

Hybrid Sensor-Vehicular Networks

Julian Timpner

18. Dezember 2009

Ein relativ neuer Forschungsbereich sind Hybrid Sensor Vehicular Networks (HSVN), die Eigenschaften von Wireless Sensor Networks (WSN) und Vehicular Ad-hoc Networks (VANET) kombinieren. Dazu können etwa Sensornetze am Straßenrand ausgebracht werden, die Informationen über den Zustand der Fahrbahn sammeln und an vorbeifahrende Fahrzeuge weiterleiten. Durch gleichzeitige Vernetzung der Fahrzeuge untereinander können die gewonnenen Daten über große Entfernungen übertragen und den Fahrern zugänglich gemacht werden. Diese hybriden Netze eignen sich für vielfältige Einsatzzwecke, von denen einige in dieser Arbeit vorgestellt werden, wobei Anwendungen zur Erhöhung der Sicherheit und des Durchsatzes im Straßenverkehr im Vordergrund stehen. Die Unterschiede zwischen WSN und VANETs, insbesondere im Bereich der eingesetzten Kommunikationstechnologien, werden beschrieben und die sich daraus ergebenden Probleme aufgezeigt. Ferner werden verschiedene Systemarchitekturen für HSVNs aus ausgewählten Forschungsarbeiten präsentiert. Der Fokus liegt dabei auf den Ergebnissen praktischer oder simulierter Auswertungen.

1 Einleitung

Sowohl drahtlose Sensornetze (engl. *wireless sensor networks*, kurz WSN), als auch Fahrzeug-Ad-hoc-Netze (engl. *vehicular ad-hoc networks*, kurz VANET) sind Technologien, die seit mehreren Jahren Gegenstand intensiver Forschungen sind. Ein relativ neues Forschungsgebiet hingegen stellen sogenannte *Hybrid Sensor-Vehicular Networks* (HSVN) dar, die drahtlose Sensornetze und Fahrzeug-Ad-hoc-Netze in einem hybriden Ansatz miteinander kombinieren. So können die sehr unterschiedlichen Charakteristika beider Technologien genutzt werden, um den Straßenverkehr sicherer, effizienter und umweltfreundlicher zu gestalten.

Drahtlose Sensornetze sind Rechnernetze aus Sensorknoten. Diese sind kleinste, per Funk kommunizierende Computer, die sich zu Ad-hoc-Netzen zusammenschließen und über eingebaute Sensoren ihre Umgebung überwachen können. In einem breiten Spektrum von Anwendungen lassen sich Einsatzbereiche von Sensornetzen finden: in der Überwachung von Umweltgrößen, wie Temperatur, Licht, etc., der Bestandsaufnahme

in Lagerhäusern, der Kommunikation per Audio-/Video-Streaming, dem Smart-Home-Monitoring und vielen mehr. Ein Merkmal von Sensornetzen ist, dass die Sensorknoten batteriebetrieben sind und daher besonders energiesparend operieren müssen, was in eingeschränkten Kommunikations- und Verarbeitungsfähigkeiten resultiert. Hinzu kommt, dass die Knoten meist statisch, also nicht mobil, sind.

Bei VANETs handelt es sich hingegen um mobile Ad-Hoc-Netze, deren Knoten Fahrzeuge sind und die ihre Topologie daher sehr dynamisch, d. h. mit Fahrzeuggeschwindigkeit, ändern können. Ferner leiden die Fahrzeuge in der Regel nicht unter beschränkten Energiereserven, wie dies bei WSN der Fall ist. Die Fahrzeuge können außerdem selbst mit Sensoren ausgestattet werden und so Aufgaben eines WSN übernehmen. Allerdings lässt sich in diesen hochmobilen Netzen weder eine flächendeckende Verfügbarkeit von Sensoren sicherstellen, noch ist die Erkennung bestimmter Ereignisse durch mobile Sensoren sehr zuverlässig.

Hybrid Sensor-Vehicular Networks nutzen die Vorteile beider Technologien, in dem WSN am Straßenrand ausgebracht bzw. in die Straße eingebracht werden. Dabei ist es nicht nötig, komplette Straßen abzudecken, sondern es ist ausreichend, WSN-Inseln an markanten Fahrbahnteilbereichen, z. B. Unfallschwerpunkten, anzubringen. Die WSN können so Ereignisse und Umwelteinflüsse, wie Glatteis, Unfälle oder Straßenschäden, erkennen und vorbeifahrende Fahrzeuge benachrichtigen. Die Fahrzeuge im VANET können ihrerseits diese Informationen über relativ große Distanzen weitergeben: zum einen mittels Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation, zum anderen durch Fortbewegung entlang ihrer Reiseroute. Auf diese Weise können Fahrer rechtzeitig über Gefahren informiert werden und entsprechend reagieren.

Diese Arbeit liefert einen Überblick über die aktuellen Forschungsansätze auf diesem Gebiet und zeigt an ausgewählten Fallbeispielen, welche Ergebnisse sich damit erzielen lassen. Nach Abschnitten stellt sich der Aufbau wie folgt dar: Abschnitt 2 zeigt mögliche Anwendungsfälle von HSVN auf. In Abschnitt 3 erfolgt eine Beschreibung der unterschiedlichen Kommunikationssysteme, wie sie von WSN und VANETs genutzt werden und wie sich diese integrieren lassen. Die Abschnitte 4 und 5 stellen ausgewählte Forschungsarbeiten sowie deren praktische Resultate vor. In Abschnitt 6 erfolgt eine Zusammenfassung und Bewertung der vorgestellten Ergebnisse.

2 Anwendungsfälle

Hybrid Sensor-Vehicular Networks sind in vielen Szenarien sinnvoll einsetzbar, da sie die Stärken von WSN und VANETs kombinieren, während deren Schwächen kompensiert werden. Dieser Abschnitt stellt beispielhaft einige Anwendungsfälle aus aktuellen Forschungsarbeiten dar.

