

METHODEN ZUR ANALYSE DES DYNAMISCHEN ABLAUFGESCHEHENS IN DATENNETZEN

U. Herzog

Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung
Universität Stuttgart

Zusammenfassung

Diese Arbeit gibt einen Überblick über die verkehrstheoretischen Probleme bei Datennetzen sowie eine Einführung in die Beschreibung und Analyse des dynamischen Ablaufgeschehens. Die einzelnen Kapitel sind

1. Einführung
2. Beschreibung des dynamischen Ablaufgeschehens
3. Verkehrstheoretische Problemstellungen bei Datennetzen
4. Methoden zur Behandlung verkehrstheoretischer Probleme
5. Ein Beispiel : Schnelle Reaktionszeit durch prioritätsgesteuerte Satellitenvermittlungen.

1. Einführung

Bei der Planung von Datenübertragungs- und Rechnernetzen ist eine Vielzahl technologischer sowie vermittlungs-, übertragungs- und programmierungstechnischer Gesichtspunkte zu berücksichtigen.

Der Entwurf wirtschaftlich optimaler Netze mit vorgeschriebener Leistungsfähigkeit und vorgeschriebener Sicherheit ist jedoch erst dann möglich, wenn neben diesen Kriterien auch verkehrstheoretische Untersuchungen durchgeführt und bei der Planung beachtet werden.

Hauptaufgabe der Verkehrstheorie ist die Untersuchung des dynamischen Ablaufgeschehens in Nachrichtennetzen, die Definition und Bestimmung charakteristischer Gütemerkmale sowie das Aufdecken systeminterner Engpässe.

Ziel dieser Untersuchungen ist es, wirtschaftlich optimale Netzformen und Betriebsarten zu finden für vorgeschriebene Gütemerkmale (Durchsatz, Antwortzeiten, etc.).

2. Beschreibung des dynamischen Ablaufgeschehens

2.1. Allgemeines

Das Ablaufgeschehen in Datennetzen wird durch den Transport von Nachrichten auf den Übertragungswegen sowie deren Weiterleitung in den verschiedenen Vermittlungseinrichtungen (Datenvermittlungen, Multiplexer, etc.) bestimmt. Nicht ausreichende Übertragungsraten führen zu einem Rückstau dieser Anforderungen in den Vermittlungen; hardwaremäßige Engpässe oder eine ungünstige Konzeption der Betriebssysteme behindern eine reibungslose Verkehrsabwicklung.

Der zeitliche Ablauf derartiger Transport-, Warte- und Bearbeitungsphasen ist mindestens teilweise deterministisch, auch dann, wenn die Zusammenhänge sehr komplex sind. Aus der Sicht eines

In diesem Abschnitt wird der Einfluß der Verkehrsquellen kurz diskutiert, ferner wird ein Überblick über die wichtigsten Ankunfts- und Endeprozesse gegeben.

2.2.1. Anzahl der Verkehrsquellen

In Wirklichkeit ist die Anzahl der Verkehrsquellen immer endlich. Jede einzelne Verkehrsquelle hat ein individuelles Verkehrsbedürfnis. Die sog. Ankunftsrate, d.h. die erwartete Anzahl eintreffender Bedienungs- und Transportwünsche pro Zeiteinheit ist deshalb vom Systemzustand abhängig: sind viele Verkehrsquellen momentan belegt (werden bedient oder warten), so ist die momentane Ankunftsrate gering. Sind dagegen nur wenige Verkehrsquellen belegt, so ist die momentane Ankunftsrate relativ groß. Exakt ist dieser Fall sehr schwierig zu behandeln.

In vielen Fällen der Praxis ist die Anzahl der Verkehrsquellen wesentlich größer als die Anzahl der zur Verfügung stehenden Bedienungseinheiten oder Transportkanäle; der Anteil einer individuellen Verkehrsquelle am gesamten Verkehrsvolumen ist gering. In all diesen Fällen kann man ein idealisiertes Modell anwenden, das die mathematische Behandlung des Problems erheblich vereinfacht: die Anzahl der Verkehrsquellen q wächst über alle Grenzen und der Beitrag einer individuellen Quelle (Ankunftsrate α) strebt gegen null dergestalt, daß das Produkt $q \cdot \alpha$ konstant ist. Bezeichnet man mit x die Anzahl momentan belegter Verkehrsquellen so gilt deshalb für die gesamte Ankunftsrate λ :

$$\lim_{\substack{q \rightarrow \infty \\ \alpha \rightarrow 0 \\ q\alpha = \text{const.}}} \alpha(q-x) = \alpha \cdot q = \lambda$$

In diesem idealisierten Verkehrsmodell, das in vielen Fällen der Praxis anwendbar ist, ist also die Ankunftsrate λ unabhängig vom Belegungszustand; die mathematische Behandlung vereinfacht sich wesentlich.

2.2.2. Beschreibung von Ankunfts- und Endeprozessen.

Ankunftsprozesse werden durch die Verteilungsfunktion der Ankunftsabstände der Nachrichten, Datenblöcke oder Befehle beschrieben. Diese Verteilungsfunktion $F_A(t)$ ist definiert als die Wahrscheinlichkeit, daß der Ankunftsabstand T höchstens gleich der beliebigen Zeit t ist:

$$F_A(t) = P(T_A \leq t) = \int_0^t f_A(\tau) d\tau \quad (1)$$

wo $f_A(\tau)$ die Dichtefunktion ist. Bezeichnet man den mittleren Ankunftsabstand mit a_m :

$$a_m = \int_0^{\infty} \tau \cdot f_A(\tau) d\tau \quad (2)$$

so wird dessen Kehrwert als "mittlere Ankunftsrate λ " definiert:

$$\lambda = \frac{1}{a_m} \quad (3)$$

Endeprozesse werden durch die Verteilungsfunktion der Bedienungs- und Transportzeiten T_B bzw. durch die Verteilungsfunktion der Länge T_B von Nachrichten, Datenblöcken und Befehlen beschrieben. Entsprechend den Gleichungen (1,2,3) gilt:

$$F_B(t) = P(T_B \leq t) = \int_0^t f_B(\tau) d\tau \quad \mu_m = \frac{1}{\varepsilon} = \int_0^{\infty} \tau \cdot f_B(\tau) d\tau \quad (4)$$

Teilsystems (Datenvermittlung, Prozessor, etc.) scheint die zeitliche Folge der Daten und Befehle jedoch zufällig zu sein, m.a.W., der zeitliche Ablauf entspricht einem speziellen Stochastischen Prozeß (Zufallsprozeß), welcher mit Methoden der Wahrscheinlichkeitstheorie beschrieben werden kann.

Vollständig erfasst wird dieses zufällige, stochastische Verhalten durch folgende drei Kriterien:

- Ankunftsprozeß : Der Ankunftsprozeß beschreibt, in welchem zeitlichen Abstand die einzelnen Anforderungen eintreffen.
- Endeprozeß : Der Endeprozeß beschreibt die Bedienungs- oder Transportzeiten für die einzelnen Anforderungen
- Systemeinfluß : Der Einfluß des Systems ist durch die Systemstruktur und die Art der Abfertigung ankommender und wartender Nachrichten, Datenblöcke oder Befehle festgelegt.

Mit Hilfe dieser drei Kriterien können qualitative und quantitative Aussagen über die Leistungsfähigkeit eines Bedienungs- oder Übertragungssystems gemacht werden.

