

Aktualisierung stationslokaler Routing-Information in einem mobilen, dezentral organisierten multi-hop Paketfunk-Netz.

GI/ITG Fachtagung

"Kommunikation in verteilten Systemen"

Stuttgart, Febr. 1989

V. Brass, B. Walke

Fachbereich Elektrotechnik/Datenverarbeitungstechnik

Fern-Universität Hagen

Es wird ein Verfahren für die Aktualisierung von Stationen durch Broadcast-Pakete in einem mobilen multi-hop Paketfunknetz mit Punkt-zu-Punkt Verkehr vorgestellt, das implizite Quittungen (ACK/NAK) vorsieht. Simulationsergebnisse zeigen, mit welcher mittleren Laufzeit der Pakete gerechnet werden muß, bis Stationen in 1-, 2- und 3-hop Entfernung sicher erreicht werden. Die Resultate erlauben Rückschlüsse auf das zulässige Verhältnis von Erzeugungswahrscheinlichkeit  $q$  (pro Slot) zu Übertragungswahrscheinlichkeit  $p$  aller (eigener und von Relais-) Pakete. Um Auswirkungen der Stationsmobilität auf das verkehrstheoretische Verhalten zu ermitteln, wird simulativ untersucht, wie oft topologische Änderungen auftreten und wie weit entsprechende Aktualisierungsinformation zur Aufrechterhaltung der Kommunikationsfähigkeit verbreitet werden muß. Aus den Simulationsergebnissen für das betrachtete Netz sind Erkenntnisse über geeignete Management-Protokolle möglich, die uneingeschränkt auf ähnliche Netze übertragbar sind.

## 1. EINLEITUNG

Es wird ein dezentral organisiertes Paketfunk-System betrachtet, wobei Aufgaben wie Netzinitialisierung, An-/Abmeldung von Stationen usw. paketiert über einen Vielfachzugriffskanal mit dem S-ALOHA Protokoll abgewickelt werden /WALKE.87/. Alle Stationen verkehren paketorientiert Punkt-zu-Punkt miteinander und erzeugen somit eine Grundlast im System, deren charakteristische Leistungskenngrößen wie mittlerer Durchsatz und Verzögerung pro Teilstrecke (Hop) sowohl analytisch, als auch simulativ bereits in /BRAGO.87/ ermittelt wurden. Die Abwicklung von Organisationsaufgaben wie An- und Abmeldung und Aktualisierung lokaler Datenbestände von Stationen erfordert die Übertragung von Broadcast-Paketen (eine Station sendet ihr Paket multi-hop an alle Stationen). Nachfolgend wird dafür ein Routingverfahren vorgestellt, das anstrebt, das resultierende Verkehrsvolumen und die Ende-zu-Ende Paketlaufzeiten möglichst klein zu halten. Dabei wird vorausgesetzt, daß alle Stationen die aktuelle Netztopologie, also die funktechnische Vernetzung der Stationen untereinander kennen. Deshalb ist es realisierbar, daß Broadcast (BC-) Pakete von der Quellstation so geroutet werden, daß sie von jeder Station nur einmal empfangen bzw. jeweils nur an eine Teilmenge ausgewählter Nachbarstationen weitergegeben werden. Um den Quittungsverkehr für BC-Pakete zu minimieren, ist ein Verfahren entwickelt worden, bei dem Stationen die Übertragungen ihrer Nachbarstationen auswerten und dabei implizit Quittungen gewinnen. Da Stationen in mobiler Umgebung tatsächlich die Topologie nicht ohne ständige Aktualisierung ihrer lokalen Sicht des Netzes kennen,

wird untersucht, welche Topologieänderungen bei Mobilität zu erwarten sind und wie weit Stationen, die ihre Routingtabelle aktualisieren müssen, entfernt liegen. Zunächst wird im zweiten Kapitel ein Modell des Paketfunk-Netzes beschrieben und die eingeführte Notation erläutert. Das dritte Kapitel behandelt Routingfragen und in Kapitel vier wird ein Quittierungsverfahren für BC-Nachrichten eingeführt. Im fünften Kapitel werden die Verfahren bewertet und dabei die Auswirkungen der Mobilität auf das dezentrale Routen diskutiert. Mit den dort gemachten Annahmen für die stationsindividuelle Beweglichkeit werden Ereignisse wie Verlust bzw. Gewinn von Nachbarn beobachtet und Vorschläge zu einem effizienten Aktualisierungs-Verfahren gemacht. Eine Zusammenfassung mit einer Wertung der Ergebnisse folgt am Schluß.

## 2. MODELLANNAHMEN

Das hier untersuchte System ist mit den folgenden Parametern modelliert worden:

- (a) Anzahl der Stationen im Gesamtsystem:  $n = 50$ ,
  - (b) Jede Station hat eine ausreichende Sendeleistung, so daß ein maximaler Sende-/Empfangsradius  $s_r = 2.0$  km entsteht,
  - (c) Die Ausdehnung des Funknetzes, bzw. der maximale Abstand zwischen zwei Stationen im gesamten Funknetz beträgt  $2r = 10.0$  km ( $r =$  Radius des Funknetzes),
  - (d) Alle Stationen sind homogen auf einer Kreisfläche mit Radius  $r$  verteilt angeordnet.
  - (e) Die Zeit ist in Zeitschlitz (Slots) unterteilt; ein Slot faßt ein Paket
- Die verkehrstheoretische Untersuchung erfolgt mit folgenden üblichen Annahmen:
- (f) gleiches Verkehrsaufkommen aller Stationen mit:
    - Erzeugungswahrscheinlichkeit  $q$  Pakete/Slot,
    - Übertragungswahrscheinlichkeit  $p$  Pakete/Slot
  - (g) homogenen Verkehrsbeziehungen der Stationen untereinander, d.h. jede Station wählt jede andere Station als Empfänger mit der Wahrscheinlichkeit  $1/(n-1)$  aus.

Bild 2.1 zeigt ein Beispiel für die Topologie des untersuchten Netzes.

## 3. ROUTINGVERFAHREN

In diesem Kapitel werden praktisch realisierbare quittierende Rundspruch-Verfahren in Verbindung mit gezieltem Routen vorgestellt und in Kapitel 5 die ermittelten Simulationsergebnisse diskutiert. Da nicht alle Stationen benachbart sind, entstehen multi-hop Routen, bei denen ein oder mehrere Relais zwischen Quell- und Zielstation erforderlich sind (store and forward). Für die hier verwendeten Routingverfahren werden stationslokale Kenntnisse über die funktechnische Vernetzung des gesamten Netzes (vgl. Bild 2.1) vorausgesetzt. Jede Zwischenstation (Relais) auf einer multi-hop Route bestimmt dabei völlig dezentral den weiteren Fortgang der Route. Als Kriterium für die Auswahl einer Nachbarstation als Relais auf einer Route ist die minimale Anzahl benötigter hops bis zur Zielstation festgelegt.

