste gegenüber den Instanzen der Netzübergangsschicht zu verdecken, damit ein teilnetzunabhängiger, einheitlicher Vermittlungsdienst existiert,
- *Netzübergangsschicht* (Subnetwork Interconnection Layer); sie übernimmt die Aufgabe des globalen Vermittlungsdienstes, d.h. die systemweite Adressierung und Verkehrslenkung.

Im Rahmen dieser Terminologie kann ein Lokales Netz als Teilnetz (Schicht 1 bis 3a) aufgefaßt werden. Bild 2.4 zeigt die für Lokale Netze relevanten Schichten; dabei wird ersichtlich, daß lediglich die Schichten 1 und 2a technologieabhängig sind. Entsprechend sind für diese Schichten unterschiedliche Medienzugriffsprotokolle international genormt worden bzw. befinden sich in der Normung.

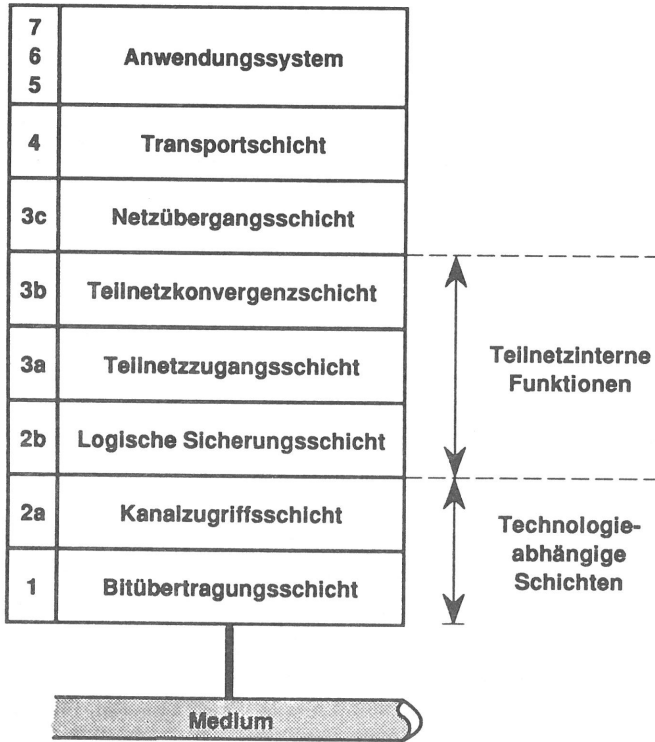


Bild 2.4: Einbindung Lokaler Netze in das OSI-Referenzmodell

2.1.3 Technologie

Unterschiedliche Technologien bedingen verschiedene Ausprägungsformen bei Lokalen Netzen. Der Begriff Technologie umfaßt dabei die Bereiche Übertragungstechnik, Übertragungsmedium, Topologie und Medienzugriffsverfahren. In den letzten Jahren sind eine Reihe von Veröffentlichungen über die unterschiedlichen Netztopologien und Netzzugangsprotokolle erschienen (vgl. hierzu [21,28,52,67,63,149,151,158,160]), so daß im Rahmen dieses Kapitels nur die grundsätzlichen Aspekte genannt werden.

Als Übertragungsmedien werden bei Lokalen Netzen neben verdrehten Kupferleitungen und Koaxialkabeln in zunehmendem Maße Glasfaser-Übertragungsstrecken eingesetzt. Verdrehte Kupferleitungen finden nur bei niederen bis mittleren Datenraten (bis 4 Mbit/s) Einsatzgebiete, da sie besonders störempfindlich sind. Im Bereich der Lokalen Netze ist die Koaxialverkabelung am gebräuch-

lichsten, da sie bei hohen Datenraten gute Übertragungseigenschaften bietet und eine große Anzahl von Stationen an ein Koaxialsegment anschließbar ist. Glasfaserstrecken sind besonders für sehr hohe Datenraten (>100 Mbit/s), große Entfernungen und bei hohen Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit geeignet [10,87,154]. Dagegen ist bei Lichtwellenleitern die Realisierung von Vielfachzugriffsprotokollen problematisch.

In Lokalen Netzen werden die Daten bitseriell übertragen, wobei man zwischen der *Basisbandübertragung* und der *Breitbandübertragungstechnik* unterscheidet. Bei der Basisbandübertragung werden die digitalisierten Signale direkt über das Medium übertragen. Um eine möglichst gute Taktrückgewinnung bei den Empfangsstationen zu erreichen, wird der sogenannte *Manchester-Kode* [114] als Leitungskodierverfahren eingesetzt. Zur Übertragung gleichstromfreier Signale wird eine modifizierte Leitungskodierung, die *Differential Manchester Kodierung*, angewendet [69,70].

Die Breitbandtechnik setzt eine Modulation der zu übertragenden Nachricht mit einem Trägersignal voraus. Damit können mit Hilfe der Breitbandtechnik mehrere unterschiedliche Datenströme (z.B. mehrere LANs) auf verschiedenen Frequenzbändern über eine Breitbandstrecke übertragen werden [70].

Neben den Übertragungstechnischen Realisierungen bei Lokalen Netzen spielt die Topologie eine wichtige Rolle. Durchgesetzt haben sich Bus-, Ring- und Sternstrukturen, da diese Netztopologien bezüglich den Anforderungen an hohe Bandbreite, begrenzte geografische Ausdehnung und leichte Erweiterbarkeit kostengünstiger sind als vermaschte Netzstrukturen. Die gewählte Topologie eines Lokalen Netzes hat auch immer einen Einfluß auf das verwendete Kanalzugriffsprotokoll [143,151].

Bei einer *sternförmigen Netztopologie* (Bild 2.5a) sind alle Stationen direkt mit einer *Zentralstation* verbunden. Mögliche Kanalzugriffsprotokolle sind dabei so spezifiziert, daß diese *Zentralstation* die Vermittlungsfunktion wahrnimmt und den Übertragungskanal einzelnen Stationen zuteilt [50,140]. Der Nachteil solcher Sternstrukturen liegt in einer möglichen Überlastung der *Zentralstation*, die dann zum Engpaß wird, oder gar einem Ausfall der *Zentralstation*, was zu einem netzweiten Zusammenbruch aller Kommunikationsbeziehungen führt.

Ringtopologien (Bild 2.5b) zeichnen sich durch gerichtete Punkt-zu-Punkt-Verbindungen zwischen benachbarten Stationen aus. Die einzelnen Stationen sind aktiv an den Ring gekoppelt, d.h. jede Station übernimmt eine Signalregeneration, so daß in aller Regel keine zusätzlichen Signalverstärker auf den Übertragungsstrecken benötigt werden. Bei Ausfall einer Station kann mittels eines speziellen By-Pass-Relais die Station überbrückt werden [20,37,110], oder es werden *Doppel-*

ringstrukturen eingesetzt (Bild 2.5c), um einen Betrieb auch bei Ausfall einer Station noch zu garantieren [135,136].

Bus- bzw. Baumtopologien sind durch den passiven Anschluß der Stationen an das Übertragungsmedium gekennzeichnet. Die Verbindungscharakteristik läßt sich als Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindung (Broadcast) beschreiben. Jede sendende Station gibt ihre Nachricht auf das Medium, alle anderen Stationen hören mit und kopieren die Nachricht in ihren eigenen Empfangsspeicher, falls die Nachricht für sie bestimmt ist. Wird auf der Bustopologie der Nachrichtenaustausch mittels Basisbandtechnik realisiert, sind bezüglich Übertragungsbandbreite und Netzausdehnung Grenzen gesetzt [69,146]. Der eigentliche Nachrichtenfluß ist bidirektional, d.h. eine Nachricht breitet sich in

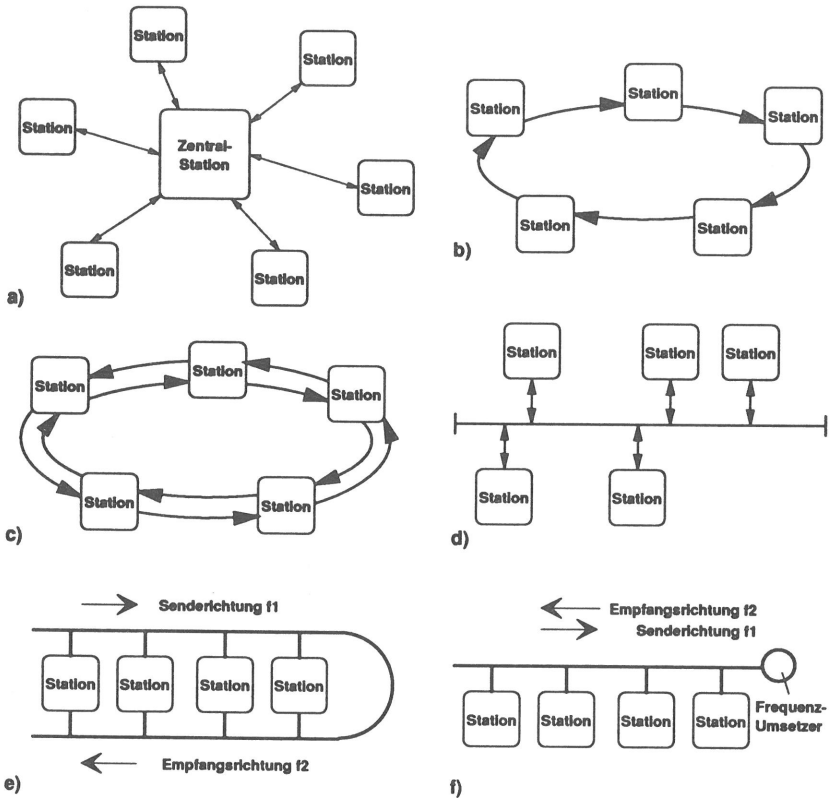


Bild 2.5: Topologien bei Lokalen Netzen

- a) Sternstruktur
- b) Ringstruktur
- c) Doppelringstruktur
- d) Busstruktur
- e) Doppelbusstruktur
- f) Breitbandbusstruktur

Richtung beider Leitungsenden aus (Bild 2.5d). Neuere Entwicklungen bei Lokalen Netzen werden für höhere Bandbreiten und größere Entfernungen konzipiert und setzen deshalb Breitbandübertragungstechniken ein [49,103,121]. Der Nachrichtenfluß ist dadurch unidirektional, was zu modifizierten Bus- bzw. Doppelbusstrukturen (Bild 2.5e, 2.5f) führt, um weiterhin eine vollkommene Erreichbarkeit aller angeschlossenen Stationen zu garantieren.

Bei Lokalen Netzen wird das gemeinsame Übertragungsmedium durch Steuereinrichtungen in den Stationen (MAC-Schicht) verwaltet. Die dabei verwendeten Zugriffsverfahren lassen sich in *Konkurrenz-, Zuteilungs- und Kanalmultiplexverfahren* einteilen (Bild 2.6) [52,91,138]. Diese Kanalvergabeverfahren können sowohl zentral als auch dezentral eingesetzt werden.



Bild 2.6: Klassifizierung der Kanalzugriffsverfahren

Bei den *Konkurrenzverfahren* belegt eine Station sofort den freien Kanal, sobald ein Sendewunsch vorliegt. Da die Stationen, aufgrund endlicher Signallaufzeiten, nur einen bedingten Überblick über den gesamten Systemzustand haben, können Konfliktfälle (Kollisionen) auf dem Übertragungskanal entstehen. Deshalb muß ein probabilistisches Verfahren (Back-off-Algorithmus) oder ein deterministisches Verfahren zur Auflösung von Kollisionsfällen eingesetzt werden [146].

Bei den *Kanalmultiplexverfahren* legt eine zentrale Station statisch oder dynamisch fest, welche Station im Zeitmultiplex welchen Teil der Übertragungsbandbreite zugeteilt bekommt.

Die *Zuteilungsverfahren* arbeiten ebenso wie die Kanalmultiplexverfahren prinzipiell kollisionsfrei. Die Zuteilung des Übertragungskanals unterscheidet sich bei zentraler Steuerung durch Aufruf (Polling) [37], bei dezentraler Steuerung durch eine explizite Sendeberechtigung, die umläuft

(Token Passing) [37,110], durch Einsetzen einer Nachricht bei gleichzeitiger kurzer Zwischenspeicherung des Datenstroms (Register Insertion) [61] oder durch eine synchrone Zeitrasterung des Kanals, um die einzelnen Zeitschlitze individuell oder für die gesamte Dauer einer Verbindung zuzuteilen (Empty Slot Allocation) [3]. Die Reihenfolge, in der die Kanalzuteilung erfolgt, ist dabei i.a. zyklisch über alle Stationen verteilt. Den Kanalzuteilungsverfahren können zusätzlich noch Prioritätssteuermechanismen überlagert werden, um Stationen [148] oder Nachrichten [20] zu bevorzugen.

2.1.4 Standardisierung

Voraussetzung für eine Kommunikation in heterogenen Systemen ist eine stabile internationale Normung. Ausgehend von dem OSI-Referenzmodell (siehe Kap. 2.1.2) begann der Standardisierungsprozeß Lokaler Netze Anfang der Achtziger Jahre in verschiedenen Standardisierungsgremien. Im IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) und in der ECMA (European Computer Manufactures Association) wurden für verschiedene Kanalzugriffsverfahren die Bitübertragungsschicht und die MAC-Teilschicht definiert und von ISO (International Organization for Standardization) als Grundlage entsprechender ISO-Standards übernommen [81,82,83]. Die Funktionen der Schicht 2b (LLC-Sub-Layer) sind in einer weiteren eigenständigen Norm von den entsprechenden Gremien definiert worden [40,80].

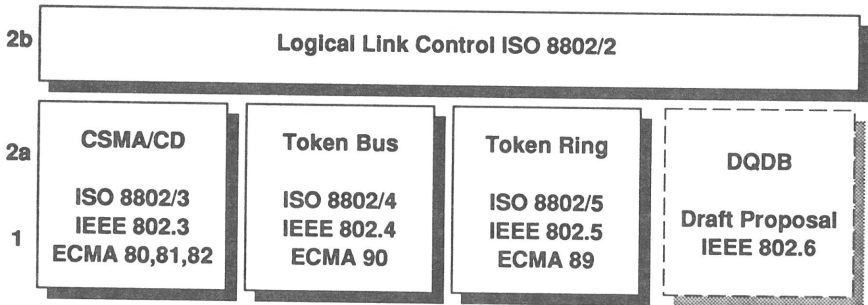


Bild 2.7: Stand der LAN-Normung

Die bisherigen Standards für Lokale Netze spezifizieren Übertragungsraten bis zu 16 Mbit/s. Neuere Entwicklungen auf dem LAN-Sektor setzen 100 Mbit/s und mehr als Übertragungsraten ein. So arbeitet momentan die Arbeitsgruppe IEEE 802.6 an einem weiteren Standard für ein neues Zugriffsprotokoll (Distributed Queue Dual Bus Metropolitan Area Network, DQDB), das auf einer Doppelbustopologie mit 150 Mbit/s Übertragungsrate basiert [72]. Bei ANSI (American National Standards Institute) wurden 1988 die Schichten 1 und 2a für ein tokengesteuertes Doppellingsystem

auf Lichtwellenleiterbasis, FDDI (Fiber Distributed Data Interface), mit einer Übertragungsrate von 100 Mbit/s standardisiert [4].

Die Standardisierungsaktivitäten für die Vermittlungs- und Transportschicht bei Lokalen Netzen versuchen soweit wie möglich, auf bereits bestehende Protokolle zurückzugreifen. Um in der Transportschicht einen verbindungsorientierten Dienst zu erbringen, ist das ISO-Transportprotokoll Klasse 4 vorgesehen [77]. Auf der Vermittlungsschicht kann ein verbindungsloser [79] oder ein verbindungsorientierter Vermittlungsdienst gemäß ISO 8072 [76] erbracht werden.

2.2 Anforderungen paketierter Sprachübertragung

Eine interaktive Sprachverbindung zeichnet sich durch einen kontinuierlichen Datendurchsatz aus und erfordert gleichzeitig kurze Übertragungszeiten. Wird zwischen den Sprachein- und -ausgabegeräten ein paketvermittelndes (Lokales) Netz als Übermittlungssystem eingesetzt, hat dies Auswirkungen auf die geforderte Dienstgüte der Sprachübertragung:

1. Es wird bei paketorientierter Übertragung die Information senderseitig digitalisiert und in Pakete zusammengefaßt, was zu einem Anstieg der Laufzeit führt;
2. Es wird bei der, für paketvermittelnde Netze typischen, asynchronen Zeitmultiplex-technik die Übertragungszeit jedes Paketes um eine stochastische Wartezeit verlängert;
3. Es wird die Sprachpaketübertragungszeit durch die lastabhängige Übermittlungszeit in paketorientierten Netzen beeinflusst, d.h. durch neue Verbindungen können bereits bestehende Sprachverbindungen beeinflusst werden.

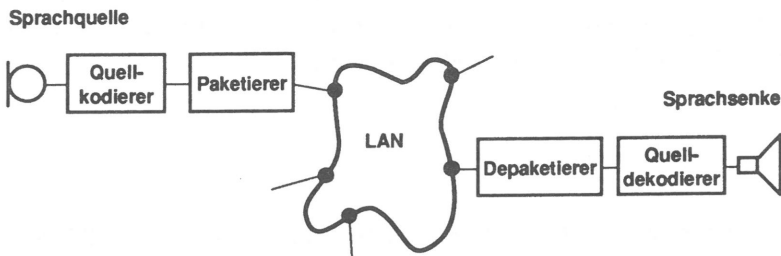


Bild 2.8: Funktionsblöcke einer paketierten Sprachübertragungsstrecke

In Bild 2.8 sind die funktionalen Blöcke einer Sprachübertragungsstrecke über ein Lokales Netz dargestellt. Das von der Sprachquelle generierte Signal wird senderseitig quellkodiert, paketierte und über das Lokale Netz zur Empfangsstation übermittelt. Die Empfangsstation hat die Aufgabe, eintreffende Sprachpakete zu "depaketieren", d.h. die stochastischen Laufzeitschwankungen aufeinanderfolgender Pakete auszugleichen, damit der Quelldekodierer synchron zum Quellkodierer die übertragene Sprachinformation zurückwandeln kann.

Um die Anforderungen nach hohem Durchsatz und gleichzeitiger kurzer Übertragungszeit von Sprachpaketen zu garantieren, sind in den einzelnen Funktionseinheiten Maßnahmen zur Laufzeitoptimierung und Durchsatzreduktion zu berücksichtigen.

2.2.1 Aufgaben der Sprachpaketier-Einheit

2.2.1.1 Sprachkodierung

Die Übertragung von Sprachinformation in paketierte Form setzt eine Digitalisierung der Sprache voraus. Die Vorteile einer digitalen Sprachübertragung sind vor allem in der Integration von Sprach- und Datenkommunikation in einem Vermittlungsnetz zu sehen. Neue Bereiche, wie Voice-Mail-Anwendungen, Auskunftsdienste oder sprachunterstützte Teledienste (z.B. Dokumententransfer mit Sprachanmerkungen) sind aufgrund der einfachen Speicherung und Verarbeitung digitaler Sprachinformationen im Entstehen [108].

Heutzutage wird in digitalen Vermittlungssystemen zur Sprachübertragung das vom CCITT (Comité Consultatif International Télégraphique et Téléphonique) genormte Puls-Code-Modulations-Format (CCITT-PCM) als Kodierverfahren eingesetzt [24]. Das Sprachsignal wird mit einer Abtastrate von 8 kHz und 8 bit pro Abtastwert quantisiert, wobei eine Komprimierung vorgenommen wird. Dieses PCM-Verfahren eignet sich auch sehr gut für andere Analogsignale (Modem- oder Signalisiertöne) und ist robust gegenüber Übertragungsfehlern; so werden Bitfehlerraten des Übertragungskanal bis zu 10^{-4} subjektiv toleriert, und erst ab einer Bitfehlerrate von 10^{-3} ist eine Sprachübertragung nicht mehr möglich [11,122].

2.2.1.2 Bitratenreduktion

Eine Sprachintegration in Lokalen Netzen auf der Basis des standardisierten CCITT-PCM-Verfahrens hat den Nachteil, daß für eine Duplex-Sprachverbindung eine Bandbreite von 128 kbit/s benötigt wird. Pro Sprachverbindung fallen somit kontinuierlich Datenmengen über längere Zeiten an,

die bei mehreren Verbindungen zur Überlast des LANs führen. Durch eine Bitratenreduktion kann das anfallende Datenvolumen bei nahezu gleicher Sprachqualität gedrosselt werden.

Obwohl für das öffentliche ISDN-Netz eine Sprachkodierung nach dem CCITT-PCM-Standard mit 64 kbit/s festgelegt wurde, gibt es für spezielle Anwendungen (Satelliten- bzw. Funkübertragungsstrecken) andere Kodierverfahren. Das CCITT hat ein Kodierverfahren mit adaptiver Prädiktion und rückwärtsgesteuerter adaptiver Quantisierung standardisiert, das eine Datenrate von 32 kbit/s generiert (CCITT-ADPCM [25]). Bemerkenswert an diesem ADPCM-Verfahren ist zum einen seine Transkodiereigenschaft, d.h. es ist ein nahezu quantisierungsfehlerfreier Übergang auf digitalem Wege von ADPCM auf PCM und vice versa möglich, zum anderen besitzt dieses ADPCM-Verfahren eine große Robustheit gegenüber Kanalstörungen; so sind Bitfehlerraten von 10^{-2} subjektiv noch tolerierbar [122].

Stand der heutigen Kodiertechnik ist, Telefonsprachqualität mit einer Kodiertrate von 16 kbit/s zu realisieren. Mögliche Anwendungsgebiete sind dabei:

- Mobilfunk (16 kbit/s Funkübertragungsstrecken zwischen Endteilnehmern und Vermittlungsstelle)
- Bildtelefonie im ISDN (48 kbit/s Videosignal- und 16 kbit/s Sprachsignalbandbreite)
- Sprachspeichersysteme
- Sprachauskunftsdienste.

Das CCITT beschäftigt sich augenblicklich mit den Anforderungen, die entsprechende Kodierverfahren für diese Anwendungen erfüllen müssen, um einen einheitlichen Standard für ein 16 kbit/s-Sprachkodierverfahren zu definieren [32].

Weitere Möglichkeiten der Bitratenreduktion sind Transformations- und Teilbandkodierverfahren, die es ermöglichen, die Sprachkodiertrate auf 4 - 8 kbit/s und mit Vocodertechniken sogar bis auf 600 bit/s zu reduzieren [6,11,35,43,64,122,127,142]. Diese Verfahren erlauben eine Sprachkodierung mit variabler Bitrate, die von der Teilnehmerendeinrichtung [159,161] oder von einzelnen Netzknoten [88] gesteuert werden kann. Die subjektive Sprachgüte dieser Verfahren kann bis zu Bitfehlerraten von 10^{-3} durch geeignete Maßnahmen (z.B. Fehlersicherung der Transformationskoeffizienten) sichergestellt werden.

Durch die augenblicklichen Aktivitäten auf dem Gebiet der Bildkodierung werden die Sprachkodierverfahren um neue Vorschläge und Optimierungsverfahren erweitert. Leider zeichnet sich bis jetzt, aufgrund der vielfältigen Bitratenreduktionsverfahren, kein einheitlicher Standard ab.

2.2.1.3 Sprachpausenerkennung

Eine Reduktion des Sprachdatenvolumens ist durch eine Quantisierung (Abschneiden der nicht relevanten Nachrichtenteile) und eine Redundanzminderung durch Filterung des Sprachsignals möglich (siehe Kap. 2.2.1.2). Eine Verringerung des Sprachdatenvolumens kann auch dadurch erfolgen, daß Pausen im Sprachsignal erkannt und diese nicht übertragen werden. Die Detektion von Sprachpausen stellt dabei eine besondere Art der Quantisierung dar. Die Effizienz der Sprachpausenreduktion hängt sehr stark von der Einstellung des Sprachdetektors ab; ist dieser z.B. zu empfindlich eingestellt, ist die Effizienz der Sprachpausenreduktion verschwindend klein.

2.2.1.3.1 TASI

Bereits Anfang der Sechziger Jahre wurden Sprachdetektoren in sogenannten TASI-Systemen (Time Assignment Speech Interpolation) eingesetzt [16]. Bei TASI-Systemen werden N Sprachkanäle auf M Übertragungskanäle ($M < N$) konzentriert. Die auftretenden Sprachpausen werden durch Sprachdetektoren erkannt, und das TASI-System teilt dynamisch nur denjenigen Sprachkanälen einen Übertragungskanal zu, die augenblicklich aktiv sind. Da die mittlere Sprachaktivität (Definition siehe Kap. 3.1.1) bei jedem Sprachkanal typischerweise bei 40% liegt, kann auf diese Weise eine Überbuchung der abgehenden Übertragungskanäle um mehr als das Doppelte erreicht werden [13,39], da die Sprachaktivitäten der einzelnen Kanäle voneinander unabhängig sind und mehrere Sprachkanäle betrachtet werden ($N = 72$ Gespräche, $M = 36$ Transatlantik-Verbindungen [16]).

Digitales TASI wird auch als *Digitale Sprachinterpolation* (DSI) bezeichnet [39] und erlaubt im Gegensatz zum analogen TASI das kurzzeitige Zwischenspeichern einzelner Sprachkanäle. Dadurch lassen sich TASI-Gewinne (Verhältnis N Sprachkanäle zu M Übertragungskanäle) von 1,5 bereits bei 6 Übertragungskanälen erzielen [13].

Da TASI-Systeme die stochastischen Eigenschaften der Sprecheraktivität ausnützen, kann es zu Überlastsituationen kommen, wenn gleichzeitig mehr Sprachkanäle aktiv sind als Übertragungskapazität zur Verfügung steht. Für DSI-Systeme, die bei paketierter Sprachübertragung relevant sind, können in solchen Überlastfällen drei Verfahren bzw. Kombinationen der Verfahren eingesetzt werden:

- Verwerfen von Sprachabstastwerten; dabei wird der erste Teil eines sogenannten Sprachblocks abgeschnitten (Zugriffs-Clipping, Freeze-Out, siehe Bild 2.9b),

- Reduktion der Bitrate während der Überlastsituation; dabei wird z.B. von einer 8 bit-PCM auf eine 4- bzw. 3 bit-ADPCM umgeschaltet, um die anfallenden Sprachdatensmengen der einzelnen Kanäle zu drosseln,
- Zwischenspeicherung von Sprachblöcken, bis Kapazität auf den Übertragungskanälen wieder verfügbar ist (Bild 2.9c).

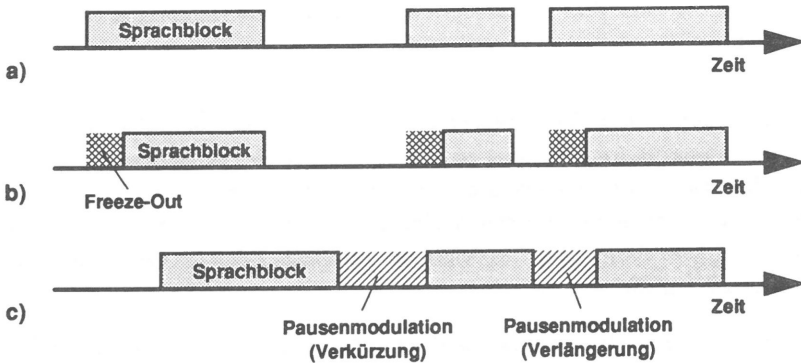


Bild 2.9: Sprachblockänderungen durch Einflüsse des DSI

a) Originalverlauf

b) Verwerfen von Sprachabstastwerten

c) Zwischenspeicherung der Sprachblöcke

Jedes dieser Verfahren führt jedoch zu Verzerrungen des ursprünglichen Sprachsignals, sei es durch Verluste von Sprachabstastwerten oder durch Modulation der Pausendauern durch Zwischenspeicherung.

Bei paketierter Sprachübertragung unter Ausnutzung der Sprachpausenreduktion tritt nur die variable Verzögerung der Sprachblöcke auf, da Sprachblöcke zwischengespeichert werden, bis wieder Kanalkapazität verfügbar ist. Dies führt zu einer Modulation der Pausenlängen. Die subjektive Wirkung dieser *Pausenmodulation* (Gap Modulation) hängt in starkem Maße von den Sprach- und Pausenblocklängen ab. Pausenänderungen zwischen einzelnen Worten bzw. Sätzen werden kaum als störend empfunden, wohingegen Pausenmodulationen zwischen Wortsilben als äußerst störend empfunden werden [15,58,60]. Abhilfe schafft eine künstliche Verlängerung der Sprachblocklänge (siehe Kap. 3.1.1). Damit sinkt die Sprachpaketrate und somit die Wahrscheinlichkeit für eine Pausenmodulation zwischen Wortsilben. Auf der anderen Seite steigt damit die Sprachaktivität an, und es sinkt der erzielbare TASI-Gewinn.

2.2.2 Aufgaben der Sprachdepaketier-Einheit

Das Gegenstück zur Sprachpaketier-Einrichtung ist die Sprachdepaketier-Einrichtung. Ihre primäre Aufgabe besteht darin, einen kontinuierlichen Sprachdatenstrom aus den einzelnen Sprachpaketen, die über das LAN übertragen wurden, zu rekonstruieren. In Lokalen Netzen wird zwar die Reihenfolge der übertragenen Pakete immer beibehalten, aber es besteht i.a. keine Synchronisation zwischen dem Absenden eines Paketes beim Sprachpaketierer und dem Empfang des Paketes beim Sprachdepaketierer.

Empfängt die Sprachdepaketier-Einheit ein Paket, wird dieses gemäß dem gewählten Quellkodierverfahren in ein analoges Ausgangssignal zurückgewandelt und über ein Sprachausgabegerät ausgespielt. Sobald das Sprachpaket vollständig beim Empfänger ausgespielt ist, muß das nächste Sprachpaket beim Sprachdepaketierer eingetroffen sein, anderenfalls tritt eine Unterbrechung des kontinuierlichen Sprachflusses beim Empfänger auf. Für diesen Fall kann die Sprachdepaketier-Einheit auf zwei Arten reagieren:

- das zu spät eintreffende Sprachpaket wird verworfen (Sprachpaketverlust); die Sprachdepaketier-Einheit muß dann jedoch intern das fehlende Sprachpaket geeignet ersetzen,
- das zu spät eintreffende Paket wird sofort ausgegeben; es entsteht eine Lücke im Sprachfluß.

Um diese Sprachpaketverluste bzw. Lücken zu minimieren, besitzt die Sprachdepaketier-Einheit einen Speicher, in dem eintreffende Sprachpakete zwischengespeichert werden, bis sie dekodiert und ausgespielt werden.

Bei paketierter Sprachübertragung mit Sprachpausenreduktion muß die Sprachdepaketier-Einrichtung zusätzlich noch sicherstellen, daß keine Pausenänderungen beim Empfänger entstehen. Pausenänderungen können auftreten, wenn die jeweils ersten Sprachpakete zwei aufeinanderfolgender Sprachblöcke unterschiedliche Laufzeiten besitzen.

2.2.2.1 Synchronisationsverfahren

Die bei paketierter Sprachübertragung in Lokalen Netzen auftretenden Verzögerungszeiten sind in Bild 2.10 dargestellt; sie sollen der Begriffsklärung und zur Definition der im folgenden häufig verwendeten Größen dienen. Betrachtet wird dabei der zeitliche Ablauf einer Sprachpaketübermittlung vom Eintreffen des ersten Sprachabtastwertes beim Sender bis zum Beginn des Ausspielens dieses Abtastwertes beim Empfänger.

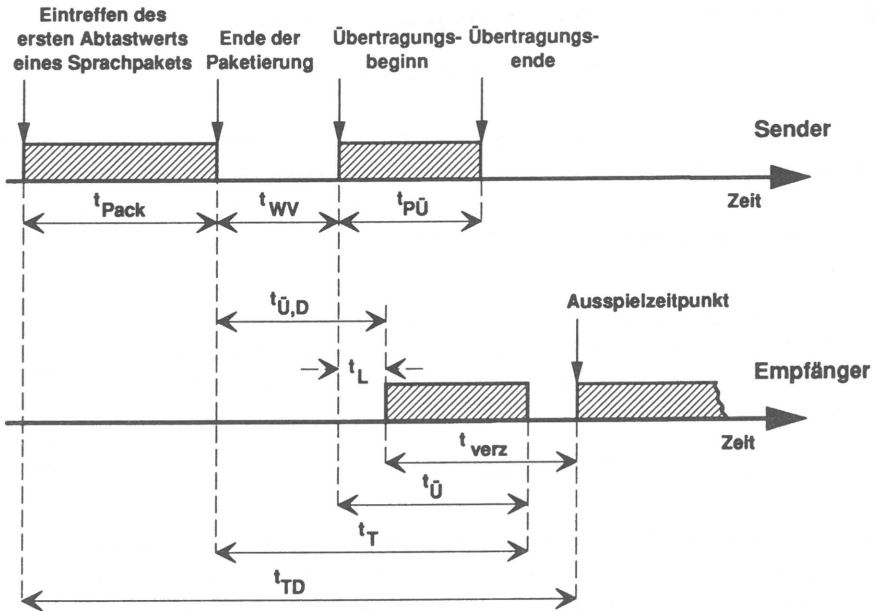


Bild 2.10: Zeitlicher Verlauf einer Sprachpaketübermittlung über ein paketvermittelndes Netz

Im Depaketierer müssen Laufzeitunterschiede einzelner Sprachpakete ausgeglichen werden, um einen synchronen Sprachfluß beim Empfänger zu gewährleisten. Damit eine verzerrungsfreie Sprachdepaketierung möglich wird, muß jedes beim Depaketierer eintreffende Sprachpaket um eine Zeit t_{verz} zwischengespeichert werden und kann erst nach einer konstanten Zeit t_{TD} bezogen auf den Zeitpunkt der Sprachpaketgenerierung ausgegeben werden. Die Verzögerungszeit t_{verz} muß dabei größer oder gleich dem Maximum der Übermittlungsverzögerung $t_{\ddot{U},D}$ durch das Lokale Netz sein. Im allgemeinen besitzt der Depaketierer keine Kenntnis über den Zeitpunkt der Paketgenerierung und muß deshalb das erste eintreffende Paket um $t_{\ddot{U},Dmax}$ verzögern. Alle weiteren eintreffenden Pakete werden jeweils nach der Paketierungszeit t_{Pack} ausgegeben. Die Gesamtverzögerung t_{TD} ergibt sich aus der Paketierungszeit t_{Pack} , der maximalen Übermittlungsverzögerung $t_{\ddot{U},Dmax}$ durch das Lokale Netz und der Zeit t_{verz} zu

$$t_{TD} = t_{Pack} + t_{\ddot{U},Dmax} + t_{verz} \quad (2.1)$$

mit

$$t_{verz} = t_{\ddot{U},Dmax} \quad (2.2)$$

als obere Schranke. Als maximale Gesamtverzögerung ergibt sich dann

$$t_{TD} = t_{Pack} + 2t_{\ddot{u},Dmax} \quad (2.3)$$

Wird eine reine 4 Draht-Verbindung zwischen den Teilnehmern garantiert, kann eine Gesamtverzögerung in einer Sprachrichtung von bis zu 150 ms toleriert werden [122,161], ansonsten sollte die Gesamtverzögerung 40 ms nicht überschreiten, oder es müssen zusätzlich aufwendige Echo-kompensationsverfahren angewendet werden [23,36,59].

Die Gesamtverzögerung kann verkürzt werden, wenn der Depaketierer den Zeitpunkt der Paketgenerierung kennt. Diese Information kann im Paketkopf der Sprachpakete mit übertragen werden oder durch Messung bzw. Abschätzungen der Paketlaufzeiten durch das Netz geschehen. Die Gesamtverzögerung ergibt sich dann zu

$$t_{TD} = t_{Pack} + t_{\ddot{u},Dmax} \quad (2.4)$$

Die Synchronisation von Sprachpaketierer und Depaketierer über die Laufzeitinformation der Sprachpakete führt zu einer Reduktion der Gesamtverzögerungszeit, erfordert jedoch einen erhöhten Steuerungsaufwand. Verschiedene Synchronisationsverfahren sind in [9,116,122] zu finden. In Lokalen Netzen und auch für zukünftige ATM-Netze werden jedoch keine Synchronisationsmechanismen zwischen Sprachpaketierer und Depaketierer eingesetzt.

2.2.2.2 Paketverluste

Pakete werden beim Sprachdepaketierer verworfen, wenn die Übermittlungsverzögerung des Pakets größer als eine vorgegebene Zeit t_D ist. Alle anderen Pakete werden zwischengespeichert und nach der Zeit t_D ausgegeben. Damit läßt sich die Gesamtlaufzeit der Sprachpakete auf den Wert t_D beschränken. Ist die Schranke t_D kleiner als die maximale Gesamtverzögerung t_{TD} , treten Paketverluste auf (Bild 2.11). Treffen beim Sprachdepaketierer mehr Sprachpakete ein als der Zwischenspeicher momentan aufnehmen kann (z.B. nach einer Netzüberlastsituation), treten ebenfalls Paketverluste auf.

Im allgemeinen ist jedoch nur der Ankunftszeitpunkt des Pakets im Sprachdepaketierer bekannt, deshalb wird das erste Paket um t_D verzögert, die nachfolgenden Pakete werden dann entsprechend dem Zeitraster des Paketierers um t_{Pack} verzögert; Paketverluste sowie Pausenänderungen sind die Folge (Bild 2.12).

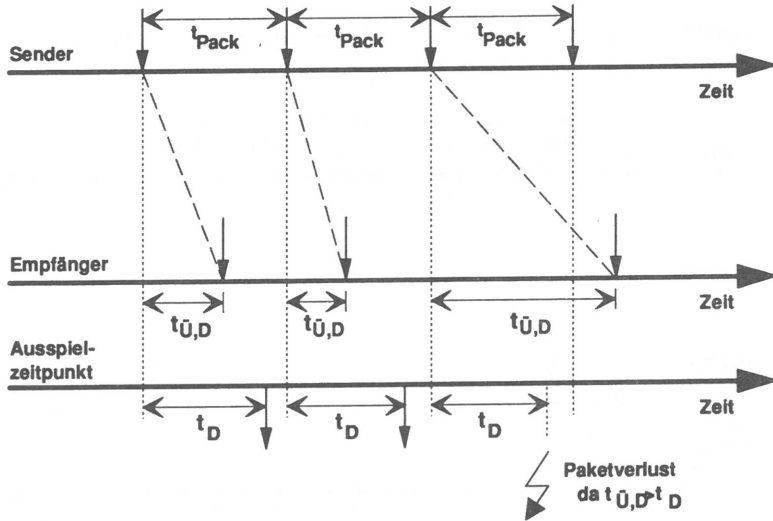


Bild 2.11: Sprachpaketverluste durch Beschränkung der Gesamtlaufzeit

Sprachpaketverluste führen zu einer Verschlechterung der Sprachqualität. Die subjektive Sprachqualität ist stark abhängig von der gewählten Paketlänge und der Paketverlustrate (Verhältnis von verworfenen Paketen zur Gesamtzahl aller Pakete). Verluste bei kleinen Paketlängen (<16 ms) führen zu Knackgeräuschen, während Verluste von längeren Paketen (>64 ms) zu Silben- bzw. Wortverlusten führen [60,85].