Staukontrolle In [1] entwerfen die Autoren auf Grundlage eines HSVN ein Framework zur Staukontrolle bzw. -vermeidung (s. Abschnitt 4). Dabei gehen sie davon aus, dass am Straßenrand in bestimmter Weise statische Sensoren angebracht sind und Fahrzeuge ebenfalls mit Sensoren und GPS ausgestattet sind. Beide Arten von Sensoren besit-

zen identisches, digitales Kartenmaterial und großes Speichervolumen. Mobile Sensoren messen ständig ihre Position und Geschwindigkeit und können so mittels des Kartenmaterials die Verkehrssituation einschätzen. Die statischen Sensoren sammeln alle Informationen von vorbeifahrenden Fahrzeugen und kombinieren diese. Insgesamt entsteht so ein umfangreiches Bild der Verkehrssituation. Statische Sensoren müssen nicht miteinander kommunizieren, weshalb diese nur sehr dünn gestreut sein müssen. Wenn ein Fahrzeug sich einem statischen Knoten nähert, wird eine Verbindung aufgebaut und ein zweiseitiger Informationsaustausch findet statt. Ebenso können Fahrzeuge untereinander gesammelte Daten austauschen und Informationen über die Verkehrssituation in Fahrtrichtung dem Fahrer anzeigen.

Unfallprävention In [2] wird ein HSVN vorgestellt, das sich sowohl zur Unfallprävention, als auch zur Unfalluntersuchung eignet (s. Abschnitt 5). Es wird davon ausgegangen, dass an gefährlichen Straßenabschnitten WSN-Inseln angebracht werden, also kleine bis mittlere drahtlose Sensornetze, die voneinander getrennt sind. Diese können Fahrer mit aktuellen Verkehrs- und Fahrbahnbedingungen versorgen, auch deutlich über die Sensorreichweite der Fahrzeuge hinaus. So können z. B. vereiste Straßen, Unfallsituationen oder Tiere auf der Fahrbahn rechtzeitig erkannt werden.

Dazu wird ein Fahrzeug, wenn es in Reichweite eines WSN kommt, Nachrichten von dessen Knoten mit aktuellen Umweltdaten erhalten. Zu diesen Daten können Temperatur, Luftfeuchte oder sich bewegende Objekte gehören. Um die Verarbeitungszeit im Fahrzeug zu verkürzen, können diese Daten optional auch im WSN verarbeitet werden, um Fahrern direkt High-Level-Informationen zur Verfügung zu stellen. Wenn eine Gefahrensituation vorliegt, kann diese dem Fahrer angezeigt werden. Darüber hinaus wird eine Sicherheitswarnung generiert, die über das VANET an andere Fahrzeuge gesandt wird. So können Fahrer rechtzeitig informiert werden und der Situation entsprechend reagieren.

Unfalluntersuchung Werden die WSN dahingehend erweitert (s. [2]), dass sie die gemessenen Daten langfristig speichern, so bietet sich diese Architektur auch für eine nachträgliche Unfalluntersuchung an. Dazu können Unfallexperten die gespeicherten Informationen auslesen und daraus z. B. das Verhalten bestimmter Verkehrsteilnehmer und die Straßenbedingungen zum Unfallzeitpunkt bestimmen. In diesem Fall dürfen die Sensordaten jedoch natürlich nur von autorisierten Benutzern zugegriffen werden und müssen vor einer Manipulation geschützt sein.

Parkplatzsuche Vor allem in städtischen Gebieten ist die Parkplatzsuche ein zentrales Problem für Autofahrer. Ein sich anschließendes Problem ist Stau, der durch langsame Fahrzeuge auf Parkplatzsuche und illegales Parken am Fahrbahnrand verursacht wird. In [3] wird daher ein System entwickelt, das mittels eines hybriden Ansatzes Informationen über freie Parkplätze verteilt und so in Simulationen die durchschnittliche Suchzeit nach einem Parkplatz um bis zu 50 % reduzieren konnte. Dafür werden Parkplätze mit RFID-Chips ausgestattet, die den Status des Parkplatzes (besetzt, frei) feststellen kön-

nen. Während vorbeifahrende Fahrzeuge diesen auslesen können, wird der Status durch ein- oder ausparkende Fahrzeuge geändert. Über Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation können die so gesammelten Informationen dann über das VANET verteilt werden.

3 Integration der Kommunikationssysteme

Ein wesentlicher Unterschied zwischen WSN und VANETs sind die verwendeten Funktechniken. Bei der Kombination der verschiedenen Systeme durch ein HSVN ergeben sich somit grundlegende Fragestellungen bezüglich der Integrierbarkeit der Kommunikationskanäle. Dieser Abschnitt beschreibt daher zunächst die verschiedenen Funktechniken und stellt dann, basierend auf einer Beschreibung der unterschiedlichen Informationsflüsse zwischen VANET und WSN, eine integrierende Systemarchitektur vor.

3.1 Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation

Zu den verschiedenen Funktechniken, die innerhalb von VANETs zum Einsatz kommen, gehören u. a. IEEE 802.11 b/g, WiMAX IEEE 802.16, Bluetooth und ZigBee. Gemäß [2] lässt sich in Nordamerika und Europa jedoch ein Trend zur Nutzung von WLAN-Technologien für Mittelstreckenkommunikation (bis ca. 1000 Meter) erkennen. Insbesondere der sich in Vorbereitung befindende Standard IEEE 802.11p dürfte ein wesentlicher Schritt in Richtung einer einheitlichen Schnittstelle für Fahrzeug-zu-Fahrzeug- und Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Anwendungen sein. Ein wichtiger Indikator für die Bedeutung von 802.11p ist auch die Reservierung des Frequenzbands von 5,85 bis 5,925 GHz für Intelligent Transportation Systems (ITS-)Anwendungen. 802.11p dient außerdem als Grundlage für Dedicated Short-Range Communications (DSRC), das in verschiedenen Varianten in Europa, Asien und Nordamerika bereits im Einsatz ist und etwa der elektronischen Mauterfassung dient. Aufgrund der Bedeutung von 802.11p wird in den weiteren Abschnitten, soweit nicht anders beschrieben, davon ausgegangen, dass die Kommunikation im VANET auf ebendiesem basiert. Für die Langstreckenkommunikation sind hauptsächlich WiMAX, GSM und UMTS von Bedeutung, die jedoch (anders als Kurz- und Mittelstreckentechniken) teure Infrastrukturinstallationen voraussetzen. Im Weiteren werden diese daher nicht berücksichtigt.

