

Internet Integration of Vehicular Ad Hoc Networks

Marc Bechler

Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund
Technische Universität Braunschweig
bechler@ibr.cs.tu-bs.de

Abstract: Selbstorganisierende Ad-hoc-Netze gelten als Schlüsseltechnologie für zukünftige telematikgestützte Fahrzeugdienste. Die Bereitstellung von Internet-Diensten im Fahrzeug erfordert die Integration dieser Netze in das Internet, für die es keine gängigen Protokolle gibt. In dieser Arbeit wird mit MOCCA ein neuartiger Ansatz für die Internet-Integration von Fahrzeugnetzen vorgestellt. MOCCA verfolgt einen proxybasierten Ansatz, der die Eigenschaften des Fahrzeugnetzes verdeckt und für die effiziente Kommunikation zwischen Fahrzeug und Internet sorgt. MOCCA kümmert sich dabei um die Mobilitätsunterstützung der Fahrzeuge, die Ausnutzung von heterogenen Kommunikationsumgebungen sowie den effizienten Datenaustausch auf der Transportschicht. Eine wichtige Eigenschaft von MOCCA ist die starke Verzahnung der Protokolle, um einen bestmöglichen Wirkungsgrad zu erreichen. Die Evaluierung anhand von typischen fahrzeugbasierten Kommunikationsmodellen zeigt, dass MOCCA ein geeigneter Ansatz für die Internet-Integration von Fahrzeugnetzen ist.

1 Motivation

Aktuelle Entwicklungsaktivitäten im Automobilssektor verlagern sich zunehmend auf neue Schlüsseltechnologien. Der Verkehrstelematik kommt dabei eine wachsende Bedeutung zu im Hinblick auf die Sicherheit und den Verkehrsfluss auf den Straßen: Diverse Studien belegen, dass sich die aktive und passive Fahrzeugsicherheit signifikant verbessern lässt, wenn Fahrzeuge untereinander kommunizieren können. Eine beispielhafte Anwendung ist das Warnen vor gefährlichen Verkehrssituationen wie Staus oder Unfälle. Somit können nachfolgende Fahrzeuge rechtzeitig bremsen oder auf alternative Strecken ausweichen. In einem solchen Szenario spielen geringe Verzögerungen und Kommunikationskosten eine wichtige Rolle. Daher konzentrieren sich aktuelle Entwicklungen auf Ad-hoc-Netze. Diese Fahrzeugnetze ermöglichen die Kommunikation zwischen Fahrzeugen über andere Fahrzeuge hinweg, ohne dass hierfür eine vorinstallierte Netzinfrastruktur vorhanden sein muss. Abbildung 1 zeigt ein solches Kommunikationsszenario. Das Fahrzeugnetz beinhaltet auch Zugangspunkte zum Internet, die am Fahrbahnrand montiert sind. Dadurch können auch entfernte Fahrzeuge über das Internet miteinander kommunizieren.

Dem Trend zum allgegenwärtigen Internet folgend erwarten Verkehrsteilnehmer die Nutzung von Internet-Diensten wie Email im Fahrzeugnetz. Da die Zugangspunkte an das Internet angeschlossen sind, können sie einen temporären Internetzugang für die vorbeifahrenden Fahrzeuge bereitstellen. Jedoch unterscheidet sich die Kommunikation im

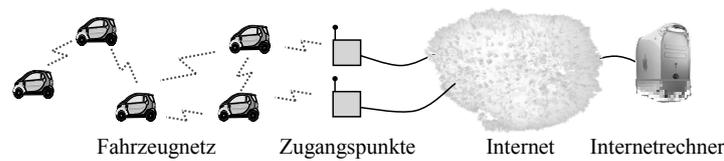


Abbildung 1: Beispielhaftes Kommunikationsszenario für Fahrzeugnetze

Fahrzeugnetz grundlegend von der Kommunikation im Internet: Fahrzeuge sind mobil und wechseln ständig ihren Zugangspunkt. Die Multihop-Eigenschaft sowie die drahtlose Kommunikation im Fahrzeugnetz bergen weitere Herausforderungen hinsichtlich der Mobilitätsunterstützung. Somit können traditionelle Internetprotokolle nicht für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Internetrechner verwendet werden. Dieser Beitrag stellt mit MOCCA (*Mobile Communication Architecture*) eine neuartige Kommunikationsarchitektur für die Internet-Integration von Fahrzeugnetzen vor. MOCCA vereint einen proxybasierten Ansatz mit einem skalierbaren Mobilitätsmanagement für die Fahrzeuge. Darüber hinaus verbessert MOCCA die Kommunikation in heterogenen Kommunikationsumgebungen, die typisch sind für die Verkehrstelematik. Auf der Transportschicht sorgt ein optimiertes Transportprotokoll für den effizienten Datenaustausch. MOCCA verfolgt dabei einen integrierten Ansatz, bei dem die Protokolle sehr eng miteinander verzahnt sind, um einen bestmöglichen Wirkungsgrad zu erreichen.