Die subjektive Beurteilung der Sprachqualität bei auftretenden Sprachpaketverlusten hängt auch davon ab, ob die Verluste am Beginn eines Sprachblocks (Front-End-Clipping, FEC) oder in der Mitte eines Sprachblocks (Midspeech-Clipping, MSC) auftreten [59]. Um keine Einbußen der Sprachqualität zu erhalten, sollten kleine Sprachpaketlängen (<16 ms) gewählt werden, da bei diesen Paketlängen die Sprachpaketverlustrate größer sein darf als bei großen Paketlängen. Eine Verschlechterung der Sprachqualität wird bei Sprachverlustsraten $<0.5\%$ und Sprachpaketlängen <16 ms praktisch nicht wahrgenommen [60,85,122].

Erkennt der Depaketierer das Fehlen eines Sprachpakets, kann er intern die fehlende Sprachinformation ersetzen. Im einfachsten Fall wird anstatt des Sprachpakets eine Nullfolge generiert [85]. Das menschliche Ohr registriert dieses Ersetzungsverfahren subjektiv als Unterbrechung, deshalb werden in der Literatur andere Verfahren vorgeschlagen, wie z.B. das Wiederholen des letzten Paketes oder ein Grundrauschen auszugeben, bis das nächste Sprachpaket beim Depaketierer eintrifft.

Diese Verfahren zeigen bei gesteigerter Sprachpaketverlustrate (10%) subjektiv keine Verschlechterung der Sprachverständlichkeit [119,120].

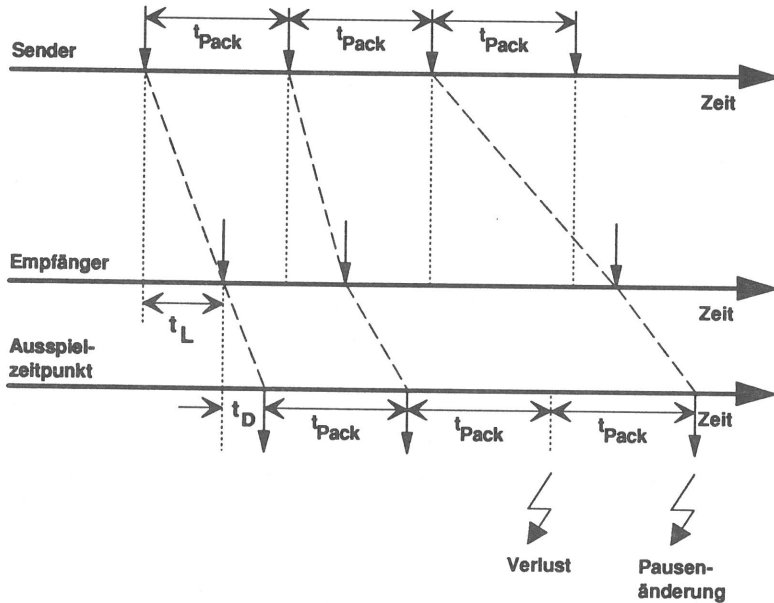


Bild 2.12: Paketverluste und Pausenänderungen bei Verzögerung des ersten Pakets um t_D

2.2.3 Laufzeitbeeinflussende Systemgrößen

Wie in Kap. 2.2.2.1 gezeigt, setzt sich die Gesamtlaufzeit einer paketierten Sprachübertragungsstrecke aus der Bearbeitungszeit im Sprachpaketierer, der Laufzeit durch das Paketnetz und den Verzögerungszeiten im Depaketierer zusammen.

Die Bearbeitungszeit im Sprachpaketierer ergibt sich aus der Verarbeitungszeit des Sprachkodierverfahrens, gegebenenfalls der Verarbeitungszeit des Sprachpausendetektors und der Sprachpaketierzeit. Die Paketierungszeit t_{Pack} ergibt sich aus dem Quotienten der im Sprachpaket enthaltenen Anzahl von Nutzbits L_{PV} und der Quellkodierate Q_V :

$$t_{Pack} = \frac{L_{PV}}{Q_V} \quad (2.5)$$

Zur Gesamtverzögerung kann diese Paketierungszeit einen maßgeblichen Anteil beitragen. Im allgemeinen ist die Quellkodierrate vorgegeben, so daß eine Verringerung von L_{PV} die Paketierungszeit verkürzt. Kurze Pakete reduzieren die Gesamtverzögerungszeit und wirken sich auch positiv bei Paketverlusten aus (siehe Kap. 2.2.2.2).

In paketvermittelnden Netzen muß in jedem Paket zur eigentlichen Information zusätzlich Paketsteuerinformation (Paket-Overhead) mit übertragen werden. Bei LANs liegt diese Steuerinformation im Bereich von 100 - 200 bit. Werden nun kurze Sprachpakete übermittelt, ist das Verhältnis von Steuerinformation zu gesamter Paketlänge groß. Um eine hohe Systemauslastung durch Nutzinformation zu erzielen, müssen lange Sprachpakete gefordert werden, dem gegenüber sollte aus Gründen der Paketverluste und der maximal zulässigen Gesamtverzögerung die Sprachpaketlänge möglichst klein gewählt werden. Aus diesen beiden gegenläufigen Forderungen ergibt sich ein Optimum für die Sprachpaketlänge, die im wesentlichen durch die Systemparameter Quellkodierrate, Gesamtlaufzeit, Paket-Overhead und Netzauslastung bestimmt werden. In einem paketvermittelnden System für reine Sprachübertragung wurde, unter stark vereinfachenden Annahmen, eine optimale Sprachpaketlänge zwischen 300 bis 700 bit ermittelt [115].

Die Paketlaufzeit durch das Netz setzt sich aus der konstanten physikalischen Laufzeit und den Bearbeitungszeiten in den Paketvermittlungsknoten zusammen. Betrachtet man LANs, so tritt neben der physikalischen Laufzeit im wesentlichen nur noch eine senderseitige Wartezeit auf, bis dem Sprachpaket die Übertragungskapazität des Übertragungsmediums zugeteilt wird (Access Delay). Die schwankenden Paketlaufzeiten resultieren aus diesen stochastischen Wartezeiten. Besonders problematisch an diesen Wartezeiten ist ihre starke, nichtlineare Abhängigkeit von der Netzauslastung [21], die u.U. bis auf mehrere Sekunden ansteigen kann [34,107].

Um diese Laufzeitschwankungen klein zu halten, können im Paketnetz verschiedene Mechanismen implementiert werden:

- *Netzzugangskontrolle auf Verbindungsebene* (Admission Control); neue Verbindungswünsche werden nur akzeptiert, falls das Netz durch die Annahme der neuen Verbindung nicht in eine Überlastsituation kommt
- *Nachrichtenabhängige Prioritätssteuerung*; Sprachpakete werden gegenüber anderen Datenpaketen bevorzugt bedient, d.h. Sprachpakete können bereits wartende Datenpakete im Netzknoten überholen
- *Lastgesteuerte Sprachpaketunterdrückung*; Sprachpakete, die länger als eine maximale Zeitschranke auf ihre Übertragung warten, werden ganz oder teilweise verworfen.

Kombiniert man die lastgesteuerte Sprachpaketunterdrückung mit geeigneten Sprachkodierverfahren, kann die Sprachkodiertrate adaptiv an die augenblickliche Netzauslastung angepaßt werden (Sprachkodierung mit variabler Bitrate [12,45]). Aus der Literatur sind noch weitere Verfahren bekannt, die eine Flußsteuerung auf Verbindungsebene durchführen und dabei das Sprachkodierverfahren mit Sprachpaketunterdrückungsalgorithmen kombinieren. Es werden dabei die Sprachabstastwerte nach einem vorgegebenen Schema auf verschiedene Sprachpakete unterschiedlicher Priorität aufgeteilt. Die Netzknoten unterdrücken ihrerseits nach diesem Prioritätsschema bestimmte Sprachpakete, der Depaketierer kann aus den empfangenen restlichen Sprachpaketen die im Netz unterdrückten Pakete bedingt rekonstruieren [31,38,85,161].

Für den Einsatz in Lokalen Netzen eignen sich besonders Netzzugangskontrollmaßnahmen sowie Verfahren der nachrichtenabhängigen Prioritätssteuerung. Lastgesteuerte Sprachpaketunterdrückungsverfahren erfordern einen erhöhten Steuerungsaufwand in den Netzknoten und ggf. in der Sende- und Empfangseinheit und sind deshalb nur für große Paketvermittlungssysteme von Bedeutung [88].

Um die Laufzeitschwankungen der einzelnen Sprachpakete durch das Netz ausgleichen zu können, muß der Sprachdepaketierer die empfangenen Sprachpakete variabel verzögern, damit jedes Paket synchron, um die Verzögerungszeit t_{TD} versetzt, beim Empfänger ausgegeben werden kann (siehe Kap. 2.2.2.1).

2.3 Sprachintegrationskonzepte

Aus den oben genannten Anforderungen an eine paketierte Sprachübertragung lassen sich für den Bereich der Lokalen Netze verschiedene Konzeptionen für eine Sprachintegration ableiten. Grundsätzlich sind folgende Konfigurationen zu unterscheiden:

- Sprachkommunikation soll nur innerhalb des Lokalen Netzes erfolgen. Die begrenzenden Systemparameter wie Sprachpaketierzeit bzw. Gesamtverzögerung können aufgrund der lokalen Ausdehnung großzügig dimensioniert werden; notwendige Signalisierprotokolle müssen keinem Standard entsprechen (Bild 2.13a),
- Das Sprachintegrationskonzept soll neben Intern-Verbindungen auch externe Sprachverbindungen ermöglichen. Externe Sprachverbindungen können dabei aus anderen Lokalen Netzen stammen, die über beliebige Transitnetze gekoppelt sind (Bild 2.13b), oder von Teilnehmern bestehender Weitverkehrsnetze (Bild 2.13c). Für den letzteren Fall muß zumindest die Kopplungsstation des Lokalen Netzes die volle Funktionalität des Weitverkehrsnetzes erbringen (Gateway-Funktion).

Erfolgt die Sprachkommunikation über mehrere Netze hinweg, muß für das einzelne Lokale Netz eine möglichst geringe Übertragungszeit gefordert werden, um die obere Grenze der zulässigen Gesamtverzögerungszeit bei paketierter Sprache nicht zu überschreiten. Eine Priorisierung des Sprachverkehrs gegenüber dem Datenverkehr ist daher Grundlage aller in der Literatur bekannten Sprachintegrationskonzepte [26,59,65,124,164].

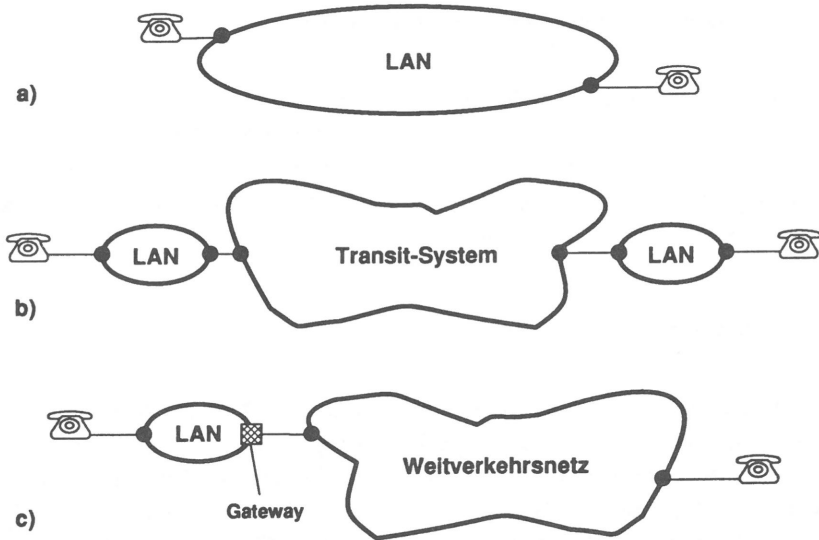


Bild 2.13: Mögliche Sprachverbindungen

- a) Interne Sprachverbindungen;*
- b) Sprachverbindungen zwischen homogenen Netzen über Transitnetze;*
- c) Sprachverbindungen in heterogenen Netzen*

Die Forderung nach Echtzeitfähigkeit bei paketierter Sprachübertragung läßt Flußsteuermechanismen auf Verbindungsebene, wie sie in Datenpaketnetzen (z.B. X.25) eingesetzt werden, als nicht praktikabel erscheinen. Sender und Empfänger arbeiten bei Sprachübertragung i.a. mit derselben Übertragungsrate, so daß eine Flußkontrolle zur Anpassung der Übertragungsgeschwindigkeiten entfallen kann. Per Definition besitzen Lokale Netze geringe Fehlerraten ($<10^{-9}$) und zudem ist die menschliche Sprache sehr robust gegenüber Verlusten, somit kann auf aufwendige Fehlerkorrekturverfahren auf der Übertragungsstrecke verzichtet werden.

Die zur paketierte Sprachübertragung notwendigen Funktionen (Paketierer, Depaketierer) werden in aller Regel in die Endgeräte ausgelagert, somit reduzieren sich die Protokollfunktionen des Transportmediums (Lokalen Netzes) für Sprachübertragung.

2.3.1 Möglichkeiten bei standardisierten Lokalen Netzen

Parallel zu den Bestrebungen, Lokale Netze für Datenanwendungen zu standardisieren, wurden Untersuchungen durchgeführt, in wieweit sich Lokale Netze auch für Sprachübertragung eignen. Die Sprachintegrationskonzepte setzten sich dabei speziell mit den Medienzugriffsprotokollen auseinander und versuchen, durch unterschiedliche Zugriffsberechtigungen für Sprach- bzw. Datenpakete den Anforderungen der jeweiligen Verkehrsklasse gerecht zu werden.

2.3.1.1 CSMA/CD

Bereits Anfang der Achtziger Jahre wurden Modifikationen des CSMA/CD-Zugriffsprotokolls entwickelt, die zusätzlich zur reinen Datenübertragung paketierte Sprachübertragung ermöglichen. Da das CSMA/CD-Zugriffsverfahren (siehe Kap. 3.4.1) ein probabilistisches Zugriffsprotokoll ist, Sprachpakete jedoch deterministisch zur Übertragung anstehen und dies häufig zu Kollisionen führt, basieren die für Sprachintegration modifizierten CSMA/CD-Protokolle auf einer getakteten Zeitmultiplex-Rahmenstruktur [55,86,100,112,117,134].

Um das Datenvolumen der Sprachinformation zu reduzieren und das statistische Multiplexen paketierte Sprache auszunutzen, werden Sprachpausenreduktion [55,100], ADPCM [112], lastabhängige Bitratenkodierung [46] bzw. Vocoder-Techniken [86] vorgeschlagen. Leistungsuntersuchungen von paketierte Sprachübertragung beim CSMA/CD-Zugriffsverfahren wurden unter der Annahme reiner bzw. überwiegender Sprachkommunikation durchgeführt [27,34]. Mittlerweile sind bereits erste kommerzielle Produkte verfügbar, die es erlauben, Telefonapparate über entsprechende Konzentratoren an CSMA/CD-Netzwerke anzuschließen [105].

2.3.1.2 Token-Bus

Die Leistungsfähigkeit von Lokalen Netzen, die nach dem Token-Bus Zugriffsverfahren [82] (siehe Kap. 3.4.2) arbeiten, wurde analytisch [19] und auch simulativ [53] durchgeführt; dabei sind jedoch z.T. einfache Datenmodelle und keine Prioritäten betrachtet worden.

Untersuchungen zur Sprachintegration bei Token-Bus Systemen sind kaum bekannt [1,2,34]. Bei diesen Untersuchungen wurde ADPCM mit Sprachpausenreduktion der Sprachquellen angenommen. Das Verhalten der Übertragungszeit für priorisierte Sprachpakete bei einem nicht standardisierten Token-Bus Protokoll ist außerdem in [1,2] simulativ untersucht worden.

2.3.1.3 Token-Ring

Die Klasse der Lokalen Netze, die nach dem Token Passing-Verfahren arbeiten, ist besonders für paketierte Sprachübertragung geeignet, da für diese Systeme eine obere Schranke der Paketübertragungszeit garantiert werden kann. Vergleichende Untersuchungen [19,33,53] von Token Passing-Protokollen für Bus- bzw. Ringtopologien favorisierten dabei das Token Passing-Zugriffsverfahren basierend auf Ringtopologien.

Ausgehend vom standardisierten Token-Ring Netzwerk [83] (siehe Kap. 3.4.3), das als reine Nebenstellenanlage betrieben werden kann [7] bzw. für eine gemischte Sprach-/Datenkommunikation dimensioniert werden kann [152,153], existieren eine Reihe von Sprachintegrationskonzeptionen für Token-Ring Systeme [96]. Die für eine Sprachübertragung günstige Priorisierung der Sprachpakete (siehe Kap. 2.2.3) erfolgt durch prioritätsabhängige Sendeberechtigungen (Token). Die Prioritätsvergabe kann dabei zentral [18,68,164] oder dezentral [89,90,96] erfolgen.

Neben der reinen Beschreibung des Protokolls zur Sprachintegration auf dem Token-Ring [18] wurden auch Leistungsuntersuchungen der verschiedenen nichtstandardisierten Protokollvarianten durchgeführt. Als Quellmodelle dienten dabei ADPCM-Sprachsignale mit Sprachpausenreduktion [68,96]. Im Bereich der analytischen Untersuchungen zur Sprachintegration bei Token-Ring Netzwerken existieren vereinfachte Verfahren zur Bestimmung der Sprachpaketverzögerungen [89,90,145,162,164] bei priorisierter Sprachpaketübertragung und einige Arbeiten für nicht-priorisierte Sprachübertragung bei Token-Ring Systemen [144,153] und vergleichende Studien mit Lokalen Netzen, die nach dem Slotted Ring bzw. Buffer Insertion-Verfahren arbeiten [124,128].

Vergleichende Untersuchungen oder vergleichbare Studien der drei standardisierten Lokalen Netze CSMA/CD, Token-Bus und Token-Ring auf ihr Verhalten bei gemeinsamer Sprach- und Datenkommunikation sind nicht bekannt. Untersuchungen hierzu finden sich in Kapitel 4 und Kapitel 5.

2.3.2 Spezielle Sprachintegrationskonzepte

Sprach- und Datenkommunikation mit ihren unterschiedlichen Anforderungen unter Beibehaltung der jeweiligen Verkehrscharakteristik in ein gemeinsames System zu integrieren, wird bei sogenannten hybriden Vermittlungssystemen ermöglicht [56,57,99,163]. Die Übertragungskapazität wird dabei in Kanäle für die durchschaltevermittelten Dienste und die restliche Bandbreite für die paketvermittelten Dienste aufgeteilt und dynamisch an die momentanen Anforderungen der verschiedenen Verkehrsklassen vergeben.

2.3.2.1 Hybride LAN-Konzepte

Die Integration von durchschaltevermitteltem und paketvermitteltem Verkehr in Lokalen Netzen basiert auf einem periodisch generierten Pulsrahmen, der in Zeitschlitz konstanter Länge unterteilt ist [99,163]. Die einzelnen Zeitschlitz können für CS-Verkehr oder PS-Verkehr genutzt werden. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal der Systeme ist die Anordnung und Vergabe der zur Verfügung stehenden PS-Bandbreite (PS-Zeitschlitz). Die einzelnen PS-Zeitschlitz können zu einem Paketkanal zusammengefaßt werden; dieser Kanal kann mittels eines Token-Verfahrens einzelnen Stationen zugeteilt werden [136]. Ein anderes Konzept erlaubt es jeder Station, freie PS-Zeitschlitz individuell zur Paketübertragung zu nutzen [22,42,66,103,121].

Solche hybriden LANs sind für Übertragungsraten von 100 Mbit/s und mehr konzipiert und befinden sich augenblicklich in der Entwicklung bzw. werden zum Teil in den Standardisierungsgremien (siehe Kap. 2.1.4) diskutiert [5,72].

2.3.2.2 Nebenstellenanlagen

Heutige Entwicklungen bei Nebenstellenanlagen sind von ihrer Konzeption her darauf abgestimmt, sowohl Sprach- als auch Datenkommunikation als integrierte Nebenstellenanlagen (Computerized Private Branch Exchange, CPBX) abzuwickeln. Paketvermittelte Dienste werden jedoch auch in ISDN-fähigen Nebenstellenanlagen auf physikalische CS-Verbindungen abgebildet [8]. Damit bleibt die effektive Ausnutzung von Nebenstellenanlagen bei Datenanwendungen problematisch, da von dem statistischen Multiplexen der Datenverbindungen kein Gebrauch gemacht wird.

3 MODELLIERUNG VON VERKEHRSQUELLEN UND LOKALEN NETZEN

Durch Beobachtung und Messung an realen Systemen können prinzipiell alle Vorgänge qualitativ und quantitativ erfaßt werden. Für die Untersuchung der Leistungsfähigkeit von Sprachintegrationsverfahren bei Lokalen Netzen verbietet sich diese Methode, da unterschiedliche Konzeptionen gegenübergestellt werden, um als Planungs- bzw. Entwicklungshilfe für mögliche Realisierungen zu dienen. Aus diesem Grund muß eine Untersuchung der verschiedenen Sprachintegrationskonzepte durch analytische und/oder simulative Methoden erfolgen [95]. Dazu ist eine Modellierung der zu betrachtenden Systeme notwendig, die einen Vergleich der unterschiedlichen Verfahren erlaubt.

3.1 Modellbildung unter verkehrstheoretischen Aspekten

Die Modellbildung spielt bei der Untersuchung von Systemabläufen eine entscheidende Rolle. Modelle sind dabei abstrakte Darstellungen, welche die Struktur und das zeitliche und räumliche Zusammenwirken des realen Systems nachbilden. Die Modellierung soll eine leicht durchschaubare und handhabbare Beschreibung des Systems mit wenigen Grundelementen ermöglichen. Darum sind Modelle oftmals approximativ und somit fehlerbehaftet. Typische Elemente der verkehrstheoretischen Modellierung sind:

- *Verkehrsquellen*; sie generieren nach einem definierten Prozess (Ankunftsprozess) Anforderungen, die das Systemmodell belasten,
- *Warteschlangen*; sie dienen zur Zwischenspeicherung von Anforderungen,
- *Bedieneinheiten*; sie repräsentieren zeitverbrauchende Transaktionen (Übertragungsdauer, etc.) und werden durch Anforderungen für deren Bearbeitungsdauer belegt.

Um den Nachrichtenfluß (Anforderungen) durch das Systemmodell zu beschreiben, erfolgt die Verknüpfung der einzelnen Elemente über gerichtete Graphen. Der zeitliche Ablauf von Anforderungen durch das System wird im wesentlichen durch die Ankunftsabstände und Bediendauern der Anforderungen bestimmt.

Die Auswahl einer von mehreren wartenden Anforderungen in einer Warteschlange kann durch unterschiedliche *Abfertigungsstrategien* (FIFO, First-In, First-Out; LIFO, Last-In, First-Out; etc.) erfolgen. Trifft eine Anforderung eine volle Warteschlange oder Bedieneinheit an (Blockierung), muß, durch Verlust einer Anforderung oder Wiederbelegen der vorherigen Bedieneinheit, auf die-

sen Blockierungsfall reagiert werden. Teilen sich mehrere Warteschlangen eine Bedieneinheit, muß die *Zuteilung* der Bedieneinheit zu den Warteschlangen im Modell berücksichtigt werden. Mögliche Zuteilungsstrategien sind die zyklische Reihenfolge und prioritätsabhängige Vergabe.

Ziel der verkehrstheoretischen Modellierung ist es, festzustellen,

- ob die an das System gestellten Anforderungen bzgl. Verkehrsgüte oder Systemauslastung erfüllt werden,
- wo Systemengpässe zu erwarten sind,
- wie Alternativen der Systemstruktur die Leistungsfähigkeit des Systems beeinflussen.

Für die Modellanalyse eignen sich Simulationen [98,97], d.h. die Nachbildung des Ablaufgeschehens im Systemmodell auf einem Rechner, sowie eine Reihe von analytischen Methoden der Warteschlangentheorie [92,155]. Nach diesem Abriß über die wichtigsten Punkte der Modellierung werden nur noch die für diese Arbeit relevanten Techniken der Modellanalyse aufbereitet:

- *Zeitreue Simulation*

Die Simulation der detaillierten Gesamtmodelle soll genaue Ergebnisse über die Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Sprachintegrationsverfahren bei den betrachteten Lokalen Netzen liefern. Die dabei eingesetzte stationäre, zeitreue Simulation erfordert jedoch eine aufwendige Programmierung und einen erheblichen Rechenaufwand. Mit Hilfe der Simulation lassen sich andererseits charakteristischen Kenngrößen des Systems, wie z.B.:

- Verteilung der Transferzeit durch das Netz für Daten- und Sprachpakete getrennt
- Systemauslastung und Nutzdurchsatz
- Wartewahrscheinlichkeit
- Blockierwahrscheinlichkeit für Datenpakete
- Sprachpaketverlustwahrscheinlichkeit pro Sprecher auch bei sehr komplexen Quellmodellen (siehe Kap. 3.2.2)

genau bestimmen.

- *Systemmodellanalyse*

Die analytische Untersuchung eines Systems erbringt in aller Regel schneller Ergebnisse als die Simulation. Zwar sind korrelierte und komplizierte Systemabläufe mathematisch schwierig zu beschreiben und oftmals nur über Approximationen oder vereinfachte Ersatzmodelle lösbar, jedoch zeigen analytische Lösungen das grundsätzliche Systemverhalten. Dadurch werden erst umfangreiche Parameterstudien sinnvoll. Eine Methode und die notwendigen Er-

weiterungen, um priorisierte Sprachübertragung bei Lokalen Netzen nach dem Token Passing-Prinzip zu analysieren, wird in Kapitel 5 näher ausgeführt.

3.2 Verkehrsmodelle für Sprachquellen

Zur genauen Bestimmung der Leistungsfähigkeit verschiedener Sprachintegrationsverfahren ist es zum einen notwendig, das Lokale Netz möglichst detailliert nachzubilden, zum anderen müssen die Einflüsse der unterschiedlichen Quellmodelle für Sprach- und Datenverkehr in ihrem Verhalten exakt modelliert werden. Um aussagekräftige Resultate zu erhalten, muß ein Gesamtmodell aus drei Teilmodellen bestehen:

- Verkehrsmodell der Sprachquellen
- Verkehrsmodell der Datenquellen
- Verkehrsmodell des Lokalen Netzes

Von besonderem Interesse ist dabei der Einfluß der Sprachquellen unter Berücksichtigung der Sprecherkorrelationen und dem Einsatz von Sprach- und Sprachpausenreduktionsverfahren.

Die Anforderungen von Teilnehmern werden durch einen stochastischen Ankunftsprozess aus Verkehrsquellen modelliert. Durch die Zufallsvariable T_A kann der Ankunftsprozess beschrieben werden, wobei T_A die Abstände zwischen aufeinanderfolgenden Anforderungen charakterisiert und durch die Verteilungsfunktion (VF)

$$F_A(t) = P\{T_A \leq t\} \quad (3.1)$$

gegeben ist.

Die Verteilungsdichtefunktion (VDF)

$$f_A(t) = \frac{dF_A(t)}{dt} \quad (3.2)$$

sowie die Laplace-Transformierte

$$\phi_A(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} f_A(t) dt \quad (3.3)$$

beschreiben gleichfalls das statistische Verhalten eines Prozesses und werden bei der verkehrstheoretischen Analyse eingesetzt.

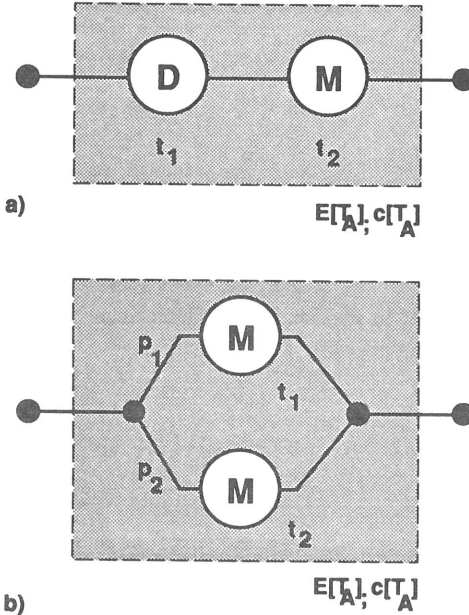


Bild 3.1: Phasenmodelle der Ersatz-Verteilungsfunktionen

- a) $0 \leq c[T_A] \leq 1$
- b) $c[T_A] \geq 1$

Die Verteilungsfunktionen werden häufig aus Messungen des Teilnehmerverhaltens gewonnen. Zum Teil sind aus diesen Messungen jedoch nur Mittelwert $E[T_A]$ und Varianz $VAR[T_A]$ der Ankunftsabstände bestimmt worden, und so muß erst eine VF bestimmt werden, die zumindest in diesen beiden Maßzahlen mit den Meßwerten übereinstimmt. Um eine Ersatz-VF zu bestimmen, die mit den gemessenen Werten übereinstimmt, können in Abhängigkeit des Variationskoeffizienten $c[T_A]$ der unbekanntem VF zwei Phasenmodelle für die Ersatz-VF unterschieden werden (Bild 3.1).

Die Verteilungsfunktionen dieser Phasenmodelle stimmen mit der unbekanntem VF in den beiden ersten Momenten exakt überein. Hat die zu approximierende VF einen hypoexponentiellen Charakter ($0 \leq c[T_A] \leq 1$), kann sie durch das Phasenmodell nach Bild 3.1a ersetzt werden, das folgende VF besitzt

$$F_A(t) = P\{T_A \leq t\} = \begin{cases} 0 & \text{für } 0 \leq t \leq t_1 \\ 1 - e^{-(t-t_1)/t_2} & \text{für } t > t_1 \end{cases} \quad (3.4)$$

mit

$$t_1 = E[T_A] \cdot (1 - c[T_A])$$

$$t_2 = E[T_A] \cdot c[T_A] .$$

Für den Fall eines hyperexponentiellen Charakters ($c[T_A] \geq 1$) der unbekanntem VF, kann diese durch das Ersatzphasenmodell nach Bild 3.1b mit der zugeordneten VF nach Gl. 3.5 nachgebildet werden

$$F_A(t) = P\{T_A \leq t\} = 1 - p_1 e^{-t/t_1} - p_2 e^{-t/t_2} \quad (3.5)$$

mit

$$t_{1,2} = \frac{E[T_A]}{(1 \pm \sqrt{\frac{c[T_A]^2 - 1}{c[T_A]^2 + 1}})}, \quad p_{1,2} = \frac{E[T_A]}{2t_{1,2}}$$

$$p_1 t_1 = p_2 t_2 .$$

3.2.1 Synchrones Sprechermodell

Betrachtet man das digitale Ausgangssignal einer Sprachquelle, so werden gemäß des gewählten Abtastintervalls t_A deterministisch zu den Zeitpunkten N^*t_A (mit $N=0,1,2,3,..$) Abtastwerte, bestehend aus L_V Sprachbits, generiert. Mehrere dieser Abtastwerte werden in der Paketereinheit zu einem Sprachpaket zusammengefaßt, welches dann über das Lokale Netz übertragen wird (siehe Kap. 2.2.1). Die Sprachpakete besitzen i.a. eine konstante Anzahl Sprachabtastwerte N ; damit läßt sich, aus der Sicht des LANs, der Ankunftsprozess auf Paketebene durch die deterministische VF

$$F_{Pack}(t) = P\{T_{Pack} \leq t\} = s(t - Nt_A) \quad (3.6)$$

beschreiben, wobei $s(t)$ die Sprungfunktion ist

$$s(t - t_0) = \begin{cases} 0 & \text{für } t < t_0 \\ 1 & \text{für } t \geq t_0 \end{cases} . \quad (3.7)$$

Die in jedem Sprachpaket enthaltene Nutzinformation L_{PV} ergibt sich aus der Kodierrate der Sprachquelle Q_V

$$Q_V = \frac{L_V}{t_A} \quad (3.8)$$

und der Anzahl Sprachabtastwerte pro Sprachpaket zu

$$L_{PV} = Nt_A Q_V . \quad (3.9)$$

Dieses relativ einfache Modell beschreibt den Ankunftsprozess einer Sprachquelle auf Paketebene. Systembestimmende Parameter sind die Quellkodierrate Q_V und die Paketierdauer N^*t_A , wobei die Quellkodierrate i.a. fest vorgegeben ist (PCM bzw. ADPCM).

Der wesentliche Aspekt für paketierte Sprachübertragung liegt jedoch in der Ausnutzung des TASI-Gewinns (Kap. 2.2.1.3.1), deshalb müssen Sprachquellmodelle entwickelt werden, welche die stochastischen und Korrelations-Eigenschaften einzelner Sprachverbindungen nachbilden.

3.2.2 Sprachquellmodelle unter Berücksichtigung des Sprachpausenverhaltens

Grundlage der Modellierung von Sprachquellen unter Berücksichtigung des Sprecherverhaltens sind die ausführlichen Messungen von Brady [14]. Untersucht wurde dabei das statistische Verhalten von aktiven (*Talkspurt*) und inaktiven (*Silence*) Sprachphasen von Teilnehmern während ihres Telefongesprächs (Tabelle 3.1). Meßtechnisch erfaßt wurde u.a. die Wahrscheinlichkeit, daß

- mindestens eine Person spricht (*Talkspurt*),
- beide Teilnehmer gleichzeitig sprechen (*Double Talking*),
- keiner der beiden Gesprächspartner spricht (*Mutual Silence*).

Zustand	Zustandswahrscheinlichkeit in Prozent
Talkspurt	39.5%
Double Talking	4.49%
Mutual Silence	25.01%

Tabelle 3.1: Antreffwahrscheinlichkeit der verschiedenen Gesprächszustände nach [14]

Anzumerken ist hier, daß der Zustand *Talkspurt* auf eine Person bezogen angegeben ist, d.h. dieser Zustand enthält auch die Zeiten, in denen beide Teilnehmer gleichzeitig aktiv sind. Die Antreffwahrscheinlichkeit, daß genau nur ein Teilnehmer aktiv ist, beträgt 35,01%.

Beachtenswert bei diesen gemessenen Ergebnissen ist die geringe Wahrscheinlichkeit, daß beide Sprecher gleichzeitig aktiv sind (4,49%). Dies zeigt die starke Abhängigkeit der aktiven Sprachpha-

	Messung nach Brady [14]	Messung nach Gruber [58]	Messung nach Lee [101]	Messung nach Sriram [150]
Talkspurt in [sec]	1,125	0,1697	0,227	0,352
Silence in [sec]	1,721	0,1239	0,596	0,65

Tabelle 3.2: Gemessene mittlere Talkspurt- und Silence-Dauern

sen beider Gesprächspartner; zwar kann ein Sprecher dem anderen ins Wort fallen, doch ist der weitaus größere Anteil eines Gesprächs durch eine jeweils einseitige Kommunikationsbeziehung charakterisiert. Die von Brady gemessenen mittleren Zeiten für die aktiven bzw. inaktiven Sprachphasen, bezogen auf einen Sprecher, sind in Tabelle 3.2 zu sehen. Ähnliche Messungen sind in [58] und [101] veröffentlicht, bzw. in [150] erwähnt.

Die auf den ersten Blick sehr unterschiedlichen Ergebnisse zeigen den entscheidenden Einfluß des Algorithmus zur Detektion von aktiven und inaktiven Sprachphasen. Vergleicht man die gemessenen Werte aus [14] mit den analytisch approximierten Werten aus [58,101] unter Berücksichtigung derselben Sprachpausen-Verfahren, ist eine bessere Übereinstimmung der verschiedenen Meßreihen zu erkennen (Tabelle 3.3)

	Brady gemessen	Gruber approx.	Lee approx.
Talkspurt in [sec]	1.125	1.15	1.3
Silence in [sec]	1.721	1.76	2.22

Tabelle 3.3: Vergleich der mittleren Zustandsdauern bei gleichen Parametern der Sprachpausendetektion

Der Algorithmus zur Detektion von aktiven bzw. inaktiven Sprachphasen basiert auf einem Vergleich des Sprachsignals mit einem Schwellwert. Überschreitet das Sprachsignal den Schwellwert, so entspricht das einer aktiven Sprachphase; Werte unterhalb des Schwellwerts werden als inaktive Phasen definiert. Als Maß für den Schwellwertvergleich können die Nulldurchgangsrate, Kurzzeitsignalleistungsmessungen oder Kombinationen davon dienen. Dazu muß das Sprachsignal in Blöcke konstanter Länge unterteilt werden (Bild 3.2a). Für jeden dieser Blöcke wird der Schwellwertvergleich durchgeführt, und man erhält ein duales Muster von *Sprach-* und *Pausenblöcken* (Bild 3.2b). Die Blocklänge muß dabei nicht notwendigerweise mit der Länge der zu übertragenden Sprachpakete übereinstimmen.

Betrachtet man die Sprachblocklängen, so stellt man fest, daß 40% aller Sprachblöcke kürzer als 50 ms sind und größtenteils von impulsförmigen Nebengeräuschen stammen [15,58,101]. Die Verteilungsdichtefunktion der Pausenblocklängen kann vereinfacht aus zwei Bereichen zusammengesetzt werden:

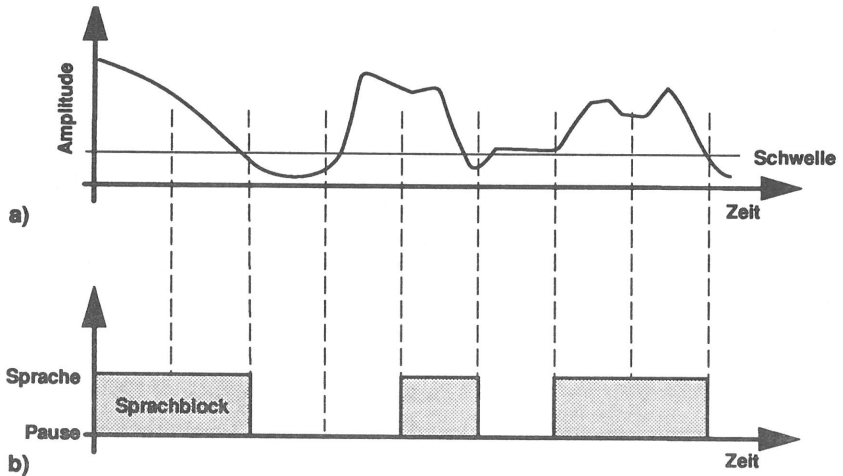


Bild 3.2: Generierung von Sprach- und Pausenblöcken
a) Sprachsignal mit Schwellwertvergleich
b) abgeleitetes Sprachblockmuster

- 1.) Pausenblocklängen ≤ 200 ms; sie treten nach Stoppkonsonaten (z.B. "p") und zwischen Worten bzw. Sätzen auf,
- 2.) Pausenblocklängen > 200 ms; sie ergeben sich bei den Gesprächsphasen, bei denen der Sprecher seinem Gesprächspartner zuhört.