IEEE 802.11p [4], auch WAVE genannt (engl. *Wireless Access in Vehicular Environments*), soll den IEEE 802.11 Standard auf die Anforderungen in Fahrzeug-Netzen anpassen. Dies ist notwendig, da dort sehr niedrige Latenzen (innerhalb von 4 bis 50 ms) auch bei hohen Geschwindigkeiten (bis zu 200 km/h) einzuhalten sind, wofür Anpassungen am Bitübertragungs- und MAC-Layer nötig sind. 802.11p arbeitet auf einem speziell reservierten Frequenzband, das in den USA zwischen 5,85 und 5,925 GHz und in Europa zwischen 5,875 und 5,9 GHz liegt. Die Datenraten betragen zwischen 3 und 27 MBit/s bei einer Kanalbandbreite von 10 MHz. Diese Halbierung der Bandbreite und der Bruttodatenrate gegenüber IEEE 802.11a ist nötig, um dem Dopplereffekt entgegen zu wirken.

Der MAC-Layer beruht im Wesentlichen auf IEEE 802.11 Distributed Coordination Function (DCF) und erweitert dieses um Konzepte aus Enhanced Distributed Channel

Access (802.11e), wie Access Category und Arbitrary Inter-Frame Space. Somit können Applikationen verschiedene Prioritäten zugeordnet werden. 802.11p basiert außerdem auf einem Mehrkanalsystem, sodass Knoten zwischen Kanälen wechseln (USA) oder auf mehreren Kanälen simultan übertragen können (Europa).

3.2 WSN-Kommunikation

Die beiden vorherrschenden Funktechniken für drahtlose Sensornetze sind zum einen Protokolle, die auf IEEE 802.15.4 basieren, zum anderen Bluetooth. Aufgrund der höheren Verbreitung von 802.15.4-basierenden Verfahren, wie ZigBee, werden diese vorwiegend behandelt.

Der Standard IEEE 802.15.4 definiert Bitübertragungs- und MAC-Layer für Wireless Personal Area Networks, also Kurzstrecken-Funktechnik. Charakteristisch für 802.15.4-Netze sind die langen Ruhepausen der Knoten. Dafür befinden sich Knoten normalerweise in einem Ruhezustand, aus dem sie innerhalb von 15 ms erwachen können, sobald Daten gesendet oder empfangen werden sollen. Nach der Übertragung wechseln sie sofort wieder zurück in den Ruhezustand. So können die typischerweise batteriebetriebenen Knoten Laufzeiten von sechs bis 24 Monaten erreichen.

Neben der geringen Leistungsaufnahme waren auch kostengünstige Hardware, Nutzung unlizensierter Bänder und der Parallelbetrieb mit anderen Funktechniken im selben Frequenzbereich Primärziele der Entwicklung. Somit eignen sich 802.15.4 und darauf aufbauende Protokolle wie ZigBee (die höhere Protokollebenen (z. B. für Routing) definieren) hervorragend für den Einsatz in WSN.

Das unlicenzierte 2,45 GHz-Band steht nahezu weltweit zur Verfügung und wird daher vorrangig von den für Sensorknoten verbreiteten Funkmodulen benutzt. Die erzielbare Datenrate beträgt ca. 250 kbit/s. Für die Kollisionsvermeidung kommt auf dem MAC-Layer ein CSMA/CA-Verfahren zum Einsatz. Des Weiteren stehen Sicherungsmaßnahmen durch Message-Integrity-Check und symmetrische Verschlüsselung zur Verfügung.

3.3 Informationsflüsse in HSVN

Aufgrund der beschriebenen Unterschiede in den von WSN und VANETs verwendeten Kommunikationstechniken gehen die in dieser Arbeit untersuchten Forschungsansätze für ein HSVN davon aus, dass Fahrzeuge mit zwei Wireless-Netzwerkkarten ausgerüstet sind: einem IEEE 802.11p- und einem IEEE 802.15.4-Adapter.

In [5] unterscheiden die Autoren demnach die folgenden fünf Informationsflüsse in einem HSVN:

1. Kommunikation innerhalb des WSN
2. Datenübertragung vom WSN in das VANET
3. Kommunikation innerhalb des VANET
4. Wiedereinspielen von Informationen vom VANET in ein WSN

5. Datentransport durch sich fortbewegende Fahrzeuge

Anhand dieser Informationsflüsse sollte nun die Machbarkeit der Integration von WSN und VANET untersucht werden. Dazu wäre normalerweise eine komplexe Simulation notwendig, die u. a. realistische Modelle der genannten Informationsflüsse, des Verkehrsflusses, sowie der Vereinbarkeit der eingesetzten Funksysteme beinhalten müsste. Stattdessen stellen die Autoren die Architektur eines Prototypen vor, um die Charakteristika von HSVN und eventuell auftretende Schwierigkeiten zu analysieren und an praktischen Ergebnissen zu messen. Die wesentlichen Elemente dieser Architektur sind in Abbildung 1 dargestellt.

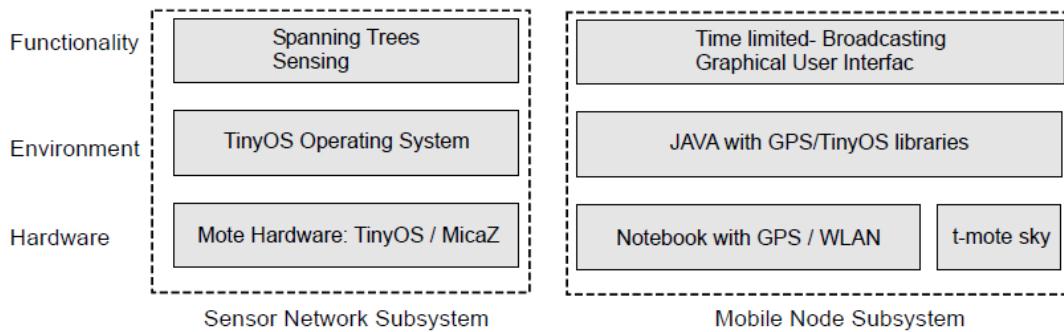


Abbildung 1: Prototypische Architektur [5]

Kommunikation innerhalb des WSN Das *Sensor Network Subsystem* (s. Abbildung 1) dient der Erkennung von Ereignissen in der Umwelt und der Weiterleitung dieser Informationen an das VANET. Zu diesem Zweck unterscheiden die Autoren normale Sensorknoten von sogenannten Gateway-Knoten. Während erstere zuständig für die Umgebungsüberwachung sind, werden einige Knoten als Schnittstelle (Gateway) zum VANET markiert. Innerhalb einer WSN-Insel werden die Sensordaten durch den Aufbau eines Spannbaumes mit den Gateways als Wurzel an ebendiese weitergeleitet. Um den Energieverbrauch der Knoten dabei möglichst gleichmäßig zu verteilen, wechseln sich diese regelmäßig als Gateway ab. Diese sowie die im nächsten Abschnitt beschriebene Funktionalität wurden in TinyOS 2.0 implementiert.

