Effiziente Endsystem-basierte Multicast-Dienste in Mobilen Ad-hoc-Netzwerken

Peter Baumung, Martina Zitterbart
Institut für Telematik
Universität Karlsruhe (TH)
{baumung,zit}@tm.uka.de

Abstract: Die Kombination von mobilen Ad-hoc-Netzwerken und Endsystem-basierten Protokollen bieten interessante Ansätze zur Erbringung vollständig dezentraler und infrastrukturloser Dienste. Dies trifft auch auf den universitären Bereich zu, in welchem die Bereitstellung campusweiter Gruppendienste zur Unterstützung von Studierenden von großem Nutzen sein kann. Für den erfolgreichen Betrieb Endsystem-basierter Protokolle in mobilen Ad-hoc-Netzwerken sind jedoch die besonderen Eigenschaften des Netzwerks zu berücksichtigen. Dieser Beitrag zeigt, wie im Hinblick auf die Realisierung von Gruppendiensten die Leistungsfähigkeit Endsystem-basierter Protokolle beträchtlich gesteigert werden kann.

1 Einführung und Motivation

Da mobile Ad-hoc-Netze (kurz auch MANETs genannt) ohne jegliche Kommunikationsinfrastruktur auskommen, bieten sie prinzipiell eine interessante Basis zur Erbringung von Diensten. Aufgrund ihrer besonderen Eigenschaften verlangen diese Netzwerke nach neuen Protokollen und Mechanismen, um eine effiziente Kommunikation zu ermöglichen. Im Gegensatz zu Festnetzen werden Daten in MANETs über das drahtlose Funkmedium versendet, so dass hier, anders als bei den traditionellen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen im Festnetzbereich, durchaus mehrere Geräte gleichzeitig auf das Medium zugreifen können. Hieraus resultieren häufig Kollisionen bzw. Paketverluste, welche durch geeignete Mechanismen zu beheben sind. Der Datenaustausch selbst findet in MANETs typischerweise zwischen kleinen tragbaren Endgeräten statt, welche demnach auch eine gewisse Mobilität aufweisen können. Können zwei Geräte aufgrund beschränkter Übertragungsreichweite nicht direkter miteinander kommunizieren, fungieren die dazwischen liegenden Endgeräte als weiterleitende Instanzen und überbrücken auf diese Weise auch größere Abstände. Im Vergleich zu fest verdrahteten Systemen können in MANETs also *alle* Knoten des Netzwerks gleichzeitig sowohl als Client und Server als auch als einfache Router agieren. Ebenso ist aufgrund der bereits erwähnten Mobilität damit zu rechnen, dass Routen zu Knoten brechen oder wegen Partitionierungen des Netzes manche Knoten auch über längere Zeit hinweg nicht mehr zu erreichen sind. Zur Realisierung einer effizienten Kommunikation in MANETs werden demnach Ansätze benötigt, welche sich selbstständig bzw. vollständig dezentral verwalten. Ebenso wird eine hohe Robustheit gegenüber einzelnen Link- und

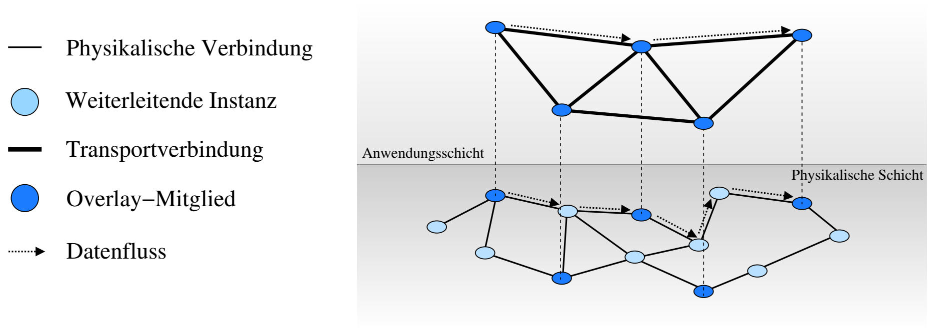


Abbildung 1: Aufbau eines Overlay-Netzes zwischen Endsystemen.

Knotenausfällen und demnach auch ein hohes Maß an Flexibilität gefordert. Endsystem-basierte Anwendungen erfüllen diese Anforderungen, so dass ihnen zur Diensterbringung in MANETs ein gewisses Potential zuzuordnen ist.

Während in Abschnitt 1.1 kurz auf das Prinzip Endsystem-basierter Anwendungen eingegangen wird, werden in Abschnitt 1.2 einige Dienste skizziert, welche den Hintergrund des vorliegenden Beitrags bilden. Abschnitt 2 verdeutlicht anschließend welche Probleme bei dem Betrieb von Endsystem-basierten Protokollen in MANETs auftreten können. Ebenso werden zu den einzelnen Problemen Lösungsansätze vorgestellt. Ein zu Testzwecken implementiertes Protokoll wird kurz in Abschnitt 3 beschrieben. Die Evaluation des Protokolls findet sich abschließend in Abschnitt 4.

1.1 Prinzip Endsystem-basierter Anwendungen

Endsystem-basierte Protokolle realisieren die Kommunikation zwischen den Mitglieder einer Gruppe anhand eines so genannten Overlay-Netzes. Wie Abbildung 1 entnommen werden kann entsteht dieses, indem die Gruppenmitglieder auf Anwendungsschicht durch von Transportverbindungen miteinander verbunden werden. Der Auf- und Abbau der Verbindungen sowie die Entscheidung zu welchen Gruppenmitgliedern Verbindungen unterhalten werden unterliegt der Kommunikationsanwendung bzw. dem darin realisierten Overlay-Protokoll. Die Kommunikation zwischen den Endsystemen wird ausschließlich anhand der aufgebauten Transportverbindungen realisiert. Für die Kommunikation entfernter Gruppenmitglieder, welche nicht direkt miteinander verbunden sind, wird deshalb ein *Overlay-Routing-Protokoll* benötigt. Dieses ist vollständig unabhängig von dem Routing-Protokoll auf Netzwerk-Schicht, welches die Weiterleitung der über die einzelnen Transportverbindungen gesendeten Daten übernimmt.