Wie bereits in Kap. 2.2.1.3.1 ausgeführt, ist es sinnvoll, in realen Systemen kurze Sprachpausen zu überbrücken, um das *Back-End-Clipping* des Sprachpausendetektors zu minimieren, und Pausenmodulationen zwischen einzelnen Silben zu vermeiden [14,58]. Bekannte Verfahren sind dabei:

- *Hangover*

Bei dieser Methode wird grundsätzlich die Sprachblocklänge um eine konstante Hangover-Zeit verlängert, d.h. Pausenblocklängen, die kleiner als die Hangover-Zeit sind, werden überbrückt (Verlängerung des Sprachblocks). Pausenblöcke, die länger als die Hangover-Zeit sind, werden um diese Zeit gekürzt (Bild 3.3)

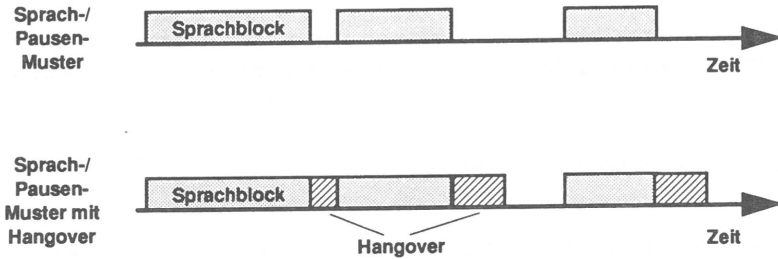


Bild 3.3: Pausenblocküberbrückung mittels Hangover

- Fill-In

Bei dieser Methode muß das ursprüngliche Sprach-/Pausenblockmuster um die Fill-In-Zeit verzögert werden. Ein Detektor vergleicht das unverzögerte Muster mit dem um die Fill-In-Zeit verzögerten Muster und erkennt alle Pausenblocklängen, die kürzer als die Fill-In-Zeit sind daran, daß das verzögerte Muster einen Pausenblock enthält, während das unverzögerte Signal bereits wieder als Sprachblock detektiert wird (Bild 3.4). Mit diesem Verfahren werden alle Pausenblocklängen überbrückt, die kleiner als die Fill-In-Zeit sind; längere Pausenblöcke werden jedoch, im Gegensatz zum Hangover-Verfahren, nicht gekürzt. Die Fill-In-Methode führt deshalb zu kürzeren mittleren Sprachblocklängen als die Hangover-Methode. Nachteilig ist jedoch die notwendige Verzögerung des Sprachsignals um die Fill-In-Zeit.

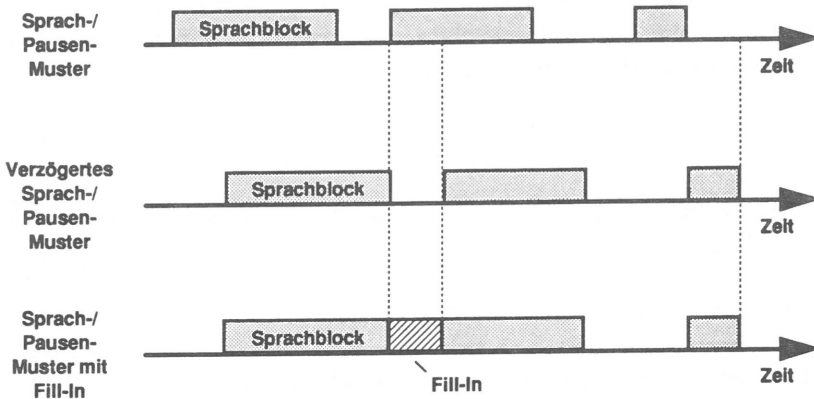


Bild 3.4: Pausenblocküberbrückung mittels Fill-In

Um keine Beeinträchtigung der Sprachqualität zu erleiden, sollten alle Pausenblocklängen < 200 ms überbrückt werden (siehe Kap. 2.2.2.2). Entsprechende Messungen der Verteilungsfunktionen der

Sprach- und Pausenblocklängen unter Berücksichtigung einer Fill-In-Zeit von 200 ms sind in [14,15] und [101] durchgeführt und durch bekannte Verteilungsfunktionen angenähert worden.

3.2.2.1 Sprachquellmodell eines Sprechers

Ein Modell zur Nachbildung des Paketankunftsprozesses einer Sprachquelle unter Berücksichtigung des Sprach-/Pausenverhaltens kann durch die zwei Zustände *Talkspurt* und *Silence* charakterisiert werden (Bild 3.5)

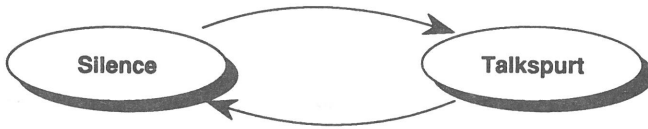


Bild 3.5: Zustandsautomat für einen Sprecher unter Berücksichtigung des Sprach-/Pausenverhaltens

Die Verweildauer im Zustand *Talkspurt* kann durch eine exponentielle Verteilungsfunktion

$$F_T(t) = P\{T_T \leq t\} = 1 - e^{-\beta t} \quad \text{für } t > 0 \quad (3.10)$$

mit $(1/\beta)$ als mittlere Verweildauer im Zustand *Talkspurt* angenähert werden, die Verweildauer im Zustand *Silence* wird wegen der Überbrückung kurzer Pausenblöcke (Fill-In Verfahren) durch eine verschobene exponentielle Verteilungsfunktion

$$F_S(t) = P\{T_S \leq t\} = \begin{cases} 0 & \text{für } 0 \leq t \leq t_{\text{Fill-In}} \\ 1 - e^{-\alpha(t-t_{\text{Fill-In}})} & \text{für } t > t_{\text{Fill-In}} \end{cases} \quad (3.11)$$

mit $(1/\alpha)$ als mittlere Verweildauer im Zustand *Silence* abzüglich der Fill-In-Zeit approximiert [15,101].

Zu untersuchen gilt es, in wieweit dieses Sprechermodell das Verhalten einer Verbindung zweier Gesprächspartner nachbildet und die Korrelationen zwischen den Teilnehmern berücksichtigt. Dazu wird ein Verbindungsmodell bestehend aus zwei Sprechermodellen A und B gemäß Bild 3.5 definiert, das 4 Zustände einnehmen kann:

- Teilnehmer A und Teilnehmer B sind inaktiv (*Mutual Silence*)
- Teilnehmer A ist aktiv; Teilnehmer B ist inaktiv
- Teilnehmer A ist inaktiv; Teilnehmer B ist aktiv
- Beide Teilnehmer sind aktiv (*Double Talking*)

Mit Hilfe der Verteilungsfunktionen der Einzelzustände *Talkspurt* und *Silence* lassen sich die Verteilungsfunktionen der 4 Zustände des Verbindungsmodells berechnen. Der Zustand *Mutual Silence* ist gekennzeichnet durch das Minimum aus Pausendauer T_S des einen Sprechers und Restpausendauer (Vorwärtsrekurrenzzeit) T_S^V des anderen Sprechers (Bild 3.6).

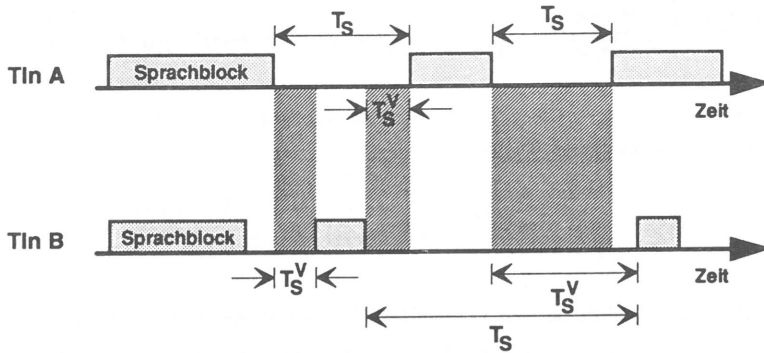


Bild 3.6: Mutual Silence Szenarien

Für die ZV T_{MS} des Zustands *Mutual Silence* gilt somit [98,126]:

$$T_{MS} = \min(T_S, T_S^V) \quad (3.12)$$

Die Sprechermodelle für Tln A und Tln B sind nach Annahme voneinander unabhängig, damit gilt für die VDF der ZV T_{MS} :

$$f_{MS}(t) = f_S(t)[1 - F_S^V(t)] + f_S^V(t)[1 - F_S(t)] \quad (3.13)$$

wobei

$$F_S(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } 0 \leq t \leq t_{Fill-In} \\ 1 - e^{-\alpha(t-t_{Fill-In})} & \text{für } t > t_{Fill-In} \end{cases} \quad (3.14)$$

und

$$f_S(t) = \begin{cases} 0 & \text{für } 0 \leq t \leq t_{Fill-In} \\ \alpha \cdot e^{-\alpha(t-t_{Fill-In})} & \text{für } t > t_{Fill-In} \end{cases} \quad (3.15)$$

die VF bzw. die VDF der Pausendauer eines Sprechers ist. Für die VDF der Vorwärtsrekurrenzzeit $f_A^V(t)$ gilt allgemein [30]

$$f_A^V(t) = \frac{1}{E[T_A]} [1 - F_A(t)] \quad (3.16)$$

damit ergeben sich für die Vorwärtsrekurrenzzeit-Verteilungsdichte- und -Verteilungsfunktion

$$f_S^V(t) = \begin{cases} \frac{1}{1/\alpha + t_{Fill-In}} & \text{für } 0 \leq t \leq t_{Fill-In} \\ \frac{1}{1/\alpha + t_{Fill-In}} e^{-\alpha(t-t_{Fill-In})} & \text{für } t > t_{Fill-In} \end{cases} \quad (3.17)$$

und

$$F_S^V(t) = \begin{cases} \frac{t}{1/\alpha + t_{Fill-In}} & \text{für } 0 \leq t \leq t_{Fill-In} \\ \frac{t_{Fill-In}}{1/\alpha + t_{Fill-In}} + \frac{1}{1 + \alpha \cdot t_{Fill-In}} (1 - e^{-\alpha(t-t_{Fill-In})}) & \text{für } t > t_{Fill-In} \end{cases} \quad (3.18)$$

Mit den Gl. 3.13 - Gl. 3.18 läßt sich, nach einigen algebraischen Umformungen, die VDF $f_{MS}(t)$ explizit darstellen (Gl. 3.19):

$$f_{MS}(t) = \begin{cases} \frac{1}{1/\alpha + t_{Fill-In}} & 0 \leq t \leq t_{Fill-In} \\ \frac{2}{1/\alpha + t_{Fill-In}} e^{-2\alpha(t-t_{Fill-In})} & t > t_{Fill-In} \end{cases} \quad (3.19)$$

Die VDF $f_{DT}(t)$ für die Zustandsdauer, daß beide Teilnehmer gleichzeitig sprechen (*Double Talking*), ergibt sich in Anlehnung an die vorherige Betrachtungsweise aus dem Minimum der Sprachdauer T_T des einen Sprechers und der Restdauer der aktiven Sprachphase T_T^V (Bild 3.7).

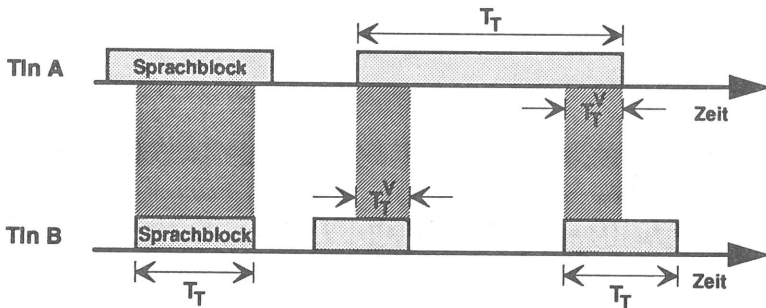


Bild 3.7: Double Talking Szenarien

Aufgrund der Markoff-Eigenschaft (d.h. die Verteilung des Restankunftsabstands entspricht der Ankunftsabstandsverteilung) erhält man für den Zustand *Double Talking* unter Anwendung von Gl. 3.10 und Gl. 3.13 die VDF $f_{DT}(t)$

$$f_{DT}(t) = 2\beta e^{-2\beta t} \quad \text{für } t \geq 0 \quad (3.20)$$

bzw. für die VD $F_{DT}(t)$

$$F_{DT}(t) = 1 - e^{-2\beta t} \quad \text{für } t \geq 0 \quad (3.21)$$

Bestimmt man die Wahrscheinlichkeiten der jeweiligen Zustände und vergleicht sie mit den Messungen (Tabelle 3.4), erkennt man bereits signifikante Unterschiede beim Zustand *Double*

Talking. Das einfache Verbindungsmodell, bestehend aus zwei nicht gekoppelten Sprechermodellen, überschätzt das tatsächliche Auftreten dieses Zustands um das Vierfache.

	Gemessene Werte nach Brady [14]	Analytisch bestimmte Werte
Beide Tln aktiv	4,49%	20,32%
Ein Tln aktiv	35,01%	24,4%
Kein Tln aktiv	25,01%	30,88%

Tabelle 3.4: Vergleich der gemessenen und der berechneten Zustandswahrscheinlichkeiten einer Sprachverbindung

Vergleicht man die gemessene Verteilungsfunktion [14] mit der analytisch ermittelten VF (Gl. 3.21) für den Zustand *Double Talking* (Bild 3.8), ist der deutlich schwächere Anstieg der Kurve der analytisch ermittelten Verweildauern zu erkennen. Das bedeutet, daß bei dem gewählten Verbindungsmodell häufig längere Verweildauern im Zustand *Double Talking* vorkommen als in der Realität.

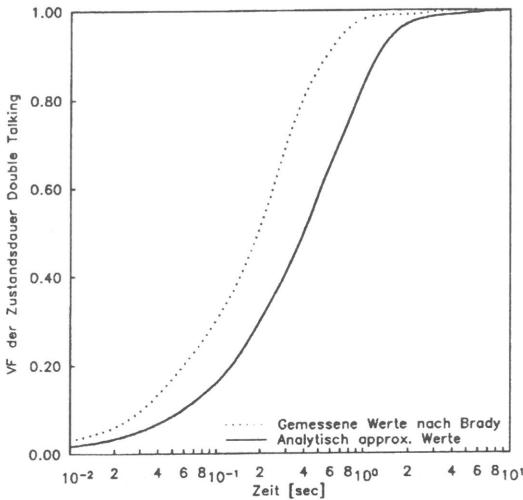


Bild 3.8: Gemessene und analytisch approximierte Verteilungsfunktion für den Gesprächszustand *Double Talking*

Ein ähnliches Verhalten ist auch in Bild 3.9 zu erkennen; der Zustand *Mutual Silence* (Kein Teilnehmer ist aktiv) wird durch das 2-Phasenmodell überschätzt.

Das einfache Sprechermodell mit Berücksichtigung des Sprach-/Pausenverhaltens bildet die Korrelationen zweier Gesprächspartner nur unzureichend nach. Betrachtet man speziell Übertragungssysteme, die nur einen Übertragungskanal für beide Gesprächsrichtungen besitzen, wie z.B. Lokale Netze, so ist zu erwarten, daß das Sprechermodell zu einer falschen und z.T. überhöhten Netzbelastung führen wird. Deshalb soll im folgen-

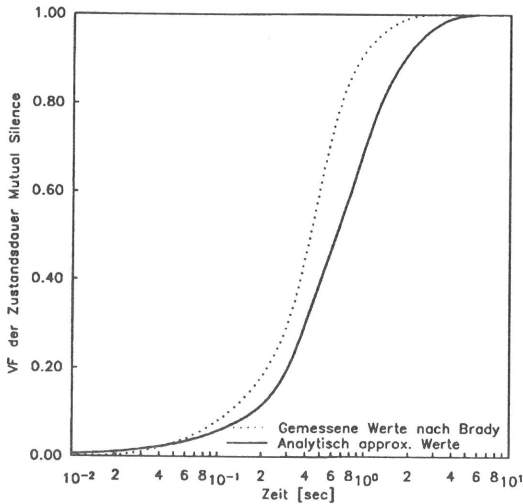


Bild 3.9: Gemessene und analytisch approximierte Verteilungsfunktion für den Gesprächszustand Mutual Silence

den ein Verbindungsmodell entwickelt und parametrisiert werden, das die dialogbedingten Abhängigkeiten der beiden Sprecheraktivitäten berücksichtigt und mit den empirisch ermittelten Werten gut übereinstimmt.

3.2.2.2 Sprachquellmodell einer Dialog-Verbindung

Wie im vorherigen Kapitel gezeigt, kann eine Dialog-Verbindung zunächst durch vier globale Zustände beschrieben werden, die in Anlehnung an [14] wie folgt bezeichnet werden:

- Solitary-Talk-Tln A
- Solitary-Talk-Tln B
- Mutual Silence
- Double Talking

Solitary-Talk-Tln A bzw. *Solitary-Talk-Tln B* kennzeichnen die Zustände, in denen entweder nur Tln A oder Tln B spricht. Die Verweildauern in diesen Zuständen können durch eine negativ exponentielle Verteilungsfunktion angenähert werden [15,101]. Der Mittelwert für die Solitary-Talk-Dauer des Tln A ($E[T_{STA}]$) bzw. Tln B ($E[T_{STB}]$) ergibt sich gemäß Gl. 3.10 aus dem gemessenen Mittelwert der *Talkspurt*-Dauer abzüglich der mittleren Double-Talking-Dauer, da die gemessenen

Werte auf einen Sprecher bezogen sind. Die beiden Zustände *Solitary-Talk-Tln A* bzw. *Solitary-Talk-Tln B* sind i.a. gleich und symmetrisch verteilt, somit gilt für die Mittelwerte:

$$E[T_{STA}] = E[T_{STB}] = 1/\beta - E[T_{DT}]. \quad (3.22)$$

Aus den Zuständen *Solitary-Talk-Tln A* bzw. *Solitary-Talk-Tln B* kann entweder der Zustand *Mutual Silence* erreicht werden, in dem keiner der beiden Tln aktiv ist, oder der Zustand *Double-Talking*, in dem beide Tln aktiv sind. Ein direkter Übergang vom Zustand *Solitary-Talk-Tln A* in den Zustand *Solitary-Talk-Tln B* und umgekehrt wurde nicht festgestellt [14].

Der Zustand *Mutual Silence* setzt sich aus zwei Arten von Pausenzuständen zusammen:

- 1.) Aus Pausen, die nach Stoppkonsonanten zwischen Worten bzw. Sätzen auftreten, jedoch keinen Wechsel des aktiven Sprechers nach sich ziehen, und
- 2.) Aus Pausen, die aus einem Wechsel der Gesprächsführung resultieren, d.h. ein Tln beendet seine aktive Sprachphase und nach einer Pause übernimmt der andere Tln das Gespräch und wird aktiv (Sprecherwechsel).

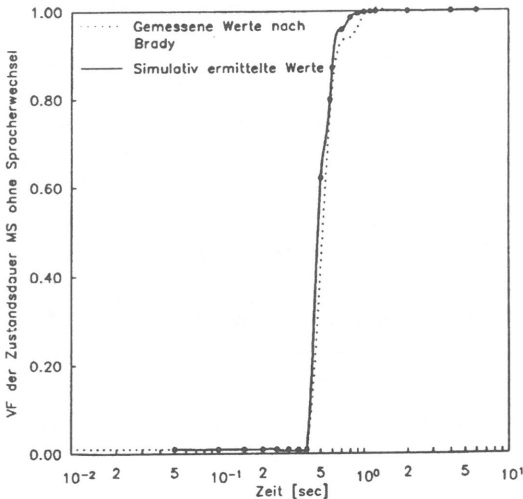


Bild 3.10: Gemessene und approximierte Verteilungsfunktion für den Zustand *Mutual Silence* ohne Sprecherwechsel

Die Verteilungsfunktionen für diese beiden Arten von Pausenzuständen wurden in [14] empirisch ermittelt. Da die Messungen mit einem Fill-In-Verfahren zur Überbrückung kurzer Pausen durchgeführt wurden, ergeben sich für den Fall ohne Sprecherwechsel nur Pausendauern, die größer als 200 ms sind (Bild 3.10). Als Approximation der gemessenen Verteilungsfunktion wurde eine verschobene Exponential-Verteilung (Gl. 3.11) vorgeschlagen.

Die Verteilung für Pausendauern mit Sprecherwechsel (Bild 3.11) kann näherungsweise durch ein Erlang-Verteilungsfunktion (E_K -VF) $F_A(t)$ mit der Dichte

$$f_A(t) = \mu^K \frac{t^{K-1}}{(K-1)!} e^{-\mu t} \quad \text{mit } K = 1, 2, 3, \dots \quad (3.23)$$

modelliert werden, wobei die E_K -Verteilungsfunktion durch die Summe von k identisch negativ-exponentiell verteilten Zufallsvariablen mit dem Mittelwert $1/\mu$ gekennzeichnet ist.

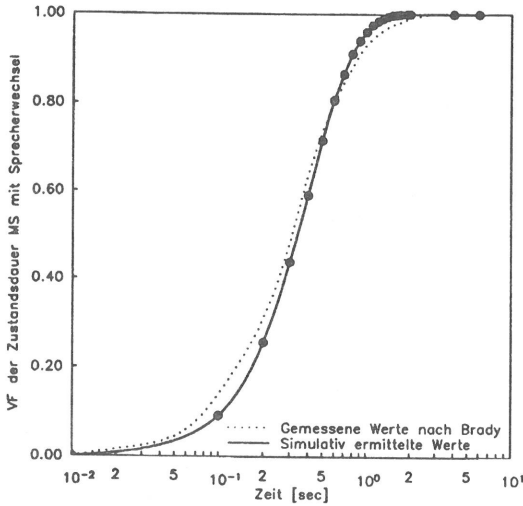


Bild 3.11: Gemessene und approximierte Verteilungsfunktion für den Zustand Mutual Silence mit Sprecherwechsel

Für den Zustand *Double Talking* gelten prinzipiell die oben genannten Gesichtspunkte, leider existieren für diesen Zustand keine detaillierten Meßergebnisse, die zwischen Sprecherwechsel und keinem Sprecherwechsel unterscheiden. Deshalb wurden bei der Modellierung dieses Zustands symmetrische Sub-Zustände angenommen. Die VF für die verschiedenen Sub-Zustände wurde durch eine E_2 -Verteilung angenähert.

Um in dem Modell einer Sprachdialog-Verbindung die Abhängigkeit der Gesprächswechsel zu berücksichtigen, besitzt das Verbindungsmodell 10 Zustände. Wie in Bild 3.12 zu sehen, bestehen die Zustände *Double Talking* und *Mutual Silence* aus jeweils 4 Sub-Zuständen, welche die verschiedenen Zustandsverteilungen mit bzw. ohne Sprecherwechsel darstellen. Aus [14] sind die entsprechenden Zahlenwerte für die mittleren Aufenthaltsdauern in den einzelnen Zuständen und, soweit genannt, die Werte für die Variationskoeffizienten entnommen. Die Übergangswahrscheinlichkeiten in die einzelnen Folgezustände lassen sich aus den Phasendauern und deren Antreffwahrscheinlichkeiten bestimmen [141].

Die Unterteilung des Zustands *Double Talking* in 4 Sub-Zustände wurde alleinig aus Symmetriegründen eingeführt; da über keinen dieser Sub-Zustände Meßergebnisse bekannt sind, wurde ein symmetrisches Verhalten der einzelnen Sub-Zustände zueinander unterstellt. Bild 3.13 zeigt, daß diese Annahme die tatsächlichen Verhältnisse im Zustand *Double Talking* nur näherungsweise trifft (kurze *Double Talking*-Dauern werden unterschätzt).

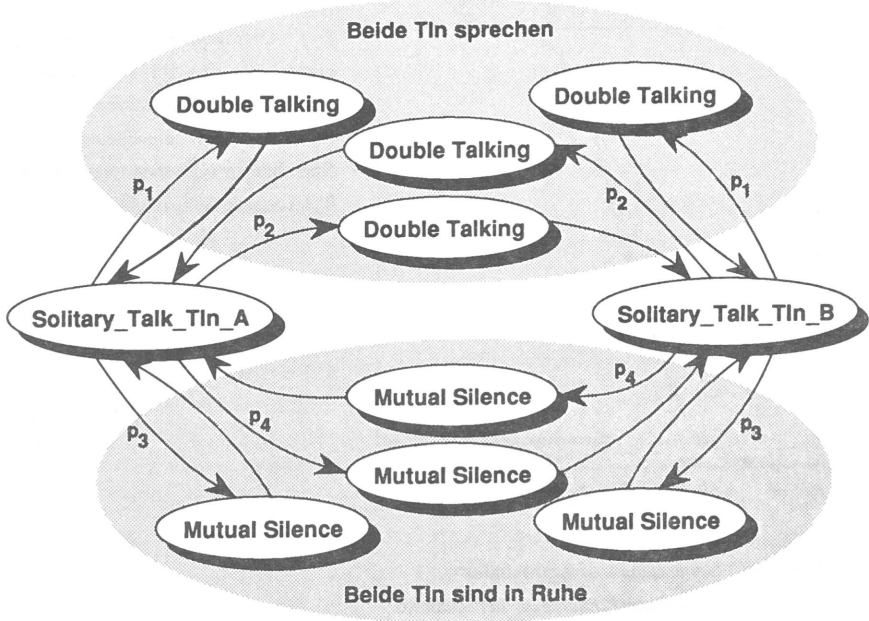
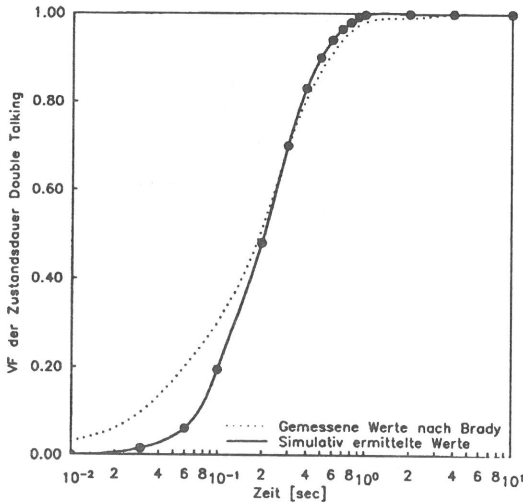


Bild 3.12: Phasenmodell einer Sprachdialog-Verbindung unter Berücksichtigung von Sprecherkorrelationen

Vergleicht man jedoch die Zustandswahrscheinlichkeiten, die sich aus dem Dialogquellmodell ergeben, mit den gemessenen Resultaten (Tabelle 3.5), so ist insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung festzustellen.

	Gemessene Werte nach Brady [14]	Mittels Dialogmodell ermittelte Werte
Beide Tln aktiv	4,49%	5,09%
Ein Tln aktiv	35,01%	34,98%
Kein Tln aktiv	25,01%	24,98%

Tabelle 3.5: Vergleich der gemessenen und der aus dem Dialogmodell ermittelten Zustandswahrscheinlichkeiten einer Sprachverbindung



Das Dialogquellmodell (Bild 3.12) eignet sich deshalb zur Nachbildung der aktiven und inaktiven Sprachphasen auf Verbindungsebene, da es die Sprecherkorrelationen während eines Telefongesprächs nachbildet.

Bild 3.13: Gemessene und approximierte Verteilungsfunktion für den Zustand Double Talking

3.3 Verkehrsmodell für Datenquellen

Die Beschreibung der Charakteristik des Datenverkehrs durch geeignete Quellmodelle ist schwierig, da einerseits viele unterschiedliche Datenanwendungen ganz unterschiedlicher Charakteristik existieren (z.B. interaktive Terminal-Host-Datenkommunikation oder File-Transfer oder Remote-Betrieb), andererseits ist die Verkehrscharakteristik durch die Einflüsse des zugrundeliegenden Vermittlungssystems abhängig (z.B. Übertragungsbandbreite, Übermittlungsprinzip oder eingesetzte Protokolle).

Bekannte Messungen von Datenverkehrsprofilen sind entweder anwendungsorientiert oder betrachten nur das Vermittlungssystem. Anwenderorientierte Messungen bestimmen Verteilungsfunktionen oder zumindest Mittelwerte von Teilphasen einer Datenapplikation, wie z.B. die Reaktionszeit eines Host-Rechners auf eine interaktive Terminalanfrage bzw. die Anzahl übertragener Zeichen. Solche Messungen sind für niederrätigen Terminaldatenverkehr bekannt [47,129,130]. Es sind nur wenige Messungen an Lokalen Netzen veröffentlicht [54,146]. Daraus abgeleitete Para-

meter und mögliche Modellierungen der Charakteristika unterschiedlicher Datenverkehre werden zur Zeit diskutiert [84,111,137].

Das für die Untersuchungen eingesetzte Datenmodell ist durch die Verteilungsfunktion der Paketankunftsabstände und die Verteilungsfunktion der Paketlänge charakterisiert. Eine Modellierung der Datenquellen auf Verbindungsebene, analog dem verbindungsabhängigen Sprechermodell (Kap. 3.2.2.2), ist bei Lokalen Netzen unter der Voraussetzung mehrerer Datenquellen (>20) nicht erforderlich [54,111].

3.4 Systemmodell der Lokalen Netze

Basierend auf einer detaillierten Modellierung sollen in den folgenden Kapiteln Aussagen über die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Sprachintegrationsverfahren bei unterschiedlichen Lokalen Netzen gemacht werden. Die Modellierung muß dabei alle Mechanismen und Komponenten eines Systems berücksichtigen, welche die Leistungsfähigkeit beeinflussen. Um vergleichbare Systemmodelle der unterschiedlichen Lokalen Netze zu erhalten, ist ein Abstraktionsgrad der einzelnen Systemmodelle zu wählen, der Vereinfachungen annimmt, ohne daß wesentliche Verfälschungen der Ergebnisse zu befürchten sind.

Unterscheidungsmerkmale zeigen Lokale Netze in der Art und Weise wie der Zugriff auf das Übertragungsmedium erfolgt, d.h. zu modellieren sind die Schichten 1 und 2a des ISO-Referenzmodells. Neben dem eigentlichen Zugriffsprotokoll einschließlich der Prioritätsmechanismen sind folgende Größen bei einer verkehrstheoretischen Modellierung leistungsbestimmend:

- Paketgröße der zu übertragenden Nutzinformation (Daten und Sprache)
- Benötigte Steuerinformation zur Übermittlung der Nutzinformation
- Übertragungsgeschwindigkeit auf dem Medium
- Signallaufzeit und stationsinterne Verzögerungszeiten
- Anzahl aktiver Stationen
- Anzahl Warteplätze pro Station für eintreffende Sprach- bzw. Datenpakete

Auf die Besonderheiten der einzelnen Zugriffsprotokolle bei den standardisierten LANs wird im folgenden näher eingegangen.

3.4.1 CSMA/CD

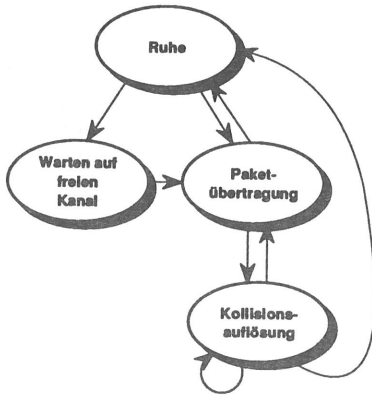


Bild 3.14: Zustandsautomat des CSMA/CD-Zugriffs-Protokolls

Stationen in einem nach dem CSMA/CD-Standard [69] arbeitenden Lokalen Netz regeln den Zugriff auf das gemeinsame Übertragungsmedium nach einem stochastischen Algorithmus. Jede Station beobachtet passiv den Kanalzustand, bis sie ein Paket zu übertragen hat (Zustand *Ruhe*). Ist der Übertragungskanal durch eine momentane Paketübertragung belegt, geht die Station in einen Wartezustand, bis die augenblickliche Paketübertragung auf dem Kanal abgeschlossen ist (Zustand *Warten auf freien Kanal*). Ist der Übertragungskanal frei, beginnt die Station ihr Paket zu senden (Zustand *Paketübertragung*). Beginnt keine weitere Station innerhalb der Zeit ein Paket zu senden, in der andere Stationen den Kanal als erneut belegt erkannt haben, so wird die Paketübertragung erfolgreich abgeschlossen (Bild 3.14).

Versuchen mehrere Stationen gleichzeitig Pakete zu übertragen, entstehen Kollisionen, d.h. Verfälschungen der übertragenen Pakete. Kollisionen treten nur auf, wenn Stationen innerhalb der Signallaufzeit zwischen den Stationen zu senden beginnen. Dies tritt vor allem nach dem Ende einer Paketübertragung auf, falls mehrere Stationen ihre Übertragungen aufgrund des belegten Kanals zurückgestellt haben.

Ist eine Kollision aufgetreten, brechen alle beteiligten Stationen ihre Übertragung ab und lösen die Kollision über einen sogenannten Back-Off-Algorithmus auf (Zustand *Kollisionsauflösung*). Der Algorithmus verzögert die abgebrochene Paketübertragung um eine zufällige Zeit (Back-Off-Zeit), um zu verhindern, daß sofort wieder eine Kollision durch die beteiligten Stationen erfolgt. Die Back-Off-Zeit wird stationsindividuell nach folgender Vorschrift bestimmt

$$t_{\text{Back-Off}} = \text{random}(0, \min(2^N, 2^{10})) * 2t_{LMAX} \quad (3.24)$$

wobei t_{LMAX} der maximalen Signallaufzeit auf dem Bus entspricht (Nach [69]: 51,2 μs) und N die Anzahl der Kollisionen dieses Pakets seit dem ersten Übertragungsversuch kennzeichnet. Treten 16 Kollisionen eines Pakets in Folge auf, wird dieses nicht mehr übertragen (Paketverlust). Das beim CSMA/CD-Protokoll vorgeschriebene Paketformat ist in Bild 3.15 dargestellt.

Präambel	SFD	Ziel- adresse	Sende- adresse	Längen- feld	Informations- feld	FCS
(7 Byte)	(1 Byte)	(2 oder 6 Byte)	(2 oder 6 Byte)	(2 Byte)	(64...1518 Byte)	(4 Byte)

Bild 3.15: Paketformat beim CSMA/CD-Protokoll

Jedes Paket beginnt mit einer Präambel zur Synchronisation der Empfangslogik der Stationen und einer Startkennung (SFD, Start Frame Delimiter). Es folgen Ziel- und Senderadresse. Daran anschließend wird die Länge der zu übertragenden Nachricht übertragen. Abgeschlossen wird der Rahmen mit einer Prüfsumme (FCS, Frame Check Sequence). Die zu übertragende Nutzinformation darf pro Paket 1500 Byte nicht überschreiten, und bei weniger als 64 Byte Nutzinformation muß das Paket bis zu dieser minimalen Nutzinformationslänge mit Stopfbits aufgefüllt werden. Zwischen zwei aufeinander folgenden Paketübertragungen muß außerdem ein minimaler Abstand (Inter Frame Spacing) von 9,6 µs garantiert werden.

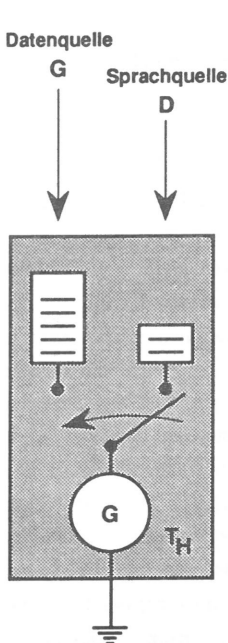


Bild 3.16: Modell einer Station für Sprach- und Datenübertragung in einem CSMA/CD-LAN

Bei der verkehrstheoretischen Modellierung einer Station in einem CSMA/CD-LAN muß deshalb je Station eine Ersatz-"Bedienphase" vorgesehen werden, die die Übertragung eines Pakets gemäß dem CSMA/CD-Protokoll nachbildet (Bild 3.16). Diese Bedienphase beinhaltet auch die Wartezeit, bis der Kanal frei ist, die Paketübertragungszeit sowie eine mögliche Back-Off-Zeit; repräsentiert wird diese Bedienphase durch die ZV T_H . Weitere Pakete werden zwischenzeitlich in einer Warteschlange gespeichert, bis die Bedieneinheit wieder frei wird.

Eine Priorisierung von Sprachpaketen durch das Zugriffsprotokoll ist im CSMA/CD-Standard nicht vorgesehen, dennoch kann stationsintern durch geeignete Mechanismen eine bevorzugte Abarbeitung von Sprachpaketen gegenüber Datenpaketen erfolgen. Dazu müssen zwei getrennte Warteschlangen für eintreffende Anforderungen vorhanden sein. Eine Warteschlange nimmt nur Datenpakete, die andere nur Sprachpakete auf (Bild 3.16). Durch eine geeignete Zuteilungsstrategie können wartende Sprachpakete bevorzugt abgefertigt werden. Sobald die Bedieneinheit leer ist, werden immer zuerst Pakete aus der Sprachwarteschlange bedient. Nur für den Fall, daß bei Bedienung sich kein Sprachpaket in der Warteschlange befindet, wird zur Datenwarteschlange *umgeschaltet* und ggf. von dort ein Paket in die Bedieneinheit übernommen. Dieser Prioritätsmechanismus ist noch standardkonform und erlaubt eintreffenden Sprachpaketen ein "Überholen" wartender

Datenpakete. Lediglich das aktuell auf die Kanalübertragung wartende Paket kann nicht überholt werden, da es in der Zugriffseinheit bereits auf die Kanalzuteilung wartet. Die Paketankünfte werden durch die oben beschriebenen Modelle für Sprach- und Datenquellen nachgebildet.

3.4.2 Token-Bus

Beim Token-Bus Standard [70] sind alle Stationen passiv an einen gemeinsamen Bus angekoppelt. Die Stationen bilden durch ihre physikalischen Adressen einen logischen Ring, da jede Station die Adressen ihrer Nachbarstationen kennt (Bild 3.17). Während der Initialisierung des Systems und bei Konfigurationsänderungen werden die Adresszuordnungen neu vergeben. Auf dem logischen Ring wird die Sendeberechtigung (Token) von jeder Station zur jeweils nachfolgenden Station, in Richtung absteigender Stationsadressen, weitergegeben.