Datenübertragung vom WSN in das VANET Für den Datenaustausch zwischen dem statischen WSN und vorbeifahrenden Fahrzeugen stellt sich zunächst die Frage, wann die Informationen übertragen werden sollen. Eine Möglichkeit wäre es, Informationen periodisch zu übertragen, was bei dünnbesetztem VANET jedoch ineffizient wäre und zu einem hohen Energieverbrauch der Gateways führen würde. Für dichtbesetzte VANETs hingegen besteht die Gefahr, dass Informationen zu selten übertragen werden, um alle Fahrzeuge zu erreichen. Insgesamt bietet es sich daher an, die Übertragung von

Informationen durch die Anwesenheit eines Fahrzeuges auszulösen. Statt eines passiven Ansatzes, der die Anwesenheit eines Fahrzeugs durch Sensoren (z. B. Magnetometer) bestätigt, wird in [5] ein aktiver Ansatz verfolgt. Bei diesem sendet ein vorbeifahrendes Fahrzeug eine Anwesenheitsnachricht an das WSN. Dies kann entweder periodisch geschehen, oder Positions-basiert, wenn die Positionen der WSN den Fahrzeugen bekannt sind. Gegenüber einem passiven Ansatz hat dies den Vorteil, dass zwischen Fahrzeugen mit oder ohne Netzwerkunterstützung unterschieden werden kann, und somit überflüssige Übertragungen verhindert werden.

Sobald eine Anwesenheitsnachricht eingeht, ist die Datenübertragung vom WSN zeitkritisch: da sich Fahrzeuge mit relativen Geschwindigkeiten von bis zu 70 m/s fortbewegen können, kann das mögliche Zeitfenster weniger als eine Sekunde betragen. Sämtliche zu übertragende Daten sollten daher in nur einen oder sehr wenige Frames passen, um die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Übertragung zu erhöhen.

Kommunikation innerhalb des VANET Hauptaufgabe des VANET (*Mobile Node Subsystem* in Abbildung 1) ist es, die Sensordaten, die es vom WSN erhalten hat, an andere Fahrzeuge zu übertragen. Zusätzlich sollten die Informationen jedoch auch in entfernte WSN-Inseln injiziert werden, um sie auch zu späteren Zeitpunkten, wenn eventuell keine weiteren Fahrzeuge in der Nähe sind, verfügbar zu machen. Dies lässt sich kombinieren, in dem die Anwesenheitsnachrichten (s. vorheriger Abschnitt) des Fahrzeugs auch die Informationen enthalten, die im WSN gespeichert werden sollen. Ein solches Piggyback-Verfahren reduziert somit den Kommunikationsoverhead und erhöht die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Übertragung, gerade bei sehr kurzen Zeitfenstern.

Für die Datenübertragung im VANET wurde ein UDP-basiertes Flooding-Verfahren implementiert. Dabei werden die vom WSN erhaltenen Daten serialisiert und gebroadcastet. Um die Gültigkeit der Daten und somit deren Verbreitung via Broadcast einzuschränken, tragen diese einen zusätzlichen Zeitstempel. Obwohl dieses Verfahren insgesamt sehr einfach ist, argumentieren die Autoren, dass es in Zukunft die Implementierung fortgeschrittener Verfahren ermöglichen würde. Ein etabliertes Verfahren in der VANET-Domäne ist beispielsweise Geocast [6], das als spezielle Form des Multicast Nachrichten an ein räumlich abgegrenztes Gebiet übermittelt.

Wiedereinspielen von Informationen vom VANET in ein WSN Ein Hauptvorteil von HSVN ist, dass Informationen, die sich über das VANET ausgebreitet haben, wieder in WSN eingespielt werden können. Dies kann nötig sein, um auch in Fällen in denen das VANET keine Verbindung mehr hat, Fahrzeugen Informationen über entfernte Ereignisse, die im VANET vorhanden waren, zugänglich zu machen. Konkret bedeutet dies, dass z. B. Warnmeldungen, die ein Fahrzeug A von WSN-Insel A erhalten hat, im WSN B gespeichert werden können, bis ein Fahrzeug B vorbeifährt und die Warnung so auch erhalten kann, wenn Fahrzeug A bereits außer Reichweite ist.

Datentransport durch sich fortbewegende Fahrzeuge Neben der Vernetzung der Fahrzeuge lässt sich auch deren räumliche Fortbewegung ausnutzen, um Informationen zu

verbreiten. So können Informationen im Fahrzeug zwischengespeichert werden, solange keine Verbindung zu anderen Fahrzeugen möglich ist.

3.4 Evaluation

Um das Konzept der HSVN zu untersuchen, wurden zwei Feldtests durchgeführt. Ein erstes Experiment sollte zeigen, ob die grundsätzliche Kommunikation zwischen mobilen Knoten und Gateways möglich ist. Ein zweiter Versuch sollte die Durchführbarkeit der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Integration der Informationsflüsse durch den Prototypen untersuchen.

Direkte Kommunikation Entlang einer Landstraße wurde in ca. 30 cm Höhe ein Tmote SKY Sensorknoten platziert. Dieser wurde so programmiert, dass er 40 Pakete pro Sekunde broadcastet. Anschließend wurde diese Straße mit einem Fahrzeug, das mit einem 802.15.4-Adapter ausgestattet ist, mit verschiedenen Geschwindigkeiten abgefahren und die Anzahl der empfangenen Pakete gezählt. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse dieser Messung und vergleicht die tatsächlich empfangenen Pakete mit einer theoretisch erreichbaren oberen Schranke¹. Es lässt sich festhalten, dass sich bei Geschwindigkeiten zwischen 10 und 70 km/h relativ hohe Empfangsraten erzielen ließen. Höhere Geschwindigkeiten wurden aus praktischen Gründen nicht evaluiert.

