



Positionsbasiertes Routing für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen

Position-Based Routing for Inter-Vehicle Communication

Martin Mauve, Universität Mannheim

Hannes Hartenstein, NEC Europe Network Labs, Heidelberg

Holger Füllner, Jörg Widmer, Wolfgang Effelsberg, Universität Mannheim

Die Möglichkeit, mit Hilfe von drahtloser Kommunikation Nachrichten zwischen Fahrzeugen auszutauschen, wird in naher Zukunft das Autofahren sicherer und komfortabler gestalten. Insbesondere das Weiterleiten dieser Nachrichten von einem Sender zu einem oder mehreren Empfängern stellt hierbei eine interessante Herausforderung dar. In diesem Artikel wird ein positionsbasiertes Ad-Hoc-Routing-Verfahren vorgestellt, welches dieses Problem löst. Dabei arbeiten die Fahrzeuge selbst bei der Weiterleitung von Nachrichten zusammen, so dass keine flächendeckende Infrastruktur notwendig ist. Der vorgeschlagene Ansatz ist daher sowohl kostengünstig als auch robust gegenüber dem Ausfall einzelner Komponenten. Um die Funktionsfähigkeit des positionsbasierten Ad-Hoc-Routing-Verfahrens nachzuweisen, wurden realitätsnahe Fahrzeugbewegungen erzeugt und als Grundlage für eine Simulationsstudie mit dem Netzwerksimulator ns-2 verwendet. Die Studie belegt, dass auch für die Kommunikation über größere Distanzen und über mehrere Fahrzeuge hinweg sehr gute Zustellraten erreicht werden.

In the near future communication between vehicles by means of wireless technology will enhance both safety and comfort of the passengers. One main challenge in realizing this communication will be the routing of messages from one sender to one or more receivers. In this paper we propose a position-based ad-hoc routing protocol which solves this problem. In this protocol all vehicles work together, thus no pre-established infrastructure is required. As a consequence, the resulting network is inexpensive and robust. In order to prove the viability of the approach, a simulation study was performed using the ns-2 network simulator. As a basis for this study realistic car movement patterns were used. The study shows that even over large distances requiring message forwarding by multiple vehicles, high success rates for the delivery of messages are achieved.

1 Einleitung

Zwei wesentliche Ziele unserer automobilen Gesellschaft sind die Verbesserung der Verkehrssicherheit sowie die Steigerung des Komforts beim Reisen. So wurden Fahrzeuge mit ABS, Airbags, elektronischem Abstandsmesser, CD-Spieler und anderen Elementen ausgerüstet, um das Fahren sicherer und komfortabler zu gestalten. Bislang sind solche Elemente immer Eigenschaften eines individuellen Fahrzeuges gewesen. Die Existenz von preisgünstigen und standardisierten Lösungen für die drahtlose Kommunikation wird es in Zukunft zusätzlich ermöglichen, dass Sicherheit und Komfort im Verkehr durch verbesserte Koordination und Zusammenarbeit der Fahrzeuge erhöht werden.

Eine Vielzahl von Anwendungen wird durch eine solche Kooperation zwischen Fahrzeugen möglich. Zum Beispiel können die Fahrer von Fahrzeugen rechtzeitig gewarnt werden, wenn sie sich einem Stauende nähern. Oder ein Fahrzeug kann den nachfolgenden Fahrzeugen die aktuellen Strassenbedingungen wie Glatteis oder Aquaplaning mitteilen. Weiterhin ist es durch Austausch von Nachrichten möglich, Kolonnenfahrten – das so genannte Platooning – zu koordinieren. Natürlich kann die Kommunikation zwischen Fahrzeugen auch zur Unterhaltung dienen oder solche Teilnehmer in das Internet einbinden, die selbst keinen direkten Internetzugang besitzen.

Um diese Anwendungen zu ermöglichen, werden neben dem *radio broadcast*, der alle Nachbarn in Funkreichweite eines Senders erreicht, mindestens folgende zwei Kommunikationsformen benötigt:

- das Senden einer Nachricht von einem Sender an einen Empfänger (Unicast),
- das Senden einer Nachricht von einem Sender an einen oder mehrere Empfänger in einer bestimmten geografischen Region (Geocast).

Bei beiden Kommunikationsformen können sich der oder die Empfänger außerhalb der Funkreichweite des ursprünglichen Senders einer Nachricht befinden. In diesem Fall ist entweder eine umfassende Kommunikationsinfrastruktur notwendig, oder die Nachrichten müssen von einem Sender an einen oder mehrere Empfänger über mehrere Fahrzeuge hinweg weiter geleitet werden.

In dieser Arbeit gehen wir von der Annahme aus, dass eine flächendeckende Infrastruktur, die den Anforderungen der Kommunikation zwischen Fahrzeugen hinsichtlich Übertragungsgeschwindigkeit und Kosten gewachsen ist, nicht existiert, und dass deshalb die Nachrichtenübertragung durch die Fahrzeuge selbst bewerkstelligt werden muss. Wir betrachten also das Netzwerk, das durch die Fahrzeuge selbst gebildet wird, als ein *mobiles Ad-Hoc-Netz*, in dem jeder Knoten sowohl als Endsystem als auch als Router operiert. Ziel dieses Artikels ist es, geeignete Routing-Verfahren für solche Fahrzeug-Netze aufzuzeigen. Die größte Herausforderung hierbei ist die hohe Geschwindigkeit, mit der sich die Topologie des Netzes ändert. Insbesondere wenn der Gegenverkehr in die Weiterleitung von Nachrichten einbezogen wird, ist es nicht einfach, Wege von einem Sender zu einem oder mehreren Empfängern zu finden.

Der vorliegende Artikel gliedert sich wie folgt: Im nächsten Abschnitt werden existierende Ansätze zur Weiterleitung von Nachrichten in mobilen Ad-Hoc-Netzwerken klassifiziert. Dabei argumentieren wir, dass insbesondere Verfahren, die die geografische Position von Fahrzeugen zur Weiterleitung von Nachrichten verwenden, sehr gut für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen geeignet sind. Ein solches Verfahren wird daher im dritten Abschnitt ausführlicher beschrieben. Im vierten Abschnitt wird unter Verwendung simulierter Fahrzeugbewegungen die Leistungsfähigkeit dieses Verfahrens für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen analysiert. Eine Zusammenfassung sowie ein Ausblick auf zukünftige Arbeiten schließen den Artikel ab.

2 Routing in mobilen Ad-Hoc-Netzen

Ansätze zum Routing in mobilen Ad-Hoc-Netzen können in *topologiebasierte* und *positionsbasierte* Verfahren eingeteilt werden. Topologiebasiertes Routing

benutzt die Informationen über die Nachbarschaftsbeziehungen zwischen den einzelnen Knoten, um einen Pfad von einem Sender zu einem oder mehreren Empfängern zu bestimmen. Diese Ansätze können weiter in proaktive und reaktive Verfahren unterschieden werden.