Das folgende Kapitel widmet sich den konkreten Anforderungen und verwandten Arbeiten. Kapitel 3 stellt Architektur und Protokolle von MOCCA vor, die in Kapitel 4 bewertet werden. Schließlich rundet eine Zusammenfassung in Kapitel 5 den Beitrag ab.

2 Anforderungen und verwandte Arbeiten

Fahrzeugnetze unterscheiden sich grundlegend von der Kommunikation im Internet. Fahrzeuge sind mobil und kommunizieren drahtlos, wodurch sich Topologie, Kommunikationsbedingungen und Standort der Fahrzeuge ständig ändern. Da Zugangspunkte nicht immer verfügbar sind, hat der Internetzugriff meist einen temporären Charakter. Hinzu kommt, dass neben dem Fahrzeugnetz weitere verfügbare Kommunikationssysteme alternativ genutzt werden können. Auch können Fahrzeugnetze recht groß werden und eine Vielzahl an kommunizierenden Fahrzeugen umfassen. Aufgrund dieser Merkmale können die im Internet verwendeten Protokolle nicht im Fahrzeugnetz angewendet werden: Diese Protokolle unterstützen weder Ad-hoc-Netze noch Mobilität, und das im Internet verwendeten TCP kommt nur sehr unzureichend mit temporären Verbindungen und variierenden Eigenschaften zurecht. Die Internet-Integration von Fahrzeugnetzen hat die effiziente Kommunikation zwischen Fahrzeug und Internetrechner sicherzustellen. Dazu zählen die folgenden vier Aspekte: (i) Unterstützung der Fahrzeugmobilität, (ii) Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften von Fahrzeugnetzen, (iii) effizienter Datenaustausch auf der Transportschicht sowie (iv) Skalierbarkeit von Adressierung und Protokollen.

Existierende Arbeiten erfüllen diese Anforderungen unzureichend. Arbeiten aus der Verkehrstelematik (z.B. COMCAR, Infostations) basieren auf zellulären Netzen und berücksichtigen keine Ad-hoc-Netze. Diese werden zwar von Ansätzen aus dem *Mobile Computing* (z.B. Carnet, IPonAir) unterstützt, jedoch sind diese Ansätze weder hinreichend skalierbar noch berücksichtigen sie die typischen Eigenschaften von Fahrzeugnetzen. Somit ergibt sich die Notwendigkeit für einen neuartigen Ansatz zur Internet-Integration.

3 MOCCA

Wie die vorangegangenen Kapitel gezeigt haben, weisen Fahrzeugnetze und das Internet grundlegend unterschiedliche Eigenschaften auf. Das vorrangige Ziel der Internet-Integration ist es, dass das Fahrzeugnetz als eine transparente Erweiterung des Internets erscheint. In dieser Arbeit wird mit MOCCA (Mobile Communication Architecture) eine Kommunikationsarchitektur für die Internet-Integration von Fahrzeugnetzen vorgestellt. MOCCA basiert auf einem speziellen Proxy-Konzept, bei dem ein integrierter Ansatz verfolgt wurde: Zum einen sind die entwickelten Protokolle speziell auf die Eigenschaften des Fahrzeugumfeldes abgestimmt. Zum anderen sind die Protokolle eng miteinander verzahnt, um bestmögliche Synergieeffekte zu erzielen. Abbildung 2 zeigt die grundlegende Architektur von MOCCA aus topologischer Sicht. Eine zentrale Komponente ist der *MoccaProxy*¹, der im Internet angesiedelt ist. Die Proxyfunktionalität umfasst auch das Aufspalten der TCP-Verbindungen in zwei Abschnitte, wie in Abbildung 2 gezeigt ist: Kommunikation im Internet, d.h. zwischen Internetrechner und MoccaProxy, und Kommunikation im Fahrzeugnetzwerk, also zwischen Fahrzeug und MoccaProxy.