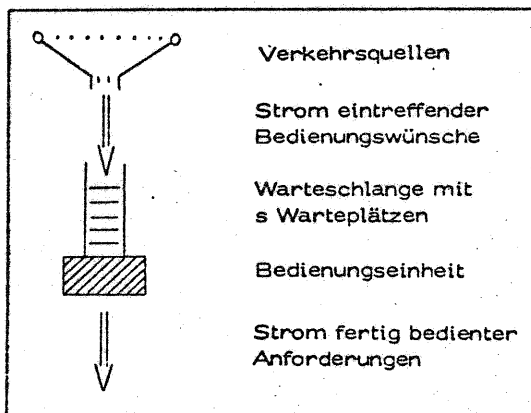


Bild 1: Bedienungssystem

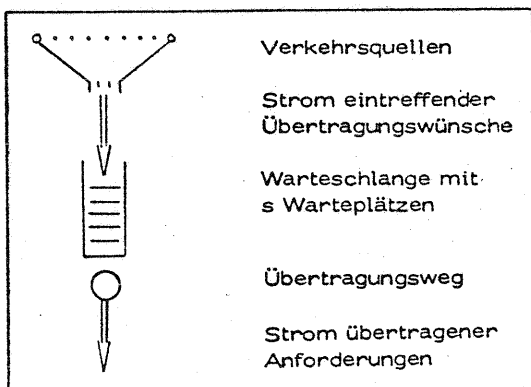


Bild 1 zeigt - schematisch dargestellt - ein einfaches, aber typisches Bedienungssystem:

Von den Verkehrsquellen (z.B. Fernschreiber, Rechner, Übertragungskanäle) wird ein "Strom" von Anforderungen erzeugt. Ist die Bedienungseinheit (z.B. Zentraler Prozessor einer Datenvermittlung, Steuerung einer Speichereinheit, etc.) momentan belegt, so wird in einer Warteschlange eine Marke gesetzt, die die Ankunft des neuen Bedienungswunsches anzeigt. Die Warteschlange wird in einer bestimmten Reihenfolge (siehe 2.3.) von der Bedienungseinheit abgearbeitet.

Das entsprechende Beispiel eines einfachen Übertragungssystems zeigt Bild 2.

Ein komplexeres Modell zeigt Bild 5 und wird in Kapitel 5 behandelt.

Bild 2: Übertragungssystem

2.2. Ankunfts- und Endeprozesse

Die Wahl eines geeigneten Verkehrsmodells ist von weittragender Bedeutung: je realistischer die gewählten Ankunfts- und Endeprozesse sind, desto besser werden die durch Analyse bzw. Synthese erzielten Ergebnisse der Wirklichkeit entsprechen.

k-ter Ordnung (kurz Erlang-k-Verteilung). Diese Verteilung wird deshalb erfolgreich angewendet, um reale Ankunfts- und Endeprozesse zu beschreiben, deren Verteilungsfunktion zwischen konstanter und negativ exponentieller liegen.

Allgemeine Erlangverteilung

Eine Familie von Verteilungsfunktionen ohne Begrenzung ist die "Allgemeine (oder Gemischte) Erlangverteilung", bestehend aus einer Summe gewichteter Erlang-k-Verteilungen. Sie erlaubt es, alle in der Praxis auftretenden Ankunfts- und Endeprozesse mit beliebiger Genauigkeit nachzubilden [9].

Gegenüber anderen Typen von Verteilungsfunktionen hat diese Familie von Verteilungsfunktionen den Vorteil, daß sie interpretiert werden kann als eine "Kombination von fiktiven exponentiellen Phasen". Diese Modellvorstellung vereinfacht die mathematische Behandlung realer Prozesse wesentlich (vgl. auch 4.3.2.).

Gruppenankunft und Gruppenbedienung

Ein typisches Merkmal aller bisher behandelten Ankunfts- und Endeprozesse besteht darin, daß innerhalb eines infinitesimal kleinen Zeitelements Δt höchstens ein Ankunfts- oder Endeereignis auftreten kann. Treffen an einer Bedienungsstelle gleichzeitig mehrere Bedienungswünsche ein, so spricht man von Prozessen mit Gruppenankunft.

Der Ankunftsabstand der einzelnen Gruppen ist häufig wie bei den Prozessen mit Einzelankunft verteilt (negativ exponentiell, konstant, etc.). Innerhalb einer Gruppe treffen mit Wahrscheinlichkeit g_x genau x Anforderungen ein. Analoge Überlegungen führen zu den Prozessen mit Gruppenabfertigung.

2.3. Systemeinfluß

Transport- und Bedienungsprozesse werden sowohl durch die Systemstruktur als auch durch die Art der Abfertigung eintreffender und wartender Anforderungen beeinflusst. Bereits im Abschnitt 2.1. wurden zwei einfache Strukturmodelle vorgestellt (Bild 1 und 2). Komplexe Strukturen für Netze und Datenvermittlungen siehe z.B. Abschnitt 5 sowie den Tagungsbeitrag [10].

Von der Vielzahl verschiedenartiger Abfertigungsstrategien für eintreffende oder wartende Anforderungen können hier nur die wichtigsten behandelt werden. Sie werden im folgenden unterschieden nach der Abfertigung mit und ohne Prioritäten. Zahlreiche Literaturangaben siehe [11,12,5].

2.3.1. Abfertigung ohne Prioritäten

FIFO: first-in, first-out, d.h. die zuerst eingetroffene Anforderung wird zuerst bedient. Im Gegensatz zu vielen anderen Strategien ist in diesem Fall stets gewährleistet, daß alle Anforderungen mit Sicherheit bedient werden. Nahezu alle Warteschlangen für Realzeitanforderungen werden deshalb nach der FIFO-Strategie organisiert und abgearbeitet.

LIFO: last-in, first-out, d.h. die zuletzt eingetroffene Anforderung wird zuerst bedient. Der für die Organisation von LIFO-Warteschlangen erforderliche Zeitaufwand ist (im Gegensatz zu FIFO) sehr gering. Häufig werden deshalb Warteschlangen für die Speicherplatzverwaltung nach LIFO organisiert.

2.2.3. Wichtige Ankunfts- und Endeprozesse

Bereits früher wurde auf die Bedeutung der gewählten Ankunfts- und Endeprozesse hingewiesen. Die folgende Zusammenstellung gibt nun einen Überblick über die wichtigsten mathematischen Modelle, weitere Einzelheiten findet man z.B. in [1-5].

Interessante Meßergebnisse von realen Systemen sowie deren Vergleich mit verschiedenen mathematischen Modellen werden in den Arbeiten [5-8] vorgestellt.

Negativ exponentielle Verteilung

Die bekannteste Verteilungsfunktion für Ankunfts- und Endeprozesse ist die negativ exponentielle Verteilung. Sie tritt nicht nur bei vielen Naturereignissen (Zerfall von Atomen, Brown'sche Bewegung, etc.) auf, sondern beschreibt häufig in guter Näherung die Verteilung von Ankunftsabständen sowie Bedienungs- und Transportzeiten in Daten- und Fernsprechnetzen.

Für die Verteilungsfunktion $F(t)$ (Wahrscheinlichkeit, daß der Ankunftsabstand, die Bearbeitungs- oder die Transportzeit T höchstens gleich einer bestimmten Zeit t ist) gilt:

$$F(t) = P(T \leq t) = 1 - e^{-\frac{t}{t_m}} \quad (5)$$

mit t_m als Mittelwert der Verteilung von T . Bild 3 zeigt die entsprechende graphische Darstellung.

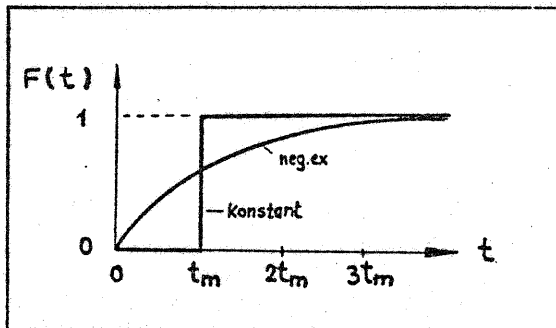


Bild 3: Verteilungsfunktion einer negativ exponentiellen bzw. konstanten Verteilung.

Die mathematische Behandlung von Prozessen mit negativ exponentiellen Verteilungsfunktionen ist noch relativ einfach, da es sich in diesem Fall um sog. Markoff-Prozesse handelt (siehe 4.3.1.).

Konstante Verteilung

Endeprozesse werden häufig besser durch eine konstante Verteilung beschrieben. (Ein typisches Beispiel sind Datennetze mit "packet-switching"). Für die Verteilungsfunktion gilt dann:

$$F(t) = P(T \leq t) = \begin{cases} 0 & \text{für } 0 \leq t < t_m \\ 1 & \text{für } t \geq t_m \end{cases} \quad (6)$$

Die mathematische Behandlung derartiger Verkehre ist jedoch bedeutend schwieriger als im ersten Fall, da die sog. Markoff'sche Eigenschaft (Unabhängigkeit von der Vorgeschichte) verloren geht. Der Verlauf der Verteilungsfunktion ist ebenfalls in Bild 3 graphisch dargestellt.