Proaktive topologiebasierte Verfahren verwenden klassische Routing-Algorithmen wie Distanz-Vektor-Routing (DSDV [19]) oder Link-State-Routing (OLSR [3] und TBRPF [6]). Hierbei werden Informationen über alle im Netzwerk verfügbaren Pfade vorgehalten, auch wenn diese zurzeit nicht verwendet werden. Der wesentliche Nachteil dieser Verfahren ergibt sich aus eben dieser Eigenschaft: Das Aufrechterhalten von unbenutzten Pfaden kann aufgrund der häufigen Topologieänderungen eines mobilen Ad-Hoc-Netzes zu einer erheblichen Belastung oder sogar zum Zusammenbruch des Netzes führen [11].

Aufgrund dieser Beobachtung wurden eine Reihe von *reaktiven topologiebasierten Verfahren* entwickelt. Bekannte Beispiele hierfür sind DSR [14], TORA [18] und AODV [20]. Hierbei werden nur diejenigen Pfade aufrecht erhalten, die zurzeit in Verwendung sind. Sollten zu jedem Zeitpunkt nur eine kleine Anzahl aller verfügbaren Pfade in Verwendung sein, so reduziert dies die Belastung des Netzwerkes erheblich. Trotzdem haben auch diese Verfahren eine Reihe von Nachteilen:

- Bevor Pakete geschickt werden können, muss zunächst eine Route aufgebaut werden; daher wird das Senden des ersten Pakets unter Umständen erheblich verzögert.
- Obwohl die Last zur Aufrechterhaltung von benutzten Routen geringer ist als die Last zur Aufrechterhaltung aller Routen, kann bei sehr dynamischen Netzwerken die Last immer noch sehr hoch sein.
- In hochdynamischen Ad-Hoc-Netzen kann eine Verbindung bereits wieder ungültig sein, bevor auch nur ein einziges Datenpaket zugestellt wurde.
- Wird eine Route ungültig, während auf ihr Datenpakete transportiert werden, so müssen diese häufig verworfen werden.

Neben proaktiven und reaktiven topologiebasierten Verfahren gibt es auch hybride Ansätze, die versuchen, die Vorteile beider Verfahren zu kombinieren. Hierzu zählt insbesondere das *Zone Routing Protocol (ZRP)* [4]. Auch bei diesen Ansätzen müssen jedoch wenigstens die benutzten Pfade aufrecht erhalten werden. Somit sind auch hier zumindest die letzten drei Probleme der reaktiven Ansätze immer noch vorhanden. Eine weiterführende Übersicht über topologiebasierte Verfahren findet sich in [7] und [2].

Positionsbasiertes Routing vermeidet einige Einschränkungen der topologiebasierten Ansätze durch die Verwendung von zusätzlichen Informationen. Ins-



besondere wird erwartet, dass jeder Knoten seine eigene geografische Position bestimmen kann. In Fahrzeugen wird dies üblicherweise durch den Einsatz von GPS geschehen, es sind jedoch auch andere Mechanismen vorstellbar [3]. Durch das regelmäßige Senden von so genannten Beacons teilt jeder Knoten seinen Nachbarn die eigene Position mit. Diese Informationen werden in einer Nachbarschaftstabelle gespeichert.

Möchte ein Sender ein Paket an einen bestimmten Knoten schicken, so bestimmt er die geografische Position des Empfängers mit Hilfe eines Positionsdienstes. Anschließend wird das Paket einem Nachbarn übergeben, der in Richtung der Position des Empfängers liegt. Idealerweise kann dies dann von Knoten zu Knoten fortgesetzt werden, bis der Empfänger erreicht ist. Beim Senden eines Paketes an alle Knoten in einer Region ist kein Positionsdienst notwendig. Stattdessen kann das Paket direkt in Richtung der Region geleitet und dort geflutet werden.

Da in jedem Knoten nur lokale Entscheidungen getroffen werden, die von der Position des Empfängers und der Position der Nachbarn abhängig sind, ist das Aufrechterhalten von Routen nicht nötig. Somit sind die wesentlichen Nachteile der topologiebasierten Verfahren hier nicht mehr gegeben. Insbesondere in sehr dynamischen Netzen, bei denen die Knoten die eigene Position kennen, ist der Einsatz von positionsbasierten Verfahren daher sinnvoll. Ein mobiles Ad-Hoc-Netz, welches Fahrzeuge als Knoten hat, besitzt diese Eigenschaften: Es ist aufgrund der Geschwindigkeiten von Fahrzeugen hochdynamisch, und zudem werden nahezu alle Fahrzeuge in absehbarer Zukunft mit GPS-Empfängern ausgestattet sein. Aus diesem Grund betrachten wir im Folgenden den Einsatz von positionsbasierten Verfahren für den Einsatz in der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation.

3 Positionsbasiertes Routing

3.1 Positionsdienst

Der Positionsdienst ist ein integraler Bestandteil von positionsbasiertem Routing. Mit Hilfe des Positionsdienstes können Knoten die geografische Position von anderen Knoten erfragen. In klassischen zellbasierten Netzen wird diese Aufgabe von zentralen Positionsservern übernommen, die die Positionsdaten von allen Kommunikationsteilnehmern verwalten. Für mobile Ad-Hoc-Netze ist ein solcher Ansatz nur bedingt geeignet, er widerspricht insbesondere der Infrastrukturunabhängigkeit von mobilen Ad-Hoc-Netzen. Ein Verfahren, das versagt, wenn ein bestimmter Knoten nicht erreicht werden kann, wird der Dynamik dieser Netze nicht gerecht.

Für mobile Ad-Hoc-Netze werden daher vorwiegend Verfahren eingesetzt, bei denen alle oder zumindest viele der Knoten aktiv zum Positionsdienst beitragen. Grundsätzlich unterscheiden sich die Verfahren darin, welcher Kommunikationsaufwand durch Anfragen an den Positionsdienst entsteht und welcher Speicher- und Kommunikationsaufwand für das Bereithalten und Auffrischen der Positionsinformationen notwendig ist. Verfahren, die die Positionsinformation von allen Knoten in allen Knoten bereithalten, erzeugen fast keine Kosten bei Anfragen, doch der Aufwand bei Positionsänderungen ist sehr groß. Das andere Ende des Spektrums bilden Verfahren, bei denen Knoten nur Informationen über die eigene Position vorhalten und bei Positionsanfragen daher alle Knoten kontaktiert werden müssen, bis der gesuchte Knoten gefunden ist. Hier ist also eine Positionsanfrage besonders teuer, während keinerlei Kosten bei Positionsänderungen anfallen. Viele der bekannten Verfahren liegen in der Mitte des Spektrums, sodass ein Knoten nur Informationen über bestimmte andere Knoten vorhalten muss.

