

# Design and Quantitative Analysis of Protocols for Epidemic Information Dissemination in Mobile Ad Hoc Networks

Oliver P. Waldhorst

Universität Leipzig – Institut für Informatik  
Augustusplatz 10-11, 04109 Leipzig  
waldhorst@informatik.uni-leipzig.de

**Abstract:** Die vorgestellte Arbeit [Wal05] beschäftigt sich mit dem Gebiet der Protokolle für die epidemische Verbreitung von Informationen in mobilen Ad-hoc Netzen (MANET). Solche Protokolle nutzen die in diesen Netzen vorhandene Mobilität und übertragen Informationen, wenn sich zwei Geräte „begegnen“ (d.h. sich in Funkreichweite befinden), ähnlich der Übertragung einer ansteckenden Krankheit zwischen Individuen. Die Arbeit setzt sich aus drei Forschungsbeiträgen in diesem Gebiet zusammen. (1) Ein universell einsetzbarer verteilter Suchdienst für mobile Anwendungen in MANET wird vorgestellt, der auf epidemischer Verbreitung von Einträgen eines verteilten Index beruht. (2) Verschiedene Mechanismen zur Verbreitung von Präsenzinformationen in einem MANET werden untersucht und basierend auf den Ergebnissen dieser Untersuchungen ein Präsenzdienst für ein mobiles Instant Messaging System vorgeschlagen. (3) Ein neuartiger stochastischer Modellierungsansatz zur Analyse und Optimierung von Systemen zur epidemischen Informationsverbreitung wird vorgeschlagen und auf ein existierendes System angewendet.

## 1 Motivation

In den letzten Jahren konnte durch den technischen Fortschritt im Bereich der Mikroelektronik und der damit einhergehenden Miniaturisierung ein starker Anstieg der Popularität von mobilen Computern und computer-ähnlichen Geräten beobachtet werden. Preisgünstige Notebooks, leistungsstarke Personal Digital Assistants (PDAs) und Smart Phones erlauben die mobile Verarbeitung komplexer Informationen. Der Fortschritt bei den drahtlosen Funkzugangstechnologien, wie z.B. UMTS und WiFi-Hotspots, ermöglicht einen Zugang zum Internet von praktisch jedem Ort. Allerdings führt der Trend in der Entwicklung mobiler Endgeräte dazu, dass ein großer Teil aller digital verfügbaren Informationen nicht auf öffentlichen World Wide Web Servern sondern auf persönlichen (mobilen) Rechnern gespeichert ist.

Moderne mobile Endgeräte sind in der Regel mit Technologien für die drahtlose Kommunikation über kurze bis mittlere Entfernungen ausgestattet, wie z.B. Bluetooth [Bis01] oder IEEE 802.11 [IEE97]. Diese Technologien ermöglichen die Etablierung von spontanen, selbstorganisierenden Kommunikationsstrukturen, so genannten *mobilen Ad-hoc Netzen* (MANET, [MAN]). In einem MANET fungieren alle Geräte (meist bezeichnet als

*Knoten*) als Router und leiten Pakete für andere Knoten weiter. So werden Routen über mehrere drahtlose Schritte (engl. *Hops*) gebildet, die zwei Geräten die Kommunikation ermöglichen, auch wenn sie sich nicht in Funkreichweite befinden. Die Standardisierung einer ad-hoc gebildeten Internet-ähnlichen Routing Infrastruktur in MANET ist Gegenstand vieler Bemühungen [MAN]. Eine solche Infrastruktur ermöglicht die Verwendung des MANET für eine Vielzahl von innovativen mobilen Anwendungen, z.B. Tausch von Dateien, Musik und Videos, Instant Messaging, Sprach- und Videokommunikation. Diese Anwendungen benötigen jedoch Mechanismen zum Informationsaustausch, die auf das MANET zugeschnitten sind.

In einem MANET existiert in der Regel kein Endgerät mit überdurchschnittlicher Leistung, die genutzt werden könnte, um ähnlich einem Server Dienste für andere Geräte zur Verfügung zu stellen. Aus diesem Grund können klassische verteilte Internet-Anwendungen, die zumeist auf dem Client-Server Ansatz beruhen, nicht ohne weiteres in MANET betrieben werden. In den letzten Jahren hat der *Peer-to-Peer (P2P)* Ansatz zur Realisierung verteilter Internet-Anwendungen zunehmend an Bedeutung gewonnen. P2P-Systeme bestehen aus vielen Endgeräten (*Peers*) mit sehr ähnlichen Fähigkeiten, von denen jedes Endgerät sowohl als Client als auch als Server agiert. Typische P2P-Systeme sind inhärent skalierbar, da keine zentralen Einheiten existieren, die zu einem Engpass werden könnten. Außerdem sind P2P-Systeme ähnlich wie MANET selbstorganisierend, da keine zentralen Instanzen zur Steuerung oder Kontrolle existieren. Diese Gemeinsamkeiten legen es nahe, den P2P Ansatz zur Entwicklung von MANET Anwendungen zu verwenden.

