Nachrichtentechn. Z. 26 (1973) H. 8, S. 341-345

Entwicklungstendenzen in der Nachrichtenverkehrstheorie

Von Paul Kühn, VDE

Mitteilung aus dem Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart

1. Einführung

Der rasch ansteigende Bedarf an vermittlungstechnischen Einrichtungen für den Fernsprech- und Datenverkehr erfordert in zunehmendem Maße genaue Methoden zur Prognose des zukünftigen Bedarfs sowie zur Entwicklung und Planung dieser Einrichtungen. Der Fernsprech- und Datenverkehr innerhalb von Vermittlungssystemen, Rechnersystemen und Netzen ist i. a. durch statistische Eigenschaften gekennzeichnet und wird von einer Vielzahl von Teilnehmern, ferner von strukturellen und betrieblichen Voraussetzungen dieser Systeme bestimmt. Die Entwicklung und Planung solcher Systeme erfolgt einerseits im Hinblick auf eine zufriedenstellende Abwicklung des Verkehrs und andererseits im Hinblick auf die wirtschaftliche Nutzung der investierten Betriebsmittel.

Aufgabe der Nachrichtenverkehrstheorie ist die mathematische Analyse stochastischer Bedienungs- und Transportprozesse innerhalb von Nachrichtensystemen sowie die Entwicklung von Regeln und Bemessungsunterlagen für den möglichst optimalen Entwurf (Synthese). Im folgenden werden die hauptsächlichsten Entwicklungstendenzen in der Nachrichtenverkehrstheorie kurz umrissen. Die Problematik wird sowohl vom Standpunkt der Methodik als auch vom Standpunkt der Problemstellungen in Entwicklung und Planung aus beleuchtet. Aus Umfangsgründen kann dabei nur auf einen kleinen Teil der Quellenliteratur sowie auf Arbeiten mit stark zusammenfassender Darstellung des betreffenden Gebietes verwiesen werden.

2. Entwicklungstendenzen in der Methodik

Verkehrstheoretische Fragestellungen treten in verschiedenen Bereichen vermittelnder, verarbeitender und übertragender Systeme auf, vgl. hierzu Abschnitt 3. Die Vorgehensweise der Nachrichtenverkehrstheorie wird von einer Reihe verschiedener Aspekte geprägt, welche im folgenden kurz umrissen werden sollen.

2.1. *Modellbildung und Modellbestätigung*

Um die verkehrstheoretischen Fragestellungen der Analyse zugänglich zu machen, werden Teil- oder Gesamtsysteme in einem Modell verdichtet. Das verkehrstheoretische Modell umfaßt drei Hauptkomponenten:

1. Systemstruktur: Anordnung von Quellen, Speichern, Durchschalteeinrichtungen und Bedienungseinheiten für die Entstehung, Speicherung, Vermittlung und Verarbeitung von Anforderungen.

2. Betriebsstrategien: Regeln für die Auswahl von Wegen, Bedienungseinheiten, Wartespeichern und wartenden Anforderungen. Sie dienen der Steuerung des Verkehrsflusses und der Zuteilung von Betriebsmitteln.

3. Ankunfts- und Bedienungsprozesse: Beschreibung des zeitlichen Eintreffens von Anforderungen (Ankunftsprozeß) bzw. des zeitlichen Bedienungsverlaufs (Bedienungs- oder Endeprozeß) durch Wahrscheinlichkeitsverteilungsfunktionen.

Zur möglichst genauen Anpassung eines verkehrstheoretischen Modells an die Wirklichkeit sind die Verkehrsflüsse und ihre statistischen Eigenschaften durch Messungen an realen Systemen zu ermitteln und in Form von stochastischen Prozessen zu beschreiben. Umfangreiche Messungen über den Fernsprech- und Datenverkehr wie auch den Verkehr innerhalb von Rechnersystemen sind bereits durchgeführt worden [11—17]. Auch in Zukunft werden solche Messungen große Bedeutung für die Kontrolle der Modellannahmen haben.

2.2. *Systemanalyse*

Die Analyse des verkehrstheoretischen Modells zielt auf die Bestimmung des Durchsatzes, der Warte-, Antwort- und Blockierzeiten, die Auslastung einzelner Systemeinheiten, die Überlastungsfähigkeit u. a. m. Von besonderem Interesse ist dabei die Abhängigkeit der einzelnen Kriterien von der Systemarchitektur (Struktur), den Steuerungsverfahren (Strategien) sowie den statistischen Eigenschaften des Verkehrs (Ankunfts- und Bedienungsprozesse).