Ebenso können Overlay-Netze zur Bereitstellung von Multicast-Diensten genutzt werden. In diesem Fall übernehmen die Mitglieder der Multicast-Gruppe und nicht die da-

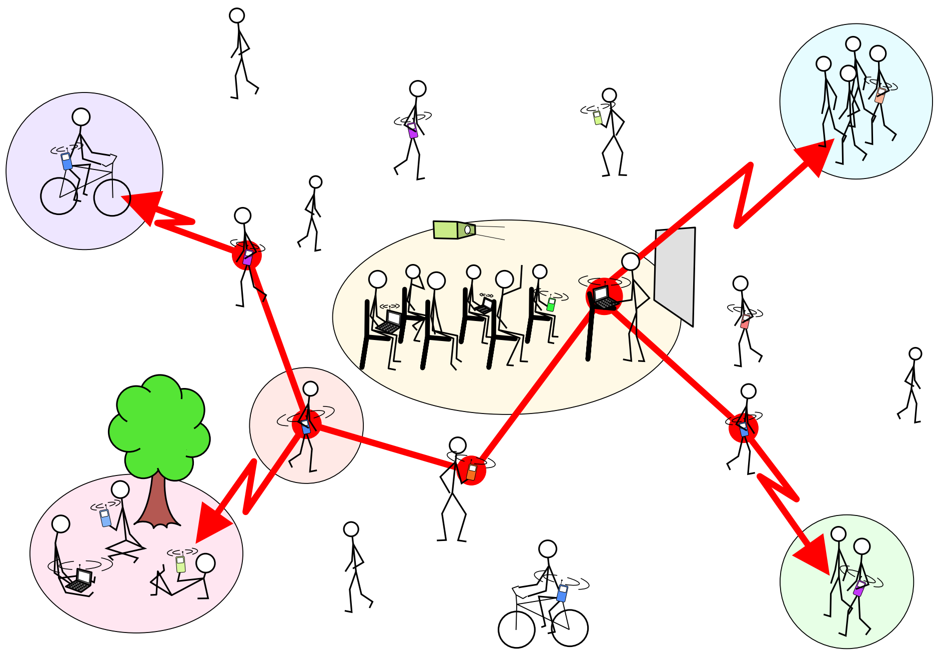


Abbildung 2: Beispielszenario für den Einsatz eines Campus-weiten Gruppendienstes.

zwischen angesiedelten weiterleitenden Instanzen die Duplizierung der Pakete sowie deren Weiterleitung zu anderen Gruppenmitgliedern. Hierin liegt einer der großen Vorteile Endsystem-basierter Anwendungen. So müssen Protokolle und Mechanismen, welche zur Verwaltung der Gruppe und des Datenflusses benötigt werden, lediglich in den Gruppenmitgliedern selbst realisiert sein. Alle übrigen Geräte des Netzwerks werden von Gruppenspezifischen Aufgaben vollständig entlastet und sind mit der Weiterleitung des Gruppenverkehrs höchstens bis auf Netzwerkschicht involviert.

1.2 Endsystem-basierte Multicast-Dienste in MANETs

Im universitären Bereich ist vor allem die Realisierung von Gruppen-Diensten von Interesse. Diese können dazu eingesetzt werden, um Studierende rund um den Lehrbetrieb zu unterstützen. Ein Beispielszenario ist in Abbildung 2 dargestellt. Hier ist zu erkennen, wie ein Datenstrom während einer Vorlesung einer Gruppe von Studierenden zugestellt wird. Bei dem Datenstrom selbst kann es sich um verschiedene relevante Lerninhalte handeln. So ist beispielsweise sowohl die Verteilung einfacher Vorlesungsunterlagen und Übungsblätter, als auch das Streamen von Whiteboard-Anwendungen oder Audio-Daten von Interesse.

Aufgrund der Multi-Hop-Fähigkeit von mobilen Ad-hoc-Netzwerken ist es im Laufe der

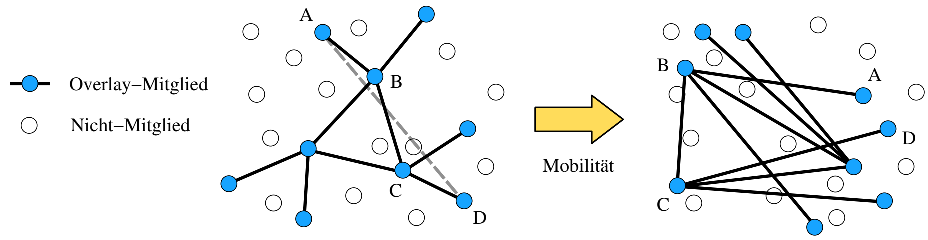


Abbildung 3: Auswirkung der Mobilität auf eine zunächst effiziente Overlay-Topologie.

Verteilung nicht notwendig, dass sich die vollständige Empfängergruppe in direkter Übertragungsreichweite der Quelle befindet. Vielmehr ist die Gruppe der Studierenden anhand eines Overlay-Netzes zu organisieren, um sie an der Datenübertragung teilhaben zu lassen. Ziel dieses Beitrags ist es, Konzepte vorzustellen, aufgrund derer sich die Organisation von Mitgliedern einer Multicast-Gruppe möglichst effizient realisiern lässt.

2 Effizienzsteigerung für den Betrieb in MANETs

Dieses Kapitel setzt sich explizit mit den wichtigsten Merkmalen von MANETs auseinander und stellt einige Konzepte vor, aufgrund derer sich eine deutliche Leistungssteigerung Endsystem-basierter Protokolle im Hinblick auf die Erbringung eines Gruppenkommunikationsdienstes erreich lässt. In Abschnitt 2.1 wird dabei zunächst auf die Auswirkungen der in MANETs möglichen Mobilität der Teilnehmer auf die Topologie eines Overlays eingegangen. Abschnitt 2.2 zeigt anschließend auf, welche Probleme beim Betreiben von Overlay-Netzen in MANETs aufgrund des geteilten Mediums auftreten und wie diese durch die explizite Nutzung der Broadcast-Fähigkeit des drahtlosen Mediums umgangen werden können. Da im Gegensatz zu Endsystem-basierten Anwendungen im Festnetz in MANETs für den Gruppenbeitritt keine fest installierte Infrastruktur vorausgesetzt werden kann, wird in Abschnitt 2.3 kurz ein Mechanismus vorgestellt, aufgrund dessen der Beitritt zu einem Overlay-Netz vollständig dezentral realisiert werden kann. Abschließend weist Abschnitt 2.4 noch auf einige Konzepte zur Behandlung der in MANETs sehr häufig auftretenden Paketverluste hin.

2.1 Adaption der Overlay-Topologie

Im Festnetz unterliegt die Topologie eines Overlay-Netzes nur selten Änderungen. Der Begriff Dynamik taucht hier oftmals nur im Zusammenhang mit der Gruppenmitgliedschaft auf. So wirken sich in Festnetzen lediglich die Gruppenbei- und -austritte von Benutzern in Form von Änderungen auf die Topologie eines Overlay-Netzes aus.

