

# **Optimierung der Kommunikation zwischen am Verkehr beteiligten Strukturen**

## **Diplomarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom-Wirtschaftsmathematiker  
an der  
Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

Fachbereich Wirtschaftswissenschaften II  
Studiengang Wirtschaftsmathematik

- 1. Betreuer: Herr Prof. Dr. Ekkehard Schneider
- 2. Betreuer: Herr Dr. Peter Wagner

Eingereicht von:  
Sebastian Lehr  
Matr.-Nr. 0385611  
Ruppiner Chaussee 369a  
13503 Berlin

Berlin, 10.01.2005

## **Danksagung**

Diese Arbeit entstand durch einen Themenvorschlag des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, Institut für Verkehrsforschung, Abteilung Verkehrsinformatik. Dort wurde mir auch während der Zeit der Bearbeitung dieser Arbeit die für die Durchführung der Simulationen benötigte aktuelle Version des Verkehrssimulationsprogramms „SUMO“ zur Verfügung gestellt.

Für die außergewöhnliche Unterstützung durch wissenschaftliche Gespräche und Diskussionen möchte ich mich besonders bei Herrn Dr. Peter Wagner und bei Herrn Dipl.-Informatiker Daniel Krajewicz bedanken.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Schneider, dessen Kommentare und Anregungen die Arbeit weiter vorangebracht haben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Allgemeines .....	1
1.2 Weiterer Verlauf .....	5
<b>2. Mobile Ad-hoc-Netzwerke</b>	<b>7</b>
2.1 Einleitung .....	7
2.1.1 Motivation .....	7
2.1.2 Einführung in die Theorie .....	7
2.2 Routingverfahren .....	9
2.2.1 Allgemeines .....	9
2.2.2 Algorithmus von Dijkstra .....	13
2.2.3 Dynamic Source Routing (DSR) .....	16
2.2.4 Ad-Hoc On-demand Distance Vector Routing (AODV) .....	17
2.2.5 Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) .....	19
2.2.6 Bewertung der Routingverfahren .....	25
2.3 Probleme im Zusammenhang mit Mobilien Ad-hoc-Netzwerken .....	29
2.3.1 Allgemeines .....	29
2.3.2 Routingverfahren .....	30
2.4 Sicherheitsaspekte .....	32
<b>3. Kommunikation in einem Verkehrssystem</b>	<b>34</b>
3.1 Wesen eines Verkehrssystems .....	35
3.1.1 Definition .....	35
3.1.2 Verkehrsszenarien .....	35
3.2 Sender und Empfänger .....	36
3.3 Ablauf der Informationsweiterleitung .....	36
3.3.1 Benötigte Informationen .....	37
3.3.2 Verbindungsdetails .....	39
3.3.2.1 Die Funkverbindung .....	39
3.3.2.2 Übertragungsmethoden .....	43
3.3.2.3 Einbeziehung des Gegenverkehrs .....	44
3.3.3 Berechnung von Kenngrößen .....	45
3.3.4 Störungen der Übertragung .....	48
3.3.4.1 Signalausbreitung .....	48
3.3.4.2 Kollisionen von gesendeten Paketen .....	49
3.3.5 MAC-Protokoll zur Lösung des Kollisionsproblems .....	51
3.3.6 Zusammenfassung .....	53

<b>4. Bewertung der neuen Kommunikationsform</b>	<b>55</b>
4.1 Aufbau eines Szenarios .....	56
4.1.1 Einführende Erläuterung .....	56
4.1.2 Bau eines Verkehrsnetzes .....	56
4.1.3 Kreierung von Fahrzeugen und Fahrrouen .....	56
4.1.4 Konstanter Fluss .....	57
4.1.5 Ausstattungsgrad .....	58
4.1.6 Senderadius .....	59
4.2 Modellannahmen .....	60
4.3 Simulationsaufbau .....	60
4.3.1 Grundlegende Struktur .....	60
4.3.2 Simulationsdurchführung .....	63
4.4 Analyse der Ergebnisse .....	64
4.4.1 Einfluss des Ausstattungsgrades auf die Simulationsergebnisse .....	66
4.4.2 Einfluss des Senderadius auf die Simulationsergebnisse .....	68
4.4.3 Ausstattungsgrad gegen Senderadius .....	70
4.4.4 Altersstruktur der Informationen .....	71
4.4.5 Fahrdauer der Fahrzeuge .....	72
4.5 Marktchancen .....	73
<b>5. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>74</b>
5.1 Zusammenfassung .....	74
5.2 Erweiterungsmöglichkeiten .....	76
<b>A. Xml-Datei zur Steuerung des Verkehrsflusses</b>	<b>78</b>
<b>B. Statistische Daten</b>	<b>80</b>
B.1 Abhängigkeit vom Ausstattungsgrad .....	80
B.2 Abhängigkeit vom Senderadius .....	81
B.3 Altersstruktur .....	81
B.4 Fahrdauer .....	82
<b>C. Berechnung der Korrelationskoeffizienten</b>	<b>83</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>86</b>
<b>Index</b>	<b>89</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1.	Unterschied zwischen einem stationären Netz und einem Ad-hoc-Netz .....	8
2.2.	Mögliche Routen und Ziele .....	10
2.3.	Einteilung der Routingverfahren .....	11
2.4.	Digraph .....	15
2.5.	Baum kürzester Wege .....	15
2.6.	Greedy-Eigenschaft .....	21
2.7.	Lokales Optimum im Greedy-Modus .....	22
2.8.	Perimeter-Modus .....	22
2.9.	Gebiete des planaren Graphen .....	24
2.10.	Planarisierungsverfahren .....	24
2.11.	Planarisierungsalgorithmen .....	31
3.1.	Bedrohliche Situationen .....	36
3.2.	PHY-Rahmenformat beim IEEE 802.11b Standard .....	41
3.3.	Konnektivität mit und ohne Gegenverkehr .....	45
3.4.	Hidden Terminal Problem .....	49
3.5.	RTS-CTS-Problem .....	50
4.1.	Fahrzeuge und Straßen .....	57
4.2.	Fahrzeuganzahl .....	58
4.3.	Das analysierte Verkehrsnetz .....	61
4.4.	Teilausschnitt einer Konfigurationsdatei für die Erzeugung von Fahrzeugen und Routen .....	62
4.5.	Start- und Endpunkte einer Route .....	62
4.6.	Ausgabedateien und deren Informationen .....	65
4.7.	Abhängigkeit der wichtigsten Kriterien vom Ausstattungsgrad .....	67
4.8.	Abhängigkeit der wichtigsten Kriterien vom Senderadius .....	69
4.9.	Das mittlere Informationsalter in Abhängigkeit zum Ausstattungsgrad und Senderadius .....	72
4.10.	Anzahl Kanten und Verbindungen in Abhängigkeit zur Fahrdauer .....	72

# Tabellenverzeichnis

2.1.	Anfangstableau des Dijkstra-Algorithmus .....	14
2.2.	Endtableau des Dijkstra-Algorithmus .....	14
2.3.	Simulationseigenschaften im Autobahnszenario .....	26
2.4.	Simulationseigenschaften im Stadtszenario .....	26
2.5.	Durchschnittliche Übertragungsrate in Abhängigkeit vom Szenario und von der Entfernung zwischen Sender und Ziel .....	27
2.6.	Durchschnittliche aufkommende Bandbreite in kbps in Abhängigkeit vom Szenario und von der Distanz zwischen Sender und Ziel.....	27
2.7.	Durchschnittliche Latenzzeit in Abhängigkeit vom Szenario und von der Distanz zwischen Sender und Ziel .....	28
2.8.	Durchschnittliche Anzahl benötigter Hops in Abhängigkeit vom Szenario und von der Distanz zwischen Sender und Ziel .....	28
3.1.	Mögliche Informationen und deren Größe .....	38
3.2.	Vergleich von einigen drahtlosen Funktechniken .....	40
3.3.	Eigenschaften von IEEE 802.11b .....	41
3.4.	Fahrzeuganzahl in Abhängigkeit zum Senderadius .....	46
4.1.	Simulationsaufbau für die erste Versuchsreihe .....	63
4.2.	Simulationsaufbau für die zweite Versuchsreihe .....	63
B.1.	Abhängigkeit der einzelnen Kriterien vom Ausstattungsgrad .....	80
B.2.	Abhängigkeit der einzelnen Kriterien vom Senderadius .....	81
B.3.	Abhängigkeit des mittleren Alters vom Ausstattungsgrad und vom Senderadius .....	81
B.4.	Fahrzeuge und deren Fahrdauer .....	82

# Abkürzungsverzeichnis

ACK	ACKnowledgement
AODV	Ad-Hoc On-Demand Distance Vector Routing
CD	Compakt Disc
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
CTS	Clear To Send
D-GPS	Differenzial-GPS
DSR	Dynamic Source Routing
DSDV	Destination-Sequenced Distance-Vector
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DVD	Digital Versatile Disc
GG	Gabriel Graph
GHz	Gigahertz
GPS	Global Positioning System
GPSR	Greedy Perimeter Stateless Routing
GSR	Geographic Source Routing
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
ID	Identity
LAN	Local Area Network
LLC	Logical Link Control
LSR	Link-State-Routing
MAC	Medium Access Control
MANET	Mobile Ad-Hoc Network
MARCH	Media Access with Reduced Handshake
Mbit/s	Megabit pro Sekunde
MK	Markierte Knoten
PCMCIA	Personal Computer Memory Card International Association
PDA	Personal Digital Assistant
PHY	Physikalisch
PLCP	Physical Layer Convergence Protocol
RNG	Relative Neighborhood Graph
RTR	Ready To Receive
RTS	Request To Send
SDMA	Space Division Multiple Access
SUMO	Simulation of Urban MObility
ZRP	Zone Routing Protocol

# Kapitel 1.

## Einleitung

### 1.1 Allgemeines

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Analyse und der Optimierung der Infrastruktur Verkehrsnetz. Bereits heute wird mit Hilfe von diversen Verfahren versucht, den Verkehrsablauf in einem Verkehrsnetz zu verbessern. So können Navigationssysteme in den Fahrzeugen dem Fahrer problemlos eine Route anbieten, auf der er sein Ziel entweder schnell (hohe Durchschnittsgeschwindigkeit, aber längere Strecke) oder mit einem niedrigen Benzinverbrauch (kleinere Durchschnittsgeschwindigkeit, aber kürzere Strecke) erreicht. Für die Routenfindung sind nahezu alle Straßen z.B. eines Landes auf einem Speichermedium (CD, DVD) hinterlegt, auf das für die Routenfindung zurückgegriffen wird. Da die Länge der Straßen sowie die zulässige Höchstgeschwindigkeit, die auf den Straßen gefahren werden darf, ebenfalls abgespeichert sind, kann das Navigationsgerät eine genaue Zeitplanung vornehmen. Ausgestattet mit einem GPS-Empfänger kann es über das Ortungssystem GPS (*Global Positioning System*) die aktuelle Position des Fahrzeuges auf der Straße ermitteln [Rot02, S. 257-266] [Bau03]. Tritt der Fall ein, dass sich der Fahrer verfahren hat, wird er auf seinen Fehler verbal hingewiesen. Fast gleichzeitig wird eine neue Route berechnet und dem Fahrer mitgeteilt. Normalerweise kann GPS auf zehn bis zwanzig Meter genau die Position eines Fahrzeuges angeben. Wird eine exaktere Positionsangabe benötigt, kann ohne zu hohen Kostenaufwand eine Genauigkeit im Zentimeterbereich erreicht werden. Reicht auch dies nicht aus, muss auf das *Differenzial-GPS* (D-GPS) zurückgegriffen werden. Nun liegt die Genauigkeit im Millimeterbereich, jedoch ist der Einsatz von D-GPS erheblich teurer. In den theoretischen Ausführungen dieser Arbeit wird deshalb auf den Einsatz von D-GPS verzichtet.

Um die Positionsdaten zu erhalten, muss der in Navigationsgeräten eingebaute GPS-Empfänger mit einem Satelliten in Verbindung stehen. Im weiteren Verlaufe dieser Arbeit wird dem Einsatz von GPS zur Positionsermittlung noch eine große Bedeutung zukommen. Hierzu wird auf das zweite und dritte Kapitel verwiesen.



Interessant für den Mathematiker sind rechentechnische Modelle und Verfahren, mit denen z.B. kürzeste Wege in einem Graphen berechnet werden können. Als Beispiel sei hier der *Dijkstra-Algorithmus* genannt [Dom02, S. 66-68]. Dieser stellt ein klassisches Verfahren aus der Graphentheorie dar und wird im zweiten Kapitel der Diplomarbeit genauer vorgestellt. Das Dijkstra-Verfahren wird in vielen Verkehrstelematikanwendungen in unterschiedlichen Varianten eingesetzt. Bei der Berechnung eines kürzesten Weges greift die Software eines Navigationssystems oftmals auf den Dijkstra-Algorithmus zurück.

Nun lässt sich auch ein Verkehrsnetz als ein Graph mit Knoten und Kanten darstellen. Dabei ist für jeden Betrachter des Verkehrsnetzes sofort ersichtlich, dass sich ein Startpunkt mit einem Zielpunkt durch unterschiedliche Routen miteinander verbinden lässt. Wenn alle Fahrzeuge dieselben Routen benutzen würden, hätte dies sehr lange Staus zur Folge. Also teilt sich der Verkehr so auf die Routen auf, dass alle möglichst gleich stark befahren werden. Es wird angenommen, dass für alle Fahrzeuge die Reisezeiten und auch die Kosten gleich hoch sind. Dieses wird als *Nutzeroptimum* oder auch als *Nutzergleichgewicht* verstanden.

In einem Verkehrssystem tritt in unregelmäßigen Abständen der Fall ein, dass eine Straße durch einen Unfall nicht befahrbar ist. Die gewählte Route zwischen Startpunkt und Zielpunkt ist unterbrochen. Sicherlich könnte durch einen Hinweis des Verkehrsfunks eine alternative Route durch den Fahrer selbst gewählt werden. Auch haben bereits viele Hersteller von Navigationssystemen ein entsprechendes Softwarepaket implementiert, mit deren Hilfe das Navigationsgerät automatisch eine neue Route berechnen kann, sobald die Unfallmeldung eingetroffen ist.

Innerhalb der Verkehrsforschung wird zz. eine andere Methode verfolgt, die ebenfalls die Verkehrsteilnehmer z.B. vor einem Unfall und dem damit verbundenen Stau warnen soll; jedoch ohne den Verkehrsfunk. So ist es theoretisch denkbar, dass die Fahrzeuge untereinander kommunizieren und somit andere Verkehrsteilnehmer von dem Stau informieren. Im Laufe der Diplomarbeit soll nun untersucht werden, wie erfolgreich eine solche Kommunikation der am Verkehr beteiligten Strukturen untereinander ist. Zu den Strukturen gehören die Fahrzeuge, die Straßen, die Personen in den Fahrzeugen sowie stationäre Sender. Letzteres wird in dieser Diplomarbeit nur am Rande betrachtet werden, da eine Verbindung, die nur zwischen den Fahrzeugen besteht, aufgebaut werden soll. Aus diesem Grund wird auf eine Infrastruktur mit unbeweglichen Sendern, die außerdem teuer, schlecht wartbar und auch noch beantragt werden muss (Lizenzgebühren), verzichtet. Auch Mobilfunknetze sind für die Kommunikation nicht geeignet, da sie sich nicht selbst organisieren können und auf eine vorinstallierte Infrastruktur angewiesen sind.

Um eine Kommunikation ohne stationäre Sender erreichen zu können, ist es notwendig, ein mobiles Ad-hoc-Netzwerk (*MANET*) aufzubauen [Tan03][Per00]. Ein MANET ist ein

Funknetzwerk, welches keine feste Infrastruktur wie eine Basisstation oder einen Router benötigt. Diese Netze bauen sich spontan auf [Hei03, S. 97-100]. Solch eine Eigenschaft muss auch gegeben sein, da ein Verbindungsaufbau zwischen den Fahrzeugen (Knoten) sehr kurzfristig zustande kommt. Ferner befinden sich in diesem Netzwerk mehrere Geräte (Knoten). Durch die fehlende feste Infrastruktur können sich diese frei und unabhängig von einer festen Verkabelung bewegen. Weitere Beispiele für Knoten können z.B. mobile Geräte wie Mobiltelefone, Kleincomputer (PDA's) oder Laptops sein. Der Verbindungsaufbau kann entweder durch eine direkte Verbindung erfolgen (*singlehop*), bei der sich die einzelnen Knoten sehen und miteinander kommunizieren können oder durch eine indirekte Verbindung (*multihop*), bei der dazwischen liegende Knoten die Informationen zum Zielknoten weiterleiten. Die Knoten übernehmen demnach die Funktion eines Routers. Dadurch können auch größere Distanzen zwischen den jeweiligen Knoten überbrückt werden. In einem Verkehrsszenario wird es definitiv der Fall sein, dass ein Fahrzeug, welches vor einer Gefahrenstelle gewarnt werden soll, sich außerhalb der Funkreichweite aufhält. Eine multihop-Verbindung wird aus diesem Grund häufiger entstehen. Eine direkte Verbindung kann also nur dann aufgebaut werden, wenn sich Sender und Empfänger in einer bestimmten maximalen Reichweite zueinander befinden. Durch das Fehlen von stationären Sendern wird diese nicht so groß sein, da die Reichweite stark von der benutzten Antenne und deren Ausrichtung abhängig ist. Außerdem bestünde die Gefahr von Überlagerungen von gesendeten Nachrichten bei einem zu großen Senderadius. Verständigen könnten sich die Knoten über *Hiperlan* [Hei03, S. 416-425] oder auch über dem heute sehr verbreiteten Standard *IEEE 802.11* [Hei03, S. 89-91]. Diese sind für die Übertragung der Nachrichten in bestimmten Frequenzbändern verantwortlich. Bei letzterem werden kleine IEEE 802.11-Erweiterungskarten im PCMCIA-Standard benötigt. Durch stetige Weiterentwicklungen dieses Standards werden immer höhere Datenraten möglich.

In Firmen, Hochschulen oder auch in privaten Haushalten wird diese Übertragungsmöglichkeit für den drahtlosen Internetzugang bereits stark genutzt. Im Gegensatz zum MANET wird hier allerdings eine feste Infrastruktur benötigt, da der Router (*Access Point*) mit dem Internet per Netzkabel permanent verbunden sein muss.

Werden nun die Knoten (Fahrzeuge) mit diesen Erweiterungskarten ausgestattet, kann ein MANET aufgebaut werden, ohne das eine feste Infrastruktur von Nöten ist. Die Knoten können jetzt direkt miteinander kommunizieren. Dabei gibt es drei verschiedene Kommunikationsarten. Eine Kommunikation von lediglich einem Knoten zu einem Anderen wird als *unicast* bezeichnet. Möchte ein Knoten mit allen Knoten im Netz kommunizieren wird das *broadcasting* eingesetzt. Schließlich bedeutet *multicast* die Kommunikation eines Knotens mit einer Gruppe von Knoten.

Durch den Informationsaustausch können plötzliche Verkehrssituationen wie Staus oder Unfälle sowie Wettermeldungen (z.B. Nebel) an andere Fahrzeuge weitergeleitet werden. Neuerdings ist es mit der IEEE 802.11-Technik möglich, eine Übertragungsgeschwindigkeit von bis 54 Mbit/s zu erreichen. Diese Datenmenge dürfte ausreichen, um die benötigten Informationen an andere Verkehrsteilnehmer schnell weiterzuleiten. Welche Informationen konkret benötigt werden, wird später noch genauer erläutert. Da sich die Fahrzeuge mit einer hohen Geschwindigkeit bewegen, bleibt für die Übertragung der benötigten Informationen nicht viel Zeit. Die Mobilität der Knoten stellt somit ein Problem dar. Besonders auf Autobahnen haben die Sender nur ganz kurz die Möglichkeit, eine evt. Stauwarnung an den Empfänger zu leiten, da die Geschwindigkeit sehr hoch ist. Neben dieser direkten Kommunikation zwischen den Fahrzeugen (*unicast inter-vehicle communication*) haben die Knoten auch die Möglichkeit, ihre Informationen an eine spezielle Region zu senden (*geocast*). In dem Forschungsprojekt *FleetNet* [Fle] sowie dem *carnet*-Projekt [Mor00] werden solche Verfahren für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen entwickelt. Diese Verfahren werden in realen Fahrzeugen implementiert und in *real world*-Szenarien getestet.

Zusätzlich zur Übertragungsfrage muss noch die Energieversorgung der Knoten geklärt werden. Diese vollzieht sich über die Autobatterie. Ansonsten würde die Bereitstellung der Energie in einem Ad-hoc-Netz ein großes Problem darstellen, da durch die Mobilität der Knoten kein fester Stromzugang vorhanden ist. Somit muss auf diesen Punkt im Laufe dieser Diplomarbeit nicht weiter eingegangen werden.

Damit ein Multihop-MANET auch problemlos zustande kommen kann, wurden einige Routingverfahren entwickelt. Dies war auch notwendig, da, wie bereits berichtet, die Knoten die Funktionsweise eines Routers übernehmen und die Informationen weiterleiten. So kann gewährleistet werden, dass die Knoten die Informationen erhalten. Dabei kann zwischen topologiebasierten und positionsbasierten Routingverfahren unterschieden werden. Beide verwenden für die Routenfindung unterschiedliche Strategien. Für die Wahl eines Routingverfahrens spielt das verwendete Szenario eine große Rolle. Hier kann meistens zwischen einem Autobahnszenario, einem Landstraßenszenario und einem Stadtszenario unterschieden werden. Alle Verfahren haben ihren Ursprung vom Link State Routing-Verfahren (*LSR*) oder Distance Vector Routing-Verfahren (*DSDV*). Insbesondere das Link State Routing verwendet den *Dijkstra Algorithmus*, um den kürzesten Pfad zwischen allen Knoten im Netzwerk zu ermitteln. Mit der genauen Theorie beschäftigt sich diese Arbeit im Punkt 2.2, wo einige Routingverfahren vorgestellt werden.

Die Fragestellung dieser Arbeit lautet nun, wie erfolgreich eine Kommunikation der Fahrzeuge untereinander ist. Dazu wird anhand vieler Kriterien untersucht, inwieweit schon eine geringe Anzahl von mit der Funktechnologie ausgestatteten Fahrzeugen eine solche Kommunikation ermöglicht. Auch wird der Einfluss des Senderradius näher durchleuchtet. Die oben

kurz erwähnten Routingverfahren wurden bereits auf ihre Tauglichkeit getestet. Die Ergebnisse werden ausführlich dargestellt. In dieser Diplomarbeit werden die einzelnen Routingverfahren nicht weiter optimiert. Viel interessanter ist der allgemeine Nutzen der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation. Dazu wird mit Hilfe von Simulationen analysiert, wie viele Informationen die einzelnen Fahrzeuge über das Verkehrsnetz erhalten. Auch wird die Anzahl an Fahrzeugen herausgefiltert, mit denen kommuniziert wurde und wie oft. Die Informationen über die Straßen sind für ein Fahrzeug nur dann interessant, wenn diese aktuell sind. Aus diesem Grund wird auch die Alterstruktur der Informationen betrachtet.