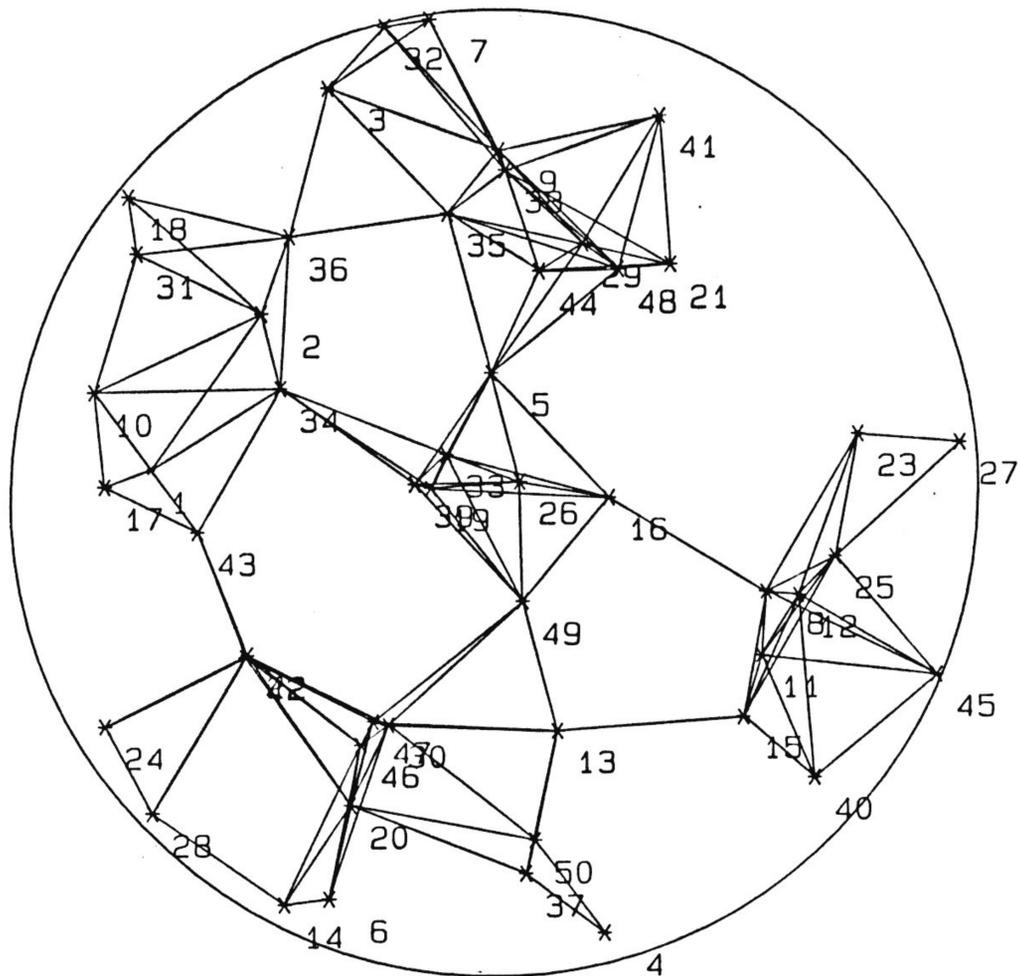
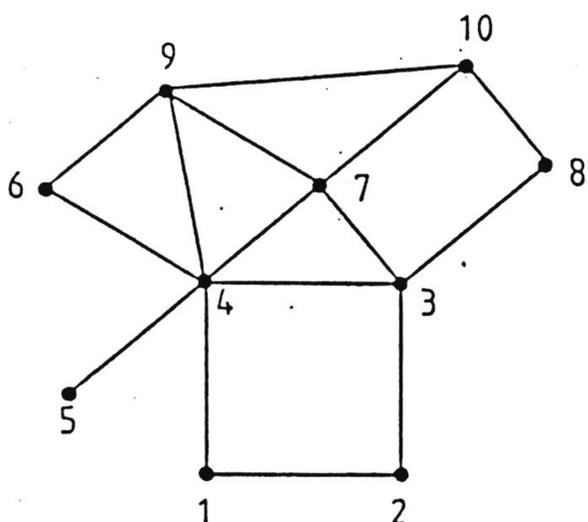


Bild 2.1: Beispiel für ein Funknetz; die Verbindungslinien zwischen den einzelnen Stationen entsprechen der funktechnischen Vernetzung.

Das folgende Beispiel zeigt den Aufbau einer Routingtabelle für Punkt-zu-Punkt Verbindungen, in der noch ein oder mehrere Alternativ-Relais eingetragen sind.



Routingtabelle für S4

Ziel Relais (Ersatz)

Ziel	Relais (Ersatz)
1	1 (3)
2	1 (3)
3	3 (7, 1)
5	5 (-)
6	6 (9)
7	7 (3, 9)
8	3 (7, 9)
9	9 (6, 7)
10	7 (9, 3)

Bild 3.1: Routingtabelle der Station S4 für Punkt-zu-Punkt Verbindungen.

Bei BC-Verkehr wird ein Paket (z.B. An-/Abmeldepaket) von einer Station ausgehend an alle anderen Stationen des Netzes übermittelt. Um hierbei das Verkehrsvolumen möglichst klein zu halten, ist ein Routingverfahren mit folgenden zwei Eigenschaften erforderlich:

- Vollständigkeit, d.h. alle Stationen im Netz werden mindestens einmal erreicht,
- möglichst wenige Übertragungen, d.h. jede Station sollte ein BC-Paket nur einmal erhalten.

Will eine Station an alle anderen ein BC-Paket senden, dann überträgt sie es zunächst an alle ihre Nachbarstationen. Diese überprüfen anhand ihrer Routing-Tabelle, an

welche ihrer Nachbarstationen das Paket weitertransportiert wird usw. Dabei wird sichergestellt, daß jede Station das Paket nur genau einmal empfängt. Das ist dadurch möglich, daß jede Station bei Erzeugung des BC-Paketes einen minimalen Erreichbarkeitsbaum generiert, der in Form eines sog. Kontrollstreifens im Paket verbleibt. Der Baum enthält jede Empfängerstation genau einmal. Bild 3.2 zeigt ein Beispiel für einen von Station S1 bzgl. des Netzes in Bild 3.1 erzeugten Kontrollstreifen.

E	1	②	3	4	⑤	⑥	7	⑧	⑨	⑩
S	1	1	4	1	4	4	4	3	4	7

Bild 3.2: Kontrollstreifen für ein BC-Paket von S1 aus.

Der Kontrollstreifen definiert für jeden hop alle Nachbarstationen als Empfänger (E) und legt diejenigen als Sender (S) fest, die zur Erreichbarkeit aller Stationen des Netzes beitragen müssen. So werden im ersten hop S2 und S4 von S1 erreicht, aber nur S4 als Sender definiert. S4 überträgt im zweiten hop den empfangenen Kontrollstreifen weiter, wobei die Empfangsstationen S3, S5, S6, S7 und S9 erreicht werden, jedoch nur S3 und S7 als Sender nach S8 bzw. S10 festgelegt sind. Die mit einem Kreis markierten Stationen übertragen das empfangene Paket also nicht weiter. Wie aus Bild 3.2 abzulesen ist, treten nur die Stationen S1, S3, S4 und S7 als Sender auf. Das Verfahren ist deshalb so effizient, weil in jeder Station vollständige Kenntnisse über die Netzstruktur vorausgesetzt werden und erfordert den kleinstmöglichen Verkehrsaufwand. Würde man bei gleicher Netztopologie das BC-Paket nach der Flooding-Methode übertragen, wobei jede Station an alle Nachbarstationen überträgt, so wären neun (alle, außer S5) Stationen an der Übermittlung des Paketes beteiligt. Die quantitative Verbesserung der Streifenmethode gegenüber der Flooding-Methode wird in Kapitel 5 untersucht.

#### 4. QUITTIERUNGSVERFAHREN

Um sicherzustellen, daß ein BC-Paket alle Stationen im Netz erreicht, ist ein quittierendes Übertragungs-Protokoll erforderlich. Für die sendende Station muß eindeutig erkennbar sein, ob ihr übertragenes Paket den gewünschten benachbarten Empfänger erreicht hat oder nicht. Quittungen werden implizit durch Beobachtung der Übertragungen der jeweiligen Empfängerstation gewonnen.

In /ELSAN.82/ und /ELSAN.83/ wird eine verwandte Methode zur impliziten Quittierung für Punkt-zu-Punkt Verbindungen beschrieben. Es hat den Nachteil, daß Störungen des Empfängers zu Zeitpunkten, zu denen Quittungen implizit gewonnen werden könnten, zum vollständigen Verlust der Quittung führen. Eine Kollision der Quittung wird angenommen, wenn entweder die interessierte Station gerade selbst überträgt oder in

ihrem Empfangsbereich sind zwei oder mehr Sender gleichzeitig übertragen.

Ein BC-Paket wird in der Regel von mehreren (allen) benachbarten Stationen gleichzeitig erfolgreich empfangen. Da u.U. mehrere der Empfänger als Relais arbeiten müssen und dabei ein korrelierter Verkehr benachbarter Stationen entsteht, sind implizite Quittungen nur mit einem verbesserten Quittierungsmechanismus realisierbar. Explizite Quittungen sind nötig, wenn eine implizite Quittung ausbleibt. Die zusätzliche Netzbelastung durch explizite Quittungen als Pakete im gleichen Kanal ist bereits untersucht worden. In /TOBAG.78/ wird gezeigt, daß dabei unerwünschte Korrelationseffekte entstehen, die zu einer enormen Verschlechterung des Netzdurchsatzes führen.

Die Verbesserung des hier vorgeschlagenen Quittierungsverfahrens besteht darin, daß jede Station  $S_i$  über einen begrenzten Zeitraum für ihren lokalen Gebrauch einen Sendebericht ( $n$  Bit) anfertigt, in dem sie festhält, in welchen der  $n$  vergangenen Slots sie übertragen hat. Parallel dazu vermerkt  $S_i$  in ihrem Empfangsbericht ( $n$  Bit), in welchen zurückliegenden Slots sie Pakete empfangen hat. Den Empfangsbericht trägt sie in jedes von ihr gesendete Paket ein. Alle Nachbarn  $S_j$ , die ein Paket von  $S_i$  empfangen, vergleichen den Empfangsbericht von  $S_i$  mit dem eigenen Sendebereich und können an den markierten Slots erkennen, ob ihr früher an  $S_i$  gesendetes Paket empfangen wurde oder nicht. Die  $n$  Bit des Empfangsberichtes entsprechen einem zurückliegenden Zeitfenster und jedes Bit einem Slot. Da in der one-hop Umgebung einer Station immer nur maximal eine Übertragung erfolgreich sein kann, ist das Verfahren eindeutig, solange man den Capture Effekt (erfolgreicher Empfang eines mehrerer gleichzeitig gesendeter Pakete) vernachlässigt. Bei Auftreten von Capture kann Eindeutigkeit durch Verwendung von Paketlaufnummern - wie beim HDLC-Protokoll - erzielt werden. Hat ein Sender nach Ablauf von  $n$  Bit noch kein Paket des Empfängers beobachtet, so kann er nicht mehr mit einer impliziten Quittung rechnen: die Länge des Empfangsberichtes entspricht dem time-out des Senders.