In mobilen Ad-hoc-Netzwerken sind die Transportverbindungen eines Overlay-Netzes jedoch ständigen Schwankungen unterworfen. Dies resultiert aus der Tatsache, dass Knoten des Netzwerks mobil sind und deswegen zur Vermittlung von Daten zwischen zwei bestimmten Endsystem eine im Laufe der Zeit unterschiedliche Anzahl von Übertragungsabschnitten überbrückt werden muss. Aufgrund der in MANETs häufig auftretenden Paketverluste ist deshalb bei der Auseinanderbewegung zweier Overlay-Knoten mit einer kontinuierlichen Verschlechterung der Verbindungsqualität zu rechnen.

Abbildung 3 ist die allgemeine Auswirkung der Knotenmobilität auf die Topologie von Overlay-Netzen zu entnehmen. Das initiale Overlay auf der linken Seite weist eine hohe Effizienz auf, da nah beieinander liegende Knoten über Transportverbindungen direkt miteinander verbunden sind und somit auch direkt miteinander kommunizieren können. Selbst der Paketfluss zwischen voneinander weit entfernten Knoten (wie beispielsweise Knoten A und D) weist eine gewisse Optimalität auf. Hier erfolgt die Weiterleitung über das Overlay anhand der Knoten B und C. Wie in der Abbildung zu erkennen ist, weisen die Overlay-Teilstrecken über die Knoten A, B, C und D kaum Abweichungen zu einer direkten Verbindung zwischen A und D (gestrichelte Verbindung in Abbildung 3) auf, so dass hier von einer effizienten Kommunikation beider Knoten ausgegangen werden kann.

Wegen der Mobilität der Teilnehmer kann sich dies im Laufe der Zeit jedoch deutlich ändern. So ist die Kommunikation zwischen A und D anhand des rechten Overlays in Abbildung 3 äußerst ineffizient. Obwohl beide Knoten nun sehr nah beieinander liegen, erfolgt die Kommunikation zwischen ihnen noch immer über die nun weit entfernten Overlay-Knoten B und C. Hieraus resultiert demnach eine hohe Belastung des Netzwerks, da weitaus mehr Knoten in die Weiterleitung von Paketen zwischen A und D involviert sind, als es bei einer direkten Kommunikation der Fall wäre. Aufgrund der insgesamt nun auch weitaus längeren Overlay-Teilstrecken, wird die durchschnittliche Paketverlustrate zwischen A und D nun stark erhöht sein.

Um derartige Effekte zu vermeiden, wie sie beispielsweise in [LTM99] auftreten, ist eine ständige Anpassung des Overlays an die Topologie des zugrunde liegenden (drahtlosen) Netzwerks notwendig. Eine solche Anpassung findet zum Beispiel in [GM03] statt. Da sich die Topologieänderungen des zugrunde liegenden Netzwerks auf die Übertragungsqualität einzelner Tansportverbindungen auswirken, ist letztere anhand einer geeigneten Metrik zu bewerten. Aufgrund dieser Bewertung können sich verschlechternde Overlay-Verbindungen indentifiziert und abgebaut werden. Um eine Partitionierung des Overlays zu vermeiden, sind abgebaute Verbindungen unter Umständen durch neue, effizientere Verbindungen zu ersetzen. Hierzu ist es demnach zusätzlich erforderlich, die Qualität potentieller Verbindungen (welche noch nicht bestehen) zu bestimmen. Die Art und Weise, nach welcher Knoten bestimmt werden, zu denen die Qualität einer potentiellen Verbindungen gemessen wird, ist dabei von großer bedeutung, da diese direkt Einfluss auf die Belastung des Netzwerks hat [Lu03].

Zur Bewertung der eigentlichen Verbindungsqualität hat sich der Einsatz einer Hop-Zahl-basierten Metrik als sinnvoll gezeigt. Im Gegensatz zu Umlaufzeitmessungen unterliegt diese deutlich geringeren Schwankungen [Bl04]. Schwingungen der Overlay-Topologie aufgrund kurzzeitig schwankender Paketumlaufzeiten können somit erfolgreich umgangen werden.

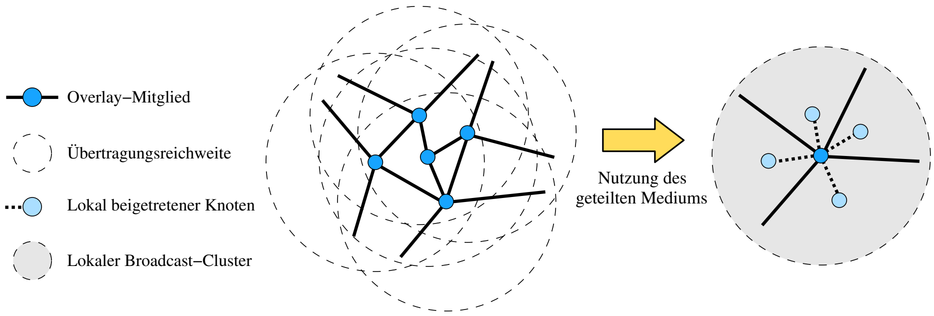


Abbildung 4: Nutzung der Broadcast-Fähigkeit des Mediums durch Broadcast-Cluster.

2.2 Nutzung des geteilten Mediums

Während das geteilte Medium in mobilen Ad-hoc-Netzwerken den unerwünschten Effekt zahlreicher Paketverluste nach sich zieht, lässt sich dessen Broadcast-Eigenschaft nutzen, um die Leistungsfähigkeit von Endsystem-basierten Protokollen zu steigern. Beträchtliche Verbesserungen der Effizienz lassen sich im Hinblick auf Gruppenkommunikationsanwendungen insbesondere dann erzielen, wenn man davon ausgeht, dass sich die einzelnen Gruppenmiglieder zu kleinen Anhäufungen von Knoten zusammenfinden.