Die meisten für das Internet entworfenen P2P-Systeme verwenden Verbindungen auf Anwendungsschicht zur Übertragung von Daten oder Kontrollnachrichten [LCP<sup>+</sup>05]. Diese Verbindungen bilden logische Netze und werden als *Overlay Network* oder *Overlay* bezeichnet. Da im Internet in der Regel genügend Bandbreite zwischen Peers an beliebigen Orten verfügbar ist, betrachten die Verfahren zur Konstruktion von P2P Overlays nur selten die Topologie des darunterliegenden physikalischen Netzes, wie z.B. in [RIF02] gezeigt. Allerdings verschwendet eine mangelnde Übereinstimmung von Overlay und physikalischem Netz in einem P2P System für MANET die ohnehin knappe Bandbreite des geteilten Funkmediums. Außerdem führt die Mobilität der Knoten dazu, dass die physikalischen Routen, die von einer Overlay-Verbindung genutzt werden, sich häufig ändern. Im schlimmsten Fall verursachen Verbindungsabbrüche die Trennung einzelner Peers vom Overlay Netz. In der Arbeit [Wal05] wurde ein Simulationsexperiment mit Hilfe des Netzsimulators *ns-2* [FV] durchgeführt, bei dem sich 40 MANET-Knoten im Fußgänger-Tempo auf einer Fläche von einem Quadratkilometer bewegen und Dateien mit Hilfe des für das Internet entwickelten P2P Systems *Gnutella* [For] austauschen. Wie Abbildung 1 zeigt, entfällt der Hauptteil des dadurch verursachten Datenverkehrs auf Kontrollnachrichten des MANET Routing-Protokolls und des Mechanismus zur Overlay-Konstruktion. Nur 7% des Verkehrs wurde für die Suche nach Dateien sowie für deren Übertragung verwendet.

Die schlechte Übereinstimmung von logischer und physikalischer Topologie kann mit Hilfe des *schichtenübergreifenden Informationsaustauschs* zwischen Protokollen auf verschiedenen Schichten des TCP/IP Protokollstapels verbessert werden. Zum Beispiel kann das auf der Internet-Schicht angesiedelte MANET Routing-Protokoll Informationen über

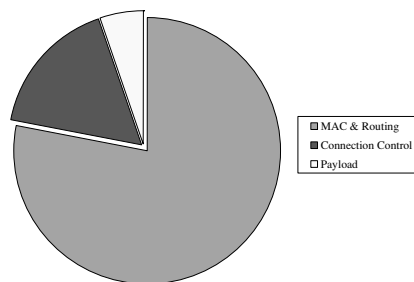


Abbildung 1: Zusammensetzung des Datenverkehrs für ein Gnutella System in einem MANET

den Zustand von Routen zu anderen Peers an die P2P Anwendung auf der Anwendungsschicht weitergeben, die dann das Overlay entsprechend anpassen kann. Derartige Systeme funktionieren am besten in MANET mit einer hohen Dichte von mobilen Endgeräten und geringer Mobilität. Dagegen sind in Netzen mit geringer Gerätedichte und hoher Mobilität Verbindungsunterbrechungen oder gar der Zerfall des Netzes in mehrere Teilnetze häufig zu beobachten, so dass an die physikalische Netztopologie angepasste Overlay-Verbindungen meist nicht realisierbar sind.

Eine entscheidende Beobachtung ist in diesem Zusammenhang, dass die Mobilität in einem MANET nicht zwangsweise die Kommunikation erschwert, sondern im Gegenteil zum effizienten Informationsaustausch ausgenutzt werden kann. So zeigten Grossglauser und Tse, dass Mobilität die Kapazität für eine verzögerungstolerante Anwendung erhöhen kann, wenn mobile Knoten als Kuriere fungieren und Nachrichten von der Quelle zum Ziel tragen [GT02]. Dieses Konzept kann verallgemeinert werden, indem man den Informationsaustausch zwischen zwei Knoten immer dann durchführt, wenn sich diese begegnen. Algorithmen, die auf diesem Konzept beruhen, verbreiten Informationen ähnlich der Ausbreitung einer ansteckenden Krankheit und werden deshalb als *epidemische Algorithmen* bezeichnet.