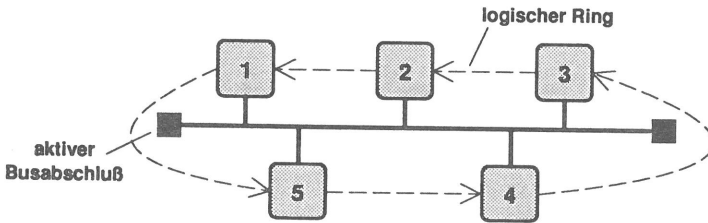


Bild 3.17: Physikalische und logische Topologie des Token-Bus

Erhält eine Station das Token, so darf sie Pakete übertragen (Zustand *Token empfangen*). Die Sendedauer jeder Station wird über ein Timer-gesteuertes Zugriffsprotokoll begrenzt, damit eine gerechte Zuteilung der zur Verfügung stehenden Bandbreite auf alle Stationen gewährleistet ist (Zustand *Sendedauer bestimmen*). Ist der interne Token Hold Timer bei der momentan sendeberechtigten Station abgelaufen oder hat die Station kein Paket zu übertragen, wird das Token zur nächsten Station weitergegeben (Zustand *Tokenweitergabe*). Die Station hört auf dem Bus mit, ob nach ihrer Tokenweitergabe eine gültige Datenübertragung erfolgt (Zustand *Überprüfung Tokenweitergabe*). Ist dies der Fall, geht die Station davon aus, daß die nachfolgende Station das Token korrekt erhalten hat. Registriert die Station innerhalb einer gewissen Zeit keine weitere gültige Datenübertragung, generiert sie ein neues Token und sendet dieses nochmals zur nächsten Station. Falls wiederum innerhalb einer festgelegten Zeitspanne keine gültige Datenübertragung erfolgt, nimmt die Station an, daß sich ihre nachfolgende Station aus dem logischen Ring abgeschaltet hat und sendet ein spezielles Steuerpaket (Who-Follows-Frame), um eine Umkonfigurierung des logischen Rings einzuleiten. Bild 3.18 zeigt den Zustandsautomaten für das Token-Bus Zugriffsprotokoll.

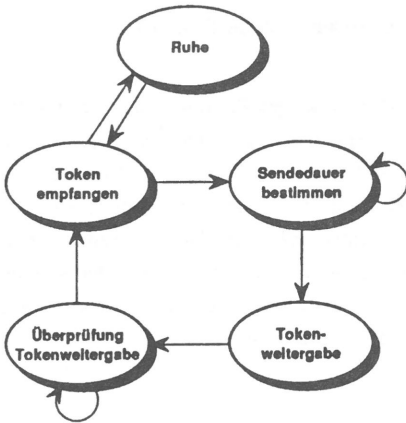


Bild 3.18: Zustandsautomat für das Token-Bus Zugriffsprotokoll

Um neue Stationen in den logischen Ring aufnehmen zu können, wird zu äquidistanten Abständen ein Anfrage-Paket (Solicit-Successor-Frame) von der momentan sendeberechtigten Station generiert, bevor sie das Token weitergibt. Meldet sich innerhalb der Response-Window-Time eine neue Station, wird mittels eines festgelegten Protokolls die neue Station in den logischen Ring aufgenommen.

Das MAC-Zugriffsprotokoll des Token-Bus unterscheidet bis zu 4 Prioritätsklassen und garantiert für die höchste Prioritätsklasse eine maximale Übertragungszeit. Damit scheinen sich Token-Bus Systeme für paketierte Sprachübertragung besonders zu eignen. Die Klasse mit der höchsten Priorität wird *High Priority Class* genannt, die restlichen Klassen werden als *Access Class 4, 2, 0* mit absteigender Priorität bezeichnet. Jede Station besitzt für jede Zugriffs-

klasse einen internen Timer. Der Wert des *Hi-Pri-Token Hold Timers* der höchsten Prioritätsklasse begrenzt die maximale Sendezeit einer Station. Dieser Wert wird bei der Tokenankunft in den sogenannten *Token Hold Timer* geladen. Den niederen Prioritätsklassen ist jeweils eine maximale Tokenumlaufzeit (Target Token Rotation Time, TTRT) zugeordnet. Für jede dieser 3 Prioritätsklassen wird mittels sogenannter *Token Rotation Timern* die Zeit zwischen zwei aufein-

Datenformat

Präambel	SD	FC	Ziel-adresse	Sende-adresse	Informations-feld	FCS	ED
(>1 Byte)	(1 Byte)	(1 Byte)	(2 oder 6 Byte)	(2 oder 6 Byte)	(0...8174 Byte)	(4 Byte)	(1 Byte)

Tokenformat

Präambel	SD	FC	DA	SA	FCS	ED
(>1 Byte)	(1 Byte)	(1 Byte)	(2 oder 6 Byte)	(2 oder 6 Byte)	(4 Byte)	(1 Byte)

Bild 3.19: Rahmenformate beim Token-Bus Standard IEEE 802.4

anderfolgender Tokenankünften in einer Station gemessen (Token Rotation Time, TRT).

Ist eine Station sendeberechtigt, werden zuerst alle Pakete der höchsten Prioritätsklasse übertragen, läuft die Zeit des Token Hold Timers während einer Übertragung ab, wird diese Übertragung noch vollständig durchgeführt und erst danach das Token weitergegeben. Sind keine Pakete in der höchsten Prioritätsklasse zu übertragen und ist der Token Hold Timer noch nicht abgelaufen, können Pakete der nächstniederen Prioritätsklasse gesendet werden, falls ihre Target Token Rotation Time größer als die augenblicklich gemessene Token Rotation Time ist. In einer der unteren 3 Prioritätsklassen darf nur gesendet werden, wenn sowohl bei allen höherpriorären Klassen kein Sendewunsch mehr vorliegt als auch der Token Hold Timer noch nicht abgelaufen ist.

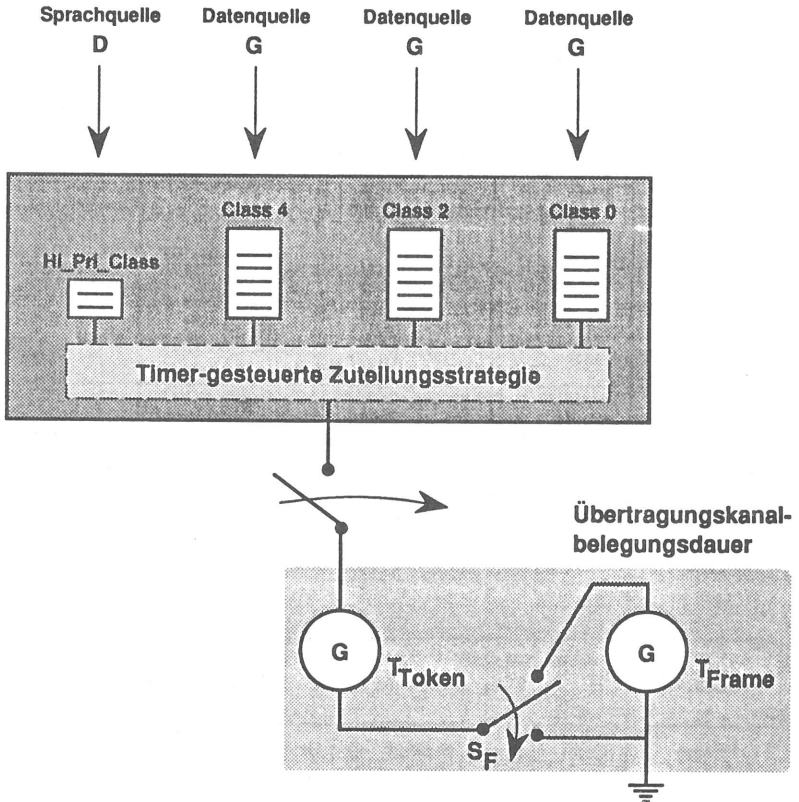


Bild 3.20: Modell einer Token-Bus Station

Das Rahmenformat für den Token-Bus unterscheidet zwei Arten: Datenrahmen und Steuerrahmen (Bild 3.19). Jedem Rahmen ist eine Präambel vorgestellt, um die Empfangseinrichtungen aller Stationen auf den Paketrahmen zu synchronisieren. Beginn und Ende eines Rahmens werden durch zwei Begrenzungsfelder mit je 1 Byte markiert (Start Delimiter, SD bzw. End Delimiter, ED). Die Unterscheidung zwischen Daten bzw. Steuerrahmen erfolgt im Frame Control Feld (FC, 1 Byte). Daran anschließend folgen Start- und Zieladresse, die 2 oder 6 Byte lang sein können sowie das eigentliche Datenfeld mit maximal 8175 Byte Länge. Mittels einer Blockfehlersicherung (Frame Check Sequence, FCS, 4 Byte) werden fehlerhafte Paketübertragungen erkannt. Bei Steuerrahmen, wie z.B. dem Token, wird die Zieladresse durch die Adresse der nächsten Station repräsentiert.

Das verkehrstheoretische Modell einer Token-Bus Station ist in Bild 3.20 dargestellt. Es umfaßt 4 Warteschlangen, je Prioritätsklasse eine. Bei vorhandener Sendeberechtigung (Tokenempfang) wird gemäß dem oben beschriebenen Timer-gesteuerten Prioritätsverfahren die zu übertragende Nachricht aus der jeweiligen Warteschlange gesendet. Die Übertragungszeit für eine Nachricht wird durch die ZV T_{Frame} nachgebildet. Falls eine Station bei Tokenempfang keine Nachrichten zu übertragen hat, findet keine Paketübertragung statt, was durch den Schalter S_F modelliert wird. Die ZV T_{Token} repräsentiert die Tokenweitergabezeit zwischen zwei benachbarten Stationen, die in jedem Fall verstreicht, bis die nächste Station sendeberechtigt wird.

3.4.3 Token-Ring

In einem Lokalen Netz, das nach dem IEEE 802.5 Standard arbeitet, sind die einzelnen Stationen aktiv über unidirektionale Segmente ringförmig miteinander verbunden. In einer Station empfangene Signale werden regeneriert und zur nachfolgenden Station weitergesendet (Bild 2.5b).

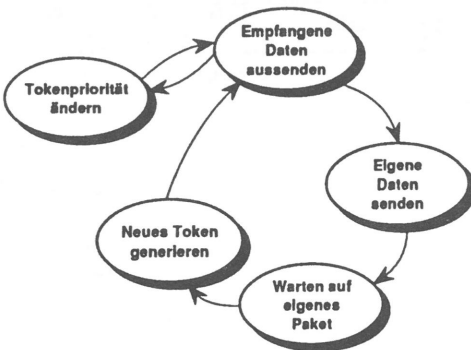


Bild 3.21: Zustandsautomat für das Token-Ring Zugriffsprotokoll nach IEEE 802.5

Das Zugriffsprotokoll für Token-Ring Systeme kann durch einen 5-stufigen Zustandsautomaten beschrieben werden (Bild 3.21). Diejenige Station, die das Token (Sendeberechtigung) besitzt, kann Nachrichten auf den Ring aussenden (Zustand *Eigene Daten senden*). Die ausgesandte Nachricht läuft auf dem Ring um und wird von der sendenden Station wieder vom Ring gelöscht und ein

neues Token zur nächsten Station ausgesendet (*Zustand Warten auf eigenes Paket*). Während die Nachricht auf dem Ring umläuft, prüft jede Station die Empfangsadresse der Nachricht und legt eine Kopie derselben in ihrem Empfangsspeicher ab, falls die Nachricht für sie bestimmt ist (*Zustand Empfangene Daten aussenden*). Empfängt die Station das Token, welche die Tokenpriorität erhöht hat, generiert diese ein neues Token mit der zuvor gültigen niederen Priorität (*Zustand Tokenpriorität ändern*).

Beim Token-Ring Zugriffsverfahren können bis zu 8 Prioritätsklassen unterschieden werden. Ist eine Station sendeberechtigt, kann sie Nachrichten senden, bis der stationsinterne Token Hold Timer abgelaufen ist oder im Paketkopf der ausgesendeten Nachricht eine andere Station eine höhere Priorität beantragt. Tritt eine dieser Bedingungen ein, so wird das Token mit der entsprechenden Priorität weitergegeben.

Das Rahmenformat des Token-Ring Standards unterscheidet sich nur geringfügig von dem Rahmenformat, das beim Token-Bus Standard eingesetzt wird; es ist lediglich um das Access Control Byte (AC) und das Frame Status Byte (FS) erweitert (Bild 3.22). Insbesondere ist das AC-Byte wichtig, da es neben dem Token Bit 3 bit zur Kennzeichnung der aktuellen Prioritätsklasse und 3 bit zur Anmeldung (Reservierung) einer höheren Prioritätsklasse enthält. Das Tokenformat ist ein verkürztes Datenrahmenformat, das nur aus dem Start-of-Frame-Delimiter, dem Access Control Byte und dem End-of-Frame-Delimiter besteht.

Datenformat

SD	AC	FC	Ziel- adresse	Send- adresse	Informations- feld	FCS	ED	FS
(1 Byte)	(1 Byte)	(1 Byte)	(2 oder 6 Byte)	(2 oder 6 Byte)	(>1 Byte)	(4 Byte)	(1 Byte)	(1 Byte)

Tokenformat

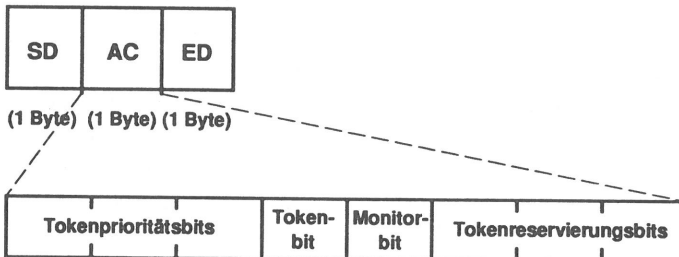


Bild 3.22: Rahmenformate beim Token-Ring Standard IEEE 802.5

Die Priorisierung des Zugriffsprotokolls wird über die Prioritäts- und Reservierungsbits im AC-Feld gesteuert. Jede Station schreibt ihre beantragte Priorität (Reservierung) in das Reservierungsfeld des AC-Bytes, falls die dortige Reservierung kleiner ist. Sendet die momentan sendeberechtigte Station in einer niederen Priorität, so gibt sie das Token mit der angemeldeten höheren Priorität auf den Ring und speichert ihren Prioritätszustand ab. Sobald das Token mit der höheren Priorität wieder bei der Station eintrifft, wird der abgespeicherte Zustand vor der Prioritätserhöhung wieder hergestellt. Die Station kann dann ihre Übertragungen in der bisherigen Prioritätsklasse fortsetzen, falls keine erneute Reservierung stattgefunden hat. Übertragungen niederer Priorität können über diesen Mechanismus zurückgestellt werden, bis alle Nachrichten auf höherer Priorität übertragen sind. Für die höchste Prioritätsklasse läßt sich ebenfalls eine maximale Übertragungszeit, die von der Anzahl der Stationen und der Token Hold Time abhängig ist, angeben.

Für eine Station innerhalb eines Token-Ring LANs ergibt sich ein verkehrstheoretisches Modell gemäß Bild 3.23. Danach besitzt jede Station 8 Warteschlangen entsprechend den 8 Prioritäts-

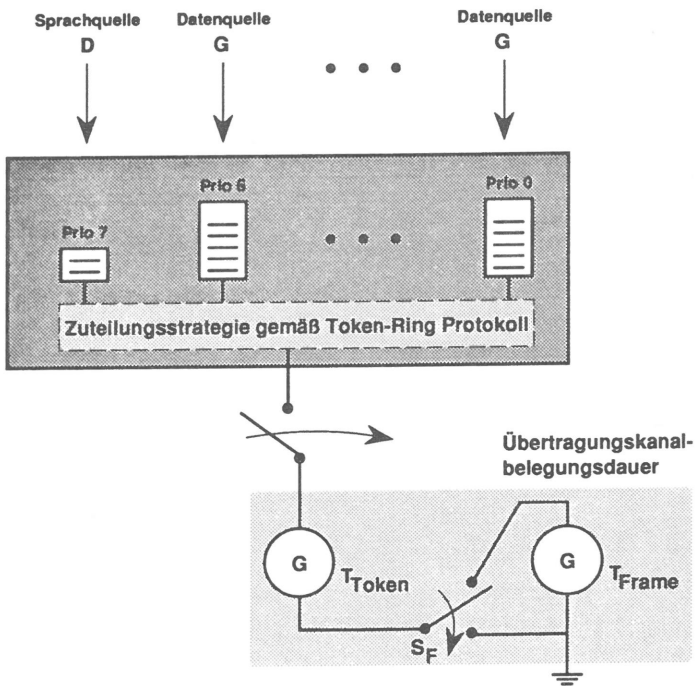


Bild 3.23: Modell einer Token-Ring Station

klassen. Die Token-Ring Zugriffssteuerung legt die Reihenfolge der Bedienungen der Warteschlangen fest. Die Bediendauer einer Nachricht wird durch die ZV T_{Frame} repräsentiert. Die Weitergabe des Tokens zwischen zwei benachbarten Stationen wird durch die ZV T_{Token} modelliert und der Schalter S_F bildet Stationen nach, die bei Tokenankunft keine Nachrichten zu übertragen haben, bzw. aufgrund der aktuellen Tokenpriorität keine Nachricht übertragen dürfen. Das Modell ist ähnlich dem verkehrstheoretischen Modell des Token-Bus, da beide Lokalen Netze ein Token Passing-Verfahren zur Vergabe der Bandbreite benutzen.

4 SYSTEMVERHALTEN BEI SPRACH-/DATEN- INTEGRATION

Grundsätzlich lassen sich drei Betriebszustände für ein paketvermittelndes System abgrenzen:

- *Niederlast*; in diesem Bereich ist die Kapazität des Vermittlungssystems mehr als ausreichend, um die geforderten Vermittlungsaufgaben zu erfüllen,
- *Hochlast*; in diesem Bereich wird das Vermittlungssystem zum Engpaß der gesamten Übertragung. Dies zeigt sich durch einen drastischen Anstieg der Übermittlungszeiten verglichen mit den Werten bei Niederlast,
- *Überlast*; in diesem Bereich übersteigt die Verkehrsbelastung die Nennkapazität des Systems [123].

Für die Entwicklung bzw. die Dimensionierung eines Vermittlungssystems ist es notwendig, diese drei Bereiche abzugrenzen. Das System ist so zu dimensionieren, daß bei gegebenem Verkehrsangebot die Nennkapazität des Vermittlungssystems nicht überschritten wird. Der Überlastzustand kann aus den systembestimmenden Parametern in aller Regel abgeleitet werden [62,151]; um einen hohen Durchsatz im Überlastfall zu erreichen, sind zweckmäßige Überlastabwehrstrategien vorzusehen.

Aus der Sicht des Netzbetreibers ist auch der Hochlastfall zu vermeiden, da aufgrund des hohen Verkehrsangebots ein erhöhter Protokoll- bzw. Signalisierungsaufwand entsteht und das Vermittlungssystem dadurch ineffizient arbeitet. Steigt beispielsweise bei einem LAN mit CSMA/CD-Protokoll das Angebot, so treten mit höherer Wahrscheinlichkeit Kollisionen auf, was zu einer erhöhten Protokollsteuerung (Back-Off-Mechanismus) führt.

Soll bei LANs neben der Datenübertragung zusätzlich Sprachkommunikation möglich sein, sind für das Gesamtsystem die Bereiche Niederlast und Hochlast zu bestimmen, aber auch für die Teilbereiche der Daten- bzw. Sprachkommunikation existieren jeweils die genannten Lastbereiche. Von besonderem Interesse ist dabei, in wieweit die priorisierte Sprachkommunikation Datenübertragungen zurückdrängt und dadurch das Lokale Netz aus der Sicht der Datenkommunikation den Hoch- oder gar Überlastbereich erreicht. Setzt man voraus, daß eine Station sowohl Sprachinformation als auch Daten über das Netz übertragen kann, wird sich die Priorisierung der Sprachkommunikation zum einen auf das Verhalten dieser Station auswirken, zum anderen kann sich die priorisierte Sprachübertragung auch auf die Leistungsfähigkeit derjenigen Stationen auswirken, die nur reine Datenkommunikation unterstützen. Um dieses z.T. komplexe Systemverhalten zu untersuchen, wurden,

basierend auf den in Kapitel 3 beschriebenen Quell- und Netzmodellen, vergleichende Simulationen durchgeführt.

4.1 Zeittreue Simulation

Bei der Verkehrssimulation wird das Ablaufgeschehen eines Verkehrsmodells mittels einer Programmiersprache auf einen Digitalrechner abgebildet. Um genaue Ergebnisse für die verschiedenen Lokalen Netze bei gemeinsamer Sprach- und Datenkommunikation zu erhalten, wurde die zeittreue Simulation eingesetzt (Event-by-Event Simulation). Das Ablaufgeschehen wird bei dieser Art der Simulation durch eine Abfolge von Ereignissen nachgebildet, die zu diskreten Zeitpunkten Änderungen des Systemzustands bewirken. Ereignisse, wie z.B. eine Sprachpaketankunft oder das Übertragungsende eines Pakets, lösen dabei Aktionen aus (z.B. Beginn einer Paketübertragung oder Einreihen in eine Warteschlange). Die zeitliche Abfolge dieser Ereignisse wird in einer Liste (Kalender) geführt, die je nach Ereignis bzw. ausgelöster Aktion neue Ereigniszeitpunkte bestimmt, die dann ihrerseits in den Kalender eingetragen werden. Der Kalender ist entsprechend der zeitlichen Reihenfolge der einzelnen Systemereignisse geordnet. Nach der Bearbeitung des aktuellen Ereignisses wird das nächste Ereignis im Kalender bestimmt und bearbeitet; die dazwischen liegende Zeitspanne wird nur simuliert. Die leistungsbezogenen Kenngrößen wie Durchsatz, Wartezeiten etc. werden durch Messungen im simulierten System gewonnen.

4.2 Leistungsbeeinflussende Parameter

Die Leistungsfähigkeit Lokaler Netze hängt grundlegend von folgenden Größen ab:

- Ausbreitungsgeschwindigkeit
- Übertragungsrate
- Netzausdehnung
- Paketlänge
- MAC-Protokoll
- Anzahl aktiver Stationen
- Verkehrsangebot
- Sprachintegrationsverfahren.

Fehler auf dem Übertragungsmedium können zudem die Leistungsfähigkeit Lokaler Netze negativ beeinflussen, da jedoch per Definition eine extrem kleine Bitfehlerwahrscheinlichkeit ($<10^{-9}$) zu garantieren ist, können diese Einflüsse vernachlässigt werden. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist eine nahezu konstante Größe für jedes Medium; bei Lokalen Netzen wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit ca. $2 \cdot 10^8$ m/s angesetzt. Eine weitere feste Größe ist die Übertragungsrate. Sie kann zwar während des Systemdesigns festgelegt werden, eine Änderung in einer bestehenden Realisierung ist nur bedingt möglich. Bei den in Kapitel 3 genannten LANs ist die Übertragungsrate zudem Gegenstand der einzelnen Standards und dort eindeutig spezifiziert [69,70,71]. Die Netzausdehnung bestimmt die Verzögerungszeiten bei der Übertragung; bei großen Leitungslängen kann dies zu Durchsatzeinbrüchen führen, welche über geeignete Protokolle, so z.B. die Entwicklungen im Bereich der HSLANs, ausgeglichen werden.

Bei Lokalen Netzen spielt die Paketlänge ebenfalls eine leistungsbestimmende Rolle, wobei als Paketlänge die Gesamtheit aller Bits pro Paket zu verstehen ist. Neben der zu übertragenden Nutzinformation enthält jedes Paket noch Steuerinformation, und das Verhältnis Nutzinformation zu gesamter Paketlänge kennzeichnet das Systemverhalten. Dieser Protokoll-Overhead ist durch das gewählte MAC-Protokoll vorgegeben, so daß nur durch die Wahl der Nutzinformation pro Paket Einfluß auf die Charakteristik des Systems genommen werden kann.

Das MAC-Protokoll realisiert die Vermittlungsfunktionen und bestimmt somit im wesentlichen die Eigenschaften eines LANs. Im Rahmen dieser Arbeit sollen verschiedene MAC-Protokolle auf ihre Eignung für eine Integration von Sprach-/Datenkommunikation untersucht werden. Der durch die Sprachintegration notwendige erhöhte Steuerungsaufwand wird sich bei den unterschiedlichen LAN-Systemen auf ihre Leistungsfähigkeit auswirken. Eine Sprachintegration wird zudem abhängig sein von dem eingesetzten Sprachübertragungsverfahren. So wird eine PCM-Sprachübertragung aufgrund des deterministischen Verhaltens das Lokale Netz anders belasten als eine PCM-Sprachübertragung mit Sprachpausenreduktion.

4.3 Vergleich und Leistungsbewertung der standardisierten Lokalen Netze

Aus der Sicht der Sprachanwendungen ist bei der Integration von Sprach- und Datenkommunikation die Warte- bzw. Transferzeit für eine Sprachübertragung das entscheidende Leistungsmerkmal; für paketierte Sprachübertragung ist eine kurze Wartezeit zu fordern (siehe Kap. 2.2.3). Aus der Sicht der Datenanwendungen ist i.a. auch noch ein hoher Durchsatz wünschenswert. Deshalb werden diese Größen für die Leistungsbewertung und den Vergleich der verschiedenen LANs herangezogen. Da die Sprachintegration in jedem Fall durch eine Priorisie-

zung innerhalb des Lokalen Netzes erfolgt, zum einen innerhalb einer Station, zum anderen auch systemweit über das gesamte Übertragungsmedium hinweg, ist der zu erwartende Verdrängungseffekt für bestehende Datenverbindungen stationsintern wie auch systemweit zu beurteilen.

Der Einfluß der Übertragungsrate, sowie die Anzahl aktiver Stationen und der Einfluß unterschiedlicher Paketlängen auf Lokale Netze bei reiner Datenkommunikation wurden bereits ausführlich untersucht [19,62,151]. Vergleichende Untersuchungen unter dem Gesichtspunkt einer möglichen Sprachintegration, die das Systemverhalten bei unterschiedlichen Paketlängen und unterschiedlichen Sprachquellmodellen betrachtet, sind jedoch nicht bekannt.

Für die folgenden Untersuchungen wurden für alle Systeme einheitlich folgende Annahmen getroffen: Als Übertragungsrate wurde 4 Mbit/s gewählt, und die Anzahl aktiver Stationen, die Datenverkehr auf das LAN bringen, wurde zu 100 Stationen festgelegt. Das Gesamtangebot an Datenverkehr wurde zu 50% der Übertragungsrate bei einer symmetrischen Lastaufteilung auf alle Stationen angenommen. Dieser Wert ist für heutige LAN-Installationen relativ hoch angesetzt [54]; um jedoch das Hochlastverhalten der Systeme bei zusätzlich steigendem Sprachverkehrsangebot zu zeigen, ist diese Annahme zu rechtfertigen.

Als Variable wurde die Anzahl aktiver Sprachverbindungen gewählt (eine Sprachverbindung besitzt zwei Teilnehmer, die über das Lokale Netz miteinander Sprachpakete austauschen). Anzumerken ist, daß eine Erhöhung der aktiven Sprachverbindungen nicht die Anzahl aktiver Stationen am LAN verändert, sondern innerhalb einer *Datenstation* zusätzlich ein Verkehrsangebot an priorisierten Sprachpaketen erzeugt, entsprechend dem gewählten Sprachquellmodell. Ein Multiplexen mehrerer Sprachverbindungen innerhalb einer Station wird ebenfalls nicht betrachtet, d.h. pro Station kann maximal ein Sprecher aktiv sein. Diese Annahme wurde in Anlehnung an die Standardisierungsaktivitäten von IEEE 802.9 [73] gemacht.

4.3.1 Einfluß der Paketlänge

Die Wahl der Paketlänge spielt bei der Integration von Sprache in Lokalen Netzen eine entscheidende Rolle. Erstens muß ein Optimum für die Sprachpaketlänge gefunden werden, damit die Laufzeit der Sprachpakete durch das Netz minimal wird (siehe Kap. 2.2.3); zweitens basieren die Sprachintegrationsverfahren auf einer nichtunterbrechenden Priorisierung der augenblicklich durchgeführten Datenpaketübertragung. Dies würde für kurze Paketlängen sprechen, andererseits

führen kurze Paketlängen zu einem schlechteren Verhältnis von Nutzinformation zu gesamter Paketlänge.

4.3.1.1 Sprachpaketlänge

Gemäß Kap. 2.2.2.1 setzt sich die Gesamtverzögerung einer paketierte Sprachübertragungsstrecke aus der Paketierungszeit t_{Pack} , der Übermittlungsverzögerung $t_{ü,D}$ und der Verzögerungszeit t_{Verz} im Depaketierer zusammen. Die Transferzeit t_T durch ein Lokales Netz ergibt sich aus der Wartezeit t_{WV} und der Übermittlungsdauer $t_{ü}$ (Übertragungsdauer sowie Ausbreitungsverzögerung) auf dem Kanal. Die Wartezeit t_{WV} ist dabei die Zeit zwischen dem Ende der Paketierungszeit des Sprachpakets, bis dieses Sprachpaket den Übertragungskanal zugeteilt bekommt (siehe auch Bild 2.10). Zu minimieren gilt es die Summe aus der Paketierungszeit t_{Pack} , der Wartezeit t_{WV} und der Übermittlungsdauer $t_{ü}$:

$$\min\{t_G\} = \min\{t_{Pack} + t_{WV} + t_{ü}\} \quad . \quad (4.1)$$

Die Paketierdauer t_{Pack} ergibt sich gemäß Gl. 3.8 zu

$$t_{Pack} = \frac{L_{PV}}{Q_V} \quad , \quad (4.2)$$

und die Übermittlungsdauer $t_{ü}$ setzt sich zusammen aus der Paketübertragungsdauer und der Signallaufzeit zu

$$t_{ü} = \frac{L_{PV} + L_O}{v} + \frac{l_r}{0,7 * c} \quad (4.3)$$

mit

- L_O = Paket-Overhead
- v = Übertragungsrate
- l_r = Länge des Übertragungskanals
- c = Lichtgeschwindigkeit.

Die zu minimierenden Größen t_{Pack} und $t_{ü}$ sind von der gewählten Sprachpaketlänge abhängig; die Wartezeit t_{WV} ist vom Zugriffsprotokoll des jeweiligen LANs abhängig. Für die standardisierten Lokalen Netze CSMA/CD bzw. für die Token Passing-LANs sind nur approximative Analysen bekannt [62,139,162]. Für die Klasse der Token Passing-LANs kann jedoch unter der Annahme deterministischer Sprachankünfte und konstanter Paketlängen bei reinem Sprachverkehr eine Abschätzung der Sprachpaketwartezeit t_{WV} angegeben werden.

Betrachtet man ein Token Passing-LAN mit N Sprachstationen und definiert die Zeit zwischen zwei aufeinanderfolgenden Bedienungen (Sprachpaketübertragungen) bei einer Station als Zykluszeit t_C , ist diese Zykluszeit gemäß Gl 4.4 definiert zu

$$t_C = N \cdot t_{Token} + \alpha N t_{\ddot{u}} \quad (4.4)$$

Die Zeit t_{Token} kennzeichnet dabei die Tokenweitergabezeit zwischen zwei Stationen, und der zweite Term repräsentiert die mit der Wahrscheinlichkeit α auftretende Bedienung einer Sprachstation in diesem Zyklus. Für α gilt

$$\alpha = \frac{t_C}{t_{Pack}} \quad , \quad \alpha < 1 \quad , \quad (4.5)$$

da jedes Sprachpaket innerhalb der Zeit t_{Pack} bedient werden muß, damit keine Instabilitäten auftreten.

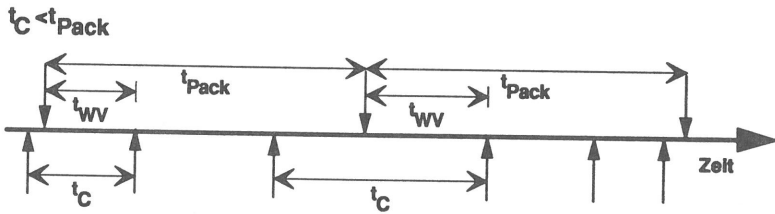


Bild 4.1: Zeitlicher Zusammenhang zwischen t_{WV} und t_C

Aufgrund der Stabilitätsbedingung $\alpha < 1$ muß für die Wartezeit t_{WV} folgende Bedingung gelten (siehe Bild 4.1)

$$0 < t_{WV} < t_C \quad (4.6)$$

Mit Gl 4.6 läßt sich somit die Wartezeit t_{WV} durch die obere Schranke t_C abschätzen. Der Verlauf der drei Größen t_{Pack} , t_C und $t_{\ddot{u}}$, sowie deren Summe t_G , in Abhängigkeit des Verhältnisses von Nutzinformation zu Paketoverhead, ist in Bild 4.2 aufgetragen. Deutlich ist das Minimum im Kurvenverlauf der Summenverzögerungszeit t_G zu erkennen, das im wesentlichen durch die Wartezeit t_{WV} und die Paketierungszeit t_{Pack} gebildet wird.

Die Paketübermittlungszeit $t_{\ddot{u}}$ hat bei LAN-üblichen Übertragungsraten (>1 Mbit/s) keinen signifikanten Einfluß auf die Wahl der Sprachpaketlänge. Wird das Verhältnis von Sprachinformationslänge zu Paket-Overhead zu klein, steigt der Sprachpaketverzögerung t_G stark an; die Paketsteuerinformation pro übertragenes Paket bleibt konstant, die Nutzinformation wird jedoch

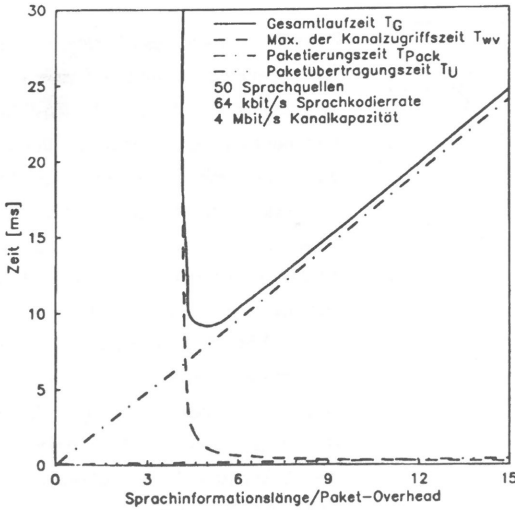


Bild 4.2: Sprachpaketlaufzeit bei Token Passing-LANs in Abhängigkeit des Verhältnisses von Nutzinformation zu Paket-Overhead

geringer. Geht man zu größeren Sprachinformationslängen über, dominiert die Sprachpaketierzeit t_{Pack} und bestimmt dadurch den Sprachpaketverzug t_G .

Die optimale Sprachpaketlänge liegt im Bereich zwischen 400 - 800 bit je nach Wahl der Parameter Paket-Overhead, Anzahl aktiver Sprachquellen, Kanalkapazität, Sprachkodierate und Laufzeit. Diese Werte decken sich mit simulativ ermittelten Werten [152,153]. Für die weiteren Untersuchungen wurde deshalb eine Paketierungsdauer t_{Pack} von 10 ms gewählt; dies entspricht bei 64 kbit/s-PCM einer Sprachpaketinformationslänge von 640 bit.

4.3.1.2 Datenpaketlänge

Bei einer priorisierten Sprachkommunikation in Lokalen Netzen ist zu klären, ob bzw. wie sich unterschiedliche Datenpaketlängen auf das Systemverhalten der Sprachpriorität auswirken. Dazu wurden, ausgehend von den in Kapitel 3 vorgestellten Modellen für die verschiedenen Lokalen Netze und Quellmodelle, simulative Untersuchungen durchgeführt, deren Ergebnisse in den folgenden Diagrammen dargestellt und erläutert werden. Die gewählten Parameter sind entsprechend Kap. 4.3 festgelegt worden.

Der Durchsatz der Sprachpakete für die drei standardisierten LANs ist in Bild 4.3 zu sehen. Variiert wurde das Sprachangebot bei zwei unterschiedlichen, jedoch konstanten Datenpaketlängen ($L_D=10000$ bit und $L_D=1000$ bit). Das Datenverkehrsangebot beträgt stets konstant 50% der Übertragungskapazität.

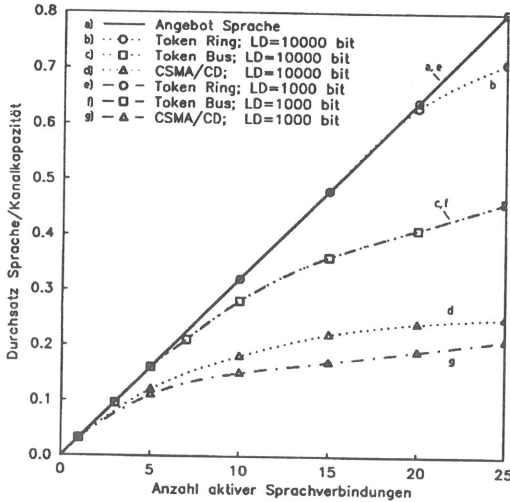


Bild 4.3: Normierter Sprachpaketdurchsatz bei den standardisierten LANs

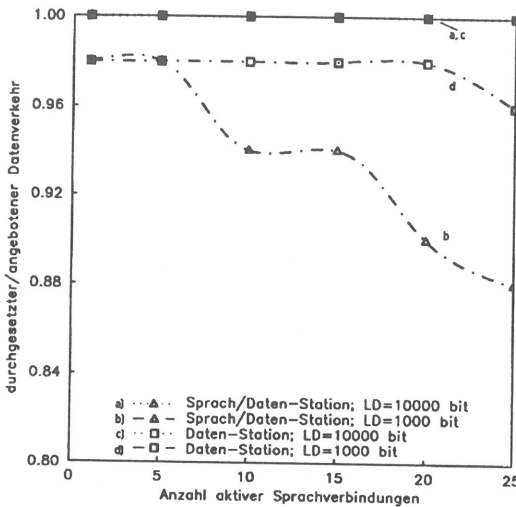


Bild 4.4: Normierter Datendurchsatz des CSMA/CD-Protokolls bei Sprach- / Daten- bzw. reinen Datenstationen

Betrachtet man das Angebot an Sprachpaketen, ist deutlich zu erkennen, daß das CSMA/CD-Protokoll bereits bei mehr als einer Sprachverbindung nicht mehr das gesamte Angebot an Sprachpaketen durchsetzen kann (Bild 4.3); d.h. bei einem Gesamtangebot von Sprach- und Datenverkehr von mehr als 0,53 Erl ist ein LAN nach CSMA/CD-Standard im Überlastbereich. Werden lange Datenpakete vorausgesetzt, ist ein höherer Durchsatz erzielbar. Dies deckt sich mit bekannten Untersuchungen zu CSMA/CD-Systemen [19,147].