Folgendes Beispiel verdeutlicht den Ablauf des impliziten Quittierungsmechanismus:

$S_1$  (vgl. Bild 3.1) überträgt in den Slots  $t_2$  und  $t_7$  die Pakete  $P_1$  bzw.  $P_2$  an  $S_4$  und trägt dies in ihren Sendebereich ein, vgl. Bild 4.1. Unter der Annahme, daß  $S_4$  das Paket  $P_1$  in Slot  $t_2$  kollisionsbedingt nicht, aber das Paket  $P_2$  in Slot  $t_7$  empfängt, können folgende implizite Quittungen gewonnen werden:  $S_4$  hatte in den Slots  $t_2$  bzw.  $t_5$  keine oder mehrere gleichzeitige Übertragungen in ihrem Empfangsbereich und markiert deshalb in ihrem Empfangsbericht die Slots  $t_2$  bzw.  $t_5$  mit  $F(\text{alse})$ .

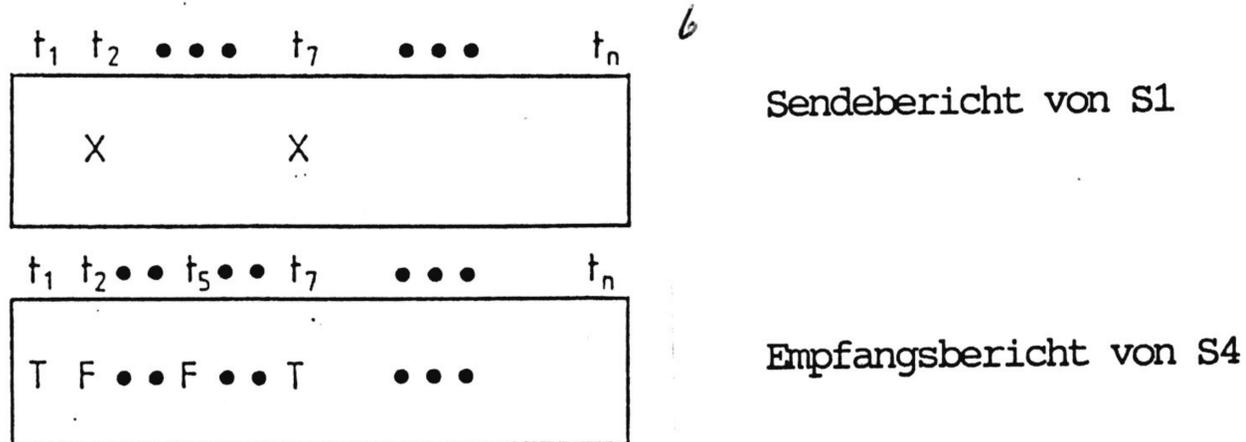


Bild 4.1: Implizites Quittieren von S4 an S1 (vgl. Bild 3.1)

Die Slots  $t_1$  und  $t_7$  werden aufgrund erfolgreichen Empfangs im Empfangsbericht von S4 mit T(rue) markiert. S1 vergleicht, bei Mithören des Empfangsberichtes von S4 zu einem späteren Zeitpunkt ( $t_i > t_7$ ) die "relativen" Zeitpunkte  $t_2$  und  $t_7$  mit dem eigenen Sendebereich und sieht, daß Paket P1 kollidiert, aber Paket P2 erfolgreich übertragen wurde. Die Eintragungen für die Slots  $t_1$  und  $t_5$  haben für S1 keine Relevanz. Wenn eine Station nach Empfang eines Paketes während der kommenden  $n$  Slots kein Paket übertragen würde, überträgt sie ein explizites ACK-Paket. Das Verfahren hat folgende Vor- und Nachteile.

#### VORTEILE:

- der Relais-Verkehr bei Punkt-zu-Punkt und BC-Betrieb wird genutzt, um sowohl positive (ACK) als auch negative (NAK) Quittungen zu gewinnen.
- bildet sich in einer Relaisstation  $S_j$  eine Warteschlange von Paketen, wird ein von  $S_i$  empfangenes Paket u.U. nicht sofort weiter übertragen. Da aber jedes Paket von  $S_j$  den Empfangsbericht enthält, kann  $S_i$  schon bei der nächsten Übertragung von  $S_j$  die Quittung (ACK/NAK) gewinnen. Bei einer Kollision muß somit nicht der gesamte time-out vor der erneuten Übertragung abgewartet werden.
- jede Relais-/Zielstation überträgt bei ausreichender Länge des Empfangsberichtes und ausreichend großem Eigen-/Relaisverkehr Quittungen wiederholt, so daß der Verlust einer Quittung unwahrscheinlich ist.
- jede Übertragung enthält u.U. Quittungen verschiedener Pakete.
- implizite Quittungen sind besonders bei BC-Betrieb vorteilhaft, da sonst lokal ein büschelartig hohes Verkehrsaufkommen durch Quittungen entstehen würde.

#### NACHTEILE:

- die Zeitspanne (time-out) bis zur wiederholten Übertragung desselben Paketes eines Senders muß genügend groß sein, damit der Empfänger mit hoher Wahrscheinlichkeit aus eigenem Antrieb sendet. Andernfalls wiederholt der Sender unnötigerweise ein erfolgreiches Paket.
- Verlust an Kanalkapazität wegen Übertragung des Empfangsberichtes in den Paketen. Dies entspricht einem schmalen Quittungskanal von ca. 50bit/Slot,
- bei zu geringem Verkehrsaufkommen empfangender Stationen steigt die Häufigkeit expliziter Quittungen wegen Ablauf des time-outs.

## 5. ERGEBNISSE

## 5.1 ENDE-ZU-ENDE PAKET-LAUFZEITEN IN MULTI-HOP NETZEN

Die Verbesserung des Routens von BC-Paketen durch die Quellstation mittels der Kontrollstreifenmethode soll durch Vergleich mit der Flooding-Methode gezeigt werden. Dazu wurde in statistischen Zeitabständen von einer zufällig im Netz nach Bild 2.1 gewählten Station ein BC-Paket erzeugt und seine mittlere Ende-zu-Ende Laufzeit zu allen anderen Stationen gemessen. Eine zeitliche Überlappung unterschiedlicher BC-Quell-Pakete wurde nicht zugelassen. Die in Bild 5.1 gezeigten mittleren Laufzeiten sind ohne Berücksichtigung von Quittungsdauern ermittelt und mit 95%-Konfidenzintervallen angegeben worden.