Die Analyseverfahren bedienen sich größtenteils wahrscheinlichkeitstheoretischer Methoden. Die Ursprünge der Beschreibung von Verkehrsabläufen durch stochastische Prozesse gehen auf den dänischen Mathematiker

A. K. Erlang (1878—1929) zurück [1]. Die Theorie der Stochastischen Prozesse ist in der Zwischenzeit zu einem hochentwickelten mathematischen Instrument ausgebaut worden, welches die Verfahren der Nachrichtenverkehrstheorie maßgeblich beeinflußt hat. Die Beschreibung der meisten Verkehrsabläufe läßt sich auf diskrete Prozesse mit kontinuierlicher Zeit zurückführen, wobei häufig der stationäre Zustand von besonderem Interesse ist. Innerhalb dieser Prozesse haben die Markoffschen Prozesse in den Anwendungen die größte Bedeutung erreicht. Die gebräuchlichste Analysemethode besteht in dem Verfahren der Beschreibung des Prozesses mittels Zustandsgleichungen. Hieraus gewinnt man Zustandswahrscheinlichkeiten und weitere charakteristische Größen. Neben der Bestimmung von Mittelwerten und Verteilungsfunktionen von Zufallsgrößen im stationären Fall sind überdies instationäre Vorgänge bei Einschwing- und kurzzeitigen Überlastungsfällen von Bedeutung. Auf die vielfältigen mathematischen Methoden, welche von Ansätzen mit Differenzen-, Differential- und Integralgleichungen bis zu funktionen- und funktionaltheoretischen Methoden reichen, kann hier nicht näher eingegangen werden, hierzu sei auf die einschlägige Literatur verwiesen [2—10].

Zur experimentellen Nachbildung der Verkehrsabläufe auf Rechenanlagen hat sich in den letzten 15 Jahren die Simulationstechnik sehr stark entwickelt [18—23]. Hierbei werden neben Systemstruktur und Betriebsstrategie auch die Zufallsprozesse mittels eines Programmes erzeugt. Während des Simulationslaufs werden die dynamischen Vorgänge des Systems nachgebildet und die charakteristischen Verkehrsgrößen bestimmt. Die Bedeutung dieser Technik läßt sich u. a. auch daran ablesen, daß hierfür eine Reihe spezieller Simulationssprachen entwickelt wurde [22—23].

Vom Standpunkt der praxisorientierten Planung und Entwicklung her gesehen, besteht die Aufgabe der Nachrichtenverkehrstheorie in der Bereitstellung von Planungsunterlagen für die wichtigsten Standardprobleme. Hierzu ist es häufig erforderlich, approximative Berechnungsverfahren zu entwickeln, welche einerseits im Rahmen der Meß- und Modellgenauigkeit hinreichend genau sind und andererseits mit vertretbarem Aufwand numerisch ausgewertet werden können.

2.3. *Systementwurf*

Ziel der verkehrstheoretischen Untersuchungen ist der Entwurf (Synthese) optimaler Teil- oder Gesamtsysteme, welcher neben der Bestimmung optimaler Systemstrukturen bzw. Betriebsstrategien vor allem die wirtschaftliche Auslegung (Dimensionierung) der einzelnen Systemkomponenten unter Vorschrift von Verkehrsgüte und Kostenfunktionen umfaßt [24—26].

Die Syntheseverfahren hängen stark von der einzelnen Fragestellung ab. Zur wirtschaftlichen Dimensionierung haben sich Verfahren der Mathematischen Optimierung eingebürgert. Optimierungen der Struktur können häufig nur durch schrittweise Verbesserungen herbeigeführt werden. Tendenzen sind jedoch erkennbar, daß in diesem Bereich in Zukunft verstärkt Methoden der mathematischen Optimierung sowie der Graphentheorie angewandt werden [27—28]. Bei der Bestimmung optimaler Strategien (z. B. bezüglich Durchsatz) ist die Methodik ebenfalls unterschiedlich. Die optimale Strategie wird in der Regel aus der Analyse des Verkehrsablaufs bei Anwendung verschiedener Strategien durch Vergleich bestimmt. Andere Verfahren gehen von der Betrachtung einzelner Zustände oder Teilbereiche aus, welche einen Schluß auf die momentan optimale Strategie zulassen. Auch hier kommen verstärkt Methoden der mathematischen Optimierung zur Anwendung [29—30].

Ähnliche Methoden wie bei der wirtschaftlichen Dimensionierung und der Bestimmung von optimalen Strukturen bzw. Strategien werden auch in der Unternehmensforschung angewendet.