Viele Systeme realisieren Informationsverbreitung basierend auf epidemischen Algorithmen, oder kurz *epidemische Informationsverbreitung*. Ein erstes Beispiel ist das *Seven Degrees of Separation (7DS)* System, das mobilen Nutzern das Surfen im WWW ohne Internet-Anbindung ermöglicht, indem WWW-Dokumente zwischen mobilen Endgeräten ausgetauscht werden [PS01]. Small und Haas entwickelten das *Shared Wireless Infostation Model (SWIM)* zum Sammeln von biologischen Informationen in einem hybriden Netz aus mobilen Knoten (in diesem Fall Walen) und festen Basisstationen (montiert auf Bojen) mittels eines epidemischen Ansatzes [SH03]. Kürzlich präsentierten Luo, Eugster und Hubaux das *Probabilistic Lightweight Group Communication System for Ad Hoc Networks (PILOT)*, eine Protokollfamilie für den zuverlässigen Datenaustausch basierend auf einem epidemischen Basisprotokoll [LEH04].

Leider weist jedes der bisher entwickelten System zur epidemischen Informationsverbreitung mindestens einen der folgenden Nachteile auf. Erstens wurden alle Systeme außer Pilot für eine spezielle Anwendungen entwickelt und stellen deshalb keine generischen Me-

chanismen für den Datenaustausch in MANET bereit. Zweitens berücksichtigt keines der Systeme explizit die begrenzte Verfügbarkeit von Speicherplatz auf mobilen Endgeräten, da alle Systeme Puffer mit unbeschränkter Größe für die Datenverbreitung verwenden. Drittens verfügt keines der Systeme über Mechanismen, die die Konsistenz der verbreiteten Informationen sicherstellen. In der vorgestellten Arbeit [Wal05] wird ein universell einsetzbares System zur epidemischen Datenverbreitung vorgestellt, das Puffer mit beschränkter Größe nutzt und über implizite und explizite Mechanismen zur Gewährleistung der Datenkonsistenz verfügt (siehe Abschnitt 2). Des Weiteren wird ein System vorgestellt, das Informationen verbreitet, die ständigen Veränderungen unterliegen. Dabei wird die erzielte Datenkonsistenz explizit evaluiert (siehe Abschnitt 3).

Der Entwurf von Systemen zur epidemischen Informationsverbreitung erfordert natürlich auch Methodik und Werkzeuge zur quantitativen Bewertung und Optimierung verschiedener Design-Alternativen. Die meisten Systemvorschläge führen solche Bewertungen mit Hilfe von Simulation durch, z.B. [PS01]. Andere Vorschläge benutzen ausschließlich analytische Leistungsmodelle oder ergänzen Simulationsergebnisse durch solche Modelle, z.B. [PS01], [SH03], [LEH04]. Dabei haben die analytischen Ansätze zur Leistungsbewertung in der Regel drei Nachteile: Erstens betrachten sie lediglich die Verbreitung eines einzelnen Datenobjekts isoliert, weshalb kein Verfahren den Einfluss von begrenzten Ressourcen, wie z.B. Speicherplatz, berücksichtigen kann. Zweitens betrachten alle analytischen Leistungsmodelle das Anlauf- oder Einschwingverhalten eines Systems, wie z.B. die Anzahl der mobilen Knoten, die ein Datenobjekt in einer endlichen Zeitspanne erhalten hat. Somit können keine Aussagen über die Leistung des Systems im Dauerbetrieb gemacht werden. Drittens erfordern die meisten Modelle, dass bestimmte Parameter (wie z.B. die Kontaktraten zwischen mobilen Endgeräten) mittels Simulation bestimmt werden. In der vorgestellten Arbeit [Wal05] wird ein Ansatz zur Bestimmung der Leistung eines Systems im Dauerbetrieb vorgeschlagen. Dabei wird die Verbreitung von vielen Datenobjekten mittels begrenzter Puffer mit Least-Recently-Used Ersetzungsstrategie berücksichtigt (siehe Abschnitt 4).