In Abbildung 4 findet sich ein Szenario, in welchem eine solche, aus 5 Mitgliedern bestehende Anhäufung, abgebildet ist. In der linken Hälfte der Abbildung sind die Mitglieder über die Transportverbindungen eines Overlay-Netzes miteinander verbunden. Zusätzlich verfügen einige der Mitglieder über Transportverbindungen zu anderen, weiter entfernten Gruppenmitgliedern. Betrachtet man die Verteilung von Multicast-Daten innerhalb der Anhäufung, so stellt man fest, dass Datenpakete den abgebildeten Knoten zugestellt werden, indem jeder einzelne Knoten das Paket von einem direkten Nachbarn im Overlay-Netz erhält und dabei individuell adressiert wird. Angesichts der Tatsache, dass sich alle abgebildeten Mitglieder in gegenseitiger Übertragungsreichweite befinden, ist diese Verteilung äußerst ineffizient, da das Medium zur Versendung eines identischen Datenpakets wiederholt beansprucht wird. Eine Lösung dieses Problems besteht in der expliziten Nutzung der Broadcast-Eigenschaft des geteilten Mediums. Dieses kann beispielsweise erreicht werden, indem das existierende Overlay-Netz um so genannte *Lokale Broadcast-Cluster* erweitert wird [Ba03, Bl04].

Lokale Broadcast-Cluster entstehen, indem jeder Knoten, welcher dem Overlay-Netz beigetreten ist, regelmäßig *Heartbeat*-Nachrichten via Broadcast versendet. Der Overlay-Knoten wird hierdurch gleichzeitig zum Repräsentanten seines lokalen Broadcast-Clusters. Ein Gruppenmitglied A, welches sich in Übertragungsreichweite des Overlay-Knotens befindet, empfängt dessen Heartbeats und nimmt hierdurch die Anwesenheit des Overlay-Knotens wahr. Knoten A tritt nun dem Overlay-Netz nicht explizit bei, sondern verbleibt als *lokal beigetretenes Gruppenmitglied* in dem lokalen Cluster des Overlay-Knotens. Dies ist in der rechten Hälfte von Abbildung 4 dargestellt.

Während die Verteilung von Multicast-Daten innerhalb des Overlays auf herkömmliche Art und Weise vollzogen wird, erfolgt die Weiterleitung an die lokal beigetretenen Gruppenmitglieder durch die Repräsentanten lokaler Cluster via Broadcast. Hierdurch wird sichergestellt, dass alle sich in Übertragungsreichweite eines Overlay-Knotens befindenden Gruppenmitglieder anhand einer einzelnen Sendeoperation adressiert werden. Handelt es sich bei einer Multicast-Quelle selbst um einen lokal beigetretenen Knoten, so nutzt diese den Repräsentanten ihres lokalen Clusters, um Daten an die übrigen Gruppenmitglieder zu versenden. Letzterer leitet hierzu das von der lokal beigetretenen Quelle empfangene Paket sowohl über seine Transportverbindungen innerhalb des Overlay-Netzes als auch via Broadcast an die übrigen Mitglieder seines lokalen Clusters weiter.

Aufgrund der Mobilität von Knoten ist es möglich, dass ein lokal beigetretenes Gruppenmitglied seinen lokalen Broadcast-Cluster verlässt. Dies ist gleichbedeutend damit, dass sich der Knoten nun nicht länger in Übertragungsreichweite seines lokalen Repräsentanten befindet. Für das Gruppenmitglied äußert sich dies also durch das Ausbleiben der periodischen Heartbeat-Nachrichten. Um auch weiterhin Multicast-Daten beziehen zu können, ist es erforderlich, dass der betroffene Knoten dem Overlay-Netz beitritt und hierdurch selbst zu dem Repräsentanten seines lokalen Clusters wird.

Analog dazu ist es auch erforderlich den Übergang eines aktiven Overlay-Knotens zu einem lokal beigetretenen Gruppenmitglied zu definieren. Als ausschlaggebendes Ereignis hierfür scheint die Kollision zweier lokaler Broadcast-Cluster angemessen. Eine solche tritt ein, wenn sich zwei Overlay-Knoten in gegenseitiger Übertragungsreichweite befinden und demnach gegenseitig ihre Heartbeats empfangen. Da dies wiederum einer redundanten Datenverteilung und somit einer gewissen Ineffizienz entspricht, verlässt in solch einem Fall einer der beiden Knoten das Overlay-Netz und gliedert sich in den lokalen Cluster des anderen Knotens ein.

Eine beträchtliche Entlastung des Mediums wird erreicht, indem die Mitglieder eines lokalen Clusters keinerlei Kontrollinformation mit dessen Repräsentanten austauschen. So ist jedem Overlay-Knoten die genaue Struktur seines lokalen Clusters unbekannt. Bemerkenswert ist deshalb ebenfalls die Tatsache, dass der Aufwand für die Verteilung von Multicast-Daten nun nicht mehr mit der Anzahl der Gruppenmitglieder ansteigt, sondern lediglich mit dem Areal, in welchem sich die Gruppe aufhält.

2.2.1 Interpretation der entstehenden Struktur

Ein Beispiel der entstehenden Overlay-Topologie mit lokalen Broadcast-Clustern ist in Abbildung 5 dargestellt. Die Kommunikationsgruppe umfasst hier insgesamt 30 Mitglieder. Als Overlay wurde ein hierarchisches Overlay verwendet (vgl. Kapitel 3), wobei die Hierarchieebenen, auf welchen Transportverbindungen bestehen, anhand der Strichdicken unterschieden werden können. Es ist gut zu erkennen, dass die dem Overlay beigetretenen Knoten mit ihren Übertragungsreichweiten ein gewisses Areal abdecken. Alle übrigen Gruppenmitglieder, die sich innerhalb der abgedeckten Fläche befinden treten dem Overlay nicht bei sondern gliedern sich in die entsprechenden lokalen Cluster ein. Dies re-

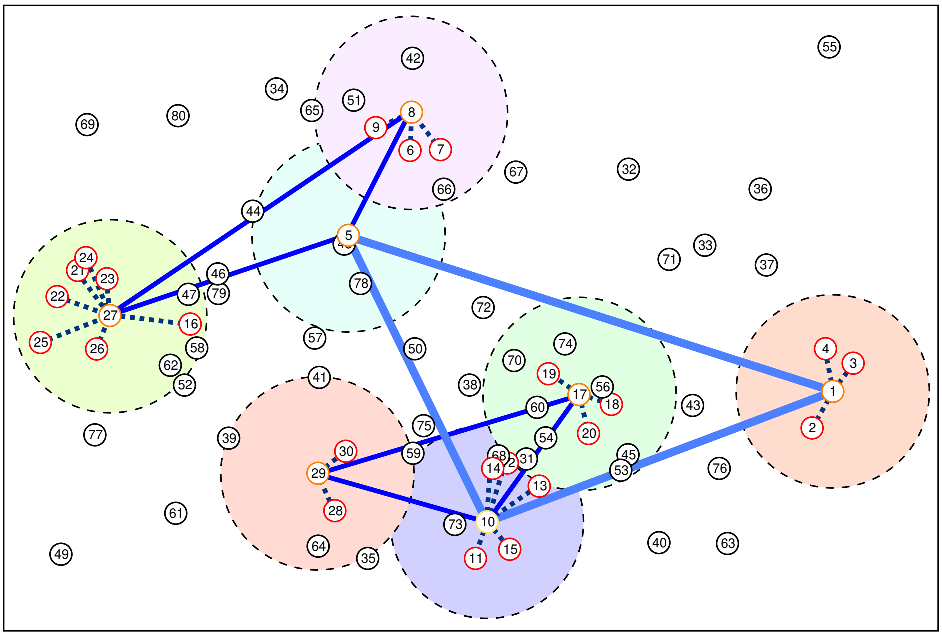


Abbildung 5: Hierarchisches Overlay-Netz mit lokalen Broadcast-Clustern.