3. Entwicklungstendenzen in der Problemstellung

Aus den vielgestaltigen Fragestellungen und Ansätzen zur theoretischen Durchdringung der Phänomene des Nachrichtenverkehrs sollen nur einige dargestellt werden, in welchen sich u. a. die Einflüsse der gegenwärtigen Entwicklung und Planung in der Nachrichtentechnik widerspiegeln.

3.1. *Teilnehmer-Verhalten im Fernsprech- und Datenverkehr*

Die gebräuchlichste Modellannahme beschreibt das Teilnehmer-Verhalten in Form von endlich oder unendlich vielen unabhängigen Verkehrsquellen, welche Anforderungen in voneinander unabhängigen Ankunftsabständen erzeugen; entsprechend sind auch die Bedienungsdauern unabhängige Zufallsvariable, welche einer bestimmten Verteilungsfunktion gehorchen. Das tatsächliche Verhalten der Teilnehmer ist jedoch auch durch wiederholte Anrufversuche und Verzichte gekennzeichnet, wodurch sich eine im Verhältnis zu den Sprech- bzw. Datenübertragungswegen wesentlich stärkere Belastung der zentralisierten Steuerungseinrichtungen (Register, Markierer, Prozessoren) ergibt. Eine Reihe von Ansätzen versucht dieses Verhalten in die verkehrstheoretischen Modelle mit einzubeziehen [3, 8, 31—33].

3.2. *Durchschalteeinrichtungen in Nachrichtenvermittlungssystemen*

Die Berechnung der Verkehrsleistung von Durchschalteeinrichtungen (ein- und mehrstufige Koppelanordnungen) gehört zu den wichtigsten Aufgaben der Nachrichtenverkehrstheorie. Zur Ersparnis an Leitungen und Koppelpunkten werden einstufige Koppelanordnungen mit Mischungen zur Konzentration wie auch mehrstufige, konjugiert durchschaltende Koppelanordnungen (Linksysteme) verwendet. Sowohl die strukturellen Eigenschaften als auch die Absuch- und Auswahlstrategien bestimmen wesentlich die Verkehrsleistung einer Koppelanordnung. Im folgenden sollen nur Koppelanordnungen betrachtet werden, welche als „Verlustsysteme" arbeiten; über Koppelanordnungen mit Wartemöglichkeit vergl. Abschnitt 3.3.

Die Berechnung von einstufigen Koppelanordnungen mit vollkommener Erreichbarkeit bzw. idealer Mischung geht bereits auf A. K. Erlang zurück [1]. Allgemeinere Mischungs- und Linksystemanordnungen können prinzipiell durch mehrdimensionale Zustände beschrieben und exakt berechnet werden [34, 44—45]. In symmetrischen Fällen können zwar Algorithmen zur Reduzierung der Zustandszahl angegeben werden [44], für die praktisch auftretenden Strukturen sind die Größenordnungen dieser Zustandsgleichungssysteme i. a.

dennoch so groß, daß keine Möglichkeiten zur numerischen Auswertung bestehen und approximative Verfahren entwickelt werden müssen.

Umfangreiche Untersuchungen über den Einfluß von Verdrahtungsart und Absuchstrategie auf die Verkehrsleistung von Mischungen sowie über exakte und approximative Berechnungsverfahren sind in der Vergangenheit durchgeführt worden, vergl. [34—41]. Für die wichtigsten Mischungstypen der Praxis stehen Planungsunterlagen in Tabellenform bereit [42—43], so daß in diesem Gebiet ein relativer Abschluß erreicht wurde, wenn von speziellen Fragestellungen (schiefe Last, ungleiche Erreichbarkeiten, spezielle Verkehre) abgesehen wird. Demgegenüber sind bei Linksystemen Fragen des Einflusses von Systemstruktur (Verdrahtungsarten, Fächer- bzw. Maschenstrukturen, Mischwahl- bzw. Richtungswahlsysteme, Systeme mit Rückeinspeisung) und Betriebsstrategie (Absucharten, Bündelwahl bzw. Punktwahl, Betrieb mit doppeltgerichtetem Verkehr, Umordnen von bestehenden Belegungen) gegenwärtig von großem Interesse [3—5, 45—48]. Zur Berechnung sind mehrere Näherungsverfahren entwickelt worden, welche in jüngster Zeit stark verbessert wurden [46—48]. (Eine systematische Darstellung der wichtigsten Näherungsverfahren findet sich in [46] mit umfangreichen Schrifttumsangaben.) Weitere interessante Problemstellungen treten bei der Optimierung solcher Systeme bezüglich Anzahl der Stufen und Koppelpunktebedarf auf [49], wobei u. U. noch zusätzlich der Steuerungsaufwand mit in Betracht gezogen werden kann. Die Analyse und Synthese von mehrstufigen Koppelanordnungen wird außerdem zunehmend von Zeitmultiplex-Durchschalteeinrichtungen (PAM, PCM) her beeinflußt; für die verkehrstheoretischen Untersuchungen können diese jedoch durch ein Abbildungsverfahren auf Raummultiplex-Linksysteme zurückgeführt werden [50—51].