Um nun einigermaßen verlässliche Informationen erhalten zu können, wie erfolgreich diese neue Art der Kommunikation ist, bedarf es einiger statistischer Auswertungen. Das Deutsche Luft- und Raumfahrtzentrum hat bereits ein in C++ geschriebenes Verkehrssimulationsprogramm (*SUMO*) für mikroskopische, multimodale Simulationen veröffentlicht [Sum]. Dabei bedeutet *mikroskopisch* die Auflösung der Simulation (jede einzelne Person und jedes einzelne Fahrzeug wird simuliert) und *multimodal* die Möglichkeit, verschiedene Verkehrsmittel (PKW's, öffentliche Verkehrsmittel) abzubilden. Als Alternative zu einer *mikroskopischen* Verkehrssimulation existieren auch *makroskopische* Simulationen, welche den Verkehr als eine kompressible Flüssigkeit betrachten, deren Dichte und Fluss studiert wird. Da bei der Kommunikation zwischen Fahrzeugen die Position jedes Fahrzeuges von Interesse ist, wurde hier ein mikroskopischer Ansatz gewählt. Dieses Programm dient als Grundlage für die Untersuchungen, die in dieser Diplomarbeit durchgeführt werden. Dafür wurde die Verkehrssimulation um die entsprechenden Methoden erweitert. Hierzu wird auf das vierte Kapitel verwiesen.

## 1.2 Weiterer Verlauf

Im zweiten Kapitel wird die Theorie über die mobilen Ad-hoc-Netzwerke vertieft. In diesem Zusammenhang werden auch die Routingverfahren erläutert und analysiert. Diese Algorithmen sollen mehr oder weniger sichern, dass ein gesendetes Paket den Empfänger erreicht, wenn sich dieser nicht in Funkreichweite des Senders aufhält. Dazu wird im Punkt 2.2.6 dieses Kapitels mit Hilfe von bereits durchgeführten Simulationen erörtert, welche Routingverfahren „gute“ Arbeit leisten. Diese Erörterung soll außerdem aufzeigen, dass die Zuverlässigkeit der einzelnen Verfahren in Abhängigkeit zu dem verwendeten Verkehrsszenario steht. Zum Abschluss dieses Kapitels werden dem Leser die verbundenen Schwierigkeiten sowie einige Sicherheitsaspekte im Zusammenhang mit MANET's erläutert. Dabei wird zwischen den allgemeinen Problemen in Ad-hoc-Netzwerken und den Problemen mit den Routingverfahren differenziert. Im dritten Kapitel wird dann der genaue Kommunikationsvorgang in einem Verkehrsnetz dargestellt. Es wird u.a. beschrieben, welche

Informationen an andere Verkehrsteilnehmer übermittelt werden müssen, damit diese auch genau erkennen, wo sich eine Gefahrenstelle befindet. Ein weiterer Hauptbestandteil dieses Kapitels wird die verwendete Funktechnologie sein. Des Weiteren werden im dritten Kapitel einzelne Kenngrößen berechnet, die die Anforderungen an das Netzwerk dokumentieren sollen. Im vierten Kapitel werden einige Simulationen durchgeführt, die mit der Verkehrssimulation „SUMO“ nach Erweiterung des Quelltextes getätigt werden. Dabei wird genau die Vorgehensweise dargestellt. Außerdem befinden sich im vierten Kapitel eine Reihe statistischer Auswertungen, die aufzeigen, wie erfolgreich die hier in dieser Diplomarbeit entwickelte Kommunikation zwischen Fahrzeugen in der Praxis sein kann. Es wird ferner durchleuchtet, inwieweit schon eine geringe Anzahl von ausgestatteten Fahrzeugen eine reibungslose Kommunikation ermöglicht und somit die erforderlichen Investitionen rechtfertigt und die Fahrzeugführer zu einer Anschaffung der Hard- und Software anregt. Auch wird analysiert, ob schon kleinere Antennen zufrieden stellende Ergebnisse liefern können oder eine Kommunikation unmöglich machen. Zum Abschluss werden im fünften Kapitel die zentralen Aussagen dieser Arbeit zusammengefasst. Zudem wird noch ein Ausblick gegeben, welche Erweiterungsmöglichkeiten dieses Themengebiet noch bietet bzw. welche Aspekte aus Zeitgründen noch nicht betrachtet werden konnten.

## **Kapitel 2.**

### **Mobile Ad-hoc-Netzwerke**

#### **2.1 Einleitung**

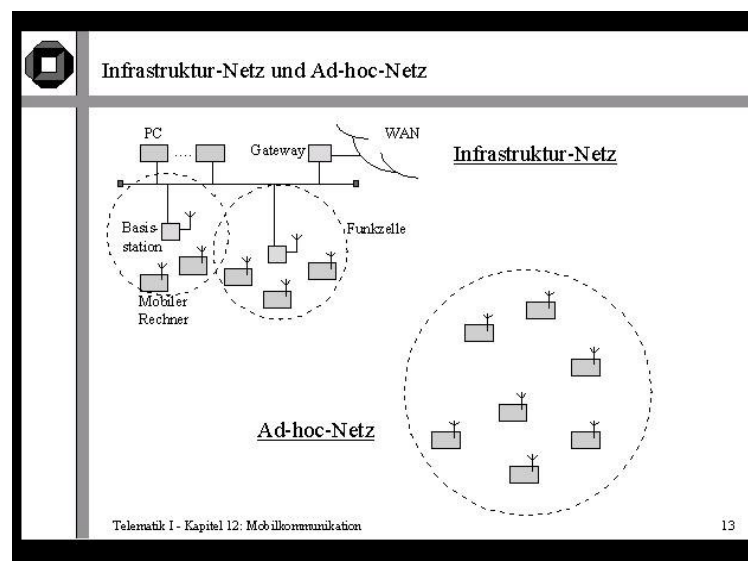
##### **2.1.1 Motivation**

Im ersten Kapitel wurden bereits einige Eigenschaften von MANET's erläutert. Diese Eigenschaften dienen als Basis für das grundlegende Verständnis eines MANET's. Da das zweite Kapitel das Ziel verfolgt, dem Leser verständlich darzustellen, weshalb bei der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation auf ein MANET zurückgegriffen wird, werden die bereits getätigten Aussagen ergänzt und mit Hilfe von einigen Abbildungen verdeutlicht. Eine elementare Rolle werden auch die speziell für MANET's entwickelten Routingverfahren spielen. Diese sind für die Übermittlung der gesendeten Nachrichten zuständig, falls sich Sender und Empfänger nicht im gegenseitigen Funkbereich befinden. Im zweiten Teil dieses Kapitels werden dazu einige Verfahren beschrieben und ihre Funktionsweise erläutert. Um die Tauglichkeit eines Verfahrens zu analysieren, werden die jeweiligen Vor- und Nachteile aufgelistet und anschließend diskutiert. Es werden nur solche Routingverfahren betrachtet, die bereits umfangreich getestet wurden. Dabei wird immer wieder auf die entsprechende Literatur verwiesen.

##### **2.1.2 Einführung in die Theorie**

Ein Netzwerk muss verschiedene Kriterien erfüllen, um als ein Ad-hoc-Netzwerk klassifiziert werden zu können. So stellt die *Wireless-LAN-Technik* in Verbindung mit einem drahtlosen Internetzugang ein Gegenbeispiel dar. Dieses Gegenbeispiel ist für das Verständnis für den Aufbau von Ad-hoc-Netzwerken sehr gut geeignet. Im Folgenden wird anhand dieses Gegenbeispiels die erste Besonderheit von Ad-hoc-Netzwerken kurz erläutert.

Durch die Erschließung des Massenmarktes durch das Internet wird dessen Bedeutung für die Beschaffung von Informationen immer größer. So stieg in den letzten Jahren die Anzahl von Internetnutzern in Deutschland kontinuierlich an. Dies geht aus einem Bericht der ARD/ZDF-online Studie 2004 hervor. Demnach sind jetzt 35,7 Millionen Jugendliche und Erwachsene (entspricht 55,3% der Bevölkerung ab 14 Jahren) online [AZ]. Dabei beschränkt sich die Nutzung des Internets nicht nur auf den heimischen PC, sondern zunehmend auch auf Flughäfen, Bahnhöfe oder andere öffentliche Einrichtungen. Über kabellose Netzwerke (Wireless-LAN-Systeme) können sich die Nutzer mit dem Internet verbinden [Hei03, S. 93-95][Köh03]. Diese benötigen hierfür lediglich ein Notebook und eine Funk-Netzwerkkarte. Die Einwahl erfolgt über stationäre Router (*Access Point*), die permanent mit dem Internet verbunden sind. Diese Anwendungsmöglichkeit hat jedoch eine grundlegende Einschränkung. Ohne diese feste Infrastruktur ist die eben beschriebene Einsatzmöglichkeit der Wireless-Lan-Technik nicht möglich. Hier liegt demnach kein Ad-hoc-Netzwerk vor, denn das Fehlen eben dieser Infrastruktur kennzeichnet ein Ad-hoc-Netzwerk. Der Zusatz „mobil“ wird dann verwendet, wenn sich die Knoten zusätzlich bewegen. Für den Aufbau eines Ad-hoc-Netzes wird kein stationärer Router benötigt, der die Endgeräte miteinander verbindet. Sollen die Fahrzeuge direkt miteinander kommunizieren, muss auf einen Umweg über einen stationären Router verzichtet werden. Aus diesem Grund ist es dringend notwendig, auf Ad-hoc-Netzwerke zurückzugreifen. In der Abbildung 2.1. wird dieser Unterschied nochmals graphisch veranschaulicht.



**Abbildung 2.1.:** Unterschied zwischen einem stationären Netz und einem Ad-hoc-Netz – Quelle: [Te]

Des Weiteren haben Ad-hoc-Netzwerke die Fähigkeit zur Autokonfiguration. Dies bedeutet, dass jederzeit ein weiterer Knoten in das Netzwerk eintreten kann ohne vorhergehende

administrative Eingriffe. Der Faktor Zeit wird dadurch stark verringert. Als Beispiel sei hier das Autobahnszenario genannt. Wenn der mobile Knoten (Fahrzeug) mit einer hohen Geschwindigkeit in das Ad-hoc-Netzwerk eintritt, bleibt seine Zugehörigkeit eventuell nur für kurze Zeit bestehen. Die Übermittlung der Informationen muss schnell vonstatten gehen. Ein administrativer Eingriff dauert seine Zeit. Der Knoten könnte sich danach schon wieder aus dem Netz entfernt haben. Die Übermittlung der Nachricht schlägt fehl, da kein Empfänger mehr vorhanden ist.

Eine weitere Eigenschaft im Zusammenhang mit Ad-hoc-Netzen wurde noch nicht explizit erwähnt. Es handelt sich hierbei um den Kostenfaktor. Durch die fehlende Infrastruktur wird der Kostenaufwand stark reduziert, da auf den Betrieb von stationären Sendern verzichtet werden kann. Außerdem ist eine Kommunikation z.B. über den Standard IEEE 802.11b lizenzfrei. Damit konnten zwei große Kostenfaktoren eliminiert werden. Durch den von vielen Experten erwarteten Preisverfall bei GPS-Endgeräten dürfte die Kommunikation über MANET's finanzierbar sein, da besonderes die im nächsten Kapitel erläuterten positionsbasierten Routingverfahren GPS benötigen. Es bleibt aber noch zu klären, mit welchen Algorithmen die Pakete an die einzelnen Knoten gesendet werden, wenn sich Sender und Empfänger nicht in gegenseitiger Funkreichweite aufhalten. Dies führt zu den Routingverfahren, die speziell auf Ad-hoc-Netzwerke abgestimmt wurden.

## 2.2 Routingverfahren

### 2.2.1 Allgemeines

Die Aufgabe der Routingverfahren besteht darin, die Pakete mit den benötigten Informationen von der Quelle (Sender) zum Ziel (Empfänger) weiterzuleiten [Tan03]. Da sich nicht alle Knoten in einem bestimmten Funkbereich befinden können, müssen die Pakete mehrere Teilstrecken (*Hops*) durchlaufen, damit der Empfänger das Paket empfangen kann. Die Klassifikation zwischen singlehop und multihop erfolgte bereits in der Einleitung. Im Zusammenhang mit multihop-Routing fungieren die Knoten in einem Ad-hoc-Netz gleichzeitig als *Router* und auch als *Host*. Als Router hat der Knoten die Aufgabe den Weg, welchen die Pakete durch das Netzwerk nehmen zu bestimmen. Er stellt somit eine Vermittlungseinheit dar. Da der Knoten die Informationen auch durch Anwendungsprogramme auswertet (z.B. Berechnung einer neuen Route, wenn diese ungültig ist), kann er auch als Host oder Endsystem bezeichnet werden. Zwei mögliche Routen und deren Ziele zeigt die Abbildung 2.2. auf der nächsten Seite. Bei a) ist das Ziel ein bestimmter Knoten (unicast) und bei b) eine bestimmte Region (geocast).



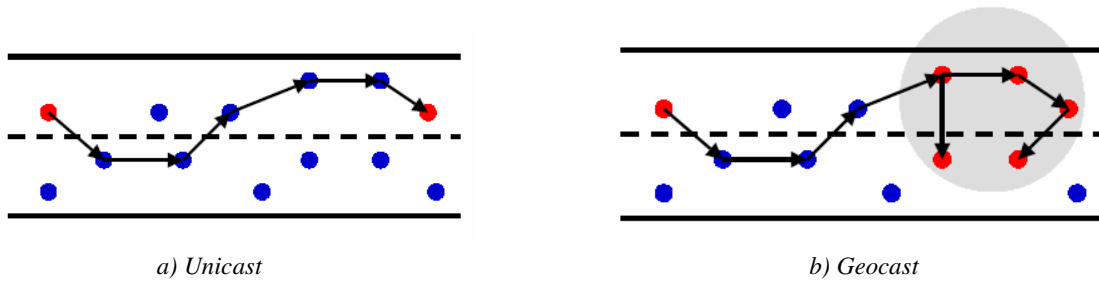


Abbildung 2.2.: Mögliche Routen und Ziele – Quelle: [Fle02]

Nun besteht die besondere Herausforderung dieser speziellen Routingverfahren darin, dass auch die Router (Knoten oder auch Fahrzeuge) mobil sind und die Bandbreite äußerst begrenzt ist. Folglich muss bei der Wahl eines Routingverfahrens darauf geachtet werden, ob es flexibel reagieren kann oder zu starr arbeitet. Die Routing-Algorithmen unterscheidet man hierzu in zwei Hauptgruppen. Dies sind die *nichtadaptiven Algorithmen* und die *adaptiven Algorithmen*. Eine gute Übersicht zeigt die Abbildung 2.3. auf der nächsten Seite. In dieser Diplomarbeit werden lediglich die adaptiven Algorithmen auf ihre Eignung für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation analysiert, da sich diese automatisch auf eine geänderte Netzwerktopologie einstellen können (dynamisch). Nichtadaptive Algorithmen nehmen das Routing anhand fester Tabellen vor. Die Wege zu den Knoten werden im Voraus berechnet und nicht geändert (statisch). Diese Vorgehensweise ist für die MANET's nicht geeignet, da die Knoten ständig mobil sind und auch das Netzwerk wieder verlassen können. Nichtadaptive Routing-Algorithmen sind z.B. der Dijkstra-Algorithmus (Routing nach dem kürzesten Pfad) und das sogenannte *Flooding* (Fluten). Bei diesem statischen Algorithmus leitet jeder Knoten die ankommenden Pakete an alle Knoten weiter. Hierbei ist die aufkommende Datenmenge jedoch sehr hoch, da alle Knoten die Pakete erhalten. Dabei spielt es keine Rolle, ob sie die Pakete benötigen oder nicht. Durch gezielte Veränderungen dieses Verfahrens kann ein Einsatz jedoch dennoch lohnenswert sein. Der Algorithmus von Dijkstra wird im nächsten Unterkapitel detailliert erläutert, da er bei vielen Routing-Algorithmen als Grundlage herangezogen wird, wenn ein kürzester Pfad zwischen zwei Knoten berechnet werden soll. Die ersten entwickelten Algorithmen waren lediglich Varianten vom Dijkstra-Verfahren.

Innerhalb der adaptiven Algorithmen gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Daten zwischen den Knoten zu versenden. Zum einen gibt es die *topologiebasierten Routingverfahren*. Diese benutzen die Informationen über bestehende Verbindungen im Netzwerk, um eine Entscheidung, an welchen Knoten innerhalb der Sendereichweite die Nachricht gesendet werden soll, treffen zu können. Dabei werden entweder klassische Algorithmen wie Distance-Vector Routing auf Funknetzwerke (MANET's) übertragen (zum Beispiel DSDV [Tan03]) oder neue Algorithmen wie beispielsweise *DSR* [Rot02, S. 206-211][Sch00] oder *AODV* [Tan03] entwickelt. Diese beiden Algorithmen werden in den folgenden Punkten näher

betrachtet. Bei diesen Ansätzen ist jedoch problematisch, dass die Informationen über bestehende Verbindungen immer auf dem aktuellen Stand gehalten werden müssen. Dies führt dazu, dass Änderungen der Topologie des Netzwerkes nur bis zu einem bestimmten Grad toleriert werden können, um eine Überflutung des Netzes mit Kontrollnachrichten zu verhindern (näheres später).

Neben diesen Algorithmen existieren noch die *positionsbasierten Routingverfahren*. Solche Algorithmen versuchen, die Schwachstellen der topologischen Verfahren durch eine andere Vorgehensweise zu eliminieren. Hierzu wird vorausgesetzt, dass jeder Knoten seine geographische Position mittels eines Positionsdienstes wie z.B. GPS bestimmen kann. Durch das regelmäßige Senden von so genannten *Beacons* teilt jeder Knoten seinem Nachbarn die eigene Position mit. Um diese Informationen auch verwerten zu können, speichert jeder Knoten die derzeitigen Positionen der Nachbarn in einer Nachbarschaftstabelle. Der Vorteil liegt darin, dass hier die Routen zu den einzelnen Knoten nicht aufrechterhalten werden müssen. Dies ist der Fall, da die Knoten lokal anhand ihrer Tabellen eine Entscheidung treffen, wohin das Paket gesendet wird.

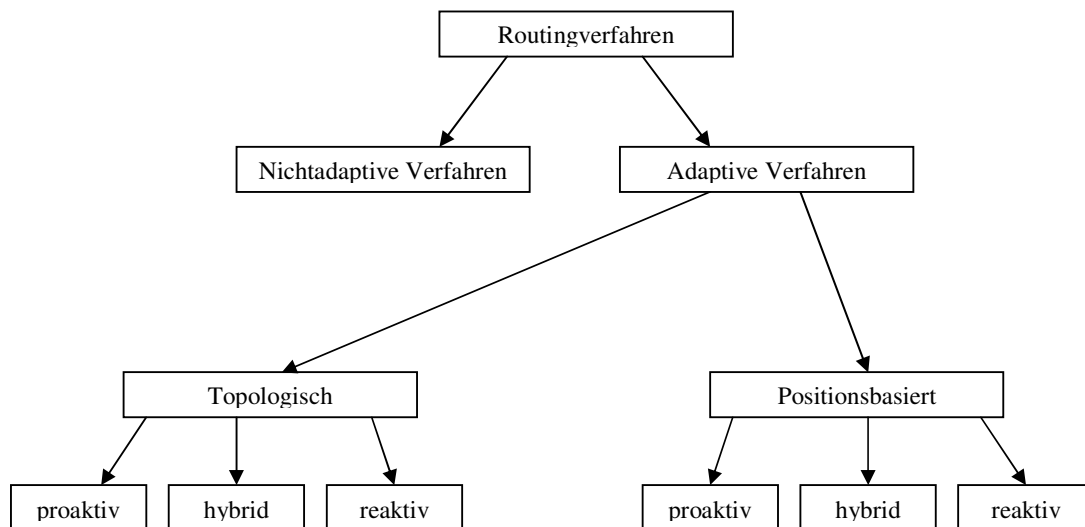


Abbildung 2.3: Einteilung der Routingverfahren

Wie anhand der Abbildung 2.3. zu erkennen ist, werden sowohl die topologischen als auch die positionsbasierten Routingverfahren nochmals in drei Bereiche unterteilt. *Proaktive* (engl.: table-driven) Routingverfahren zeichnen sich dadurch aus, dass sie zu allen Knoten, die sich im Netzwerk befinden, eine Routing-Tabelle (der Weg zu den jeweiligen Knoten) aufstellen. Dabei wird nicht beachtet, ob die Pfade zu den Knoten auch wirklich verwendet werden oder nicht. Aufgrund der schnellen Änderung der Topologie des MANET's besteht die Gefahr einer Überbelastung des Netzwerkes. Im extremen Fall könnte es sogar zusammenbrechen. Solche Verfahren sind demnach für MANET's nicht geeignet. Beispiele für proaktive

topologiebasierte Verfahren sind klassische Verfahren wie *Distanz-Vector-Routing* (DSDV) [Tan03] oder das *Link-State-Routing* (LSR) [Tan03]. Der Vorteil von proaktiven Routingverfahren liegt darin begründet, dass bei bekannter Route das Paket sofort zugestellt werden kann. Den größten Nachteil stellt die bereits erläuterte zu starke Belastung des Netzwerkes dar.

*Reaktive* (engl.: on-demand) Routingverfahren eignen sich besser für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation. Bei diesen Verfahren wird erst dann eine Route zum Ziel berechnet, wenn ein Paket gesendet werden soll. Es werden nur solche Pfade aufrechterhalten, die gerade in Verwendung sind. Dadurch kann die Belastung des Netzes deutlich reduziert werden. Beispiele für reaktive topologiebasierte Verfahren sind *DSR* [Rot02, S. 206-211] und *AODV* [Tan03]. Der Nachteil von reaktiven Verfahren gegenüber den proaktiven ist, dass vor jeder Paketzustellung erst eine Route berechnet werden muss und dadurch Zeit verloren geht (*Latenzzeit*). Im schlimmsten Fall hat sich die Topologie des MANET's bereits so stark verändert, dass das Paket nicht mehr zugestellt werden kann und somit verworfen wird.

*Hybride* Routingverfahren versuchen die beiden Vorteile von proaktiven und reaktiven Verfahren zu kombinieren. Die Pfade werden also teilweise nach proaktiven und teilweise nach reaktiven Gesichtspunkten aufgebaut. Ein Beispiel für ein hybrides topologiebasiertes Routingverfahren ist das *Zone Routing Protocol* (ZRP) [Zon]. Doch auch bei diesem Verfahren ist nicht gewährleistet, dass eine zufriedenstellende Zustellrate erreicht wird, da ebenfalls durch das hochdynamische Netzwerk viele Pakete verloren gehen können.

Bisher wurden nur Beispiele für topologiebasierte Routingverfahren genannt. Dies ist darin begründet, da in der gedruckten Literatur die neuen positionsbasierten Routingverfahren bislang kaum berücksichtigt wurden. Umfangreiche Recherchen haben jedoch erhebliche Vorteile solcher Routingverfahren gegenüber Topologischen ergeben. So erreichen die positionsbasierten Verfahren bei Autobahnsszenarien oder Szenarien mit überwiegend Landstraßen höhere Zustellraten als die Topologischen [Mau02]. In diesem Zusammenhang fällt immer wieder der Name *Greedy Perimeter Stateless Routing* (GPSR). In einem Stadtszenario gibt es viele Hindernisse, die die Übertragung der Pakete stark stören können. Hierzu zählen besonders kleine Hügel oder Gebäude. Ein positionsbasiertes Routingverfahren, das hierfür Lösungsansätze untersucht hat, ist das *Geographic Source Routing* (GSR). Weshalb GSR nicht weiter erläutert wird und aus welchem Grund für die statistischen Analysen im vierten Kapitel kein Stadtszenario verwendet wird, kann im Laufe dieses Kapitels nachgelesen werden. Bei den Simulationen im vierten Kapitel kommen auch keine Routingverfahren für die Weiterleitung der Nachrichten zum Einsatz. Die Bewertung der Algorithmen erfolgt lediglich in diesem Kapitel mit Hilfe von bereits durchgeführten Analysen aus den verschiedenen Literaturquellen.