Beispiele für Positionsdienste sind Homezone [18; 12] oder der Grid Location Service (GLS) [3]. Die Position der Homezone eines Knoten A ermittelt sich aus dessen Knoten-Identifizier (im Allgemeinen die IP-Adresse), zum Beispiel durch Anwenden einer Hashfunktion. Alle Knoten innerhalb der Homezone sind dann zuständig für das Verwalten der Positionsinformation des Knotens A . Bei Positionsanfragen muss lediglich wieder die Hashfunktion auf den Identifizier des gesuchten Knotens angewendet werden und dann eine Anfrage an die entsprechende „Heimatregion“ gestellt werden. Gegebenenfalls ist der Einsatz mehrerer Homezones sinnvoll, um das Problem eines *Single-Point-of-Failure* zu vermeiden.

Im Gegensatz dazu wird beim *Grid Location Service* über einen ausgefeilten Mechanismus sicher gestellt, dass mehrere Knoten des Ad-Hoc-Netzes Informationen über die Position eines Knotens speichern. Diese Positionsserver sind in der näheren Umgebung des gesuchten Knotens in hoher Dichte vorhanden und werden mit zunehmendem Abstand zum gesuchten Knoten immer spärlicher. So wird sichergestellt, dass einerseits der Positionsdienst auch für größere Netze skaliert und andererseits geografisch lokale Kommunikation nicht unnötig erschwert wird. Nachteilig ist hier eine deutlich erhöhte Komplexität des Positionsdienstes und eine hohe Anzahl von notwendigen Positionsmeldungen, um bei sehr dynamischen Szenarien konsistente Positionsinformationen zu gewährleisten.

Für die Evaluation von positionsbasiertem Routing für Fahrzeugszenarien in diesem Artikel wurde zunächst ein sehr einfacher und robuster Positionsdienst gewählt: Positionsinformationen werden nicht proaktiv verteilt, sondern nur lokal im Knoten selbst

vorgehalten. Um die Position eines Knotens zu erfahren, wird inkrementelles Fluten (Flooding) angewendet, d.h. zuerst werden alle Knoten im Abstand von zwei Hops per Broadcast gefragt.¹ Ist diese Anfrage erfolglos, wird die maximale Distanz für das Fluten erhöht, bis die Anfrage erfolgreich ist, also der gesuchte Knoten selbst erreicht wird. Wichtige Parameter für den Positionsdienst sind die Art des Inkrementierens des Suchradius (linear oder exponentiell) und die zeitlichen Abstände, nach denen bei ausbleibendem Erfolg der Radius erhöht wird.

Die Vorteile des Verfahrens liegen in seiner Einfachheit und seiner Robustheit. Selbst wenn viele Nachrichten während des Flutens verloren gehen, bleibt die Wahrscheinlichkeit, dass dadurch der Zielknoten nicht gefunden wird, sehr gering. Des Weiteren ist das Verfahren reaktiv; nur wenn tatsächlich Datenverkehr auftritt, werden durch den Positionsdienst Ressourcen verbraucht, da keine Positionsinformationen bei entfernten Knoten konsistent gehalten werden müssen.

Nachteilig wirkt sich die hohe Netzbelastung aus, die durch das Fluten entsteht. Insbesondere wird bei einer Positionsanfrage nicht nur einmal, sondern im Allgemeinen mehrmals mit unterschiedlichen Reichweiten geflutet. In dem Fall, dass die Kommunikation im Netz vorwiegend zwischen wechselnden Kommunikationspartnern stattfindet, kann so ein großer Teil der zur Verfügung stehenden Netzkapazität allein für den Positionsdienst belegt werden.

Es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, diesen sehr einfachen Positionsdienst zu erweitern und zu verbessern, um die oben genannten Nachteile abzumildern. Durch aggressives Caching in allen Knoten, die Positionsanfragen oder -antworten empfangen, kann die Anzahl der nötigen Anfragen drastisch reduziert werden. Auch das Fluten selbst lässt sich so verbessern, dass nicht jeder Knoten die Anfrage an seine Nachbarn weiterleitet, sondern nur eine Untermenge der Knoten, die garantiert, dass jeder Knoten innerhalb des Flutradius erreicht wird.

Wenn als Positionsinformation nicht nur die aktuelle Position, sondern auch Richtung und Geschwindigkeit übertragen werden (Dead-Reckoning), kann die Zeitdauer, für die die Cache-Einträge gültig sind, erhöht werden, da die zukünftige Position des gesuchten Knotens über einen längeren Zeitraum besser vorhergesagt werden kann. Dadurch ergibt sich eine weitere Reduktion fehlgeschlagener Positionsanfragen, die ein erneutes Fluten mit größerem Radius nach sich ziehen. Mit diesen Optimierungen ist auch dieses einfache Verfahren durchaus eine Alternative zu weitaus komplexeren Positionsdiensten.

¹ Die Positionen der direkten Nachbarn sind bereits durch das Beaconing bekannt.

3.2 Positionsbasierte Wegewahl

Zur Weiterleitung eines Paketes bei positionsbasierter Wegewahl benötigt ein Knoten drei Arten von Informationen:

- seine eigene Position, die beispielsweise mit Hilfe von GPS bestimmt werden kann,
- die durch den Positionsdienst bestimmte Position des Empfängers,
- die aufgrund von Beacons bekannte Position seiner Nachbarn.

Mithilfe dieser Informationen sucht sich der weiterleitende Knoten einen Nachbarn aus, der geografisch in Richtung des Empfängers liegt. Prinzipiell sind für die positionsbasierte Wahl des Nachbarn verschiedene Strategien möglich, von denen einige in Bild 1 dargestellt sind. Hierbei ist der weiterleitende Knoten mit S und der Empfänger mit E gekennzeichnet. Der Kreis mit dem Radius r kennzeichnet die Sende-reichweite von S . Eine nahe liegende Strategie ist die Weiterleitung des Paketes an denjenigen Nachbarn, der den größten Fortschritt in Richtung des Empfängers verspricht. Im Beispiel wäre dies der Knoten C . Diese Strategie ist auch als *most forward within radius* (MFR) [21] bekannt und minimiert die Anzahl der Knoten auf dem Weg vom Sender zum Empfänger.

Ist ein Knoten in der Lage, seine Sendeleistung an die Distanz zu einem Kommunikationspartner anzupassen, dann ist es sinnvoll, denjenigen Nachbarn zu wählen, der sowohl einen Fortschritt in Richtung des Empfängers erzielt als auch am dichtesten am weiterleitenden Knoten selbst liegt [13]. Im Beispiel wäre dies der Nachbar A . Diese Strategie vermindert das Risiko, dass sich mehrere gleichzeitig stattfindende Übertragungen gegenseitig stören, und erhöht somit den Erwartungswert des Paketfortschritts in Richtung des Empfängers. Diese Strategie wird als *nearest with forward progress* (NFP) bezeichnet.