3.3. *Zentralsteuerungen in Nachrichtenvermittlungssystemen*

Die Konsequenz der zentralisierten Steuerung von Fernsprech- und Datenvermittlungen besteht in einem umfangreichen Informationsaustausch zwischen Peripherie und Zentralsteuerung, welcher u. U. zu Engpässen führen kann. Die Modelle zur Beschreibung dieses Informationsaustausches führen auf sog. „Wartesysteme" mit ein- oder mehrstufigen Koppelanordnungen und einzelner oder stapelweiser Informationsübernahme zu beliebigen oder durch einen starren Takt bzw. die Unterbrechbarkeit vorgeschriebenen Zeitpunkten. Die Komplexität der peripheren Strukturen bedingt i. a. kompliziertere Systeme, welche z. B. durch mehrere parallele und/oder serielle Warteschlangen gekennzeichnet sind. Ferner sind diese Systeme durch ein relativ großes Spektrum von Betriebsstrategien, (z. B. Klassen von unterbrechenden oder nichtunterbrechenden Prioritäten, verschiedene Absuch- und Auswahlstrategien) sowie Typen von Ankunfts- und Bedienungsprozessen ausgezeichnet.

Für einstufige Wartesysteme mit einem oder mehreren vollkommen erreichbaren Bedienungsorganen und einer Warteschlange sind in der Warteschlangentheorie umfangreiche Lösungen bekannt geworden [1—3, 5—10, 52]. Schwerpunkte der momentanen Entwicklungen liegen einerseits in der Untersuchung komplizierterer Strukturen und Strategien (Mischungen und Linksysteme mit Warten [53—56], serielle Wartesysteme [57], getaktete Wartesysteme [58], Wartesysteme mit unterschiedlichen Unterbrechungsmechanismen [59—61, 63]), andererseits in der Untersuchung von Systemen mit allgemeineren Prozessen [3, 10]. Eine wesentliche Bedeutung wird in Zukunft auch die Untersuchung von Gesamtsystemen (Peripherie gekoppelt mit Zentralsteuerung) haben, wofür bereits eine Reihe von Ansätzen besteht.

3.4. *Verkehr innerhalb von Rechnersystemen*

Die Leistungsfähigkeit von Rechnersystemen wird sowohl durch strukturelle Maßnahmen (Parallelarbeit, Fließbandarbeit, Pufferung) in der Systemarchitektur als auch durch betriebsstrategische Maßnahmen (Multiprogramming, Paging, vorausschauende Versorgung) im Betriebssystem gesteigert. Schnelle Reaktionszeiten oder Dialogbetrieb erfordern zusätzliche Möglichkeiten der interaktiven Verarbeitung. Hierbei entstehen verkehrstheoretisch ganz ähnliche Problemstellungen wie die in 3.3 angesprochenen. Es handelt sich dabei i. a. um Netzwerke aus Bedienungseinheiten (Prozessoren, E/A-Kanäle) und Warteschlangen, welche von sehr verschiedenartigen Betriebsstrategien (Prioritäten, Zuteilungs- und Ersetzungsalgorithmen) und Prozessen (Programme) gesteuert werden. Die diesbezügliche Analyse und Synthese von Rechnerstrukturen und Betriebssystemen wird in Zukunft einen bedeutenden Zweig der Nachrichtenverkehrstheorie darstellen [62—66].