Interessant ist der Verlauf des Durchsatzes für Datenpakete (Bild 4.4). Hier zeigt sich, daß bei langen Datenpaketen kein Einbruch des Durchsatzes festzustellen ist. Die geforderte Priorisierung der Sprachpakete gegenüber den Datenpaketen führt also weder im Hoch- noch im Überlastbereich zu einer bevorzugten Abfertigung der Sprachpakete. Die eingeführte stationsinterne Priorisierung der Sprachpakete ist zu *schwach*, um sich gegen das Datenangebot durchzusetzen.

Für die Sprachpakete wurden kleine senderseitige Eingangspuffer angenommen (2 Speicherplätze pro Warteschlange für Sprachpakete), um die Gesamtlaufzeit der Sprachpakete so gering wie möglich zu halten. Dies hat zur Folge, daß bei steigendem

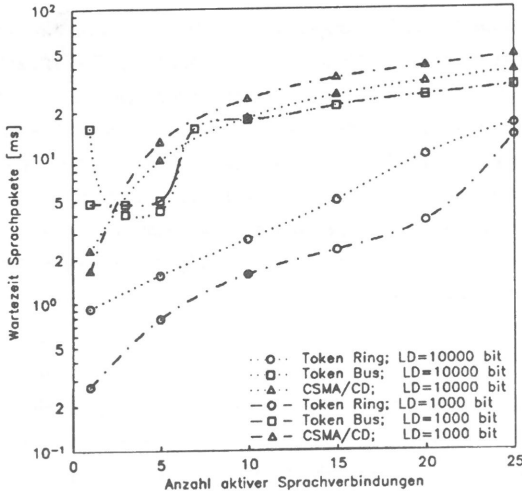


Bild 4.5: Mittlere Sprachpaketwartezeit der standardisierten LANs bei unterschiedlichen Datenpaketlängen

übertragen wollen. Aufgrund der relativ kurzen Sprachpaketlängen ist die Anzahl Kollisionen und der daraus resultierende Protokoll-Overhead, bezogen auf die Paketlänge, größer als bei langen Datenpaketen. Deshalb liegt der mögliche Durchsatz der Sprachpakete bei kurzen Datenpaketen ($L_D=1000$ bit) unter dem bei langen Datenpaketen ($L_D=10000$ bit).

Bedingt durch die probabilistische Kollisionsauflösung treten für einzelne Pakete sehr lange Wartezeiten auf. Die bei den Simulationen ermittelten maximalen Sprachpaketwartezeiten lagen um den Faktor 200 über den in Bild 4.5 dargestellten Mittelwerten. Selbst bei weitaus geringerer Last (5% Gesamtlast) lagen die Maximalwerte noch um den Faktor 30 höher als die mittleren Wartezeiten. CSMA/CD-basierende LANs sind deshalb nicht geeignet, eine Sprachintegration sinnvoll zu unterstützen.

Ein nach dem Token-Bus Standard arbeitendes Lokales Netz zeigt bei den gewählten Parametern für den Durchsatz der Sprachpakete (Bild 4.3) bessere Werte als ein LAN mit CSMA/CD-Zugriffprotokoll. Bei mehr als 6 Sprachverbindungen tritt auch hier ein Überangebot des Sprachverkehrs ein. Die Stabilitätsgrenze ist dann erreicht, wenn die Zykluszeit größer wird als die Sprachpaketierzeit. Die Zykluszeit ergibt sich aus der Summe aller Weiterreichungen des Tokens und den

Angebot die Sprachpaketwartespeicher volllaufen und es zu Verlusten kommt. Außerdem wurde bei allen Simulationen unterstellt, daß alle aktiven Sprecher nach der Paketierungszeit t_{Pack} gleichzeitig ihre Sprachpakete den LANs anbieten. Diese Annahme stellt einen Extremfall dar, der jedoch gerechtfertigt ist, da für an das öffentliche Fernsprechnet angeschlossene Nebenstellenanlagen (z.B. LANs) eine externe Taktversorgung (8 kHz), synchron zum öffentlichen Netz, gewährleistet werden muß. Treffen nun mehrere Pakete zeitgleich bei einem Lokalen Netz mit CSMA/CD-Protokoll ein, so treten vermehrt Kollisionen auf, da nach einer Paketübertragung mit hoher Wahrscheinlichkeit mehrere Stationen ein Sprachpaket

möglichen Sendedauern der einzelnen Stationen. Die Weitergabe des Tokens setzt sich aus der Übertragungsdauer des Tokens und der maximalen Signallaufzeit über den gesamten Bus zusammen. Bei einer Buslänge von ca. 10 km ergibt sich für die Tokenweitergabe zwischen zwei Stationen eine Zeit von 0.075 ms; für die angenommene Konfiguration mit 100 Stationen sind somit 7,5 ms ausschließlich für die Tokenweitergabe pro Zyklus notwendig, was 3/4 des zur Verfügung stehenden Sendefensters ausmacht, bis das nächste Sprachpaket zur Übertragung ansteht. Bei den gegebenen Parametern übersteigt die Zykluszeit bei mehr als 12 aktiven Sprachstationen die Paketierungsdauer von 10 ms, und es kommt zu Verlusten von Sprachpaketen aufgrund der begrenzten Sprachpaketspeicher (2 Sprachpaketspeicherplätze pro Station).

Der Durchsatz an Sprachinformation wird durch den niederpriorisierten Datenverkehr nicht beeinflusst. Änderungen der Datenpaketlänge wirken sich nicht auf das Verhalten des Sprachpaketdurchsatzes aus (Bild 4.3), da beim Token-Bus Zugriffsprotokoll niedere Prioritäten innerhalb einer Station erst dann bedient werden, wenn keine Anforderungen höherer Priorität mehr vorliegen. Die Sendedauer jeder Station wurde so gewählt, daß nur ein Paket (ein Sprachpaket oder ein Datenpaket) je Tokenempfang übertragen werden darf. Dadurch wird gewährleistet, daß für die höchste Priorität eine symmetrische Aufteilung der Übertragungsbandbreite auf alle sendeberechtigten Stationen erfolgt.

Damit ein Datenpaket in einer Station sendeberechtigt wird, darf kein Sprachpaket in dieser Station zur Übertragung anstehen, und zudem muß die Token Rotation Time der betrachteten Prioritätsklasse kleiner als die vorgegebene TTRT dieser Prioritätsklasse sein. Den in Bild 4.6 dargestellten Ergebnissen liegen Werte für die TTRT von 8 ms bei $L_D=10000$ bit bzw. 9,8 ms bei $L_D=1000$ bit zugrunde. Für die Wahl dieser TTRT-Werte für die Datenpriorität gilt folgende Betrachtung: Eine Datenpaketübertragung dauert 2,5 ms ($L_D=10000$ bit) bzw. 0,3 ms ($L_D=1000$ bit) bei einer Übertragungsrate von 4 Mbit/s. Eine Datenübertragung darf nur dann stattfinden, wenn dadurch die Zykluszeit der Sprachpriorität nicht signifikant größer wird als der Ankunftsabstand t_{Pack} der Sprachpakete. Wählt man die TTRT zu 8 ms (9,8 ms), darf eine Station nur dann ein Datenpaket senden, wenn ihre gemessene TRT noch kleiner als 8 ms (9,8 ms) ist. Durch eine Datenpaketübertragung steigt die aktuelle Zykluszeit geringfügig über den maximal zulässigen Wert von 10 ms, was zu keiner Benachteiligung der Sprachpriorität führt. Da der aktuelle Zyklus jedoch die TTRT der Datenpriorität überschritten hat, finden keine weiteren Datenpaketübertragungen in diesem Zyklus mehr statt.

Die Zykluszeit nimmt mit steigender Anzahl aktiver Sprachverbindungen zu, damit verkleinert sich das Sendefenster für die Datenpakete, was zu einem reduzierten Durchsatz an Datenpaketen führt.

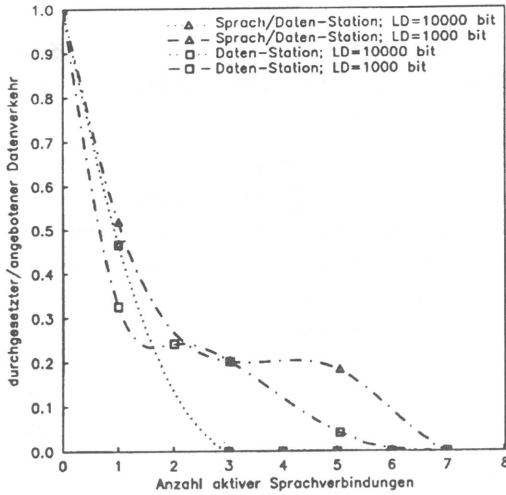


Bild 4.6: Normierter Datendurchsatz des Token-Bus Protokolls bei Sprach-/ Daten- bzw. reinen Datenstationen

Steigt die Zykluszeit über den Wert der TTRT für die Datenpriorität, so können keine Datenpakete mehr übertragen werden (Bild 4.6).

Lange Datenpakete ($L_D=10000$ bit) wirken sich negativ auf die Wartezeit der Sprachpakete aus (Bild 4.5). Solange die Zykluszeit kleiner als die TTRT ist, können Datenpakete gesendet werden, wobei das Token-Bus Protokoll ein Überziehen der TTRT durch die begonnene Nachrichtenübertragung erlaubt (nicht-unterbrechende Sendeberechtigung). Dieses Überziehen der Sendezeit einer Station ist proportional zur Paketlänge, d.h. lange Pakete aus der niederen Datenpriorität können den Übertragungskanal über die vorgesehene Zeit

TTRT hinaus belegen, was zu einem Anstieg der Wartezeit der Sprachpakete im Vergleich zu kurzen Datenpaketlängen ($L_D=1000$ bit) führt.

Unter bestimmten Parameterkonstellationen kann das Timer-gesteuerte Zugriffsprotokoll des Token-Bus Standards für die niedere Prioritätsklasse zu einer unfairen Vergabe der Übertragungsbandbreite führen. Einzelnen Stationen wird dabei ein größeres Sendefenster und damit ein prozentual größerer Anteil an der Gesamtkapazität des Übertragungskanals eingeräumt. Dieser Effekt ergibt sich, sobald die mittlere Zykluszeit geringfügig über dem Wert der TTRT für die niedere Prioritätsklasse liegt, das Angebot der höheren Prioritätsklasse jedoch so gewählt ist, daß die mittlere Zykluszeit kleiner als der mittlere Ankunftsabstand der Anforderungen der höheren Prioritätsklasse ist. Tritt diese Konstellation ein, treten Zyklen auf, in denen keine Anforderungen in der höheren Prioritätsklasse vorliegen, damit messen Datenstationen eine kleinere Zykluszeit (TRT) für die niedere Prioritätsklasse. Liegt diese Zeit unter der TTRT, so können Datenpakete übertragen werden. Dadurch steigt jedoch die TRT für die folgenden Stationen wieder an, so daß diese keine Daten übertragen dürfen. Dieses Verhalten ist deterministisch und führt zu stabilen Zyklen, in denen einzelne Stationen bei der Vergabe des Übertragungskanals bevorzugt werden. Zu sehen ist dies in Bild 4.6 an den unterschiedlichen Kurvenverläufen des Datendurchsatzes für eine

Datenpaketlänge von $L_D=1000$ bit. Ein ähnliches Systemverhalten, das gleichfalls zu vorhersagbaren Zyklen führt, ist in [125] für bestimmte Hochlastsituationen festgestellt worden.

Durch das Abbilden des Token Passing-Prinzips auf eine Bustopologie ist ein erhöhter Protokollaufwand notwendig, der direkt proportional zur Anzahl angeschlossener Stationen ist. Für kleine Token-Bus Systeme (ca. 10 Stationen) ist eine Integration von Sprach- und Datenkommunikation möglich. Dabei sollte die Nachrichtenpaketlänge für die niederen Prioritäten möglichst klein gewählt werden. Einen positiven Einfluß besitzt das Timer-gesteuerte Zugriffsprotokoll auf starke Schwankungen der Paketlängen und sogar auf hochvariante Paketankunftsprozesse, da das Protokoll glättend auf diese Varianzen reagiert, was sich insgesamt in einer Reduktion der Varianz der Übertragungszeiten auswirkt.

Als letzten Vertreter der standardisierten LANs soll das nach dem IEEE 802.5 Standard arbeitende Lokale Netz (Token-Ring) auf seine Leistungsfähigkeit bei der Integration von Sprach- und Datenkommunikation untersucht werden. Betrachtet man den Durchsatz der Sprachpakete (Bild 4.3), so kann mit einem Token-Ring LAN ein Sprachpaketangebot von bis zu 0,8 Erl durchgesetzt werden ($L_D=1000$ bit). Die Wartezeit für Sprachpakete liegt beim Token-Ring LAN ebenfalls deutlich unter den Werten, die sich für Token-Bus bzw. CSMA/CD-Systeme bei gleichen Parametern ergeben (Bild 4.5).

Ein Einfluß der Datenpaketlänge auf das Verhalten der Sprachpaketwartezeit sowie des Sprachpaketdurchsatzes ist erkennbar. Dies ist protokollbedingt, da wartende Sprachpakete aufgrund ihrer höheren Priorität ihren Sendewunsch in der aktuellen Datenpaketübertragung anmelden, diese jedoch nicht unterbrechen können. Deshalb führen lange Datenpakete ($L_D=10000$ bit) immer zu einer höheren mittleren Wartezeit der Sprachpakete (Bild 4.5). Im Grenzbereich zur Überlast wirkt sich diese Nichtunterbrechbarkeit der aktuellen Paketübertragung auch negativ auf den Durchsatz der Sprachpakete aus (Bild 4.3; $L_D=10000$ bit).

Der Kurvenverlauf des Durchsatzes der Datenpakete ist in Bild 4.7 dargestellt. Ab 10 aktiven Sprachverbindungen tritt eine Reduzierung des Datendurchsatzes ein, d.h. bei einem Gesamtangebot an das System von 0,75 Erl ist die Sättigung für das Gesamtsystem (Sprach- und Datenebene) erreicht. Aus anderen Veröffentlichungen [20,53] ist jedoch bekannt, daß bei nur einer Prioritätsklasse ein Durchsatz bei Token-Ring LANs von über 0,8 Erl zu erzielen ist. Der notwendige Steuerungsaufwand, um zwischen den zwei Prioritätsklassen *umzuschalten*, bewirkt eine Reduzierung des maximal möglichen Gesamtdurchsatzes. Entsprechend den Prioritätsstufen wird dabei zuerst der Durchsatz der niederen Datenpriorität beschnitten. Stationen, die sowohl Sprach- als auch Datenpakete zu übertragen haben, werden stärker in ihrem Datendurchsatz gedrosselt als reine

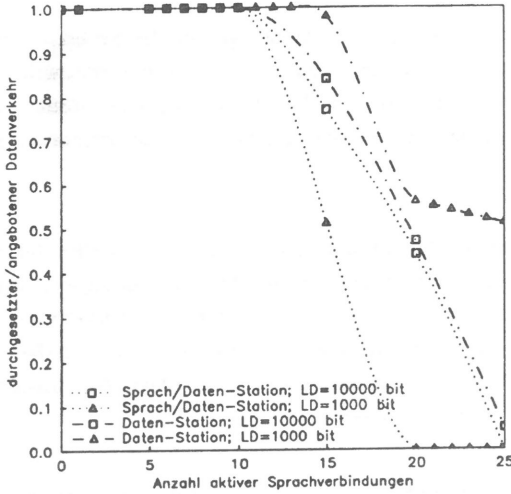


Bild 4.7: Normierter Datendurchsatz des Token-Ring Protokolls bei Sprach-/ Daten- bzw. reinen Datenstationen

Datenstationen, die nur Datenpakete zu übertragen haben (Bild 4.7), wobei dieser Effekt stark von der gewählten Datenpaketlänge abhängt. Dieses Systemverhalten kann im Sinne einer stationsbezogenen Kapazitätsaufteilung des Übertragungskanal als wünschenswert und fair bezeichnet werden.

Insgesamt zeigt das Token-Ring LAN das günstigste Systemverhalten bei einer Sprach-/Datenintegration. Die gemachten Aussagen gelten auch für andere Verteilungen der Datenpaketlängen. Deshalb werden im folgenden Abschnitt die Auswirkungen der verschiedenen Sprachreduktionsverfahren auf das Systemverhalten von Token-Ring LANs untersucht. Die

anderen Lokalen Netze zeigen prinzipiell dieselben Charakteristika.

4.3.2 Einfluß der Sprachquellmodelle

Durch die Wahl eines geeigneten Sprachkodierverfahrens kann die Leistungsfähigkeit des Lokalen Netzes bei gemeinsamer Sprach-/Datenkommunikation erhöht werden. Um den Einfluß der Sprachquellmodelle zu untersuchen, wurden außer dem bisher vorausgesetzten 64 kbit/s PCM-Sprachquellmodell, ein ADPCM-Sprachquellmodell mit 32 kbit/s Abtastrate sowie zwei Modelle für Sprachquellen mit Sprachpausenreduktion als Lastgeneratoren für die simulativen Untersuchungen eingesetzt.

Allen Quellmodellen liegt eine feste Paketierungszeit $t_{Pack}=10$ ms zugrunde, d.h. für den Fall des PCM-Sprachquellmodells ergibt sich alle 10 ms eine Sprachinformationslänge von 640 bit, für den Fall des ADPCM-Sprachquellmodells werden deterministisch alle 10 ms Sprachabstastwerte der Länge 320 bit generiert. Die zwei Sprachquellmodelle mit Sprachpausenreduktion sind in Kap. 3.2.2 eingehend beschrieben worden. Der Unterschied zwischen den beiden

Sprachquellmodellen liegt darin, daß das *Dialogmodell* die Abhängigkeiten der beiden Sprecher während ihrer Kommunikationsbeziehung berücksichtigt. Damit vergleichbare Werte vorliegen, wird angenommen, daß die beiden Sprachquellmodelle mit Sprachpausenreduktion während der aktiven Phasen Sprachdaten mit einer Kodiertrate von 64 kbit/s generieren, die deterministisch alle 10 ms dem Lokalen Netz angeboten werden.

In Bild 4.8 ist der Sprachpaketdurchsatz bei den verschiedenen Sprachquellmodellen für das Token-Ring LAN dargestellt. Das Angebot an Datenpaketen beträgt 50% der Übertragungskapazität und ist symmetrisch auf alle 100 Stationen verteilt bei einer konstanten Datenpaketlänge von $L_D=1000$ bit. Bei steigendem Sprachangebot steigt auch der Durchsatz und erreicht erst bei ca. 0.8 Erl eine Sättigung. Aufgrund des halbierten Sprachdatenvolumens bei ADPCM-Sprachkodierung mit 32 kbit/s stellt sich auch *nur* das halbe Sprachangebot ein.

Die beiden Sprachquellmodelle mit Sprachpausenunterdrückung erzeugen ein noch geringeres Angebot an Sprachpaketen, obgleich für sie während der aktiven Sprachphasen eine Kodiertrate von 64 kbit/s angenommen wurde. Da die Sprachpausen jedoch ca. 60% der Gesamtgesprächsdauer eines Sprechers ausmachen, muß der Kurvenverlauf des Sprachdurchsatzes für diese beiden

Sprachquellmodelle unterhalb der Kurve für das ADPCM-Sprachquellmodell liegen.

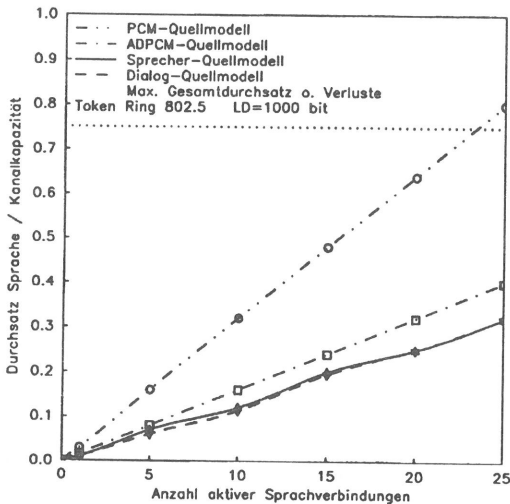


Bild 4.8: Normierter Sprachpaketdurchsatz des Token-Ring Protokolls bei verschiedenen Sprachquellmodellen

Für alle Sprachquellmodelle treten keine Beeinträchtigungen der niederen Datenpriorität auf, solange das Gesamtangebot kleiner als 0,75 Erl bleibt. Bei Überschreiten dieses Wertes wird der Durchsatz der Datenpriorität begrenzt (siehe Kap. 4.3.1.2). Unterschiede im Verhalten des Durchsatzes für die beiden Sprachquellmodelle mit Sprachpausenunterdrückung sind kaum feststellbar. Der Verlauf der mittleren Wartezeiten der Sprachpakete bei den verschiedenen Sprachquellmodellen ist in Bild 4.9 dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, daß beim PCM-Sprachquellmodell die

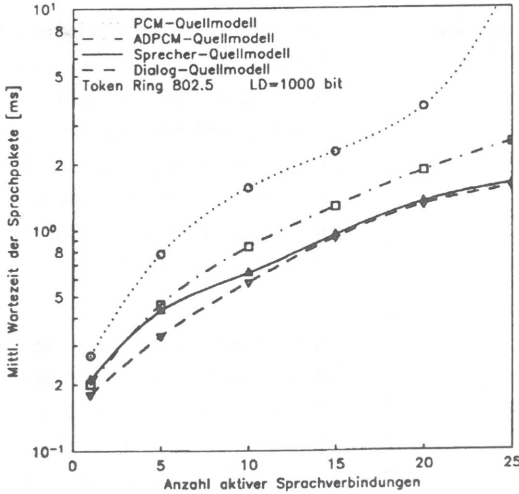


Bild 4.9: Mittlere Sprachpaketwartzeit des Token-Ring Protokolls bei verschiedenen Sprachquellmodellen

quellmodell. Da das Sprecherquellmodell die dialogbedingten Abhängigkeiten nicht berücksichtigt, treten bei diesem Modell häufiger die Fälle auf, in denen beide Teilnehmer gleichzeitig aktiv sind; dies bedeutet mehr Sprachpaketübertragungen während eines Paketierungsintervalls und somit einen Anstieg der Sprachpaketwartzeit. Nimmt die Anzahl aktiver Sprachverbindungen zu, so verschwindet dieser Effekt, da die einzelnen Gespräche voneinander unabhängig sind und die Anzahl aktiver Sprecher pro Paketierungsintervall steigt.

Die Aussagen sind weitgehend unabhängig von der gewählten Datenpaketlänge und -verteilung, lediglich graduelle Verschiebungen der einzelnen Kurven zueinander sind feststellbar. Insbesondere der erwartete Unterschied zwischen den zwei Sprachquellmodellen mit Sprachpausenreduktion ist nahezu vernachlässigbar. Das Sprecherquellmodell überschätzt zwar den Zustand, daß beide Teilnehmer gleichzeitig sprechen (Kap. 3.2.2.1) und erzeugt deshalb in diesen Phasen ein um den Faktor zwei höheres Angebot an Sprachpaketen, jedoch ist die Übertragungsrates bei LANs so hoch, daß dieses Mehrangebot ohne merkliche Wartezeiten übertragen werden kann. Zudem überschätzt das Sprecherquellmodell auch die Zustände, in denen beide Teilnehmer inaktiv sind, so daß, bezogen auf das Paketierungsintervall t_{Pack} , sowohl das Sprecherquellmodell als auch das Dialogquellmodell im Mittel dieselbe Anzahl aktiver Sprecher aufweist. Lediglich die Streuungen um

höchsten Wartezeiten auftreten, bedingt durch das große Sprachdatenvolumen, das übertragen werden muß. Der Hochlastfall, gekennzeichnet durch den drastischen Anstieg der Wartezeit, tritt bei dem PCM-Sprachquellmodell bereits bei mehr als 20 Sprachverbindungen auf. Für die anderen Sprachquellmodelle setzt der Hochlastfall erst bei mehr als der doppelten Anzahl aktiver Sprachverbindungen ein.

Wie erwartet liegen die Wartezeiten der anderen Sprachquellmodelle unter den Werten für das PCM-Sprachquellmodell. Bemerkenswert ist, daß das Sprecherquellmodell für wenige Sprachverbindungen etwas höhere Wartezeiten aufweist als das Dialog-

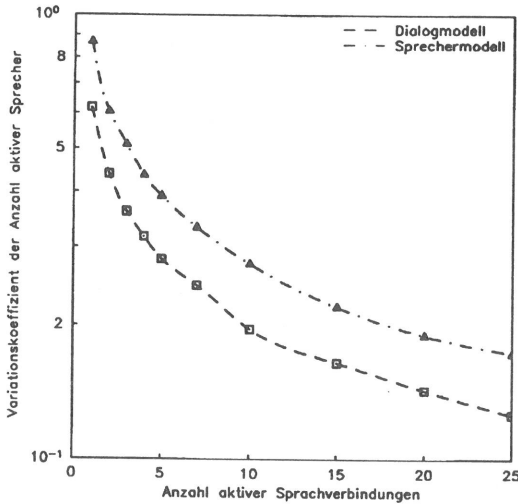


Bild 4.10: Abhängigkeit des Variationskoeffizienten der Anzahl aktiver Sprecher von der Anzahl gleichzeitig aktiver Sprachdialogverbindungen bei den Sprachquellmodellen mit Sprachpausenreduktion

diesen Mittelwert sind verschieden (Bild 4.10). Das Dialogquellmodell weist aufgrund der geringeren Antrittswahrscheinlichkeit für die Fälle, daß beide Sprecher gleichzeitig aktiv bzw. inaktiv sind, kleinere Werte für den Variationskoeffizienten der Anzahl aktiver Sprecher auf.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß bei einer Integration von Sprache in Lokalen Netzen eine Reduktion des Sprachdatenvolumens durch Sprachpausenunterdrückungsverfahren eine signifikante Leistungssteigerung zu erzielen ist. Das in der Literatur weit verbreitete Sprecherquellmodell ist zudem ausreichend, um das Systemverhalten von Lokalen Netzen bei paketierter Sprachübertragung unter Ausnutzung von Sprachpausenunterdrückungsmethoden zu charakterisieren.

4.4 Modifikationen des Token-Ring Zugriffsprotokolls

Die in den vorherigen Abschnitten gezeigten Ergebnisse legen den Schluß nahe, daß bei gleichen gegebenen Systemparametern Token-Ring LANs nach dem Standard IEEE 802.5 am besten geeignet sind, eine Integration paketierter Sprache zu ermöglichen. In der Literatur finden sich jedoch auch Ansätze, Sprachintegration bei Lokalen Netzen mit Ringtopologie durch nicht standardisierte bzw. modifizierte Zugriffsprotokolle zu realisieren (siehe hierzu Kap. 2.3.1.3). Die verschiedenen Vorschläge lassen sich dazu in zentrale Prioritätsverfahren und dezentrale Prioritätsverfahren unterteilen.

Unter dem Begriff zentrale Prioritätsverfahren lassen sich alle Varianten zusammenfassen, die mit einer speziellen, ausgezeichneten Sprach-Master-Station (SM-Station) arbeiten. Diese SM-Station

teilt die Bandbreite des Übertragungskanals virtuell in einen Sprach- und einen Datenbereich auf. Dazu wird zu äquidistanten Zeitpunkten die Priorität des Tokens geändert. Dies erfolgt, gemäß dem MAC-Protokoll des Standard Token-Ring, entweder durch eine Reservierung in einem Datenpaket oder durch die direkte Änderung der aktuellen Tokenpriorität. Damit wird erreicht, daß die Übertragungen der niederpriorisierten Datenpakete zyklisch durch die SM-Station unterbrochen werden und ein hochpriorisierter Sprachpaketübertragungszyklus eingeschoben wird. Während dieses Sprachzyklus dürfen nur alle aktiven Sprachstationen senden. Danach beendet die SM-Station den Sprachzyklus, und auf der niederpriorisierten Datenebene kann mit Paketübertragungen fortgefahren werden.

Die Bandbreite für den Datenbereich wird nach dem bekannten Token Passing-Verfahren den Stationen zugeteilt. Zur Vergabe der Bandbreite für Sprachverbindungen können unterschiedliche Protokolle eingesetzt werden. Zwei Sprachübertragungsprotokolle, die bei dem zentralen Prioritätsverfahren eingesetzt werden können, sind:

- *Token Passing*

Sprachpakete werden gleichfalls wie die Datenpakete nach dem Token Passing-Prinzip übertragen, d.h. sobald die SM-Station die Tokenpriorität erhöht hat, kann jede aktive Sprachstation, nach Erhalt des Tokens, ihr Sprachpaket mit Send- und Empfangsadresse aussenden und gibt, nachdem sie ihr eigenes Paket wieder empfangen hat, das Token weiter.

- *Sprach-Frame*

Bei diesem Protokoll generiert die SM-Station beim Umschalten auf die Sprachpriorität einen speziellen Sprach-Frame (Bild 4.11), der in Anlehnung an den Token-Ring Standard dieselbe Struktur und Steuerinformation besitzt (siehe Bild 3.23). Der Nutzinformatiosbereich dieses Sprach-Frames ist in einzelne Slots unterteilt, wobei jeder Slot für die Dauer einer Sprachverbindung dieser fest zugeordnet ist. Beim Auf- und Abbau einer Sprachverbindung wird über ein Signalisierprotokoll zwischen SM-Station und den beteiligten Sprachstationen die Vergabe der Slots geregelt. Damit jede Sprachverbindung mit nur einem Slot voll-duplex betrieben werden kann, muß dieser Sprach-Frame zweimal je Sprachzyklus umlaufen. Danach löscht die SM-Station den Sprach-Frame vom Ring und generiert einen neuen Token mit der niederen Datenpriorität.

Neben diesen zentral arbeitenden Prioritätsverfahren sind auch dezentral arbeitende Verfahren bekannt. Diese sind dadurch gekennzeichnet, daß jede Station individuell die aktuelle Ringpriorität aufgrund wartender Sprachpakete ändern darf. Ein Vertreter dieser dezentralen Prioritätsprotokolle ist der IEEE 802.5 Standard. Eine weitere dezentral arbeitende Protokollvariante ist die sogenannte *stationsinterne Sprachpriorisierung*, die innerhalb einer Station den Sprachverkehr gegenüber dem

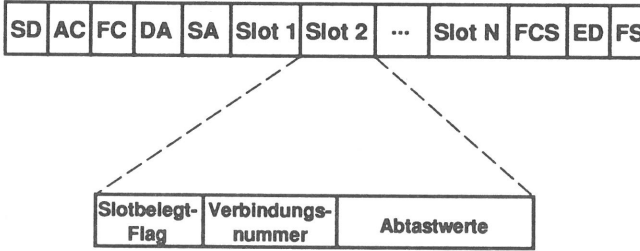


Bild 4.11: Mögliches Format des Sprach-Frames

Datenverkehr priorisiert; d.h. jede Station darf immer nur ein Paket übertragen und muß danach das Token weitergeben. Sobald sie die Sendeberechtigung erhalten hat, wird zuerst das Sprachpaket übertragen, falls vorhanden. Wartet kein Sprachpaket in der Station

auf die Übertragung, wird ein Datenpaket übertragen. Eine Reservierung, wie im IEEE 802.5 Protokoll, ist bei diesem Protokoll nicht vorgesehen.

4.4.1 Vergleich verschiedener Sprachintegrationsverfahren basierend auf Ring-Topologien

Aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Sprachintegrationsvarianten kann ein Leistungsvergleich nur die grundlegenden Mechanismen und deren Einfluß auf das gesamte Systemverhalten beinhalten. Die prinzipiellen Sprachintegrationsmethoden sind in Kap. 4.4 kurz skizziert worden. Für eine Beurteilung der Leistungsfähigkeit gelten die in Kap.4.3 aufgestellten Kriterien. So ist zu fordern, daß die Sprachpaketübertragungszeiten klein sind, jedoch der mögliche Datenpaketedurchsatz durch die Sprachkommunikation nicht beeinträchtigt wird. Des weiteren ist zu klären, ob eine Integration der Sprachkommunikation bei Ring-Topologien bereits sinnvoll möglich ist, wenn lediglich eine stationsinterne Sprachpriorisierung erfolgt, die keiner Priorisierung des Mediums, gekennzeichnet durch die Tokenpriorität, bedarf. Außerdem ist der Einfluß der zentralen Prioritätsverfahren im Vergleich zu den dezentralen Verfahren festzustellen.

4.4.2 Leistungsbewertung der verschiedenen Sprachintegrationsverfahren

Aus den vorherigen Erkenntnissen ergibt sich für einen Leistungsvergleich der verschiedenen Token-Ring Sprachintegrationsverfahren, daß für Datenübertragungen kurze Paketlängen zu wählen sind. Für die nachfolgenden simulativen Untersuchungen wurden deshalb Datenpakete mit negativ-exponentieller Längenverteilung und einer mittleren Paketlänge von $L_D=1000$ bit angenommen. Ansonsten gelten die in Kap. 4.3 gemachten Annahmen. Als Sprachquellmodell liegt den

Ergebnissen in Bild 4.12 und Bild 4.13 das synchrone Sprechermodell ohne Sprachpausenreduktion mit einer Kodierate von 64 kbit/s zugrunde.

Vergleicht man die in Bild 4.12 dargestellte mittlere Wartezeit der Sprachpakete der vier verschiedenen Sprachintegrationsverfahren nach Kap. 4.4, so fällt auf, daß die mittlere Wartezeit der Sprachpakete für die zentralen Prioritätsverfahren nahezu konstant über den gesamten Angebotsbereich verläuft. Erst bei mehr als 20 aktiven Sprachverbindungen steigt die Sprachpaketwartezeit für das Token Passing-Protokoll für die Sprachpaketübertragungen an, da ab diesem Wert für besagtes Token Passing-Protokoll das Gesamtsystem in den Überlastbereich kommt.

Wird für die Sprachpaketübertragung ein spezieller Sprach-Frame eingesetzt, der aus Slots der Länge eines Sprachpaketes besteht, wobei für N Sprachverbindungen N Slots je Sprach-Frame vorhanden sind, so kann ein noch höheres Sprachpaketangebot vermittelt werden. Dieses Sprachpaketübertragungsprotokoll erfordert nur zwei Sprach-Frame-Umläufe je Sprachzyklus. Wird das Token Passing-Verfahren für die Sprachpaketübertragung eingesetzt, sind $2*N$ Sprachpakete je Sprachzyklus zu übertragen. Die übertragene Nutzinformation ist in beiden Fällen dieselbe, nur steigt beim

Token Passing-Verfahren die Steuerinformation mit der Anzahl aktiver Sprachstationen, da jedes Sprachpaket einen zusätzlichen Paket-Overhead zur Steuerung besitzt.

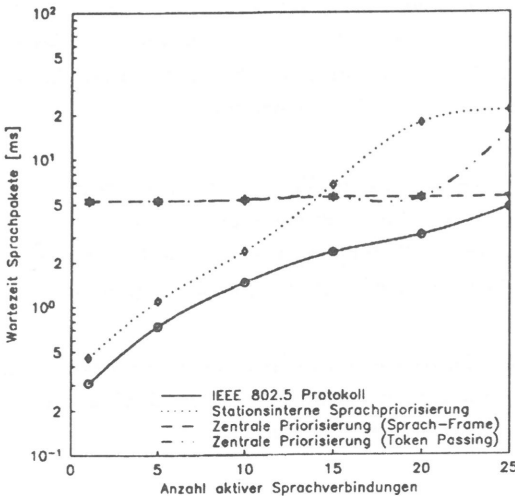


Bild 4.12: Mittlere Wartezeit der Sprachpakete bei verschiedenen Sprachintegrationsverfahren basierend auf Ring-Topologien

Die mittlere Wartezeit der Sprachpakete liegt für die zentralen Priorisierungsstrategien etwas oberhalb der halben Sprachpaketierdauer ($t_{Pack} = 10$ ms). Dieser Wert stellt sich ein, da die SM-Station in Intervallen der Sprachpaketierzeit einen Sprachzyklus einleitet. Als mittlere Wartezeit der Sprachpakete muß sich deshalb die halbe Intervalldauer zwischen zwei Sprachzyklen einstellen, denn die Anfangszeiten der Sprachverbindungen sind im allgemeinen gleichverteilt über die Intervalldauer zwischen zwei Sprachzyklen. Unter Umständen muß

noch eine aktuell stattfindende Datenpaketübertragung abgewartet werden, bis der Sprachzyklus gestartet werden kann (Reservierung); deshalb liegt der Wert der mittleren Wartezeit etwas über der halben Sprachpaketierzeit.

Bei den dezentral arbeitenden Sprachintegrationsverfahren ist eine Abhängigkeit der mittleren Wartezeit der Sprachpakete von der Anzahl aktiver Sprachverbindungen zu erkennen (Bild 4.12). Die mittleren Wartezeiten liegen jedoch bei wenigen Sprachverbindungen (<10) deutlich unter den Werten der zentralen Priorisierungsverfahren. Da jede Station, sobald sie sendeberechtigt wird, ihr wartendes Sprachpaket übertragen kann, ergeben sich kürzere Wartezeiten für diese Niederlastsituationen. Mit zunehmender Sprachlast nimmt die Wartezeit, bis das Token wieder bei einer Station vorbeikommt, zu. Deshalb ist die Wartezeit der Sprachpakete bei den dezentralen Priorisierungsverfahren lastabhängig. Aufgrund der Reservierungsmöglichkeit des IEEE 802.5 Token-Ring Protokolls steigt die Sprachpaketwartezeit im Hochlastfall (>20 Sprachverbindungen) nicht proportional zum Sprachangebot, da jede Station, die ein Sprachpaket senden möchte, im nächsten, an der Station vorbeikommenden Datenpaket eine Reservierung durchführen kann.

Dieser Reservierungsmechanismus fehlt der stationsinternen Sprachpriorisierung, deshalb steigt hier die mittlere Sprachpaketwartezeit mit zunehmendem Sprachangebot an. Die Sättigung wird bei mehr als 20 Sprachverbindungen aufgrund limitierter Sprachpaketwartespeicher (2 Sprachpaketwarteplätze je Station) erreicht, wobei die Durchsatzgrenze bei der stationsinternen Sprachpriorisierung für Sprachpakete bereits bei 15 Sprachverbindungen erreicht ist.

In Bild 4.13 ist der Datenpaketchsatz für die verschiedenen Sprachintegrationsverfahren dargestellt, wobei alle Stationen sowohl Sprach- als auch Datenpakete übertragen. Bei bis zu 10 Sprachverbindungen wird, für alle Verfahren, die Datenpaketübertragung durch die Sprachkommunikation nicht beeinflusst. Danach setzt eine Reduktion der Bandbreite für Datenpaketübertragungen ein.