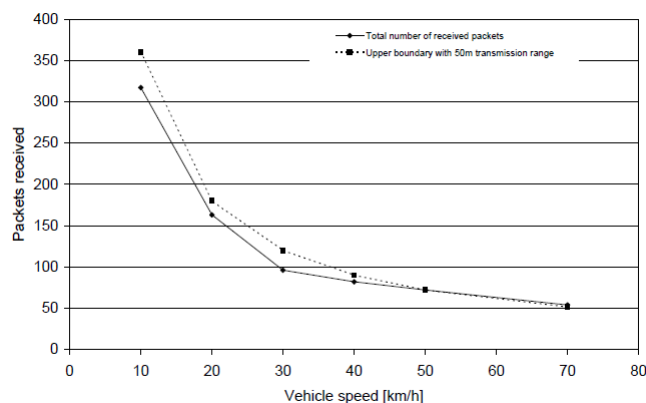


Abbildung 2: Empfangene Pakete bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten [5]

Prototyp Auf einem Parkplatz wurden 16 Sensorknoten in einem Abstand von jeweils 30 m verteilt. Fünf Knoten wurden dabei als statische Gateways eingerichtet und die globale Topologie des Netzes mittels des TinyOS 2.0 Collection Frameworks bestimmt. Anschließend wurde ein mobiler Knoten in Form eines Laptops mit angeschlossenem Tmote

¹Die obere Schranke ergibt sich aus der Fahrzeuggeschwindigkeit, der Senderate und der maximalen Reichweite eines Tmote SKY Knotens.

SKY und einem GPS-Modul über den Parkplatz getragen. Auf dem Laptop wurden gemäß der Beschreibung des Prototypen Pakete vom WSN empfangen und an anderer Stelle wieder in dieses eingespielt. Durch Protokollierung der Pakete konnte gezeigt werden, dass beide Kommunikationsrichtungen realisiert werden konnten. Ein zusätzlicher Laptop, jedoch ohne angeschlossenen Sensorknoten, repräsentierte ein zweites Fahrzeug, das nur über WLAN mit dem ersten Laptop kommunizieren konnte. Es zeigte sich, dass alle Informationen korrekt an den zweiten Laptop weitergeleitet wurden.

4 Fallstudie: Staukontrolle

Dieser Abschnitt präsentiert die in Abschnitt 2 aufgeführte Forschungsarbeit zur Entwicklung eines HSVN zur Staukontrolle und stellt deren praktische Ergebnisse vor. Das Gesamtsystem besteht dabei aus digitalen Karten, statischen Knoten am Straßenrand und mit Sensoren ausgestatteten Fahrzeugen.

Straßensegmentierung Die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges hängt stark von den Bedingungen des befahrenen Straßenabschnitts ab. So haben z. B. die Anzahl der Fahrbahnen, Ampeln, Verkehrsregelungen uvm. große Bedeutung für den Verkehrsfluss. Diese natürliche Gliederung einer Straße in Segmente verschiedener Charakteristika lässt sich für eine kostengünstige Lösung zur Staukontrolle nutzen. So können innerhalb einer Stadt Straßen in Segmente zwischen benachbarten Kreuzungen eingeteilt werden, wobei Ampeln die Begrenzungen dieser Segmente darstellen. In Innenstädten ergeben sich somit viele, in Vorstädten weniger Segmente. Auf Autobahnen werden Segmente durch die Abfahrten begrenzt. Die Lage der Begrenzungen lässt sich via GPS leicht feststellen und mit den digitalen Karten abgleichen.

Für jedes Segment werden nun nur zwei statische Knoten benötigt, jeweils am Anfang und am Ende des Abschnitts. So können Fahrzeuge bevor sie in ein Segment einfahren Informationen über den Verkehrsfluss in dem Segment erhalten. Mehr als zwei Knoten sind nicht nötig, da Fahrzeuge innerhalb der Segmente ihre Fahrtrichtung wahrscheinlich nicht ändern können und somit zusätzliche Informationen überflüssig wären.

Statische Knoten Der komponentenweise Aufbau der statischen Knoten ist in Abbildung 3(a) dargestellt. Ein zentrales Element ist die Datenbank, deren Datensätze den Verkehrsfluss in Abhängigkeit des Straßensegments darstellen. Der Verkehrsfluss wird dabei durch eine vorzeichenlose Ganzzahl repräsentiert, die umso höher ist, je schleppender der Verkehr fließt. Außerdem wird der Zeitpunkt gespeichert, zudem zuletzt Informationen über dieses Segment eingetroffen sind.

Mobile Knoten Mobile Knoten in Fahrzeugen sind in das in Abbildung 3(b) dargestellte System eingebunden. Jedes Fahrzeug misst sowohl seine Geschwindigkeit, als auch seine Position via GPS. Mit Hilfe des digitalen Kartenmaterials kann dann das aktuelle Straßensegment, indem sich das Fahrzeug befindet, bestimmt werden. Daraus lässt sich

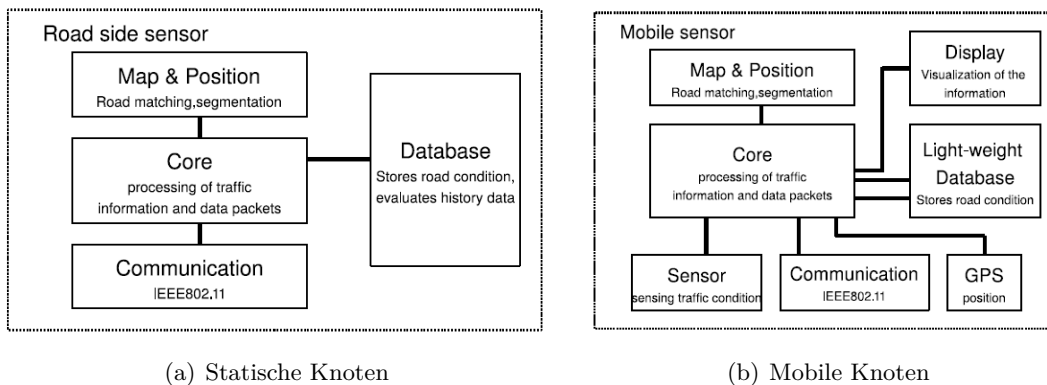


Abbildung 3: Architektur zur Staukontrolle [1]

anschließend der Verkehrsfluss berechnen. So könnte etwa eine niedrige Geschwindigkeit inmitten eines relativ großen Segments auf einen Stau hindeuten. Die gesammelten Informationen werden ebenfalls in einer (leichtgewichtigen) Datenbank gespeichert.