### 2.2.2 Algorithmus von Dijkstra

Um einen mathematischen Einstieg in die Routing-Algorithmen zu bekommen, wird zunächst der Algorithmus von Dijkstra betrachtet [Dom02, S. 66-68]. In klassischen Routingverfahren wie dem *Link State Routing* [Tan03] oder *Distance Vector Routing* [Tan03] wird dieser Algorithmus zur Berechnung des kürzesten Pfades in einem Graphen verwendet. Das Dijkstra-Verfahren gehört zur Gruppe der Baumalgorithmen. Nach der Anwendung des Algorithmus ist anhand des „Baumes kürzester Wege“ der kürzeste Weg zu jedem Knoten im Graphen ablesbar. Dieser Baum ist in Abbildung 2.5. dargestellt.

Damit der Dijkstra-Algorithmus angewendet werden kann, müssen verschiedene Voraussetzungen erfüllt sein. Zum einen muss ein so genannter *Digraph*  $G = (V, E, c)$  mit  $n$  Knoten vorliegen;  $V$  ist die Knotenmenge,  $E$  ist die Kantenmenge. Als Digraph wird in der Graphentheorie ein Graph bezeichnet, der gerichtete Kanten und eine endliche Knotenmenge  $V$  enthält. Diese Kanten (Pfeile) müssen alle mit Werten  $c \geq 0$  bewertet sein. All dieses ist in der Abbildung 2.4. der Fall. In dem Feld  $D[1 \dots n]$  ist die kürzeste Entfernung vom Startknoten zu jedem anderen Knoten gespeichert. Falls kein Weg zu dem jeweiligen Knoten existieren sollte, ist die Entfernung gleich unendlich. Aus  $R[1 \dots n]$  kann dann erkannt werden, welcher Weg eingeschlagen werden muss, um sich auf kürzeste Art und Weise fortzubewegen. Zu Beginn ist lediglich der Startknoten in einer Menge  $MK$  *markierter Knoten* vertreten. Diese Menge  $MK$  gibt an, welche Knoten bisher erreicht wurden. Im ersten Iterationsschritt wird nun geprüft, welche Knoten vom Startknoten über die gerichteten Kanten erreicht werden können. Diese Knoten werden in  $MK$  aufgenommen und ihre Entfernungen zum Startknoten in  $D[1 \dots n]$  gespeichert. Nun muss im zweiten Schritt aus  $MK$  derjenige Knoten  $h$  gewählt werden, der am kürzesten vom Startknoten entfernt ist. Dies muss im gesamten Verlauf des Algorithmus beachtet werden. Die kürzesten Entfernungen zu den Knoten werden dabei sukzessive aktualisiert. Nun wird wieder untersucht, welche Knoten erreicht werden können und die Entfernungen zum Startknoten gespeichert. Ist  $MK$  leer, ist das Verfahren beendet. Um auf das Endresultat zu kommen, sind stets einige Iterationsschritte notwendig. Die Anzahl der Schritte richtet sich danach, wie viele Knoten in dem Graphen vorhanden sind.

Im folgenden Beispiel wird der kürzeste Weg von einem Startknoten zu jedem anderen Knoten vom Graphen in Abbildung 2.4. unter der Anwendung des Dijkstra-Algorithmus berechnet. Als Startknoten wird Knoten eins definiert. In Tabelle 2.1. ist das Anfangstableau und in Tabelle 2.2. das Endtableau abgebildet. Dazu muss noch angemerkt werden, dass nicht in jedem Schritt alle Knoten betrachtet werden, sondern nur diejenigen, die auch in dem jeweiligen Schritt erreicht werden können. Die Tabellen dienen nur dem besseren Verständnis des Beispiels.

Iteration 1:

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D[i]	0	20	10	$\infty$	70	$\infty$	$\infty$	$\infty$	$\infty$
R[i]		1	1		1				

Tabelle 2.1.: Anfangstableau des Dijkstra-Algorithmus

Die Menge der markierten Knoten lautet nach der ersten Iteration  $MK = (2,3,5)$ . Die Iterationsschritte 2 bis 9 sind im Folgenden aufgelistet:

Iteration 2:  $h = 3$ ;  $D[4] := 30$ ;  $R[4] := 2$ ;  $MK = \{2, 4, 5\}$ ;

Iteration 3:  $h = 2$ ;  $D[6] := 50$ ;  $R[6] := 2$ ;  $MK = \{4, 5, 6\}$ ;

Iteration 4:  $h = 4$ ;  $D[5] := 50$ ;  $R[5] := 4$ ,  $D[8] := 60$ ;  $R[8] := 4$ ;  $MK = \{5, 6, 8\}$ ;

Iteration 5:  $h = 6$ ; keine Änderung für Knoten 5,  $D[7] := 70$ ;  $R[7] := 6$ ;  $MK = \{5, 7, 8\}$ ;

Iteration 6:  $h = 5$ ;  $D[7] := 60$ ;  $R[7] := 5$ ,  $D[9] := 100$ ;  $R[9] := 5$ ;  $MK = \{7, 8, 9\}$ ;

Iteration 7:  $h = 8$ ;  $D[9] := 80$ ;  $R[9] := 8$ ;  $MK = \{7, 9\}$ ;

Iteration 8:  $h = 7$ ;  $D[9] := 70$ ;  $R[9] := 7$ ;  $MK = \{9\}$ ;

Iteration 9:  $h = 9$ ; keine Entfernungsänderung;  $MK = \emptyset$ .

Das Verfahren wird nun abgebrochen. Nach den neun Iterationsschritten wird folgende Tabelle gespeichert:

$i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
D[i]	0	30	10	30	50	50	60	60	70
R[i]		1	1	3	4	2	5	4	7

Tabelle 2.2.: Endtableau des Dijkstra-Algorithmus

Der kürzeste Weg von beispielsweise Knoten eins bis Knoten neun wird ermittelt, indem zunächst der Zielknoten betrachtet wird. Anschließend wird durch Rückwärtslaufen bis zum Startknoten der kürzeste Weg  $w$  von Knoten eins zu Knoten neun berechnet. Durch Betrachtung von Abbildung 2.5. wird ersichtlich, dass  $w = (1,3,4,5,7,9) = 70$  ist. Anhand dieses Baumes kann sofort erkannt werden, welche Route gewählt werden muss, um sein Ziel so schnell oder kostengünstig wie möglich zu erreichen.

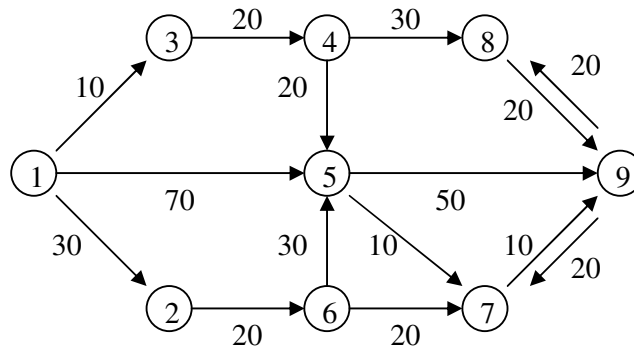


Abbildung 2.4.: Digraph

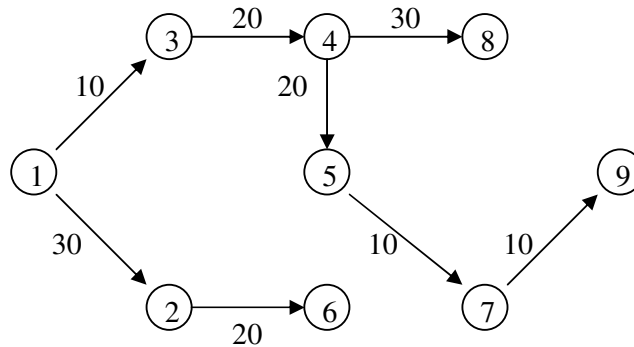


Abbildung 2.5.: Baum kürzester Wege

Dieses Beispiel sollte kurz aufzeigen, wie kürzeste Wege in der Praxis berechnet werden können. Ein ähnlicher Algorithmus wie der Dijkstra-Algorithmus ist der FIFO-Algorithmus, der ebenfalls in dem Buch von Domschke und Drexel beschrieben wird [Dom02, S. 68-71]. In Abbildung 2.4. waren nur die Entfernungen zwischen den einzelnen Knoten angegeben. Durch die Einführung der Mautgebühr könnte es vorkommen, dass die kürzeste Route teurer ist, als eine längere Route, da hier höhere Gebühren anfallen. Nun liegt ein lineares Optimierungsproblem mit mehreren Zielsetzungen vor. Ansätze hierzu sind ebenfalls in dem eben erwähnten Buch beschrieben [Dom02, Kapitel 2].

Jedes Routingverfahren hat das Ziel, stets optimal zu arbeiten. Der Algorithmus von Dijkstra implementiert ein statisches Routingverfahren nach dem kürzesten Pfad. Alle im Folgenden vorgestellten Algorithmen möchten ihre Pakete ebenfalls auf schnellstem Weg zum Ziel senden. Auf Grundlage des Algorithmus von Dijkstra wurden diese entwickelt und auf die MANET's abgestimmt. Diese neueren Verfahren müssen jedoch die zum Anfang des Punktes 2.2 aufgeführten Kriterien erfüllen, um wirksam arbeiten zu können. Die drei nachfolgend erläuterten Routingverfahren besitzen das Potential, die anfallenden Datenpakete erfolgreich in einem MANET vom Sender zum Empfänger übertragen zu können.

### 2.2.3 Dynamic Source Routing (DSR)

Dynamic Source Routing (DSR) ist ein reaktives, topologiebasiertes Routingverfahren, welches speziell für MANET's entwickelt worden ist [Rot02, S.206-211][Sch00]. Vorgestellt wurde es erstmals im Jahre 1996 von Johnson et al. [Joh96]. Die Motivation war, einen Routing-Algorithmus zu entwickeln, der nicht permanent alle möglichen Pfade zwischen allen Knoten aufrechterhält und damit die Bandbreite zu stark belastet. So sucht DSR nur dann einen Weg zum Ziel, wenn auch tatsächlich ein Paket dorthin geschickt werden soll und derzeit kein bekannter Weg existiert.

Um einen möglichst optimalen Weg ermitteln zu können, werden zwei Protokolle angelegt. Das Protokoll *Route Discovery* ist für die Wegfindung zuständig. Um kontrollieren zu können, ob ein ermittelter Pfad noch verwendet werden kann, beinhaltet DSR noch das *Route Maintenance* Protokoll. Stellt sich nach der Überprüfung heraus, dass der Weg mittlerweile nicht mehr durchlaufen werden kann, wird dies dem Sender mitgeteilt. Er muss nun einen neuen Weg suchen.

Als Erstes wird das Protokoll Route Discovery genauer betrachtet. Wurde im Rahmen dieses Protokolls ein Weg vom Sender-Knoten zum Ziel-Knoten ermittelt, hat der Sender die Möglichkeit, diesen Weg in seinem Cache zwischenspeichern. Möchte der Sender zu einem späteren Zeitpunkt erneut zum selben Ziel eine Nachricht senden, braucht der Weg nicht neu ermittelt zu werden, da dieser gespeichert ist. In der Regel soll jedoch ein anderer Knoten das Paket bekommen und im Cache ist kein Weg dorthin abgelegt. Liegt der Empfänger nicht in Funkreichweite, muss das Paket über andere Knoten weitergeleitet werden. Der Sender ( $N_i$ ) flutet erstmal seinen gesamten Funkbereich mit *Route Request-Paketen*. Dieses Paket beinhaltet eine eindeutige Identifikation  $ID_i$ , den gesuchten Zielknoten  $N_j$  und eine Knotenliste  $Doc_i$ , die von  $N_i$  aufgestellt (initialisiert) wurde. Empfängt ein Knoten  $N_k$  dieses Paket, generiert  $N_k$  entweder ein *Route Reply-Paket*, ein neues Route Request-Paket oder es wird von  $N_k$  verworfen. Letzteres ist der Fall, wenn der Knoten das Paket schon einmal erhalten hatte. Dies überprüft der Knoten mit Hilfe der  $ID_i$ . Dadurch kann erheblich an Bandbreite gespart werden. Das Paket wird auch dann verworfen, wenn der Name von  $N_k$  schon in der Knotenliste vorhanden ist (Vermeidung von Schleifen).

Sollte  $N_k$  nicht das gesuchte Ziel gewesen sein, flutet dieser Knoten erneut das Netzwerk mit Route Request-Paketen. Dabei wird dem Paket hinzugefügt, dass  $N_k$  bei der Routenfindung durchlaufen wurde. Die Knotenliste wird um  $N_k$  erweitert. Erst wenn der Zielknoten erreicht ist, werden Route Reply-Pakete gesendet.

Die Zielsuche endet, wenn  $N_k$  entweder der gesuchte Zielknoten ( $N_k = N_j$ ) oder im Cache von  $N_k$  ein Weg zum Ziel gespeichert ist. Dabei wird das Route Reply-Paket über den ermittelten

Weg in umgekehrter Reihenfolge zum Sender zurückgeschickt (*bidirektionale Verbindung*). Kann das Paket aufgrund der sich ständig ändernden Topologie im Netzwerk nicht auf dem umgekehrten Weg zum Sender zurück geleitet werden, so initiiert der Knoten, der das Route Reply versenden möchte, ein weiteres Route Discovery und hängt die Informationen des Route Reply-Pakets an das Route Request-Paket an (*unidirektionale Verbindung*). Unter der Voraussetzung, dass es einen Rückweg gibt, erhält der Sender das Route Reply-Paket. Dabei können alle auf dem Rückweg durchlaufenen Knoten Einträge in ihrem Cache vornehmen. Sie speichern den Pfad von sich bis zum Zielknoten. Die Pfade aus dem Cache können die Knoten auch als direkte Antworten verwenden.

Nachdem ein Weg ermittelt werden konnte, überwacht das Route-Maintenance-Protokoll die Gültigkeit dieses Pfades. Wird der Weg unterbrochen, weil z.B. ein auf dem Weg liegender Knoten das MANET verlassen hat, muss ein neuer Pfad ermittelt werden. Das Route-Maintenance-Protokoll wird durchgeführt. Bemerkt ein Knoten, dass das Paket nicht auf dem gespeicherten Pfad entlang zum Ziel weitergeleitet werden kann, sendet er ein *Error-Paket* an den Sender zurück. Der Weg muss nun neu berechnet werden, indem der Sender ein neues Route Discovery Protokoll generiert.

Zusammenfassend liegt der Vorteil dieses Verfahrens sicherlich in der Ressourceneinsparung. Ein erheblicher Nachteil von DSR ist die Verzögerung (*Latenzzeit*) des Versendens der Nachricht, weil die Wegfindung evt. sehr lange dauern kann.

#### 2.2.4 Ad-Hoc On-demand Distance Vector Routing (AODV)

Ad-Hoc On-demand Distance Vector (AODV) [Tan03][Pe01] ist neben DSR das zweite speziell für MANET's entwickelte Routingverfahren. Auch hier wird der Pfad zum Ziel reaktiv berechnet. Im Unterschied zum eben beschriebenen Verfahren wird jedoch keine Knotenliste von bisher durchlaufenen Knoten dem Paket hinzugefügt. Vielmehr unterhält jeder Knoten eine Routing-Tabelle, weswegen er immer nur den nächsten Knoten einer Route kennt und niemals die Vollständige. Dadurch kann die Paketgröße verringert werden, wodurch an Bandbreite gespart wird, da keine Knotenliste gesendet wird. Allerdings müssen die Knoten viel Speicherplatz für die Speicherung der Routing-Tabellen aufbringen.

Auch bei AODV soll eine beste Route bis zum Ziel berechnet werden. Um diese finden zu können, werden Entfernungsvektoren zwischen dem Start- und dem Zielknoten verwendet, deren Länge minimiert werden soll. AODV ist demnach ein entfernter Verwandter des Bellman-Ford-Distant Vector-Algorithmus [Bel57], der aber auf den Einsatz in einer mobilen Umgebung abgestimmt worden ist. Die Knoten und deren Kanten (Funkverbindungen) des Netzwerkes bilden zusammen einen gerichteten Graphen, deren Verbindungen unterschied-



lich stark gewichtet sind. Da die Verbindungen Entfernungsvektoren darstellen, kann eine minimale Route berechnet werden. Hierfür wird ein Minimierungsverfahren eingesetzt, welches eine minimale Route mit einer Weg-Distanz  $d(A,B)$  zwischen einem Startknoten A und einem Zielknoten B bestimmen soll. Hat der Zielknoten das Paket erhalten, kann von hier aus die Berechnung rekursiv durchgeführt werden. Dabei wird jener Weg eingeschlagen, auf dessen Transportweg das Paket als Erstes den Zielknoten erreicht hat, da dieser Pfad den kürzesten Weg darstellt. Dieses Minimierungsverfahren kann auch formal anhand einer Gleichung beschrieben werden. Dabei ist  $\|A,s\|$  die Entfernung vom Ausgangsknoten bis zu seinem Nachbarn (erste Teilstrecke) und  $d(s,B)$  die Distanz von einem Nachbarn s zum Zielknoten B. Dies soll minimiert werden.

$$d(A,B) = \min_s [\|A,s\| + d(s,B)] \quad (2.1)$$

$$d(A,B) = 1 + \min_s [d(s,B)] \quad (2.2)$$

AODV berechnet genau auf dieser Grundlage den Weg zum Ziel. Angenommen der Knoten A möchte sein Paket an Knoten B senden und in seiner Routing-Tabelle ist kein Weg dorthin gespeichert. Es muss nun ein Weg dorthin ermittelt werden. Hierzu wird ein *Route Request-Paket* (Anfragepaket) von A erstellt und rundum gesendet. Dabei wird es solange weitergeleitet, bis es das Ziel erreicht hat. Jeder durchlaufene Knoten trägt in seiner Routingtabelle ein, dass der Startknoten über den Knoten, von dem er das Paket erhalten hatte, erreichbar ist. Dadurch wird eine Route rückwärts aufgebaut (*Reverse Route Table*). Mit Hilfe dieser Information kann dann der Rückweg zum Startknoten bestimmt werden. Angelangt am Zielknoten beschreibt dasjenige Paket den minimalen Weg, das als Erstes am Zielknoten angelangt ist. Eventuell später eintreffende Pakete werden verworfen. Als Antwort sendet B ein *Route Reply-Paket* (Antwortpaket) an den Startknoten. Den Weg dorthin können die Knoten ihrer Routingtabelle entnehmen. Bei der Weiterleitung tragen die Knoten nunmehr in ihren Tabellen ein, über welchen Knoten der Zielknoten (B) erreichbar ist (*Forward route Table*). Wenn der Startknoten dieses Paket erhalten hat, besteht endgültig eine minimale Route zwischen A und B.

Seit dem Jahr der Veröffentlichung von AODV im Jahre 1999 sind viele Optimierungen eingeführt worden. Zum einen wird bei einem Tabelleneintrag für einen neuen Rückweg ein Timer gestartet. Ist dieser abgelaufen, weil innerhalb dieser Zeit das Paket nicht über diesen Knoten zurück gesendet wurde, wird der Eintrag entfernt. So kann gewährleistet werden, dass nur vollständige und bestätigte Wege in den Tabellen der jeweiligen Knoten gespeichert werden. Zum anderen wird die Suche nach einem Nachbarknoten mit einem kleinen Senderadius zuerst lokal vorgenommen. Kann kein Knoten erreicht werden, wird der Senderadius weiter ausgedehnt. Dadurch wird nicht sofort das gesamte Netzwerk mit Route Request-Paketen geflutet und somit Bandbreite gespart. Die dritte Optimierung betrifft den

Inhalt der Route Request-Pakete. Jedes Paket wird durch die *Quelladresse* und die *Anforderungskennung* genau bestimmt, womit Duplikate vermieden werden. Liegt ein Duplikat vor, wird das Paket verworfen und nicht weiter bearbeitet. Der Zielknoten kann somit später eintreffende Pakete sofort als Duplikate identifizieren. Mit Hilfe der vierten Optimierung kann die Latenzzeit deutlich verringert werden. Hat ein Knoten in seiner lokalen Tabelle bereits einen Weg zum Ziel gespeichert, sendet er ein Route Reply-Paket zum Startknoten, das den Weg zum Ziel beinhaltet. Auch der Zielknoten erhält die Information, dass ein Weg zu ihm gesucht wurde und bereits dem Startknoten mitgeteilt worden ist. Damit wird auch überprüft, ob der gespeicherte Weg zum Ziel noch existiert.

Natürlich müssen auch die ermittelten Wege verwaltet werden. Wechselt ein Knoten seinen Standort oder verlässt er das Netzwerk, ist es nicht mehr möglich, dass Paket auf dem gespeicherten Weg zuzustellen. Um immer auf den aktuellen Stand zu bleiben, welche Nachbarn noch erreichbar sind, sendet jeder Knoten in periodischen Abständen eine *call-Nachricht* rundum. Erhält er keine Antwort, werden alle Wege über diesen Knoten gelöscht. Auch das erfolglose Senden eines Paketes, welches mit einem *error-Paket* beantwortet wird, führt zur Löschung eines Eintrages. Diese Prozedur nimmt jeder Knoten in seiner Routingtabelle lokal vor. Sollte ein Knoten das „Verschwinden“ eines Knotens bemerkt haben, informiert er seine noch aktiven Nachbarn darüber. Nun können auch diese die Wege aus ihren Tabellen entfernen. Jetzt muss ein neuer Weg zum Ziel gesucht werden.

Wie alle topologiebasierten Verfahren wird auch AODV nur mit einer nicht zu starken Dynamik des Netzwerkes fertig. Allerdings bleibt festzuhalten, dass AODV die aufkommende Bandbreite gegenüber dem DSR-Algorithmus wegen der Verminderung der Paketgröße schon deutlich verringern konnte. In hochdynamischen Netzen besteht jedoch die Gefahr, dass eine ermittelte Route schnell ihre Gültigkeit verliert. Positionsbasierte Verfahren kommen mit der Dynamik besser zurecht. Hier spielen andere Einflussfaktoren wie das *Beaconing*, der *Location Service* und die Positionsbestimmung durch ein Positionierungssystem wie beispielsweise GPS eine tragende Rolle.

### 2.2.5 Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR)

Das von Karp [Kar00][Ka00] im Jahre 2000 entwickelte Greedy Perimeter Stateless Routing (GPSR) gehört zu den positionsbasierten Routingverfahren. Stellte bei den eben erläuterten Verfahren die hohe Dynamik des Netzwerkes ein großes Problem dar, tritt hier eine andere Schwierigkeit auf. Doch dazu später mehr. Zunächst wird das Routingverfahren erläutert. GPSR benötigt keine Informationen bezüglich der Topologie der einzelnen Knoten. Dies bedeutet, dass es für die Paketzustellung unerheblich ist, über welche Knoten das Paket zum Ziel gelangt (keine Routing-Tabellen). Ebenfalls ist die Topologie der näheren Umgebung um

den Zielknoten für die Paketzustellung nicht interessant. Solch ein Algorithmus wählt einen anderen Ansatz über den so genannten *Location Service*. Dieser hat die Aufgabe, den Aufenthaltsort von einem bestimmten Knoten innerhalb des MANET's zu ermitteln. Voraussetzung für die Durchführung dieses Verfahrens ist also, dass der Startknoten weiß, wo er sich selbst, seine Nachbarn und der Zielknoten befindet. Die Bestimmung der Positionen könnte z.B. mit dem Positionierungssystem GPS erfolgen, welches auch von dem Location Service für die Positionsbestimmung eingesetzt wird. Näheres über die einzelnen Location Services wie z.B. Homezone [Par97], DREAM (Distance Routing Effect Algorithm for Mobility) [Ma01] oder auch den Grid Location Service [Li00] kann in den angegebenen Literaturquellen nachgelesen werden.