Erlang-k-Verteilung

Beide oben angegebenen Verteilungsfunktionen, die negativ exponentielle und die konstante, sind Grenzwerte der Erlangverteilung

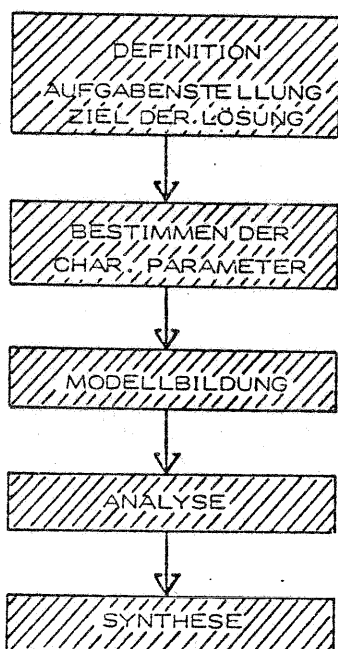
Verlust- und Überlaufwahrscheinlichkeit: Wahrscheinlichkeit, daß eine eintreffende Anforderung weder bedient noch gespeichert werden kann, da das System momentan blockiert ist. Im Falle der Verlustwahrscheinlichkeit wird die eintreffende Anforderung vom System abgewiesen, im Falle der Überlaufwahrscheinlichkeit einem anderen System zur Weiterbearbeitung angeboten.

Verteilungsfunktionen: Charakteristische Mittelwerte und Wahrscheinlichkeiten geben zwar eine sehr wesentliche Auskunft über das Verkehrsverhalten eines Systems. In vielen Fällen der Praxis sind die Angaben ausreichend. Eine umfassende Auskunft über die Schwankungen der Größen um die Mittelwerte liefern aber erst die Verteilungsfunktionen. Typische Beispiele sind die Wartezeitverteilungsfunktionen und die Verteilungsfunktion der Anzahl im Speicher wartenden Anforderungen.

3. Verkehrstheoretische Probleme

3.1. Aufgabenstellung

Hauptaufgabe der Verkehrstheorie ist die Untersuchung des Verkehrs in Nachrichtennetzen, die Definition charakteristischer Gütemerkmale sowie das Aufdecken von systeminternen Engpässen.



Ziel sämtlicher Untersuchungen ist es, wirtschaftlich optimale Netzformen und Betriebsarten zu finden

- für eine bestimmte vorgeschriebene Verkehrsgüte (Charakteristische Größen)
- sowie vorgeschriebene Sicherheit im Falle von Überlastung oder Ausfall von Netzknoten und Bündeln.

3.2. Der Weg zu Optimierung

Bild 4 gibt einen Überblick über die fünf wesentlichen Schritte, die zur Lösung eines Optimierungsproblems notwendig sind:

An erster Stelle ist die Aufgabenstellung sowie das Ziel der Problemlösung zu präzisieren, d.h. es muß festgelegt werden, welche Anforderungen das System in Bezug auf Verkehrsgüte und Sicherheit erfüllen soll. Bereits hier sind gewisse Vorentscheidungen über die Betriebsart des Netzes (ungeregelt oder geregelt, alternative oder adaptive Leitweglenkung, usw.)

zu treffen. In einem zweiten Schritt sind die charakteristischen Parameter der Verkehre, Vermittlungseinrichtungen und Übertragungswege festzustellen.

Mit Hilfe dieser Daten ist man dann in der Lage, Struktur- und Verkehrsmodelle des realen Systems zu entwerfen.

Die bei der Analyse erzielten Ergebnisse werden entscheidend von den gewählten Verkehrs- und Strukturmodellen beeinflusst: je genauer die Modelle den tatsächlichen Verhältnissen entsprechen, desto besser stimmen die Ergebnisse mit realen Messungen überein. Eine sorgfältige Modellbildung ist deshalb besonders wichtig. Bei der Analyse komplexer Systeme wird man zunächst einfache, dann genaue rechnerische Verfahren entwickeln. Daran anschließend (oder parallel) wird man zur Kontrolle Simulationsmethoden anwenden.

RANDOM: die wartenden Anforderungen werden zufällig ausgesucht und bedient. Derartige Abfertigungsdisziplinen treten oft auf, wenn die Auswahl der zu bedienenden Anforderung mit Hilfe einer Schaltung (hardware) erfolgt.

Sind mehrere Warteschlangen mit gleichberechtigten Anforderungen vorhanden, so kommen zu den oben vorgestellten Abfertigungsstrategien noch verschiedene Möglichkeiten zur Auswahl einer bestimmten Warteschlange hinzu.

2.3.2. Abfertigung mit Prioritäten

Bei Prioritäten unterscheidet man interne und externe Prioritäten. Interne Prioritäten werden bei an sich gleichrangigen Aufgaben gesetzt, um z.B. einen maximalen Durchsatz in einer Datenvermittlung zu erreichen. Externe Prioritäten geben Auskunft über die Wichtigkeit einer Anforderung (Nachricht, Befehl) im Vergleich mit anderen konkurrierenden Anforderungen. Sie sind oft fest vorgegeben für bestimmte Anforderungen, können aber auch wartezeitabhängig sein.

Sowohl interne als auch externe Prioritäten können rein unterbrechend, rein nicht unterbrechend oder eine Mischform zwischen beiden Extremen sein.

2.4. Charakteristische Größen

Ziel der verkehrstheoretischen Untersuchungen ist es, mit Hilfe der Angaben über Ankunfts- und Endeprozesse, Systemstruktur und Abfertigungsstrategie typische Gütemerkmale abzuleiten. Mit Hilfe dieser charakteristischen Größen ist man dann in der Lage, die Effektivität eines Datennetzes oder eines Teilsystems zu beurteilen bzw. zu verbessern (siehe auch Kap. 3). Die wichtigsten charakteristischen Größen sind im folgenden zusammengestellt.

Durchlaufzeit: Die Durchlaufzeit einer bestimmten Anforderung ist gleich der Summe aller Warte-, Bedienungs- und Transportzeiten, beginnend beim Eintritt der Anforderung in ein System bis zum Verlassen. Teilweise benutzt man für die Durchlaufzeit auch die Begriffe Antwort- oder Reaktionszeit.

Angaben über minimale, mittlere und maximale Durchlaufzeit ermöglichen eine gute Abschätzung der Leistungsfähigkeit eines Systems.

Durchsatz: Der mittlere oder maximale Durchsatz ist gleich der mittleren oder maximalen Anzahl von Anforderungen, welche pro Zeiteinheit in einem System transportiert oder bearbeitet wird.

Belastung: Die mittlere Belastung, kurz Belastung genannt, ist die mittlere Anzahl gleichzeitig belegter Bedienungseinheiten oder Transportkanäle.

Wartewahrscheinlichkeit: Wahrscheinlichkeit, daß eine eintreffende Anforderung warten muß.

Mittlere Wartezeit: Für die mittlere Zeit, die eine eintreffende Anforderung warten muß, werden nahezu immer zwei Werte angegeben: die mittlere Wartezeit, bezogen auf alle Anforderungen oder bezogen auf jene, die auch tatsächlich warten müssen.

Wartebelastung: Die Wartebelastung, häufig auch als mittlere Warteschlangenlänge bezeichnet, wird definiert als die mittlere Anzahl gleichzeitig auf Bedienung oder Transport wartender Anforderungen.

gender Untersuchungen sowie weiterführende Literaturstellen findet man in |12,32|.

Zahlreiche Hinweise für die schnelle Abschätzung der Gesamtleistungsfähigkeit geben |16,26,33|, Analyse bei extremen Belastungen siehe |34|.