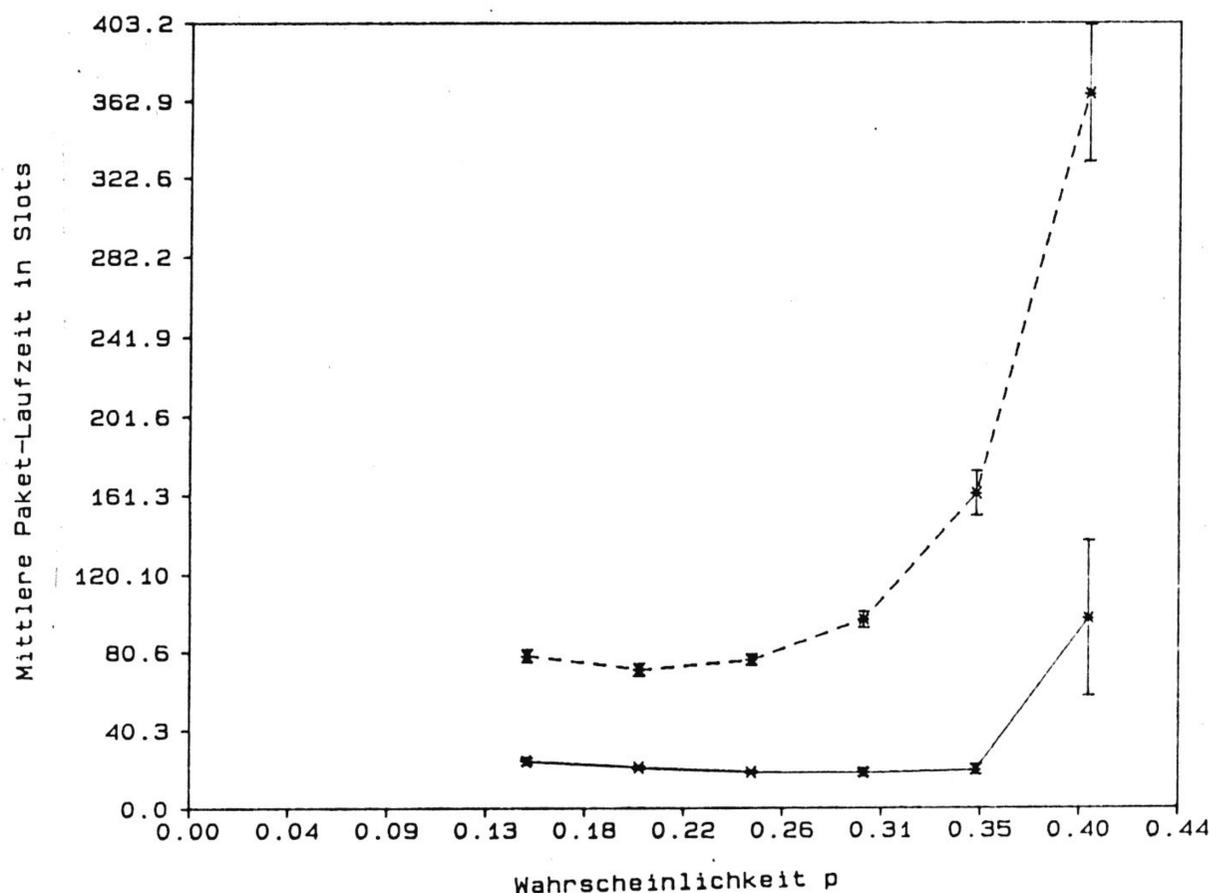


Bild 5.1: Mittlere Ende-zu-Ende Laufzeit für BC-Pakete bei Flooding (--) und gezieltem Routen (—).

Parameter: Erzeugungswahrscheinlichkeit ( $q$ ) = 0.0067,

Übertragungswahrscheinlichkeit ( $p$ ) = 0.15 - 0.4

Man sieht, daß besonders bei hohen Übertragungswahrscheinlichkeiten  $p$  die Flooding-Methode deutlich ungünstigere Ende-zu-Ende Laufzeiten liefert als die Kontrollstreifen-Methode. Dies liegt daran, daß beim Flooding deutlich mehr Pakete als beim gezielten Routen entstehen, so daß eine entsprechend größere Zahl von Kollisionen resultiert, und die Pakete deutlich häufiger wiederholt werden müssen. Zur Bewertung des vorgeschlagenen Quittierungsverfahrens wurde eine Station aus der Netzmitte als Quelle ausgewählt und die Laufzeit ihrer BC-Pakete ermittelt. Dabei wurde zwischen Zeiten unterschieden, die ein BC-Paket zu Stationen benötigt, die genau einen, zwei bzw. drei hops entfernt liegen. Daneben wurde Punkt-zu-Punkt Verkehr gemäß den Parametern  $q$  und  $p$  abgewickelt.

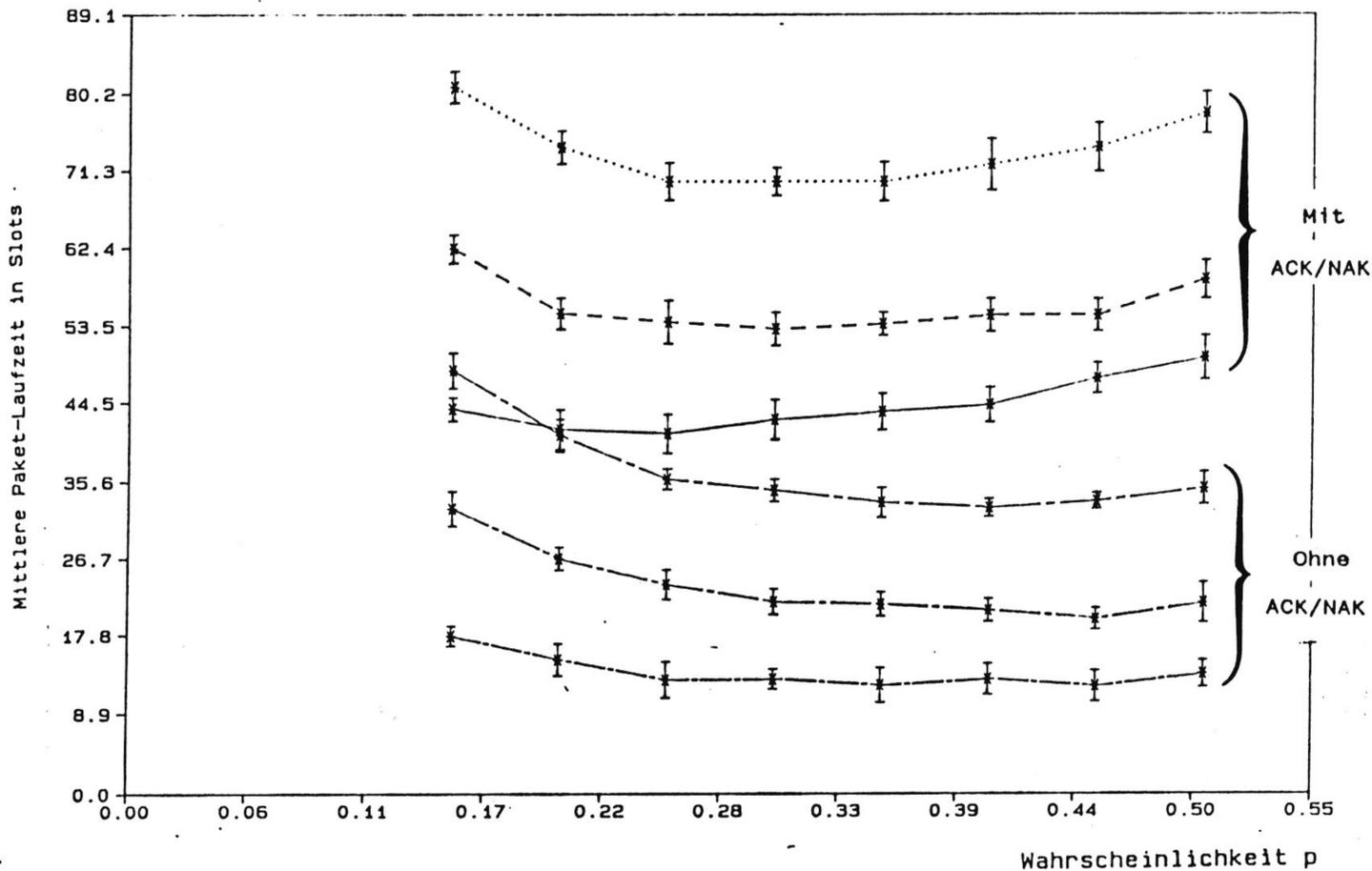


Bild 5.2: Mittlere Laufzeiten von BC-Paketen für 1-hop (---), 2-hop (--) und 3-hop (...) Parameter:  $q = 0.005$ ,  $p = 0.15 - 0.5$

Bild 5.2 zeigt die ermittelten Werte über der Übertragungswahrscheinlichkeit  $p$ . Für  $p < 0.15$  ergibt sich, daß trotz des geringen Verkehrsaufkommens ( $q = 0.005$  entspricht einer Erzeugungswahrscheinlichkeit von 1 Paket/ 200 Slot) einzelne Stationen im Netz aufgrund der kleinen Übertragungswahrscheinlichkeit  $p$  verstopft werden und den Relaisverkehr nicht mehr bewältigen können. Das System wird dabei instabil. Für  $p > 0.5$  werden die Warteschlangenlängen einzelner Relais aufgrund vieler Kollisionen ebenfalls unbegrenzt groß und das System wird instabil. Kollisionen werden um so wahrscheinlicher, je größer  $p$  ist. Im gezeigten Bereich für  $p$  von 0.15-0.4 nehmen die Paketlaufzeiten mit zunehmendem  $p$  ab. Der Grund dafür ist, daß mit wachsendem  $p$  jedes Paket weniger lange auf Übertragung warten muß. Für  $p > 0.4$  nehmen die Paketlaufzeiten etwas zu, was an der zunehmenden Zahl von Kollisionen liegt, wobei Stationen ihr Paket erneut übertragen müssen. Es gibt deshalb, abhängig vom lokalen Verkehrsaufkommen und der Vermaschung einer Station im Netz, für jede eine lokale optimale Übertragungswahrscheinlichkeit. Wir haben hier nur den Fall betrachtet, daß  $p$  für alle Stationen gleich groß ist.