sultiert offensichtlich in einer deutlichen Verkleinerung des Overlay-Netzes, da von den insgesamt 30 Gruppenmigliedern nun lediglich 7 dem Overlay beitreten müssen.

Insgesamt ähnelt das Overlay-Netz nun einem Backbone, über welches Multicast-Daten fließen. Das Netzwerk selbst ist nun mit einem Infrastruktur-basierten WLAN vergleichbar, wobei das Overlay-Netz die Kommunikationsinfrastruktur bildet. Die lokal beigetretenen Gruppenmitglieder können hierbei als die mobilen Endgeräte des WLANs aufgefasst werden. Diese befinden sich in Übertragungsreichweite von Access-Points, welche in diesem Fall die Knoten des Overlays sind. Letztere organisieren sich mit Hilfe des eigentlichen Overlay-Netzes und tauschen untereinander Daten über dieses aus.

Die aufgebaute Infrastruktur ist hier jedoch äußerst flexibel, da sie ständig um weitere Gruppenmitglieder erweitert werden kann. Ebenso ist es nach Abschnitt 2.2 auch möglich, vorhandene Infrastruktur abzubauen, falls diese nicht benötigt wird oder keinen Effizienzgewinn mehr darstellt. Hierbei bietet sich nun inbesondere auch die Möglichkeit, gezielt leistungsfähigere Endgeräte in die Infrastruktur aufzunehmen und auf diese Weise leistungsschwächere Geräte von erweiterten Gruppen-spezifischen Aufgaben zu entlasten. Die Beurteilung der Leistungsfähigkeit eines Geräts kann beispielsweise aufgrund des zur Verfügung stehenden Pufferspeichers, der Sendereichweite oder auch des derzeitigen Akku-Zustands erfolgen.

2.3 Dezentraler Gruppenbeitritt

In Festnetzen wird zur Bewerkstelligung des Gruppenbeitritts oftmals auf so genannte Web- oder Host-Caches zurückgegriffen. Hierbei handelt es sich um zentrale Server, welche beitretenden Endsystemen Informationen über derzeit im Overlay vertretene Gruppenmitglieder bereitstellen. Ist einem beitretenden Knoten erst einmal ein Overlay-Knoten bekannt, kann über diesen der eigentliche Gruppenbeitritt erfolgen. In mobilen Ad-hoc-Netzen kann jedoch derart zentrale Infrastruktur nicht vorausgesetzt werden, so dass ein Mechanismus benötigt wird, welcher den Gruppenbeitritt vollständig dezentral realisiert.

Aufgrund der in Abschnitt 2.2 entworfenen Struktur lokaler Broadcast-Cluster bietet sich eine Unterteilung des Beitrittsprozesses in zwei Phasen an: Die lokale Beitrittsphase und die Phase des Overlay-Beitritts. In ersterer wartet der beitretende Knoten passiv auf den Empfang eines Heartbeats von einem umliegenden Overlay-Knoten. Wird ein solches empfangen, ist der Gruppenbeitritt bereits abgeschlossen, da nun die Adresse eines Overlay-Knotens bekannt ist, und von diesem Multicast-Daten aller Gruppenmitglieder bezogen werden können. Bleibt der Empfang eines Heartbeats jedoch für eine gewisse Dauer aus, geht der Knoten in die Phase des Overlay-Beitritts über. In dieser wird die Eingliederung in das Overlay-Netz versucht. Der hierfür benötigte Overlay-Knoten wird ausfindig gemacht, indem das (drahtlose) Netzwerk mit speziellen Paketen geflutet wird. Um die Belastung des Netzes in Grenzen zu halten, wird hierzu auf exponentielles Fluten zurückgegriffen. Erhält ein Overlay-Knoten ein solches Paket, beantwortet er dieses und versorgt das beitretende Mitglied so mit den Informationen, die für den letztendlich erfolgenden Overlay-Beitritt benötigt werden.

2.4 Fehlerbehebung

Während in Festnetzen zum Aufbau der Transportverbindung von Overlay-Netzen meist TCP zum Einsatz kommt, ist dieses Protokoll für den Einsatz in mobilen Ad-hoc-Netzwerken jedoch nicht geeignet, da damit nur geringe Durchsätze bei hohen Latenzzeiten erzielt werden können [Lu03]. Zur Kommunikation zwischen Endsystemen ist in MANETs daher der Einsatz von UDP vorzuziehen. Um den sehr häufigen Paketverlusten entgegen zu wirken, ist dann jedoch der Einsatz eigener Mechanismen zur Fehlerbehebung notwendig.

2.4.1 Übertragungswiederholungen

In [Ba03] ist hierfür ein Ansatz beschrieben, der auf Empfänger-basierten Sendewiederholungen basiert. Hierbei wird ein verloren gegangenes Paket aufgrund von lückenhaften Sequenznummern erkannt und von einem betroffenen Empfänger anhand eines NACK-Pakets erneut angefordert. Um das bekannte Problem der Senderimplosion zu vermeiden und eine zügige Behebung der Verluste zur ermöglichen, werden NACK-Pakete an jenen Knoten gerichtet, welcher auf dem Datenpfad einer Multicast-Quelle dem betroffenen Empfänger direkt übergeordnet ist. Ebenso sind einfache Mechanismen möglich, welche die Unterdrückung überflüssiger NACK-Pakete realisieren. So kann jedes Datenpaket zusätzlich zur eigentlichen Sequenznummer ein weiteres Feld enthalten, über welches ein Gruppenmitglied seine auf dem Datenpfad untergeordneten Knoten informieren kann, bis zu welcher Sequenznummer Datenpakete selbst erfolgreich erhalten wurden. Auf diese Weise kann erreicht werden, dass Empfänger keine Wiederholungsanfragen für Pakete senden, über welche auch der auf dem Datenpfad übergeordnete Knoten nicht verfügt. Lokal beigetretene Gruppenmitglieder haben zusätzlich die Möglichkeit, NACK-Pakete mit einer zufällig gewählten Verzögerung und als Broadcast zu versenden. Hiermit erhalten sich in Übertragungsreichweite befindende Knoten die Chance, Wiederholungsanfragen mitzuhören und so eigene Anfragen zu unterdrücken.