Ein wichtiges Problem bei Datenvermittlungen ist die Speicherorganisation. Literatur |35| gibt eine Übersicht über die verschiedenen Techniken der Zwischenspeicherung und vergleicht sie bezüglich der Leistungsfähigkeit miteinander.

Eine große Gruppe von Arbeiten befaßt sich mit der Dimensionierung von "mehrstufigen Koppelanordnungen" für die Vermittlungseinheit bei Durchschaltevermittlungen oder halbelektronische Speichervermittlungen. Einen ausführlichen Überblick geben |36,37|.

3.5. Verkehrstheoretische Probleme bei Vermittlungsnetzen

Die zu untersuchenden Probleme des Vermittlungsnetzes (Verbindungsnetz zwischen den Datenvermittlungen) sind jenen, die bei der Planung des Anschlußnetzes auftreten, teilweise sehr ähnlich, normalerweise aber komplexer. Fragen der Sicherheit und Überlastbarkeit im Falle verschiedener Struktur- und Betriebsarten spielen hier eine besondere Rolle. Einige typische Problemstellungen seien hier kurz erwähnt (siehe auch |14-18,31|):

- Leistungsausnutzung und Antwortzeiten bei verschiedenen Netzkonfigurationen (Stern-, Maschen-, Verbundnetz etc.) und Durchschalteprinzipien (Speicher- oder Durchschaltevermittlung).
- Leitungsausnutzung und Antwortzeiten bei verschiedenen Verfahren der Leitweglenkung (feste, alternative, adaptive oder zentrale Leitweglenkung).
- Sicherheit bei Überlastung oder Bündel- und Netzknotenausfällen.
- Empfindlichkeit gegen Verkehrsschwankungen und Änderungen des Verkehrscharakters.
- Erweiterungsmöglichkeit im Falle wachsenden Verkehrs der angeschlossenen Datenstationen bzw. größerer räumlicher Ausdehnung des Netzes.

Grundlage vieler Untersuchungen bei Netzen mit Speichervermittlungen sind die wichtigen Arbeiten |38-41|. Kriterien zur Optimierung von Datennetzen mit fester Leitweglenkung werden erstmals in |38| angegeben, später dann in |42,43| verallgemeinert. Vergleich von Speicher- und Durchschaltevermittlungen, siehe |44-45, 5,25|. Der Einsatz von Weltraumsatelliten in Datennetzen wird in |46,47| diskutiert.

Große Datennetze besitzen flexible, verkehrsabhängige Verfahren der Leitweglenkung, d.h. je nach momentaner Verkehrssituation wird der Verkehrsfluß gesteuert, siehe dazu |5,15,17,18,31,48|.

4. Methoden zur Behandlung verkehrstheoretischer Probleme

Für die Analyse des Verkehrsflusses in Datennetzen gibt es drei Möglichkeiten, die Verkehrsmessung, die Simulation und die rein rechnerischen Verfahren.

4.1. Verkehrsmessung

Das Ablaufgeschehen in bestehenden Datennetzen kann mit Hilfe systematischer Verkehrsmessungen untersucht werden. Die Auswer-

Schließlich erfolgt die Synthese optimaler Strukturen, die eine Grundlage für den wirtschaftlichen Einsatz von Datennetzen liefert [13-18].

3.3 Verkehrstheoretische Probleme beim Anschlußnetz

Um die Frage nach der optimalen Struktur eines Anschlußnetzes (Verbindungsnetz zwischen Teilnehmern und Datenvermittlungen) bearbeiten zu können, sind zunächst zahlreiche Einzelfragen zu beantworten. Typische Beispiele sind:

- . Leitungsausnutzung und Antwortzeiten bei verschiedenen Netzstrukturen (Einzel-, Sammel-, Ringleitungen etc.)
- . Einfluß von Prioritäten auf die Wartezeiten für Anforderungen verschiedener Dringlichkeit.
- . Beeinflussung der Verkehrsgüte durch Verkehrsquellen (Datenstationen) unterschiedlicher Intensität und Verkehrsart.
- . Wirksamkeit von Multiplexern, Konzentratoren und Satellitenvermittlungen.
- . Geographische Lage von Knotenpunkten, Leitungsführung sowie Auswahl geeigneter Übertragungswege.

Sehr eingehend wurde in den letzten Jahren die verkehrstheoretische Leistungsfähigkeit von Netzen mit Ringstruktur untersucht, siehe z.B. [19 - 22].

Einsatzmöglichkeiten von Multiplexern und Konzentratoren werden in [23-25] diskutiert und mathematisch behandelt. Abschätzung der Leitungsausnutzung und Antwortzeiten im Anschlußnetz, siehe z.B. [16,26].

Verfahren zur optimalen Strukturierung von sog. zentralisierten Datennetzen lassen sich auch bei der Planung des Anschlußnetzes anwenden, da in diesem Fall die Datenvermittlung eines Anschlußbereichs als Zentrale betrachtet werden kann [27-29].

Zahlreiche weitere Literaturangaben siehe [5,13-18,27].

3.4. Verkehrstheoretische Probleme bei Datenvermittlungen

Das Hauptproblem verkehrstheoretischer Fragestellungen bei Datenvermittlungen ist die Berechnung der Gesamtleistungsfähigkeit (Durchsatz, Durchlaufzeit etc.) sowie das Ermitteln maschineninterner Engpässe. Aus der Vielzahl der Einzelfragen seien nur einige besonders wichtige herausgegriffen (siehe auch [13-18,26,30,31] :

- . Vergleich verschiedener Struktur- und Betriebsarten bezüglich der Gesamtverzögerung von Nachrichten.
- . Verkehrsgerechte Dimensionierung von Speichern (Puffer-, Haupt- und Hintergrundspeicher) und Speicherhierarchien.
- . Dimensionierung der Vermittlungseinheit bei Durchschaltvermittlungen und halbelektronischen Speichervermittlungen.
- . Erhöhung der Leistungsfähigkeit durch Prioritätsmechanismen.
- . Einfluß von "Hintergrundarbeit" auf die Reaktionszeit und den Durchsatz des Systems.

Zahlreiche Fragestellungen sind identisch oder mindestens eng verwandt mit jenen, welche bei modernen Großrechnersystemen auftreten. Eine Zusammenfassung und Klassifizierung bereits vorlie-

Mathematisch erfasst wird diese Unabhängigkeit des Prozessverlaufs von der Vorgeschichte durch das Chapman-Kolmogoroffsche Gleichungssystem:

$$p_{x_{n+1}}(t_{n+1}) = \sum_{x_n} p_{x_n}(t_n) \cdot \ddot{u}_{x_n, x_{n+1}}(t_n, t_{n+1}) \quad (8)$$

mit den Zustandswahrscheinlichkeiten (Prozeß ϕ zum Zeitpunkt t_n im Zustand x_n):

$$p_{x_n}(t_n) = \mathcal{P}(\phi_{t_n} = x_n) \quad (9)$$

und den Übergangswahrscheinlichkeiten:

$$\ddot{u}_{x_n, x_{n+1}}(t_n, t_{n+1}) = \mathcal{P}(\phi_{t_{n+1}} = x_{n+1} | \phi_{t_n} = x_n) \quad (10)$$

Das Chapman-Kolmogoroffsche Gleichungssystem (8) drückt aus, daß die Zustandswahrscheinlichkeiten zu einem Zeitpunkt t_{n+1} nur von den Zustandswahrscheinlichkeiten des vorhergehenden Zeitpunktes t_n und den Übergangswahrscheinlichkeiten im betrachteten Zeitintervall abhängig sind, nicht aber von der Vorgeschichte.

Markoff-Prozesse haben den großen Vorteil, daß man stets denselben Lösungsweg einschlagen kann:

- . Aufstellen des Chapman-Kolmogoroffschen Gleichungssystems,
- . Bestimmen und Einsetzen der Übergangswahrscheinlichkeiten,
- . Auflösen des Gleichungssystems, d.h. Bestimmen der Zustandswahrscheinlichkeiten,
- . Bestimmen der charakteristischen Größen mit Hilfe der Zustandswahrscheinlichkeiten.

Schwierigkeiten - teilweise allerdings erhebliche - treten vor allem erst bei der Auflösung bzw. Auswertung des linearen Gleichungssystems auf.