Für alle Verfahren, mit Ausnahme des stationsinternen Sprachpriorisierungsprotokolls, ist das Verhalten der Stationen, die nur Datenpakete übertragen, grundsätzlich gleich; der Durchsatz liegt jedoch immer etwas über dem in Bild 4.13 gezeigten Werten (siehe hierzu Kap. 4.3.1).

Das stationsinterne Sprachpriorisierungsprotokoll beschneidet die Übertragungskapazität für Datenpakete der eigenen Station; reine Datenstationen werden von den Sprachpaketübertragungen nicht beeinflusst und können deshalb ihr Datenpaketangebot immer durchsetzen, solange das Gesamtangebot aus allen Sprachpaketen und den Datenpaketen der reinen Datenstationen die Übertragungskapazität des Protokolls nicht überschreitet.

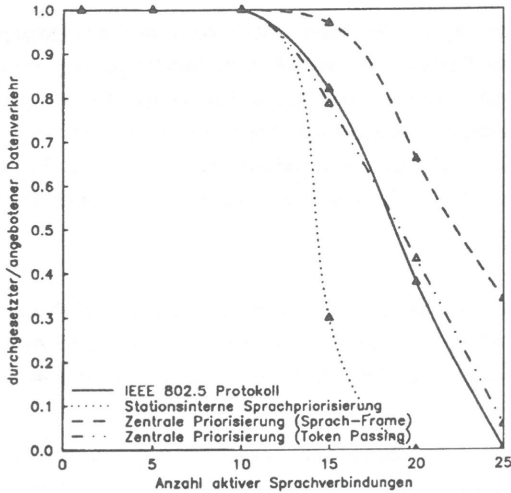


Bild 4.13: Datenpaketchsatz der Sprach-/ Datenstationen bei verschiedenen Sprachintegrationsverfahren basierend auf Ring-Topologien

Je kleiner die für die Übertragung der Sprachinformation benötigte Bandbreite ist, desto geringer ist im Hochlastfall die Reduktion der Bandbreite für die Daten. Wird für die Sprachübertragung ein Sprachübertragungsprotokoll mit Sprach-Frame eingesetzt, ist der Paket-Overhead je Sprachzyklus am geringsten; deshalb ist bei dieser Protokollvariante der Datenpaketchsatz am höchsten (Bild 4.13). Werden die Sprachpakete nach dem Token Passing-Prinzip übertragen, unabhängig ob mittels zentraler Priorisierung oder dezentral nach dem IEEE 802.5 Protokoll, steigt der Paket-Overhead proportional mit der Anzahl der aktiven Sprachverbindungen. Aus diesem Grund wird der Datenpaketchsatz bei diesen beiden Protokollvarianten mit zuneh-

menden Sprachverbindungen stärker reduziert als bei dem Sprachübertragungsprotokoll mit Sprach-Frame. Tendenziell besitzt die zentrale Priorisierung etwas bessere Eigenschaften bezüglich des Datenpaketchsatzes im Hochlastfall, da die dezentralen Verfahren, aufgrund der Möglichkeit, daß jede Station zu beliebigen Zeitpunkten die Priorität ändern kann, einen etwas erhöhten Protokollaufwand besitzen, der im Hoch- bzw. Überlastfall jedoch erst erkennbar wird (Bild 4.13).

Legt man die in Kap. 4.3 genannten Bewertungskriterien zugrunde, schneidet das IEEE 802.5 Token-Ring Protokoll am besten ab, da es die kürzesten Sprachpaketwartezeiten liefert. Ist eine lastunabhängige Verzögerungszeit der Sprachpakete durch das Lokale Netz gewünscht, die jedoch in jedem Fall über der halben Sprachpaketierungsdauer liegt, so sind Sprachübertragungsprotokolle mit zentraler Priorisierung unter Verwendung eines Sprach-Frames geeignet.

Werden Sprachquellen mit Sprachpausenreduktionsverfahren eingesetzt, gelten prinzipiell die oben gemachten Aussagen mit einer Einschränkung: bei den zentralen Prioritätsverfahren ist das Token Passing-Protokoll zur Sprachpaketübertragung geeigneter als der Einsatz eines Sprach-Frames. Dies rührt daher, daß bei Einsatz von Sprachpausenreduktionsverfahren nicht mehr alle Sprachstationen

je Sprachzyklus ein Sprachpaket zur Übertragung anstehen haben. Dies wird beim Token Passing-Protokoll implizit berücksichtigt, d.h. nur die Stationen, die tatsächlich ein Sprachpaket zu senden haben, werden nach dem Empfang des Tokens ein Sprachpaket senden. Bei der Sprachübertragung mittels Sprach-Frame wird je Sprachverbindung mindestens ein Slot reserviert; wird dieser infolge der Sprachpausenreduktion während eines Sprachzyklus nicht benutzt, kann der Sprach-Frame nicht um diesen Slot reduziert werden, da die SM-Station den Zustand der einzelnen Sprachstationen nicht vorhersehen kann.

Ansonsten gelten die in Kap. 4.3.1 und Kap. 4.3.2 gemachten Aussagen. Insbesondere sollte bei der Systemauslegung immer auf eine kurze und konstante Datenpaketlänge hin dimensioniert werden, damit der Reservierungsmechanismus zur Änderung der Priorität möglichst schnell greifen kann.

Insgesamt ist festzustellen, daß eine Integration von Sprach- und Datenübertragung mit dem standardisierten Token-Ring Protokoll wirkungsvoll realisiert werden kann, solange das Gesamtangebot aller Teilnehmer unter 0.75 Erl liegt.

5 ANALYSE VON LOKALEN NETZEN MIT TOKEN-ZUGRIFF UND PRIORISIERTER SPRACH-ÜBERTRAGUNG

5.1 Modellierung und analytische Methoden

Eine Leistungsuntersuchung mittels analytischer Methoden setzt, ebenso wie die Simulation, eine Modellierung des realen Systems voraus. Die grundsätzlichen Aspekte der verkehrstheoretischen Modellbildung sind bereits in Kap. 3.1 genannt worden.

Beschreibt man das Ablaufgeschehen in einem System durch stochastische Prozesse, können Aussagen über die Leistungsfähigkeit des Systems mit Hilfe von wahrscheinlichkeitstheoretischen Analysen gemacht werden.

5.1.1 Systeme mit zyklischer Abfertigung

Die nach dem Token Passing-Prinzip arbeitenden Lokalen Netze lassen sich auf ein verkehrstheoretisches Modell gemäß Bild 5.1 abbilden. Die einzelnen Stationen des Lokalen Netzes werden in diesem Modell durch senderseitige Warteschlangen, der von ihnen erzeugte Nachrichtenverkehr durch einen Paketankunftsprozeß dargestellt. Im Falle der Integration von Sprach- und Datenverkehr bei Lokalen Netzen besitzt jede Station, entsprechend den beiden Verkehrsklassen, mindestens zwei Warteschlangen.

Der Kanalzugriff wird über das Token gesteuert, das zyklisch von Station zu Station weitergegeben wird. Der Übertragungskanal wird im Modell durch die Bedieneinheit dargestellt. Der Übertragungskanal steht für die Dauer der Bedienung einer Station exklusiv zur Verfügung. Nach der Bedienung einer Station bis zur Bedienung der nächsten Station ist eine Umschaltzeit T_U erforderlich, welche die Zeitdauer der Tokenweitergabe (Laufzeit sowie stationsinterne Bearbeitungszeiten) nachbildet.

Das in Bild 5.1 dargestellte verkehrstheoretische Modell ist identisch zu dem Modell, das die Klasse der Polling-Systeme beschreibt. Das Polling-Systemmodell besteht gleichfalls aus einer Bedieneinheit (oder mehreren Bedieneinheiten), die nach einer allgemeinen periodischen Bedienstrategie eine Anzahl von Warteschlangen abarbeitet. Ein breites Spektrum von realen Systemen läßt

sich auf dieses Polling-Modell abbilden, so z.B. teilzentrale Vermittlungssteuerungen [29,41,48], Terminal Multiplexer [102] sowie Lokale Netze mit Token-Zugriffsverfahren [17,93,155,157]. Eine ausführliche Darstellung zu den unterschiedlichen Analysen von Polling-Systemen ist in [155] enthalten; ebenso sind die entsprechenden Literaturstellen umfassend zitiert.

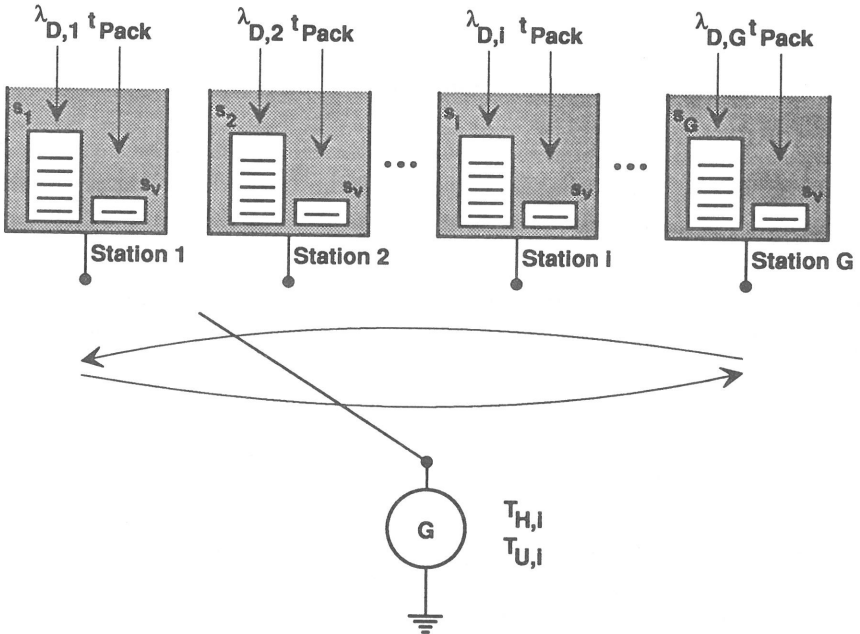


Bild 5.1: Systemmodell eines Lokalen Netzes mit Token Passing-Kanalzugriff und zwei Prioritätsklassen

Analytische Untersuchungen von Token Passing-Systemen mit zwei Prioritäten wurden in [51,90,109,118] durchgeführt. Dabei wurden für die Ankunftsprozesse Poisson-Verkehre bzw. erschöpfende Bedienstrategien für die einzelnen Warteschlangen vorausgesetzt [51,118] sowie unendliche Wartespeicher angenommen.

Im folgenden wird ein approximatives Verfahren zur Bestimmung der charakteristischen Größen für Token Passing LANs mit begrenztem Wartespeicher und zwei Prioritäten vorgestellt, das einen deterministischen Ankunftsprozeß der höheren Verkehrsklasse berücksichtigt.

5.1.2 Voraussetzungen und Annahmen

Ausgehend von dem in Bild 5.1 betrachteten Modell sind folgende Voraussetzungen zu vereinbaren:

- Jede Station i ($i=1,2,\dots,G$) besitzt eine Warteschlange der Länge s_i für Datenpakete und einen einzelnen Warteplatz s_v für Sprachpakete.
- Der Ankunftsprozeß der Datenpakete ist ein Poisson-Prozeß, d.h. die Ankunftsabstände sind negativ-exponentiell verteilt mit dem Mittelwert $E[T_{D,i}]$ und der Rate $\lambda_{D,i}$.
- Die Übertragungsdauer der Datenanforderungen wird durch die ZV $T_{H,i}$ beschrieben und ist beliebig verteilt mit dem Mittelwert $E[T_{H,i}]$ und dem Variationskoeffizienten $c[T_{H,i}]$.
- Die Umschaltzeit (Tokenweitergabezeit) ist durch die ZV $T_{U,i}$ charakterisiert, die i.a. beliebig verteilt sein kann, hier jedoch als konstant vorausgesetzt werden kann.
- Der Ankunftsprozeß der Sprachpakete ist deterministisch und besitzt den Ankunftsabstand t_{Pack} .
- Die Übertragungsdauer für ein Sprachpaket wird durch die konstante Bedienzeit T_{PV} beschrieben.

Die G Stationen des Modells werden zyklisch der Bedieneinheit zugeteilt. Diese Zuteilung erfolgt unabhängig davon, ob Anforderungen in den Warteschlangen vorliegen immer mit der Umschaltzeit $T_{U,i}$. Bedient wird in jeder Station immer nur eine Anforderung (Limited Service 1), falls vorhanden.

Die Abfertigungsstrategie der wartenden Datenpakete innerhalb einer Warteschlange ist FIFO. Wartende Sprachpakete hingegen werden vom nächsten Sprachpaket überschrieben, falls das wartende Sprachpaket nicht während der Zwischenankunftszeit t_{Pack} bedient wurde. Die Bedienstrategie innerhalb einer Station, d.h. ob ein Sprach- oder ein Datenpaket bedient wird, hängt von dem gewählten Sprachintegrationsverfahren ab.

Die folgende Analyse berücksichtigt die verschiedenen Sprachintegrationsverfahren basierend auf Ring-Topologien, die in Kap. 4.4 eingeführt wurden. Sie erlaubt es, die wichtigsten Leistungsgrößen wie z.B. Sprach- und Datenpaketverluste und die mittlere Wartezeit der Datenpakete zu bestimmen.

5.2 Grundlagen des Berechnungsverfahrens

Der Berechnungsalgorithmus zur Bestimmung der Systemgrößen besteht im wesentlichen aus drei Schritten. Zuerst wird der Zustandsprozeß der Datenwarteschlange in einer Station bestimmt, der durch die ZV $X_D(t)$ charakterisiert ist. Mittels der Methode der eingebetteten Markoff-Kette [92] kann dieser Zustandsprozeß berechnet werden. Der Bedienprozeß beschreibt dabei diejenigen Zeitpunkte, bei denen eine Anforderung aus der Warteschlange entnommen wird. Dies entspricht den Tokenankünften an der Datenwarteschlange, die durch die Zykluszeit mit der ZV T_C beschreibbar sind. Die Zykluszeit repräsentiert die Zeitspanne zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tokenankünften an der betrachteten Datenwarteschlange und beinhaltet die Datenbedienungen aller anderen Stationen sowie eventuelle Sprachpaketbedienungen. Da für die Datenwarteschlangen begrenzte Wartespeicher angenommen werden, existiert keine geschlossene Lösung, so daß eine iterative Berechnung des Zustandsprozesses $X_D(t)$ erfolgen muß.

Am Ende des ersten Berechnungsabschnitts erhält man den Zustand der Datenwarteschlange zu den Tokenankunftszeitpunkten. Zur Bestimmung der Systemgrößen der Datenwarteschlange muß in einem zweiten Schritt der Zustandsprozeß der Datenwarteschlange zu einem beliebigen Zeitpunkt berechnet werden. In einem dritten Berechnungsabschnitt kann nun das Systemverhalten für den Sprachwarteplatz bestimmt werden.

5.2.1 Zustandsprozeß einer Datenwarteschlange bei Tokenankunft

Der Zustandsprozeß $X_D(t)$ der Datenwarteschlange ist in Bild 5.2 dargestellt. Die Tokenankünfte an der betrachteten Datenwarteschlange sind beliebig verteilt. Die Zeitpunkte t_n^- ($n=0,1,2,\dots$) kennzeichnen die Zeitpunkte kurz vor dem Eintreffen des Tokens. An diesen Zeitpunkten besitzt der Zustandsprozeß die Markoff-Eigenschaft. Diese Zustände $X_D(t_n^-)$ bilden eine eingebettete Markoff-Kette.

5.2.1.1 Methode der eingebetteten Markoff-Kette

Betrachtet man den Zustandsprozeß einer beliebig herausgegriffenen Datenwarteschlange zu den Zeitpunkten kurz vor einer Tokenankunft, gilt für diese Regenerationszeitpunkte

$$\begin{aligned} P\{X_D(t_{n+1}^-) = x_{D,n+1} | X_D(t_n^-) = x_{D,n}, \dots, X_D(t_0^-) = x_{D,0}\} = \\ P\{X_D(t_{n+1}^-) = x_{D,n+1} | X_D(t_n^-) = x_{D,n}\} . \end{aligned} \quad (5.1)$$

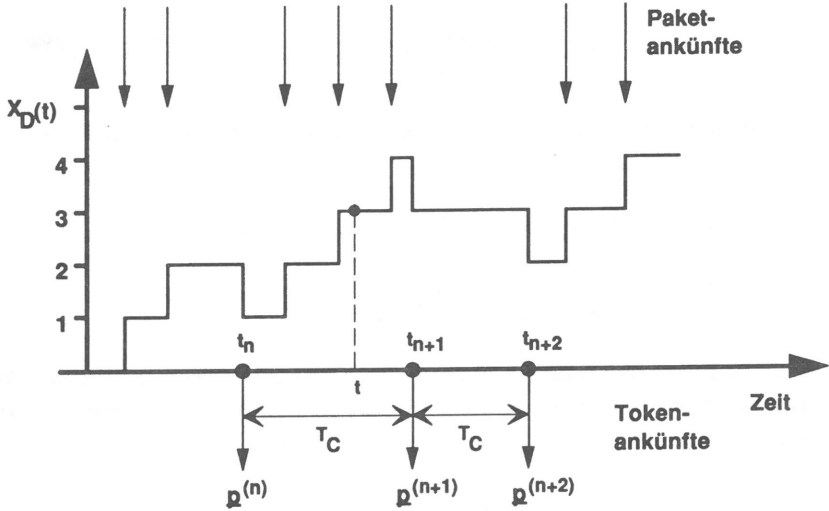


Bild 5.2: Zustandsprozeß der Datenwarteschlange

Die Zustandswahrscheinlichkeiten der ZV $X_D(t_n^-)$ zum Regenerationszeitpunkt t_n^- sind gemäß Gl. 5.2 wie folgt definiert

$$p_k^{(n)} = P\{X_D(t_n^-) = k\}, \quad k = 0, 1, \dots, s, \quad (5.2)$$

wobei alle Zustandswahrscheinlichkeiten $p_k^{(n)}$ ($k=0,1,\dots,s$) den Zustandswahrscheinlichkeitsvektor $p^{(n)}$ zum Zeitpunkt t_n^- bilden. Eine Änderung des Vektors $p^{(n)}$ ergibt sich aufgrund der Bedienung einer Datenanforderung zum Zeitpunkt t_n . Die einzelnen Zustandswahrscheinlichkeiten $p_k^{(n+)}$ zum Zeitpunkt t_n^+ kurz nach der Bedienung können entsprechend Gl. 5.3 angegeben werden

$$\begin{aligned} p_0^{(n+)} &= p_0^{(n)} + p_1^{(n)} \\ p_k^{(n+)} &= p_{k+1}^{(n)} \quad k = 1, 2, \dots, s-1 \\ p_s^{(n+)} &= 0 \end{aligned} \quad (5.3)$$

Da der Zustandsprozeß der Datenwarteschlange zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tokenankünften ein reiner Geburtsprozeß ist, wird der Prozeßverlauf nur durch den Ankunftsprozeß und die endliche Warteschlangenlänge bestimmt.

Für den Poisson-Ankunftsprozeß gilt, daß im Intervall der Länge t genau m Anforderungen mit der Wahrscheinlichkeit $a_m(t)$ eintreffen

$$a_m(t) = \frac{(\lambda_D t)^m}{m!} e^{-\lambda_D t} \quad (5.4)$$

Der Zustandswahrscheinlichkeitsvektor $p^{(n)}(t)$ zum Zeitpunkt $t_n + t$ ergibt sich mit Gl 5.3 und Gl. 5.4 zu

$$\begin{aligned} p_k^{(n)}(t) &= \sum_{u=0}^k p_u^{(n+)} \cdot a_{k-u}(t) \quad k = 0, 1, \dots, s-1 \\ p_s^{(n)}(t) &= \sum_{u=0}^s p_u^{(n+)} \sum_{v=s-u}^{\infty} a_v(t) \end{aligned} \quad (5.5)$$

Um die Zustandswahrscheinlichkeiten an den Regenerationspunkten der eingebetteten Markoff-Kette zu erhalten, muß das Zeitintervall t der Verteilung der Zykluszeit T_C entsprechen, d.h. das Zeitintervall t muß mit der Wahrscheinlichkeitsdichte $f_C(t)$ auftreten

$$f_C(t) = \frac{dF_C(t)}{dt} \quad (5.6)$$

wobei $F_C(t)$ die Zykluszeit-VF beschreibt. Integriert man über alle möglichen Zykluszeiten, erhält man die Wahrscheinlichkeit b_m daß während eines Zyklus an der betrachteten Datenwarteschlange genau m Datenpakete ankommen

$$b_m = \int_0^{\infty} a_m(t) f_C(t) dt \quad (5.7)$$

Die Zustandswahrscheinlichkeiten an zwei aufeinanderfolgenden Regenerationszeitpunkten ergeben sich aus Gl. 5.5 mit den Übergangswahrscheinlichkeiten b_m nach Gl. 5.7 und unter Anwendung von Gl. 5.3 zu

$$\begin{aligned} p_k^{(n+1)} &= p_0^{(n)} b_k + \sum_{u=1}^{k+1} p_u^{(n)} b_{k-u+1} \quad k = 0, 1, \dots, s-1 \\ p_s^{(n+1)} &= p_0^{(n)} \sum_{k=s}^{\infty} b_k + \sum_{u=1}^s p_u^{(n)} \sum_{v=s-u+1}^{\infty} b_v \end{aligned} \quad (5.8)$$

Zur Bestimmung der Übergangswahrscheinlichkeiten b_m ist es erforderlich, die VDF $f_C(t)$ der Zykluszeit zu kennen.

5.2.1.2 Zykluszeitanalyse

Betrachtet man G Datenwarteschlangen, die zyklisch bedient werden, wobei zwischen den Bedienung zweier aufeinanderfolgender Warteschlangen immer eine nicht verschwindende Umschaltzeit T_U existiert, so kann eine (Token-) Durchlaufzeit durch eine Station T_{Stat} definiert werden,

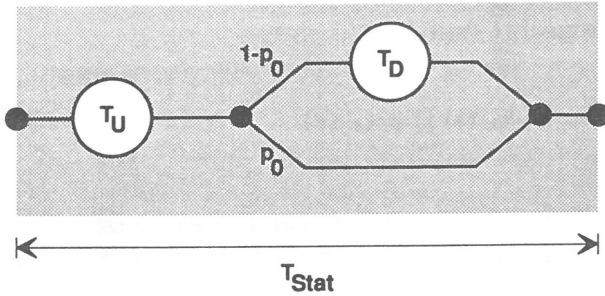


Bild 5.3: Phasenmodell der Durchlaufzeit durch eine Station T_{Stat}

welche die Bediendauer T_D einer Datenanforderung in einer Station sowie die notwendige Tokenweitergabezeit (Umschaltzeit) beinhaltet. In Bild 5.3 ist das Phasenmodell für diese Durchlaufzeit durch eine Station T_{Stat} dargestellt, wobei $(1-p_0)$ die Antreffwahrscheinlichkeit für ein Datenpaket bei Tokenankunft repräsentiert.

Beschreibt die Zykluszeit T_C das Zeitintervall zwischen zwei aufeinanderfolgenden Tokenankünften an der Warteschlange i , so setzt sich die Zykluszeit aus der Summe aller G Stationsdurchlaufzeiten $T_{Stat,i}$ zusammen

$$\begin{aligned}
 T_C &= \sum_{i=1}^G T_{Stat,i} \\
 &= \sum_{i=1}^G (T_{U,i} + (1 - p_{0,i})T_{D,i}) \quad .
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

Aus Gl. 5.9 wird ersichtlich, daß die Zykluszeit von der Antreffwahrscheinlichkeit $(1-p_{0,j})$ eines Datenpakets mit $j=1,2,\dots,G$ abhängig ist. Die Zykluszeit ist dabei zum einen abhängig von der Antreffwahrscheinlichkeit $(1-p_{0,i})$ eines Datenpakets in der eigenen Warteschlange, als auch von den Antreffwahrscheinlichkeiten $(1-p_{0,j})$ mit $j \neq i$ in aller anderen Warteschlangen. Für kleine Polling-Systeme mit nur einem Warteplatz pro Station kann die Zykluszeit unter Berücksichtigung dieser gegenseitigen Stationsabhängigkeiten bestimmt werden [156].

Für Polling-Systeme mit mehr als nur einem Warteplatz können diese Abhängigkeiten nur teilweise berücksichtigt werden, indem die Abhängigkeit der Zykluszeit T_C von der Antreffwahrscheinlichkeit $(1-p_{0,i})$ in der eigenen, betrachteten Warteschlange berücksichtigt wird [94]. Dazu werden zwei bedingte Zykluszeiten $T_C^1{}_i$ und $T_C^2{}_i$ eingeführt. Die ZV $T_C^1{}_i$ repräsentiert dabei die Zykluszeit für den Fall, daß an der betrachteten Warteschlange i keine Bedienung eines Datenpakets erfolgt; die ZV $T_C^2{}_i$ beinhaltet noch zusätzlich eine Bedienung an der Warteschlange i . Die VDFen $f_{C^1{}_i}(t)$ und $f_{C^2{}_i}(t)$ können im Bildbereich als Laplace-Transformierte wie folgt angegeben werden

$$\begin{aligned}\phi_{C,i}^1(s) &= \phi_{U,i}(s) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^G \phi_{Stat,j}(s) \\ \phi_{C,i}^2(s) &= \phi_{U,i}(s) \phi_{D,i}(s) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^G \phi_{Stat,j}(s)\end{aligned}\tag{5.10}$$

unter der vereinfachenden Annahme, daß die einzelnen Durchlaufzeiten durch eine Station T_{Stat} unabhängig voneinander sind. Die unbedingte Zykluszeit ergibt sich mit Hilfe des Gesetzes der totalen Wahrscheinlichkeit zu

$$\phi_C(s) = p_{0,i} \phi_{C,i}^1(s) + (1 - p_{0,i}) \phi_{C,i}^2(s) .\tag{5.11}$$

Mit gegebener Zykluszeit nach Gl. 5.11 kann die im vorherigen Abschnitt beschriebene Methode der eingebetteten Markoff-Kette komplettiert werden.

5.2.2 Bestimmung der Systemgrößen der Datenpriorität zu beliebigen Zeitpunkten

Zur Bestimmung der charakteristischen Größen wie Verlustwahrscheinlichkeit oder mittlere Wartezeit der Datenpakete ist es erforderlich, die Zustandsverteilung X_D einer Datenwarteschlange i zu beliebigen Zeitpunkten zu kennen. Im folgenden wird der Index i der betrachteten Warteschlange aus Übersichtlichkeitsgründen weggelassen. Die Zustandswahrscheinlichkeiten nach Gl. 5.8 gelten jedoch nur an den Regenerationszeitpunkten. Betrachtet man einen beliebigen Zeitpunkt im Intervall $[t_n, t_{n+1}]$, so gilt nach [30], daß ein Zeitintervall zwischen t_n und einem beliebigen Zeitpunkt im Intervall $[t_n, t_{n+1}]$ der Rückwärtsrekurrenzzeit des Intervalls $[t_n, t_{n+1}]$ (Zykluszeit) mit der VDF $f_C^r(t)$ entspricht

$$f_C^r(t) = \frac{1}{E[T_C]} [1 - F_C(t)] .\tag{5.12}$$

Daraus folgt mit Gl. 5.7 die Wahrscheinlichkeit für m Datenpaketankünfte während des Zeitintervalls t zu

$$b_m^* = \int_0^\infty a_m(t) f_C^r(t) dt .\tag{5.13}$$

Ersetzt man die Übergangswahrscheinlichkeiten b_m in Gl. 5.8 durch b_m^* , so erhält man die Zustandswahrscheinlichkeiten der Warteschlange zu beliebigen Zeitpunkten zwischen zwei Regenerationszeitpunkten gemäß Gl. 5.14

$$\begin{aligned}
 p_k^* &= p_0^{(n)} b_k^* + \sum_{u=1}^{k+1} p_u^{(n)} b_{k-u+1}^* , \quad k = 0, 1, \dots, s-1 \\
 p_s^* &= p_0^{(n)} \sum_{k=s}^{\infty} b_k^* + \sum_{u=1}^s p_u^{(n)} \sum_{v=s-u+1}^{\infty} b_v^* .
 \end{aligned}
 \tag{5.14}$$

Aus diesen Zustandswahrscheinlichkeiten lassen sich die charakteristischen Größen wie Verlustwahrscheinlichkeit B_D

$$B_D = p_s^* , \tag{5.15}$$

und die mittlere Wartezeit $E[T_{WD}]$

$$E[T_{WD}] = \frac{L_D}{\lambda_D(1 - B_D)} \tag{5.16}$$

mit

$$L_D = \sum_{k=1}^s k p_k^* \tag{5.17}$$

der Datenpakete ermitteln; L_D bedeutet dabei die mittlere Warteschlangenlänge. Die mittlere Wartezeit nach Gl. 5.16 folgt aus dem Gesetz von Little [104].

Ein iteratives Berechnungsverfahren für reine Poisson-Datenankünfte, das die Methode der eingebetteten Markoff-Kette nutzt und bedingte Zykluszeiten berücksichtigt, ist in [133,157] veröffentlicht. Ausgehend von diesem Verfahren, das nur eine Datenwarteschlange je Station und keine Prioritäten berücksichtigt, sollen im folgenden die notwendigen Erweiterungen durchgeführt werden, um für die verschiedenen Sprachintegrationsverfahren auf Token Passing-Basis die charakteristischen Systemgrößen für die Daten- und Sprachpriorität zu bestimmen.

5.3 Analyse von Token Passing LANs mit zentraler Sprachpriorisierung

5.3.1 Modellierung der zentralen Sprachpriorisierung

Die Modellbildung der zentralen Prioritätsverfahren (siehe Kap. 4.4), muß das Verhalten der SM-Station berücksichtigen, da diese periodisch einen Sprachzyklus in die laufenden Datenübertragungen einschieben will. Die zeitliche Abfolge der Sprachpriorisierung mittels zentraler SM-Station ist in Bild 5.4 dargestellt. Die Warteschlangen auf der Datenprioritätsebene werden zyklisch bedient, d.h. es gilt das Stationsphasenmodell gemäß Bild 5.3. Ist eine Datenwarteschlange leer, wird sofort zur nächsten Datenwarteschlange weitergeschaltet.

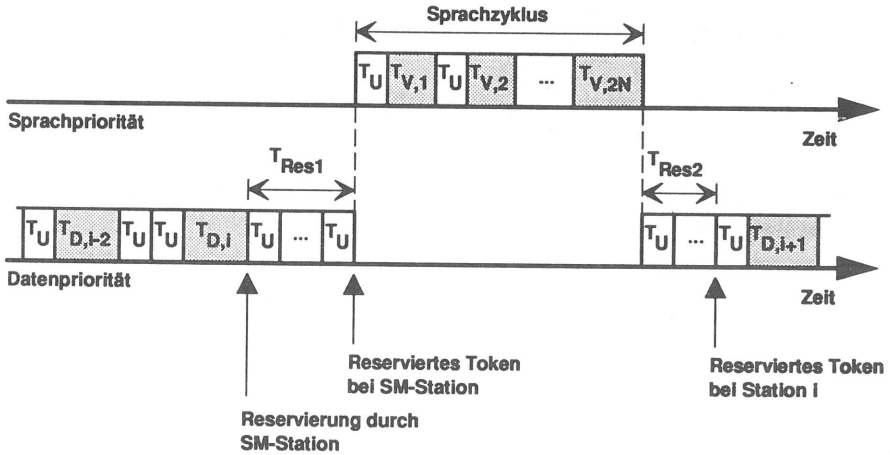


Bild 5.4: Durchführung eines Sprachzyklus mittels Reservierung bei Token Passing-Verfahren mit zentral gesteuert Sprachpriorisierung

Zu äquidistanten Zeitpunkten versucht die SM-Station die Tokenpriorität zu erhöhen, um einen Sprachzyklus einzuleiten. Dies kann auf zwei Arten geschehen:

- 1) Durch Reservierung, d.h. die SM-Station setzt im Steuerfeld des Datenpakets aus Station i die Reservierungsbits und wartet auf das von Station i nach Beendigung der aktuellen Datenübertragung ausgesendete reservierte Token (Bild 5.4). Nach einigen Umschaltzeiten T_{Res1} ist dieses bei der SM-Station angekommen. Daraufhin erzeugt die SM-Station ein Token höherer Priorität, das nur von den Sprachstationen als Sendeberechtigung erkannt wird. Die Dauer des Sprachzyklus T_{CV} ergibt sich bei N Sprachverbindungen zu

$$T_{CV} = 2N \cdot T_{PV} + G \cdot T_U \quad , \quad (5.18)$$

für den Fall, daß die Sprachpaketübertragungen nach dem Token Passing-Protokoll erfolgen; wird für die Sprachpaketübertragung ein spezieller Sprach-Frame eingesetzt (siehe Kap. 4.4), dessen Übertragungsdauer durch die ZV T_{VF} repräsentiert sei, ergibt sich die Dauer für einen Sprachzyklus zu

$$T_{CV} = 2T_{VF} + G \cdot T_U \quad . \quad (5.19)$$

Nach diesem Sprachzyklus wird ein reserviertes Token von der SM-Station wieder zu Station i gesendet (T_{Res2}), die Station i wandelt das reservierte Token in ein freies Token niederer Datenpriorität und gibt das freie Token zur nächsten Datenstation $i+1$, die damit ihre Datenübertragung beginnen kann. Die Reservierungszeiten T_{Res1}

und T_{Res2} zwischen Daten- und Sprachzyklus entsprechen in der Summe immer einem Leerzyklus T_{C0} (Bild 5.4)

$$T_{C0} = G \cdot T_U \quad (5.20)$$

- 2) Durch Tokenweitergabe; die SM-Station erhält das Token und kann somit den Sprachzyklus sofort, d.h. ohne Reservierungszeit, einleiten.

Aufgrund des zentral arbeitenden Sprachintegrationsverfahrens kann das System auf ein modifiziertes Polling-Modell (Bild 5.5) abgebildet werden. Die G Datenwarteschlangen werden entsprechend des Token Passing-Protokolls zyklisch bedient. Zu äquidistanten Zeitpunkten wird diese zyklische Datenbedienung gemäß dem oben genannten Priorisierungsverfahren unterbrochen, und alle Sprachwartepplätze werden nach dem Token Passing-Prinzip abgearbeitet. Deshalb können die $2 \cdot N$ Sprecher (bei N aktiven Sprachverbindungen) im Modell logisch von den Datenwarteschlangen separiert werden (Bild 5.5). Es gelten die in Kap. 5.1.2 getroffenen Voraussetzungen für die

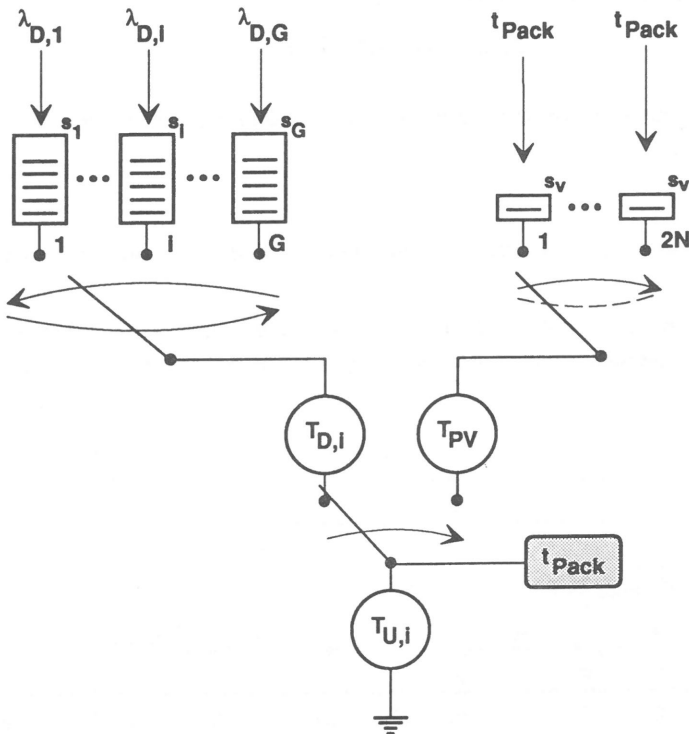


Bild 5.5: Modifiziertes Polling-Modell für Token Passing-Protokolle mit zentral gesteuerter Sprachpriorisierung

Datenpaket- und Sprachpaketankunfts- und -bedienprozesse sowie die dort vereinbarten Annahmen bezüglich der endlichen Warteschlangenlängen.

Da die Reservierungswahrscheinlichkeit, mit der ein Sprachzyklus um T_{CO} verlängert wird, nicht bekannt ist, und um den eingeschobenen Sprachzyklus nach oben hin abzuschätzen, wird angenommen, daß in jedem Fall eine Reservierung stattfindet; damit ergibt sich als Sprachzykluszeit einschließlich der Reservierungszeit

$$T_{CVO} = T_{CV} + T_{CO} \quad (5.21)$$

Aufgrund der getroffenen Annahmen, daß die Sprachpakete sowie die Umschaltzeiten konstante Dauern besitzen, ist auch die ZV T_{CVO} eine konstante Größe. Die Zeit zwischen zwei Tokenankünften an einer Datenwarteschlange entspricht nun nicht mehr der Zykluszeit T_C nach Gl. 5.11, sondern einer modifizierten Zykluszeit T_{CM} . Wird die Anzahl eingeschobener Sprachzyklen der Dauer T_{CVO} durch die ZV X ausgedrückt, gilt

$$T_{CM} = T_C + X \cdot T_{CVO} \quad (5.22)$$

wobei die Anzahl eingeschobener Sprachzyklen X von der modifizierten Zykluszeit T_{CM} abhängig ist.

5.3.2 Berechnung der Anzahl deterministischer Ankünfte in einem Zeitintervall

Die Reservierungsintervalle durch die SM-Station sind deterministisch mit dem Ankunftsabstand t_{Pack} . Diese Intervalle zwischen aufeinanderfolgenden Reservierungszeitpunkten sind konstant und

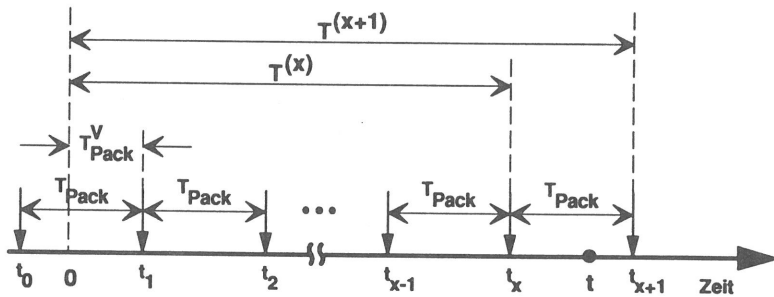


Bild 5.6: Zusammenhang zwischen der Anzahl Erneuerungen und deren Zeitdauer

identisch verteilt. Somit läßt sich die Wahrscheinlichkeit $q_{vx}(t)$ angeben, daß genau x Reservierungszeitpunkte (Erneuerungen) in einem Intervall der Dauer t liegen (Bild 5.6)

$$\begin{aligned} q_{vx}(t) &= P\{X = x\} = P\{T^{(x)} \leq t \leq T^{(x+1)}\} \\ &= F^{(x)}(t) - F^{(x+1)}(t) \end{aligned} \quad (5.23)$$

wobei $F^{(x)}(t)$ die VF der ZV $T^{(x)}$ ist mit

$$T^{(x)} = \begin{cases} 0 & \text{für } x = 0 \\ T_{Pack}^V + \sum_{u=1}^{x-1} T_{Pack} & \text{für } x = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (5.24)$$

und T_{Pack}^V der Vorwärtsrekurrenzzeit der ZV T_{Pack} entspricht.