Schließlich ist es auch möglich, die geografische Strecke zu minimieren, die ein Paket vom Sender zum Empfänger zurücklegt. Dies geschieht, indem

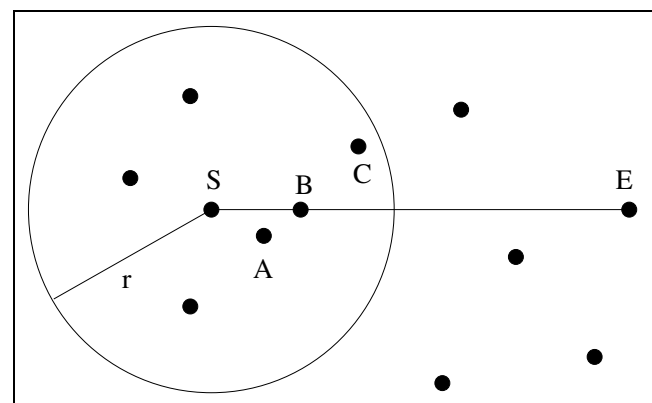


Bild 1: Verschiedene Strategien für die positionsbasierte Routenwahl.

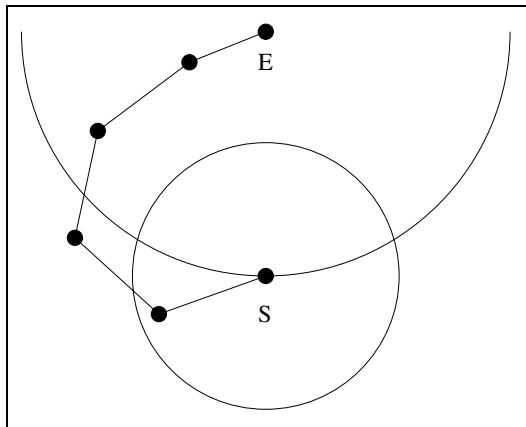


Bild 2: Beispiel für ein lokales Optimum bei der positionsbasierten Routenwahl.

ein Nachbar gewählt wird, der am nächsten zu der Verbindung von weiterleitendem Knoten und Empfänger liegt. Im Beispiel ist dies Knoten *B*. Dieses Vorgehen ist unter dem Namen *compass routing* bekannt [16].

Da bei allen beschriebenen Verfahren ausschließlich lokale Informationen verwendet werden, besteht die Gefahr, ein lokales Optimum zu erreichen, welches das Verfahren selbständig nicht mehr verlassen kann. Ein Beispiel hierfür ist in Bild 2 zu sehen. In diesem Beispiel liegt der weiterleitende Knoten *S* näher am Empfänger *E* als alle Nachbarn von *S*, obwohl es einen gültigen Weg von *S* nach *E* gibt. Somit kann keine der oben beschriebenen Strategien einen geeigneten Nachbarn für das Weiterleiten des Paketes bestimmen.

Prinzipiell gibt es mehrere Möglichkeiten, auf dieses Problem zu reagieren. So ist es beispielsweise vorstellbar, das Paket einfach zu verwerfen und darauf zu vertrauen, dass es von der Transportschicht oder der Anwendung erneut übertragen wird. Da das Netzwerk dynamisch ist, besteht durchaus die Möglichkeit, dass sich die Situation zum Zeitpunkt einer Übertragungswiederholung so verbessert hat, dass kein lokales Optimum mehr vorhanden ist. Alternativ kann das Paket an einen Nachbarn weitergeleitet werden, der weiter vom Empfänger entfernt ist, um so das lokale Optimum zu verlassen. Dann muss jedoch darauf geachtet werden, dass es nicht zu Routing-Schleifen kommt.

Ein Mechanismus hierfür wurde für die Ad-Hoc-Routing-Protokolle *face-2* [1] und *Greedy Perimeter Stateless Routing* (GPSR) [15] vorgeschlagen. Die Idee ist, das Ad-Hoc-Netzwerk als einen planaren Graphen zu betrachten und mit Hilfe der so genannten Rechte-Hand-Regel aus einem lokalen Optimum zu entkommen. Sobald das Paket einen Knoten erreicht, der näher am Empfänger liegt als das lokale Optimum, wird es wieder auf Positionsbasis weitergeleitet.

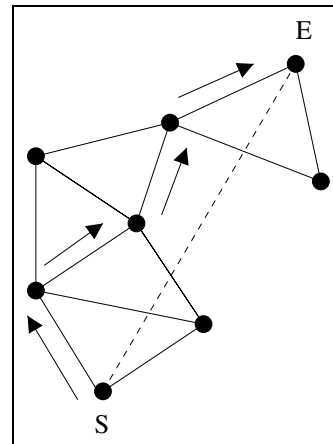


Bild 3: Beispiel für die Anwendung der Rechte-Hand-Regel.

Die Vorgehensweise dieses Mechanismus ist in Bild 3 illustriert. Es sollte angemerkt werden, dass die dargestellte Situation nur zur Verdeutlichung der Rechte-Hand-Regel dient, da übersichtlichkeitshalber kein lokales Optimum vorliegt.

Bei Anwendung der Rechte-Hand-Regel wird zunächst die Verbindung zwischen weiterleitendem Knoten im lokalen Optimum und Zielknoten bestimmt. Dann erfolgt die Weiterleitung des Paketes auf der nächsten Kante in Gegenrichtung der Uhrzeigersinn von dieser Verbindung. Der empfangende Knoten leitet das Paket dann auf der nächsten Kante in Gegenrichtung der Uhrzeigersinn weiter, sofern diese nicht die Verbindung zwischen dem Knoten, in dem die Rechte-Hand-Regel begonnen wurde, und dem Empfänger schneidet. Wenn dies der Fall ist, wird die Kante ausgelassen und die nächste Kante gegen Uhrzeigersinn gewählt. Es kann gezeigt werden, dass die Rechte-Hand-Regel immer den Zielknoten findet, vorausgesetzt, dass der Graph nicht partitioniert ist [1]. Interessant ist, dass alle Informationen für dieses Vorgehen entweder lokal vorhanden sind oder im Paketkopf mit wenig Aufwand mitgeführt werden können, sodass keine globale Sicht auf den Graphen notwendig ist.

Für den Einsatz von positionsbasiertem Routing in der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation stellt sich die Frage, welche der hier vorgestellten Lösungen geeignet sind. Da existierende Lösungen zur drahtlosen Kommunikation (z. B. IEEE 802.11) die Anpassung der Sendeleistung an die Distanz zwischen Sender und Empfänger nicht direkt zulassen, wurde zunächst die Strategie *most forward within radius* für die Auswahl eines Nachbarn gewählt. Für das Verhalten in einem lokalen Optimum scheint die Rechte-Hand-Regel geeignet zu sein. Jedoch ist zumindest auf Landstraßen und Autobahnen zu erwarten, dass lokale Maxima nicht oder nur sehr selten auftreten. Einen Vorteil wird der Einsatz dieses Mechanismus also wahrscheinlich nur innerhalb von Städten erbringen. Dennoch wurde er im Rahmen der im nächsten Abschnitt beschriebenen Evaluation eingesetzt.