Zum besseren Verständnis sei noch angemerkt, daß ein großer Wert für  $p$  (z.B.  $p = 0.4$ ) nur wirksam wird, wenn die entsprechende Station ein Paket vorliegen hat. Neben der mittleren Laufzeit von BC-Paketen über 1-, 2- und 3-hop bis zum Vorliegen aller Quittungen sind die Paketlaufzeiten ohne Berücksichtigung der Quittungen (---) dargestellt.

## 5.2 ZUM EINFLUSS DER MOBILITÄT AUF DAS ROUTEN VON PAKETEN

Jetzt wird dargestellt, welchen Einfluß die Mobilität von Stationen auf Schwankungen ihrer funktechnischen Vernetzung hat. Ortsveränderungen von Stationen führen dazu,

daß sie ihren bisherigen Funkkontakt zu ihren Nachbarn teilweise oder völlig verlieren, oder evtl. auf neuen Wegen Kontakt bekommen. Es wird angestrebt sicherzustellen, daß trotz Mobilität ein möglichst umwegfreier und zuverlässiger Funkverkehr über multi-hop Routen möglich ist. Voraussetzung dafür sind aktuelle Kenntnisse über Veränderungen der Netztopologie und daraus resultierende alternativen Routen.

Die bisherigen Ergebnisse gelten für Netze ohne Mobilität der Stationen. Das Modell nach Abschnitt 2 wird jetzt erweitert, um mittels Simulation zu untersuchen, wie sich Mobilität auf Topologieänderungen auswirkt. Jede Station erhält nun einen Bewegungsvektor, der sich aus einer Geschwindigkeit und einer Richtung zusammensetzt. Die Geschwindigkeit wurde konstant mit 30 km/h vorgegeben und ein Richtungswinkel pro Station zwischen  $-179$  und  $180$  Grad ausgewürfelt. Damit sich die Zahl der Stationen im Netz nicht ändert, wird erzwungen, daß sich alle Stationen nur innerhalb einer gegebenen Kreisfläche mit Radius  $r$  bewegen. Immer wenn sie von innen an den Rand des Kreises stoßen, werden sie an der Kreistangente des Berührungspunktes reflektiert und verbleiben so innerhalb des Kreises (Billard-Effekt). Ziel dieser Untersuchung ist, Erkenntnisse über die Häufigkeit von Topologieänderungen und den Aufwand für die Aktualisierung stationslokaler Routingtabellen zu gewinnen.

Die Geschwindigkeit der Stationen wird im folgenden nicht in km/h, sondern in m/Slot angegeben, um einen Zusammenhang zwischen Mobilität und Slotdauer herzustellen und dabei allgemeingültigere Aussagen zu erzielen. Sie ergibt sich nach Division der Fahrzeuggeschwindigkeit (m/s) durch die Anzahl der Zeitschlitze pro Sekunde (Slot/s). 50km/h entsprechen bei 1 kbit/Paket und 16 kbit/s Übertragungsrate 0.87 m/Slot.

Jede Topologieänderung, also der Verbindungsgewinn oder -verlust zwischen zwei Nachbarstationen ist ein Ereignis, das Wirkungen auf existierende Routen im Netz hat. Die beiden davon betroffenen Stationen heißen unmittelbar betroffene Stationen. Als mittelbar betroffen werden solche Stationen bezeichnet, bei denen das Ereignis zwar außerhalb ihres S-/E-Radius auftritt, die aber trotzdem ihre Routingtabelle ändern müssen. Mittelbar betroffene Stationen sollten schneller benachrichtigt werden, als indirekt betroffenen Stationen, die zwar entweder über die verlorene Verbindung geroutet haben oder über die neue Verbindung routen werden, aber deren eigene Routingtabelle gleich geblieben ist. Indirekt betroffene Stationen routen also über unmittelbar oder mittelbar betroffene Stationen. Daneben gibt es auch Stationen, die aufgrund ihrer Lage im Netz überhaupt nicht betroffen sind. Jedes Ereignis wird einer Klasse zugeteilt. Klasse  $i$  ( $i=0,1,\dots,10$ ) bedeutet, daß  $i$  Stationen mittelbar betroffen sind. In Klasse 0 fallen alle Ereignisse, bei denen nur unmittelbar betroffene Stationen auftreten. In Klasse 11 werden alle Ereignisse gezählt, bei denen 11 oder mehr Stationen mittelbar betroffen sind. Klasse 12 zählt die Ereignisse, bei denen Teilnetze entstehen bzw. integriert werden.

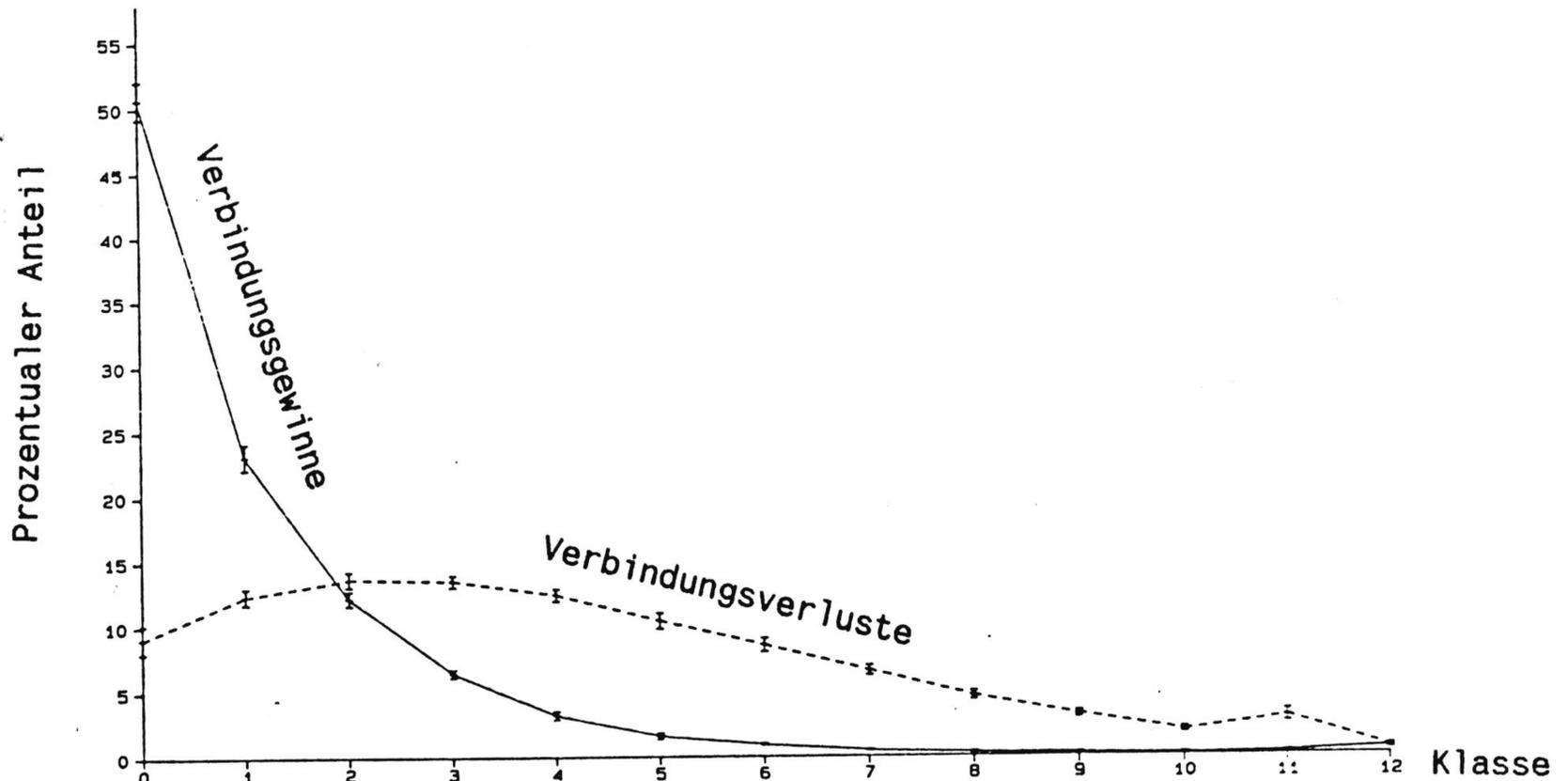


Bild 5.3: Prozentuale Verteilung der Ereignisse auf die Klassen.  
*Hauptverteilung für die Zahl mittelbar betroff. Stationen*

Bild 5.3 zeigt die Häufigkeitsverteilung von Verbindungsgewinnen bzw. -verlusten auf die Klassen, wobei zusammengehörige Punkte verbunden sind. Die Folge von Klassenwerten bei Verbindungsgewinn ist monoton fallend. Beachtenswert ist, daß rund 50% aller Verbindungsgewinne keine mittelbar betroffene Stationen betreffen. Man sieht, daß in nur 8% der betrachteten Fälle mehr als drei mittelbar betroffene Stationen existieren, bzw. daß in rund 92% aller Fälle höchstens drei Stationen mittelbar betroffen sind. Die Kurve für Verbindungsverluste beginnt bei 9% (für Klasse 0), findet ihr Maximum in den Klassen 2 und 3 bei 14%, um dann langsam zu fallen. So sind lediglich in ca. 50% aller Fälle höchstens drei Stationen mittelbar betroffen, was signifikant weniger als bei den Verbindungsgewinnen ist. Man erkennt also, daß das ein Verbindungsverlust in der Regel mehr Stationen mittelbar betrifft, als ein Verbindungsgewinn. Das liegt daran, daß bei Verlust einer Verbindung mehr Stationen ihre Routingtabelle aktualisieren müssen. Bei Verbindungsgewinnen, bei denen sich die Zahl der hops für die indirekt betroffenen Stationen nicht ändert, ist eine Aktualisierung der Routingtabelle nicht erforderlich.