Hat ein Knoten das Paket erhalten und muss er es an den Zielknoten weiterleiten, so steht die Adresse des Zielknotens im Kopf (Header) des empfangenen Pakets. Bei der Weiterleitung wird stets versucht, das Paket über einen Knoten zum Ziel zu bringen, der die geringste Entfernung aller sich im Funkbereich befindenden Knoten zum Zielknoten aufweist. Durch diese lokale Entscheidung wird der hohen Dynamik des Netzwerkes Rechnung getragen, da ein später an das gleiche Ziel gesendete Paket höchstwahrscheinlich einen anderen Weg einschlagen wird. Für die Weiterleitung wird ein lokales *Greedy-Verfahren* in Abhängigkeit vom Zielknoten verwendet, womit ein möglichst schnelles Senden der Nachricht erreicht wird. Allerdings stößt das Greedy-Verfahren durch das Auftreten eines *lokalen Optimums* in manchen Situationen an seine Grenzen. Sollte dies der Fall sein, kann GPSR flexibel reagieren und schaltet in den *Perimeter-Modus* um. Im Folgenden wird die genaue Vorgehensweise erläutert.

Wie bereits beschrieben arbeitet GPSR hauptsächlich mit dem Greedy-Verfahren. Die Abbildung 2.6. auf der nächsten Seite zeigt, dass ein Knoten  $x$  einen bestimmten Funkbereich hat, dessen Reichweite durch den Radius  $r$  angegeben wird. Alle Knoten, die sich in diesem Funkbereich befinden, wären in der Lage, ein von  $x$  gesendetes Paket an den Zielknoten  $D$  weiterzuleiten. Der Greedy-Modus leitet aber das Paket zu dem Knoten weiter, der die kürzeste euklidische Distanz  $\overline{kD}$  besitzt. Dies wird als *Greedy-Eigenschaft* bezeichnet. In Abbildung 2.6. kann über den Knoten  $y$  der lokal beste Fortschritt erreicht werden. Demnach wird das Paket zunächst zum Knoten  $y$  gesendet. Die Greedy-Eigenschaft gewährleistet, dass eine Route aufgebaut wird, die möglichst wenige Teilschritte (Hops) zum Ziel benötigt.

Um die Greedy-Eigenschaft verwenden zu können, muss  $x$  die genaue Position seiner Nachbarn kennen. Hierzu wird ein simpler, statischer Algorithmus gestartet, der den Namen *Beacon-Algorithmus* trägt. Dieser beinhaltet, dass jeder Knoten Beacon-Pakete in periodischen Abständen (Intervallen) an seine Nachbarn sendet. Die Pakete übertragen lediglich die Knoten ID und die derzeitige Position des Absenders. Dabei werden die Beacons an alle Nachbarn im Funkbereich durch broadcasting versendet. Wenn ein Knoten innerhalb

eines Zeitintervalls  $t$  kein Beacon von seinem Nachbarn erhält, den er zuvor schon einmal erreicht und deswegen gespeichert hatte, entfernt er diesen aus seiner Tabelle. An dieser Stelle wird nochmals erwähnt, dass ein Knoten nur seine Nachbarn kennen muss und nicht alle Knoten im Netzwerk, die zwischen ihm und dem Ziel liegen.

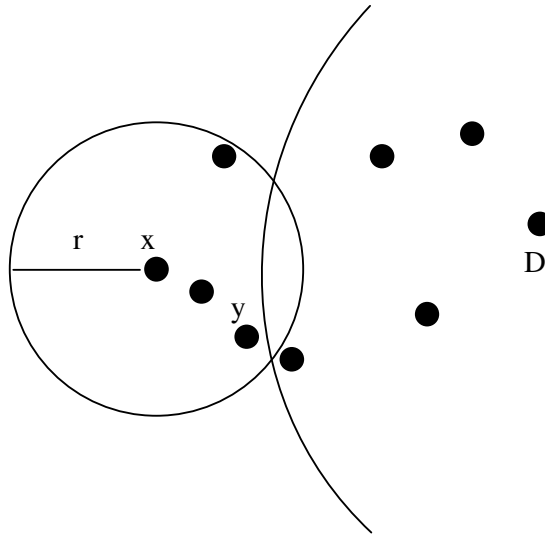


Abbildung 2.6.: Greedy-Eigenschaft

Damit die Bandbreite durch das Senden der Beacons nicht zu stark in Anspruch genommen wird, werden auch Piggybacking-Pakete gesendet. Diese stellen Datenpakete dar, die als Anhang ein Beacon besitzen. Wird eine Nachricht im Beaconintervall gesendet, braucht kein Beacon mehr explizit übertragen werden. Auf diese Art und Weise erfahren die Knoten ebenfalls von der Position ihrer Nachbarn und können ihre Tabellen (Nachbarschaftstabellen) aktualisieren.

Aufgrund der sehr begrenzten Bandbreite im MANET darf das Beaconintervall nicht zu klein sein, da sonst zuviel Bandbreite für das Versenden der Beacons verwendet wird. Auf der anderen Seite darf das Intervall auch nicht zu lang sein, weil sonst zu schnelle Fahrzeuge das Beacon zu spät oder gar nicht empfangen würden.

Nun zeigt Abbildung 2.7. den Fall, dass das Paket nicht nach dem Greedy-Verfahren zum Ziel gesendet werden kann. Der Knoten  $x$  befindet sich in einem lokalen Optimum. Die Greedy-Eigenschaft kann nicht mehr angewendet werden, da das Senden des Pakets zu Knoten  $w$  oder  $y$  keinen lokalen Fortschritt darstellt. Es muss nun zum Perimeter-Modus übergegangen werden, da das Paket nicht mehr im normalen Modus zum Zielknoten gesendet werden kann.

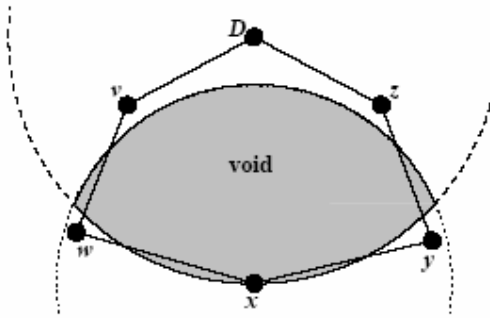
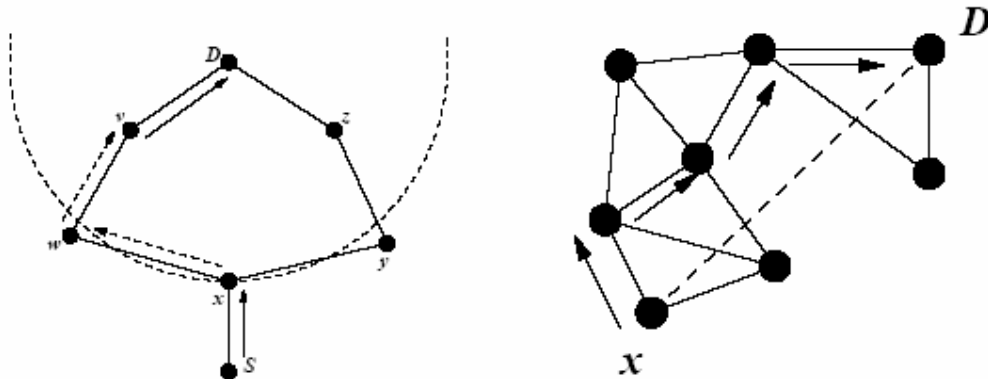


Abbildung 2.7.: Lokales Optimum im Greedy-Modus - Quelle [Ka00]

Die Idee des Perimeter-Modus ist es, das MANET als einen planaren Graphen zu betrachten. So kann mit Hilfe der *Rechten-Hand-Regel* aus dem lokalen Optimum entkommen werden. Das Greedy-Verfahren kommt dann wieder zum Einsatz, wenn der neue Empfänger des Paketes näher am Zielknoten liegt als das lokale Optimum. In der Abbildung 2.8. wird die Vorgehensweise des Perimeter-Modus verdeutlicht.



a) Idee des Perimeter-Modus  
Quelle – [Ka00]

b) Strategie des Perimeter-Modus  
Quelle – [Ka00]

Abbildung 2.8.: Perimeter-Modus

Soll der Perimeter-Modus angewendet werden, muss das Netzwerk als ein gerichteter Graph  $G = (V, E)$  vorliegen. Äquivalent zum Algorithmus von Dijkstra ist  $V$  die Knotenmenge und  $E$  die Kantenmenge. Der Unterschied betrifft die Verbindungen, also die Kanten zwischen den Knoten. Eine Kante  $e_i \in E$  ist nur dann eine Verbindungslinie zwischen zwei Knoten  $v_i$  und  $v_j \in V$ ,  $i \neq j$ , wenn sich die beiden Knoten in einem gemeinsamen Funkbereich (*radio range*) befinden. Formal dargestellt wird dies durch  $|v_i, v_j| \leq \text{radio range}$ ; der Abstand der beiden

Knoten darf also nicht größer sein als die maximale Ausdehnung des Funkbereichs. Wird die Strategie (Rechte-Hand-Regel) des Perimeter-Modus angewendet, setzt das Verfahren voraus, dass der Graph bereits planarisiert wurde. Ein *planarer* (plättbarer) Graph ist in der Graphentheorie ein Graph, dessen Knoten und Kanten in einer Ebene darstellbar sind und sich nur in den Knoten schneiden dürfen [Die00]. Kanten dürfen also nicht innerhalb des Graphen gekreuzt werden.

Ein planarer Graph hat zwei verschiedene Gebietstypen. Das innere Gebiet (*interior face*) wird an allen Seiten durch einen geschlossenen Polygonzug begrenzt. Das äußere Gebiet (*exterior face*) beschreibt hingegen die Region des Graphen, die nicht durch einen geschlossenen Polygonzug dargestellt werden kann. Dies betrifft die äußere Region um den Graphen. Zur graphischen Veranschaulichung sind die beiden Gebiete in Abbildung 2.9. auf der nächsten Seite dargestellt. Werden nun im radio range eines Knotens alle sich darin befindenden Knoten durch Kanten verbunden, schneiden sich diese evt. auch außerhalb der Knoten. Damit ist die Definition eines planaren Graphen nicht mehr erfüllt.

Um dieses Szenario vermeiden zu können, wurden Planarisierungs-Algorithmen entwickelt. Diese greifen jedoch auf das topologische Gesamtwissen [Die00] zurück, welches den Knoten nicht zur Verfügung steht. GPSR verwendet für die Planarisierung einen verteilten Algorithmus und planarisiert die jeweiligen Tabellen der Knoten. Die gespeicherten Kanten, die nicht die Planarisierungseigenschaft erfüllen, werden aus den Tabellen gelöscht, so dass nun keine Verbindung über diesen Weg aufgebaut werden kann. Somit entsteht ein planarer Graph.

Zwei Alternativen für dieses Verfahren stellen RNG (*Relative Neighborhood Graph*) [Tou80] und GG (*Gabriel Graph*) [Gab69] dar. Auch diese führen eine Planarisierung des Graphen durch und entfernen die Kanten aus dem Graph unterschiedlich stark. Dabei ist RNG ein Teilgraph des GG, da hier weniger Kanten verbleiben als bei GG. In Abbildung 2.10. ist dieser Sachverhalt aufgeführt. Des Weiteren werden im Abschnitt 2.3 einige auftretende Probleme von Planarisierungsverfahren kurz dargestellt. Auch deren Funktionsweise wird hier erläutert. In diesem Abschnitt werden außerdem alle auftretenden Probleme im Zusammenhang mit den MANET's und den dazugehörigen Routingverfahren erläutert. Dabei wird stets zwischen einem Stadtszenario und einem Autobahnszenario differenziert. Es wird sich herausstellen, dass GPSR in einem Autobahnszenario weniger Probleme mit der Paketzustellung hat, als in einem Stadtszenario. Dies ist bedingt durch das Fehlen von natürlichen Hindernissen.

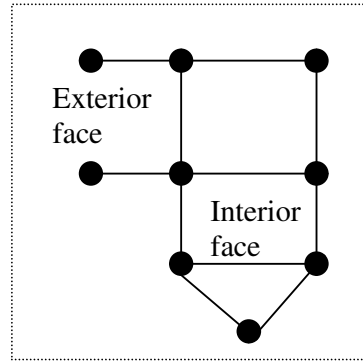


Abbildung 2.9.: Gebiete des planaren Graphen

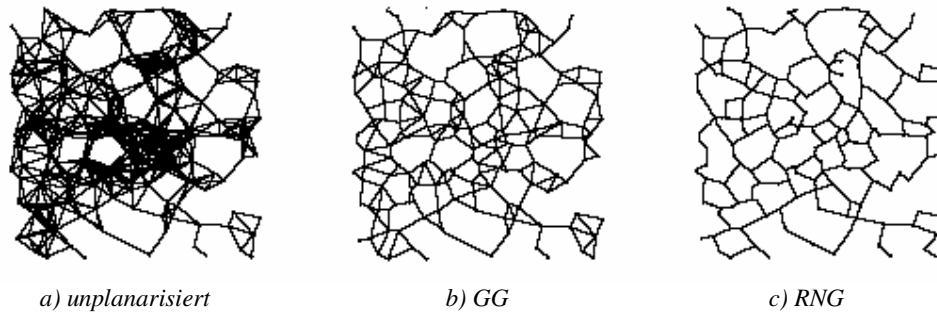


Abbildung 2.10.: Planarisierungsverfahren - Quelle – [Ka00]

Ein Paket befindet sich im Knoten  $x$  in einem lokalen Optimum. Im Header des Paketes wird eingetragen, ob GPSR gerade im Greedy- oder Perimeter-Modus arbeitet. Da nun auf den Perimeter-Modus umgeschaltet wird, kommt die Rechte-Hand-Regel zum Einsatz und der Perimeter-Startknoten  $x$  wird in den Location-Eintrag  $L_p$  des Headers eingetragen. Zum besseren Verständnis wird nochmals auf das Bild b) aus der Abbildung 2.8. verwiesen, wo allerdings auf Grund der besseren Übersichtlichkeit kein lokales Optimum vorliegt. Als erstes wird die Lage der virtuellen Kante der Strecke  $\overline{xD}$  betrachtet. Der Knoten  $x$  prüft, welche Knoten er über Kanten erreichen kann. Das Paket muss über diejenige Kante zu einem Knoten  $u$  gesendet werden, die als Erstes ausgehend von  $\overline{xD}$  gegen den Uhrzeigersinn laufend erreicht wird.  $\overline{xD}$  ist die Strecke vom Startknoten des Perimeter-Modus  $x$  zum Zielknoten  $D$ . Dabei durchkreuzt die virtuelle Kante das Gebiet, in dem sich das Paket befindet. Wurde nun das Paket zu einem Knoten  $u$  gesendet, wird wiederum eine Kante zu einem Knoten  $w$  gewählt, die als Erstes gegen den Uhrzeigersinn erreicht ist. Sollten sich allerdings die Kante  $\overline{xu}$  und die Kante  $\overline{uw}$  schneiden, wird die Kante  $\overline{uw}$  entfernt und eine neue Kante zu einem Knoten  $z$  gesucht. Wird im Laufe des Perimeter-Modus ein Knoten  $g$  erreicht, der dem Ziel näher ist als  $x$ , kann wieder in den Greedy-Modus umgeschaltet werden.

Zusammenfassend gewährleistet GPSR die Benutzung der Geographie, um lokale Weiterleitungsentscheidungen zu treffen, eine geringe Protokollkomplexität sowie eine sehr robuste Paketzustellung in dicht besetzten Netzwerken. In Zukunft soll GPSR um die Möglichkeit erweitert werden, die Pakete auch an solche Knoten weiterzuleiten, die sich in einem dreidimensionalen Raum befinden. Durch das Initialisieren von Piggybacking-Paketen konnte bereits der aufkommende Verkehr im Netzwerk reduziert werden.

### 2.2.6 Bewertung der Routingverfahren

Alle drei vorgestellten und speziell für MANET's entwickelten Routingverfahren führen in der Praxis zu unterschiedlichen Resultaten. In Simulationen wurden vier verschiedene Kriterien herangezogen, um eine vergleichende Analyse zwischen den Routingverfahren zu erstellen:

- Durchschnittliche Zustellrate
- Durchschnittliche aufkommende Bandbreite
- Durchschnittliche Latenzzeit
- Durchschnittliche Anzahl benötigter Hops

Als Basis dienten dabei die topologiebasierten Routingverfahren DSR und AODV, an denen sich die positionsbasierten Routingverfahren messen sollten. In dieser Diplomarbeit werden für die positionsbasierten Verfahren nur die Ergebnisse von GPSR dargestellt, da Schwächen dieses Verfahrens wie eine gestörte Übertragung durch Gebäude, Berge etc. in der Verkehrssimulation SUMO nicht abgebildet werden können. Näheres hierzu im Abschnitt 3.3.

Für die bereits durchgeführten Simulationen wurden realistische Fahrzeugbewegungen verwendet, die mit Hilfe des mikroskopischen Verkehrssimulators FARSI der DaimlerChrysler AG erzeugt wurden. Diese stellen eine sehr hohe Komplexität dar, da nicht nur die korrekten Abstände zwischen den Fahrzeugen modelliert werden, sondern auch das gesamte Spektrum des Fahrerverhaltens einschließlich der Bereitschaft zum Spurwechsel, zum Überholen oder die Beachtung der zulässigen Höchstgeschwindigkeiten. Anschließend wurden diese Daten dem Netzwerksimulator *ns-2* [Ns2] mit der integrierten *CMU-Monarch* [Mon] Erweiterung für mobile Funkübertragungen hinzugefügt.

Bei den Simulationen muss ferner zwischen einem Autobahnszenario und einem Stadtszenario differenziert werden. Diese unterscheiden sich stark in der Anzahl der simulierten Straßen und Gebäude, die eine Funkübertragung stören oder auch zu einem lokalen Optimum führen können.



Im Folgenden werden die Routingverfahren in den eben erwähnten vier Kriterien miteinander verglichen. Dafür werden in der Tabelle 2.3. die Simulationseigenschaften des Autobahn-szenarios [Mau02] und in der Tabelle 2.4. die Simulationseigenschaften des Stadtszenarios [Lo03] aufgelistet. In dem Autobahnszenario wurden nur GPSR und DSR verglichen, jedoch ist davon auszugehen, dass AODV hier nur geringfügig bessere Werte erzielt als DSR.

Parameter	Wert
Szenarioausdehnung in m	10 km Autobahnstrecke (2 Spuren/Richtung)
Anzahl der Knoten	240
Kommunikationsdistanz in m	500 1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000 4500
Simulationsdauer in s	200
Verschickte Pakete pro Verbindung	20
Verschickte Pakete pro Verbindung/s	4
Funkübertragungsreichweite in m	250

*Tabelle 2.3.: Simulationseigenschaften im Autobahnszenario*

Parameter	Wert
Szenarioausdehnung in m	6250 × 3450
Anzahl der Knoten	955
Kommunikationsdistanz in m	500 1000 1500 2000 2500 3000 3500 4000
Simulationsdauer in s	30
Verschickte Pakete pro Verbindung	20
Verschickte Pakete pro Verbindung/s	4
Funkübertragungsreichweite in m	500

*Tabelle 2.4.: Simulationseigenschaften im Stadtszenario*

### Durchschnittliche Zustellrate

GPSR als Vertreter eines positionsbasierten Verfahrens ist für die Paketzustellung in einem Autobahnszenario erste Wahl. Hier erreichen nahezu 100 % aller versandten Pakete ihren Empfänger. Dabei ist dieser Wert unabhängig von der Kommunikationsdistanz. Wird GPSR in einem Stadtszenario eingesetzt, verschlechtert sich dieser Wert durch das Auftreten von lokalen Optima mit zunehmender Distanz zwischen Sender und Empfänger rapide. Bei der Anwendung von AODV und DSR kann nie eine Übertragungsrate von ca. 100 % erreicht werden, jedoch kann aus Tabelle 2.5. der Vorteil der beiden Verfahren in Stadtszenarien gegenüber GPSR entnommen werden. Alle Werte entsprechen ungefähren Werten.

Verfahren	Autobahn 500 m	Autobahn 4000 m	Stadt 500 m	Stadt 4000 m
GPSR	99,9 %	99,9 %	85,83 %	16,45 %
DSR	99 %	75 %	96,87 %	21,50 %
AODV	Keine Angabe	Keine Angabe	97,34 %	79,72 %

***Tabelle 2.5.:** Durchschnittliche Übertragungsrate in Abhängigkeit vom Szenario und von der Entfernung zwischen Sender und Ziel*

Der Grund, weshalb DSR im Autobahnszenario eine geringere Übertragungsrate erreicht, ist, dass DSR versucht, eine vollständige Route aufrecht zu erhalten. Diese kann jedoch bereits wieder ungültig sein. Auch AODV verwendet vollständige Routen. Diese werden im Unterschied zu DSR im jeweiligen Knoten gespeichert. Da GPSR nur die Position des Zielknotens kennen muss, wird mit diesem Routingverfahren in einem Autobahnszenario die beste Übertragungsrate erreicht werden können, auch wenn für AODV keine Daten verfügbar sind.

### **Durchschnittliche aufkommende Bandbreite**

Bei diesem Kriterium kann GPSR in beiden Szenarien punkten. Mit zunehmender Distanz wird die durchschnittliche aufkommende Bandbreite höher. Es bleibt festzuhalten, dass GPSR mit größer werdender Entfernung die Bandbreite am geringsten belastet. In Tabelle 2.6. wird diese Einschätzung belegt.

Verfahren	Autobahn 500 m	Autobahn 4000 m	Stadt 500 m	Stadt 4000 m
GPSR	102,4000	1945,6000	157,7300	438,4160
DSR	716,8000	11878,4000	279,2040	11763,7000
AODV	Keine Angabe	Keine Angabe	33,2772	499,4830

***Tabelle 2.6.:** Durchschnittliche aufkommende Bandbreite in kbps in Abhängigkeit vom Szenario und von der Distanz zwischen Sender und Ziel*

DSR flutet sofort seinen gesamten Funkbereich mit Route Request-Paketen. Daher ist die Bandbreite auch extrem hoch. AODV flutet erstmal nur einen geringen Teil seines Funkbereichs mit Paketen. Kann kein Knoten gefunden werden, wird der Senderradius erhöht. GPSR sendet das Paket an denjenigen Knoten, der den lokal besten Fortschritt zum Ziel aufweist. Das spart Bandbreite und verdeutlicht den Vorteil von GPSR gegenüber DSR und AODV.

### Durchschnittliche Latenzzeit

Über die Latenzzeit in einem Autobahnszenario lassen sich keine Angaben machen, da dieses Kriterium nicht untersucht worden ist. Jedoch lassen sich aus den Tests in einem Stadtszenario schon signifikante Unterschiede zwischen den Routingverfahren ableiten. Hierzu wird auf Tabelle 2.7. verwiesen.