2.4.2 Fluss- und Staukontrolle

Dem in Kombination mit Empfänger-basierten Zuverlässigkeitsmechanismen auftretenden Problem unendlicher Puffer kann Rechnung getragen werden, indem die Datenverteilung mit einer einfachen Fluss- bzw. Staukontrolle gekoppelt wird. Hierzu senden Mitglieder des Overlays an den auf dem Datenpfad übergeordneten Knoten periodisch ACK-Pakete, welche so genannte *minimale kumulierte Sequenznummern* enthalten. Diese ergeben sich für jeden Overlay-Knoten aus dem Minimum aller (von untergeordneten Knoten) durch ACK-Pakete selbst erhaltenen sowie der eigenen zuletzt empfangenen, Reihenfolgegetreuen Sequenznummer. Auf diese Weise wird der Empfangsstatus aller Overlay-Knoten in Richtung der Multicast-Quelle propagiert, so dass diese davon in Kenntnis gesetzt wird, wie sehr Empfänger im Laufe der Übertragung zurückgefallen sind. Überschreitet dieses Maß einen gewissen Wert, stellt die Quelle das Versenden neuer Daten ein, so dass das Medium von den Empfängern ausschließlich zur Behebung von Paketverlusten genutzt werden kann. Somit wird sichergestellt, dass die Differenz der von einer Quelle als nächstes gesendeten und der geringsten von allen Overlay-Knoten empfangenen Sequenznummer begrenzt wird.

Zu beachten ist hierbei, dass der Empfangsstatus lokal beigetretener Knoten nicht berücksichtigt werden kann, da diese gemäß Abschnitt 2.2 den Overlay-Knoten unbekannt sind. Gerechtfertigt wird dies durch die Tatsache, dass Fehlerbehebungen innerhalb von lokalen Clustern sehr schnell vollzogen werden können, da der Prozess räumlich stark begrenzt (1 Hop) ist.

2.4.3 Entkopplung des Datenflusses vom Overlay

Die in Abschnitt 2.1 eingeführte Adaption des Overlay-Netzes an die Topologie des zugrunde liegenden (drahtlosen) Netzwerks hat zur Konsequenz, dass fortlaufend Transportverbindungen auf- und abgebaut werden. Die innerhalb eines Overlay-Netzes zur Weiterleitung von Daten benötigte und oftmals periodisch versendete Routing-Information kann im Falle von Topologie-Änderungen des Overlays für kurze Zeit inkonsistent sein. Dieser Effekt wird zusätzlich dadurch verstärkt, dass die versendete Routing-Information ebenfalls aufgrund von Kollisionen verloren gehen kann. Insgesamt kann die Propagation aktueller Routing-Information demnach beträchlicht verzögert werden. Dies hat zur Folge, dass der von einer Multicast-Quelle ausgehende Datenstrom für eine bestimmte Zeitspanne nicht allen Gruppenmitgliedern zugestellt wird.

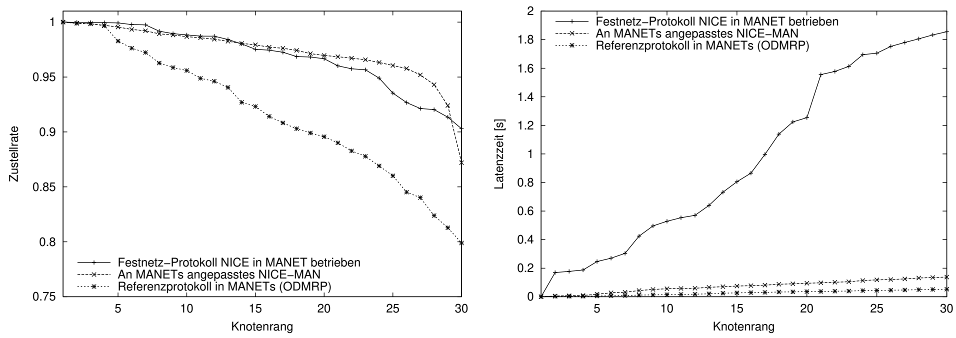
Dieses Problem kann umgangen werden, indem die Weiterleitung von Multicast-Daten von der eigentlichen Topologie des Overlay-Netzes entkoppelt wird. Hierzu versendet eine Multicast-Quelle periodisch Kontrollpakete, welche entlang des Overlays gemäß dessen Multicast-Routings zu allen Gruppenmitgliedern geleitet wird. Auf diese Art erfahren letztere in gewohnter Weise von jenem Knoten, welcher ihnen auf dem Datenpfad der Quelle direkt übergeordnet ist. An einen solchen Knoten richtet ein Empfänger die in Abschnitt 2.4.2 beschriebenen ACK-Pakete und signalisiert diesem damit den Wunsch, Daten der Multicast-Quelle zu beziehen. Die eigentliche Weiterleitung der Multicast-Daten erfolgt nun nicht mehr aufgrund des Overlay-Routing-Protokolls, sondern in Richtung jener Knoten, von denen derzeit ACK-Pakete empfangen werden. Letztere dienen somit nicht nur der Quittierung erfolgreich erhaltener Pakete, sondern auch dem Aufbau einer zweiten, von dem ursprünglichen Overlay-Routing-Protokoll unabhängigen Forwarding-Tabelle.

Treten nun aufgrund von Änderungen der Overlay-Topologie Inkonsistenzen des Overlay-Routings auf, äußert sich dies für die bisher davon betroffenen Knoten nun nur noch durch das Ausbleiben der von der Quelle periodisch versendeten Kontrollpakete. Unabhängig hiervon richten Empfänger jedoch weiterhin ACK-Pakete an ihren zuletzt bekannten Elternknoten, so dass die Weiterleitung von Multicast-Daten weiterhin stabil bleibt. Nach Auflösung der Routing-Inkonsistenzen ist es für einige Empfänger möglich, die Kontrollpakete der Quelle von einem anderen Elternknoten zugestellt zu bekommen. In solch einem Fall erfolgt ein Wechsel des Elternknotens. Dabei ist zu beachten, dass während des Wechsels vorübergehend ACK-Pakete sowohl an den zuletzt bekannten als auch an den neuen Elternknoten versendet werden, um sicher zu gehen, dass auch im Laufe des Wechsels die Zustellung der Daten stabil bleibt.