3.5. *Netze für Nachrichten- und Rechnerverkehr*

Der Aufbau und Betrieb nationaler und internationaler Netze für den Fernsprech-, Daten- und Rechnerverbundverkehr erfordert leistungsfähige Verfahren für die verkehrsabhängige Steuerung und die wirtschaftliche Dimensionierung [67—70]. Insbesondere wirft dabei die Struktur solcher Netze (Hierarchische Netze, Stern- und Maschennetze, Ringsysteme) eine wesentliche Fragestellung auf, da es sich i. a. um sehr teure Übertragungswege (z. B. Satellitenverbindungen) handelt. Innerhalb solcher Netze werden Betriebsstrategien wie Durchschalte- oder Teilstreckenvermittlung (line- bzw. message-switching), paketweise Teilstreckenvermittlung (packet-switching), alternative oder adaptive Leitweglenkung, Prioritäten usw. angewendet, welche eine wirtschaftliche wie auch flexible Nutzung (im Falle von Überlastungen oder Teilausfällen) erlauben. Zur Analyse und wirtschaftlichen Dimensionierung von Fernsprech- und Datennetzen mit alternativer Leitweglenkung sind in den letzten Jahren bereits Verfahren entwickelt und angewendet worden [67—68, 71—77]. Entwicklungstendenzen weisen verstärkt auf Untersuchungen an Netzen mit Prioritäten [78], adaptiven Steuerungsverfahren [69, 79], örtlich verschieden verteilten Betriebsmitteln [70, 80], ringförmiger Struktur [81] bzw. mit paketweiser Teilstreckenvermittlung [82] hin. Weitere Verfeinerungen ergeben sich dadurch, daß neben dem eigentlichen Verkehr noch die Auswirkungen der Signalisierung zur Steuerung der Netze betrachtet werden [83].

Zusammenfassung

Es wurde versucht, anhand von methodischen Merkmalen und aktuellen Problemstellungen Entwicklungstendenzen in der Nachrichtenverkehrstheorie aufzuzeigen. Die Methodik wurde anhand der Vorgehensweise

bei Modellbildung und Modellbestätigung, Systemanalyse und Systementwurf dargelegt. Die Entwicklungstendenzen in den Problemstellungen wurden an den Beispielen Teilnehmer-Verhalten, Durchschalteeinrichtungen und Zentralsteuerungen in Nachrichtenvermittlungssystemen, Verkehr innerhalb von Rechnersystemen sowie Netzen für den Nachrichten- und Rechnerverkehr analysiert.

Abschließend sei noch bemerkt, daß sich die Neuentwicklungen in der Nachrichtenverkehrstheorie auch in dem seit 1955 alle drei Jahre stattfindenden „International Teletraffic Congress" (ITC) widerspiegeln, welcher als weltweites Forum dieses Fachgebiets vom CCITT anerkannt ist.

Schrifttum

Allgemeine Bücher:

[1] *Brockmeyer, E.; Halstrøm, H. L.; Jensen, A.:* The life and works of A. K. Erlang. Acta Polytechnica Scandinavica. Appl. Math. and Comp. Mach. Series No. 6. Copenhagen, 1960.

[2] *Feller, W.:* An introduction to probability theory and its applications. New York: J. Wiley and Sons, 1957.

[3] *Syski, R.:* Introduction to congestion theory in telephone systems. Edinburgh: Oliver and Boyd, 1960.

[4] *Beneš, V. E.:* Mathematical theory of connecting networks and telephone traffic. New York/London: Academic Press, 1965.

[5] *Störmer, H.* et al.: Verkehrstheorie. München/Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1966.

[6] *Khintchine, A. Y.:* Mathematical methods in the theory of queuing. London: Griffin, 1960.

[7] *Saaty, T. L.:* Elements of queuing theory. New York: MacGraw-Hill, 1961.

[8] *Riordan, J.:* Stochastic service systems. New York/London: J. Wiley and Sons, 1962.

[9] *Takács, L.:* Introduction to the theory of queues. New York: Oxford University Press, 1962.

[10] *Cohen, J. W.:* The single server queue. North Holland, 1969.

Messungen:

[11] *Palm, C.:* Intensitätsschwankungen im Fernsprechverkehr. Ericsson Technics 44 (1943) S. 1 bis 187.

[12] *Störmer, H.:* Anwendung des Stichprobenverfahrens beim Beurteilen von Fernsprechverkehrsmessungen. Arch. elektr. Übertr. 8 (1954) S. 439 bis 466.

[13] *Lotze, A.:* Über die statistische Sicherheit von Verkehrsmessungen. Nachrichtentechn. Z. 11 (1958) S. 5 bis 7.

[14] *Iversen, V. B.:* Analysis of traffic processes based on data obtained by the scanning method. 7th Intern. Teletr. Congr. (ITC), Stockholm, 1973. Congressbook, S. 224/1—10.

[15] *Cole, G. D.:* Performance measurements on the ARPA computer network. ACM/IEEE, Proc. of the Second Symp. on Problems in the Optimization of Data Communications Systems. Palo Alto, Calif. 1971, S. 39 bis 45.

[16] *Estrin, G.; Kleinrock, L.:* Measures, models and measurements for time-shared computer utilities. Proc. ACM 1967 Nat. Conf., Thompson Books, Wash. D. C., S. 85 bis 96.

[17] *Oliver, N.; Chu, W. W.; Opderbeck, H.:* Measurement data on the working set replacement algorithm and their applications. Proc. of the Symp. on Comp.-Comm. Networks and Teletraffic. Polytechn. Press of the Polytechn. Inst. of Brooklyn. New York, 1972, S. 113 bis 124.