4 Quantitative Evaluation durch Simulation

Für die Evaluation der in Abschnitt 3 dargestellten Verfahren hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit in der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation werden Fahrzeugbewegungsmuster benötigt, die realistischen Verkehrssituationen entsprechen. Da Messungen von tatsächlichem Verkehr über einen weiten räumlichen Bereich und eine lange Zeitdauer praktisch nicht durchführbar sind, müssen simulierte Fahrzeugbewegungen herangezogen werden. Verkehr stellt ein sich selbst organisierendes hochdynamisches System dar, dessen Simulation ein eigenes Forschungsgebiet darstellt.² Generell unterscheidet man hierbei makroskopische und mikroskopische Verkehrssimulationen. Bei einem makroskopischen Ansatz wird Verkehr als kompressible Flüssigkeit betrachtet, deren Dichte und Fluss studiert wird. Bei einem mikroskopischen Ansatz hingegen wird jedes einzelne Fahrzeug und seine Position modelliert. Da für die Simulation der Kommunikation zwischen Fahrzeugen die Position jedes einzelnen Fahrzeuges wichtig ist, wurde hier ein mikroskopischer Ansatz gewählt. Zusätzlich sollte sichergestellt werden, dass die zugehörigen makroskopischen Eigenschaften korrekte Werte aufweisen.

Für die vorliegende Studie wurden simulierte Fahrzeugbewegungen auf einem 10 km langen Autobahnabschnitt mit zwei Spuren pro Richtung verwendet. Die Daten wurden mit Hilfe des mikroskopischen Verkehrssimulators FARSI der DaimlerChrysler AG erzeugt. FARSI folgt dem Ansatz der so genannten Fahrerhaltensmodelle: Es werden nicht nur die korrekten Abstände zwischen den Fahrzeugen modelliert, sondern das gesamte Spektrum des Fahrerhaltens einschließlich der Bereitschaft zum Spurwechsel, zum Überholen oder zur Berücksichtigung der Verkehrsgebote fließt in die Modellierung ein. Als Resultat erhält man Fahrzeugbewegungen, die mit Messungen von tatsächlichem Verkehr sowohl hinsichtlich Geschwindigkeiten und Spurbelegung als auch hinsichtlich ihrer makroskopischen Eigenschaften sehr gut übereinstimmen. Bei der Validierung der Bewegungsmuster wurde insbesondere Wert darauf gelegt, dass die Relativgeschwindigkeiten sowie die Geschwindigkeitsänderungen eines jeden Fahrzeugs tatsächlichen Messungen entsprechen, da diese Größen die Veränderung der Netztopologie über die Zeit bestimmen.

Für unsere Studie gehen wir von einer durchschnittlichen Verkehrsdichte von sechs Fahrzeugen pro Spur und Kilometer aus. Die Verteilung der gewünschten Geschwindigkeiten entspricht üblichen Messungen und hat das 50%-Quantil bei 130 km/h. Weiterhin nehmen wir an, dass 15% der Fahrzeuge Lastwagen

sind. Dieses Szenario entspricht schwachem Tagesverkehr auf einer deutschen Autobahn. Die Positionen jedes einzelnen Fahrzeugs auf dem simulierten Streckenabschnitt wurde jede halbe Sekunde zusammen mit Geschwindigkeit, Spur und Beschleunigung abgespeichert. Der Streckenabschnitt wurde für eine Zeitdauer von 200 Sekunden modelliert.

Die Bilder 4 und 5 zeigen die Konnektivität eines Ausschnittes des simulierten Netzes zu einem festen Zeitpunkt, wobei eine Funkreichweite von 250 Metern angenommen wurde. In Bild 4 und 5 fließt der Verkehr horizontal. Um eine sinnvolle Visualisierung zu erhalten, wurden die Bilder in vertikaler Richtung gestreckt.

In dem in Bild 4 illustrierten Szenario sind keine Übertragungen über den Gegenverkehr erlaubt, wohingegen sie in dem in Bild 5 dargestellten Szenario erlaubt sind. Die Konnektivitätsanalyse zeigt, dass das Fahrzeug-Netz deutlich partitioniert ist, wenn der Gegenverkehr nicht in die Weiterleitung von Nachrichten einbezogen wird. Für unsere Untersuchungen erlauben wir daher das Routen über den Gegenverkehr, wobei zu beachten ist, dass dadurch die auftretenden Topologieänderungen häufiger sind, als wenn nur eine Fahrtrichtung betrachtet wird.

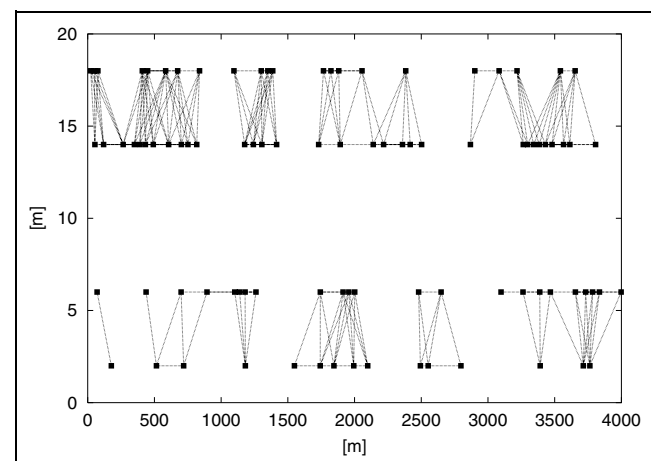


Bild 4: Konnektivität bei Betrachtung einer Fahrtrichtung.

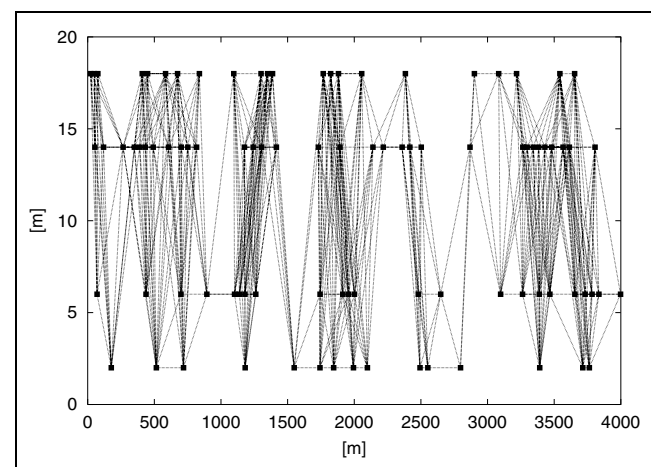


Bild 5: Konnektivität bei Betrachtung beider Fahrrichtungen.

² siehe z. B. www.trafficforum.org

Um die Leistungsfähigkeit von positionsbasiertem Routing für dieses Autobahn-Szenario zu ermitteln, wurde der Netzwerk-Simulator *ns-2* [9] mit dem oben dargestellten Bewegungsmuster als Eingabe verwendet. Um die Ergebnisse unabhängig von den Eigenschaften eines speziellen Medienzugriffsprotokolls zu machen, wurde für *ns-2* ein idealisiertes Verfahren implementiert. Dieses Medienzugriffsprotokoll besitzt keine Kapazitätsrestriktionen und erlaubt zwei Kommunikationspartnern genau dann Nachrichten auszutauschen, wenn diese 250 Meter oder weniger voneinander entfernt sind.