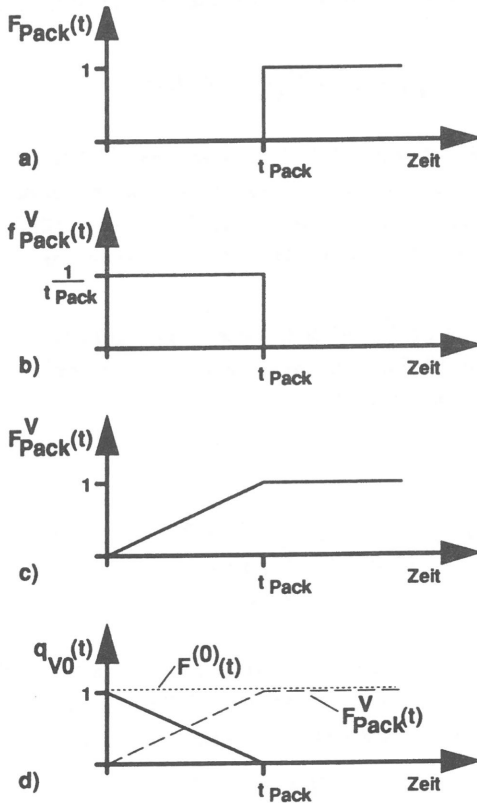


Bild 5.7: Grafische Bestimmung von $q_{v0}(t)$

Für den Fall einer deterministischen Verteilung der Ankunftsabstände T_{Pack} kann $q_{vx}(t)$ relativ einfach grafisch hergeleitet werden. Aus der VF des Ankunftsprozesses (Bild 5.7a) ergibt sich nach Gl. 3.16 die VDF $f^V_{Pack}(t)$ (Bild 5.7b), und man erhält daraus durch Integration die VF der Vorwärtsrekurrenzzeit $F^V_{Pack}(t)$ (Bild 5.7c). Die Wahrscheinlichkeit $q_{v0}(t)$, daß im Intervall $[0, t]$ keine Ankunft stattfindet, ergibt sich mit Gl. 5.23 aus der Differenz der beiden VFen $F^{(0)}(t)$ und $F^{(1)}(t)$ (Bild 5.7d) zu

$$q_{v0}(t) = \begin{cases} 1 - \frac{t}{t_{Pack}} & \text{für } 0 \leq t \leq t_{Pack} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}, \quad (5.25)$$

wobei wegen der konstanten ZV T_{Pack} auch $T_{Pack} = t_{Pack}$ geschrieben werden kann. Die Wahrscheinlichkeit, daß im Intervall $[0, t]$ genau eine Ankunft stattfindet, ergibt sich gleichfalls gemäß Gl. 5.23 zu

$$q_{v1}(t) = F^{(1)}(t) - F^{(2)}(t). \quad (5.26)$$

Zur Bestimmung von $F^{(2)}(t)$ ist die VF der Zufallsvariablen $T^{(2)} = T^V_{Pack} + T_{Pack}$ gemäß Gl. 5.24 zu bestimmen. die VDF der ZV $T^{(2)}$ berechnet sich aus der Faltung der beiden VDFen $f^V_{Pack}(t)$ und $f_{Pack}(t)$ (Bild 5.8a,b). Durch Integration erhält man die VF $F^{(2)}(t)$ (Bild 5.8c) und damit läßt sich unter Anwendung von Gl. 5.26 die Wahrscheinlichkeit $q_{v1}(t)$ bestimmen (Bild 5.8d).

Analog dazu ergeben sich die Wahrscheinlichkeiten $q_{v2}(t)$, $q_{v3}(t)$, etc., die sich aufgrund der mehrfachen Faltungen mit der VDF $f_{Pack}(t)$ jeweils nur um T_{Pack} verschieben. Die Funktion $q_{vx}(t)$ lautet somit in algebraischer Form für $x=1,2,\dots$

$$q_{vx}(t) = \begin{cases} \frac{t}{t_{Pack}} - (x-1) & \text{für } (x-1)t_{Pack} \leq t \leq xt_{Pack} \\ \frac{t}{t_{Pack}} + (x+1) & \text{für } xt_{Pack} \leq t \leq (x+1)t_{Pack} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}. \quad (5.27)$$

Die Wahrscheinlichkeiten $q_{vx}(t)$ sind noch abhängig vom gewählten Zeitintervall t , also bedingte Wahrscheinlichkeiten. Für den hier zu betrachtenden Fall muß q_{vx} die Wahrscheinlichkeit für genau x Ankünfte während eines Zykluszeitintervalls T_C sein, somit muß gelten

$$\begin{aligned} q_{vx} &= P\{X = x\} \\ &= \int_0^\infty q_{vx}(t) f_C(t) dt. \end{aligned} \quad (5.28)$$

Mit Gl. 5.26 - Gl. 5.28 kann die Wahrscheinlichkeit für genau x deterministische Ankünfte während einer Zykluszeit bestimmt werden.

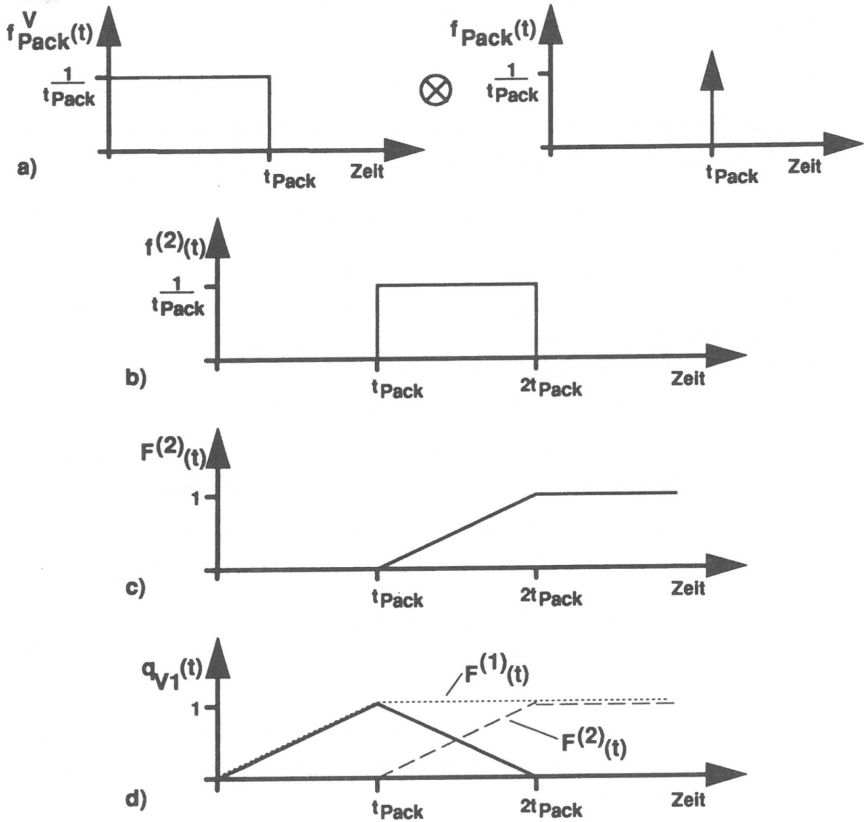


Bild 5.8: Grafische Bestimmung von $q_{v1}(t)$

5.3.3 Algorithmus zur Bestimmung der Systemgrößen

Die Anzahl durchgeführter Sprachzyklen X während der modifizierten Zykluszeit sowie der Zustandsprozess $X_D(t)$ der Datenwarteschlange sind die zu bestimmenden Systemgrößen, mit deren Hilfe Verlustwahrscheinlichkeiten und die Wartezeiten bestimmt werden können.

Der Berechnungsalgorithmus ist entsprechend Kap. 5.2 dreigeteilt; im ersten Schritt werden der Zustandsprozeß $X_D(t)$ zu den Tokenankunftszeitpunkten sowie die Anzahl eingeschobener Sprachzyklen X pro Zyklus bestimmt. Diese Berechnung erfordert ein iteratives Verfahren, für das im fol-

genden ein Iterationsschritt dargestellt wird; die während eines Iterationsschrittes zu berechnenden Größen sind in Bild 5.9 aufgezeigt. (Aus Übersichtlichkeitsgründen wird im folgenden wieder der Stationsindex i weggelassen).

- Zuerst werden die bedingten Zykluszeiten T_C^1 und T_C^2 gemäß Gl. 5.10 berechnet
- Diese werden dann mit der, aus dem vorherigen Iterationsschritt bestimmten Größe X modifiziert. Dabei gilt für die modifizierte Zykluszeit T_{CM} im Bildbereich

$$\phi_{CM}(s) = \sum_{z=0}^{\infty} p_{vz} \phi_C(s) [\phi_{CVO}(s)]^z, \quad (5.29)$$

wobei x nur die Werte $0, 1, \dots, G$ annehmen kann, da nach jedem eingeschobenen Sprachzyklus die Bedienung der Datenpakete laut Protokoll fortgesetzt werden muß, was zu einer maximal möglichen Anzahl von G eingeschobenen Sprachzyklen während der Zykluszeit T_{CM} führt. Mit den zwei bedingten Zykluszeiten T_C^1 und T_C^2 ergeben sich mit Gl. 5.29 zwei bedingte, modifizierte Zykluszeiten T_{CM}^1 und T_{CM}^2 .

- Aus T_{CM}^1 und T_{CM}^2 wird unter Anwendung von Gl. 5.11 die unbedingte, modifizierte Zykluszeit T_{CM} berechnet, aus der die Zufallsgröße X neu bestimmt wird
- Mit Hilfe der beiden bedingten, modifizierten Zykluszeiten T_{CM}^1 und T_{CM}^2 werden dann die Übergangswahrscheinlichkeiten b_m^1, b_m^2 analog zu Gl. 5.7 bestimmt

$$\begin{aligned} b_m^1 &= \int_0^{\infty} a_m(t) f_{CM}^1(t) dt \\ b_m^2 &= \int_0^{\infty} a_m(t) f_{CM}^2(t) dt \end{aligned} \quad (5.30)$$

- Aus dem Zustandsvektor \underline{p} zum Zeitpunkt t_n und den bedingten Übergangswahrscheinlichkeiten b_m^1 und b_m^2 errechnet sich der Zustandsvektor \underline{p} zum nächsten Regenerationszeitpunkt t_{n+1} gemäß Gl. 5.8 zu

$$\begin{aligned} p_k^{(n+1)} &= p_0^{(n)} b_k^1 + \sum_{u=1}^{k+1} p_u^{(n)} b_{k-u+1}^2, \quad k = 0, 1, \dots, s-1 \\ p_s^{(n+1)} &= p_0^{(n)} \sum_{k=s}^{\infty} b_k^1 + \sum_{u=1}^s p_u^{(n)} \sum_{v=s-u+1}^{\infty} b_v^2 \end{aligned}$$

- Die neue Stationsdurchlaufzeit $T_{Stat}^{(n+1)}$ ergibt sich mit $p_0^{(n)}$ gemäß Gl. 5.31 im Bildbereich als Laplace-Transformierte zu (5.31)

$$\phi_{Stat,i}(s) = \phi_{U,i}(s)[p_0 + (1 - p_0)\phi_{D,i}(s)] \quad (5.32)$$

Für die Iteration müssen Startwerte für den Zustandsprozeß der Datenwarteschlange X_D und für die Anzahl eingeschobener Sprachzyklen X vorgegeben werden. Als Abbruchkriterium für die Iteration wird die Summe der relativen Änderungen aller mittleren Warteschlangenlängen L_j , $j=1,2,\dots,G$ und von X verwendet.

Im zweiten Schritt des Berechnungsverfahrens wird nun der Zustandprozeß $X_D(t)$ zu einem beliebi-

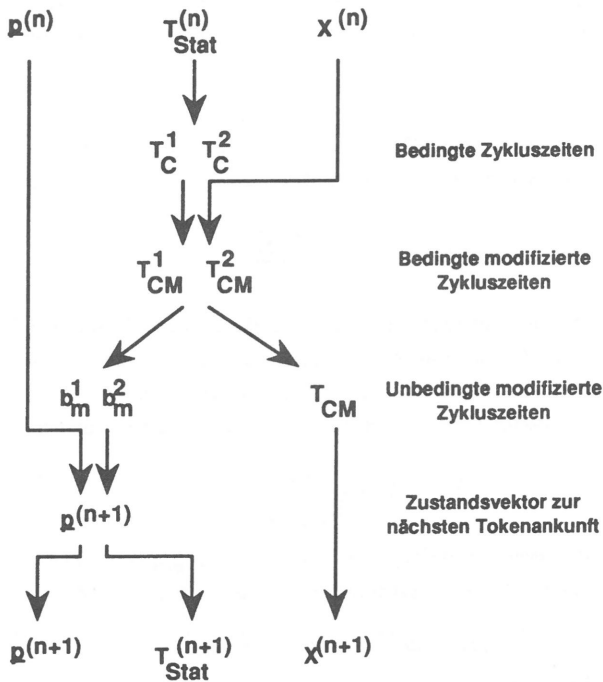


Bild 5.9: Ablauf eines Iterationsschrittes zur Bestimmung von $X_D(t)$ und X in einer Station i

gen Zeitpunkt bestimmt. Mittels Gl. 5.13 ergeben sich die Übergangswahrscheinlichkeiten b_m^{1*} und b_m^{2*} von einem Regenerationszeitpunkt bis zu einem beliebigen Zeitpunkt zu

$$\begin{aligned} b_m^{1*} &= \int_0^\infty a_m(t) f_{CM}^{1r}(t) dt \\ b_m^{2*} &= \int_0^\infty a_m(t) f_{CM}^{2r}(t) dt \end{aligned} \quad (5.33)$$

und daraus ergeben sich die Zustandswahrscheinlichkeiten zu einem beliebigen Zeitpunkt p_k^* konform zu Gl. 5.31

$$\begin{aligned} p_k^* &= p_0 b_k^{1*} + \sum_{u=1}^{k+1} p_u b_{k-u+1}^{2*}, \quad k = 0, 1, \dots, s-1 \\ p_s^* &= p_0 \sum_{k=s}^\infty b_k^{1*} + \sum_{u=1}^s p_u \sum_{v=s-u+1}^\infty b_v^{2*}. \end{aligned} \quad (5.34)$$

Aus Gl. 5.34 erhält man unter Anwendung von Gl. 5.15 - Gl. 5.17 sofort die Verlustwahrscheinlichkeit der Datenpakete sowie die mittlere Warteschlangenlänge bzw. die mittlere Wartezeit der Datenpakete.

Mit Hilfe der mittleren Zykluszeit $E[T_{CM}]$ und der im Mittel eingefügten Sprachzyklen $E[X]$ wird im dritten Teil der Analyse der mittlere Tokenankunftsabstand an den Sprachspeichern $E[T_{CVI}]$ bestimmt.

$$E[T_{CVI}] = \frac{E[T_{CM}]}{E[X]}. \quad (5.35)$$

Ist die Bedienrate an den Sprachspeichern (Kehrwert des mittleren Tokenankunftsabstands an den Sprachspeichern $E[T_{CVI}]$) kleiner als die Sprachpaketankunftsrate ($1/t_{Pack}$), treten Sprachverluste auf. Die Sprachverlustwahrscheinlichkeit B_V ergibt sich aus der Differenzrate zwischen Sprachpaketankunftsrate und Sprachpaketbedienrate bezogen auf die Sprachpaketankunftsrate zu

$$B_V = 1 - \frac{t_{Pack}}{E[T_{CVI}]}. \quad (5.36)$$

Die maximale Verlustwahrscheinlichkeit für Sprachpakete B_{Vmax} ergibt sich für den Fall, daß die unmodifizierte Zykluszeit T_C um maximal G Sprachzyklen verlängert wird

$$E[T_{CM}] = E[T_C] + G \cdot E[T_{CVO}], \quad (5.37)$$

und somit ergibt sich für $E[T_{CVI}]$

$$\begin{aligned}
 E[T_{CVI}] &= \frac{E[T_{CM}]}{E[X]} \\
 &= \frac{E[T_C]}{G} + E[T_{CVO}] \\
 &= E[T_D] + E[T_U] + E[T_{CVO}] \quad \text{für } p_0 = 0 .
 \end{aligned}
 \tag{5.38}$$

Mit Gl. 5.36 ergibt sich

$$B_{Vmax} = 1 - \frac{t_{Pack}}{E[T_D] + E[T_U] + E[T_{CVO}]} .
 \tag{5.39}$$

Für die maximale Anzahl Sprachverbindungen N_{max} welche die SM-Station zulassen kann, muß gelten

$$2N \cdot E[T_V] + E[T_{C0}] + E[T_D] + E[T_U] + E[T_{C0}] \leq E[T_{CVI}] ,
 \tag{5.40}$$

und bei vorgegebenem B_{Vmax} erhält man mit Gl. 5.39 für die maximale Anzahl zulässiger Sprachverbindungen

$$N_{max} = \frac{\frac{t_{Pack}}{1-B_{Vmax}} - (E[T_D] + E[T_U] + 2E[T_{C0}])}{2E[T_V]} .
 \tag{5.41}$$

5.3.4 Ergebnisse

Die vorgestellte Methode zur Analyse von Token Passing LANs mit zentraler Sprachpriorisierung erlaubt sowohl die Untersuchung von symmetrischen Systemen, d.h. alle stationsindividuellen Systemgrößen sind identisch, als auch die Untersuchung von Systemen mit unterschiedlichen Verkehrsaufkommen bzw. Stationsparametern. Die analytisch ermittelten Ergebnisse wurden mit Hilfe der zeitreuen Simulation (Kap. 4.1) validiert. In den nachfolgenden Diagrammen sind neben den analytisch ermittelten Kurven die Simulationsergebnisse mit ihren 95% Vertrauensintervallen dargestellt.

Exemplarisch zeigen die Bilder 5.10 und 5.11 das Verhalten der Datenpriorität einer Station bei symmetrischen Systemparametern. Das Token-Ring System besitzt eine Übertragungsrate von 10 Mbit/s und es sind 100 Stationen angeschlossen, die das System gleichverteilt mit Datenverkehr belasten. Die Datenpakete sind negativ-exponentiell verteilt mit dem Mittelwert $L_D=1000$ bit; die Kapazität der Datenwarteschlange in jeder Station beträgt 5 Warteplätze. Die Sprachpakete treffen alle 10 ms mit einer konstanten Länge von 640 bit in den Sprachspeichern der aktiven Sprach-/Datenstationen ein. Entsprechend leitet die SM-Station alle 10 ms einen Sprachzyklus ein.

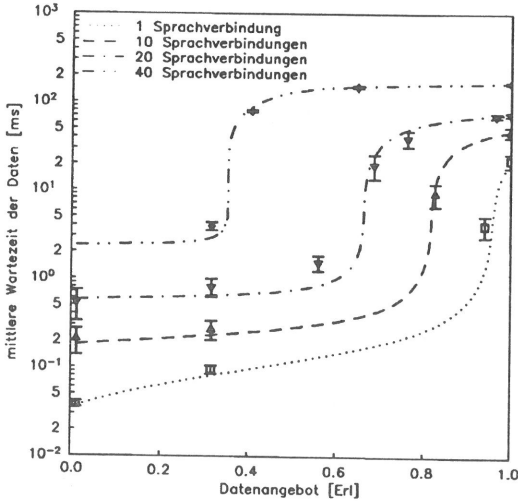


Bild 5.10: Mittlere Wartezeit der Datenpakete in Abhängigkeit des Datenangebots bei verschiedener Anzahl aktiver Sprachverbindungen

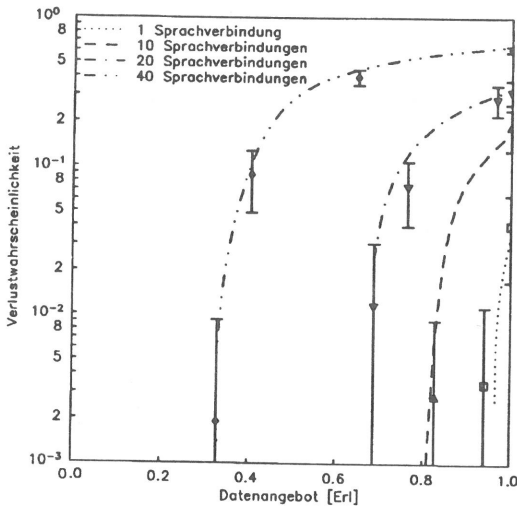


Bild 5.11: Verlustwahrscheinlichkeit der Datenpakete in Abhängigkeit des Datenangebots

Der typische Verlauf der mittleren Wartezeit der Datenpakete ist in Bild 5.10 dargestellt, wobei die Anzahl aktiver Sprachverbindungen als Scharparameter aufgetragen ist. Im Bereich der Niederlast ist nur ein leichtes Ansteigen der mittleren Datenpaketwartezeit bei steigendem Datenangebot festzustellen. Erreicht das Gesamtangebot aus Daten- und Sprachpaketverkehr die Übertragungskapazität des Lokalen Netzes, steigt die Wartezeit der Datenpakete aufgrund der Priorisierung der Sprachpakete sprunghaft an. Das Abflachen der Wartezeit der Datenpakete im Hoch- bzw. Überlastbereich ergibt sich aus den begrenzten Wartespeichern der Datenpakete und den daraus resultierenden Verlusten.

Die Ergebnisse der Analyse unterschätzen den Niederlastbereich, da die eingesetzte Zykluszeitanalyse die Abhängigkeiten der Stationen untereinander nicht berücksichtigt (siehe Kap. 5.2.1.2) [94,132]. Der ausgeprägte Anstieg der mittleren Wartezeit in den Ergebnissen macht dies ebenfalls deutlich. Generell zeigen jedoch die analytischen Ergebnisse immer dieselbe Tendenz auf wie die simulativ gewonnenen Resultate; dies gilt auch für andere Systemgrößen, wie z.B. der in Bild 5.11 dargestellten Datenpaketverlustwahrscheinlichkeit.

5.4 Analyse von Token Passing LANs mit stationsinterner Sprachpriorisierung

5.4.1 Modellierung der stationsinternen Sprachpriorisierung

Das stationsinterne Sprachpriorisierungsprotokoll unterscheidet keine Prioritäten auf dem Medium (siehe Kap. 4.4), d.h. es existiert nur eine Tokenpriorität. Empfängt eine Station die Sendeberechtigung, so wird innerhalb der Station überprüft, ob ein Sprachpaket zur Übertragung ansteht; wartet bei Tokenankunft kein Sprachpaket, so kann, falls vorhanden, ein Datenpaket übertragen werden. Damit ergibt sich ein Phasenmodell für jede Station gemäß Bild 5.12.

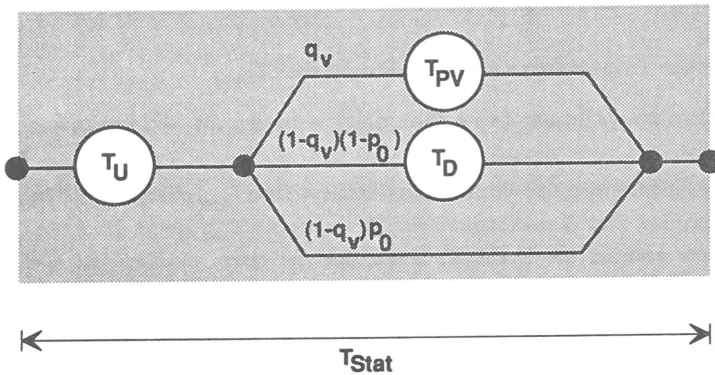


Bild 5.12: Phasenmodell der Durchlaufzeit durch eine Station bei stationsinternem Sprachpriorisierungsprotokoll

Aufgrund der stationsinternen Sprachpriorisierung sind zwei Verzweigungswahrscheinlichkeiten für das Phasenmodell einer Station zu definieren:

- q_v ; Wahrscheinlichkeit, daß bei Tokenankunft ein Sprachpaket im Sprachspeicher anzutreffen ist
- p_0 ; Wahrscheinlichkeit, daß bei Tokenankunft kein Datenpaket in der Datenwarteschlange anzutreffen ist.

Um die Abhängigkeit der Zykluszeit von der eigenen, betrachteten Station zu berücksichtigen, ist es erforderlich, als Erweiterung zu Kap. 5.2.1.2 nunmehr drei bedingte Zykluszeiten T_C^1, T_C^2, T_C^3 einzuführen. Die ZV T_C^1 repräsentiert dabei die Zykluszeit für den Fall, daß an der betrachteten Station i keine Bedienung stattfindet; die ZV T_C^2 beinhaltet noch zusätzlich eine Sprachpaketbedienung und die ZV T_C^3 beschreibt die Zykluszeit, die an der Station i eine Datenpaketüber-

tragung beinhaltet. Die VDFen $F_{C^1,i}(t)$, $F_{C^2,j}(t)$ und $F_{C^3,i}(t)$ können im Bildbereich als Laplace-Transformierte wie folgt angegeben werden

$$\begin{aligned}\phi_{C,i}^1(s) &= \phi_{U,i}(s) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^G \phi_{Stat,j}(s) \\ \phi_{C,i}^2(s) &= \phi_{U,i}(s) \phi_{V,i}(s) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^G \phi_{Stat,j}(s) \\ \phi_{C,i}^3(s) &= \phi_{U,i}(s) \phi_{D,i}(s) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^G \phi_{Stat,j}(s)\end{aligned}\tag{5.42}$$

mit der Laplace-Transformierten der Stationsdurchlaufzeit $T_{Stat,j}$

$$\phi_{Stat,j}(s) = \phi_{U,j}(s)[q_v \phi_{V,j}(s) + (1 - q_v)(1 - p_0) \phi_{D,j}(s) + (1 - q_v)p_0] ,\tag{5.43}$$

wobei angenommen wird, daß die einzelnen Durchlaufzeiten $T_{Stat,j}$ durch die Stationen unabhängig voneinander sind. Der Zustandsprozeß der Datenwarteschlange sowie die Anzahl eintreffender Sprachpakete während der Zykluszeit lassen sich mit einem modifizierten Algorithmus nach Kap. 5.3.3 bestimmen.

5.4.2 Algorithmus zur Bestimmung der Systemgrößen

Der Berechnungsalgorithmus ist dreigeteilt; im ersten Berechnungsabschnitt wird der Zustandsprozeß $X_D(t)$ zu den Tokenankunftszeitpunkten bestimmt. Das in Kap. 5.3.3 vorgestellte iterative Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Zustandsprozesses $X_D(t)$ ist dazu leicht abzuwandeln. Die während eines Iterationsschrittes zu berechnenden Größen sind in Bild 5.13 dargestellt. Aus Übersichtlichkeitsgründen wird im folgenden wieder der Stationsindex i weggelassen.

- Zuerst werden die bedingten Zykluszeiten T_{C^1} , T_{C^2} und T_{C^3} gemäß Gl. 5.42 bestimmt
- Zur Bestimmung der Antreffwahrscheinlichkeit q_v eines Sprachpakets werden unter Anwendung von Gl. 5.28 drei bedingte Antreffwahrscheinlichkeiten q_v^1 , q_v^2 und q_v^3 berechnet

$$\begin{aligned}q_v^x &= 1 - q_{v0}^x \\ &= 1 - \int_0^\infty q_{v0}^x(t) f_C(t) dt , \quad x = 1, 2, 3 .\end{aligned}\tag{5.44}$$

In Anlehnung an das Phasenmodell (Bild 5.12) läßt sich daraus mit Hilfe des Gesetzes der totalen Wahrscheinlichkeit die Antreffwahrscheinlichkeit q_v für ein Sprachpaket zum Zeitpunkt der Tokenankunft bestimmen

$$q_v = p_0(1 - q_v)q_v^1 + q_v q_v^2 + (1 - p_0)(1 - q_v)q_v^3 \quad (5.45)$$

- Analog Gl. 5.7 werden mit den drei bedingten Zykluszeiten T_C^1, T_C^2 und T_C^3 drei bedingte Übergangswahrscheinlichkeiten b_m^1, b_m^2 und b_m^3 berechnet

$$b_m^x = \int_0^\infty a_m(t) f_C^x(t) dt, \quad x = 1, 2, 3 \quad (5.46)$$

- Aus dem Zustandsvektor p zum Zeitpunkt t_n und den bedingten Übergangswahrscheinlichkeiten b_m^1, b_m^2 und b_m^3 errechnet sich der Zustandsvektor p zum nächsten Regenerationszeitpunkt t_{n+1} gemäß Gl. 5.8 zu

$$p_k^{(n+1)} = (1 - q_v)p_0^{(n)}b_k^1 + q_v \sum_{u=0}^k p_u^{(n)}b_{k-u}^2 + (1 - q_v) \sum_{u=1}^{k+1} p_u^{(n)}b_{k-u+1}^3, \quad k = 0, 1, \dots, s - 1 \quad (5.47)$$

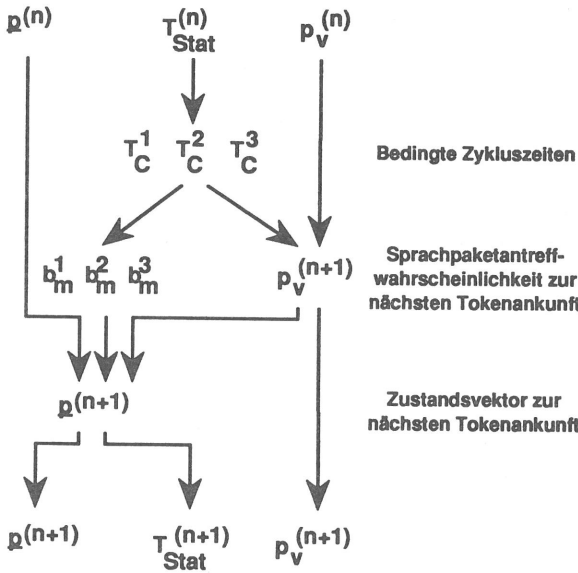
$$p_s^{(n+1)} = (1 - q_v)p_0^{(n)} \sum_{k=s}^\infty b_k^1 + q_v \sum_{u=0}^s p_u^{(n)} \sum_{v=s-1}^\infty b_v^2 + (1 - q_v) \sum_{u=1}^s p_u^{(n)} \sum_{v=s-u+1}^\infty b_v^3$$

- Die neue Stationsdurchlaufzeit $T_{Stat}^{(n+1)}$ ergibt sich mit p_0 aus Gl. 5.47 im Bildbereich als Laplace-Transformierte nach Gl. 5.43.

Für die Iteration müssen Startwerte für den Zustandsprozeß der Datenwarteschlange $X_D(t)$ und für die Antreffwahrscheinlichkeit eines Sprachpakets q_v vorgegeben werden. Als Konvergenzkriterium für die Iteration dient die Summe der relativen Änderungen aller mittleren Warteschlangenlängen $L_j, j=1,2,\dots,G$.

Im zweiten Teil des Berechnungsverfahrens wird nun der Zustandprozeß $X_D(t)$ zu einem beliebigen Zeitpunkt bestimmt. Konform zu der Betrachtungsweise in Kap 5.3.3 erhält man die Zustandswahrscheinlichkeiten zu einem beliebigen Zeitpunkt p_k^*

$$\begin{aligned}
 p_k^* &= (1 - q_v) p_0 b_k^{1*} + q_v \sum_{u=0}^k p_u b_{k-u}^{2*} \\
 &+ (1 - q_v) \sum_{u=1}^{k+1} p_u b_{k-u+1}^{3*}, \quad k = 0, 1, \dots, s-1 \\
 p_s^* &= (1 - q_v) p_0 \sum_{k=s}^{\infty} b_k^{1*} + q_v \sum_{u=0}^s p_u \sum_{v=s-1}^{\infty} b_v^{2*} \\
 &+ (1 - q_v) \sum_{u=1}^s p_u \sum_{v=s-u+1}^{\infty} b_v^{3*}.
 \end{aligned}
 \tag{5.48}$$



Aus Gl. 5.48 erhält man unter Anwendung von Gl. 5.15 - Gl. 5.17 sofort die Verlustwahrscheinlichkeit der Datenpakete sowie die mittlere Warteschlangenlänge bzw. die mittlere Wartezeit der Datenpakete.

Bedingte Zykluszeiten

Sprachpaketantreffwahrscheinlichkeit zur nächsten Tokenankunft

Zustandsvektor zur nächsten Tokenankunft

Im dritten Schritt des Berechnungsverfahrens werden die Systemgrößen für die Sprachpriorität ermittelt. Mit Gl. 5.12 und Gl. 5.28 kann die Wahrscheinlichkeit für x eingetroffene Sprachpakete zu einem beliebigen Zeitpunkt zwischen zwei Tokenankünften angegeben werden. Da bei der Modellierung genau ein Sprachspeicher je Station angenommen wurde, berechnet

Bild 5.13: Ablauf eines Iterationsschrittes zur Bestimmung von $X_D(t)$ in einer Station i

sich die Verlustwahrscheinlichkeit B_V der Sprachpakete mittels Gl. 5.12 und Gl. 5.28 zu

$$B_V = 1 - q_{v0}^* - q_{v1}^*, \tag{5.49}$$

wobei q_{v0}^* und q_{v1}^* die Antreffwahrscheinlichkeiten für kein bzw. ein Sprachpaket in der betrachteten Station während der Rückwärtsrekurrenzzeit der Zykluszeit sind. Die Schranken für die mittlere Wartezeit der Sprachpakete $E[T_{WV}]$ lassen sich ebenfalls angeben; setzt man neben dem einen Sprachspeicher in jeder Station noch voraus, daß ein neu ankommendes Sprachpaket das bereits im Sprachspeicher wartende Paket überschreiben kann, gilt

$$0 \leq E[T_{WV}] \leq \min(E[T_C], t_{Pack}) . \tag{5.50}$$

5.4.3 Ergebnisse

Am Beispiel eines Token-Ring LANs mit 4 Mbit/s Übertragungsrate sollen die erzielbaren Ergebnisse dieses Berechnungsverfahrens gezeigt werden. Auch hier wurde ein System mit 100 Stationen jeweils mit 5 Datenwarteplätzen angenommen. Die Datenpaketlänge ist negativ-exponentiell verteilt, und das Verkehrsangebot ist symmetrisch über alle Stationen verteilt.

In Bild 5.14 ist die mittlere Wartezeit der Datenpakete über dem Datenangebot bei zwei unterschiedlichen Sprachkodierverfahren dargestellt. Verglichen wird das Verhalten von PCM-Sprachquellen, die äquidistant alle 8 ms Sprachpakete der Länge 512 bit erzeugen, mit ADPCM-Sprachquellen, die nur alle 16 ms Sprachpakete der Länge 512 bit generieren. Bei der stationsinternen Sprachpriorisierung zeigt sich, daß die Wartezeit der Datenpakete bei Einsatz von ADPCM-Sprachquellen erst bei einem höheren Datenangebot ansteigt als dies bei PCM-Sprachquellen der Fall ist; dies zeigt sich besonders deutlich bei 20 aktiven Sprachverbindungen. Außerdem ist ein exponentieller Anstieg der Datenpaketwartezeit bei Sprach-/Datenstationen zu erkennen (PCM-Sprachquellen), obwohl für die Datenpakete ein begrenzter Warteraum (5 Warteplätze) angenommen wurde. Dieser Effekt, der nur bei Stationen auftritt, die sowohl Sprach- als auch Datenpakete übertragen können, stellt sich ein, sobald die Zykluszeit größer wird als der Sprachpaketankunftsabstand, denn dann wartet bei jeder Tokenankunft an einer Sprach-/Datenstation ein Sprachpaket auf die Zuteilung des Übertragungskanals ($q_v=1$) und somit wird kein Datenpaket mehr in diesen Stationen bedient.

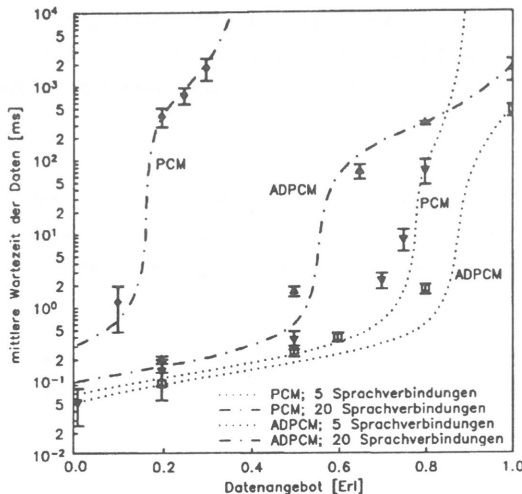


Bild 5.14: Mittlere Wartezeit der Datenpakete bei Sprach-/Datenstationen

Reine Datenstationen können weiterhin ihre Datenpakete übertragen, da die Sprachpriorisierung nur innerhalb der Sprach-/Datenstationen wirksam ist (siehe Kap. 4.4). Ist der Ankunftsabstand der Sprachpakete größer als die Zykluszeit (ADPCM-Sprachquellen), tritt dieser vollständige Blockierungseffekt der Daten innerhalb der Sprach-/Datenstationen auch bei Überlast nicht auf.

Vergleicht man die analytisch gewonnenen Ergebnisse mit den auf der Basis der zeitreuen Simulation ermittelten Werte (95% Vertrauensintervall)

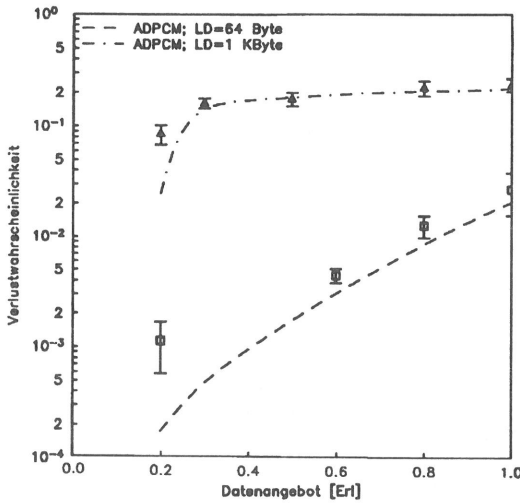


Bild 5.15: Verlustwahrscheinlichkeit der Sprachpakete in Abhängigkeit des Datenangebots

zeigen sich zum Teil deutliche Abweichungen. Dennoch ist der Verlauf der analytischen Resultate prinzipiell derselbe wie der Verlauf der simulativ bestimmten Werte. Leider führen auch bei diesem Berechnungsverfahren die unzureichend berücksichtigten Abhängigkeiten der Zykluszeit zu einer Unterschätzung der Werte der Wartezeit.