Verfahren	Autobahn 500 m	Autobahn 4000 m	Stadt 500 m	Stadt 4000 m
GPSR	Keine Angabe	Keine Angabe	0,6777 s	3,6066 s
DSR	Keine Angabe	Keine Angabe	0,1308 s	0,9250 s
AODV	Keine Angabe	Keine Angabe	0,149 s	1,6726 s

*Tabelle 2.7.: Durchschnittliche Latenzzeit in Abhängigkeit vom Szenario und von der Distanz zwischen Sender und Ziel*

GPSR verwendet einen Location Service, mit dem die Koordinaten des Zielknotens ermittelt werden. Daraus ergibt sich die relativ lange Latenzzeit. Da DSR das Netzwerk sofort flutet, kann die Zeit bis zum Senden des Paketes gering gehalten werden. Bei AODV ist die Latenzzeit höher, da erst ein kleiner Senderadius mit den Paketen geflutet wird und dieser ggf. vergrößert werden muss. Somit kann DSR die besten Resultate dieses Kriteriums aufweisen.

### Durchschnittliche Anzahl benötigter Hops

Dies ist das letzte zu untersuchende Kriterium. Hier wird untersucht, wie viele Teilstrecken die Pakete durchlaufen müssen, bis sie beim Ziel angekommen sind. Grob gesagt wird hier die Anzahl der beteiligten Knoten aufgeführt. Die Daten befinden sich in Tabelle 2.8.

Verfahren	Autobahn 500 m	Autobahn 4000 m	Stadt 500 m	Stadt 4000 m
GPSR	Keine Angabe	Keine Angabe	2,2708	13,7978
DSR	Keine Angabe	Keine Angabe	1,7044	10,4447
AODV	Keine Angabe	Keine Angabe	2,3410	13,2521

*Tabelle 2.8.: Durchschnittliche Anzahl benötigter Hops in Abhängigkeit vom Szenario und von der Distanz zwischen Sender und Ziel*

Auch zu diesem Kriterium können für ein Autobahnszenario keine genauen Angaben gemacht werden. Jedoch geht hervor, dass in der Simulationszeit von 200 Sekunden in dem 500 m Distanzintervall insgesamt bei DSR ca. 4.000 Pakete gesendet worden sind und bei GPSR ca. 10.000 Pakete. Die weitaus höhere Zahl ist darin begründet, dass GPSR in bestimmten Inter-

vallen Beacons versendet und die Anzahl an Beacons zu den normalen Nachrichten addiert wird. Die Anzahl der gesendeten Beacons pro Sekunde ist jedoch konstant, so dass im 4000 m Distanzintervall bei DSR ca. 48.000 Pakete gesendet worden sind und bei GPSR nur ca. 30.000 Pakete. Das Intervall betrug ein Beacon alle zwei Sekunden. In einem Stadtszenario benötigt GPSR die größte Anzahl an Hops, da oft in den Perimeter-Modus umgeschaltet werden muss. DSR hat hier die geringste Anzahl, welche wiederum seine Begründung in dem Fluten des Netzwerkes findet.

### **Fazit**

Je nachdem, welches Verkehrsszenario verwendet wird, muss auch das jeweilige Routingverfahren gewählt werden. Für die statistischen Analysen im vierten Kapitel werden diese zwar nicht benötigt, jedoch bieten die Routingverfahren die Möglichkeit, spezielle Fahrzeuge außerhalb der Sendereichweite mit Informationen zu versorgen.

## **2.3 Probleme im Zusammenhang mit Mobilen Ad-hoc-Netzwerken**

### **2.3.1 Allgemeines**

Die Verwendung von MANET's bringt leider auch eine Menge von Nachteilen gegenüber Netzwerken mit einer festen Infrastruktur mit sich. Im Folgenden werden die wesentlichen Einschränkungen aufgelistet und erläutert. Dabei sind diese nicht nur für MANET's gültig, sondern für alle Arten von drahtlosen Netzwerken.

Die ersten Einschränkungen betreffen den Übertragungsbereich. In kabelgebundenen Netzwerken kann eine Bandbreite von bis zu 100 Mbit/s angeboten werden, bei drahtlosen Netzwerken je nach verwendetem Standard bis zu 54 Mbit/s. Diese Geschwindigkeit kann jedoch nur unter optimalen Umständen erreicht werden (z.B. keine Betonwände) und nimmt mit der Entfernung ab. Des Weiteren kann es während der Übertragung zu Kollisionen kommen (siehe drittes Kapitel), die auch mit Mechanismen zur Vermeidung eben dieser nicht ganz ausgeschlossen werden können.

Als nächstes werden die Frequenzen betrachtet, auf denen die Signale übertragen werden. Für die Übertragung der Pakete wird das 2,4 GHz-Frequenzband verwendet (siehe drittes Kapitel), welches lizenzfrei und somit günstig zur Verfügung steht. Alle anderen Frequenzbereiche sind entweder noch nicht freigegeben worden und unterliegen nationalen Restriktionen oder sind für den laufenden Betrieb zu teuer. Die Folge ist eine Überbelastung des 2,4 GHz-Fre-

quenzbandes. Ein gesendetes Signal kann stark gestört werden und zu einer fehlerhaften Zustellung führen.

Ein bisher noch gar nicht beachtetes Thema umfasst die Sicherheit innerhalb eines MANET's. Sollen die Pakete auf einem sicheren Weg zwischen Sender und Empfänger gesendet werden, müssen sie zusätzlich verschlüsselt sein. Durch eine genaue Identifizierung der Knoten kann erreicht werden, dass nur ein bestimmter Empfänger das Paket öffnen und lesen kann. Eine genaue Beschreibung, wie ein MANET sicher betrieben werden kann, würde den Rahmen dieser Diplomarbeit sprengen. Die wichtigsten Punkte werden im Unterkapitel 2.4 kurz angesprochen.

Ein letzter wesentlicher Nachteil beim Betrieb von drahtlosen Kommunikationssystemen aller Art betrifft die menschliche Gesundheit. Auch wenn die Wirkung elektromagnetischer Felder auf den Menschen (Elektrosmog) sehr umstritten ist, verdichteten sich in den letzten Jahren Befürchtungen, dass Menschen durch elektromagnetische Wellen an Krebs erkranken können. In einigen Jahren wird die Wissenschaft durch umfangreiche Forschungen zu dieser Frage eine genauere Antwort liefern können.

### 2.3.2 Routingverfahren

In dieser Arbeit wurden mit DSR, AODV und GPSR drei Routingverfahren für MANET's ausführlich dargestellt und erläutert. Dabei bleibt festzuhalten, dass GPSR in einem Autobahnszenario hinsichtlich der Zustellrate sicherlich die beste Arbeit verrichtet. Liegt allerdings ein Stadtszenario zu Grunde, kann wie gezeigt GPSR so nicht verwendet werden. Hierfür wurde ein positionsbasiertes Routingverfahren entwickelt, welches seine Routingentscheidungen aufgrund des Wissens über die Stadtopologie trifft. Das *Geographic Source Routing* (GSR) beruht auf Ergebnissen des Terminode Projekts von Blazevic et al. [Bla00] und wurde von Tian et al. [Tia02] weiterentwickelt. Wie die Ergebnisse der Diplomarbeit von Christian Lochert [Lo03] zeigen, kommt GSR in Stadtszenarien wesentlich besser zurecht als GPSR. In dieser Arbeit wird GSR nicht weiter erläutert, da in der Verkehrssimulation SUMO noch keine Hindernisse implementiert worden sind, die die Übertragung der Pakete stören könnten. Für weitere Informationen zum GSR wird auf die angegebene Literatur verwiesen.

AODV und DSR kommen aufgrund der Tatsache, dass sie die Routen komplett speichern, nur sehr schlecht mit der hohen Dynamik des Netzwerkes zurecht. Die Paketzustellung mittels GPSR verläuft auch nicht immer reibungslos. Deswegen wird nun die Problematik des Greedy- und Perimeter-Modus erörtert.

### Problem des Greedy-Modus

Das im Laufe des Greedy-Verfahrens ein lokales Optimum auftreten können, wurde bereits ausführlich erläutert. In einem Autobahnszenario können die Knoten in fast allen Fällen die Pakete im Greedy-Modus erfolgreich versenden. Sollte es dennoch zu einem lokalen Optimum kommen, wird in den Perimeter-Modus gewechselt. In Stadtszenarien kann dies sehr häufig durch das Auftreten von Hindernissen der Fall sein [Lo03].

### Problem des Perimeter-Modus

Die Durchführung des Perimeter-Modus kann in Stadtszenarien sehr häufig zu Problemen bei der Zustellung der Pakete führen [Lo03]. In Autobahnszenarien sind diese seltener. An dieser Stelle sollen aufgrund der Seltenheit des Vorkommens von lokalen Optima nur die Funktionsweise der Planarisierungsverfahren und deren Probleme kurz vorgestellt werden. Auf Einschränkungen wie Routenschleifen, langen Routen und Probleme der Rechten-Hand-Regel werden in der eben erwähnten Literatur näher eingegangen.

Bei der Erläuterung des Perimeter-Modus wurde bereits erwähnt, dass es zwei alternative Planarisierungsverfahren gibt. Beide unterscheiden sich in der Anzahl der verbleibenden Kanten nach der Durchführung des Algorithmus. Es erfolgt die Unterscheidung in *Gabriel Graph (GG)* und *Relative Neighborhood Graph (RNG)*. Dabei ist RNG ein Teilgraph des GG. Einen Teilgraphen sowohl des GG als auch des RNG stellt der Minimal Spannende Baum (MSB) dar, was bedeutet, dass eine Verbindung zwischen allen Knoten auch noch nach der Planarisierung besteht. Für die graphische Dokumentation der beiden Algorithmen wird auf Abbildung 2.11. verwiesen.

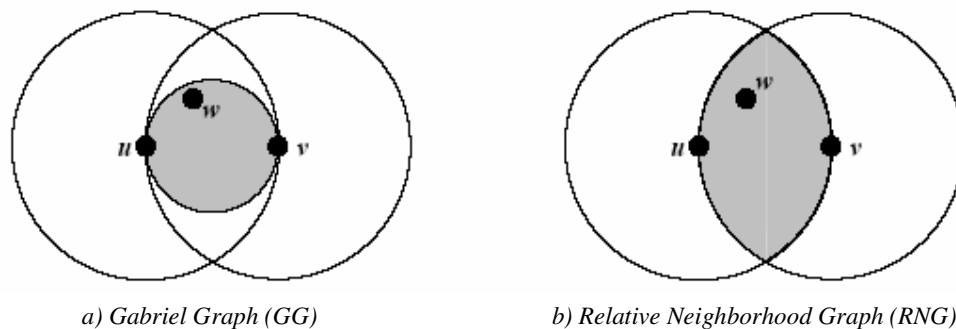


Abbildung 2.11.: Planarisierungsalgorithmen – Quelle [Ka00]

In einem Gabriel Graphen (siehe Abbildung 2.11. a)) kann nur dann direkt von einem Knoten  $u$  zu einem Knoten  $v$  geroutet werden, wenn es keinen Knoten  $w$  gibt, der in dem Kreis mit

den Berührungspunkten  $u$  und  $v$  sowie dem Durchmesser der Distanz von  $u$  und  $v$  liegt. Existiert ein solcher Knoten  $w$ , muss die Kante  $\overline{uv}$  aus den Tabellen gelöscht werden.

Bei dem Relative Neighborhood Graphen wird die Bedingung der Kantenlöschung verschärft. Das Gebiet, in dem kein weiterer Knoten liegen darf, wird vergrößert, weshalb die Anzahl der Kanten im RNG auch geringer als bei GG ist. Eine Kante  $\overline{uv}$  darf demnach nur dann existieren, wenn der Abstand von einem Knoten  $w$  zu Knoten  $u$  oder  $v$  größer ist, als der Abstand von Knoten  $u$  zu Knoten  $v$ . Ist dies nicht der Fall, muss die Kante  $\overline{uv}$  aus den Tabellen gelöscht werden.

Nun haben die Planarisierungsverfahren Schwierigkeiten mit Einschränkungen der Funkübertragung durch Hindernisse [Lo03]. So kann es passieren, dass eine Planarisierung der Tabellen von Knoten  $u$  und  $v$  zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. In der Tabelle von Knoten  $u$  wird die Kante  $\overline{uv}$  entfernt, in der Tabelle von Knoten  $v$  jedoch nicht. Nun existieren in einem Autobahnszenario kaum oder keine Beschränkungen der Signalübertragung. Wie schon öfters erwähnt sind in SUMO solche Beschränkungen auch noch nicht implementiert. Es kann davon ausgegangen werden, dass beide Knoten die Kante aus ihren Tabellen entfernen können. Deshalb kann dieser Punkt vernachlässigt werden. Es war für die Funktionsweise des Perimeter-Modus dennoch wichtig zu verstehen, wie eine Planarisierung eines Graphen durchgeführt werden kann. Auch wurden die anfallenden Probleme deswegen kurz skizziert, falls SUMO in Zukunft hinsichtlich des Vorkommens von Hindernissen erweitert wird.

## 2.4 Sicherheitsaspekte

Zum Abschluss des zweiten Kapitels wird die Sicherheit in MANET's kurz analysiert [Kgl03]. Dieses Forschungsgebiet ist noch sehr jung und wird erst seit dem Jahr 2000 betrieben. Ein Knoten kann *fehlerhaft*, *egoistisch* oder auch *boshaft* sein. Ein fehlerhafter Knoten kann bewirken, dass falsche Topologie-Informationen oder erst gar keine Pakete weitergeleitet werden. Diese Knoten stellen zwar keinen klassischen Angriff dar, jedoch wird auch hierdurch die Funktionsfähigkeit des MANET's beeinträchtigt. Eine Erkennung solcher Knoten durch ein Sicherungssystem wäre demnach wünschenswert.

Egoistische Knoten sind einerseits an Informationen interessiert, andererseits möchten sie aber keine Informationen an andere Knoten senden. Aufgrund eines zum Anfang geringen Ausstattungsgrades mit Funksystemen ist solch ein Verhalten kaum förderlich für eine erfolgreiche Paketweiterleitung. In Musiktäuschkbörsen im Internet existiert solch ein Nutzerverhalten. Es werden Musiktitel auf den PC geladen, jedoch werden keine Titel anderen

Nutzern angeboten. Allerdings ist das Tauschen von Musiktiteln über Tauschbörsen gesetzlich verboten worden.

Den boshaften Knoten geht es lediglich um eine Funktionsunfähigkeit des Netzwerkes. Sie sind somit die eigentlichen Angreifer, da fehlerhafte und egoistische Knoten trotzdem an einer Funktionsfähigkeit des Netzwerkes interessiert sind.

Es gibt drei wesentliche Arten von Mechanismen, um die Sicherheit in MANET's erhöhen zu können:

1. Alle beteiligten Knoten müssen identifiziert werden.
2. Das jeweilige Routingprotokoll muss gegen Manipulationen abgesichert werden.
3. Durch Motivation oder Bestrafung soll egoistisches Verhalten verhindert werden.

Nur durch eine klare Identifizierung der beteiligten Knoten können überhaupt Schutzmaßnahmen greifen. Dabei wird noch immer diskutiert, wie eine Identifizierung ablaufen soll. Punkt eins ist jedoch für eine Implementierung von Punkt zwei und drei Voraussetzung. Kann ein Knoten erkannt werden, der z.B. den Routing-Algorithmus stört, wird er aus dem Netzwerk entfernt. Zusätzlich wird versucht, ein Knoten zu einem Kommunikationsaufbau mit anderen Knoten zu motivieren. Dazu kommen beispielsweise virtuelle Währungen zum Einsatz. Leitet ein Knoten ein Paket erfolgreich weiter, erhält er auf seinem Konto einen bestimmten Betrag gutgeschrieben. Wenn ein Knoten eine Anfrage ins Netz sendet (z.B. ist in der Nähe ein Stau), wird sein Konto wieder um einen Betrag verringert. Die Erkennungsquote von böswilligen und egoistischen Knoten, die aus dem Netz ausgeschlossen werden sollen, kann einen Aufschluss darüber geben, wie erfolgreich sicherungstechnische Verfahren in der Praxis sind. In der Dissertation von Frank Kargl [Kgl03] wurden mögliche sicherungstechnische Maßnahmen in MANET's erläutert. Für weitergehende Informationen wird auf diese Arbeit verwiesen.



## Kapitel 3.

### Kommunikation in einem Verkehrssystem

Die drahtlose Kommunikation zwischen Fahrzeugen ist zz. ein brandaktuelles Thema innerhalb der Verkehrsforschung. Viele Unternehmen betreiben auf diesem Gebiet umfangreiche Untersuchungen, mit welchen Methoden eine erfolgreiche Kommunikation erreicht werden kann. Das größte und bekannteste Projekt ist das von *fleetNet* [fle], bei dem z.B. die Daimler Chrysler AG und die Siemens AG involviert sind. Hier wird das Ziel verfolgt, eine standardisierte Kommunikationsplattform für ein Inter-Fahrzeug Ad-hoc-Funknetz zu entwickeln. Um erste Erfahrungen zu sammeln, wurden sechs Fahrzeuge (Smart's) mit jeweils zwei Notebooks und einem Navigationsgerät ausgestattet [Sma]. Näheres hierzu kann in dem angegebenen Link nachgelesen werden.

Diese Idee der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation ist also nicht neu. Zusätzlich existiert aber noch ein anderer Ansatz. So wird auch in Erwägung gezogen, mit Hilfe von stationären Sendern ein Ad-hoc-Funknetz aufzubauen, um dann für die Fahrzeuge den Zugang ins Internet ermöglichen zu können [DC]. In dieser Diplomarbeit wird bekanntlich auf den Einsatz einer Infrastruktur verzichtet und nur die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation betrachtet.

Im dritten Kapitel wird unter Beachtung bestimmter Randbedingungen beschrieben, welche Möglichkeiten die Fahrzeuge besitzen, um miteinander kommunizieren zu können. Die im zweiten Kapitel vorgestellten Routingverfahren kommen nur dann zum Einsatz, wenn eine Nachricht nicht auf direktem Wege zugestellt werden kann. Im Punkt 3.3.6 werden die drei Übertragungsmethoden nochmals zusammengefasst, zwischen denen unterschieden werden kann. Dadurch kann genau nachvollzogen werden, welche Hilfsmittel für die Datenzustellung wann am besten geeignet sind. Doch vorher werden auch technische und physikalische Fragen geklärt, die die Anforderungen an eine Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation dokumentieren. Nach der Durcharbeitung dieses Kapitels ist der theoretische Teil der Arbeit abgeschlossen. Doch bevor erste Aussagen über die Kommunikation in einem Verkehrssystem getroffen werden können, wird das Verkehrssystem auf ein bestimmtes abgegrenzt.

## 3.1 Wesen eines Verkehrssystems

### 3.1.1 Definition

Im Allgemeinen wird ein Verkehrssystem nach den Verkehrswegen bezeichnet. Zu denen gehören Straßen, Schienen, Wasserstraßen oder Luftkorridore. Wird in dieser Diplomarbeit von einem Verkehrssystem oder einem Verkehrsnetz gesprochen, ist immer ein straßengebundenes Verkehrssystem oder Verkehrsnetz gemeint. In diesem können sich die Fahrzeuge frei bewegen. Ein ausgebautes und dichtes Straßennetz gewährleistet den reibungslosen Ablauf des alltäglichen Personen- und Gütertransports. Somit gehört ein gut ausgebautes Verkehrsnetz zu den obersten Zielen jedes Staates auf der Erde.

### 3.1.2 Verkehrsszenarien

In einem Straßennetz gibt es drei verschiedene Verkehrsszenarien, die in Autobahnverkehr, Stadtverkehr und Landstraßenverkehr klassifiziert werden können. Auf Autobahnen fahren die Fahrzeuge mit einer hohen Geschwindigkeit von durchschnittlich 130 km/h. Dabei kreuzen sich in einem Autobahnszenario relativ wenige Straßen, da die Abschnitte oftmals mehrere Kilometer lang sind. In einem Stadtszenario fließt der Verkehr sehr viel langsamer. Auch kann eine Funkübertragung durch Gebäude gestört werden. Auf Landstraßen dürfen die Fahrzeuge eine Geschwindigkeit von bis zu 100 km/h erreichen. Diese stellen jedoch meistens nur eine Verbindung zwischen einer Autobahn und einer innerstädtischen Straße dar. Sowohl auf Landstraßen als auch auf innerstädtischen Straßen wird der Verkehrsfluss teilweise mit Ampelanlagen geregelt. In diesen beiden Szenarien ist die zur Verfügung stehende Zeit für die Übertragung der Nachricht wesentlich größer als in einem Autobahnszenario.

Der Einsatz der Kommunikationstechnik soll an drei Beispielszenarien verdeutlicht werden. Die Schaubilder in Abbildung 3.1. sind dem *CarTalk-Projekt* entnommen [Car00], welches sich ebenfalls mit dem Aufbau einer Kommunikationsplattform beschäftigt.

Wie aus den Abbildungen zu erkennen ist, wird durch eine frühzeitige Warnung eine rechtzeitige Reaktion der nachkommenden Fahrzeuge gewährleistet. Voraussetzung ist sicherlich ein bestimmter Ausrüstungsgrad der Fahrzeuge mit der entsprechenden Hardware, damit Sender und Empfänger miteinander kommunizieren können. Wie hoch dieser Ausrüstungsgrad sein muss, zeigen die statistischen Analysen im vierten Kapitel. Dort wird ein Verkehrsnetz verwendet, dessen Kreuzungspunkte von Ampeln geregelt werden.

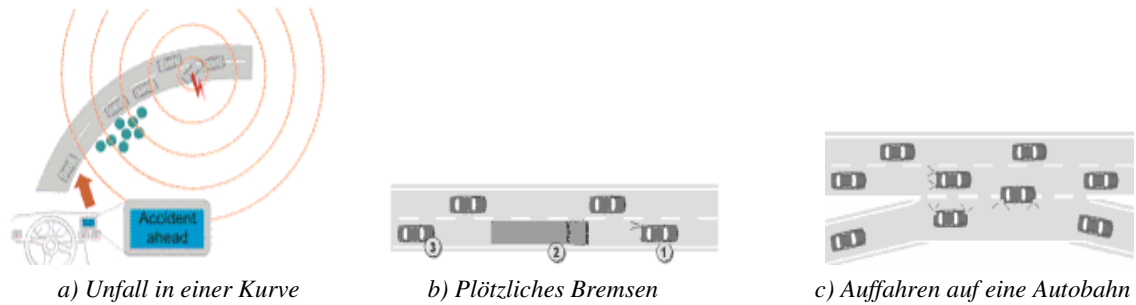


Abbildung 3.1.: Bedrohliche Situationen

Interessant ist in diesem Zusammenhang der Auslösezeitpunkt der Nachrichten. Bei einem Unfall wäre es denkbar, dass die Nachricht durch das Auslösen des Airbags oder durch einen Aufprall entsendet wird. Infolge eines Staus erfolgt eine Nachrichtenübermittlung durch das Unterschreiten einer bestimmten Durchschnittsgeschwindigkeit, die auf einer Straße unter normalen Bedingungen erreicht werden kann. Dieses ganze Themengebiet muss jedoch noch weiter erforscht werden und wird in dieser Diplomarbeit nicht weiter betrachtet.

### 3.2 Sender und Empfänger

Jedes Fahrzeug kann sowohl Sender als auch Empfänger sein. Dies ist die Grundlage der Kommunikationstheorie. Die Fahrzeuge haben die Aufgabe, andere Fahrzeuge vor Verkehrssituationen zu warnen und erhaltene Nachrichten ggf. weiterzuleiten. In den MANET's, die im zweiten Kapitel betrachtet wurden, wird statt von Fahrzeugen von Knoten gesprochen. Da im dritten Kapitel die theoretischen Grundlagen über die Kommunikation in einem Verkehrssystem vermittelt werden sollen, ist nun von Fahrzeugen die Rede. Ganz wichtig ist, dass der Sender automatisch eine Nachricht an einen Empfänger sendet. Ein manuelles Senden der Nachrichten durch den Menschen würde diesen stark vom Fahren ablenken. Es soll ihm lediglich mitgeteilt werden, dass er besonders vorsichtig fahren solle oder einen anderen Weg benutzen muss.