## 2 Epidemische Verbreitung von Indexinformationen

Viele mobile Anwendungen benötigen Methoden zur Zuordnung von generischen Schlüsseln zu generischen Werten, eine Funktionalität die von *Suchdiensten (Lookup Services)* bereitgestellt wird. In zellularen Netzen können Suchdienste durch einen unter einer bekannten Netzadresse erreichbaren, zentralen Index-Server realisiert werden. In MANET machen jedoch die fehlende feste Infrastruktur, die dynamische Netztopologie und häufig auftretende Verbindungsunterbrechungen den Einsatz eines zentralen Index-Servers unmöglich. Als ersten Forschungsbeitrag stellt [Wal05] *Passive Distributed Indexing (PDI)* vor, einen universell einsetzbaren Suchdienst für mobile Anwendungen in MANET. PDI verwaltet mit Hilfe von epidemischer Informationsverbreitung einen verteilten Index, der die Suche nach generischen Werten anhand von generischen Schlüsseln unterstützt. Schlüssel und Werte werden dabei von der Anwendung definiert, für die PDI verwendet wird.

Abbildung 2 veranschaulicht die Arbeitsweise von PDI. Ein PDI Knoten  $n$  kann Informa-

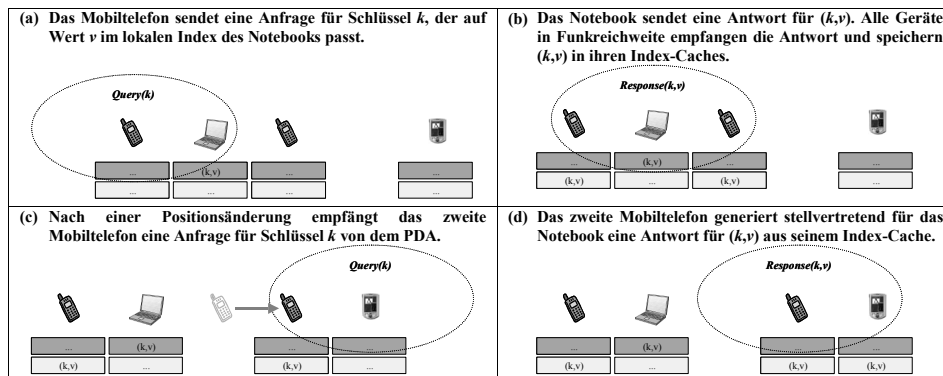


Abbildung 2: Veranschaulichung der Arbeitsweise von PDI

tionen veröffentlichen, indem er Indexeinträge in der Form  $(k, v)$  für einen Schlüssel  $k$  und einen Wert  $v$  in eine Datenstruktur einfügt, die als *lokaler Index* bezeichnet wird. In Abbildung 2 ist der lokale Index als jeweils erstes Rechteck unter einem mobilen Endgerät dargestellt. Ein Index-Eintrag  $(k, v)$  im lokalen Index wird als *bereitgestellt* bezeichnet. Der Knoten  $n$  ist der *Ursprungsknoten* des Eintrags  $(k, v)$ . Eine Suche nach Schlüssel  $k$  kann nur dann einen Treffer für Wert  $v$  liefern, wenn  $(k, v)$  aktuell bereitgestellt ist.

Um nach einem Schlüssel  $k$  zu suchen, sendet ein PDI Knoten eine QUERY-Nachricht (vergl. Abbildung 2 (a)). Die QUERY-Nachricht wird per lokalem Broadcast gesendet und von allen Knoten in Funkreichweite empfangen. Jeder dieser Knoten kann potentiell eine RESPONSE-Nachricht generieren. Eine RESPONSE-Nachricht enthält den Schlüssel  $k$  aus der QUERY-Nachricht sowie alle passenden Werte  $v$ , für die ein Paar  $(k, v)$  aktuell im lokalen Index oder in einer zweiten Datenstruktur gespeichert ist. Diese zweite Datenstruktur wird als *Index-Cache* bezeichnet und ist in Abbildung 2 als zweites Rechteck unter den mobilen Endgeräten dargestellt. Um die epidemische Ausbreitung der Informationen zu fördern, werden RESPONSE-Nachrichten ebenfalls per lokalem Broadcast gesendet. Alle mobilen Knoten, die die RESPONSE-Nachricht erhalten, extrahieren den Schlüssel  $k$  und alle passenden Werte  $v$  und speichern Indexeinträge  $(k, v)$  im Index Cache (vergl. Abbildung 2 (b)). Einträge im Index-Cache werden verwendet, um Anfragen lokal zu beantworten, wenn sich der Ursprungsknoten eines passenden Index-Eintrags außerhalb der Funkreichweite eines anfragenden Knotens befindet (vergl. Abbildung 2 (c) und (d)).