Dieselben Abweichungen sind auch bei den Ergebnissen für die Sprachpaketverlustwahrscheinlichkeit festzustellen (Bild 5.15). Dargestellt ist hier das oben beschriebene Token-Ring System mit 40 aktiven Sprachverbindungen und ADPCM-Sprachquellen; variiert wurde dabei die mittlere Datenpaketlänge.

Die Analyse unterschätzt auch hier die Sprachpaketverluste. Neben der bereits erwähnten vereinfachenden Annahme, daß die einzelnen Stationsdurchlaufzeiten unabhängig voneinander sind, trägt auch die, bei der Bestimmung der VDFen eingesetzte, Zwei-Momenten-Approximation zu den Abweichungen in den Ergebnissen bei.

Trotz dieser Abweichungen läßt sich mit den vorgestellten Berechnungsverfahren das Verhalten der verschiedenen Sprachintegrationsverfahren grundsätzlich bestimmen und bei der Dimensionierung von Token Passing-Systemen einsetzen. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen in jedem Fall den Verlauf der wichtigsten Systemgrößen.

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

6.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden unterschiedliche Möglichkeiten einer Integration von Sprach- und Datenkommunikation in lokalen Netzen und ihre Leistungsfähigkeit untersucht. Basierend auf den standardisierten Lokalen Netzen wurden Sprachintegrationsverfahren vorgestellt, modelliert und eine vergleichende Studie durchgeführt, welche die Leistungsfähigkeit der verschiedenen Lokalen Netze bei gemeinsamer Sprach- und Datenkommunikation unter Berücksichtigung unterschiedlicher Sprachkodierverfahren zeigt.

Um für die Dimensionierung von Token Passing-Systemen mit gemeinsamer Sprach- und Datenkommunikation sehr schnell hinreichend genaue Ergebnisse zu erhalten, wurden analytische Berechnungsverfahren entwickelt, mit deren Hilfe die wichtigsten Systemgrößen bestimmt werden können.

Zusammenfassend sollen die grundsätzlichen Aussagen, die bei einer Integration von Sprach- und Datenkommunikation in Lokalen Netzen gelten, genannt werden:

1. Die Sprachinformation sollte in jedem Fall priorisiert behandelt werden, um die Verzögerungen der Sprachinformation möglichst klein zu halten.
2. Interaktive Sprachkommunikation benötigt ohne spezielle Kodierverfahren in Lokalen Netzen eine feste Bandbreite (128 kbit/s pro Sprachverbindung bei PCM-Sprachübertragung); somit liegt, je nach Übertragungskapazität des Lokalen Netzes, die maximal mögliche Anzahl gleichzeitiger Sprachverbindungen bei den standardisierten LANs (16 Mbit/s Token-Ring) bei ca. 120 Verbindungen. Sprachkommunikation mittels Lokaler Netze kann deshalb nur ganz bedingt als Ersatz zur bisherigen Nebenstellentechnik eingesetzt werden.
3. Durch geeignete Sprachkodierverfahren läßt sich eine Reduktion der benötigten Bandbreite für Sprachverbindungen realisieren. Die Ausnutzung des menschlichen Sprachpausenverhaltens bewirkt dabei generell eine Halbierung der benötigten Bandbreite, so daß im vorgenannten Falle (16 Mbit/s Token-Ring) bis zu 300 Sprachverbindungen unterstützt werden können. Durch Kombination von Sprachpausenreduktions- und Sprachquellkodierverfahren läßt sich die benötigte Bandbreite für Sprachübertragungen noch weiter reduzieren.

4. Die Sprachpaketlänge sollte im Bereich von 400 - 800 bit liegen, um den Einfluß des notwendigen Paket-Overheads möglichst klein zu halten. Bei gegebener Sprachpaketlänge treten für Sprachquellkodierer, die eine Reduktion der Sprachdatenrate erlauben, längere Paketierzeiten auf. Sprachpausenreduktionsverfahren haben keinen Einfluß auf die Paketierdauer, deshalb eignen sie sich besser für eine Verringerung der zur Sprachübertragung notwendigen Bandbreite.
5. Aufgrund des hohen maximalen Durchsatzes und der fairen Aufteilung der Übertragungskapazität ist eine Integration von Sprach- und Datenkommunikation in Lokalen Netzen nach dem Token-Ring Standard sehr gut möglich; Token-Bus oder gar CSMA/CD-LANs sind nur bedingt für Sprachübertragungen einsetzbar.
6. Die Datenpaketlänge sollte, im Interesse kurzer Wartezeiten für die Sprachpakete, klein und konstant sein, damit der jeweilige Prioritätsmechanismus schnell greifen kann, was zu kurzen Sprachpaketwartezeiten und kleinen Schwankungen der Sprachpaketwartezeit führt.

6.2 Ausblick

Die aktuellen Entwicklungstendenzen gehen sehr stark in Richtung Bewegtbildkommunikation. Die dabei auftretenden Anforderungen an das Übermittlungssystem sind außer einem erhöhten Bandbreitenbedarf pro Verbindung identisch zu denen, die sich bei reiner Sprachkommunikation ergeben. Grundsätzlich gilt das oben genannte, wobei bei der Bewegtbildkommunikation die zur Verfügung stehende Bandbreite des Lokalen Netzes den eigentlich begrenzenden Faktor darstellt. Um den Bedarf an Bewegtbildkommunikation sowie schnellerer Datenübermittlung zu erfüllen, werden augenblicklich HSLANs mit deutlich höheren Übertragungsraten (>100 Mbit/s) entwickelt. Interessanterweise besitzen die allermeisten HSLANs, insbesondere diejenigen, die in den Standardisierungsgremien diskutiert werden, ein hybrides Vermittlungskonzept, das eine Integration von durchschalte- und paketvermittelnden Diensten auf einem Übertragungsmedium erlaubt.

Diese HSLANs sollen im innerbetrieblichen Einsatz die Vernetzung der bestehenden, standardisierten LANs und Nebenstellenanlagen ermöglichen. Der Problembereich, wie paketvermittelte Dienste (z.B. paketierte Sprachübertragung in LANs) auf durchschaltetermittelte Dienste (Sprachübertragung in Nebenstellenanlagen) und vice versa abgebildet werden, wird jedoch durch die heutigen, bekannten HSLAN-Konzepte nicht abgedeckt. Für diese Aufgabe ist eine Netzwerkeinheit (Gateway) zwischen den unterschiedlichen Systemen erforderlich.

Dieselbe Problematik existiert an den Netzübergängen von Lokalen Netzen auf die öffentliche Vermittlungstechnik. Das im Bereich der öffentlichen Vermittlungstechnik eingesetzte Schmalband-ISDN vermittelt Sprachinformation über durchgeschaltete B-Kanäle. Ein spezielles Gateway muß den Übergang vom Lokalen Netz, das paketierte und möglicherweise speziell quellkodierte Sprachinformationen liefert, auf die im Schmalband-ISDN vorgegebenen B-Kanäle umsetzen und zudem alle Steuerinformation über den D-Kanal weiterleiten.

Die heutigen Entwicklungen im Bereich der öffentlichen Vermittlungstechnik setzen auf ein reines paketvermittelndes Breitband-ISDN, in das alle Dienste integriert werden sollen. Nach dem ATM-Prinzip sollen alle Dienste mittels Paketen fester Länge (48 Byte Informationslänge und 5 Byte Paketsteuerinformation) übermittelt werden.

Sollte sich diese Entwicklung durchsetzen, sind ideale Voraussetzungen zur einfachen Kopplung von Lokalen Netzen und der öffentlichen Breitband-Vermittlungstechnik gegeben, die eine Vielzahl multimedialer Dienste, über heterogene Systeme und über große Entfernungen hinweg, ermöglichen.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] ABEDIN, M.J.; SMITH, D.G.; SMITH, J.L.: *The Scheduled Bus - An Efficient Protocol for mixed Voice and Data Local Communications*, Proceedings of the International Zürich Seminar, Zürich (1986), pp. 183-187
- [2] ABEDIN, M.J.; SMITH, D.G.; SMITH, J.L.: *Scheduled Bus Protocol for mixed Voice and Data Local Communications*, Computer Communications, Vol. 10 (1987), No. 4, pp. 171-178
- [3] ADAMS, J.L.; FALCONER, R.M.: *Orwell - A Protocol for Carrying Integrated Services on a Digital Communications Ring*, Electronic Letters, Vol. 20 (1984), No. 23, pp. 970-971
- [4] ANSI X3T9:*Fiber-Distributed Data Interface (FDDI) - Token Ring Media Access Control (MAC)*, (1988)
- [5] ANSI X3T9:*Fiber-Distributed Data Interface (FDDI) - Hybrid Ring Control*, (1989)
- [6] AOYAMA, T.; DAUMER, W.R.; MODENA G.: *Forward Voice Coding for Communications*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 6 (1988), No. 2, pp. 225-226
- [7] APPLETON, J.M.; PETERSON, M.M.: *Traffic Analysis of a Token Ring BPX*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 34 (1986), No. 5, pp. 417-422
- [8] BAHR, K.; STRECKER, H.O.: *Interfacing X.25 to ISDN - A PABX Approach*, Proceedings of the 1th International Conference on Data Communications in the ISDN Era, Tel Aviv (1985), pp. 143-156
- [9] BARBERIS, G.; PAZZAGLIA, D.: *Analysis and Optimal Design of a Packet-Voice Receiver*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 28 (1980), No. 2, pp. 217-227
- [10] BAUES, P.: *Lokale Netze mit Lichtwellenleitern*, Informatik-Spektrum (1985), No. 8, pp. 260-272
- [11] BELLAMY, J.: *Digital Telephony*, John Wiley & Son's, (1982)
- [12] BIALLY, T.; GOLD, B.; SENEFF, S.: *Technique for Adaptive Voice Flow Control in Packet Networks*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 28 (1980), No. 3, pp. 325-333
- [13] BLACK, D.H.: *PLC-1: A TASI System for Small Trunk Groups*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 30 (1982), No. 4, pp. 786-791
- [14] BRADY, P.T.: *A Statistical Analysis of On-Off Patterns in 16 Conversations*, Bell System Technical Journal, Vol. 47 (1968), No. 1, pp. 73-91
- [15] BRADY, P. T.: *A Model for Generating On-Off Speech Pattern in Two-Way Conversation*, Bell System Technical Journal, (1969), No. 9, pp. 2445-2472

- [16] BULLINGTON, K.; FRASER, J.M.: *Engineering Aspects of TASI*, Bell System Technical Journal, Vol. 39 (1959), No. 3, pp. 353-364
- [17] BUX, W.; TRUONG, H.L.: *Mean-Delay Approximation for Cyclic-Service Queuing Systems*, Performance Evaluation, Vol. 3 (1981), pp. 187-196
- [18] BUX, W.; CLOSS, F.H.; JANSON, P.; KÜMMERLE, K.; MÜLLER, H.R.: *A Reliable Token Ring System for Local-Area Communication*, Proceedings of the National Teletraffic Conference 81, New Orleans, Vol. A2 (1981), pp. 2.1-2.6
- [19] BUX, W.: *Local-Area Subnetworks : A Performance Comparison*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 29 (1981), No. 10, pp. 1465-1473
- [20] BUX, W.; CLOSS, F.H.; KÜMMERLE, K.; KELLER, H.J.; MÜLLER, H.R.: *Architecture and Design of a Reliable Token-Ring Network*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 1 (1983), No. 5, pp. 756-765
- [21] BUX, W.: *Performance Issues in Local-Area Networks*, IBM Systems Journal, Vol. 23 (1984), No. 4, pp. 351-374
- [22] CASEY, L.M.; DITTBURGER, R.C.; GAMAGE, N.D.: *FXNET : A Backbone Ring for Voice and Data*, IEEE Communications Magazine, Vol. 24 (1986), No. 12, pp. 23-28
- [23] CCITT G.114:*Recommendation Mean One-Way Propagation Time*, CCITT Blue Book, Vol 3, Fascicle 3.1, Genf, Schweiz (1989)
- [24] CCITT G.711:*Recommendation PCM Algorithm*, CCITT Blue Book, Vol 3, Fascicle 3.4, Genf, Schweiz (1989)
- [25] CCITT G.721:*Recommendation ADPCM Algorithm*, CCITT Blue Book, Vol 3, Fascicle 3.4, Genf, Schweiz (1989)
- [26] CHAILLET, B.; CABANEL, J.P.; SAZBON, D.: *Towards a Formal Approach for Baseband Local Area Networks Carrying Integrated Real Time Voice and Data Traffic*, Proceedings of the IFIP Conference on Ring Technology Local Area Networks, (1984), pp. 187-203
- [27] CHLAMTAC, I.: *An Ethernet Compatible Protocol for Real-Time Voice/Data Integration*, Computer Networks and ISDN Systems (1985), No. 10, pp. 81-96
- [28] CLARK, D.D.; POGAN, K.T.; REED, D.P.: *An Introduction to Local Area Networks*, Proceedings of the IEEE, Vol 66 (1978), No. 11, pp. 1497-1517
- [29] COOPER, R.B.: *Queues Served in Cyclic Order*, Bell System Technical Journal, Vol 48 (1969), pp 675-689
- [30] COX, D.R.: *Erneuerungstheorie*, (1966), Oldenburg
- [31] DA SILVA, L.A.; PETR, D.W.; FROST, V.S.: *A Class-Oriented Replacement Technique for Lost Speech Packets*, Proceedings of the INFOCOM 89, Ottawa (1989), pp. 1098-1105
- [32] DECINA, M.; MODENA, G.: *CCITT Standard on Digital Speech Processing*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 6 (1988), No. 2, pp. 227-234

- [33] DE MORAES, L.M.; RUBIN, I.: *Analysis and Comparison of Message Queueing Delays in Token Rings and Token Buses Local Area Networks*, Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Amsterdam (1984), pp. 130-135
- [34] DE TREVILLE, J.D.: *A Simulation-Based Comparison of Voice Transmission on CSMA/CD Networks and on Token Buses*, Bell System Technical Journal, Vol. 63 (1984), No. 1, pp. 33-55
- [35] DHADESUGOOR, V.R.; ZIEGLER, C.; SCHILLING, D.L.: *Delta Modulators in Packet Voice Networks*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 28 (1980), No. 1, pp. 33-51
- [36] DIAZ, F.V.: *Voice Quality in an IVD Network*, IEEE 802.9 Working Group, Contribution IEEE 802.87*9.614, (1987), pp. 1-9
- [37] DIXON, R.C.: *Ring Network Topology for Data Communications*, Proceedings of the IEEE Computer Conference, Washington (1982), pp. 591-605
- [38] DRAVIDA, S.; SRIRAM, K.: *End-to-End Performance Models for Variable Bit Rate Voice over Tandem Links in Packet Networks*, Proceedings of the INFOCOM 89, Ottawa (1989), pp. 1089-1097
- [39] DVORAK, C.A.; ROSENBERGER, J.R.: *Deriving a Subjective Testing Methodology for Digital Circuit Multiplication and Packetized Voice Systems*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 6 (1988), No. 2, pp. 235-241
- [40] ECMA TR 14: *Local Area Networks. Layer 1 to 4 Architecture and Protocols*, (1982)
- [41] EISENBERG, M.: *Queues with Periodic Service and Changeover Times*, Operations Research Letters, Vol. 20 (1972), pp. 440-451
- [42] FALCONER, R.M.; ADAMS, J.L.: *Carrying Integrated Services on the Orwell Slotted Ring*, Proceedings of the International Seminar on Computer Networking and Performance Evaluation, Tokyo (1985), pp. 4.11-4.11
- [43] FLANAGAN, J.L.; SCHROEDER, M.R.; BISHNU, S.A.; CROCHIERE, R.E.; NUGGEHALLY, S.J.; TRIBOLET, J.M.: *Speech Coding*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 27 (1979), No. 4, pp. 710-737
- [44] FROMM, I.: *Standardisierung Lokaler Netze (LAN)*, Informationstechnik, Vol. 28 (1986), No. 1, pp. 30-36
- [45] FROST, V.S.; FRIEDMAN, E.M.; MINDEN, G.J.: *Multirate Voice Coding for Load Control on CSMA/CD Local Computer Networks*, Computer Networks and ISDN Systems, (1986), No. 11, pp. 99-110
- [46] FROST, V.S.: *A Class-Oriented Replacement Technique for Lost Speech Packets*, Proceedings of the INFOCOM 89, Ottawa (1989), pp. 1098-1105;

- [47] FUCHS, E.; JACKSON, P.E.: *Estimates of Distributions of Random Variables for Certain Computer Communications Models*, Communications of the ACM, Vol. 13 (1970), No. 12, pp. 752-757
- [48] FUHRMANN, S.W.: *Symmetric Queues Served in Cyclic Order*, Operations Research Letters, Vol. 4 (1985), No. 3, pp. 139-144
- [49] GARRETT, M.W.; LIMB, J.O.; ALBANESE, A.: *Multiple Gbit/s Fiber-Optic Metropolitan Area Network*, Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Toronto (1986), pp. 934-936
- [50] GERLA, M.; FRATTA, L.: *Tree Structured Fiber Optics MAN's*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 6 (1988), No. 6, pp. 934-943
- [51] GIANINI, J.; MANFIELD, D.: *An Analysis of Symmetric Polling Systems with Two Priority Classes*, Performance Evaluation, Vol. 8 (1988), pp. 93-115
- [52] GIHR, O.; GÖLDNER, E.-H.; KÜHN, P.J.; SAUER, K.: *Lokale Netze und ISDN-Nebenstellenanlagen : Stand und Entwicklungstendenzen*, Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation, Vol. 9 (1986), No. 3, pp. 26-34
- [53] GIHR, O.: *Vergleich der Kanalzugriffsverfahren CSMA/CD, Token-Bus, Token-Ring und Slotted Ring für Poisson und unterbrochene Poisson-Ankunftsprozesse*, Beitrag zur 4.GI/ITG Fachtagung Messung, Modellierung und Bewertung von Rechensystemen, Erlangen (1987), pp. 222-235
- [54] GIHR, O.; WEIXLER, M.: *Messung der Datenverkehrsprofile in Lokalen Netzen*, Beitrag zur GI/ITG Fachtagung Kommunikation in verteilten Systemen, Stuttgart (1989), pp. 861-877
- [55] GOEL, R.K.; ELHAKEEM, A.K.: *A Hybrid FARA/CSMA-CD Protocol for Voice-Data Integration*, Computer Networks and ISDN Systems (1985), No. 9, pp. 223-240
- [56] GÖLDNER, E.-H.; KÜHN, P.J.: *Integration of Voice and Data in the Local Area*, Proceedings of the 1th International Conference on Data Communications in the ISDN Era, Tel Aviv (1985), pp. 423-431
- [57] GÖLDNER, E.-H.: *Ein Ringsystem mit integrierter Durchschalte- und Paketvermittlung*, Dissertation (1988), Universität Stuttgart;
- [58] GRUBER, J.G.: *A Comparison of Measured and Calculated Speech Temporal Parameters Relevant to Speech Activity Detection*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 30 (1982), No. 4, pp. 728-738
- [59] GRUBER, J.G.; LE, N.H.: *Performance Requirements for Integrated Voice/Data Networks*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 1 (1983), No. 6, pp. 981-1005
- [60] GRUBER, J.G.; STRAWCZYNSKI, L.: *Subjective Effects of Variable Delay and Speech Clipping in Dynamically Managed Voice Systems*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 33 (1985), No. 5, pp. 801-808

- [61] HAFNER, E.R.; NENADAL, Z.; TSCHANZ, M.: *A Digital Loop Communication System*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 22 (1974), No 6, pp. 877-881
- [62] HAMMOND, J.L., O'REILLY, P.J.: *Performance Analysis of Local Computer Networks*, Addison-Wesley Publishing Company, (1986), England
- [63] HEGERING, H.-G.: *Lokale Netze*, Informationstechnik, Vol. 28 (1986), No. 1, pp. 23-30
- [64] HEINBACH, W.: *Datenreduktion von Sprache unter Berücksichtigung von Gehörreigenschaften*, NTZ Archiv, Vol. 12 (1987), No. 9, pp. 327-333
- [65] HOBERECHT, W.L.: *A Layered Network Protocol for Packet Voice and Data Integration*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 1 (1983), No. 6, pp. 1006-1013
- [66] HOPPER, A.; WILLIAMSON, R.C.: *Design and Use of an Integrated Cambridge Ring*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 1 (1983), No. 5, pp. 775-784
- [67] HUTCHISON, D.: *Local Area Network Architectures*, Addison-Wesley Publisher, (1988), England
- [68] IBE, O.C.; GIBSON, D.T.: *Synchronous Communication Protocols for Local Networks*, Computer Networks and ISDN Systems (1986), No. 11, pp. 89-97
- [69] IEEE 802.3: *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications*, ANSI/IEEE Std 802.3 (1985)
- [70] IEEE 802.4: *Token Passing Bus Access Method and Physical Layer Specifications*, ANSI/IEEE Std 802.4 (1985)
- [71] IEEE 802.5: *Token Passing Ring Access Method and Physical Layer Specifications*, ANSI/IEEE Std 802.5 (1985)
- [72] IEEE 802.6/D7: *Proposed Standard Distributed Queue Dual Bus Metropolitan Area Network*, (1989)
- [73] IEEE 802.9: *Integrated Voice and Data LAN Interface Standard*, Working Paper (1987)
- [74] IEEE DP 802.1: *Draft Standard Overview and Architecture, Revision B*, (1983)
- [75] ISO 7498: *Information Processing Systems - Open System Interconnection, Basic Reference Model*, (1983)
- [76] ISO 8072: *Information Processing Systems - Open Systems Interconnection, Connection-oriented Transport Protocol*, (1983)
- [77] ISO 8073: *Information Processing Systems - Open Systems Interconnection, Transport Protocol Class 4*, (1983)
- [78] ISO 8802/2: *Local Area Networks, Part 2 Logical Link Control*, (1986)
- [79] ISO DIS 8348/DAD1: *Addendum to the Network Service Definition Covering Connectionless-Mode Transmission*, (1986)
- [80] ISO DIS 8802/2: *Logical Link Control*

- [81] ISO DIS 8802/3: *Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection (CSMA/CD) Access Method and Physical Layer Specifications*, (1986)
- [82] ISO DIS 8802/4: *Token Passing Bus Access Method and Physical Layer Specifications*
- [83] ISO DIS 8802/5: *Token Passing Ring Access Method and Physical Layer Specifications*
- [84] JAIN, R.; ROUTHIER, S.A.: *Packet Trains - Measurements and a New Model for Computer Network Traffic*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 4 (1986), No. 6, pp. 986-995
- [85] JAYANT, N.S.; CHRISTENSEN, S.W.: *Effects of Packet Losses in Waveform Coded Speech and Improvements Due to an Odd-Even Sample-Interpolation Procedure*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 29 (1981), No. 2, pp. 101-109
- [86] JOHNSON, D.H.; O'LEARY, G.C.: *A Local Access Network for Packetized Digital Voice Communication*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 29 (1981), No. 5, pp. 679-688
- [87] KAISER, P.; MIDWINTER, J.; SHIMADA, S.: *Status and Future Trends in Terrestrial Optical Fiber Systems in North America, Europe and Japan*, IEEE Communications Magazine, Vol. 25 (1987), No. 10, pp. 8-13
- [88] KARANAM, V.R.; SRIRAM, K.; BOWKER, D.O.: *Performance Evaluation of Variable Bit Rate Voice in Packet-Switched Networks*, AT&T Technical Journal (1988), No. 5, pp. 57-71
- [89] KARVELAS, D.; LEON-GARCIA, A.: *Performance of Integrated Packet Voice/Data Token Passing Ring*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 4 (1986), No. 6, pp. 823-832
- [90] KARVELAS, D.; LEON-GARCIA, A.: *A Performance Comparison of Voice/Data Token Ring Protocols*, Proceedings of the INFOCOM 87, San Fransisco (1987), pp. 846-855
- [91] KIESEL, W.: *Architektur und Verkehrsleistung eines lokalen Netzes mit Busstruktur und einem kollisionsarmen Vielfach-Zugriffsprotokoll*, 41. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, IND Universität Stuttgart, (1987)
- [92] KLEINROCK, L.: *Queueing Systems, Vol. I Theory, Vol. II Computer Applications*, John Wiley & Sons, (1975, 1976)
- [93] KONHEIM, A.G.; MEISTER, B.: *Service in a Loop System*, Journal of the Association for Computing Machinery, Vol. 19 (1972), No. 1, pp. 92-108
- [94] KÜHN, P.J.: *Multiqueue Systems with Nonexhaustive Cyclic Service*, Bell System Technical Journal, Vol. 58 (1979), No. 3, pp. 671-698
- [95] KÜHN, P.J.: *Analyse zufallsabhängiger Prozesse in Systemen zur Nachrichtenvermittlung und Nachrichtenverarbeitung*, Habilitationsschrift, (1981), Universität Stuttgart

- [96] KÜHN, P.J.; SAUER, K.: *Realzeitanwendungen mit dem Token-Ring - Sprachübertragung*, Beitrag zum IBM Symposium 86 Verteilte Datenverarbeitung in Lehre und Forschung, Bad Neuenahr (1986), pp. 77-93
- [97] KÜHN, P.J.; RAITH, T.; TRAN-GIA, P.: *Methodik der stationären Systemsimulation*, Seminar IND Universität Stuttgart
- [98] KÜHN, P.J.: *Wartezeitprobleme der Daten- und Nachrichtenverkehrstheorie*, Vorlesung Universität Stuttgart
- [99] KÜMMERLE, K.: *Multiplexer Performance for Integrated Line- and Packet-Switched Traffic*, Proceedings of the 2nd International Conference of Computer Communication, Stockholm (1974), pp. 507-515
- [100] LEA, C.T.; MEDITCH, J.S.: *A Channel Access Protocol for Integrated Voice/Data Applications*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 5 (1987), No. 6, pp. 939-947
- [101] LEE, H.H.; UN, C.K.: *A Study of On-Off Characteristics of Conversational Speech*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 34 (1986), No. 6, pp. 630-637
- [102] LEIBOWITZ, M.A.: *An Approximate Method for Treating a Class of Multiqueue Problems*, IBM Journal Research Development, Vol 5 (1961), pp. 204-209
- [103] LIMB, J.O.; FLORES, C.: *Description of Fastnet - A Unidirectional Local Area Communication Network*, Bell System Technical Journal, (1982), pp. 1413-1441
- [104] LITTLE, J.D.: *A Proof for the Queueing Formula $L=\lambda W$* , Operations Research 9, (1961), pp. 383-387
- [105] LITTWITZ, E.; VOLDARSKY, Y.; ZILBAR, S.: *Voice over Ethernet*, Communication International, (1986), pp. 49-50
- [106] LOOMIS, D.C.: *Ring Communication Protocol*, University of California, Technical Report 26, (1973)
- [107] MAGLARIS, B.; LISSACK, T.; AUSTIN, M.: *End-to-End Delay Analysis on Local Area Networks - An Office Building Scenario*, Proceedings of the National Teletraffic Conference 81, New Orleans, Vol. A2 (1981), pp. 3.1-3.6
- [108] MALEK, M.: *Integrated Voice and Data Communications Overview*, IEEE Communications Magazine, Vol. 26 (1988), No. 6, pp. 5-15
- [109] MANFIELD, D.R.: *Analysis of a Priority Polling System for Two-Way Traffic*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 33 (1985), No. 9, pp. 1001-1006
- [110] MARKOV, J.D.; STROLE, N.C.: *Token-Ring Local Area Networks : A Perspective*, Proceedings of the IEEE Computer Conference, Washington (1982), pp. 606-614
- [111] MARSHALL, W.T.; MORGAN, S.P.: *Statistics of Mixed Data Traffic on Local Area Network*, Proceedings of the 11th International Teletraffic Congress, Kyoto (1985), pp. 4.1.1-4.1.7

- [112] MAXEMCHUK, N.F.: *A Variation on CSMA/CD that Yields Movable TDM Slots in Integrated Voice/Data Local Networks*, Bell System Technical Journal, Vol. 61 (1982), No. 7, pp. 1527-1550
- [113] METCALFE, R.M.; BOGGS, D.R.: *Ethernet: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks*, Journal of the Association for Computing Machinery, Vol 19 (1976), No. 7, pp. 395-404
- [114] MEYR, H.; BOUTEN, H.; MÜLLER, H.; BAPST, U.: *Manchester Coding with Predistortion - An Efficient and Simple Transmission Technique in Local Digital Networks*, Proceedings of the National Teletraffic Conference, Houston (1980), pp. A.4.2
- [115] MINOLI, D.: *Optimal Packet Length for Packet Voice Communication*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 27 (1979), No. 3, pp. 607-611
- [116] MONTGOMERY, W.A.: *Techniques for Packet Voice Synchronization*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 1 (1983), No. 6, pp. 1022-1028
- [117] MUI, P.; GEORGANAS, N.D.: *Performance Evaluation of Two Multiple-Access Protocols*, Computer Communications, Vol. 7 (1984), No. 2, pp. 73-78
- [118] MURATA, M.; TAKAGI, H.: *Mean Waiting Times in Nonpreemptive Priority M/G/1 Queues with Server Switchover Times*, Proceedings of the International Seminar on Teletraffic Analysis and Computer Performance, Amsterdam (1986), pp. 395-407
- [119] MUSSER, J.M.; LIU, T.T.; LI, L.; BOGGS, G.J.: *A Local Area Network as a Telephone Local Subscriber Loop*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 1 (1983), No. 6, pp. 1046-1053
- [120] MUSSER, J.M.; LIU, T.T.; TREDEAU, F.P.: *Packet-Voice Performance on a CSMA-CD Local Area Network*, GTE Report, (1982), pp. 40-44
- [121] NEWMAN, R.M.; BUDRIKIS, Z.L.; HULLETT, I.L.: *The QPSX MAN*, IEEE Communications Magazine, Vol. 26 (1988), No. 4, pp. 20-28
- [122] NOLL, P.; LEESEMANN, V.; WESSELS, G.: *Paketorientierte Sprachübertragung*, DFVLR-Mitteilung 86-5, (1986)
- [123] NTG NORM 902#NTG 902 *Nachrichtenvermittlungstechnik, Begriffe*, Nachrichtentechnische Zeitschrift, Vol 35 (1982), No 7, pp. 481-488
- [124] PACIFICI, G.; PATTAVINA, A.: *Issues on Packet Voice Transfer in Ring Local Area Networks*, Proceeding of the 2nd International Conference on Data Communication Systems, (1985), pp. 351-362
- [125] PANG, J.W.; TOBAGI, F.A.: *Generalized Access Control Strategies for Token Passing Systems*, Proceedings of the INFOCOM 89, Ottawa (1989), pp. 332-341
- [126] PAPOULIS, A.: *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*, McGraw-Hill (1965), New York

- [127] PARKER, J.L.: *Third-Generation Codecs Pave Way for Future Digital Networks*, Data Communications, (1984), No. 9, pp. 173-182
- [128] PATAVINA, A.; PACIFICI, G.: *Performance Evaluation of Ring Networks Supporting a Packet Voice Service*, Computer Networks and ISDN Systems (1988), pp. 31-45
- [129] PAWLITA, P.: *Evaluation and Comparison of Dialogue Traffic Characteristics in Teleprocessing Systems based on Measurement Results*, Proceedings of the 9th International Teletraffic Congress, Torrmolinos (1981), pp. P1-P8
- [130] PAWLITA, P.; SÜDHOFEN, H.D.: *User Behavior in Teleprocessing Networks - Analytical Models based on Empirical Data*, Proceedings of the 10th International Teletraffic Congress, Montreal (1983), pp.3.3.4
- [131] PIERCE, J.R.: *Network for Block Switching of Data*, Bell System Technical Journal, Vol 51 (1972), pp. 1133-1143
- [132] RAITH, T.: *Leistungsuntersuchung von Multi-Bus-Verbindungsnetzwerken in lose gekoppelten Systemen*, Dissertation (1986), Universität Stuttgart
- [133] RAITH, T.; TRAN-GIA, P.: *Performance Analysis of Polling Mechanisms with Receiver Blocking*, Proceedings of the 8th International Conference of Computer Communication, München (1986), pp. 577-582
- [134] RAVIRAJ, C.R.; JONES, E.V.: *An Integrated Services Local Area Network with Hybrid Access*, Proceedings of the INFOCOM 89, Ottawa (1989), pp. 439-447
- [135] ROM, R.; SHACHAM, N.: *A Reconfiguration Algorithm for a Double-Loop Token-Ring Local Area Network*, IEEE Transactions on Computers, Vol. 37 (1988), No. 2, pp. 182-189
- [136] ROSS, F.E.: *FDDI - A Tutorial*, IEEE Communications Magazine, Vol. 24 (1986), No. 5, pp. 10-17
- [137] ROSSITER, M.H.: *A Switched Poisson Model for Data Traffic*, Australia Telecom Reprint, Vol. 21 (1987), No. 1, pp. 53-57
- [138] SACHS, S.R.: *Alternative Local Area Network Access Protocols*, IEEE Communications Magazine, Vol. 26, No 3 (1988), pp. 25-45
- [139] SAUER, K., TANGEMANN, M.: *Analytic Approach of Voice-Data Integration on Token Passing LAN's based on IEEE 802.5*, Proceedings of the 12th International Teletraffic Congress, Turin (1988), pp. 2.2B5
- [140] SCHOLL, F. W.: *Passive Optical Star Systems for Fiber Optic Local Area Networks*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 6 (1988), No. 6, pp. 913-923
- [141] SCHREIER, A.: *Modellierung und Bewertung von Sprachverbindungen unter Berücksichtigung des Sprach-/Pausenverhaltens*, Studienarbeit IND, (1987), Universität Stuttgart

- [142] SEITZER, D.; GERHÄUSER, H.; LANGENBUCHER, G.;WOITOWITZ, R.: *Fort-schritte bei der digitalen Sprachinterpolation*, Nachrichtentechnische Zeitschrift, Vol. 30 (1977), No. 11, pp. 849-854
- [143] SENIOR, J.M.; WALKER, W.M.; RYLEY, A.: *Topology and MAC Layer Access Protocol Investigation for Industrial Optical Fibre LANs*, Computer Networks and ISDN Systems (1987), pp. 275-289
- [144] SETHI, A.S.; SAYDAM, T.: *Performance Analysis of Token Ring Local Area Networks*, Computer Networks and ISDN Systems (1985), No. 9, pp. 191-200
- [145] SHEN, Z.; MASUYAMA, S.; MURO, S.; HASEGAWA, T.: *Performance Evaluation of Prioritized Token Ring Protocols*, Proceedings of the 11th International Tele-traffic Congress, Kyoto, Vol. 4.2A (1985), pp. 3.1-3.7
- [146] SHOCH, J.F.; DALAL, Y.K.; REDELL, D.D.; CRANE, R.C.: *Evolution of the Ethernet Local Computer Network*, IEEE Network (1982), pp. 10-27
- [147] SHOCH, J.F.; HUPP, J.A.: *Measured Performance of an Ethernet Local Network*, Communications of the ACM, Vol. 23 (1980), No. 12, pp. 711-721
- [148] SPANIOL, O.: *Analysis and Performance Evaluation of HYPER-Channel Access Protocols*, Performance Evaluation, Vol 1 (1981), No 3, pp. 170-179
- [149] SPANIOL, O.: *Konzepte und Bewertungsmethoden für lokale Rechnernetze*, Informatik-Spektrum (1982), No. 5, pp. 152-170
- [150] SRIRAM, K.; WHITT, W.: *Characterizing Superposition Arrival Processes in Packet Multiplexers for Voice and Data*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 4 (1986), No. 6, pp. 833-846
- [151] STALLINGS, W.: *Local Networks - An Introduction*, Collier Macmillan Publisher, (1987), London
- [152] SUDA, T.; YUEN, C.; OHTSUKI, K.: *Performance Evaluation of Packetized Voice Transmission on a Token Passing Ring Network*, Proceedings of the GLOBECOM 85, New Orleans (1985), pp. 3.1-3.5
- [153] SUDA, T.;BRADLEY, T.T.: *Packetized Voice/Data Integrated Transmission on a Token Passing Ring Local Area Network*, Proceedings of the INFOCOM 87, San Fransisco (1987), pp. 836-845
- [154] SUH, S.Y.; GARLUND, S.W.; HEGDE, S.S.: *Fiber-Optic Local Area Network Topology*, IEEE Communications Magazine, Vol. 24 (1986), No. 8, pp. 26-32
- [155] TAKAGI, H.; KLEINROCK, L.:*Analysis of Polling Systems*, Japan Science Institute Research Report, (1985)
- [156] TAKINE, T.; TAKAHASHI, Y.; HASEGAWA, T.: *Exact Analysis of Asymmetric Polling Systems with Single Buffers*, IEEE Transactions on Communications 36, (1988), No. 10, pp. 1119-1127

- [157] TRAN-GIA, P.; RAITH, T.: *Multiqueue Systems with finite Capacity and Non-exhaustive Cyclic Service*, Proceedings of the International Seminar on Computer Networking and Performance Evaluation, Tokyo (1985)
- [158] TSAO, C.D.: *A Local Area Network Architecture Overview*, IEEE Communications Magazine, Vol. 22 (1984), No. 8, pp. 7-11
- [159] VOLLMEYER, W.: *Concept for Controlling Speech Interpolation from only one End of the Line Section*, SIEMENS Forschungs- und Entwicklungsberichte, Vol. 11 (1982), No. 2, pp. 69-71
- [160] WALKE, B.: *Lokale Netze - Eine neue Technologie für die digitale Nachrichtenübermittlung*, Informationstechnik, Vol. 28 (1986), No. 2, pp. 74-88
- [161] WESSELS, G.: *Digitale Sprachübertragung in paketvermittelnden Netzen*, Minerva Publikation, (1982), München
- [162] WONG, J.W.: *Analysis of a Token Ring Protocol for Voice Transmission*, Computer Networks and ISDN Systems (1984), No. 8, pp. 339-346
- [163] ZAFIROPULO, P.: *Flexible Multiplexing for Networks Supporting Line-Switched and Packet-Switched Data Traffic*, Proceedings of the 2nd International Conference of Computer Communication, Stockholm (1974), pp. 517-523
- [164] ZAFIROPULO, P.; MÜLLER, H.R.; CLOSS, F.: *Data/Voice Integration based on the IEEE 802.5 Token Ring LAN*, Proceedings of the 4th European Fibre Optic Communications and Local Area Networks Exhibition, Amsterdam (1986), pp. 67-76