### 3.3 Ablauf der Informationsweiterleitung

Der genaue Ablauf der Informationsübermittlung stellt sich als sehr komplex dar. Im Kapitel 3.3 wird dieser Prozess in einzelnen Schritten vorgestellt. Mit Hilfe von Berechnungen kann verdeutlicht werden, welche Schwierigkeiten im Zusammenhang mit der Informationsweiterleitung auftreten können. So wird u. a. berechnet, wie lange eine Übertragung der Pakete an den Empfänger dauert. Die Pakete stellen die Datensendungen dar, die zwischen

den Fahrzeugen ausgetauscht werden. Dazu wird im Kapitel 3.3.2.1 die verwendete Funktechnologie vorgestellt und deren Funktionsweise erläutert. Zum Abschluss des theoretischen Teils dieser Arbeit befindet sich im Punkt 3.3.6 eine kurze Zusammenfassung, die mit einem Ausblick auf das vierte Kapitel schließt.

### 3.3.1 Benötigte Informationen

Es stellt sich als Erstes die Frage, wie einem anderen Verkehrsteilnehmer auf einfache Art und Weise mitgeteilt werden kann, dass er in Kürze auf eine Gefahrenstelle auffährt. Dazu wird zunächst erörtert, welche Informationen an andere Fahrzeuge gesendet werden müssen, damit diese die Nachricht nutzbar verwerten können. Je nach der Anzahl an Informationen ergibt sich eine unterschiedliche Paketgröße (Nachrichtengröße) in Byte. Unabhängig von der Art der Gefahrenstelle ist es notwendig, den nachfolgenden Fahrzeugen die genaue Position mitzuteilen, wo besonders vorsichtig gefahren werden muss. Auf der Erdoberfläche kann eine Position durch den Längengrad und den Breitengrad angegeben werden. Die Bestimmung der beiden Größen erfolgt mittels GPS [Rot02, S. 257-266] [Bau03]. Eine vorhergehende Anmeldung beim GPS-Dienst ist nicht notwendig. Die Navigationssysteme in den Fahrzeugen können die ausgesendeten Signale kostenlos benutzen und auswerten. Die Signale erhalten die GPS-Empfänger von Satelliten, die die Erde mit einem Abstand von ca. 20200 km umkreisen. Für nähere Informationen wird auf die angegebene Literatur verwiesen.

Im zweiten Kapitel wurden die Routingverfahren erläutert, die für die Weiterleitung der Informationen zu einem bestimmten Fahrzeug zuständig sind, wenn sich dieses nicht in Sendereichweite des Initiators des Paketes befindet. Für den Fall, dass an alle Fahrzeuge im Sendebereich ein Paket gesendet werden soll oder sich das Zielfahrzeug bereits in eben diesen aufhält, muss kein Routingverfahren angewendet werden. Das Paket wird auf direktem Wege zugestellt. Sollte jedoch z.B. GPSR für die Paketzustellung gewählt werden, kann das Paket als ein Piggybacking-Paket zugestellt werden (siehe Kapitel 2.2.5). Diese stellen Nachrichten dar, an denen ein Beacon angehängt wurde. Mit einem Beacon wird allen potentiellen Empfängern im Senderadius mitgeteilt, dass sich der jeweilige Knoten, der das Beacon gesendet hat, noch im Sendebereich der Anderen befindet. Für die Aufrechterhaltung des GPSR-Algorithmus ist das Senden von Beacons in Intervallen notwendig.

Ein in diesem Zusammenhang noch nicht erläuterter Punkt ist der genaue Inhalt eines Piggybacking-Paketes. Die wichtigste Anforderung an dieses spezielle Paket ist eine möglichst geringe Belastung der Bandbreite. In Tabelle 3.1. ist aufgelistet, wie viel Byte die einzelnen Informationen benötigen. Mit Hilfe dieser Angaben können im Abschnitt 3.3..3 einige Kenngrößen berechnet werden. Es sei nochmals daraufhin gewiesen, dass bei einer Paketzustellung ohne GPSR nicht alle in der Tabelle aufgelisteten Informationen zum

Empfänger gesendet werden müssen. Informationen speziell für die Durchführung von GPSR sind durch eine grüne Farbe gekennzeichnet.

Information	Bemerkung	Länge in Byte
Fahrzeug ID Sender	Fahrzeug ID des Senders	16
Fahrzeug ID Zielknoten	Fahrzeug ID des Zielknotens, die mit der Nachricht gesendet wird	16
GPS-Position Sender	Position des Senders (Ort der Gefahrenstelle)	8
GPS-Position Zielknoten	Position des Empfängers, die mit der Nachricht gesendet wird	8
Fahrtrichtung	Ausrichtung des Fahrzeugs	2
Straßenname	Name der Straße, auf der sich der Initiator befindet	4
Fahrzeuggeschwindigkeit	Geschwindigkeit des Fahrzeugs des Initiators	2
Sonstiges	Andere Paketinformationen (Stau, Aquaplaning, Kantenliste usw.)	Frei wählbar

*Tabelle 3.1.: Mögliche Informationen und deren Größe*

Die Fahrzeug ID des Senders (Initiators) der Nachricht und seine GPS-Position stellen das Beacon-Paket dar. Durch dessen Versendung wird die Funktionsweise von GPSR aufrechterhalten, da die Nachbarschaftstabellen der Fahrzeuge stets aktualisiert werden können. Um die Aktualität der Tabellen zu wahren, müssen die Beacons in bestimmten Intervallen gesendet werden. Dabei richtet sich die Intervalllänge nach der Geschwindigkeit der Fahrzeuge. Je schneller ein Fahrzeug fährt, desto kürzer muss das Intervall gewählt werden. Ansonsten könnte mit schnellen Fahrzeugen keine Kommunikation stattfinden. Durch kürzere Intervalle wird allerdings die Bandbreite stärker belastet. Deswegen ist es von Vorteil die Höchstgeschwindigkeiten der Straßen zu kennen, da so die Intervalllänge berechnet werden kann. Alle anderen Informationen befinden sich bei GPSR in dem normalen Informationspaket. Werden beide Pakete als Piggybacking-Paket (Beacon und Informationspaket) versendet, kann der Zielknoten eindeutig die Position und Art der Gefahrenstelle bestimmen. Auf Grundlage dieser Daten kann er dann selbstständig entscheiden, wie er mit den Informationen umgeht.

Wie bereits erläutert, muss GPSR nicht immer angewendet werden. Befindet sich das Zielfahrzeug in Sendereichweite des Senders, muss das Paket nicht über andere Fahrzeuge weiter geleitet werden. Somit müssen keine Informationen über die Fahrzeug-ID und Position des Zielfahrzeuges anderen Fahrzeugen mitgeteilt werden, da das Paket bereits dort angekommen ist. Auch beim broadcasting sind diese Angaben nicht notwendig, da allen Fahrzeugen die Informationen zur Verfügung gestellt werden. Dadurch wird allerdings die aufkommende Datenmenge stark erhöht.

Im Feld „Sonstiges“ können beliebige Informationen enthalten sein. Die Größe in Byte dieses Feldes richtet sich dabei nach der Anzahl an zusätzlichen Informationen. So könnten den Fahrzeugen die aktuellen Straßenverhältnisse auf diesem Weg mitgeteilt werden. Beispielszenarien sind hier das Aquaplaning oder auch Glatteis. Über spezielle Sensoren an den Autos wird gemessen, in welchem Zustand sich die Straße gerade befindet.

Die gesendeten Informationen besitzen einen Zeitstempel. Erhält ein Fahrzeug zu einem Zeitpunkt  $x$  zu einer Straße  $z$  eine Information, wird diese abgespeichert. Wird dem Fahrzeug nach einer Zeit  $x+y$  erneut eine Information zur Straße  $z$  übermittelt, wird der Eintrag, der zum Zeitpunkt  $x$  erfolgte, mit dem neuen Eintrag überschrieben. Dadurch kann eine hohe Aktualität der Daten gewährleistet und Duplikate verhindert werden.

### 3.3.2 Verbindungsdetails

In diesem Unterkapitel wird die verwendete Funktechnologie analysiert. Dazu werden im ersten Punkt verschiedene Übertragungsmethoden erläutert. Diese unterscheiden sich besonderes in Bezug auf die maximal mögliche Datenrate. Im zweiten Punkt werden mögliche Übertragungsmethoden genannt, die eine unterschiedliche Herangehensweise an die Paketweiterleitung haben. Im letzten Punkt wird der Gegenverkehr betrachtet und gezeigt, welche Vorteile eine Einbeziehung in die Paketweiterleitung mit sich bringt.

#### 3.3.2.1 Die Funkverbindung

Für den Aufbau einer Funkverbindung gibt es viele verschiedene Funktechniken und Standards. Deswegen wird zunächst erörtert, welche Funktechnologie am besten den Anforderungen eines MANET's genügt. Im Anschluss daran wird Schritt für Schritt die verwendete Funktechnologie erläutert und dem Leser verständlich dargestellt, wie eine möglichst sichere Übertragung der Pakete gewährleistet werden kann.

#### **Funktechnologien und Standards**

Damit die Informationen (Pakete) auch zu den Fahrzeugen gelangen können, muss zwischen Sender und Empfänger eine Funkverbindung bestehen, auf der die Pakete gesendet werden. Ein für MANET's interessanter Standard ist der IEEE 802.11-Standard, der von dem *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE)* standardisiert worden ist [Hei03]. Dieser wurde seit seiner Einführung im Jahre 1997 stetig weiterentwickelt, so dass immer höhere Datenraten erzielt werden konnten. Für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation ist

besonders der Standard IEEE 802.11p von großem Interesse. Der Grund liegt in der Verwendung eines hohen Frequenzbereiches zwischen 5,85-5,925 GHz [Kos], welches noch nicht so stark belastet ist wie das 2,4 GHz-Band. Dieses Frequenzband im 5 GHz-Bereich ist speziell für die Kommunikation in Verkehrssystemen reserviert und bereits von der Regulierungsbehörde der USA genehmigt worden.

Um die verschiedenen Standards miteinander vergleichen zu können, sind in der Tabelle 3.2 auf der nächsten Seite einige Funktechniken aufgeführt. Wie hier zu erkennen ist, eignet sich *Bluetooth* [Wol01] nicht für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation, da erstens die Datenrate viel zu niedrig ist und zweitens auch die maximale Reichweite nicht ausreicht. Zwar soll Bluetooth auf eine Reichweite von 100 Metern erweitert werden, jedoch gibt es immer noch zahlreiche Kriterien (Datenrate, Frequenzbereich), die an der Eignung dieser Technik Zweifel aufkommen lassen. Deswegen wird festgehalten, dass der Standard IEEE 802.11p derzeit erste Wahl für die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen ist; zumindest in den USA. In Deutschland wird bis zur Lizenzierung dieses Standards der Standard IEEE 802.11g eingesetzt. Dies liegt darin begründet, dass IEEE 802.11a auch vom Militär benutzt wird und nur innerhalb von Gebäuden verwendet werden darf. IEEE 802.11g ist vollkommen abwärtskompatibel zu IEEE 802.11b. Allerdings wird das bereits schon stark belastete Frequenzband von 2,4 GHz noch stärker beansprucht. Weitere Informationen über Hiperlan kann in der Literatur von Jörg Roth nachgelesen werden [Rot02, S. 96-106].

	<b>IEEE 802.11a</b>	<b>IEEE 802.11b</b>	<b>IEEE 802.11g</b>	<b>IEEE 802.11p</b>	<b>Bluetooth</b>	<b>Hiperlan/2</b>
<b>Funkreichweite</b>	Mehrere 100m	Mehrere 100m	Mehrere 100m	Mehrere 100m	Bis zu 10m	Bis zu 150m
<b>Datenrate</b>	54 Mbit/s	11 Mbit/s	54 Mbit/s	27 Mbit/s	1 Mbit/s	54 Mbit/s
<b>Frequenzbereich</b>	5,0 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	5,9 GHz	2,4 GHz	5,0 GHz

*Tabelle 3.2.: Vergleich von einigen drahtlosen Funktechniken*

### Sendereichweite

Nun wird die maximale Sendereichweite einer Wireless-Lan-Karte nur in einer freien Umgebung erreicht. Dies bedeutet, dass entweder Sichtkontakt zwischen den Fahrzeugen bestehen muss oder es darf sich nur ein geringfügig dämpfendes Material wie z.B. Holz, Gips oder Glas zwischen den Fahrzeugen befinden. Dennoch nimmt mit zunehmender Entfernung die Höhe der Bandbreite ab. Diese Eigenschaft zeigt Tabelle 3.3., in der die maximal erreichbare Datenübertragungsrate des Standards IEEE 802.11b in Abhängigkeit von der Entfernung zum Sender angegeben ist [Epp03]. Für IEEE 802.11g lagen leider keine Daten vor. Eine Reichweite von 550 m kann nur mit starken Antennen erreicht werden. Mit einer mittleren Antenne dürfte die maximal mögliche Reichweite bei ca. 200 m liegen.

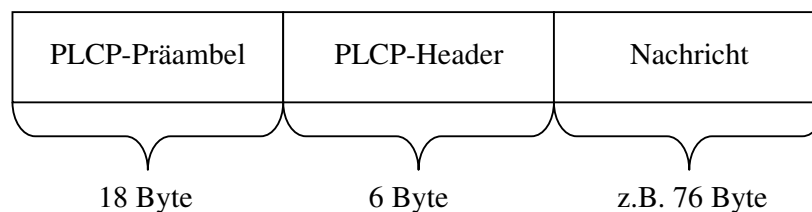
IEEE 802.11b	Sendereichweite in einer offenen Umgebung
Hoch (11 Mbit/s)	bis 160 m
Mittel (5,5 Mbit/s)	bis 270 m
Niedrig (2 Mbit/s)	bis 400 m
Sehr niedrig (1 Mbit/s)	bis 550 m

*Tabelle 3.3.: Eigenschaften von IEEE 802.11b*

### Rahmenformat

Im Unterkapitel 3.3.1 wurde bereits die mögliche Größe eines Datenpaketes in Byte festgelegt. Die zu übermittelnde Nachricht besteht jedoch nicht nur aus diesem Paket, sondern auch aus einem *Physical Layer Convergence Protocol (PLCP)* [Sch00]. Dieses Protokoll gehört zur Bitübertragungsschicht eines IEEE 802.11 Standards. Dieser Standard umfasst außerdem noch die Medienzugriffssteuerung *MAC (Medium Access Control)*, die im nächsten Punkt kurz erläutert wird und das *Logical Link Control (LLC)*. Der LLC-Layer ist dabei für die logische Steuerung der Verbindungen zuständig und ermöglicht es den unterschiedlichen Standards, aufeinander zugreifen zu können.

Die Bitübertragungsschicht von IEEE 802.11b verwendet ferner das *Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)*, um den Empfang im Hinblick auf Störeinflüsse zu verbessern. Hierzu wird das Signal künstlich über einen weiten Bereich gestreut. Durch das versteckte Senden der Informationen im normalen Hintergrundrauschen des Frequenzbandes von 2,4 GHz kann der Empfänger der Nachricht nur dann die Informationen herausfiltern, wenn er genau weiß, wonach er sucht.



*Abbildung 3.2.: PHY-Rahmenformat beim IEEE 802.11b Standard*

Abbildung 3.2. zeigt das PHY-Rahmenformat eines IEEE 802.11b Standards. Dabei muss angemerkt werden, dass der PLCP-Teil stets mit einer Datenrate von 1 Mbit/s übertragen wird. Die Nutzdaten (hier: die Nachricht) kann hingegen mit bis zu 11 Mbit/s übertragen werden. Die Größe ist dabei von dem Feld „Sonstiges“ abhängig und vergrößert sich, je mehr Informationen zu einem anderen Fahrzeug übertragen werden. Das PLCP hat die Aufgabe, ein



Signal zur Überwachung des Mediums zur Verfügung zu stellen. Dieses kontrolliert, ob das Medium derzeit frei oder belegt ist. Außerdem wird ein einheitlicher Dienstzugangspunkt angeboten, der sein Charakteristika in der Unabhängigkeit von der Übertragungstechnik hat. Die Größe von 18 Byte für das PLCP-Präambel ist dabei genauso konstant wie die 6 Byte für den PLCP-Header. Nähere Erläuterungen zur Bitübertragungsschicht kann aus dem Buch von Jochen Schiller entnommen werden. Hier werden auch alternative Verfahren zum Direct Sequence Spread Spectrum vorgestellt.

### **Medienzugriffssteuerung**

Die *MAC-Schicht (Media Access Control)* ist für eine Vielzahl von Aufgaben zuständig. Die Hauptaufgabe liegt darin, den Medienzugriff zu steuern. Senden in einem drahtlosen Kommunikationssystem mehrere Sender gleichzeitig auf einer Frequenz, so findet eine Überlagerung der Signale statt. Für einen Empfänger ist es dabei zunächst unmöglich, ein einzelnes Nutzsignal zu isolieren. Aus diesem Grund muss der Zugriff auf das Übertragungsmedium "Funkkanal" kontrolliert und zwischen den Sendern abgestimmt werden. Die MAC-Schicht wird also für die Funkkanalzuweisung benötigt, so dass möglichst keine Kollisionen entstehen. Außerdem ist die MAC-Schicht noch für das Roaming, Authentifizierung und Energiesparmaßnahmen [Sch00] zuständig. Im Ad-hoc-Modus unterstützt IEEE 802.11 den *asynchronen Datendienst*. Dieser gewährleistet den Datenaustausch auf „Best-Effort-Basis“, welcher beinhaltet, dass keine Dienstgütegarantien wie eine maximale Zugriffsverzögerung gegeben werden. Hier konkurrieren also alle Knoten miteinander, so dass neue Kontrollmechanismen (Protokolle) herangezogen werden müssen. Im Unterkapitel 3.3.5 wird ein Kontrollmechanismus vorgestellt, der Kollisionen fast ausschließen soll. Der standardmäßige Zugriffsmechanismus von IEEE 802.11 wird nun vorgestellt.

Standardmäßig beherrscht IEEE 802.11 den Zugriffsmechanismus *CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)*. Hierbei handelt es sich um ein zufälliges Zugriffsverfahren, das versucht, Kollisionen durch einen *Back-off-Algorithmus* zu vermeiden. Dabei kann nicht erkannt werden, ob im Laufe der Übertragung eine Kollision stattgefunden hat. Dieser Algorithmus ist lediglich ein Verfahren zur Vermeidung von Kollisionen. Es wird untersucht, ob der Empfänger gerade frei ist oder nicht. Sollte er besetzt sein, wird die vorgeschriebene Wartezeit bis zum Senden der Nachricht durch eine zufallsbestimmte Zeit erhöht. Stellt sich nach dem erneuten Abhören des Mediums heraus, dass es noch immer besetzt ist, erfolgt ein neuer Wartezustand, der wiederum durch eine zufallsbestimmte Wartezeit gekennzeichnet ist (Back-off-Algorithmus). Dieses Verfahren wird wiederholt, bis das Medium zum Senden frei ist. Gesendete Pakete müssen vom Empfänger bestätigt werden. Ist dies nicht der Fall, wird das Paket erneut zugestellt. Leider wird nicht das broadcasting unterstützt, was sich gelegentlich beim Fluten des Netzwerks negativ bemerkbar macht. Das

Kollisionsvermeidungsverfahren CSMA/CA ist keine perfekte Lösung, um Kollisionen vermeiden zu können. Ein alternatives Verfahren wird im Unterkapitel 3.3.5 vorgestellt.

Sollten in einem Netzwerk mit vielen Knoten und großer räumlicher Ausbreitung viele Kollisionen auftreten, kann durch den *RTS-CTS-Mechanismus* die Anzahl an Kollisionen vermindert werden. Hier fragt der sendewillige Knoten zunächst beim Empfänger an, ob er ein Paket problemlos empfangen kann. Ist dies der Fall, blockiert der Empfänger für alle anderen Knoten seine Empfangsbereitschaft und sendet eine Rückantwort zum Sender. Dadurch kann das Problem gelöst werden, dass der Sender keine Kontrolle hatte, ob der Empfänger das Paket ordnungsgemäß erhalten hat. Für eine genauere Erörterung des RTS-CTS-Mechanismus wird auf den Punkt 3.3.4.2 verwiesen. Hier werden zudem die drei größten Probleme des IEEE 802.11 MAC-Protokolls vorgestellt.

Es existiert jedoch noch ein weiterer Zugriffsmechanismus, der besonders für die MANET's sehr interessant ist, jedoch nicht von IEEE 802.11 unterstützt wird. Für die MANET's ist die Vorgehensweise dennoch sehr nützlich und wird kurz skizziert. Es handelt sich um das Raummultiplexverfahren *SDMA (Space Division Multiple Access)*, welches eine Fläche, die mit den Paketen versorgt werden soll, in mehrere benachbarte Zellen einteilt, für die unterschiedliche Frequenzen verwendet werden. Damit können Sender Daten an Empfänger in ihrem Bereich schicken, ohne sich gegenseitig zu stören. Durch den räumlichen Abstand und die Dämpfung der elektromagnetischen Wellen sind die Signale von weiter entfernten Sendern auf gleicher Frequenz soweit abgeschwächt, dass für den Empfänger eine klare Trennung möglich ist. Die MANET's realisieren eine Art SDMA, indem sie nicht mit einem starken Sender eine ganze Fläche abdecken, sondern dies mit vielen kleinen Sendern versuchen. Dadurch kann sich der maximale Datendurchsatz des Gesamtnetzes erhöhen. SDMA kann somit Kollisionen beim Empfänger verhindern. Weitere Informationen zur MAC-Schicht befinden sich in der Literatur von Jochen Schiller.

### 3.3.2.2 Übertragungsmethoden

Es existieren drei grundlegende Möglichkeiten, wie die Fahrzeuge ihre Nachrichten verbreiten können [Mau02]. Die primitivste Kommunikationsmethode ist diejenige, die einfach allen Fahrzeugen, die sich im Funkbereich befinden, die Pakete zukommen lässt (*radio broadcast*). Die Folge wäre eine sehr hohe Netzbelastung, da ständig alle Fahrzeuge die Pakete bekommen. Die zweite Möglichkeit sieht vor, dass das Paket von einem Sender an einen bestimmten Empfänger gesendet wird. Dies wird als „Unicast-Methode“ bezeichnet. Befindet sich der Empfänger im Funkbereich des Senders, kann das Paket sofort zugestellt werden. Ansonsten erfolgt die Zustellung über die bereits erläuterten Routingverfahren. In der dritten und letzten Methode wird das Paket an eine bestimmte, geographische Region gesendet.

Dabei erhält das Paket entweder ein Empfänger oder mehrere, je nachdem, wie viele Fahrzeuge sich in dieser Region aufhalten. Bezeichnet wird diese Kommunikationsform als „Geocast-Methode“. Welche von den Übertragungsmethoden angewendet wird, hängt von der Intention des Senders ab. Möchte er das Paket an ein bestimmtes Fahrzeug übermitteln, wird er die Unicast-Methode verwenden. Ist er lediglich daran interessiert, möglichst viele Fahrzeuge mit den Informationen zu versorgen, wird er diese durch broadcast senden. Die Geocast-Methode ist von Vorteil, wenn eine bestimmte Region vor einer Gefahr gewarnt werden soll. Die Wahl des Empfängers hat also großen Einfluss auf die zu verwendende Übertragungsmethode.