Für das positionsbasierte Routing kam GPSR [15] mit einer Beacon-Frequenz von einem Beacon alle 2 Sekunden zum Einsatz. Der Positionsdienst wurde wie in Abschnitt 3 beschrieben implementiert. In einer ersten Versuchsreihe wurde der Suchradius von zwei Hops ausgehend linear erhöht. Hierbei stellte sich überraschend heraus, dass einige Positionsanfragen trotz Flutens den Zielknoten nicht erreichten. Eine genauere Analyse dieser Positionsanfragen konnte diesen Sachverhalt erklären: Es handelte sich hierbei um Fahrzeuge, die in verschiedene Richtungen fahren. Bei Beginn der Positionsanfrage (2-Hop-Fluten) waren diese n Hops voneinander entfernt, wobei n größer als 2 war. Das Fluten mit der Reichweite 2 war also erfolglos. In der Zeit, die für dieses Fluten benötigt wurde, hatten sich die beiden Fahrzeuge jedoch so weit voneinander entfernt, dass nun mindestens $n + 1$ Hops zwischen ihnen lagen. Die Distanz zwischen den Fahrzeugen wuchs also schneller als der Suchradius. Daher schließen wir, dass für den Positionsdienst ein linear wachsender Suchradius ungeeignet ist. In den folgenden Versuchsreihen wurde der Suchradius exponentiell erhöht.

Weiterhin wurde zunächst eine konstante Wartezeit bis zum Fluten mit der nächsten Reichweite gewählt. Dies stellte sich als ungeeignet heraus, da diese Wartezeit zu Beginn unnötig lang war und bei größeren Flutradien nicht mehr ausreichte, um unnötiges Fluten zu verhindern. Daher wurde auf eine dynamische Wartezeit umgestellt. Diese ergibt sich aus der Reichweite des aktuellen Flutens in Hops, multipliziert mit einer Zeit, die pro Hop benötigt werden darf. Im Weiteren wurde diese Zeit auf 100 ms gesetzt, was überflüssiges Fluten in allen Fällen verhinderte und gleichzeitig ein schnelles Auffinden von Kommunikationspartnern, die nahe beieinander lagen, ermöglichte.

Um eine Aussage über die Güte des vorgeschlagenen Verfahrens zu machen, wurde die Rate der erfolgreich zugestellten Pakete in Abhängigkeit von der maximalen Entfernung zweier Kommunikationspartner ermittelt. Dabei wurden 10 Paare von jeweils einem Sender und einem Empfänger zufällig ausgewählt, so dass diese weniger als eine gewählte maximale Distanz voneinander entfernt sind und es zu jedem Zeitpunkt theoretisch möglich ist, einen

gültigen Weg vom Sender zum Empfänger zu finden. Jeder Sender schickt dann 5 Sekunden lang (modifiziert um eine zufällige Abweichung zur Vermeidung von Synchronisationseffekten) jeweils ein Paket alle 0.25 Sekunden. Erhält ein Empfänger eine Nachricht vom Sender, so antwortet der Empfänger. Diese Antwort beinhaltet insbesondere die aktuelle Position des Empfängers. Ist die Kommunikation zwischen einem Sender-Empfänger-Paar beendet, so wird ein neues Paar zufällig gewählt. Mit denselben Daten wurde auch ein bekanntes reaktives topologiebasiertes Verfahren getestet. Hierfür wurde *Dynamic Source Routing* (DSR) [14] ausgewählt, welches in früheren Studien [10; 11] als besonders effizient und robust bewertet wurde. Die Ergebnisse sind in Bild 6 festgehalten.

Erwartungsgemäß sinkt die Rate der erfolgreich mit DSR zugestellten Pakete mit der maximalen Entfernung zwischen Sender und Empfänger deutlich ab. Der Grund hierfür ist, dass DSR versucht, eine vollständige Route vom Sender zum Empfänger aufrecht zu erhalten. Dies wird immer schwieriger, je weiter diese auseinander liegen. Im Gegensatz dazu zeigt sich der positionsbasierte Ansatz sehr robust und unabhängig von der maximalen Kommunikationsreichweite. Dies ist damit zu erklären, dass nur die Position des Zieles bekannt sein muss und jeder Knoten Informationen über seine direkten Nachbarn benötigt. Letztere sind unabhängig von der Kommunikationsdistanz. Somit kann lediglich die Abweichung zwischen der dem Sender bekannten Position des Empfängers und der wirklichen Position des Empfängers sowie Inkonsistenzen über die Position der lokalen Nachbarn zu unzustellbaren Paketen führen. Durch die geringe Latenzzeit, die eine Positionsanfrage mittels Fluten selbst bei der maximalen Distanz von 4,5 km benötigt, ist die Position des Empfängers jedoch sehr genau beim Sender bekannt. Außerdem ist die Frequenz der Beacon-Übertragung relativ hoch. Daher tritt auch aus diesen Gründen bei Einsatz des idealisierten Medienzugriffsprotokolls kein Paketverlust auf.

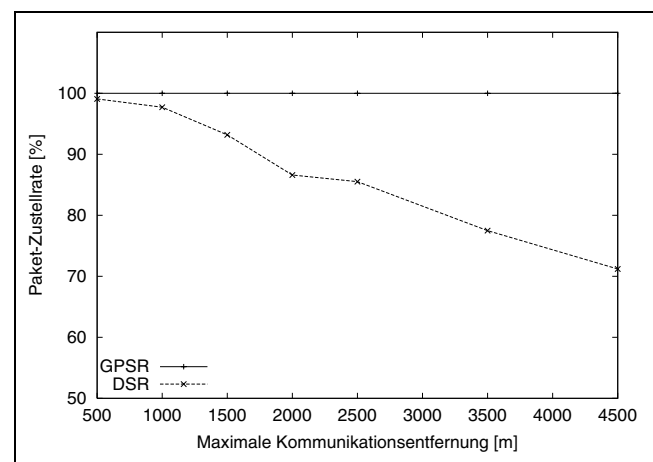


Bild 6: Erfolgsrate bei der positionsbasierten Paketweiterleitung.

Neben der Rate der erfolgreich zugestellten Pakete ist auch der Aufwand für die Zustellung der Pakete wichtig. Um diesen Aufwand zu bestimmen, wurde für beide Verfahren die Anzahl der Sendevorgänge gezählt. Dabei ist die Übertragung eines Datenpaketes von einem Knoten zu seinem Nachbarn genauso teuer wie beispielsweise ein Beacon. Dies ist realistisch, da der Engpass in drahtlosen Netzen in der Regel die Belegung des Mediums ist. Bild 7(a) zeigt die Summe aller Sendevorgänge, die über den gesamten Simulationsverlauf benötigt wurden. Es zeigt sich, dass DSR zunächst niedrig beginnt und dann mit steigender Kommunikationsdistanz stark zunimmt. Im Gegensatz dazu ist das positionsbasierte Verfahren nicht so stark von der maximalen Kommunikationsdistanz abhängig. Dies lässt sich dadurch erklären, dass ein großer Teil von Sendevorgängen im positionsbasierten Fall auf das Senden von Beacons zurückzuführen ist. Diese Sendevorgänge fallen unabhängig von der eigentlichen Kommunikation an und sind daher konstant.