Im Gegensatz zu allen bisher vorgeschlagenen Systemen zur epidemischen Informationsverbreitung begrenzt PDI die Größe des Index-Cache auf maximal  $B$  Indexeinträge, wobei  $B$  den Fähigkeiten des jeweiligen Endgerätes angepasst werden kann. Wenn der Platz im Index-Cache eines Gerätes erschöpft ist, wird die *Least-Recently-Used (LRU)* Ersetzungsstrategie angewendet, bei der jeweils der Indexeintrag entfernt wird, auf den am längsten nicht mehr zugegriffen wurde.

Durch das Speichern von Indexeinträgen in Index-Caches und das Empfangen aller Antwortnachrichten von Geräten in Funkreichweite werden Informationen epidemisch ohne auf-

wendige globale Kommunikationsoperationen im MANET verbreitet. Allerdings werden im Gegensatz zu Systemen wie SWIM und PILOT Informationen nur *passiv* ausgetauscht, nämlich dann, wenn sie auch von einem Knoten in Funkreichweite gesucht wurden.

Um auch für Geräte mit geringer Funkreichweite eine effektive Informationsverbreitung zu gewährleisten, verwendet PDI einen Mechanismus, der als *gezieltes Weiterleiten (Selective Forwarding)* bezeichnet wird und doppelte Resultate aus weitergeleiteten RESPONSE-Nachrichten entfernt, um Bandbreite einzusparen. Über alle anderen Systemvorschläge hinaus stellt PDI zwei Mechanismen bereit, um die Index-Caches konsistent zu halten: (1) Inkonsistenzen wegen Verbindungsunterbrechungen oder Knotenfehlern werden durch *Werte-Timeouts (Value Timeouts)* behandelt. (2) *Träge Invalidierungs-Caches (Lazy Invalidation Caches)* reduzieren die Anzahl von ungültigen Index Einträgen, die aus Veränderungen der Daten am Ursprungsknoten resultieren. Angelehnt an die epidemische Verbreitung von Indexeinträgen werden sowohl die Dauer der Timeouts als auch die Einträge der Invalidierungs-Caches epidemisch übertragen.

Die Leistung von PDI wurde in einer umfassenden Simulationsstudie mit Hilfe von ns-2 demonstriert. Als Arbeitslast wurden dabei die Anwendungen mobiler P2P Dateientausch, mobiles Instant Messaging, mobile Informationsportale und Suche im WWW ohne andauernde Internet-Verbindung betrachtet. Die Studie zeigte, dass sich PDI bei entsprechender Konfiguration für jede dieser Anwendungen gut einsetzen lässt. Z.B. wurde für die Dateientausch Anwendung gezeigt, dass gezieltes Weiterleiten über zwei Hops in Systemen mit geringer Dichte von mobilen Endgeräten oder beschränkten Funkreichweiten die Trefferraten um 40% erhöhen kann. Des weiteren erhöht ein Anpassung der Cache-Größen und der Parameter des gezielten Weiterleitens die Trefferrate um 30% für Anwendungen, bei denen sich nur ein geringer Teil der Anfrage nach kurzer Zeit wiederholt. Insgesamt kann PDI bei entsprechender Konfiguration Trefferraten von mehr als 90% erreichen. Dabei gewährleistet die Kombination von Werte-Timeouts und trägen Invalidierungs-Caches, dass mehr als 95% der aus Index-Caches gewonnenen Index-Einträge aktuell sind.

Motiviert durch die Resultate der Simulationsstudien wurde eine Spezifikation von PDI als Internet-Draft erarbeitet. Die Spezifikation verwendet XML-basierte Nachrichten und beinhaltet einen generischen Sicherheitsmechanismus. Dieser Spezifikation entsprechende Prototypen für die Anwendungen mobiler Dateientausch, mobiles Instant Messaging und mobile Suche im WWW wurden erfolgreich implementiert.

### 3 Epidemische Verbreitung von Präsenz-Informationen

Instant Messaging (IM) ist zur Zeit eine der populärsten Internet-Anwendungen, dank einer Kombination von Benutzerfreundlichkeit, der Kommunikation in Realzeit und der Möglichkeit, im Voraus zu wissen, ob ein Gesprächspartner verfügbar ist. Ein wichtiger Baustein eines IM-Systems ist ein Präsenzdienst, der den Präsenzstatus eines Benutzers verwaltet, also Auskunft darüber gibt, ob ein Benutzer am System angemeldet, bereit zum Chat, beschäftigt, abwesend, etc. ist. Außer in IM-Systemen werden solche Präsenzinformationen neuerdings auch in anderen Anwendungen eingesetzt, z.B. in Voice-

over-IP Telefonsystemen oder Computer-Supported-Cooperative-Work Anwendungen. Auf Grund der fehlenden festen Infrastruktur, der dynamischen Netztopologie und häufig auftretenden Verbindungsunterbrechungen ist die effektive Verbreitung von Präsenzinformationen in MANET ein anspruchsvolles Forschungsproblem.