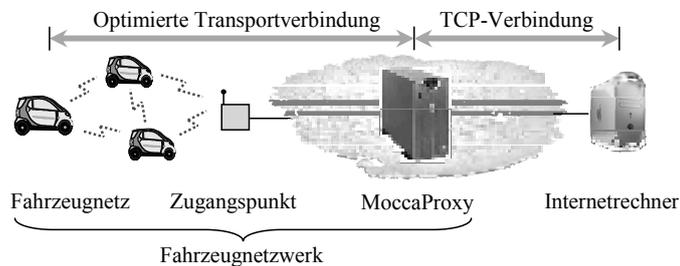


Abbildung 2: Die proxybasierte Kommunikationsarchitektur von MOCCA

Das Fahrzeugnetzwerk umfasst neben dem Fahrzeugnetz auch das Netz, das die Zugangspunkte mit dem Internet verbindet. Das kann z.B. mit DSL geschehen. Dadurch fungiert der MoccaProxy als Stellvertreter sowohl für das Internet als auch für das Fahrzeugnetz. Die Aufgabe des MoccaProxys ist es, die unterschiedlichen Kommunikationsprotokolle zu

¹Der MoccaProxy ist hier zur Verdeutlichung der Konzepte als eine virtuelle Instanz zu betrachten. In einer realen Umsetzung kann der MoccaProxy selbst als Cluster realisiert sein, um kritische Engpässe zu vermeiden. Auch können mehrere MoccaProxies unabhängig voneinander als Übergangspunkte zwischen Fahrzeugnetz und Internet fungieren. Dadurch wird die Skalierbarkeit von MOCCA sichergestellt.

überbrücken sowie die Eigenschaften des Fahrzeugnetzes zu verdecken. Für die Internet-Integration betrifft dies die Netzwerkschicht und die Transportschicht: Auf der Netzwerkschicht kümmert sich der MoccaProxy um die Interoperabilität, die Mobilität der Fahrzeuge sowie die Kommunikation im Fahrzeug. Auf der Transportschicht wird ein effizienter Datenaustausch gewährleistet. Diese Aspekte werden nachfolgend vertieft.

3.1 Adressierung und Interoperabilität

Bei MOCCA erhält jedes Fahrzeug eine global eindeutige und permanente IPv6-Adresse aus einem reservierten Adressraum. Dadurch wird die Skalierung hinsichtlich der Adressierung gewährleistet. Diese Adresse ist statisch vorkonfiguriert in der Kommunikationshardware, die mit den Fahrzeugen ausgeliefert wird. Alle Fahrzeugadressen haben den gleichen Präfix; dadurch erscheint aufgrund der proxybasierten Architektur das Fahrzeugnetzwerk als ein großes IPv6-Subnetz mit dem MoccaProxy als logischem Zugangsrouter. Dieser Ansatz bringt drei wichtige Vorteile mit sich: (i) Es entsteht kein zusätzlicher Aufwand für die Adressvergabe, (ii) ein Fahrzeug kann durch einen einfachen Vergleich der Subnetzmaske herausfinden, ob der Kommunikationspartner ein Fahrzeug oder ein Internetrechner ist, (iii) es ist sichergestellt, dass der Datenfluss zwischen Fahrzeugnetz und Internet immer den MoccaProxy passiert. Die Interoperabilität mit dem auf IPv4 basierten Internet wird durch das Protokoll NAT-PT sichergestellt, das in RFC 2766 standardisiert ist. Dies schränkt zwar die Skalierbarkeit ein, ist jedoch als unvermeidbare Übergangslösung auf dem Weg zu einem IPv6-basierten Internet zu sehen.

3.2 Mobilitätsmanagement mit MMIP6 und DRIVE

Durch die Mobilität der Fahrzeuge ändern diese ständig ihren Zugangspunkt zum Internet. Eine wichtige Aufgabe ist das Mobilitätsmanagement der Fahrzeuge. Dieses hat sicherzustellen, dass (i) ein Fahrzeug geeignete Zugangspunkte findet, (ii) die Daten aus dem Internet immer über den passenden Zugangspunkt zum Fahrzeug gelangen und (iii) Internetrechner Zugriff auf Dienste im Fahrzeug erhalten. Die Herausforderung besteht in der Multihop-Eigenschaft des Fahrzeugnetzes, bei der ein Fahrzeug über andere Fahrzeuge hinweg mit Zugangspunkten kommunizieren kann. Auch spielt wegen der Vielzahl an Fahrzeugen die Skalierbarkeit eine wichtige Rolle. Ansätze wie Mobile IPv6 (RFC 3775) sind ungeeignet, da sie die Multihop-Eigenschaft eines Netzes nicht unterstützen. Entsprechende Erweiterungen unterstützen zwar Ad-hoc-Netze, jedoch berücksichtigen diese nicht die typischen Eigenschaften von Fahrzeugnetzen und weisen nicht die notwendige Skalierbarkeit auf. In MOCCA wird das Mobilitätsmanagement durch MMIP6 (*MOCCA Mobile IPv6*) bewerkstelligt, welches das Protokoll DRIVE (*Discovery of Internet Gateways from Vehicles*) zum Auffinden geeigneter Zugangspunkte verwendet.