Aufschlussreich ist auch die Betrachtung des Gesamtvolumens aller Datenübertragungen in Bild 7(b). Hier ist bereits bei geringen Distanzen zu bemerken, dass der Aufwand für das positionsbasierte Verfahren deutlich

unter dem von DSR liegt. Der Grund hierfür ist, dass DSR Routen pflegen muss und die hierfür verwendeten Pakete schnell sehr groß werden, da sie eine komplette Route beinhalten. Die Paketgröße für das Versenden von Positionsinformationen ist dagegen sehr klein.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass ein positionsbasiertes Verfahren sowohl eine hohe Rate erfolgreicher Paketzustellungen hat als auch von den Kosten her günstig ist.

Im Rahmen von zukünftigen Simulationen wird es interessant sein, die Auswirkung der Beantwortung von Positionsanfragen aus dem Cache eines Knotens zu analysieren, wenn dieser Knoten nicht das Ziel der Positionsanfrage ist. Hierbei ist zu erwarten, dass durch Caching der Aufwand für die Positionsanfragen sinkt und gleichzeitig auch die Rate der erfolgreich zugestellten Pakete abnimmt. Zudem ist es wichtig zu analysieren, wie das Verhalten eines realen Medienzugriffprotokolls (z. B. IEEE 802.11) die Simulationsergebnisse beeinflusst.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kommunikation zwischen Fahrzeugen wird in naher Zukunft die Sicherheit und den Komfort im Straßenverkehr maßgeblich verbessern. Um unabhängig von der Existenz und Funktionsfähigkeit einer (möglicherweise sehr aufwendigen) Infrastruktur zu sein, können Ad-Hoc-Routing-Verfahren für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen eingesetzt werden. Insbesondere positionsbasierte Ad-Hoc-Routingverfahren sind eine sehr viel versprechende Technologie, um diese Art der Kommunikation zu ermöglichen. Im Rahmen dieses Artikels haben wir gezeigt, dass positionsbasierte Verfahren hervorragende Zustellraten auch über längere Distanzen und mehrere Fahrzeuge hinweg aufweisen.

Die Arbeit in diesem Bereich ist jedoch noch keinesfalls abgeschlossen. Es gilt in weiteren Studien den Einfluss von Medienzugriffsverfahren, wie beispielsweise IEEE 802.11, zu ermitteln und eine Evaluation von Geocast unter Verwendung positionsbasierter Verfahren durchzuführen. Zudem besteht eine Vielzahl von Möglichkeiten, das hier beschriebene Verfahren zu optimieren. So kann beispielsweise versucht werden, die Position von Fahrzeugen vorherzusagen, um so den Cacheeinträgen des Positionsdienstes eine längere Gültigkeit zu verleihen. Weiterhin ist die Auswirkung vieler Parameter noch nicht ausreichend verstanden. Hierzu gehören Beaconsing-Frequenz, Lebenszeit der Cacheeinträge im Positionsdienst, Reichweite einer einen Hop weiten Übertragung und vieles andere mehr. Schließlich ist zu erwarten, dass die Simulation von positionsbasiertem Routing in einem Stadtszenario viele weitere Erkenntnisse und Verbesserungsmöglichkeiten zur Folge haben wird.

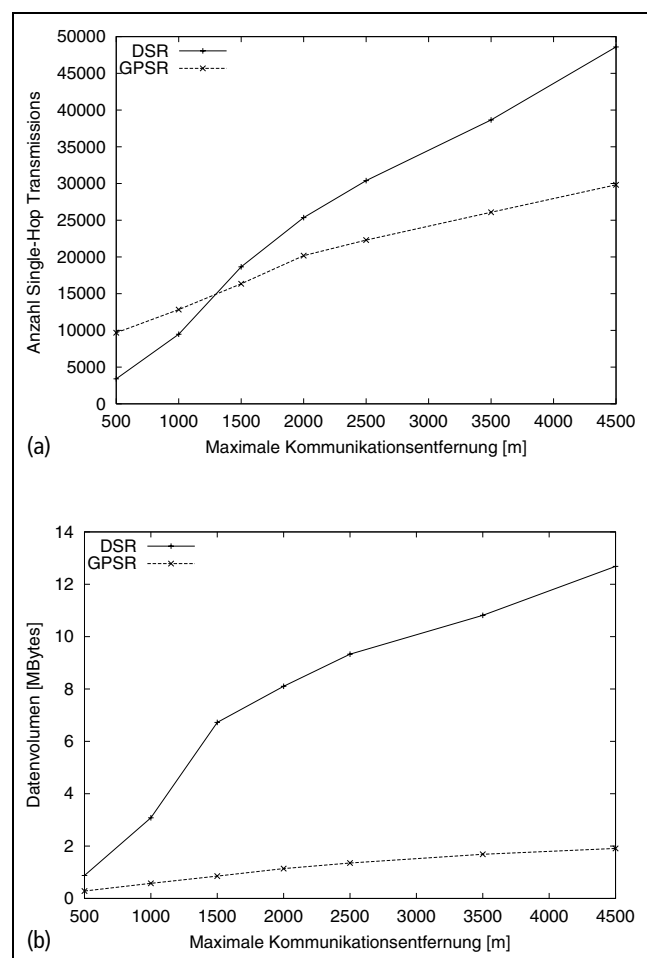


Bild 7: Analyse des Kommunikationsaufwands. (a) Anzahl der 1-Hop Paketübertragungen. (b) Benötigtes Datenvolumen.

Danksagung

Die hier vorgestellte Arbeit wurde im Rahmen des FleetNet Projektes vom Bundesministerium für Bildung und Forschung unterstützt (BMBF Vertragsnummer 01AK025D). Die Autoren bedanken sich insbesondere bei Herrn Dieter Vollmer (DaimlerChrysler) für die mit FARSI ermittelten Daten der Fahrzeugbewegungen und bei Herrn Michael Käsemann (NEC) für die unermüdliche Hilfe mit dem Netzwerksimulator ns-2.