Obwohl die in Abschnitt 2 beschriebene Simulationsstudie zeigte, dass sich das PDI System für den Einsatz in mobilen IM-Systemen eignet, fiel bei der Analyse der Ergebnisse auf, dass es noch Optimierungspotential für den Prozess der epidemischen Ausbreitung bei dieser speziellen Anwendung gibt. Außerdem erwies sich die Trefferrate als verwendetes Leistungsmaß zwar als geeignet, um einen qualitativen Hinweis auf die Leistung eines PDI-basierten IM-Systems zu geben, kann jedoch die zeitlichen Abläufe bei den Veränderungen der angezeigten Präsenzinformationen nur unzureichend berücksichtigen. Aus diesem Grund untersucht die Arbeit [Wal05] als zweiten Forschungsbeitrag Mechanismen zur Verbreitung von Präsenzinformationen in MANET. Da Präsenzinformationen zeitkritisch sind und sich häufig ändern, wurde zur Erfassung der zeitlichen Abläufe die *aufrechterhaltene Konsistenz (Sustained Consistency)* als Leistungsmaß eingeführt, das die anteilige Zeit beschreibt, in der das IM-System eine kohärente Sicht der Präsenzinformationen darstellt. Als weiteres Leistungsmaß wird zusätzlich der von den verschiedenen Mechanismen verursachte Datenverkehr herangezogen.

Um verschiedene, alternative Ansätze zu vergleichen, wurde ein stochastisches Simulationsmodell des IM-Systems entwickelt und mittels ereignisgesteuerter Simulation ausgewertet. Dabei wurden obere Schranken für die von einem Ansatz erreichbare aufrechterhaltene Konsistenz sowie untere Schranken für den dazu notwendigen Datenverkehr bestimmt. Basierend auf diesen Schranken erwies sich ein Ansatz am geeignetsten, der bei einem Wechsel des Präsenzstatus eines Knotens den neuen Status aktiv an alle erreichbaren Knoten sendet und bei dem alle Knoten periodisch auf erreichbaren Knoten nach neuen Präsenzinformationen für ihre Kontakte suchen. Dieses Ergebnis führte zur Entwicklung von *SPEED*, dem *System for Presence information Exchange by Epidemic Dissemination* in MANET. *SPEED* verwendet den oben beschriebenen Ansatz und kombiniert kontrolliertes Fluten und eine auf Caching basierende epidemische Ausbreitung von Präsenzinformationen. Zur Verbesserung der Leistung passt *SPEED* viele Protokollparameter adaptiv an die im Umfeld eines Knotens beobachtete Knotendichte an.

Um die Leistung von *SPEED* zu demonstrieren wurde wiederum eine umfassende Simulationsstudie mit Hilfe des Netzsimulators ns-2 durchgeführt, in der Vergleiche mit den zuvor bestimmten oberen und unteren Schranken sowie mit einem auf periodisches Fluten basierenden Ansatz angestellt wurden. Die Studie zeigte, dass *SPEED* im Vergleich zum Fluten durch die epidemische Verbreitung von Präsenzinformationen für MANET mit geringer Knotendichte eine bis zu 20% höhere aufrechterhaltene Konsistenz erreicht. Für größere Knotendichten wird die gleiche Konsistenz wie durch Fluten erzielt, dafür allerdings bis zu 48% weniger Datenverkehr verursacht. Ein Vergleich mit den oberen und unteren Schranken zeigte, dass die vorgestellte Konfiguration von *SPEED* eine hohe Effizienz in Bezug auf den Datenverkehr erreicht, dabei allerdings noch Raum zur Steigerung der aufrechterhaltenen Konsistenz bleibt. Durchgeführte Sensitivitätsstudien belegten jedoch, dass sich durch Veränderung der Konfiguration eine höhere Konsistenz bei leicht erhöhtem Datenverkehr erreichen lässt.