Simulation:

[18] *Kosten, L.:* Simulation in traffic theory. 6th Internat. Teletr. Congr. (ITC), München, 1970. Congressbook, S. 411/1—8.

[19] *Wagner, H.; Dietrich, G.:* Bestimmung der Verkehrsleistung von Wartesystemen durch künstlichen Fernsprechverkehr. Nachrichtentechn. Z. 17 (1964), S. 273 bis 279.

[20] *Huber, M.; Wagner, W.:* Simulation von Nachrichtenvermittlungssystemen. In: Nicht-numerische Informationsverarbeitung (Hrsg. R. Gunzenhäuser). Wien/New York: Springer-Verlag, 1968.

[21] *Kümmerle, K.:* Simulation of the performance of computer systems. Elektron. Rechenanl. 12 (1970) S. 324 bis 328.

[22] *Kampe, G.; Kühn, P.; Langenbach-Belz, M.:* Simulation in der Nachrichtenverkehrstheorie: Problemstellungen und Programmiersprachen. GI-Workshop über Methodik der rechnergestützten Simulation. Karlsruhe, 10.—11. 5. 1973.

[23] *Rogeberg, T.; Stenseth, B.:* TETRASIM — a general purpose program for the simulation of telephone systems. 7th Internat. Teletr. Congr. (ITC), Stockholm, 1973. Congressbook, S. 211/1—8.

Wirtschaftliche Auslegung und Optimierung:

[24] *Jensen, A.:* Moe's principle. An econometric investigation intended as an aid in dimensioning and managing telephone plant. Copenhagen Telephone Co.. Copenhagen, 1950.

[25] *Lotze, A.:* Field engineering methods for economic network planning with or without alternate routing. TIMS XX, Management Sciences, Developing Countries, and National Priorities. The Inst. of Management Sciences. Tel Aviv, 24.—29. 6. 1973.

[26] *Kühn, P.:* The impact of queuing theory on the optimization of communications and computer systems. TIMS XX, Management Sciences, Developing Countries, and National Priorities. The Inst. of Management Sciences. Tel Aviv, 24.—29. 6. 1973.

[27] *Kin, W. H.; Chien, R. T. W.:* Topological analysis and synthesis of communications networks. New York: Columbia University Press, 1962.

[28] *Frank, H.; Chou, W.:* Topological optimization of computer networks. Proc. IEEE 60 (1972) S. 1385 bis 1397.

[29] *Howard, R. A.:* Dynamic programming and Markov processes. New York: J. Wiley and Sons. 1960.

[30] *Conway, R. W.; Maxwell, W. L.; Miller, L. W.:* Theory of scheduling. Addison-Wesley Publ. Comp. Reading, Mass., 1967.

Teilnehmer-Verhalten:

[3, 8]

[31] *Hayward, jr., W. S.; Wilkinson, R. I.:* Human factors in telephone systems and their influence on traffic theory especially with regard to future facilities. 6th Internat. Teletr. Congr. (ITC), München, 1970. Congressbook, S. 431/1—10.

[32] *Evers, R.:* A survey of subscriber behaviour including repeated call attempts — results of measurements in two pabx's. Proc. of the 6th Internat. Symp. on Human Factors in Telecommunication, Stockholm, 1972.

[33] *Cohen, J. W.:* On the fundamental problem of telephone traffic theory and the influence of repeated calls. Philips Telecomm. Rev. 18 (1957) S. 49 bis 100.

Verlustsysteme:

a) Mischungen

[1, 3, 5]

[34] *Bretschneider, G.:* Exact loss calculations of gradings. 5th Internat. Teletr. Congr. (ITC), New York, 1967. Prebook, S. 162 bis 169.

[35] *Lotze, A.:* History and development of grading theory. Arch. elektr. Übertr. 25 (1971) S. 402 bis 410.

[36] *Hofstetter, H.; Trautmann, K.:* Der Einfluß der Mischung auf die Verkehrsleistung der Abnehmerschaltglieder hinter einstufigen Vermittlungsanordnungen. Nachrichtentechn. Z. 16 (1963) S. 635 bis 642.

[37] *Cappetti, I.:* Simulation methods on telephone gradings: Analysis of macrostructures and microstructures. 5th Intern. Teletr. Congr. (ITC), New York, 1967.

[38] *Elldin, A.:* On the congestion in gradings with random hunting. Ericsson Technics 1 (1955) S. 35 bis 94.