Bei dem Entwurf von MMIP6 wurden konsequent die Eigenschaften von Fahrzeugnetzen berücksichtigt. MMIP6 verwendet ausschließlich die statischen IPv6-Adressen der Fahr-

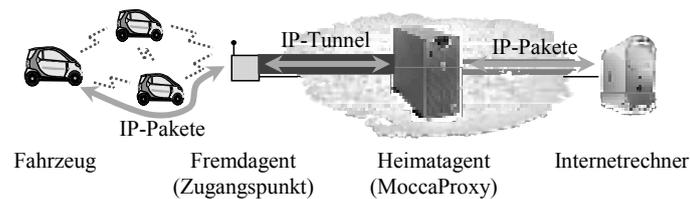


Abbildung 3: Agentensystem von MMIP6

zeuge. Im Gegensatz zu Mobile IPv6 basiert MMIP6 auf einem Agentensystem (siehe Abbildung 3), wie es in Mobile IPv4 verwendet wird. Ein Heimatagent repräsentiert dabei das Fahrzeug im Internet, wohingegen ein Fremdagente das Fahrzeug am Zugangspunkt repräsentiert. Das Besondere dabei ist, dass dieses Agentensystem mit dem proxybasierten Ansatz von MOCCA kombiniert ist. Aus topologischer Sicht sind die IPv6-Adressen der Fahrzeuge beim MoccaProxy angesiedelt, d.h. der MoccaProxy verwaltet die Heimatagenten der Fahrzeuge und tritt somit als Repräsentant der Fahrzeuge im Internet auf. Die Fremdagente sind auf den Zugangspunkten implementiert, sodass jedes Fahrzeug mit der IPv6-Adresse des gerade benutzten Zugangspunkts assoziiert ist. Findet ein Fahrzeug einen neuen Zugangspunkt, so registriert es sich über diesen bei seinem Heimatagenten. Somit weiß der Heimatagent jederzeit, über welchen Zugangspunkt er das Fahrzeug erreichen kann. Schickt nun ein Internetrechner Daten an die IPv6-Adresse des Fahrzeugs, so läuft die Kommunikation in den folgenden drei Schritten ab: (i) die IP-Pakete werden zum Heimatagenten des Fahrzeugs gesendet und somit zum MoccaProxy, bei dem die Heimatagenten topologisch angesiedelt sind, (ii) der Heimatagent nimmt die IP-Pakete stellvertretend entgegen und tunnelt sie zu dem Fremdagente, über den sich das Fahrzeug zuletzt registriert hat, (iii) der Fremdagente entpackt die IP-Pakete und leitet sie schließlich mittels dem im Fahrzeugnetz verwendetem Routingprotokoll zum gewünschten Fahrzeug.

Eine große Herausforderung ist das Auffinden der Zugangspunkte, welche die Fremdagente beherbergen. Für diese Aufgabe wurde eigens das Protokoll DRIVE entwickelt. Im Gegensatz zu existierenden Arbeiten aus dem Bereich des *Service Discovery* arbeitet DRIVE proaktiv. DRIVE verlagert einen Teil der Funktionalität des Diensteanbieters in die Fahrzeuge: Die Zugangspunkte versenden periodische Ankündigungen in einem definierbaren Bereich um den Zugangspunkt, in denen sie die Existenz eines Fremdagente mitteilen. Diese Ankündigungen werden von dem Routingprotokoll unter den Fahrzeugen in dem definierten geografischen Bereich verteilt. Empfängt der fahrzeugseitige Diensteanbieter eine solche Ankündigung, so speichert er die darin enthaltenen Informationen in einer lokalen Datenbank. Aufgrund des periodischen Versendens der Ankündigungen „weiß“ der fahrzeugseitige Diensteanbieter somit, welche Zugangspunkte gerade für den Internetzugriff genutzt werden können. Sucht MMIP6 nach einem neuen Zugangspunkt, so genügt in diesem Fall eine einfache Abfrage der lokalen Datenbank nach einem passenden Zugangspunkt. Somit werden diese häufigen Anfragen nicht im Fahrzeugnetz kommuniziert. Die Ankündigungen enthalten weitere Informationen wie die aktuelle Auslastung des Zugangspunkts. Sind mehrere Zugangspunkte gleichzeitig verfügbar, so werden diese und

weitere lokal verfügbare Informationen (z.B. Dienstgütereigenschaften) für die Auswahl des geeignetsten Zugangspunktes herangezogen. Ein Fuzzy-Logic-basiertes Expertensystem bildet diese unscharfen und teilweise unvollständigen Informationen auf zu erwartende Parameter ab [BSFW03]. In einem zweiten Schritt wird anhand dieser Parameter schließlich die Eignung eines Zugangspunktes ermittelt. Nach der Defuzzifizierung repräsentiert ein einfacher reeller Zahlenwert die Eignung eines Zugangspunktes; der Zugangspunkt mit dem höchsten Wert ist damit am besten geeignet.