## 4 Stochastische Modellierung von epidemischer Informationsverbreitung

Wie in den Abschnitten 2 und 3 dargestellt, erfordert der Entwurf von Systemen zur epidemischen Informationsverbreitung Methodik und Werkzeuge zur quantitativen Bewertung verschiedener Design-Alternativen. Neben Simulationen ist die analytische Modellierung mit stochastischen Methoden ein geeignetes Werkzeug, da sie in der Regel Leistungsergebnisse zwar mit einem höheren Abstraktionsgrad, dafür aber in deutlich kürzeren Auswertungszeiten liefert. Als dritten Forschungsbeitrag stellt die Arbeit [Wal05] einen stochastischen Ansatz zur Modellierung von Systemen zur epidemischen Informationsverbreitung in MANET vor. Über vorherige Arbeiten hinausgehend berücksichtigt der Ansatz die gleichzeitige Verbreitung vieler Datenobjekte, die um Plätze in von den mobilen Endgeräten bereitgestellten Puffern mit begrenzter Größe und LRU Ersetzungsstrategie konkurrieren. Außerdem betrachtet der Ansatz nicht das Einschwingverhalten eines Systems, sondern bewertet dessen Leistung im Dauerbetrieb.

Zur Herleitung des Modellierungsansatzes wurde gezeigt, dass ein System zur epidemischen Informationsverbreitung mittels endlichen Puffern als *zeitdiskrete Markov Kette* (*discrete-time Markov chain, DTMC*) modelliert werden kann, wobei die DTMC eine stationäre Wahrscheinlichkeitsverteilung besitzt, also die Bestimmung von Leistungsmaßen im Dauerbetrieb ermöglicht. An den Beispielen 7DS und PDI wurde demonstriert, dass sich das DTMC Modell leicht für gegebene Systeme anpassen lässt und bei einer Auswertung mittels ereignisgesteuerter Simulation für diese Systeme äußerst exakte Leistungsergebnisse liefert.

Unglücklicherweise wächst der Zustandsraum des DTMC Modells exponentiell in der Anzahl der Konten und Datenobjekten im System. Deshalb lassen sich Leistungsmaße mit herkömmlichen analytisch-numerischen Methoden für praktisch relevante Systemgrößen nicht effizient bestimmen. Aus diesem Grund wurde ein approximativer Ansatz zur effizienten Bestimmung relevanter Leistungsmaße entwickelt. Mit Hilfe des approximativen Ansatzes wurde die Leistung von vier verschiedenen Varianten des 7DS Systems im Dauerbetrieb untersucht. Die Varianten unterschieden sich durch die Verwendung von Stromsparmechanismen und dem Einsatz von festen Basisstationen. Ein Vergleich der mit dem approximativen Ansatz berechneten Leistungsmaße mit den Ergebnissen einer detaillierten Simulationsstudie zeigte eine nahezu exakte Übereinstimmung. Dabei lagen die approximativen Ergebnisse fast immer in den 99% Konfidenzintervallen der entsprechenden Simulationsergebnisse. Die Leistungsstudie zeigte weiterhin, dass im Dauerbetrieb weder die Funkreichweite noch die gewählte 7DS Variante großen Einfluss auf die Anzahl der im System verfügbaren Kopien eines Datenobjektes haben. Trotzdem beeinflusst die gewählte 7DS Variante bei hoher Reichweite signifikant die Trefferrate des Systems. Abhängig von Variante und Puffergröße können Trefferraten von 48% bis 92% erreicht werden. Für kleine Funkreichweiten liegt unabhängig von der 7DS Variante die Trefferrate zwischen 37% und 77%. Ein zu aggressiver Einsatz der Stromsparmechanismen bei großen Funkreichweiten führt zu einer nicht zu vernachlässigenden Reduzierung der Trefferrate. Dabei wurde erkannt, dass eine Halbierung der Funkreichweite die gleichen Trefferraten wie der Einsatz von Stromsparmechanismen liefert, dabei aber signifikant mehr Energie einspart. Die für



7DS vorgeschlagene Wiederholung von Anfragen ist nur sinnvoll für Systeme mit kleinen Puffern und geringen Reichweiten.