Wie schnell einzusehen ist, müssen Transportverbindungen des Overlay-Netzes nun in zwei Phasen abgebaut werden. So ist es durchaus möglich, dass eine innerhalb des Overlay-Netzes abgebaute bzw. nicht länger benötigte Verbindung noch für kurze Zeit zur Zustellung von Multicast-Daten verwendet wird.

3 Das Protokoll NICE-MAN

Bei dem Protokoll NICE-MAN handelt es sich um eine für den Betrieb in MANETs angepasste und erweiterte Version des NICE-Protokolls [BBK02]. Letzteres stammt aus dem Festnetzbereich und wurde im Hinblick auf Endsystem-basierte Übertragung von Multicast-Daten entwickelt. Das NICE-Protokoll organisiert Gruppenmitglieder anhand hierarchischer, vollvermaschter Cluster, so dass eine sehr gute Skalierbarkeit des Protokolls erwartet werden kann. Das NICE-Protokoll integriert bereits einige elementare Operationen zur Adaption der aufgebauten Hierarchie an die Topologie des zugrunde liegenden Festnetzes, so dass das Overlay-Netz für den Betrieb in mobilen Ad-hoc-Netzwerken bereits ein gewisses Maß an Flexibilität mit sich bringt. Das NICE-MAN-Protokoll ist entstanden, indem das NICE-Protokoll aus dem Festnetz um die in Abschnitt 2 beschriebenen



(a) Zustellrate

(b) Latenzzeit

Abbildung 6: Ergebnisse einer unzuverlässigen Datenverteilung.

Mechanismen erweitert wurde.

4 Evaluation

Zur Evaluation des NICE-MAN-Protokolls wurde die Simulationsumgebung QualNet verwendet. Um ein einführend erwähntes universitäres Umfeld zu aproximieren wurde ein Simulationsareal von $1000m$ x $1000m$ gewählt, auf welchem sich eine Gesamtheit von 80 mobilen Endgeräten aufhält. 30 dieser Geräte treten innerhalb der ersten 2 Minuten Simulationszeit einer Multicast-Gruppe bei. Die Gruppenmitglieder selbst sind zu kleinen Knotenverbänden zusammengefasst und bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von maximal $1\frac{m}{s}$. Die übrigen 50 Knoten folgen einem zufälligen Bewegungsmuster mit einer Höchstgeschwindigkeit von $2\frac{m}{s}$. Die Sendereichweite aller Knoten beträgt $150m$, wobei als Medienzugriffsprotokoll 802.11 mit CSMA/CA eingesetzt wird.

Die durch die Simulationen erhaltenen Ergebnisse sind als Knotenränge dargstellt. Hierfür werden innerhalb eines Szenarios die Ergebnisse für jeden Knoten gemittelt und sortiert aufgetragen. Um eine Glättung der gemessenen Werte zu erhalten, wurden die Messungen von insgesamt 20 im Voraus berechneten Bewegungsszenarien gemittelt, wobei die Szenarien mit jeweils unterschiedlichen Startwerten zur Bildung von Pseudozufallszahlen simuliert wurden.

4.1 Unzuverlässige Datenverteilung

Um einen Vergleich mit herkömmlichen Multicast-Routing-Protokollen zu erhalten, wurde zunächst eine einfache unzuverlässige Datenverteilung gefahren. Dabei fängt nach 3 Minuten Simulationszeit eine Multicast-Quelle mit der Übertragung eines kontinuierlichen Datenstroms an. Der Strom wird für eine Dauer von 5 Minuten versendet und besteht aus Paketen der Größe von 512 Bytes, welche in einem Intervall von 500*ms* verschickt werden. Es ergibt sich demnach eine Datenrate von 1 Kbyte pro Sekunde, welche einer Gruppe von 29 Empfängern zugestellt wird. Als Multicast-Routing-Protokoll wurde ODMRP eingesetzt, welches als Referenzprotokoll für Multicast-Übertragungen in MANETs gilt.

Die erhaltenen Ergebnisse sind in Abbildung 6 aufgetragen. Wie Abbildung 6(a) zu entnehmen ist, ist die allgemeine Zustellrate des Endsystem-basierten NICE-Protokolls höher als die Zustellrate, welche mit ODMRP erzielt wird. So werden bei der Verteilung über das Overlay in etwa doppelt so viele Pakete erfolgreich zugestellt. Erklärt werden kann dieses Ergebnis anhand des Zugriffsprotokolls, welches bei der Übertragung von Daten über die Transportverbindungen des Overlays zum Einsatz kommt. So finden hier auf MAC-Schicht bei der Detektion von Kollisionen bereits simple Sendewiederholungen statt, während ODMRP auf vollständig unzuverlässigen Broadcasts aufsetzt. Wie aus der Abbildung ebenfalls erkennbar ist, spielt es bei der Datenverteilung über das NICE-Overlay im Hinblick auf die reine Zustellrate zunächst keine gravierende Rolle, ob das in MANETs vorhandene geteilte Medium berücksichtigt wird oder nicht. So weicht die Zustellrate der Verteilung anhand des NICE-Overlays von der Kurve der Verteilung anhand des NICE-MAN-Overlays lediglich für die schlechtesten Knoten ab.

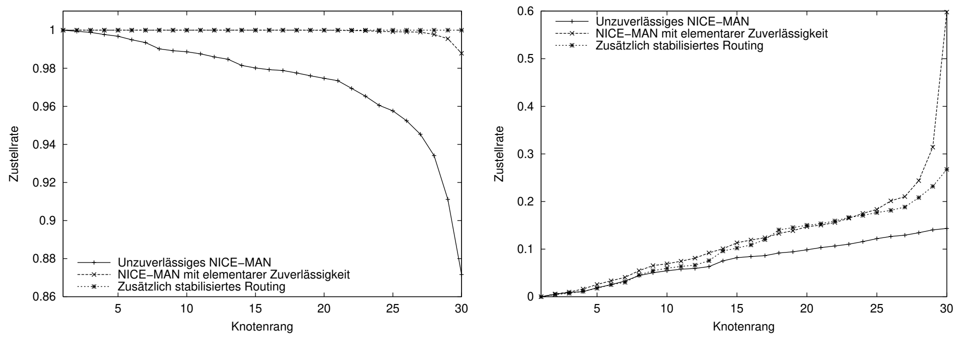
Dies ändert sich jedoch drastisch, wenn zusätzlich die erzielten Latenzzeiten aus Abbildung 6(b) ins Auge gefasst werden. Hier ist inbesondere gut zu erkennen, dass sich die Nutzung des geteilten Mediums als stark vorteilhaft erweist. So kann hierdurch die allgemeine Latenzzeit in etwa um den Faktor 10 reduziert werden. Grund dafür ist, dass nah beieinander liegende Knoten nicht länger individuell anhand mehrerer Unicast-Operationen, sondern zusammen durch eine einzige Broadcast-Operation adressiert werden. Die bei reiner Unicast-Adressierung auf engem Raum stattfindenden Übertragungswiederholungen auf MAC-Schicht bleiben somit aus. Trotz der deutlichen Verbesserung bleibt die von ODMRP erreichte Latenzzeit jedoch unerreicht.