Neben der prozentualen Verteilung der Ereignisse auf die entsprechenden Klassen ist noch die Entfernung (in hops) der mittelbar betroffenen von den unmittelbar betroffenen Stationen ermittelt worden.

Bild 5.4 gilt für Verbindungsverluste und zeigt, daß die mittelbar betroffenen Stationen zu 80% -95% (ausgezogene Kurve) nur einen hop (1. Schale) entfernt liegen. Die Kurve für die zwei-hop entfernten Stationen (2. Schale) zeigt, daß mit steigender Zahl mittelbar betroffener Stationen der Prozentsatz betroffener Stationen zunimmt. Allerdings ist die absolute Häufigkeit für viele mittelbar betroffene Stationen sehr gering, vgl. Bild 5.3. Die Kurve für die 3. Schale zeigt, daß hier kaum noch mittelbar betroffene Stationen auftreten. Beim Verbindungsgewinn herrschen ähnliche Verhältnisse.

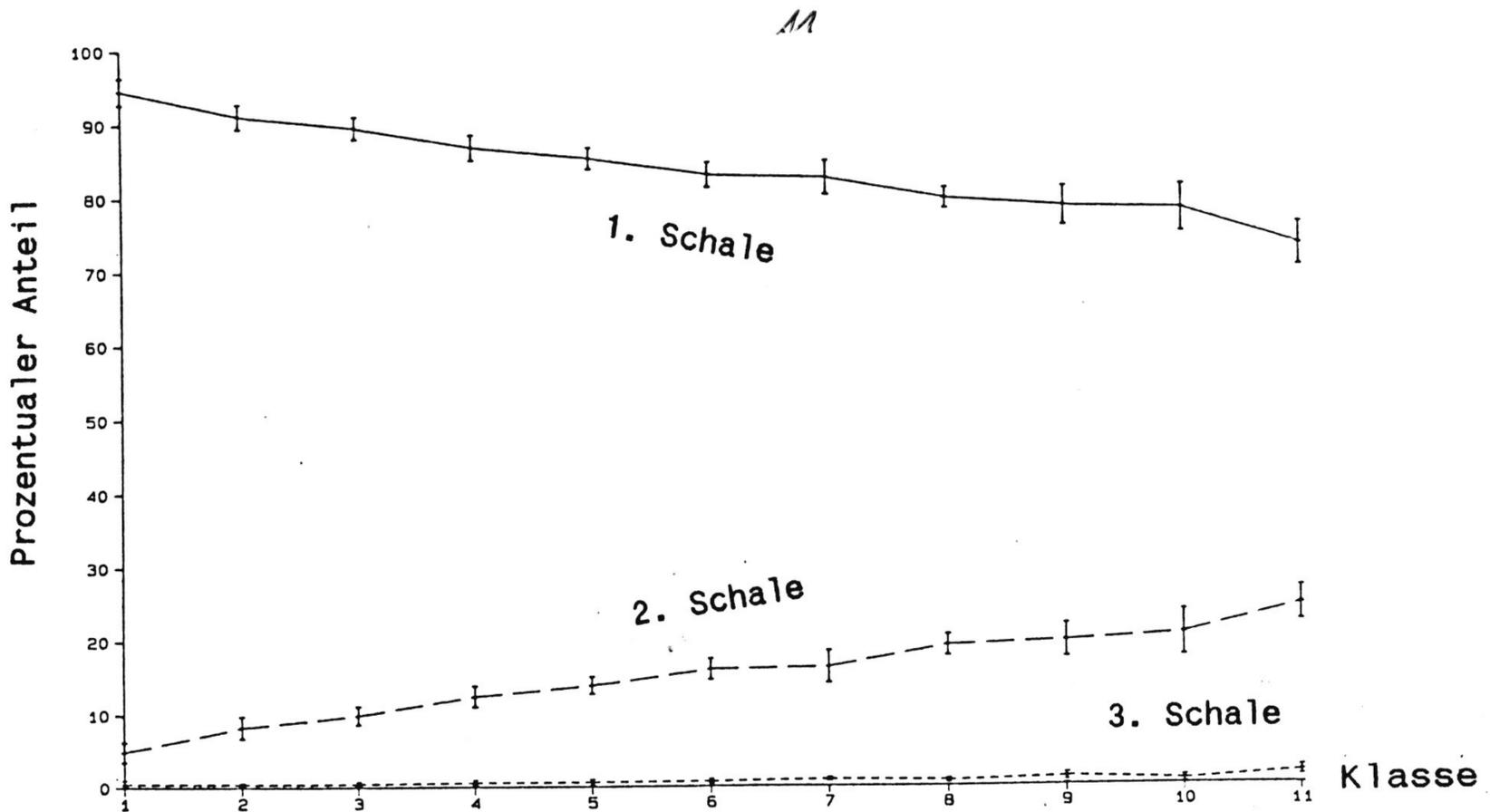


Bild 5.4: Verteilung der Entfernung in hops der mittelbar betroffen von den unmittelbar betroffenen Stationen.

Zusammenfassend kann man sagen, daß bei den weitaus meisten Topologieänderungen nur wenige Stationen mittelbar betroffen sind und zugleich in der 1. oder 2. Schale um die unmittelbar betroffenen Stationen liegen.

Im folgenden wird ein asynchrones Aktualisierungsverfahren stationslokaler Routingtabellen beschrieben, das völlig dezentral arbeitet, ohne zusätzlichen Verkehr auskommt und einen erstaunlich hohen Anteil korrekt gerouteter Paketen garantiert. Dabei trägt jede Quellstation in jedes Paket eine "Nachbarschaftskarte" ein, die ihre aktuellen Nachbarstationen angibt. Alle Stationen, die dieses Paket auf seiner Route als Relais weitergeben oder von der Quellstation bzw. einem Relais empfangen, kennen somit die aktuelle Nachbarschaft der Quellstation. Dadurch ergibt sich, daß Stationen, die bedingt durch ihre Lage im Netz relativ viel Relaisverkehr abwickeln über besonders aktuelle Routinginformation verfügen.

Topologieänderungen werden von den unmittelbar betroffenen Stationen durch folgende Mechanismen festgestellt: Verbindungsgewinne erkennen sie durch Empfang neuer Nachbarstationen. Verbindungsverlust werden angenommen, wenn eine Nachbarstation während einer festgelegten Zeitdauer nicht gehört oder wiederholt keine Quittung erhalten hat. Auf explizite "Hallo"-Pakete zur Überprüfung einer schweigenden Nachbarstation wird verzichtet.

Um zunächst eine Vorstellung von der geeigneten Zeitdauer zu bekommen, nach deren Ablauf ein Verbindungsverlust angenommen wird, wurde die Häufigkeit der Zeitabstände ermittelt, nach denen eine Station eine andere hört. Dazu wurden 5 Zeitfenster in Slots (1-30, 31-60, 61-90, 91-120, >120) gebildet und die gemessenen Zeitspannen für  $q=0.005$  und  $q=0.01$  eingetragen, vgl. Bild 5.5.