Markoff-Prozesse werden in der einschlägigen Literatur sehr ausführlich behandelt, siehe z.B. [1-4]. Das "Paradebeispiel" eines einfachen Markoff-Prozesses ist ein Bedienungsbzw. Übertragungssystem mit negativ exponentiell verteilten Ankunftsabständen und Bedienungsbzw. Übertragungszeiten.

4.3.2. Nicht-Markoff-Prozesse

Nicht-Markoff-Prozesse sind alle jene Prozesse, bei welchen der Prozeßverlauf - mindestens für eine gewisse Zeit - von der Vorgeschichte abhängig ist (ein typisches Beispiel ist das Wartesystem mit negativ exponentiell verteilten Ankunftsabständen und konstanten Bedienungsbzw. Übertragungszeiten).

Ein einheitlicher Lösungsansatz - wie bei den Markoff-Prozessen - ist nicht mehr möglich und man unterscheidet zwei Gruppen von Lösungswegen:

Methoden, bei denen der Prozeß (teilweise oder vollständig) mit Hilfe eines äquivalenten Markoff-Prozesses beschrieben und analysiert wird. Insbesondere sind dies die

- Methode der zusätzlichen Variablen [55]

tung dieser Ergebnisse erfolgt mit Hilfe statistischer Methoden. Siehe z.B. [17,49,50].

4.2. Simulation

Bei der Simulation von Datenflüssen auf Digitalrechnern bildet man das zu untersuchende System und den Verkehrsfluß mit Hilfe eines Programms im Rechner nach. Man entwirft ein Modell des realen Systems und der tatsächlichen Verkehrsabläufe und kann damit - zeitlich gerafft gegenüber der Wirklichkeit - die Leistungsfähigkeit des Systems untersuchen.

Spezielle Programmiersprachen erlauben eine relativ einfache und schnelle Beschreibung eines Systems. Die Simulationssprachen sind meistens sehr flexibel und sind zur Simulation nahezu aller Systemkonfigurationen geeignet. Ein in einer Simulationssprache programmiertes Grundmodell kann stetig erweitert werden, bis es sehr genau dem Verkehrsverhalten des realen Systems entspricht. Heute gibt es schon zahlreiche Simulationssprachen, von denen vor allem GPSS, SIMULA, SIMPAC, und SIMSCRIPT sehr häufig angewendet werden (siehe z.B. [51-54]).

Der Hauptvorteil der Simulation gegenüber den rein rechnerischen Verfahren liegt darin, daß man neue Probleme, deren Lösung noch nicht bekannt ist, in relativ kurzen und gut abschätzbaren Zeiträumen untersuchen kann, während bei den (genauen) rechnerischen Verfahren eine Lösung nicht immer gewährleistet ist (Kombination von Simulation und Rechnung, siehe [54]).

4.3. Berechnungsmethoden

Aufgabe eines Systemplaners ist nicht nur die Analyse, sondern vor allem die Synthese, also der Entwurf wirtschaftlich optimaler Netze. Optimierung ist aber mit Hilfe der Simulation schlecht möglich. Durch systematische Variation der Struktur- und Verkehrsparameter kann man zwar wirtschaftliche Lösungen finden, aber hier stößt man wegen der enormen Rechenzeiten selbst bei den größten Rechnern bald auf eine Grenze.

Echte Optimierung ist mit sinnvollem Aufwand nur bei den rein rechnerischen Verfahren möglich.

Den Verkehrsfluß in Datennetzen kann man - wie bereits in Abschnitt 2 ausführlich erläutert - als stochastischen Prozeß beschreiben und mit Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung untersuchen. Als Ergebnis erhält man charakteristische Größen, wie z.B. Warte- oder Antwortzeiten, Belastungen für Speicher oder Bedienungseinheiten usw. Entsprechend den verschiedenartigen Berechnungsmethoden wollen wir zwei große Gruppen von Prozessen unterscheiden, sog. Markoff-Prozesse und Nicht-Markoff-Prozesse.

4.3.1. Markoff-Prozesse

Ein Prozeß ϕ werde zu einem beliebigen Zeitpunkt t_{n+1} beobachtet. Ist der weitere Verlauf dieses Prozesses nur vom Zustand x_n zur Zeit t_n und nicht von der Vorgeschichte $(t_{n-1}, t_{n-2}, \dots, t_0)$ abhängig, so nennt man den Prozeß einen Markoff-Prozeß (nach dem russischen Mathematiker A.A. Markoff).

Für die bedingten Zustandswahrscheinlichkeiten gilt also

$$P(\phi_{t_{n+1}} = x_{n+1} | \phi_{t_0} = x_0, \phi_{t_1} = x_1, \dots, \phi_{t_n} = x_n) = P(\phi_{t_{n+1}} = x_{n+1} | \phi_{t_n} = x_n) \quad (7)$$

$$t_0 < t_1 < t_2 < \dots; n = 0, 1, 2, \dots$$

kleiner Modelle; denn bei relativ wenig Parametern und wenig Variablen ist der notwendige Rechenzeitaufwand noch tragbar.

Häufig angewendet werden die Dynamische Programmierungstechnik und die Branch-and Bound Technik (siehe z.B. [66-68]).

Heuristische Optimierungsverfahren: Bei der Untersuchung komplexer Modelle treten sehr viele Parameter auf: verschiedene Netzkonfigurationen, verschieden schnelle Übertragungskanäle, verschiedene Typen von Datenvermittlungen, etc. Um den enormen Rechenzeitaufwand der exakten Methoden zu vermeiden, wurden deshalb zahlreiche heuristische Verfahren entwickelt. Bei den meisten Algorithmen wird jedoch das dynamische Ablaufgeschehen nur grob berücksichtigt. (siehe z.B. [14-18,27-29]).

5. Schnelle Reaktionszeit durch prioritätsgesteuerte Satellitenvermittlungen

In weitverzweigten Anschlußnetzen werden neben Multiplexern und Konzentratoren immer häufiger sog. Satellitenvermittlungen eingesetzt. Satellitenvermittlungen haben nicht nur die Aufgabe der Verkehrskonzentration, sondern übernehmen auch gewisse Teilaufgaben zur Entlastung der Datenvermittlungen.

In diesem Kapitel wird eine Satellitenvermittlung für ein Netz mit Packet-Switching und Anforderungen unterschiedlicher Dringlichkeit (Prioritäten) kurz vorgestellt. (Ausführliche Beschreibung und Analyse siehe [5,69]).

5.1. Beschreibung des Ablaufgeschehens

Von den Teilnehmern eintreffende Übertragungswünsche werden in einem Pufferspeicher gespeichert. Ist eine bestimmte Nachricht vollständig eingetroffen, so wird in der Eingangswarteschlange eine Marke gesetzt.

Diese Eingangswarteschlange wird vom Prozessor bearbeitet: die Nachrichten werden - sofern dies nicht schon früher geschehen ist - auf Übertragungsfehler geprüft und in x einzelne Pakete zerlegt. Je nach Dringlichkeit der Nachricht werden in einer der P parallelen Ausgangswarteschlangen x neue Marken gesetzt. Die Anzahl dieser Marken ist gleich der Anzahl der Pakete, in welche die gesamte Nachricht zerlegt wurde. Alle auf Übertragung wartenden Pakete werden in der Reihenfolge ihrer Dringlichkeit in Richtung Datenvermittlung abgesendet.

5.2. Modellbildung

Bild 5 zeigt ein Strukturmodell, welches dem im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Verkehrsablauf entspricht.

Anforderungen der Datenstationen werden in einer gemeinsamen Eingangswarteschlange aufgenommen. Alle Anforderungen werden - ohne Berücksichtigung der Priorität - in der Reihenfolge ihres Eintreffens vom Prozessor bearbeitet. Nach dieser Bearbeitungsphase wird - entsprechend der Anzahl der Pakete, in die eine Nachricht zerlegt wurde - eine bestimmte Anzahl von Anforderungen in die Ausgangswarteschlange der betreffenden Priorität gesetzt.

Die Übertragung der in den verschiedenen Ausgangswarteschlangen wartenden Anforderungen erfolgt nach höchster Dringlichkeit mit nichtunterbrechender Priorität.