MMIP6 und DRIVE vermeiden unnötigen Kommunikationsaufwand im Fahrzeugnetz: Wohingegen der Aufwand bei existierenden Ansätzen von der Anzahl der Fahrzeuge abhängt, wird dieser bei DRIVE von der Anzahl der Zugangspunkte bestimmt. Der Kommunikationsaufwand für die Mobilitätsunterstützung konnte dadurch drastisch gesenkt werden. Somit weist die Mobilitätsunterstützung in MOCCA die Skalierbarkeit auf, die für Fahrzeugnetze so wichtig ist. Darüber hinaus sorgen weitere Optimierungen wie das *Home Address Forwarding* für eine weitere Reduktion des Signalisierungsaufwands [Bec04].

3.3 Das Transportprotokoll MCTP

Das im Internet verwendete Transportprotokoll TCP bietet einen zuverlässigen und verbindungsorientierten Datendienst zwischen Kommunikationspartnern. Generell erreicht TCP eine gute Effizienz in statischen Netzen wie dem Internet oder einem lokalen Netz. In mobilen Ad-hoc-Netzen wie dem Fahrzeugnetz lässt die Leistungsfähigkeit aufgrund der konservativen Staukontrolle von TCP sehr zu wünschen übrig. Ein entsprechendes Transportprotokoll sollte einerseits sehr effizient sein. Andererseits muss es auch kompatibel zu TCP sein, da ansonsten sämtliche an das Internet angeschlossene Rechner (und die darauf laufenden Anwendungen) auf einen Schlag das neue Transportprotokoll unterstützen müssen. Hier kommt die wichtige Eigenschaft des MokkaProxys zum Tragen, dass dieser die TCP-Verbindung zwischen Fahrzeug und Internetrechner aufspaltet. Das Aufspalten erhöht die Effizienz der Kommunikation in zweierlei Hinsicht:

- Die Charakteristiken von Fahrzeugnetz und Internet werden entkoppelt. Somit pflanzen sich die Eigenschaften des Fahrzeugnetzes nicht in das Internet fort.
- Zwischen Fahrzeug und MokkaProxy kann ein optimiertes Transportprotokoll verwendet werden, während die Kommunikation im Internet weiterhin auf TCP basiert.

Für die Kommunikation zwischen Fahrzeug und MokkaProxy wurde speziell das Transportprotokoll MCTP (*MOCCA Transport Protocol*) entwickelt [BJW05]. MCTP basiert auf TCP, berücksichtigt aber die folgenden typischen Eigenschaften von Fahrzeugnetzen: (i) Unterscheidung zwischen Überlast und Übertragungsfehlern, (ii) Netzpartitionierungen und (iii) Abkopplungen vom Internet. Die MCTP-Funktionalität wird ähnlich wie bei Ad hoc TCP [LS01] durch eine Zwischenschicht zwischen IP und TCP realisiert, die TCP entsprechend steuert. Im Falle eines Übertragungsfehlers wird der aktuelle TCP-Zustand kurzzeitig eingefroren und MCTP kümmert sich um die effiziente Wiederholung des verloren gegangenen TCP-Segments. Wird jedoch mittels ECN (*Explicit Congestion Notifica-*

tion, RFC 3168) ein Stau angezeigt, so überlässt MCTP die Staukontrolle vollständig dem TCP, was mit dieser Situation gut zurechtkommt. Wie bei Ad hoc TCP wird bei MCTP auch ein Modus für die Partitionierung des Fahrzeugnetzes unterstützt, falls die Kommunikation zwischen Fahrzeugen unterbrochen wird.

Speziell für die Internet-Integration gibt es in MCTP den so genannten *Disconnect Mode*, der TCP für kurz- und längerfristige Unterbrechungen vom Internet optimiert. Dieser Modus ist für Fahrzeugnetze sehr wichtig, da die Kommunikation mit Internetrechnern durch die temporäre Verfügbarkeit der Zugangspunkte ständig unterbrochen sein kann. Das Besondere dabei ist, dass MMIP6 wertvolle und zeitnahe Informationen über die Verfügbarkeit von Zugangspunkten liefert. Diese Informationen werden von MCTP entsprechend genutzt: Im Falle einer Unterbrechung wird TCP eingefroren. Wird die Verbindung zum Internet über einen neuen Zugangspunkt wieder hergestellt, so wird der alte Zustand von TCP restauriert und die TCP-Schwellwerte entsprechend angepasst. Dadurch kann MCTP sehr zeitnah auf die Verfügbarkeit von Zugangspunkten reagieren.