Diese Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse zeigt, dass mit Hilfe des approximativen Ansatzes relevante Erkenntnisse für die Optimierung von 7DS im Dauerbetrieb gewonnen werden konnten.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Arbeit [Wal05] untersucht neue Methoden zur Realisierung von Anwendungen auf mobilen Endgeräten, z.B. Notebooks, Personal Digital Assistants und Smartphones, die in einem mobilen Ad-hoc Netz (MANET) organisiert sind. Dabei wird ein Schwerpunkt auf die (von der Übertragung von ansteckenden Krankheiten motivierte) epidemische Informationsverbreitung als Methode zur Realisierung von Peer-to-Peer Anwendungen in MANET gelegt. In diesem Gebiet wurden zwei Systeme vorgeschlagen, die zur Realisierung praktisch relevanter mobiler Anwendungen genutzt werden können: (1) Das *Passive Distributed Indexing (PDI)* System zur Realisierung eines verteilten Index basierend auf epidemischer Verbreitung von Indexeinträgen. (2) Das *System for Presence information Exchange by Epidemic Dissemination (SPEED)* zur epidemischen Verbreitung von Präsenzinformationen in einem mobilen Instant Messaging System. Des weiteren wurde ein stochastischer Ansatz zur Modellierung von Systemen zur epidemischen Informationsverbreitung entwickelt, der eine effiziente Analyse und Optimierung ermöglicht.

In zukünftigen Arbeiten können die Forschungsbeiträge aus [Wal05] mit aktuellen Trends im Bereich der mobilen Ad-hoc Netze verbunden werden. So bilden Erweiterungen des Internets durch mobile Ad-hoc Netze, die mobilen Endgeräten eine Verbindung mit entfernten Internet-Zugangspunkten ermöglichen, ein interessantes Anwendungsfeld für MANET Technologie und somit auch für die epidemische Informationsverbreitung. In diesem Zusammenhang ist nicht nur eine Weiterentwicklung der Protokolle und Systeme, sondern auch der Modellierungsmethodik für deren Analyse und Optimierung notwendig.

## Literatur

- [Bis01] C. Bisdikian. An Overview of the Bluetooth Wireless Technology. *IEEE Communications*, 39(12):86–94, 2001.
- [For] Gnutella Developer Forum. Gnutella - A Protocol for a Revolution. <http://rfc-gnutella.sourceforge.net>.
- [FV] K. Fall und K. Varadhan. *The ns Manual*. The VINT Project, UC Berkeley, LBL and Xerox PARC. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>.
- [GT02] M. Grossglauser und D. Tse. Mobility increases the capacity of ad hoc wireless networks. *IEEE/ACM Trans. on Networking*, 10(4):477–486, 2002.

- [IEE97] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee. *IEEE 802.11-1997: Standard Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, 1997.
- [LCP<sup>+</sup>05] E. Lua, J. Crowcroft, M. Pias, R. Sharma und S. Lim. A Survey and Comparison of Peer-to-Peer Overlay Network Schemes. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 7(2):72–93, 2005.
- [LEH04] J. Luo, P. Eugster und J. Hubaux. Pilot: Probabilistic Lightweight Group Communication System for Ad Hoc Networks. *IEEE Trans. on Mobile Computing*, 3(2):164–179, 2004.
- [MAN] IETF Working Group Mobile Ad hoc Networks (MANET). *Mobile Ad-hoc Networks (MANET) Charter*. <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>.
- [PS01] M. Papadopouli und H. Schulzrinne. Effects of Power Conservation, Wireless Coverage and Cooperation on Data Dissemination among Mobile Devices. In *Proc. 2nd ACM Int. Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MobiHoc 2001)*, Seiten 117–127, Long Beach, CA, 2001.
- [RIF02] M. Ripeanu, A. Imnitchi und I. Foster. Mapping the Gnutella Network. *IEEE Internet Computing*, 6(1):50–57, 2002.
- [SH03] T. Small und Z. Haas. The Shared Wireless Infostation Model: A New Ad Hoc Networking Paradigm (or Where there is a Whale, there is a Way). In *Proc. 4th ACM Int. Symp. on Mobile Ad Hoc Networking & Computing (MobiHoc 2003)*, Seiten 233–244, Annapolis, MA, 2003.
- [Wal05] O. Waldhorst. *Design and Quantitative Analysis of Protocols for Epidemic Information Dissemination in Mobile Ad Hoc Networks*. Dissertation, Universität Dortmund, 2005.



**Oliver Waldhorst** begann 1995 ein Studium der Informatik an der Universität Dortmund. Er bestand die Diplomvorprüfung im Herbst 1997 und die Diplomprüfung im März 2000 mit Auszeichnung. Im November 2005 promovierte er mit Auszeichnung zum Dr. rer. nat.. Von April 2000 bis Dezember 2005 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Mobile Computing Systems Gruppe am Fachbereich Informatik der Universität Dortmund. Seit Januar 2006 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Rechnernetze und Verteilte Systeme am Institut für Informatik der Universität Leipzig. Seine Forschungsinteressen beinhalten mobile Ad-hoc Netze, Peer-to-Peer Computing in mobilen Umgebungen und mobile Anwendungen.