Kommunikation Wenn ein Fahrzeug in Reichweite eines statischen Knotens kommt, können diese beidseitig ihre Informationen austauschen. Zunächst wird eine Verbindung aufgebaut und Datenmasken können ausgetauscht werden, die die Daten beschreiben, die mit Priorität übertragen werden sollen. So kann beispielsweise ein mobiler Knoten eine Anfrage an einen statischen Knoten senden, um nur die Datensätze zu erhalten, die in Fahrtrichtung liegen und nicht schon im System vorhanden sind.

Wenn mobile Knoten untereinander kommunizieren, so wird zwischen Fahrzeugen unterschieden, die sich in gleicher oder entgegengesetzter Richtung fortbewegen. Fahrzeuge in gleicher Richtung formen eine Gruppe mit eindeutiger Gruppennummer. Tritt ein Fahrzeug dieser Gruppe bei, tauscht es seine Daten mit dem nächstgelegenen Mitglied der Gruppe aus. Diese sowie weitere über die Zeit auftretende Änderungen werden via Broadcast unter den Gruppenmitgliedern ausgetauscht, sodass alle den gleichen Datensatz besitzen. Wenn ein Fahrzeug einer solchen Gruppe entgegenkommt, so tauschen das erste Fahrzeug der Gruppe sowie das entgegenkommende alle ihre Datensätze aus. Dies ist nötig, da die Fahrzeuge der Gruppe unterschiedliche Ziele haben können, und somit alle Datensätze des entgegenkommenden Fahrzeugs interessant sind.

4.1 Evaluation

Um das beschriebene System zu testen, wurde es in Java simuliert. Eine künstliche Karte mit 40 Straßensegmenten und 25 Kreuzungen diente dabei als Grundlage. Bei einer Segmentlänge von 300m wurden 1000 Fahrzeuge zufällig auf der Karte platziert und feste Fahrtziele vorgegeben. Anschließend wurde die Anzahl der verstopften Straßen sowie die Gesamtzeit, bis alle Fahrzeuge ihr Ziel erreicht hatten, gemessen. Der gleiche

Versuch wurde dann mit aktiviertem Staukontrollsystem wiederholt und die Ergebnisse verglichen. Wie sich Abbildung 4 entnehmen lässt, sind die Unterschiede erheblich. So konnte die Anzahl der Staus um bis zu 46 % und die durchschnittliche Gesamtzeit um bis zu 36,6 % reduziert werden.

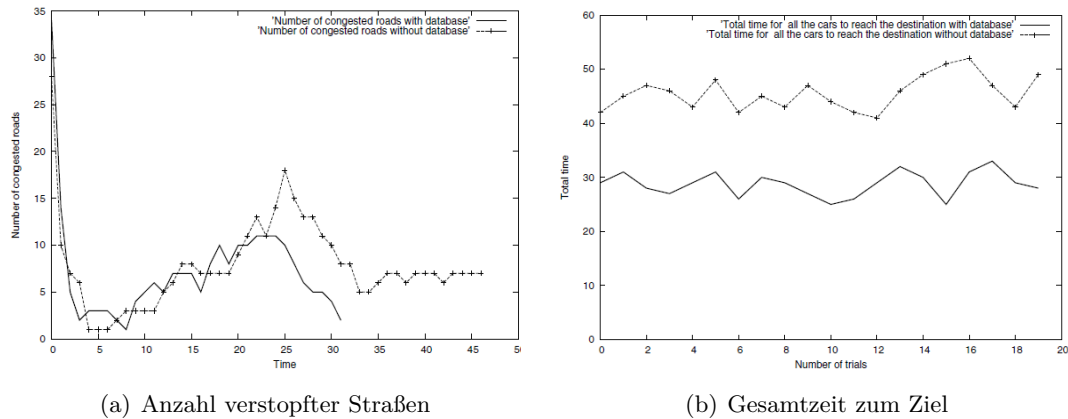


Abbildung 4: Evaluation des Staukontrollsystems [1]

5 Fallstudie: Unfallprävention

In [2] gehen die Autoren davon aus, dass es für den großflächigen Einsatz von HSVN unablässig ist, dass die Kosten für Infrastrukturinstallationen und -wartung möglichst gering sind, da diese wahrscheinlich von nur einem oder wenigen Diensteanbietern getragen würden. Sie entwerfen daher eine HSVN-Architektur, die mit sehr kostengünstigen und autonomen Sensorknoten auskommt. Auf zusätzliche Road-Side Units (RSU), die z. B. weitergehende Dienste, wie Internetzugang, bieten, verzichten sie zunächst ganz. Eine alternative Architektur, die ebenfalls vorgestellt wird, greift jedoch auf diese zurück. Die kostengünstige Architektur setzt außerdem auf redundante und verteilte Datenhaltung im WSN, um den Ausfall einzelner Knoten kompensieren zu können.

Wie unter Abschnitt 2 (Absatz Unfallprävention/Unfallvermeidung) beschrieben, werden WSN-Inseln am Straßenrand, die über 802.15.4 kommunizieren, mit einem 802.11p-basierten VANET kombiniert. Für das Routing in VANETs wird das Geocast-Verfahren eingesetzt, das drahtlose Multi-Hop-Kommunikation auf Basis von Positionsdaten unterstützt, weshalb Fahrzeuge mit GPS-Modulen ausgestattet sein müssen. Gegenüber Topologie-basierten Verfahren lassen sich so in Fahrzeugumgebungen erhebliche Performancesteigerungen realisieren. Für WSN ist Geocast aufgrund von Energiebeschränkungen und fehlender Mobilität nicht geeignet. Hier kommt stattdessen tinyLUNAR zum Einsatz. Dieses Topologie-basierte, reaktive Routingprotokoll bietet geringen Overhead und ist für minimalen Energieverbrauch optimiert.

Abbildung 5(a) zeigt eine Übersicht des vorgeschlagenen Protokoll-Stacks. Die WSN-Knoten messen Umweltgrößen, speichern diese mit einem Zeitstempel und Geodaten (z. B. dem Sektor des WSN) ab, und übertragen sie schließlich über 802.15.4 an vorbeifahrende Fahrzeuge. Der Speicher der Knoten ist dabei verschlüsselt und über mehrere Knoten verteilt, um Ausfall- und Manipulationssicherheit zu erreichen. Die auf den Knoten laufende Middleware TinyPEDS stellt diese Funktionalität zur Verfügung. Für den Verbindungsaufbau zwischen Fahrzeug und WSN kommt dabei wie in Abschnitt 3.3 beschrieben ein aktiver Ansatz zum Einsatz. Als Schnittstelle zwischen VANET und WSN dienen die On-board Units (OBU) der Fahrzeuge, die jedoch nur einen verringerten tinyLUNAR-Stack besitzen, der in der Abbildung als tLI (tinyLUNAR Interface) bezeichnet wird.