Pakete, die von der Datenvermittlung zur betrachteten Satelliten-

- Phasenmethode |2|
- Methode der eingebetteten Markoff-Kette |6|

Allgemeine Methoden, z.B.

- Momentenmethode |5|
- Integralmethode |57|

4.3.3. Klassifizierung der Lösungstypen

In den zitierten Literaturstellen wird für einfache und komplexe Modelle eine große Anzahl von analytischen Lösungen angegeben. Zusätzlich findet man in diesen Arbeiten viele Hinweise auf weiterführende Literatur.

Die angegebenen Lösungen sind häufig exakt, aber auch die Approximationstechniken sind sehr ausgefeilt.

Die Vielzahl der verschiedenen Lösungstypen kann in vier Gruppen eingeteilt werden:

Explizite Lösungstypen: Hier werden die charakteristischen Größen explizit, d.h. direkt bestimmt. Häufig ist jedoch eine direkte Lösung nicht möglich oder die Ausdrücke sind derart komplex, daß numerische Schwierigkeiten bei der Auswertung auftreten. (Für Grundmodelle mit einer Bedienungsstelle siehe |1-5|, für komplexe Warteschlangenmodelle siehe |39,58-60|).

Transformierte Lösungstypen: Das Ergebnis wird in diesem Fall mit Hilfe einer Funktionaltransformierten dargestellt, z.B. in Form einer \mathcal{L} -Transformierten oder Erzeugenden Funktion. Mathematisch ist dieses Verfahren sehr elegant und es existieren zahlreiche Ergebnisse für Standardmodelle. Leider treten jedoch häufig bei der Rücktransformation Probleme auf, sodaß eine numerische Auswertung schwierig ist (siehe z.B. |1-4,61|).

Rekursive Lösungstypen: Hier wird das Ergebnis bei der numerischen Auswertung rekursiv aus Zwischenergebnissen bestimmt. Im Gegensatz zu den obigen Lösungstypen können deshalb numerische Schwierigkeiten oft vermieden werden |62,63|.

Iterative Lösungstypen: Diesen Lösungstyp findet man insbesondere bei der Behandlung komplexer Modelle. Zunächst wird das Gesamtmodell in Teilmodelle zerlegt, diese Teilmodelle werden untersucht. Daran anschließend wird iteriert bis die Kontinuität des Verkehrsflusses im Gesamtmodell erfüllt ist ("Schnittstellenproblem"). In einem letzten Schritt wird dann die Leistungsfähigkeit des Gesamtmodells auf elementare Weise bestimmt (siehe z.B. |64,65|).

4.4. Optimierung

Die Optimierung von Datennetzen ist mit den heute zur Verfügung stehenden mathematischen Hilfsmitteln in einem Schritt oft nicht möglich. Deshalb untersucht und optimiert man in diesen Fällen zu erst Teilsysteme und bestimmt dann das Gesamtoptimum durch Iteration |14-18|.

Je nach Umfang des Optimierungsproblems verwendet man verschiedene Verfahren. Man unterscheidet:

Exakte Optimierungsverfahren: Die exakten Methoden der mathematischen Optimierung eignen sich insbesondere für die Untersuchung

5.4. Numerische Ergebnisse

In den Bildern 6 und 7 sind einige interessante Ergebnisse zusammengestellt, zahlreiche weitere Ergebnisse über Mittelwerte und Verteilungsfunktionen findet man in [5,69].

5.4.1. Vergleich zwischen "packet-" und "message-switching"

Bild 6 zeigt die mittlere Durchlaufzeit $d_N(1)$ und die Wartezeit $w_2(1)$ vor dem Übertragungssystem für Nachrichten der Prioritätsklasse 1. Der Vergleich der Kurven zeigt deutlich, daß Warte- und Durchlaufzeiten bei packet-switching erheblich geringer sein können, selbst wenn man annimmt, daß bei message-switching im Prozessor keine Bearbeitungszeit notwendig ist (punktierte Linie).

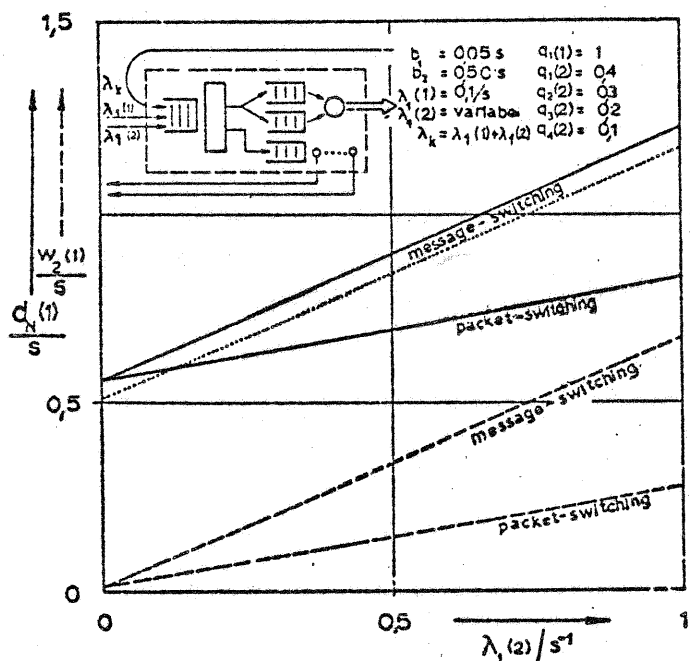


Bild 6: Mittlere Warte- und Durchlaufzeiten (vgl. Text).

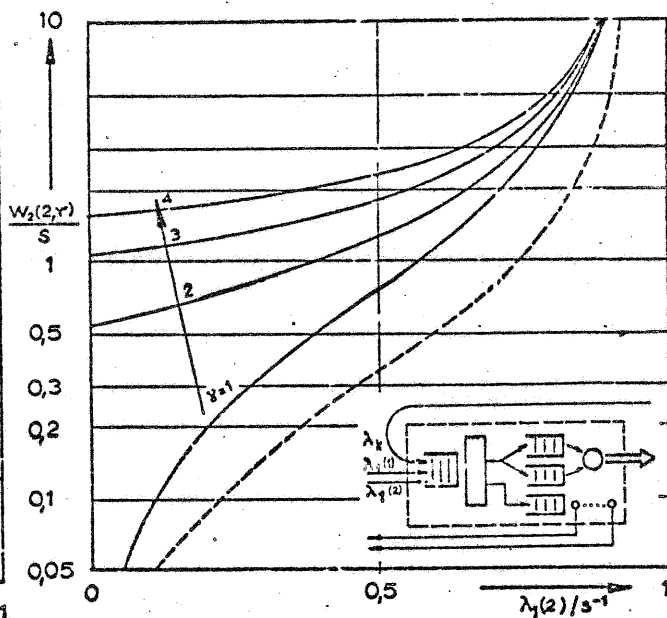


Bild 7: Mittlere Wartezeiten einzelner Pakete (vgl. Text).

5.4.2. Mittlere Wartezeiten einzelner Pakete

Bild 7 zeigt ein Beispiel für die mittlere Wartezeit $w_2(2, \nu)$ eines Pakets Nr. ν einer bestimmten Nachricht der Prioritätsklasse 2 vor dem Übertragungskanal zur Datenvermittlung.

Gestrichelt eingezeichnet sind Ergebnisse für die mittlere Wartezeit eines Pakets, wenn man fälschlicherweise annimmt, daß die Anforderungen entsprechend einem Prozeß mit Einzelankunft eintreffen (in beiden Fällen ist die mittlere Ankunftsrate pro Prioritätsklasse gleich).

Das Diagramm zeigt, daß mit Hilfe der bekannten Formeln für Prozesse mit Einzelankunft die Abschätzung der Wartezeiten sehr ungenau wird. Besonders ungenau werden die Warte- und Durchlaufzeiten ganzer Nachrichten, da diese nur von der Wartezeit des letzten Pakets abhängen.