### 3.3.2.3 Einbeziehung des Gegenverkehrs

Eine besondere Herausforderung besteht auch darin, dass der Gegenverkehr bei der Weiterleitung der Pakete miteinbezogen wird. Gekoppelt mit einer ständigen Veränderung der Topologie des Netzwerkes kann es sehr schwierig werden, die Pakete vom Sender zum Empfänger zu senden. Die *Topologie* gibt dabei die Lage und Anordnung der Fahrzeuge im Netzwerk an. Wie unterschiedlich diese Konnektivität sein kann, zeigt die Abbildung 3.3. auf der nächsten Seite. Hieraus wird ersichtlich, dass bei einer Einbeziehung des Gegenverkehrs viel mehr Verbindungen zwischen den Fahrzeugen möglich sind, als ohne dessen Berücksichtigung. Da zu erwarten ist, dass bei einer Einführung des Kommunikationssystems nur ein geringer Teil von Fahrzeugen mit der erforderlichen Hardware ausgestattet ist, kann durch die Einbeziehung des Gegenverkehrs eine größere Anzahl von potentiellen Kommunikationspartnern erreicht werden, da sich mehr Empfänger im Sendebereich aufhalten. Eine erfolgreiche Implementierung gestaltet sich jedoch schwierig, da eine Routenfindung unter Einbeziehung des Gegenverkehrs sehr problematisch sein kann. Angenommen ein Fahrzeug fährt konstant mit 100 km/h von rechts nach links und ein zweites Fahrzeug fährt ebenfalls konstant mit 100 km/h von links nach rechts. Der Senderradius beträgt 500 m. Genau diese Streckenlänge haben die Fahrzeuge Zeit, ihre Informationen miteinander auszutauschen. In diesem Fall sind dies 18 Sekunden, bei einer Geschwindigkeit von 150 km/h nur 12 Sekunden. Dies hört sich auf den ersten Blick viel an, jedoch kann evt. ein Paket, welches verworfen und nochmals zugestellt werden muss, nicht mehr zugestellt werden, da die 18 bzw. 12 Sekunden vorüber sind. Insbesondere bei einer Anwendung von DSR oder auch AODV, bei denen komplette Routen gespeichert werden, würde dies zu ständigen Wegunterbrechungen führen. GPSR kommt dagegen bestens mit der Einbeziehung des Gegenverkehrs zurecht, da keine Routen gespeichert werden müssen. Paketübertragungen über den Gegenverkehr sollten deswegen und aufgrund eines zum Anfang geringen Ausstattungsgrades von Fahrzeugen mit der erforderlichen Hardware zugelassen werden. Analysen zum Ausstattungsgrad und zum Senderradius befinden sich im vierten Kapitel, in dem die Simulationen durchgeführt werden.

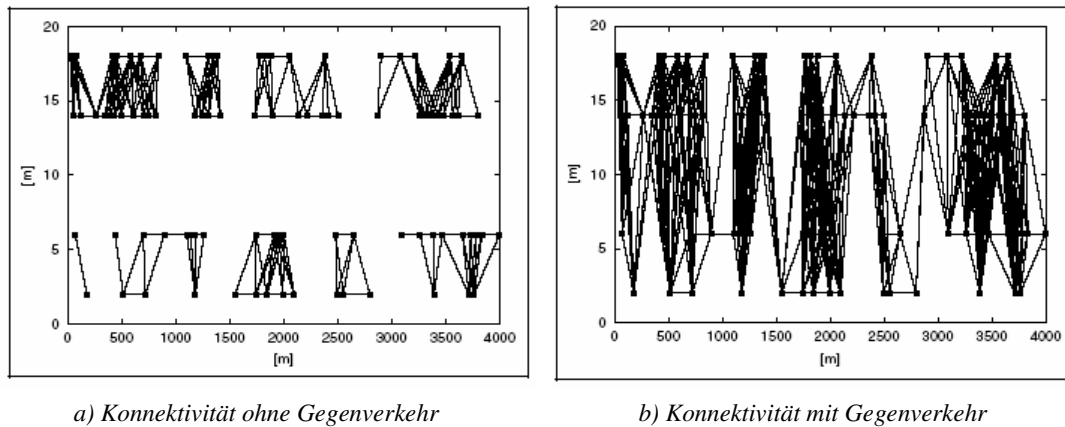


Abbildung 3.3.: Konnektivität mit und ohne Gegenverkehr – Quelle: [Mau02][Fle02]

### 3.3.3 Berechnung von Kenngrößen

Bevor überhaupt statistische Erhebungen in Bezug auf die Anzahl von Fahrzeugen im Sendebereich, Übertragungsdauer oder aufkommende Datenmenge gemacht werden können, müssen einige Kenngrößen angegeben werden [Neu00]. Alle Berechnungen, die nachfolgend durchgeführt werden, hängen wesentlich von der Verkehrsdichte ab. Diese ist eine räumliche Kenngröße und gibt an, wie viele Fahrzeuge pro Kilometer auf einer Straße fahren. Sind dies mehr als 30 Fahrzeuge pro Kilometer, wird die Straße umgangssprachlich als „voll“ bezeichnet [Kie01]. In einem denkbar dichtesten Stau liegt eine Verkehrsdichte von bis zu 140 FZ/km vor. Dies entspricht einem Bruttoabstand von 7,14 m (incl. Fahrzeuglänge). Zu klären bleibt nun noch die durchschnittliche Länge und Breite eines Fahrzeuges im Straßenverkehr [Hof94]. Nach Hofman und Nielsen beträgt die mittlere Fahrzeuglänge der Pkw-Fahrzeugflotte in Deutschland (einschließlich Kleinbussen) 4,5 Meter. Für Lkw's kann eine durchschnittliche Länge von 12 Meter angenommen werden. Bei einem Lkw-Anteil von 10%, welches als Durchschnitt für deutsche Autobahnen angenommen werden kann, ergibt sich eine mittlere Fahrzeuglänge über alle Fahrzeuge von 5,25 Metern. Für die Breite eines Fahrzeuges werden 4 m angenommen (incl. Sicherheitsabstand).

Die Ergebnisse der Berechnungen sollen die Herausforderungen an die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation aufzeigen. Es werden jedoch nur theoretische Minimal- oder Maximalwerte berechnet, die besonders in Bezug auf die Maximalwerte in der Praxis nicht erreichbar sind. Hierzu müssen in realen Verkehrsnetzen einige Tests durchgeführt werden, um statistisch signifikante Aussagen treffen zu können.

### Theoretische Anzahl an Fahrzeugen

Von der Sendereichweite hängt ab, wie viele Fahrzeuge in einem bestimmten Funkbereich anzutreffen sind. Je größer dieser ist, desto mehr Fahrzeuge können als Empfänger in Frage kommen. Um die theoretisch maximal mögliche Fahrzeuganzahl in einem Funkbereich ermitteln zu können, sind einige Gleichungen notwendig. Folgende Gleichungen sind nur für eine zweidimensionale Ebene gültig. Befindet sich im Funkbereich ein Parkhaus, würde sich die maximale Fahrzeuganzahl noch erhöhen.

$$\text{Funkfläche einer Wireless-Lan-Karte: } A = r^2 * \pi$$

$$\text{Fläche eines Fahrzeuges: } B = \text{Länge} * \text{Breite} = 5,25 \text{ m} * 4,0 \text{ m} = 21,00 \text{ m}^2$$

$$\text{Theoretische maximale Anzahl an Fahrzeugen: } A/B$$

Für die Radien werden die Einträge aus Tabelle 3.3. genommen. In der Tabelle 3.4. ist die theoretische maximale Fahrzeuganzahl in Abhängigkeit vom Senderadius dargestellt.

Senderadius	Theoretische maximale Fahrzeuganzahl
160 m	3.830
270 m	10.906
400 m	23.936
550 m	45.254

**Tabelle 3.4.:** Fahrzeuganzahl in Abhängigkeit zum Senderadius

Diese Anzahlen werden in der Praxis nicht erreicht. Es sollte nur ersichtlich werden, dass mit einem größeren Senderadius mehr Fahrzeuge miteinander kommunizieren können. Jedoch nimmt die Signalqualität proportional zum Quadrat der Entfernung zum Sender ab, so dass ab einer Entfernung von ca. 200- 300 m die Pakete nicht mehr sicher zugestellt werden können. Mit einem größeren Senderadius erhöht sich ebenfalls die aufkommende Datenmenge, die nach der Übertragungsdauer berechnet wird.

### Übertragungsdauer

Wie bereits erläutert ist die Sendereichweite abhängig von der Beschaffenheit der Umgebung, in der das Funknetzwerk betrieben wird. Interessant ist nun die Übertragungsdauer eines Paketes mit dem IEEE 802.11b Standard. Hierzu kann nur eine Obergrenze und eine Unter-

grenze für die Übertragungszeit berechnet werden, da sich die Übertragungsgeschwindigkeit an die Verbindungsqualität angleicht. Nach Tabelle 3.3. liegt die Datenrate bei einem maximalen Senderadius von 160 m bei 11 Mbit/s (Untergrenze) und bei einem maximalen Senderadius von 550 m bei 1 Mbit/s (Obergrenze); vorausgesetzt ist eine entsprechend starke Antenne. Aus diesen Daten lassen sich die beiden Grenzen angeben. Die Werte von PLCP und der Nachricht stehen in Abbildung 3.2., in der das Feld „Sonstiges“ mit 76 Byte belegt wurde. Dabei kann die Größe des Nachrichten-Feldes beliebig vergrößert oder verkleinert werden, je nachdem, welche Informationen enthalten sein sollen. Von diesem Parameter wie auch von der Datenübertragungsrate hängt die Übertragungsdauer einer gesendeten Nachricht wesentlich ab.

*Umrechnung: 1 Mbit/s = 1.048.576 Bit/s = 131.072 Byte/s*

*Untergrenze: PLCP / 1 Mbit/s + Nachricht / 11 Mbit/s = 0,24 ms*

*Obergrenze: (PLCP + Nachricht) / Übertragungsrate = 0,76 ms*

Somit beträgt die durchschnittliche Übertragungszeit einer vollständigen Nachricht in diesem Fall 0,50 ms.

Bei einer hohen Auslastung des Netzes ist es unwahrscheinlich, dass alle Pakete ihren Empfänger ohne Kollisionen erreichen. Ist die Auslastung niedrig, können die Werte als ziemlich genau angenommen werden. Ein Protokoll zur Vermeidung von Kollisionen wird im Unterkapitel 3.3.5 vorgestellt. Die Übertragungsdauer hängt außerdem von der Weglänge ab. Kann die Nachricht nicht auf direktem Wege zugestellt werden, da sich zwischen Sender und Empfänger Hindernisse befinden, vergrößert sich die Übertragungszeit, da ein Signal erst über Umwege (z.B. Reflektion an einem Gebäude) den Empfänger erreicht. Dieser durch die Mehrwegeausbreitung verursachte Effekt wird als *Laufzeitdispersion* bezeichnet [Sch00, Seite 66-69]. Für weitergehende Erläuterungen hinsichtlich Störungen der Signalverbreitung wird auf den Punkt 3.3.4 dieser Diplomarbeit verwiesen.

### **Aufkommende Datenmenge**

Als letzten Punkt wird an dieser Stelle die theoretisch aufkommende Datenmenge berechnet. Um diese Größe ermitteln zu können, müssen die Anzahl der gesendeten Nachrichten und deren jeweilige Größe vorliegen. Wird von 2000 gesendeten Nachrichten pro Sekunde mit einer durchschnittlichen Größe von 100 Byte (nach Abbildung 3.2.) ausgegangen, liegt die aufkommende Datenmenge bei 0,19 Megabyte/s. Allerdings ist dieser Wert sehr theoretisch und hängt von vielen zufällig gewählten Parametern ab. Diese wurden rein willkürlich gewählt und können sich durch Messungen in real world-Szenarien erheblich unterscheiden.

### 3.3.4 Störungen der Übertragung

In diesem Punkt werden zwei mögliche Störungsquellen, die bei einer Funkübertragung auftreten können, betrachtet. Im Anschluss daran wird im Unterkapitel 3.3.5 ein MAC-Protokoll für eine Vermeidung von Kollisionen zweier oder mehrerer gesendeter Pakete vorgestellt.

#### 3.3.4.1 Signalausbreitung

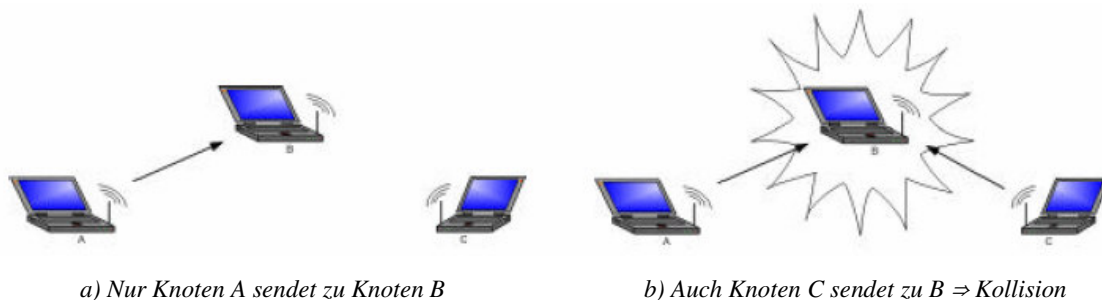
Möchte ein Fahrzeug mit einem anderen Fahrzeug kommunizieren, breitet sich das Funksignal als eine elektromagnetische Welle unabhängig von ihrer Frequenz immer geradlinig aus, solange sich keine Hindernisse zwischen den beiden Fahrzeugen befinden. In einem realen Verkehrssystem auf der Erde kann eine solche direkte, gerade Verbindung ohne das Auftreten aller Arten von Hindernissen nicht permanent gewährleistet werden. Deswegen wird die Empfangsqualität nicht nur vom Abstand zwischen Sender und Empfänger beeinflusst, sondern auch davon, ob sich zwischen den Fahrzeugen z.B. Gebäude oder Berge befinden. Da in den einzelnen Verkehrsnetzen, die mit der Verkehrssimulation SUMO aufgebaut werden, keine Gebäude oder Berge als Hindernisse implementiert werden, kann dieser Punkt jedoch vernachlässigt werden. In realen Verkehrsnetzen können sich die Signale auch dann nicht geradlinig ausbreiten, wenn sich zwischen Sender und Empfänger ein anderes Fahrzeug befindet. Wie stark ein Signal durch ein anderes Fahrzeug gestört wird, hängt von der Frequenz ab, mit der die Signale gesendet werden. Wird das Funksignal mit einer niedrigen Frequenz gesendet, können Objekte besser durchdrungen werden, als mit einer höheren Frequenz. Somit verhält sich ein Signal höherer Frequenz zunehmend wie Licht. Findet demnach in einem Verkehrsnetz eine Funkübertragung statt, kann das Signal ein anderes Fahrzeug durchdringen, da die verwendete Frequenz von 2,4 GHz niedrig ist. Würde die Frequenz dagegen bei z.B. 30 GHz oder mehr liegen, bestünde die Gefahr einer *Abschattung* des Signals. Dies bedeutet, dass das Signal ein Fahrzeug nicht durchdringen kann und gewissermaßen abgeblockt wird. Ein Kommunikationsaufbau zwischen zwei bestimmten Fahrzeugen könnte fehlschlagen. Aus diesem Grund verwendet IEEE 802.11b eine niedrige Frequenz von besagten 2,4 GHz, weswegen in den im vierten Kapitel verwendeten Verkehrsnetz von einer gestörten Übertragung von Funksignalen abgesehen werden kann. Sollte das Beispielnetz hinsichtlich des Vorkommens von Hindernissen erweitert werden, müssen auch physikalische Eigenschaften wie Dämpfung, Abschattung, Beugung oder Streuung von Signalen beachtet werden [Sch00, Seite 61-69]. Dies würde die Zuverlässigkeit der Routingverfahren verschlechtern (siehe Kapitel zwei). Für die Paketzustellung müsste nun eine andere Strategie bzw. ein anderes Routingverfahren gewählt werden.

### 3.3.4.2 Kollisionen von gesendeten Paketen

Unabhängig von der Implementierung von Hindernissen in einem Verkehrsnetz können zwei gesendete Nachrichten kollidieren. Dabei ist eine Kollision nicht nur beim Empfänger möglich, sondern auch während der Übertragung des Paketes. Die MAC-Protokolle haben die Aufgabe, die Kommunikation einzelner Knoten untereinander zu kontrollieren und zu organisieren (vgl. Punkt 3.3.2.1). In MANET's kann dabei nicht auf herkömmliche Protokolle zurückgegriffen werden, da alle Knoten ständig in Bewegung sind. Das bereits vorgestellte Kollisionsvermeidungsverfahren CSMA/CA ist hier bei weitem keine perfekte Lösung des Kollisionsproblems. Im Unterkapitel 3.3.5 wird ein Protokoll vorgestellt, welches die Anzahl von Kollisionen stark vermindern soll. Doch zunächst werden die drei Probleme im Zusammenhang mit MAC-Protokollen erörtert, die besonders bei dem Standard IEEE 802.11 auftreten. Dazu wird bereits nach der Beschreibung des jeweiligen Problems ein Lösungsansatz skizziert.

#### Hidden Terminal Problem

In Abbildung 3.3. möchte Knoten A eine Nachricht zum Knoten B senden. Nach CSMA/CA hat A herausgefunden, dass B frei ist und Daten empfangen kann. Außerdem befindet sich B in Sendereichweite von A. Fast gleichzeitig versucht jedoch auch Knoten C eine Nachricht zu Knoten B zu senden. Auch C hatte festgestellt, dass B nicht belegt ist. Somit sendet auch C seine Nachricht zu B. Da Knoten A und Knoten C nicht in Sendereichweite zueinander sind, bemerken sie das gleichzeitige Senden zu B nicht. Es kommt bei B zu einer Kollision. Da von A und C nicht überprüft werden kann, ob die Nachricht erfolgreich transferiert worden ist, wird diese nicht erneut zugestellt. Somit kann B die gespeicherten Informationen nicht auswerten. Die Kommunikation ist fehlgeschlagen.



**Abbildung 3.4.:** Hidden Terminal Problem – Quelle [Web02]



Für das Hidden Terminal Problem wurde eine einfache Lösung gefunden [Web02]. Ein Kommunikationsvorgang vollzieht sich demnach in vier Schritten. Die Beschreibung orientiert sich dabei an Abbildung 3.4. Möchte Knoten A zu Knoten B seine Informationen übertragen, sendet er zunächst ein RTS-Signal (*Request To Send*) zum Knoten B. Dies bedeutet, dass zunächst angefragt wird, ob B bereit ist, von A Daten zu empfangen. Ist dies der Fall, wird im zweiten Schritt für diesen Kommunikationsvorgang ein entsprechender Übertragungskanal reserviert und eine Antwort in Form eines CTS-Signals (*Clear To Send*) von B initiiert. Dieses Signal erhalten alle sich in der Sendereichweite von B befindenden Knoten. Dadurch weiß C, dass B Daten empfängt und somit belegt ist. Der Knoten C wird für die Dauer der Übertragung, die im dritten Schritt erfolgt, blockiert und kann keine Daten versenden. War die Datenübertragung erfolgreich, sendet Knoten B im vierten Schritt ein ACK-Signal (*ACKnowledgement*) rundum. A und C erfahren somit von der erfolgreichen Übertragung und sind für neue Datentransfers bereit. Aus dieser Herangehensweise ergeben sich jedoch zwei weitere Probleme, die im Folgenden angesprochen werden.

### RTS-CTS Problematik

Das zweite Problem im Zusammenhang mit den MAC-Protokollen betrifft das Versenden von RTS- und CTS-Signalen. Durch das Senden dieser beiden Signale kann zwar die Anzahl an Kollisionen von zwei Nachrichten vermindert werden, jedoch sind diese nicht ganz auszuschließen (Abbildung 3.5.b). Ferner können auch RTS- und CTS-Signale miteinander oder mit einer Nachricht kollidieren (Abbildung 3.5.a). Abhilfe kann hier lediglich das ACK-Signal liefern. Durch das ACK-Signal haben die Knoten die Möglichkeit, eine erfolgreiche Übertragung zu bestätigen. Bleibt diese aus, muss die Nachricht erneut zugestellt werden.

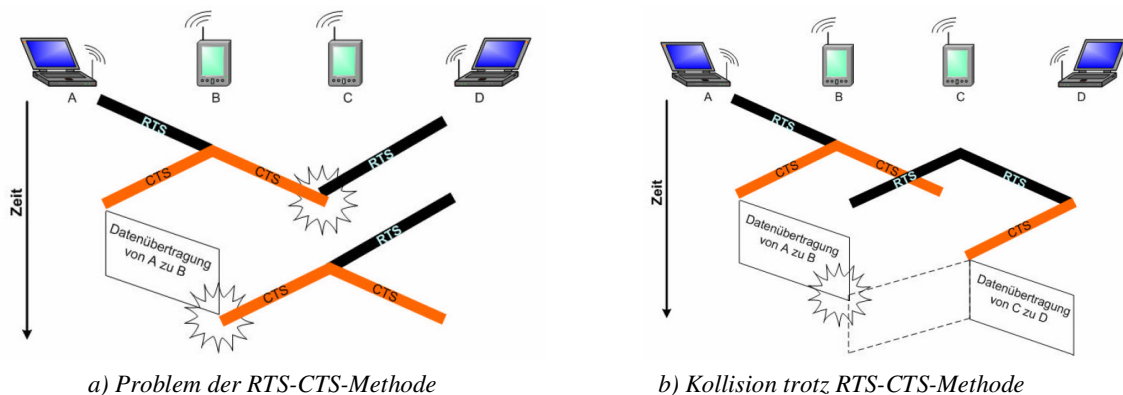


Abbildung 3.5.: RTS-CTS-Problem – Quelle [Web02]

### Exposed Node Problem

Der letzte Punkt dieses Abschnittes beschäftigt sich mit der Problematik eines Exposed Node (deutsch: ausgesetzter Knoten). Wird ein Knoten blockiert, kann er keine Daten senden. Dies hat zur Folge, dass ein Knoten eine wichtige Information, die er anderen Knoten mitteilen möchte, nicht weitergeben kann. Er muss erst warten, bis seine Blockierung durch ein ACK-Signal wieder aufgehoben wurde.

Die Lösung dieses Problems liegt in der Verwendung von gerichteten Antennen, weshalb das Exposed Node Problem nur bei ungerichteten Antennen auftritt. Bezogen auf das Verkehrsnetz ist die Benutzung von gerichteten Antennen immer dann sinnvoll, wenn nur Fahrzeuge Informationen erhalten sollen, die sich hinter dem Initiator der Nachricht befinden. Die Sendefläche wird nun allerdings halbiert und somit verringert sich auch die Wahrscheinlichkeit, einen Kommunikationspartner zu finden. Außerdem erfährt ein benachbarter Knoten eventuell nicht, dass bei einem seiner Nachbarn gerade eine Übertragung stattfindet. Somit ist wieder das Hidden Terminal Problem vorhanden. Im nächsten Punkt des dritten Kapitels wird ein MAC-Protokoll beschrieben, welches einen Kompromiss zwischen den Problemen darstellt und somit Kollisionen weitgehend verhindern kann.