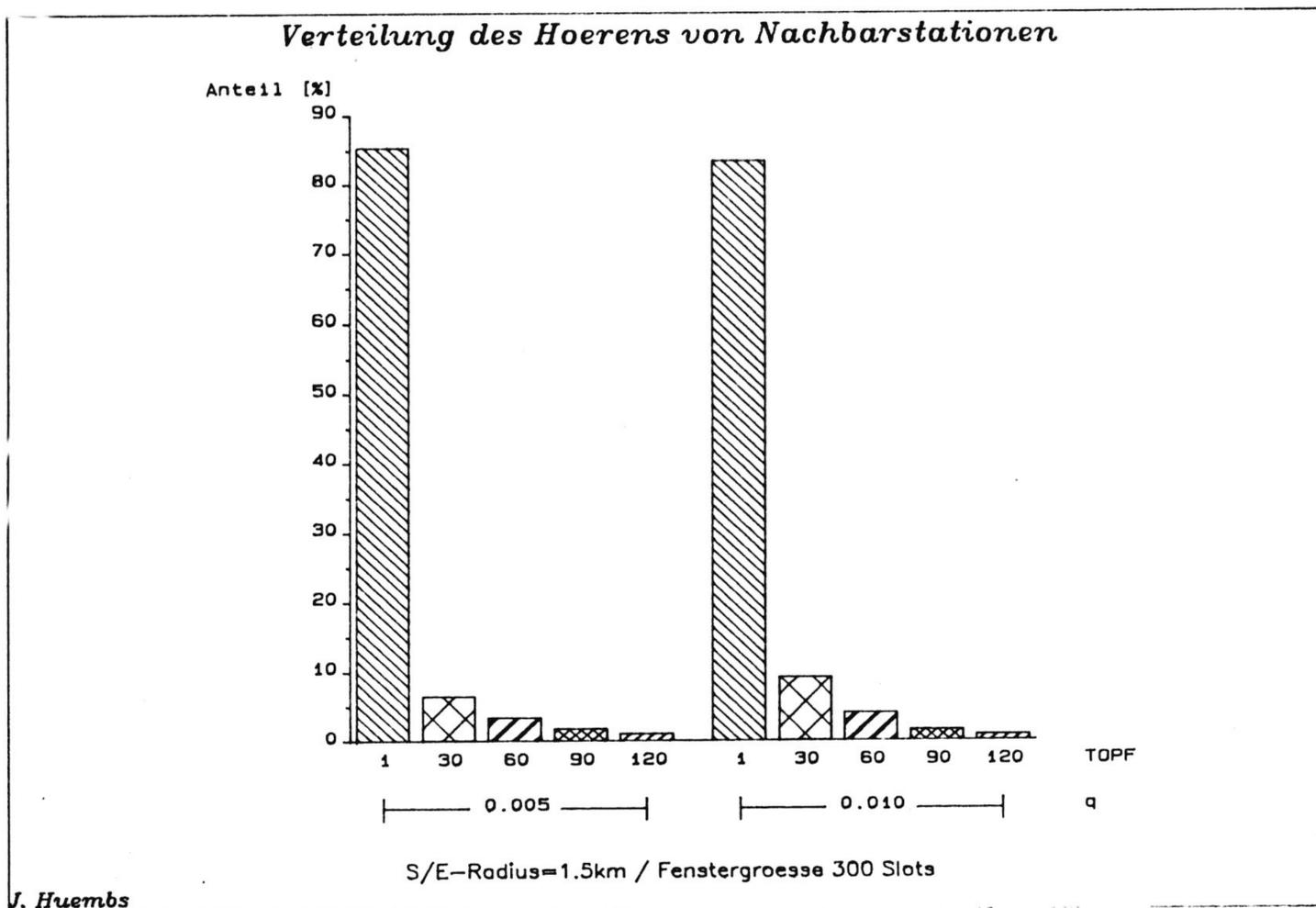


Bild 5.5: Häufigkeit der Dauer zwischen Kontakten benachbarter Stationen

Für beide Erzeugungswahrscheinlichkeiten ( $q$ ) haben Stationen mit 85% Wahrscheinlichkeit Kontakt nach spätestens 30 Slots. Größere Zeitspannen zwischen Funkkontakten sind relativ unwahrscheinlich, so daß in das 5. Zeitfenster (>120 Slots) kaum noch Werte fallen. Weiter wurde ermittelt, wie oft in Abhängigkeit von der Größe des Zeitfenster fälschlich zu einer nicht mehr vorhandenen Nachbarstation übertragen wird, vgl. Bild 5.6. Als Parameter wurden neben der Größe des Zeitfenster auch die Stationsgeschwindigkeit berücksichtigt.

Bei kleiner Fenstergröße werden entsprechend bald Verbindungsverluste angenommen und Pakete selten zu nicht erreichbaren ehemaligen Nachbarstationen übertragen. Bei höheren Geschwindigkeiten treten mehr topologische Änderungen pro Zeiteinheit auf: daher steigt die Zahl falsch gerouteter Pakete. Die Werte steigen mit größerer Fenstergröße, da dort Verbindungsverluste entsprechend später erkannt werden. So steigen bei 90km/h die erzielten Werte von unter 1.5% (Fenstergröße 100 Slots) auf knapp 10% (Fenstergröße 600 Slots). Bewegen sich die Stationen mit lediglich 30km/h, erhöhen sich die Werte natürlich nicht so schnell, so daß bei einer kleinen Fenstergröße fast alle Verbindungsverluste rechtzeitig erkannt werden.

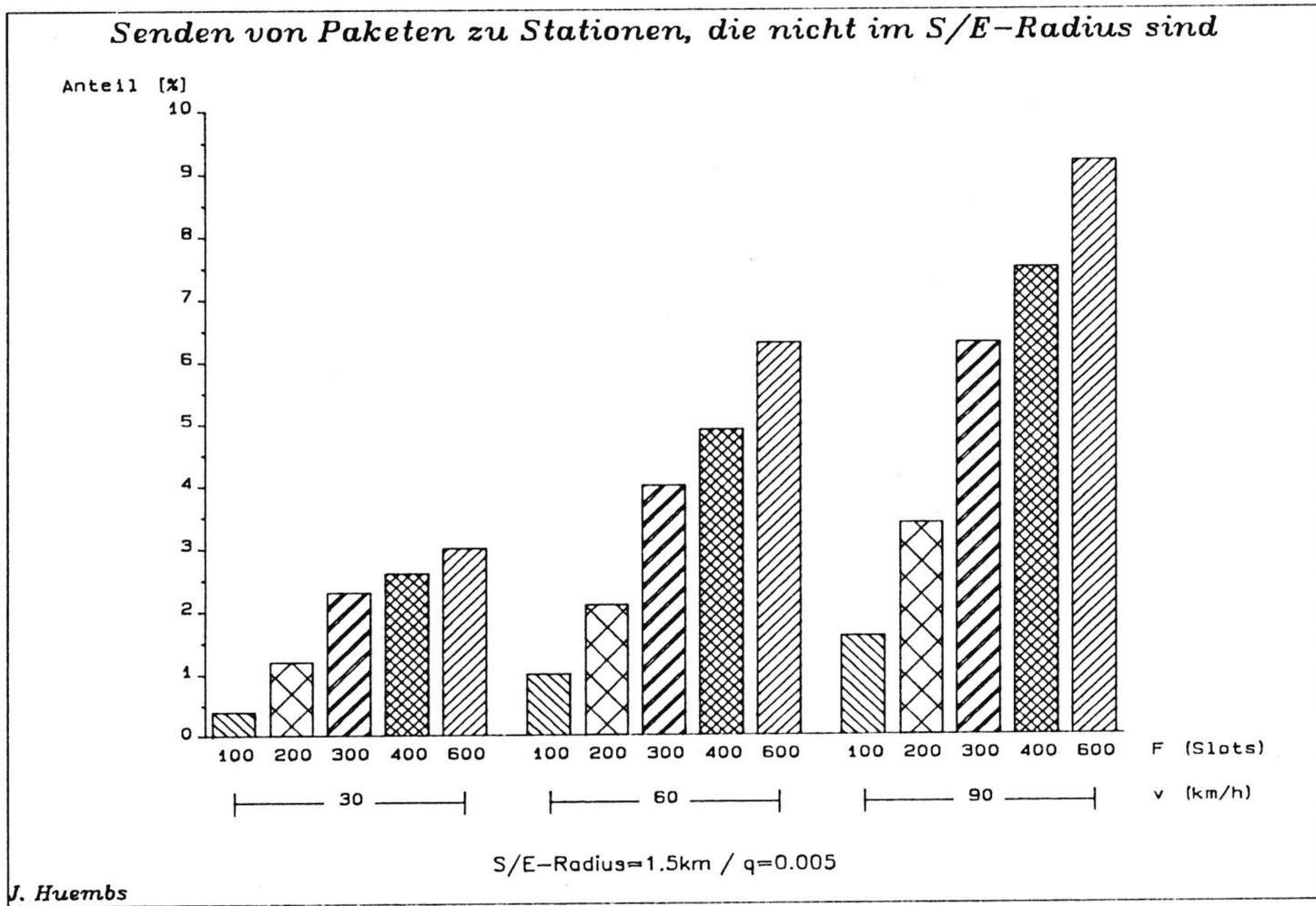


Bild 5.6: Häufigkeit fälschlicher Übertragungen zu ehemaligen Nachbarstationen

Als weiteres Maß für die Qualität des asynchronen Aktualisierungsverfahren wird nun die mittlere Anzahl optimal gerouteter Pakete als Funktion der besprochenen Fenstergröße betrachtet, vgl. Bild 5.7. Je nach Geschwindigkeit und Zeitfenster ergeben sich 80-97% optimal gerouteter Pakete. Es wurde zusätzlich ermittelt, daß falsch geroutete Pakete lediglich einen Umweg von 1.4 hops machen.