4.2 Datenverteilung mit Fehlerbehebung

Die Ergebnisse der Evaluation der in Abschnitt 2.4 beschriebenen Verfahren zur Fehlerbehebung findet sich in Abbildung 7. Hierbei wurde die in Abschnitt 4.1 eingeführte Datenrate auf 4 Pakete pro Sekunde verdoppelt, so dass sich eine Rate von 2 Kbytes pro Sekunde ergibt. Die Dauer der Übertragung von 5 Minuten wurde beibehalten. Der für die Flussbzw. Staukontrolle verwendete Puffer hat eine Kapazität von 48 Paketen, welche demnach eine Pufferung von 12 Sekunden des Datenstroms erlaubt.

Wie nicht anders zu erwarten wäre, sind die Zustellraten (Abbildung 7(a)) bei Verwendung elementarer Zuverlässigkeitsmechanismen[1] bedeutend höher als bei einer vollständig un-

[1] Mit dem Begriff der elementaren Zuverlässigkeitsmechanismen ist hier die Verwendung von Sendewiederholungen zur Behebung von Paketverlusten und einer Fluss- bzw. Staukontrolle zur Vermeidung der Überlastung des Mediums gemeint.



(a) Zustellrate

(b) Latenzzeit

Abbildung 7: Ergebnisse einer Datenverteilung mit Fehlerbehebungsmechanismen.

zuverlässigen Datenverteilung. So kann bereits für mehr als die Hälfte aller Gruppenmitglieder eine ideale Zustellrate von 1.0 erreicht werden. Für die übrigen Knoten sind einige wenige Paketverluste ($\leq 1\%$) trotz Sendewiederholungen nicht zu beheben. Ursache hierfür ist die in Abschnitt 2.4.3 genannte zeitweise inkonsistente Routing-Information innerhalb des Overlays. Da manchen Gruppenmitgliedern der Datenstrom über einen gewissen Zeitraum hinweg nicht zugestellt werden kann, ist ein Puffer von 48 Paketen unter Umständen nicht ausreichend, um die aufgetretenen Paketverluste zu beheben. Wird jedoch der Datenstrom gemäß Abschnitt 2.4.3 vom Overlay entkoppelt und somit das Routing der Multicast-Daten stabilisiert, kann für alle 29 Empfänger eine ideale Zustellrate erreicht werden.

Abbildung 7(b) ist zu entnehmen, dass die Verwendung von Übertragungswiederholungen erwartungsgemäß eine Erhöhung der Latenzzeit nach sich zieht. Für die jeweils schlechtesten Knoten fällt diese bei Verwendung elementarer Zuverlässigkeitsmechanismen relativ drastisch aus. Grund hierfür ist analog zu oben die Inkonsistenz der Routing-Information. So tritt für Pakete, die erst nach der Behebung einer solchen Inkonsistenz zugestellt werden, eine hohe Verzögerung auf. Durch das Stabilisieren des Routings kann diese Verzögerung jedoch erfolgreich reduziert werden.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden Konzepte vorgestellt, welche eine deutliche Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Overlay-Netzen im Hinblick auf die Realisierung eines Multicast-Dienstes ermöglichen. So wurde insbesondere gezeigt wie die Broadcast-Eigenschaft des geteilten Mediums genutzt und so eine beträchtliche Steigerung der Effizienz erreicht werden kann. Zusätzlich wurden Mechanismen genannt, die den in MANETs sehr häufig auftretenden Paketverlusten Rechnung tragen. In diesem Zusammenhang wurden sowohl Sendewiederholungen sowie eine Fluss- bzw. Staukontrolle beschrieben, als auch ein Verfahren zur Stabilisierung des Routings der Multicast-Daten. Die abschließend durchgeführte Evaluation hat gezeigt, dass sich die vorgestellten Verfahren bewähren, und sich mit ihnen eine zuverlässige Zustellung von 2 KBytes pro Sekunde an eine Gruppe von 29 mobilen Empfänger bewerkstelligen lässt.

Zukünftige Arbeiten werden sich damit beschäftigen, wie sich Overlay-Netze im Hinblick auf die Verteilung von Multicast-Daten effizienter gestalten lassen. Hierfür werden sowohl weitere, bereits existierende Ansätze untersucht, als auch eigene Ansätze entworfen werden. Ebenso stellt sich die Frage, inwieweit die in Abschnitt 2.2.1 gewagte Interpretation zutrifft und ob die aufgebaute Infrastruktur auch zur Erbringung anderer Dienste genutzt werden kann.

Literatur

[Ba03] Baumung, P.: Implementierung und evaluation eines hierarchischen endsystem-multicast-protokolls für mobile ad-hoc-netze. Master's thesis. Universität Karlsruhe (TH). August 2003.

[BBK02] Banerjee, S., Bhattacharjee, B., und Kommareddy, C.: Scalable application layer multicast. In: *ACM SIGCOMM 2002*. Pittsburgh, PA, USA. June 2002.

[Bl04] Blödt, S.: Efficient end system multicast for mobile ad hoc networks. In: *The First International Workshop on Mobile Peer-to-Peer Computing*. Orlando, Florida, USA. March 2004.

[GM03] Gui, C. und Mohapatra, P.: Efficient overlay multicast for mobile ad hoc networks. In: *The Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. New Orleans, Louisiana, USA. March 2003.

[LTM99] Liu, M., Talpade, R. R., und McAuley, A.: AMRoute: Adhoc multicast routing protocol. Technical Report TR 99-1. Center for Satellite and Hybrid Communication Networks. 1999.

[Lu03] Luhm, E.: Implementierung und evaluation eines endsystem-multicast-protokolls für mobile ad-hoc-netze. Master's thesis. Universität Karlsruhe (TH). February 2003.