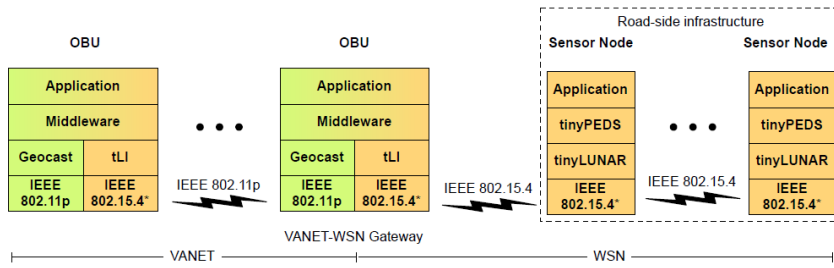
Abbildung 5(b) zeigt einen alternativen Ansatz, der höhere Infrastrukturkosten unberücksichtigt lässt und eine zusätzliche RSU für jedes WSN vorsieht. Diese dient als zentraler Datenspeicher und verteilt die Informationen an das VANET. Im Vergleich zu Abbildung 5(a) besitzt die RSU nun den Protokollstack der OBU, während diese nur einen 802.11p-Stack benötigt. Zwischen den Fahrzeugen bzw. den Fahrzeugen und der RSU wird demnach nur die leistungsfähigere 802.11p-Technik eingesetzt, während 802.15.4 ausschließlich innerhalb des WSN (inklusive RSU) verwendet wird. Ein solcher Aufbau ist vorteilhaft in Bezug auf eine zentrale Speicherung der Messdaten und ermöglicht es außerdem, weitergehende Funktionalität zur Verfügung zu stellen. So könnten die Fahrzeuge z. B. flächendeckend mit Internet-Kommunikation versorgt werden.

Da zwischen den Kosten und der gebotenen Leistung abgewogen werden muss, argumentieren die Autoren, dass eine zukünftige Koexistenz beider Systeme am wahrscheinlichsten sei.

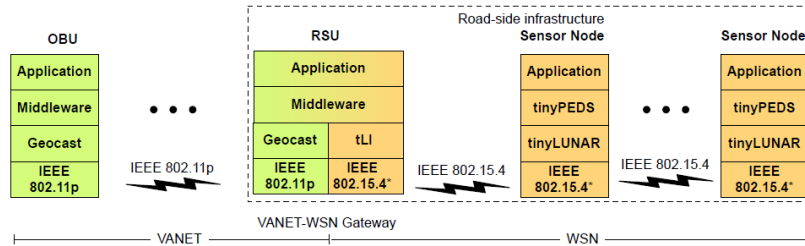
5.1 Evaluation

Das vorgestellte HSVN wurde in zwei verschiedenen Testumgebungen untersucht. In einem ersten Schritt wurde innerhalb eines Gebäudes auf kleinem Raum ein *Proof of concept* erbracht. Ein zweites Experiment unter realistischeren Bedingungen diente dazu, die Machbarkeit der WSN-zu-Fahrzeug-Kommunikation zu zeigen. Für den Versuchsaufbau wurde ein NEC LinkBird-MX als VANET-Knoten und eine Crossbow TelosB als Sensorknoten eingesetzt. Detaillierte Informationen zu der eingesetzten Hardware sind in [2] zu finden.

Indoor Experiment Ziel des Indoor Experiments war es, zu überprüfen, ob jedes Fahrzeug innerhalb der Geocast-Reichweite die vom WSN ausgesandten Warnmeldungen empfangen kann. Zu diesem Zweck wurden drei VANET-Knoten so konfiguriert, dass sie empfangene Gefahrenmeldungen über eine graphische Benutzerschnittstelle ausgeben. Um die Position der Knoten zu simulieren, wurde ein zusätzlicher Control-PC angeschlossen, der Positionsdaten generiert und an die Knoten weiterleitet. Ferner war der PC für die Simulation von Paketverlusten zuständig, die aufgrund der räumlichen Nähe der Testumgebung nicht den in der Realität zu erwartenden entsprachen.



(a) Protokollentwurf mit verteilter Datenhaltung



(b) Alternativer Entwurf mit zentraler Datenhaltung

Abbildung 5: Vorgeschlagene Protokoll-Architekturen [1]

In dem Experiment wurde nun ein VANET-Knoten mit IEEE 802.15.4 ausgestattet, um mit dem WSN kommunizieren zu können. Sobald sich beide in räumlicher Nähe zueinander befanden, empfing der Knoten die Sensordaten und leitete diese innerhalb des VANET zuverlässig mittels Geocast weiter.

Outdoor Experiment Für einen großflächigeren Versuchsaufbau unter realistischen Bedingungen wurde ein WSN auf einer Fläche von ca. 900 m^2 nahe einer Straße ausgebracht. Da Knoten, die sich direkt am Boden befinden, aufgrund von Reflektionen eine schlechtere Verbindung haben, wurde jene, die potentiell mit Fahrzeugen kommunizieren, in 45 cm Höhe angebracht. Für den Test wurde ein Fahrzeug mit einem VANET-Modul ausgestattet und fuhr wiederholt in Richtung auf das WSN die Straße entlang. Dabei sandte es periodisch im Abstand von 200 ms eine Anwesenheitsnachricht an das WSN. Sobald das WSN diese erhielt, schickte es Messdaten an das Fahrzeug, die dieses zusammen mit der gemessenen Distanz zum WSN dem Fahrer anzeigte.