Schrifttum:

- [1] Feller, W.: An Introduction to Probability Theory and its Applications, Volume I, John Wiley & Sons, New York & London, 1961.
- [2] Ferschl, F.: Zufallabhängige Wirtschaftsprozesse, Physica-Verlag, Wien, 1964.

vermittlung übertragen werden, werden entsprechend behandelt und dann zu den Datenstationen übertragen.

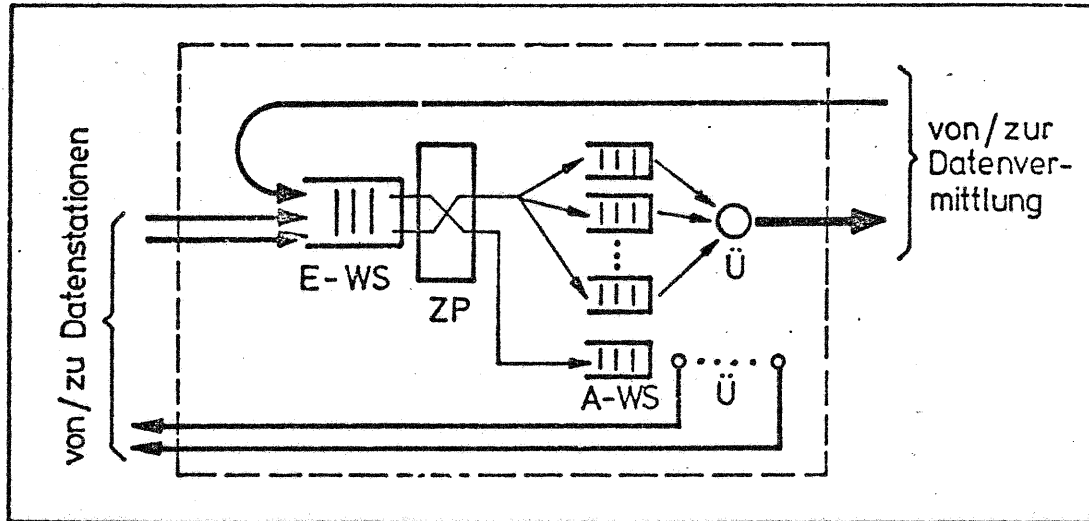


Bild 5: Modell zur Beschreibung des dynamischen Ablaufgeschehens in der Satellitenvermittlung (E-WS Eingangswarteschlange; ZP: Zentraler Prozessor; A-WS: Ausgangswarteschlangen; Ü: Übertragungswege).

Alle Warteschlangen sind unbegrenzt, d.h. keine Anforderungen werden abgewiesen (dynamische Speicherplatzzuweisung! Begrenzte Anzahl s. Simulationsprogramm in [69]). Die wartenden Anforderungen einer bestimmten Warteschlange werden in der Reihenfolge ihres Eintreffens abgearbeitet (FIFO).

Ankunftsabstände individuell pro Prioritätsklasse p ($p=1,2,\dots,P$):

$$F_{Ap}(t) = P(T_{Ap} \leq t) = 1 - e^{-\lambda(p) \cdot t}$$

Ankunftsabstände eintreffender Pakete

$$F_{AK}(t) = P(T_{Ad} \leq t) = 1 - e^{-\lambda_k \cdot t}$$

Prozessor-Bedienungszeiten einheitlich für alle Anforderungen:

$$F_B(t) = P(T_B \leq t) = 1 - e^{-t/b_1}$$

Das Zerlegen der Nachrichten in eine Anzahl von Paketen gleicher Länge wird durch die Wahrscheinlichkeit q beschrieben: $q_x(p)$ ist die Wahrscheinlichkeit, daß eine eintreffende Nachricht der Priorität p in x Pakete aufgeteilt wird. Die Übertragungszeit für jedes Paket ist konstant. Für die Verteilungsfunktion gilt deshalb:

$$F_{\dot{U}}(t) = P(T_{\dot{U}} \leq t) = \begin{cases} 0 & \text{für } 0 \leq t \leq b_2 \\ 1 & \text{für } t \geq b_2 \end{cases}$$

5.3. Berechnung der charakteristischen Größen

Die Berechnung der Wartezeit in der Eingangswarteschlange ist mit Hilfe Erlangs bekannter Wartezeitformel möglich [1-5]. Der Ausgangsprozess dieses ersten Systems ist nach dem Theorem von Burke (ausführliche Beschreibung siehe [5]) ebenfalls ein Poisson-Prozeß. Die Ankunftsabstände der einzelnen "Paketgruppen", die im Übertragungssystem eintreffen, sind deshalb negativ exponentiell verteilt. Charakteristische Verkehrsgrößen dieses Teilsystems werden in [5, 69] mit Hilfe der Momentenmethode analysiert.

- [3] Gnedenko, B.W.: Lehrbuch der Wahrscheinlichkeitsrechnung, Akademie-Verlag Berlin, 1968.
- [4] Kleinrock, L.: Queuing Systems, John Wiley & Sons, Vol. 1: Theory, 1975.
- [5] Herzog, U.: Verkehrsfluß in Datennetzen, Habilitationsschrift und 21. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten. Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1973.
- [6] Fuchs, E., Jackson, P.E.: Estimates of Distributions of Random Variables for Certain Computer Communications Traffic Models. Proc. ACM Symp. on Problems in the Optimization of Data Commun. Systems, Pine Mountain, Ga., October 1969, S. 202 - 225.
- [7] Dudick, A.L., Fuchs, E., Jackson, P.E.: Data Traffic Measurements for Inquiry-Response Computer Communications Systems. Proc. IFIP, Ljubljana, Jugoslawien, August 1971, TA-4-79 bis 83.
- [8] Wilkinson, R.I.: Some Comparisons of Load and Loss Data with Current Traffic Theory. Proc. G. ITC, München, September 1970, S. 521/1-521/7.
- [9] Bux, W., Herzog, U., Reutter, P.: Approximation von Verteilungsfunktionen mit Hilfe der Phasennethode, Monografie des Instituts für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1976.
- [10] Bux, W., Kühn, P.: Untersuchungen zur verkehrsgerechten Dimensionierung von Speichervermittlungen. Tagungsband zur NTG-Fachtagung Datennetze, Baden-Paden, 18.-20.2.1976.
- [11] Jaiswal, N.K.: Priority Queues, Academic Press, New York und London, 1968.
- [12] Herzog, U., Kühn, P., Zeh, A.: Klassifizierung und Analyse von Verkehrsmodellen für das Ablaufgeschehen in Rechnersystemen. NTG/GI Fachtagung "Rechner und Betriebssysteme: Analyse, Simulation und Entwurf", Darmstadt, April 1972. Nachrichtentechn. Fachberichte 44 (1972) S. 181-198.
- [13] Green, P., Tang, D.: Some Recent Development in Teleprocessing System Optimization. Proc. IEEE Intern. Convention, New York, 1973.
- [14] Frank, H.: Optimal Design of Computer Networks. In Computer Networks, R. Rustin (Editor), Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1971.
- [15] Frank, H., Gerla, M., Chou, W.: Issues in the Design of Large Distributed Computer Communication Networks. Proc. Nat. Telecommun. Conf., Atlanta, 1973, 371-1 bis 371-9.
- [16] Martin, J.: System Analysis for Data Transmission, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1972.
- [17] Davies, D.W., Barber, D.L.A.: Communications Networks for Computers, John Wiley & Sons, London, New York, 1973.
- [18] Grinsdale, R.L. (Ed.), Kuo, F.F.: Computer Communication Networks, Noordhoff, Leyden, 1975.
- [19] Hayes, J.F., Sherman, L.M.: Traffic Analysis of a Ring Switched Data Transmission System, BSTJ 50 (1971) S. 2947-2978.
- [20] Spragins, J.D.: Analysis of Loop Transmission Systems. Proc. ACM/IEEE Symp. on Problems in the Optimization of Data Commun. Systems, Palo Alto, Calif., Oktober 1971. S. 175-182.
- [21] Botsch, D.: Die Verlustwahrscheinlichkeit einstufiger Koppelanordnungen der Vermittlungstechnik mit Extern- und Internverkehr. Dissertation, TH Stuttgart, 1966 und A.E.U. 22 (1968) S. 127-132.
- [22] Konheim, A.G., Meister, B.: Distributions of queue length and waiting times in a loop with two-way traffic. J. of Comp. System Sci. 7 (1973) S. 506-521.
- [23] Chu, W.W.: Buffer Behavior for Batch Poisson Arrivals and Single Constant Output. IEEE Trans. Commun. Techn. 18 (1970) S. 613-618.
- [24] Rudin, H.R.: On Economies of Scale and Integration of Services in certain queued Information Transmission Systems, Proc. ICC, Philadelphia, Pa., 1972, S. 32.27 - 32.31.
- [25] Kümmerle, K.: Multiplexer Performance for Integrated Line and Packet-Switched Traffic. Research Report RZ 651, IBM Zürich Research Laboratory, 1974.
- [26] Stimler, S.: Real-Time Data-Processing Systems, McGraw-Hill Book Company, New York, 1969.
- [27] Whitney, V.Y.M.: Comparison of Network Topology Optimization Algorithms. Proc. ICC 72, Washington D.C., 1972, S. 332-337.
- [28] Gerich, K.: Eine Betrachtung der System-Design Verfahren für Realzeitsysteme. IBM-Nachrichten 205 (1971) S. 661-666.
- [29] Woo, L.S., Tang, D.T.: Optimization of Teleprocessing Networks with Concentrators. Research Report, IBM Thomas J. Watson Research Center, Yorktown Heights, 1974.
- [30] Margopoulos, W.P., Williams, R.J.: Characteristic Problems (on Teleprocessing System Design) IBM Syst. J. 5 (1966) S. 134-141.
- [31] Bux, W.: Verkehrstheoretische Probleme beim Aufbau und Betrieb von Rechnerverbundsystemen. Diplomarbeit, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1973.
- [32] Herzog, U., Krämer, W., Kühn, P., Witzgall, M.: Analyse von Betriebssystem-Modellen für Rechnersysteme mit Multiprogramming und Paging. NTG/GI-Fachtagung "Struktur und Betrieb von Rechnersystemen", Braunschweig, 1974, S. 266-288.
- [33] Chang, W.: Single Server Queuing Processes in Computing Systems. IBM Syst. J. 9 (1970) S. 36-71.
- [34] Spragins, J.D.: Simulation of a Communication Processor under Extreme Loading Conditions. IEEE Trans. Commun. 20 (1972) S. 609-619.