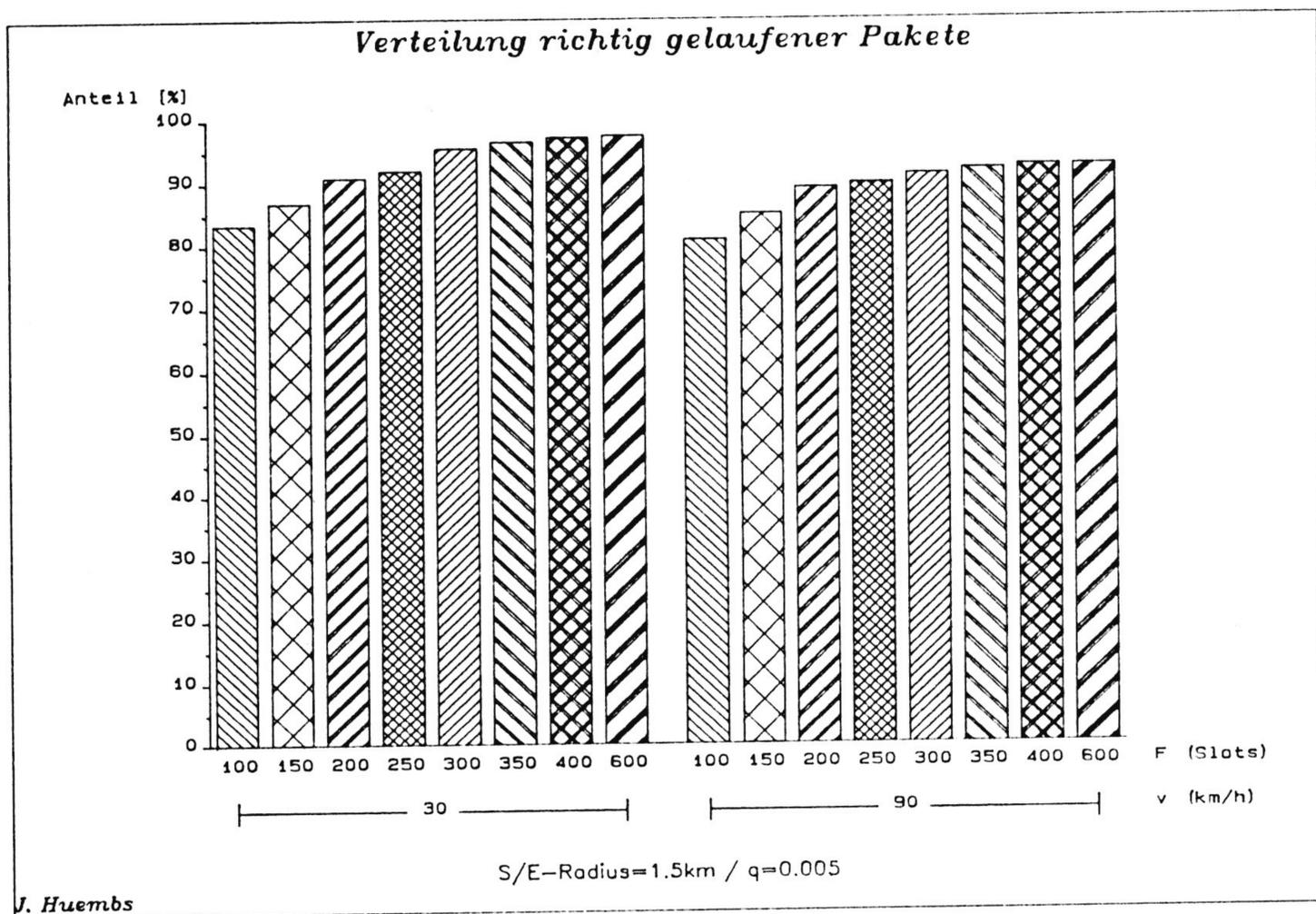


Bild 5.7: Prozentsatz aller Pakete, welche die optimale Route durchlaufen.

Bei Vergrößerung des Zeitfensters fällt auf, daß der prozentuale Anteil richtig gewählter Routen stets zunimmt. Bei kleinen Fenstergrößen werden zu früh falsche Verbindungsverluste angenommen und verbreitet, so daß die (Relais-) Stationen in über 15% aller Fälle die optimalen Wege nicht mehr erkennen können.

Die bisherigen Ergebnisse erlauben den Schluß, daß die vorgestellte Methode zur asynchronen Aktualisierung stationslokaler Routingdaten geeignet ist, ein mobiles Netz überlebensfähig zu halten und zugleich sehr befriedigende Leistungskenngrößen liefert. Es hat sich gezeigt, daß die Größe des Zeitfensters ein entscheidender Parameter ist: Sie sollte nicht kleiner als 200 Slots gewählt werden, da sonst zu häufig unnötig lange Routen gewählt werden. Sie sollte nicht größer als 300 Slots sein, da sonst der Anteil Übertragungen zu nicht mehr vorhandenen Nachbarn zu groß wird (vgl. Bild 5.6) und auch keine wesentliche Steigerung im Anteil optimal gewählter Routen erzielt würde.

## 6. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Es wird ein Verfahren für die sichere Verteilung (Broadcast) von Paketen in einem multi-hop Paketfunknetz mit homogenem Punkt-zu-Punkt Verkehr vorgestellt, das implizite Quittungen (ACK/NAK) als Teil jedes Paket vorsieht. Jede Station quittiert dabei eine feste Zahl vergangener Slots und gestattet so anderen Stationen durch Mithören schnell und zuverlässig, trotz häufig gestörter Empfangsumgebung, den (Miß-)Erfolg einer eigenen Übertragung zu erkennen. Zugehörige Simulationsergebnisse zeigen, mit welcher mittleren Laufzeit der Pakete gerechnet werden muß, bis Stationen in 1-, 2- und 3-hop Entfernung sicher erreicht werden. Untersuchungen mobiler Stationen durch Simulation ergeben Einsichten, wieviele Stationen von jeder Topologieänderung betroffen sind, und wie weit diese Stationen von der Stelle der Änderung entfernt liegen. Weiter wurde ein neues asynchrones Aktualisierungsverfahren eingeführt und bewertet. Es zeichnet sich durch sehr geringen Aufwand aus, bei dem keine zusätzlichen Pakete entstehen. Seine Leistungsfähigkeit wurde anhand des hohen prozentualen Anteil optimal gerouteter Pakete bestätigt.

Das System ist aufgrund der vielen wesentlichen Parameter sehr komplex und nur schwer durchschaubar. Als wesentliche Resultate sollten nicht die tatsächlich ermittelten Zahlenwerte interessierender Verkehrsgrößen, sondern die vorgestellten Management-Mechanismen angesehen werden, für die sie ermittelt wurden. Diese Mechanismen können vermutlich mit ähnlichem Erfolg auch auf verwandte Systeme übertragen werden.

Wir planen Untersuchungen zur Optimierung der Parameter für die implizite und explizite Quittierung, zur dynamischer Steuerung der stationslokalen Übertragungswahrscheinlichkeit  $p$  und zur Verbesserung der asynchronen Aktualisierung. Dabei wird angestrebt, das Zeitverhalten zu verbessern und die Leistungsgrenzen der Protokolle festzustellen.

Für ihre Mitarbeit im Rahmen von Diplomarbeiten danken wir herzlich den Herren J. Hümb's und N. Papadopulos.

#### LITERATUR

/BRAGO.87/ V. Brass, C. Gotthardt:

On Throughput and Delay-time in S-ALOHA Multi-hop Systems; Informatik Fachberichte 154, (Ed. U. Herzog) Springer-Verlag Berlin/Heidelberg, pp 236-249, Sep. 1987.

/ELSAN.82/ M.Y. Elsanadidi, W.M. Chu:

Study of Acknowledgment Schemes in a Star Multiaccess Network; IEEE Trans. on Com., Vol. COM-30, pp 1657-1664, July 1982

/ELSAN.83/ M.Y. Elsanadidi, W.M. Chu:

Simulation studies of the behaviour of multi-hop broadcast networks; Computer Science Department, UCLA 90024 (erschienen in: ACM, Communications Architectures and Protocols, SIGCOM 1983 Symposium, pp 170-177.

/TOBAG.78/ F.A. Tobagi, L. Kleinrock:

The effect of acknowledgement traffic on the capacity of packet switched radio channels; IEEE Trans. on Com., Vol. COM-26, pp 815-826, June 1978

/WALKE.87/ B. Walke:

Über Organisation und Leistungskenngrößen eines dezentral organisierten Funksystems. Kommunikation in verteilten Systemen 1987 Informatik Fachberichte 130, Springer Verlag, S. 578-591.