3.4 MOCCA im Fahrzeug

Die Fahrzeugpassagiere erwarten, dass auch ihre mobilen Geräte im Fahrzeugnetz unterstützt werden. Damit können sie z.B. ihren Laptop mit dem Firmenrechner abgleichen. Die mobilen Geräte können dabei über entsprechende Bordnetze (z.B. Firewire) an die MOCCA-Kommunikationsplattform im Fahrzeug angeschlossen werden. Da die Anwendungen auf den mobilen Geräten nicht die MOCCA-Protokolle verwenden, läuft auf der Kommunikationsplattform der so genannte *VehicleProxy*. Dieser übersetzt die MOCCA-Protokolle zurück in Standard-Internetprotokolle. Die IPv6-Adressen werden zurück nach IPv4 übersetzt, und der VehicleProxy selbst kommuniziert mit den Anwendungen auf den mobilen Geräten mittels TCP. Somit können die Anwendungen auf den mobilen Geräten ohne Änderungen das Fahrzeugnetz für den Zugriff auf das Internet verwenden.

Ein weiteres wichtiges Merkmal von MOCCA ist das transparente Umschalten zwischen verschiedenen Kommunikationssystemen mittels eines *Multiplexers*. Fahrzeuge bewegen sich üblicherweise in heterogenen Kommunikationsumgebungen: Neben dem Fahrzeugnetz können weitere Kommunikationssysteme wie GSM, UMTS oder IEEE 802.11 zur Verfügung stellen. Der Multiplexer ist dabei in der Lage, ein passendes Kommunikationssystem für den Datenaustausch zwischen Fahrzeug und MoccaProxy auszuwählen. Ein Fuzzy-Logic-basierter Ansatz zieht dabei die unterschiedlichsten Parameter der jeweiligen Kommunikationssysteme sowie die Anforderungen der Anwendungen heran, um in einem zweistufigen Prozess diese Auswahl zu treffen [BW05]. Der Multiplexer tunnelt darauf hin den Kommunikationsstrom dynamisch über das neue Kommunikationssystem zum MoccaProxy. Umgekehrt etabliert der MoccaProxy einen Tunnel zurück zum Fahrzeug, durch den die Daten aus dem Internet gesendet werden. Das folgende Beispiel demonstriert die Nützlichkeit dieses Verfahrens: Verlässt ein Fahrzeug den Abdeckungsbereich eines Zugangspunktes und ein alternativer Zugangspunkt ist nicht verfügbar, so kann die Kommunikation über GPRS getunnelt werden. Damit können temporäre Abkopplungen des Fahrzeugnetzes vom Internet überbrückt werden.

4 Evaluierung und Bewertung

Die Bewegung von Fahrzeugen hängt von zahlreichen Faktoren ab, z.B. Tageszeit, Wetter oder Verfassung des Fahrers. Aufgrund dieser Vielfalt an Faktoren ist es praktisch unmöglich, Verkehrsflüsse exakt zu modellieren. Das Ziel der Evaluierung ist es, die Leistungsfähigkeit von MOCCA in typischen Szenarien zu bestimmen. Dabei wurden Kommunikationsmodelle für die folgenden vier Szenarien entwickelt: Eine Kreuzung in einer Stadt, eine Autobahn bei Nacht, eine Autobahn mit einem hohen Verkehrsfluss und ein Autobahnstau. Für jedes Szenario wurde ein Kommunikationsmodell pro Fahrzeug entwickelt, das die Kommunikationseigenschaften der Netzwerkschicht emuliert. Im Folgenden werden die Ergebnisse des Szenarios „Autobahn bei Nacht“ vorgestellt, das in Abbildung 4 gezeigt ist. Dieses besteht aus einem Autobahnabschnitt mit drei Spuren, bei dem vier Zugangspunkte den Internetzugriff ermöglichen. Dabei wird angenommen, dass die Fahrzeuge schnell fahren und die Fahrzeugdichte bei Nacht so gering ist, dass keine Multihop-Kommunikation stattfindet. Somit kann ein Fahrzeug nur dann mit dem Internet kommunizieren, wenn es durch den Funkbereich (1 km Radius, Kreise in Abbildung 4) eines Zugangspunktes fährt. Die Ressourcen des Zugangspunktes muss das Fahrzeug dabei nicht mit anderen Fahrzeugen teilen. Bewegt sich das Fahrzeug V durch dieses Szenario, hat es zu folgenden Zeiten Zugriff zum Internet: 0–48 s über Zugangspunkt 1, 60–144 s über die Zugangspunkte 2 und 3 (mit 24 ms Unterbrechung in der Mitte für die Verbindungsübergabe) und 324–372 s über Zugangspunkt 4. Dazwischen ist die Verbindung unterbrochen.