[39] *Lotze, A.:* Verluste und Gütemerkmale einstufiger Mischungen. Nachrichtentechn. Z. 14 (1961) S. 449 bis 453.

[40] *Herzog, U.; Lotze, A.; Schehrer, R.:* Die Berechnung von Leitungsbündeln hinter vereinfachten Mischungstypen. Nachrichtentechn. Z. 22 (1969) S. 684 bis 689.

[41] *Bazlen, D.:* The dimensioning of trunk groups for standard gradings of the German GPO in case of finite number of traffic sources. Nachrichtentechn. Z. 25 (1972) S. 50 bis 52.

[42] *Lotze, A., Wagner, W.:* Table of the modified Palm-Jacobaeus-loss-formula. Institute of Switching and Data Technics. University of Stuttgart, 1962.

[43] Tabellenbuch Fernsprechverkehrstheorie, Teil 1. Berlin/München: Siemens AG, 1970.

b) Linksysteme

[3—5]

[44] *Basharin, G. P.:* Derivation of equations of state for two-stage telephone circuits with losses (in russisch). Electrosvyaz 2 (1960) S. 56 bis 64.

[45] *Lörcher, W.:* Exakte Berechnung der Zustandswahrscheinlichkeiten und der charakteristischen Verkehrsgrößen mehrstufiger Koppelanordnungen mit konjugierter Durchschaltung. Dissertation Universität Stuttgart, 1973 (Arbeitsbericht in Vorbereitung).

[46] *Kümmerle, K.:* Berechnungsverfahren für mehrstufige Koppelanordnungen mit konjugierter Durchschaltung — Systematik und Analyse. Dissertation Universität Stuttgart, 1969, und 9. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten des Instituts für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Univ. Stuttgart, 1969.

[47] *Bazlen, D.; Kampe, G.; Lotze, A.:* On the influence of hunting mode and link wiring on the loss of link systems. 7th Internat. Teletr. Congr. (ITC), Stockholm, 1973. Congressbook, S. 232/1—12.

[48] *Bazlen, D.:* Mehrstufige doppelt-gerichtete Koppelanordnungen der Vermittlungstechnik mit Intern- und Externverkehr. Dissertation Universität Stuttgart, 1973 (Arbeitsbericht in Vorbereitung).

[49] *Lotze, A.:* Optimum link systems. 5th Intern. Teletr. Congr. (ITC), New York, 1967. Prebook, S. 242 bis 251.

[50] *Huber, M.:* On the congestion in TDM systems. Application of the CIRB method and comments on known formulae. 4th Intern. Teletr. Congr. (ITC), London, 1964. Doc. 104.

[51] *Tanaka, M.:* Nonblocking switching in integrated PCM-networks. Arch. elektr. Übertr. 25 (1971) S. 477 bis 478.

Wartesysteme:

[1—3], [5—10]

[52] *Bhat, U. N.:* 60 years of queuing theory. Management Science, Ser. B (1969) S. 280 bis 294.

[53] *Thierer, M.:* Wartesystem-Tafeln für unvollkommene und vollkommene Erreichbarkeit nach der Interconnections-Warteformel (IDF). 7. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten des Instituts für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Univ. Stuttgart, 1968.

[54] *Kühn, P.:* Über die Berechnung der Wartezeiten in Vermittlungs- und Rechnersystemen. Dissertation Univ. Stuttgart, 1972, und 15. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten des Instituts für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Univ. Stuttgart, 1972.

[55] *Kühn, P.:* Waiting time distributions in multi-queue delay systems with gradings. 7th Internat. Teletr. Congr. (ITC), Stockholm, 1973. Congressbook, S. 242/1—9.

[56] *Hieber, L.:* Die Berechnung der Wartewahrscheinlichkeit und der mittleren Wartezeit von Linksystemen mit unbegrenzter Wartemöglichkeit. Dissertation Univ. Stuttgart, 1970, und 11. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten des Instituts für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Univ. Stuttgart, 1970.

[57] *Krämer, W.:* Total waiting time distribution function and the fate of a customer in a system with two queues in series. 7th Internat. Teletr. Congr. (ITC), Stockholm, 1973. Congressbook, S. 322/1—8.

[58] *Langenbach-Belz, M.:* Getaktete Wartesysteme bei Rechnern und zentralgesteuerten Nachrichtenvermittlungsanlagen. Dissertation Univ Stuttgart, 1973 (Arbeitsbericht in Vorbereitung).

[59] *Jaiswal, K.:* Priority queues. New York/London: Academic Press, 1968.

[60] *Gaver, D. P.:* On priority type disciplines in queuing. Proc. of the Symp. on Congestion Theory. The Univ. of North Carolina Press. Chapel Hill, 1965, S. 228 bis 252.