- [35] Chang, J.H.: An Analysis of Buffering Techniques in Teleprocessing Systems. IEEE Trans. Commun. 20 (1972) S. 619-630.
- [36] Kümmerle, K.: An Analysis of Loss Approximations for Link Systems. Proc. 5. ITC, New York, N.Y., 1967, S. 327-336 und A.E.U. 25 (1971) S. 466-471.
- [37] Bazlen, D., Kampe, G., Lotze, A.: Design Parameters and Loss Calculation of Link Systems, IEEE Trans. Communic., Vol. COM-22 (1974) S. 1908-1920.
- [38] Kleinrock, L.: Communication Nets, Stochastic Message Flow and Delay. McGraw-Hill Book Company New York, 1964.
- [39] Zimmermann, G., Störmer, H.: Wartezeiten in Nachrichtenvermittlungen mit Speichern, R. Oldenbourg, München, 1961.
- [40] Jackson, J.R.: Jobshop-Like Queueing Systems. Management Sci 10(1963)S. 131-142.
- [41] Frank, H., Kahn, R.E., Kleinrock, L.: Computer Communication Network Design: Experience with Theory and Practice. Network 2(1972) S. 135-166.
- [42] Meister, B., Müller, H.R., Rudin, H.R.: On the Optimization of Message Switching Networks. IEEE Trans. Commun. 20(1972) S. 8-14.
- [43] Borgonovo, F., Camerini, P.M., Fratta, L., Maffioli, F.: Message Switching Networks for Computer Communications. Eurocon'74. Europ. Conf. on Electronics, Amsterdam, 22.-26.4.74.
- [44] Closs, F.: Message Delays and Trunk Utilization in Line-Switched and Message Switched Networks. IBM Research Laboratory, Zürich, Juni 1972.
- [45] Kaiser, W.: Present Trends in Data Transmission. Eurocon'74. Europ. Conf. on Electrotechnics, Amsterdam, 22.-26.4.1974.
- [46] Gerla, M., Chou, W., Frank, H.: Cost Throughput Trends in Computer Networks using Satellite Communications. Proc. IEEE Intern. Conf. on Commun., Minneapolis, 1974, S. 21C-1+21C-5.
- [47] Eric, M.J.: The Economics and Performance of Satellite Packet Switching. IEEE Trans. Commun. Vol. COM-23(1975)S. 732-741.
- [48] Fultz, G.L., Kleinrock, L.: Adaptive Routing Techniques for Store - and Forward Computer Communication Networks. Advanced Research Projects Agency Semiannual Technical Report, June 1971, University of California, S. 83-91.
- [49] Mauceri, L.J.: Control of an Expanding Network - "An Operational Nightmare". Networks 4 (1974) S. 287-297.
- [50] Hellerman, H., Conroy, T.F.: Computer System Performance, McGraw-Hill Book Company, New York, 1975.
- [51] Gordon, G.: System Simulation. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 1969.
- [52] Kampe, G.: SIMSCRIPT. Vieweg-Verlag, Braunschweig, 1971.
- [53] Friehmelt, R.: Simulation of a Computer Network Communication System. 2nd SIMULA-User's Conference, Monte Carlo, 9.-11.10. 1974.
- [54] Chou, W., Frank, H., van Slyke, R.: Simulation of Centralized Computer Communications Systems. IEEE Trans. Commun. Vol. COM-23(1975)S. 994-1001.
- [55] Cox, D.R., Miller, H.D.: The Theory of Stochastic Processes. Wiley & Sons, New York, 1965.
- [56] Kendall, D.G.: Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and Their Analysis by the Method of the Imbedded Markov Chain. Ann. Math. Statist. 24(1953)S. 338-354.
- [57] Lindley, D.V.: The Theory of Queues with a Single Server. Proc. Cambridge Phil. Soc. 48 (1952) S. 277-289.
- [58] Buzen, J.: Queueing Network Models of Multiprogramming. Ph.D. Thesis, Division of Engineering and Applied Physics, Harvard University, Cambridge, Mass. 1971.
- [59] Baskett, F., Chandy, K.M., Muntz, R.R., Palacios, F.G.: Open, Closed and Mixed Networks of Queues with Different Classes of Customers. J. ACM 22 (1975) S. 248-260.
- [60] Chandy, K.M., Herzog, U., Woo, L.: Parametric Analysis of Queueing Network Models. IBM J. Res. Develop. 19(1975) S. 36-42.
- [61] Cohen, J.W.: The Single Server Queue. North-Holland Publ. Company, Amsterdam-London, 1969.
- [62] Herzog, U., Woo, L., Chandy, K.M.: Solution of Queueing Problems by a Recursive Technique. IBM J. Res. Develop. 19(1975)S. 295-300.
- [63] Sauer, C.H., Chandy, K.M.: Approximate Analysis of Central Server Models. IBM J. Res. Develop. 19(1975) S. 301-313.
- [64] Chandy, K.M., Herzog, U., Woo, L.: Approximate Analysis of General Queueing Networks. IBM J. Res. Develop. 19(1975) S. 43-49.
- [65] Kühn, P.: Analysis of Complex Queueing Networks by Decomposition. Wird veröffentlicht beim 8. ITC, Melbourne, November 1976.
- [66] Garfinkel, R.S., Nemhauser, G.L.: Integer Programming. Wiley & Sons, Inc., New York, 1972.
- [67] Neumann, K.: Operations Research Verfahren, Bd. 1, Carl Hauser Verlag, München-Wien, 1975.
- [68] Herzog, U.: Optimal Scheduling Strategies for Real-Time Computers. IBM J. Res. Develop. 19 (1975) S. 494-503.
- [69] Ley, J.: Eine Satellitenvermittlung für Packet-Switching mit Prioritäten. Diplomarbeit Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1973.