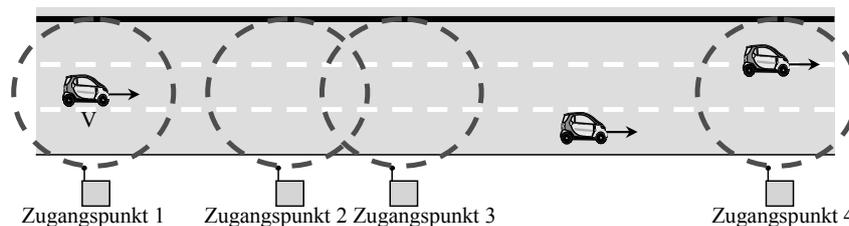


Abbildung 4: Autobahn bei Nacht

Die Evaluierung wurde im Labor mit fünf Rechnern R1–R5 durchgeführt. R1 repräsentierte das Fahrzeug, das über den Fahrzeugnetzemulator R2 mit dem MokkaProxy auf R3 kommuniziert. R3 war über den Internetemulator auf R4 mit einem Internetrechner R5 verbunden. R2 emulierte neben den MOCCA-Protokollen MMIP6 und DRIVE das FleetNet-System, das vom FleetNet-Konsortium entwickelt wird. FleetNet erreicht eine Datenrate von 588 kbit/s, 40 ms Verzögerung (pro Hop) mit 5 % Schwankung und 1 % Paketverlusten. Für die Anbindung der Zugangspunkte an das Internet wurde ein ATM-Netz angenommen, dessen Verzögerungen und Fehlerraten im Gegensatz zum Fahrzeugnetz vernachlässigbar sind. Der Internetemulator simulierte eine Internetverbindung mit 200 ms Verzögerung und 5 % Schwankung bei 0,2 % Paketverlusten. Dieser Aufbau erlaubt es, Messungen mit realen Endsystemen durchzuführen. Dabei wurden die folgenden drei unterschiedliche Konfigurationen miteinander verglichen:

- *Ende-zu-Ende*: Als Referenz wurde eine durchgehende TCP-Verbindung von R1 zu R5 über die anderen Rechner verwendet, wie es heutzutage im Internet gängig ist.
- *Proxy*: Hier wurde die Ende-zu-Ende-Verbindung durch einen Proxy auf R3 in zwei TCP-Verbindungen R1–R3 und R3–R5 aufgespalten.
- *MOCCA*: Hier kam der MoccaProxy auf R3 zum Einsatz, bei dem im Vergleich zu Proxy zwischen R1 und R3 das Transportprotokoll MCTP verwendet wurde.

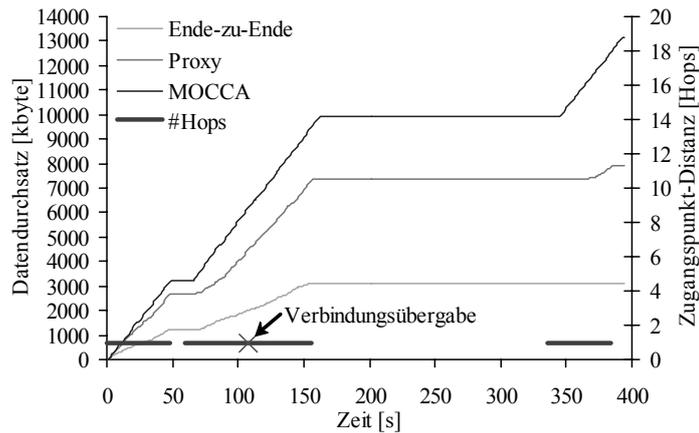


Abbildung 5: Vergleich des Durchsatzes von Ende-zu-Ende, Proxy und MOCCA

Die Evaluierung wurde mit einem MCTP-Prototyp für Linux durchgeführt. Gemessen wurde der Datendurchsatz zwischen R1 und R5. Um statistische Abweichungen zu minimieren, wurde für jede Konfiguration der Durchschnitt aus drei Messungen ermittelt. Abbildung 5 illustriert den Datendurchsatz der jeweiligen Konfiguration über die Zeit. Zur Verdeutlichung markieren die breiten Linien die Zeiten, in denen Verbindung zu einem Zugangspunkt bestand. Die Ergebnisse zeigen, dass der Ende-zu-Ende-Ansatz nur einen sehr geringen Durchsatz erreicht, wohingegen die proxybasierten Ansätze besser abschnitten. Die Messungen zeigen auch die Probleme von TCP mit temporären Unterbrechungen: Während die Verbindungsübergabe kaum Einfluss hat, benötigte Ende-zu-Ende-TCP und Proxy-TCP sehr lange, um auf die Verfügbarkeit eines neuen Zugangspunktes nach längerer Unterbrechung (bei 60 s und 324 s) zu erkennen. So dauerte es mehr als bei Proxy mehr als 70 s, bis Zugangspunkt 4 von TCP erkannt wurde; Ende-zu-Ende erkannte die Verfügbarkeit nicht. Im Gegensatz dazu reagierte MOCCA sehr schnell auf temporäre Unterbrechung und erreichte einen kontinuierlichen Datendurchsatz bei der Verfügbarkeit eines Zugangspunktes. In diesem Test erreichte Ende-zu-Ende-TCP einen Durchsatz von 3,132 Mbyte, Proxy erreichte 7,897 Mbyte und MOCCA konnte 13,144 Mbyte übertragen.