Literatur

- [1] *Bose, P.; Morin, P.; Stojmenovic, I.; Urrutia, J.*: Routing with guaranteed delivery in ad hoc Wireless Networks. In: Proceedings of the 3rd International workshop on Discrete algorithms and methods for mobile computing and communications ACM, 1999, S. 48–55.
- [2] *Broch, J.; Maltz, D. A.; Johnson, D. B.; Hu, Y.-C.; Jetcheva, J.*: A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols. In: Proceedings of the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '98), Dallas, Texas, U.S.A., October 1998, S. 85–97.
- [3] *Clausen, T.; Jacquet, P.; Laouiti, A.; Minet, P.; Muhlethaler, P.; Quayyum, A.; Viennot, L.*: Optimized Link State Routing Protocol. Internet Draft, draftietf-manet-olsr-05.txt, work in progress. October 2001.
- [4] *Haas, Z. J.; Haas, M. R.*: The Performance of Query Control Schemes for the Zone Routing Protocol. In: ACM/IEEE Transactions on Networking 9 (2001), August, Nr. 4, S. 427–438.
- [5] *Li, J.; Jannotti, J.; De Couto, D. S. J.; Karger, D. R.; Morris, R.*: A Scalable Location Service for Geographic Ad Hoc Routing. In: Proceedings of the 6th ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom '00) ACM, 2000, S. 120–130.
- [6] *Ogier, R. G.; Templin, F. L.; Bellur, B.; Lewis, M. G.*: Topology Broadcast Based on Reverse-Path Forwarding (TBRPF). Internet Draft, draft-ietf-manet-tbrpf-03.txt, work in progress. November 2001.
- [7] *Royer, E. M.; Toh, C.-K.*: A Review of Current Routing Protocols for Ad-Hoc Mobile Wireless Networks. In: IEEE Personal Communications (1999), April, S. 46–55.
- [8] *Stojmenovic, I.*: Home agent based location update and destination search schemes in ad hoc wireless networks/Computer Science, SITE, University of Ottawa. 1999 (TR-99-10). – Forschungsbericht.
- [9] *Breslau, L.; Estrin, D.; Fall, K.; Amd J. Heidemann, S. F.; Helmy, A.; Huang, P.; Mccanne, S.; Varadhan, K.; Xu, Y.; Yu, H.*: Advances in Network Simulation. In: IEEE Computer (2000), May.
- [10] *Broch, J.; Maltz, D.; Johnson, D.; Hu, Y.-C.; Jetcheva, J.*: A Performance Comparison of Multi-Hop Wireless Ad Hoc Network Routing Protocols. In: Proc. of the 4th ACM/IEEE Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MOBICOM) '98. Dallas, TX, USA, 1998, S. 85–97.
- [11] *Das, S. R.; Castaneda, R.; YAN, J.*: Simulation Based Performance Evaluation of Mobile, Ad Hoc Network Routing Protocols. In: ACM/Baltzer Mobile Networks and Applications (MONET) Journal (2000), July, S. 179–189.
- [12] *Giordano, S.; Hamdi, M.*: Mobility Management: The Virtual Home Region. 1999. – Forschungsbericht
- [13] *Hou, T.-C.; Li, V. O.*: Transmission Range Control in Multihop Packet Radio Networks. In: IEEE Trans. on Communications 34 (1986), January, Nr. 1, S. 38–44.
- [14] *Johnson, D. B.; Maltz, D. A.*: Dynamic Source Routing in Ad Hoc Wireless Networks. In: Imielinske, T. (Hrsg.); Korth, H. (Hrsg.): Mobile Computing Bd. 353. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [15] *Karp, B.; Kung, H. T.*: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks. In: Proc. of the 6th Annual ACM/IEEE Int. Conf. on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000). Boston, MA, USA, August 2000, S. 243–254.
- [16] *Kranakis, E.; Singh, H.; Urrutia, J.*: Compass Routing on Geometric Networks. In: Proc. of 11th Canadian Conf. on Computational Geometry. Vancouver, August 1999 [17] Mauve, M.; Widmer, J.; Hartenstein, H.: A Survey on Position-Based Routing in Mobile Ad-Hoc Networks. In: IEEE Network 15 (2001), November/December, Nr. 6, S. 30–39.
- [18] *Park, V. D.; Corson, M. S.*: A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Networks. In: Proceedings of IEEE INFOCOMM, 1997, S. 1405–1413.
- [19] *Perkins, C. E.; Bhagwat, P.*: Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV). In: Proceedings of ACM SIGCOMM'94 Conference on Communications Architectures, Protocols and Applications, 1994.
- [20] *Perkins, C. E.; Royer, E. M.*: Ad-Hoc On-Demand Distance Vector Routing. In: Proceedings of the 2nd IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, 1999, S. 1405–1413.
- [21] *Takagi, H.; Kleinrock, L.*: Optimal Transmission Ranges for Randomly Distributed Packet Radio Terminals. In: IEEE Trans. on Communications 32 (1984), March, Nr. 3, S. 246–257.

Dr. Martin Mauve studierte von 1991 bis 1997 Wirtschaftsinformatik an der Universität Mannheim. Zwischen 1996 und 1997 war er Diplomat am International Computer Science Institute (ICSI) der University of California in Berkeley. Von 1997 bis 2000 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Praktische Informatik IV an der Universität Mannheim. Zur Zeit ist er wissenschaftlicher Assistent an der Universität Mannheim.
Adresse: E-Mail: mauve@informatik.uni-mannheim.de

Dr. Hannes Hartenstein studierte Mathematik und Informatik an der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg. Er promovierte von 1995 bis 1998 bei Prof. Dr. D. Saupe am Institut für Informatik der Fakultät für Angewandte Wissenschaften an der Albert-Ludwigs-Universität. Seit 1999 ist er als Wissenschaftler bei den NEC Europe Network Labs in Heidelberg tätig. Er ist NEC-Projektleiter für das vom BMBF unterstützte Projekt 'Fleetnet – Internet on the Road'.
Adresse: E-Mail: hannes.hartenstein@crrle.nec.de

Dipl.-Wirtsch.-Inf. Holger Füßler studierte Wirtschaftsinformatik an der Universität Mannheim und erreichte 2000 seinen Abschluss als Diplom-Wirtschaftsinformatiker. Seit 2000 arbeitet er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Praktische Informatik IV der Universität Mannheim.
Adresse: E-Mail: fuessler@informatik.uni-mannheim.de

Dipl.-Wirtsch.-Inf. Jörg Widmer studierte von 1994 bis 2000 Wirtschaftsinformatik an der Universität Mannheim. Von 1999 bis 2000 arbeitete er am AT&T Center for Internet Research at ICSI (ACIRI) in Berkeley, wo er auch seine Diplomarbeit anfertigte. Seit 2000 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Praktische Informatik IV der Universität Mannheim.
Adresse: E-Mail: widmer@informatik.uni-mannheim.de

Prof. Dr. Wolfgang Effelsberg erhielt 1976 das Diplom in Elektrotechnik an der Technischen Universität Darmstadt und promovierte dort 1981 im Fach Informatik. Von 1981–1984 arbeitete er als Assistent Professor an der University of Arizona in Tucson und als Post-Doctoral Fellow bei IBM Research in San Jose, Kalifornien. Von 1984 bis 1989 war er am Europäischen Zentrum für Netzwerkforschung der IBM in Heidelberg tätig. 1989 nahm er einem Ruf an die Universität Mannheim an, wo er seither die Arbeitsgebiete Rechnernetze, Multimediale Technik und Distance Learning in Forschung und Lehre vertritt.
Adresse: E-Mail: effelsberg@informatik.uni-mannheim.de