Die gemessene Distanz als Kommunikationsreichweite zwischen WSN und Fahrzeug ist dabei besonders relevant, da sie die Zeit bestimmt, die der Fahrer im Fall einer Gefahrensituation zur Reaktion zur Verfügung hat. Um verschiedene Szenarien zu untersuchen, wurde die Geschwindigkeit zwischen 30 und 70 km/h variiert und sowohl mit einer Rundstrahl-, als auch einer Richtantenne durchgeführt. Für die Rundstrahlantenne wurde dabei eine Messung pro Geschwindigkeitswert durchgeführt, während für die Richtantenne jeweils drei Messwerte aufgenommen wurden. Tabelle 1 zeigt die entspre-

Velocity [km/h]	Omni-directional [m]	Directed [m]
30	78	150, 165, 163
40	79	158, 161, 163
50	68	150, 164, 155
60	71	140, 150, 155
70	72	151, 155, 161

Tabelle 1: Reichweite in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und des Antennentyps [2]

chenden Resultate. Es lässt sich festhalten, dass der Einfluss der Geschwindigkeit gegenüber dem des Antennentyps vernachlässigbar ist. Innerhalb des vereinfachten Szenarios, in dem z. B. auf Sichtbehinderungen zwischen VANET und WSN verzichtet wurde, konnten gemäß der Autoren somit Ergebnisse erzielt werden, die die Entwurfsentscheidungen bezüglich einer 802.15.4-basierten Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation stützen.

6 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden Hybrid Sensor Vehicular Networks als eine Kombination aus Fahrzeug-Netzen und straßenseitigen Sensornetzen vorgestellt. Die unterschiedlichen Anforderungen dieser Netze an eine zuverlässige Kommunikation wurden dargestellt und die Machbarkeit einer Integration der verschiedenen Technologien anhand einer prototypischen Architektur analysiert. Es lässt sich annehmen, dass sich IEEE 802.11p als Standard in der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation etablieren wird, während IEEE 802.15.4 in den meisten untersuchten Forschungsarbeiten für die Intra-WSN- und WSN-zu-Fahrzeug-Kommunikation genutzt wird. Diese Vorgehensweise wurde evaluiert und als praktikabel befunden.

Der praktische Einsatz von HSVN wurde in verschiedenen Szenarien evaluiert. So konnte in [1] durch den Einsatz eines HSVN die Anzahl von Staus um ca. 50 % reduziert werden. Als ein weiteres Beispiel möglicher Anwendungen wurde die Unfallprävention vorgestellt, die Gegenstand von [2, 5] ist. Dabei zeigte sich, dass HSVN ein nützliches Werkzeug zur Warnung von Fahrern vor gefährlichen Straßenbedingungen sein können. Da für den praktischen Einsatz natürlich die Infrastrukturkosten eine maßgebliche Rolle spielen, ist ein HSVN, das auf kostengünstigen verteilten WSN basiert, erwartungsgemäß gegenüber Lösungen mit erweiterten Fähigkeiten, wie Internetzugang, aber teureren Infrastrukturinstallationen im Vorteil. Zudem ist die Genauigkeit und Zuverlässigkeit gegenüber reinen Fahrzeug-basierten Ansätzen in einem hybriden Netz größer. Ein entscheidendes Merkmal von HSVN ist es, dass Informationen vom VANET wieder in ein WSN eingespeist werden können. Somit kann die Dichte der Sensornetze reduziert werden und sogenannte WSN-Inseln aus voneinander getrennten Netzen an bestimmten Fahrbahnbereichen reichen für eine Aufrechterhaltung der Funktionalität aus. So können Fahrzeuge Informationen über weite Strecken tragen und in ein entferntes WSN einspeisen, um die Informationen auch dann anderen Verkehrsteilnehmern zur Verfügung zu stellen, wenn die Verbindung innerhalb des VANET unterbrochen ist.

Jedoch existieren noch eine Vielzahl von Problemen, die die vorgestellten Forschungsarbeiten nicht oder nicht hinreichend lösen konnten. So konnten zwar bereits vielversprechende Ergebnisse bezüglich der Zuverlässigkeit der Kommunikation zwischen WSN und Fahrzeugen erzielt werden (s. [5]), jedoch gelten diese bislang nur unter vereinfachten Bedingungen, wie optimalen Sichtverbindungen zwischen den kommunizierenden Knoten und relativ geringen Geschwindigkeiten. Das Verhalten unter realistischeren Bedingungen ist daher noch zu evaluieren. Zudem ist die Sicherheit und Zuverlässigkeit der übertragenen Daten kritisch. So muss sichergestellt werden, dass die Daten vom WSN plausibel und nicht manipuliert sind. Unbefugte dürfen sich darüber hinaus keinen Zugang dazu verschaffen können. Eine umfassende Sicherheitsarchitektur für straßenseitige Sensornetze wird in [7] vorgestellt, die über den Umfang dieser Arbeit jedoch hinaus geht. Wenn diese mit einer sicheren VANET-Architektur kombiniert würde, so könnte in der Tat eine großflächige Verbreitung von HSVN in naher bis mittlerer Zukunft möglich sein.

Literatur

- [1] Fanyu Kong, Jindong Tan. A Collaboration-based Hybrid Vehicular Sensor Network Architecture. In *International Conference on Information and Automation, 2008. ICIA 2008.*, pages 584–589, Juni 2008.
- [2] Andreas Festag, Alban Hessler, Roberto Baldessari, Long Le, Wenhui Zhang, Dirk Westhoff. Vehicle-to-Vehicle and Road-Side Sensor Communication for Enhanced Road Safety. In *ITS World Congress and Exhibition*, New York City, NY, USA, Oktober 2008.
- [3] Tadahiro Kuroda Shun Miura, Yi Zhan. Evaluation of Parking Search using Sensor Network. *IEEE International Symposium on Wireless Pervasive Computing*, page 6 pp, Januar 2006.
- [4] D. Jiang and L. Delgrossi. IEEE 802.11p: Towards an International Standard for Wireless Access in Vehicular Environments. In *Vehicular Technology Conference, 2008. VTC Spring 2008. IEEE*, pages 2036–2040, Mai 2008.
- [5] Elias Weingärtner and Frank Kargl. A Prototype Study on Hybrid Sensor-Vehicular Networks (Ext. Abstract). (AIB 2007-1), Juli 2007.
- [6] Frank Dürr, Christian Becker, and Kurt Rothermel. Efficient Forwarding of Symbolically Addressed Geocast Messages. In *Proceedings of the 14th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN 2005)*, pages 77–85, Oktober 2005.
- [7] Jens-Matthias Bohli, Alban Hessler, Osman Ugus, and Dirk Westhoff. A secure and resilient WSN roadside architecture for intelligent transport systems. In *WiSec '08: Proceedings of the first ACM conference on Wireless network security*, pages 161–171, New York, NY, USA, 2008. ACM.