Auch die weiteren Szenarien bestätigten, dass MOCCA den Datendurchsatz signifikant verbessern konnte. Somit lässt sich zusammenfassen, dass MOCCA die Fahrzeugmobilität unterstützt, die Eigenschaften von Fahrzeugnetzen berücksichtigt, effiziente Kommunikation ermöglicht und dass die Protokolle die notwendige Skalierbarkeit aufweisen.

5 Zusammenfassung

Fahrzeugnetze basierend auf selbstorganisierenden Ad-hoc-Netzen sind eine Schlüsseltechnologie für zukünftige Anwendungen sowohl in der Verkehrstelematik als auch in intelligenten Transportsystemen. Die Integration dieser Fahrzeugnetze in das Internet hat sicherzustellen, dass das mobile Fahrzeugnetz als eine transparente Erweiterung des Internets erscheint. In diesem Beitrag wird mit MOCCA ein neuartiger Ansatz für die Internet-Integration von Fahrzeugnetzen vorgestellt. MOCCA kombiniert eine proxybasierte Kommunikationsarchitektur mit einer Reihe von optimierten Protokollen für das Mobilitätsmanagement, das Auffinden von geeigneten Zugangspunkten und alternativ verfügbaren Kommunikationssystemen, sowie einem optimierten Transportprotokoll. MOCCA verfolgt dabei einen integrierten Ansatz, bei dem die Protokolle sehr eng miteinander verzahnt sind, wodurch ein hohes Maß an Effizienz und Skalierbarkeit erreicht wurde. Die Eignung von MOCCA wird nicht nur durch die Evaluierung bestätigt; MOCCA wird im FleetNet-Projekt für die Internet-Integration des dort entwickelten Fahrzeugnetzes verwendet.

MOCCA ist nicht als finale Arbeit anzusehen, sondern eher als Ausgangsbasis für weiterführende Arbeiten. Dazu zählen die Integration von Sicherheitsmechanismen in die proxybasierte Architektur, weitergehende Optimierung durch die Nutzung von zusätzlich verfügbaren Informationen sowie Experimente in einem realen Fahrzeugumfeld.

Literatur

- [Bec04] M. Bechler. *Internet Integration of Vehicular Ad Hoc Networks*. Dissertation, Logos-Verlag Berlin, ISBN 3-8325-0750-7, 2004.
- [BJW05] M. Bechler, S. Jaap und L. Wolf. An Optimized TCP for Internet Access of Vehicular Ad Hoc Networks. In *Proc. Networking Conference*, Waterloo, Kanada, Mai 2005.
- [BSFW03] M. Bechler, O. Storz, W. Franz und L. Wolf. Efficient Discovery of Internet Gateways in Future Vehicular Communication Systems. In *Proc. IEEE Vehicular Technology Conference*, Jeju, Korea, April 2003.
- [BW05] M. Bechler und L. Wolf. Fuzzy Logic Based Handovers in Vehicular Communication Environments. In *Proc. Workshop on Intelligent Transportation*, Hamburg, März 2005.
- [LS01] J. Li und S. Singh. ATCP: TCP for Mobile Ad Hoc Networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Juli 2001.

Marc Bechler arbeitete nach seinem Studium der Informatik als Wissenschaftlicher Mitarbeiter zunächst am Institut für Telematik der Universität Karlsruhe (TH). Seit 2002 ist er Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund der Technischen Universität Braunschweig, wo er im Oktober 2004 mit Auszeichnung promovierte. Seine Forschungsarbeiten umfassen Verkehrstelematik, Mobile Computing, Ad Hoc Networking und Sicherheit in der Mobilkommunikation. Marc Bechler veröffentlichte zahlreiche Beiträge auf nationalen und internationalen Konferenzen und ist Mitautor des Buches „Linux-Netzwerkarchitektur“, das in deutsch, englisch, französisch und russisch erschienen ist.