[61] *Herzog, U.:* Preemption-distance priorities in real-time computer systems. Nachrichtentechn. Z. 25 (1972) S. 201 bis 203.

Rechnersysteme:

[62] *Swoboda, J.:* Verkehrsfragen innerhalb einer Rechenanlage. Elektron. Rechenanl. 12 (1970) S. 249 bis 252.

[63] *Herzog, U.; Kühn, P.; Zeh, A.:* Klassifizierung und Analyse von Verkehrsmodellen für das Ablaufgeschehen in Rechnersystemen. Nachrichtentechn. Fachber. 44 (1972) S. 181 bis 198.

[64] *Chang, W.:* Single server queuing processes in computing systems. IBM Syst. J. (1970) S. 36 bis 71.

[65] *Buzen, J. P.:* Queuing network models of multiprogramming. Thesis Harvard University. Cambridge, Mass., 1971. Contract No. F 19628—70—C—0217 (85 Literaturangaben).

[66] *Kleinrock, L.:* Scheduling, queuing and delays in time-shared systems and computer networks. In: Computer-Communication Networks, Abramson, N., Kuo, F. (Ed.). Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1973.

Netze:

[67] *Wilkinson, R. I.; Riordan, J.:* Theories for toll traffic engineering in the USA. Bell Syst. techn. J. 35 (1956) S. 421 bis 514.

[68] *Lotze, A.:* Verkehrstheoretische Fragen bei der Gestaltung internationaler Fernwählnetze. Nachrichtentechn. Z. 19 (1966) S. 633 bis 639.

[69] *Boehm, B. W.; Mobley, R. L.:* Adaptive routing techniques for distributed communications systems. IEEE Trans. COM—17 (1969) S. 340 bis 349.

[70] *Kahn, R. E.:* Resource-sharing computer communications networks. Proc. IEEE 60 (1972) S. 1397 bis 1407.

[71] *Rapp, Y.:* Planning of junction network in a multiexchange area. 5th Internat. Teletr. Congr. (ITC), New York, 1967. Prebook, S. 581 bis 586.

[72] *Lotze, A.; Schehrer, R.:* The design of alternate routing systems with regard to the variance coefficient. Nachrichtentechn. Z. 7 (1968) S. 52 bis 56.

[73] *Herzog, U.; Lörcher, W.; Lotze, A.; Schehrer, R.:* Tabellen für die wirtschaftliche Dimensionierung von Fernsprechnetzen mit alternativer Leitweglenkung. Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1973.

[74] *Wallström, B.:* Methods for optimizing alternative routing networks. Ericsson Technics 25 (1969) S. 3 bis 28.

[75] *Herzog, U.; Kühn, P.:* Comparison of some multi-queue models with overflow and load-sharing strategies for data transmission and computer systems. Symp. on Comp. — Comm. Networks and Teletraffic. Polytechn. Press of the Polytechn. Inst. of Brooklyn. New York, 1972, S. 449 bis 472.

[76] *Herzog, U.:* Message-switching networks with alternate routing. 7th Intern. Teletr. Congr. (ITC), Stockholm, 1973. Congressbook, S. 415/1—8.

[77] *Kleinrock, L.:* Communication nets. Stochastic message flow and delay. New York: Mc-Graw-Hill, 1964.

[78] *Katzschner, L.:* Service protection for direct final traffic in DDD-networks. 7th Internat. Teletr. Congr. (ITC), Stockholm, 1973. Congressbook, S. 413/1—6.

[79] *Butrimenko, A.:* Routing technique for message-switching networks with message outdating. Proc. of the Symp. on Comp.-Comm. Networks and Teletraffic. Polytechn. Press of the Polytechn. Inst. of Brooklyn. New York, 1972, S. 257 bis 261.

[80] *Kahn, R. E.; Crowther, W. R.:* Flow control in a resource-sharing computer network. IEEE Trans. COM—20 (1972) S. 539 bis 546.

[81] *Konheim, A. G.:* Service epochs in a loop system. Proc. of the Symp. on Comp.-Comm. Networks and Teletraffic. Polytechn. Press of the Polytechn. Inst. of Brooklyn, New York, 1972, S. 125 bis 144.

[82] *Davies, D. W.:* The control of congestion in packet-switching networks. IEEE Trans. COM—20 (1972) S. 546 bis 550.

[83] *Closs, F.:* Time delays and trunk capacity requirements in line-switched and message-switched networks. Proc. of the Internat. Switching Symp. Cambridge, Mass., 1972, S. 428 bis 433.

(Eingangsdatum: 24. Mai 1973)