#### 3.3.5 MAC-Protokoll zur Lösung des Kollisionsproblems

Bevor das Protokoll erläutert wird, erfolgt eine Klassifizierung von MAC-Protokollen in *senderinitiierte* und *empfängerinitiierte* Protokolle [Web02]. Bei einem senderinitiierten MAC-Protokoll wird zunächst vom Sender ein RTS-Signal an alle Knoten im Sendebereich oder an einen bestimmten Knoten gesendet. Erhält der Sender daraufhin ein CTS-Signal von einem Knoten (Empfänger) beginnt er mit der Übertragung der Nachricht. Ein erfolgreiches Versenden der Nachricht wird mit einem ACK-Signal bestätigt. Dieses MAC-Protokoll wurde bereits vorgestellt. Wie der Name schon andeutet, wählen empfangeninitiierte MAC-Protokolle einen anderen Ansatz. Hier geht der Kommunikationswunsch vom Empfänger aus. Dazu muss der spätere Empfänger ein *RTR-Signal (Ready To Receive)* zum Sender leiten. Besitzt der potentielle Sender Informationen, die er senden möchte, beginnt er mit der Datenübertragung. Es ist dabei nicht zwingend, dass der Sender Daten für einen Empfänger besitzt. Der Vorteil besteht darin, dass bei empfangeninitiierten MAC-Protokollen ein Kontrollsignal gespart werden kann, da weniger Signale gesendet werden. Dadurch verringert sich die Wahrscheinlichkeit einer Kollision zwischen den Kontrollsignalen untereinander oder mit der eigentlichen Nachricht.

Möchte ein Fahrzeug in einem Verkehrssystem mit einem anderen oder mehreren Kommunizieren, ist ein sofortiges Fluten des Sendebereichs nicht empfehlenswert. Mit großer Wahrscheinlichkeit kollidieren die gesendeten Nachrichten untereinander und können nicht erfolgreich zugestellt werden. Kontrollsignale können die durchschnittliche Zustellrate erhöhen und somit zu einer verbesserten Kommunikation beitragen. Es wird nun ein MAC-Protokoll vorgestellt, welches eine Kombination von einem Senderinitiierten und einem Empfängerinitiierten darstellt und eine Weiterentwicklung vom MARCH-Protokoll (*Media Access with Reduced Handshake*) von Weber et al. ist. Hierfür werden vier verschiedene Kontrollsignale benötigt:

- RTS-Signal: Anfrage des Senders, ob Empfänger bereit ist, eine Nachricht zu empfangen.
- CTS-Signal: Antwort des Empfängers, dass er frei ist und die Nachricht erhalten kann. Gleichzeitig werden alle anderen Knoten über eine Datenübertragung informiert.
- ACK-Signal: Mitteilung des Empfängers an alle Fahrzeuge über den erfolgreichen Datenversand.
- RTR-Signal: Versenden dieses Signals bekundet Interesse an einer erfolgreich zugestellten Nachricht. Dieses Signal kann erst nach dem Erhalt eines ACK-Signals gesendet werden.

Der Kommunikationsvorgang beginnt mit dem Versenden eines RTS-Signals durch ein Fahrzeug A, welches wichtige Informationen für ein Fahrzeug Z hat und im Sendebereich von A liegt. Hat Fahrzeug Z das Signal erhalten, sendet es als Antwort ein CTS-Signal zu A und zu allen anderen Knoten in seinem Funkbereich. A beginnt mit der Übertragung der Daten. Ist diese erfolgreich verlaufen, wird von Z das ACK-Signal rundum gesendet. Damit erfährt Fahrzeug A von der erfolgreichen Übertragung der Nachricht. Da auch alle anderen Fahrzeuge von der neuen Information des Fahrzeuges Z wissen, haben sie die Möglichkeit, ebenfalls an diese Daten zu gelangen. Hierzu können sie ein RTR-Signal an Z senden. Dabei besteht die Gefahr, dass zu viele Fahrzeuge an der Information interessiert sind und die RTR-Signale miteinander bei Z kollidieren. Deswegen kann nur das Fahrzeug H, welches den geringsten Abstand zu Z hat, ein RTR-Signal versenden. Alle anderen müssen warten, bis Fahrzeug H die Übertragung durch ein ACK-Signal bestätigt hat. Mit diesem Verfahren erhalten nach und nach alle Fahrzeuge die Nachricht, wenn sie an dieser interessiert sind.

Wie bereits erwähnt wurde dieses MAC-Protokoll um einige Funktionsweisen erweitert. Inwieweit das Protokoll gute Ergebnisse hinsichtlich des kollisionsfreien Zustellens der Nachrichten gewährleisten kann, müssen Simulationen zeigen. Allerdings wird dieser Punkt im vierten Kapitel nicht analysiert und muss offen gelassen werden.

### 3.3.6 Zusammenfassung

Im dritten Kapitel und besonders im Punkt 3.3 wurden die Herausforderungen an eine Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation in einem Verkehrsnetz beschrieben. Dabei erfolgte eine Erläuterung der Funkverbindung, die einen großen Einfluss auf die Übertragungsdauer von gesendeten Nachrichten zu anderen Fahrzeugen hat. Besonders hervorzuheben sind an dieser Stelle nochmals die Übertragungsmethoden radio broadcast, unicast und geocast. Das Senden einer Nachricht an alle Fahrzeuge im Funkbereich mittels radio broadcast gestaltet sich als sehr einfach. Nun sind jedoch nicht alle Fahrzeuge an einer Information über eine bestimmte Straße interessiert. Durch Anwendung der Unicast-Methode entsteht die Möglichkeit, die Nachricht an ein bestimmtes Fahrzeug zu senden. Wird geocast angewendet, kann die Nachricht an eine Gruppe von Fahrzeugen, die sich in einem bestimmten geographischen Gebiet aufhalten, gesendet werden. Befindet sich das Zielfahrzeug (unicast) oder die Zielfahrzeuge (geocast) in Sendereichweite des Empfängers, kann auch hier die Nachricht direkt zugestellt werden. Die im zweiten Kapitel beschriebenen Routingverfahren für MANET's kommen bekanntlich zum Einsatz, wenn sich der gewünschte Empfänger der Nachricht nicht in eben dieser Funkreichweite aufhält. Das Datenpaket muss über andere Fahrzeuge zugestellt werden. Die geocast Fähigkeit der Routingverfahren wird gerade noch erforscht und entwickelt. Die Wahl einer Übertragungsmethode wird also von der Anzahl an Fahrzeugen, die die Nachricht erhalten sollen, im gleichen Maße bestimmt, wie auch von der Tatsache, ob sich das gewünschte Zielfahrzeug oder die gewünschten Zielfahrzeuge in Sendereichweite des Initiators der Nachricht aufhalten.

Zusätzlich zu den Nachrichten werden Kontrollnachrichten versendet, die die Anzahl an kollidierten Datenpaketen reduzieren sollen. Im Punkt 3.3.5 wurde durch Weiterentwicklung eines bestehenden Verfahrens versucht, ein MAC-Protokoll zu entwickeln, welches die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Paketzustellung weiter erhöht. Unabhängig von der Übertragungsmethode muss dieses Protokoll vor der Nachrichtenübermittlung durchgeführt werden. Nur dadurch kann eine hohe Zustellrate auch über mehrere Fahrzeuge hinweg erreicht werden. Daneben muss jedoch auch angemerkt werden, dass die Wahrscheinlichkeit einer Kollision von Nachrichten jeder Art mit einer anderen nur reduziert und nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann. Es kann festgehalten werden, dass je mehr Nachrichten die Fahrzeuge in einem Gebiet austauschen, desto höher ist die Gefahr einer Kollision und damit einer fehlerhaften Zustellung. Das Protokoll gewährleistet es dennoch den Fahrzeugen auf eine fehlerhafte Zustellung durch das erneute Senden der Nachricht entsprechend zu reagieren. Den Fahrzeugen bleibt die Chance erhalten, an die Informationen zu gelangen und somit vor der Gefahrenstelle gewarnt zu werden. Inwieweit die Fahrzeugführer auch entsprechend auf die Situation reagieren, kann nicht vorhergesagt werden und obliegt der Entscheidung jedes Einzelnen.

Im nun folgenden vierten Kapitel wird bei den Simulationen das radio-broadcast angewendet. Diese Übertragungsmethode ist die einfachste Möglichkeit, die den Fahrzeugen zur Verfügung steht, ihre Nachrichten an andere Fahrzeuge zu übertragen. Leider ermöglicht es der zeitliche Rahmen dieser Diplomarbeit nicht, alle geschilderten Abläufe und Rahmenbedingungen wie z.B. die Übertragungsdauer oder auch die Größe eines Paketes in Byte in die Verkehrssimulation SUMO zu implementieren. Dennoch können mit Hilfe der Simulationsergebnisse Aussagen über die Güte der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation getroffen werden. Durch die graphische Darstellung von Kurvenverläufen werden die getätigten Ausführungen untermauert. Eine große Rolle spielen in diesem Zusammenhang der Ausrüstungsgrad der Fahrzeuge und der verwendete Senderadius. Alle weiterführenden Erläuterungen befinden sich im vierten Kapitel.

## **Kapitel 4.**

### **Bewertung der neuen Kommunikationsform**

Im zweiten Kapitel wurden einige Routingverfahren vorgestellt, mit deren Hilfe ein Datenpaket von einem Sender zu einem bestimmten Empfänger gelangen kann, wenn diese außerhalb einer gemeinsamen Sendereichweite sind. Eine Bewertung der Algorithmen hinsichtlich verschiedener Kriterien ist bereits erfolgt und wird nicht Gegenstand dieses Kapitels sein. Außerdem würde eine Implementierung der Routingverfahren in die Verkehrssimulation „SUMO“ den zeitlichen Rahmen dieser Diplomarbeit sprengen. Das für Autobahnszenarien am besten geeignete Verfahren GPSR muss aber spätestens dann implementiert werden, wenn ein bestimmtes Fahrzeug das Datenpaket erhalten soll. Danach sind weitere Simulationen mit dem GPSR-Algorithmus möglich, in dessen Folge das Verfahren weiter optimiert werden kann.

Die Simulationen, die in diesem Kapitel durchgeführt werden, verfolgen das Ziel, die Güte der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation aufzuzeigen. In Abhängigkeit des Ausstattungsgrades der Fahrzeuge mit der erforderlichen Funktechnologie und der maximalen Sendereichweite können durch Simulationen mehrere Aussagen hinsichtlich der Beeinflussung der einzelnen Kenngrößen untereinander getätigt werden.

Für die Bewertung dieser Kommunikationsform wird die Verkehrssimulation „SUMO“ verwendet, welche die Bewegung der Fahrzeuge in einem Netzwerk darstellen kann. Die Möglichkeit, dass die Fahrzeuge miteinander kommunizieren können, ist noch nicht im Quelltext enthalten gewesen. Aus diesem Grund wurde SUMO um folgende Funktionen erweitert:

- Erzeugen und Schreiben in drei Textdateien (end.txt, step.txt und known.txt) für spätere statistische Auswertungen
- Implementierung von neuen Klassen und Funktionen, durch die eine Kommunikation zwischen den Fahrzeugen erreicht und ein Ad-hoc-Netz aufgebaut werden kann
- Wahlmöglichkeit des Ausstattungsgrades der Fahrzeuge zwischen null und eins

- Wahlmöglichkeit des Senderadius innerhalb dessen eine Kommunikation aufgebaut werden kann
- Ausgabe von Kenngrößen unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen (Schleifendurchläufe)

## 4.1 Aufbau eines Szenarios

### 4.1.1 Einführende Erläuterungen

Um die Kommunikation in einem Verkehrsnetz mit Hilfe von SUMO statistisch bewerten zu können, ist es zunächst notwendig, einige Vorbereitungen zu tätigen. Diese untergliedern sich dabei in fünf Punkten:

- Erstellung eines Verkehrsnetzes
- Erstellung von Fahrzeugen und deren Routen
- Gewährleistung eines konstanten Flusses
- Wahl des Ausstattungsgrades
- Wahl des Senderadius

Besonders bei den ersten drei Punkten erweist es sich als sehr hilfreich, die SUMO-Dokumentation von Daniel Krajewicz [Kra] durchzuarbeiten.

### 4.1.2 Bau eines Verkehrsnetzes

Für die Analyse eines Verkehrsnetzes mittels SUMO muss zunächst ein Verkehrsnetz erstellt werden [Kra]. Hierfür wird allerdings keine graphische Benutzeroberfläche geboten. Das Verkehrsnetz muss über die DOS-Eingabeaufforderung gebaut werden. Eine Anleitung hierzu befindet sich in der angegebenen Literatur.

### 4.1.3 Kreierung von Fahrzeugen und Fahrrouten

Nach der erfolgreichen Erzeugung des Verkehrsnetzes befinden sich jedoch noch keine Fahrzeuge auf den Straßen. Diese sowie deren Fahrrouten können ebenfalls nur über die DOS-Eingabeaufforderung hinzugefügt werden [Kra]. Abbildung 4.1. zeigt die graphische

Darstellung der Straßen und Fahrzeuge in SUMO. Im Punkt 4.1.4 wird erläutert, zu welchen Zeitpunkten neue Fahrzeuge in das Verkehrsnetz gelangen müssen, um die Fahrzeuganzahl während der Simulation nahezu konstant halten zu können.



*Abbildung 4.1.: Fahrzeuge und Straßen*

Des Weiteren wird jedem Fahrzeug eine feste Route vorgegeben, auf der es durch das Verkehrsnetz fahren muss. Diese Anweisungen werden in eine Konfigurationsdatei geschrieben. Eine weitere wesentliche Aufgabe dieser Datei wird nun erläutert.

#### 4.1.4 Konstanter Fluss

Das Ziel des vierten Kapitels ist es, möglichst viele aussagekräftige Statistiken zu erhalten. Während der Durchführung der Simulationen wirken verschiedene Einflussfaktoren auf die Simulationsergebnisse ein. Der Ausstattungsgrad der Fahrzeuge sowie der maximale Sendradius können durch Festlegung vor dem Start der Simulation konstant gehalten werden. (vgl. Punkt 4.1.5 und 4.1.6). Die Anzahl der sich in der Simulation befindenden Fahrzeuge ist allerdings nicht konstant. Es bedarf keiner weiteren Erklärung, dass mit einer hohen Anzahl an Fahrzeugen mehr Verbindungen aufgebaut werden können als mit einer niedrigen. Der Mittelwert der Verbindungen pro Fahrzeug soll aber lediglich vom Ausstattungsgrad und vom Senderadius beeinflusst werden. Deswegen ist es notwendig, den Verkehrsfluss im Szenario annähernd konstant zu halten. Die Vorgehensweise hierzu bedarf einiger Erläuterungen.

Jede Simulation beginnt im Zeitschritt null. Zu diesem Zeitpunkt befinden sich noch keine Fahrzeuge auf den Straßen. Innerhalb des ersten Zeitschrittes treten die ersten Fahrzeuge in das Verkehrsnetz ein. Nachdem sie auf allen Kanten (hier neun) gefahren sind, verlassen sie zu einem bestimmten Zeitpunkt die Simulation. Dabei ist die Fahrdauer durch die Ampelregelung an den Kreuzungen nicht für jedes Fahrzeug gleich. Um die Auswirkungen der Fahrdauer auf die Simulationsergebnisse nicht zu groß werden zu lassen, müssen Daten von vielen Fahrzeugen erhoben werden. Aus diesem Grund werden in einer festgelegten Zeitspanne kontinuierlich Fahrzeuge in das Verkehrsnetz gesendet, welches sich auch an der stark ansteigenden Linie in Abbildung 4.2. erkennen lässt. Wurde die gewünschte Fahrzeuganzahl erreicht, muss diese Zahl während einer zu wählenden Simulationsdauer konstant gehalten werden. Diese Anzahl wird genau dann als nahezu konstant bezeichnet, wenn sie während



einer Zeitperiode um höchstens 200 Fahrzeuge schwankt. Der Zeitpunkt zwischen einer steigenden Fahrzeuganzahl und einer fallenden Anzahl ist meistens derjenige, wo die ersten Fahrzeuge das Verkehrsnetz wieder verlassen. Dadurch verringert sich die Fahrzeuganzahl entsprechend. Leider ist es nicht möglich, bei Ausscheidung eines Fahrzeuges sofort ein neues zu generieren. Vielmehr müssen mühsam in eine xml-Datei (siehe Punkt 4.3.1 und Anhang) Anweisungen geschrieben werden, die eine erneute Entsendung von Fahrzeugen innerhalb eines angegebenen Intervalls in das Verkehrsnetz ermöglichen. In die Statistik werden nur solche Fahrzeuge aufgenommen, die zu Beginn des konstanten Flusses in das Verkehrsnetz eintreten und es auch nach einer Periode konstanten Flusses wieder verlassen haben. Die Länge dieses konstanten Flusses in Zeitschritten richtet sich dabei auch nach dem Ausstattungsgrad der Fahrzeuge. So ist zu erwarten, dass bei einem Ausstattungsgrad von weniger als ein Prozent nur eine sehr geringe Anzahl an Fahrzeugen in die Statistik aufgenommen wird, wodurch die Ergebnisse eventuell stark verfälscht werden. Aus diesem Grund wurde festgelegt, dass bis zu einem Wert von einem Prozent mindestens die Daten von 100 Fahrzeugen in die Statistik einfließen. Bei kleineren Prozentzahlen werden die Ergebnisse ungenauer, sind aber gerade noch zu vertreten. Näheres hierzu befindet sich im Unterkapitel 4.3, wo nochmals explizit erläutert wird, wie die Simulationen durchgeführt werden.

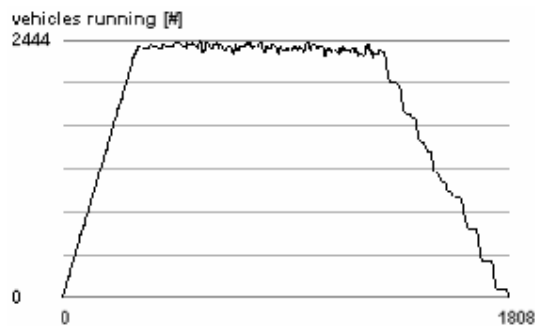


Abbildung 4.2.: Fahrzeuganzahl

#### 4.1.5 Ausstattungsgrad

Die Funktion des Ausstattungsgrades wurde bereits mehrmals erläutert. Es bleibt noch die Frage, wie er verändert werden kann. Für die Änderung des Ausstattungsgrades existiert keine graphische Eingabemaske. Die Veränderung erfolgt innerhalb der Datei „sumo.sumo.cfg“. Diese kann mit dem „Editor“ geöffnet werden. Nach dem Öffnen der Datei muss nach der Zeile „<device>0.09</device>“ gesucht werden. An dieser Stelle kann der Ausstattungsgrad verändert werden. In diesem Fall beträgt er neun Prozent. Dabei muss noch angemerkt werden, dass je höher die Prozentzahl ist, desto länger wird auch die Simulation dauern. Der Grund liegt in der Vielzahl an durchlaufenen Kontrollschleifen innerhalb des C++ Programms. Der Ausstattungsgrad beschreibt eine minimale Anzahl von kommunikationsfähigen Fahrzeugen, die für einen Datenaustausch in einem Verkehrsnetz notwendig ist. Bei

welchem Prozentwert diese Grenze liegt, kann mit Hilfe der Simulationsergebnisse ermittelt werden. Liegt dieser über einer bestimmten Grenze, die einen hohen Ausstattungsgrad beschreibt, muss der Senderradius erhöht werden. In dieser Hinsicht wird auch interessant sein, ob der Ausstattungsgrad einen größeren Einfluss auf die einzelnen Ergebnisse hat oder der Senderradius. Nach welchen Variablen untersucht wird bzw. welche unterschieden werden, kann im Punkt 4.3 nachgelesen werden.

#### 4.1.6 Senderradius

Eine weitere Einflussgröße auf die Simulationsergebnisse stellt der maximale Senderradius dar, in dem die Fahrzeuge potentielle Empfänger erreichen können. Wird dieser erweitert, vergrößert sich die Fläche, in der mit anderen Fahrzeugen kommuniziert werden kann. Angenommen die Fahrzeuge haben einen kreisförmigen Senderradius. Die Fläche eines Kreises wird mit der Formel  $A = \pi * r^2$  berechnet. Die Größe dieser Fläche ist ausschließlich von dem verwendeten Radius abhängig. Wird dieser verdoppelt, erhöht sich auch im gleichen Maße die eingeschlossene Fläche und somit die Anzahl der Fahrzeuge, mit denen kommuniziert werden kann. Nun führt ein zu groß gewählter Senderradius zu erheblichen Interferenzen (vgl. Kapitel 3.). Aus diesem Grund wird im Laufe des vierten Kapitels geprüft, ob bereits mit kleinen Radien und entsprechendem Ausstattungsgrad sehr gute Ergebnisse erzielt werden können.

Die Veränderung des Senderradius erfolgt direkt im Quelltext von SUMO. In einer if-Bedingung wird geprüft, ob sich zwei Fahrzeuge in einer bestimmten Sendereichweite zueinander befinden. Ist dies der Fall, werden die Anweisungen innerhalb der Bedingung ausgeführt. Die entsprechende Zeile des Quelltextes ist in der Datei „GUINet.cpp“ ziemlich am Ende zu finden. Diese lautet:

```
if(sqrt(((p1.x()-p2.x())*(p1.x()-p2.x()))+((p1.y()-p2.y())*(p1.y()-p2.y())))<=10)
{
    v1->networking_KnowsAbout(v2, currentStep);
    v2->networking_KnowsAbout(v1, currentStep);
}
```

Die Zehn gibt dabei die maximale Entfernung zwischen zwei Kommunikationspartnern an, damit diese eine Kommunikation aufbauen können. Bei Veränderung dieser Zahl muss das gesamte C++ Programm neu erstellt werden. Es kann nun geprüft werden, welche Auswirkung eine Erhöhung oder Senkung des Radius auf die einzelnen Variablen hat. Dabei wird der Ausstattungsgrad konstant gehalten.

## 4.2 Modellannahmen

Bei der Durchführung der Simulationen zur Analyse der neuen Kommunikationstechnologie werden in Bezug auf die Fahrzeuge (Knoten) einige Annahmen getroffen. Diese Annahmen betreffen die Kommunikationsfähigkeit zweier Fahrzeuge unter bestimmten Voraussetzungen.

1. Innerhalb eines Modells ist eine Kommunikation zwischen zwei Fahrzeugen a und b genau dann möglich, wenn sich diese innerhalb einer maximalen Sendereichweite r zueinander befinden, d.h. die Bedingung aus 4.1.6 ist erfüllt. Anderenfalls besteht zwischen ihnen kein Funkkontakt.

$$f(a,b) = \begin{cases} 1, & \text{falls } \sqrt{(p1.x() - p2.x())^2 + (p1.y() - p2.y())^2} \leq r \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.1)$$

2. Normalerweise können die Knoten (Fahrzeuge) eingeschaltet oder ausgeschaltet sein. Sind sie ausgeschaltet, können sie weder Daten empfangen noch senden. In diesem Modell sind alle Knoten stets eingeschaltet, weswegen hier keine Unterscheidung getroffen werden muss.
3. Eine Kommunikation zwischen zwei Fahrzeugen ist auch nur dann möglich, wenn zwei Fahrzeuge mit der erforderlichen Funktechnologie  $F=1$  ausgestattet sind. Die Erfüllung der Annahme eins bleibt davon unberührt.

$$f(a,b) = \begin{cases} 1, & \text{falls } \sqrt{(p1.x() - p2.x())^2 + (p1.y() - p2.y())^2} \leq r \cap A=1 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.2)$$

4. Während einer bestimmten Periode wird ein konstanter Verkehrsfluss vorausgesetzt.

## 4.3 Simulationsaufbau

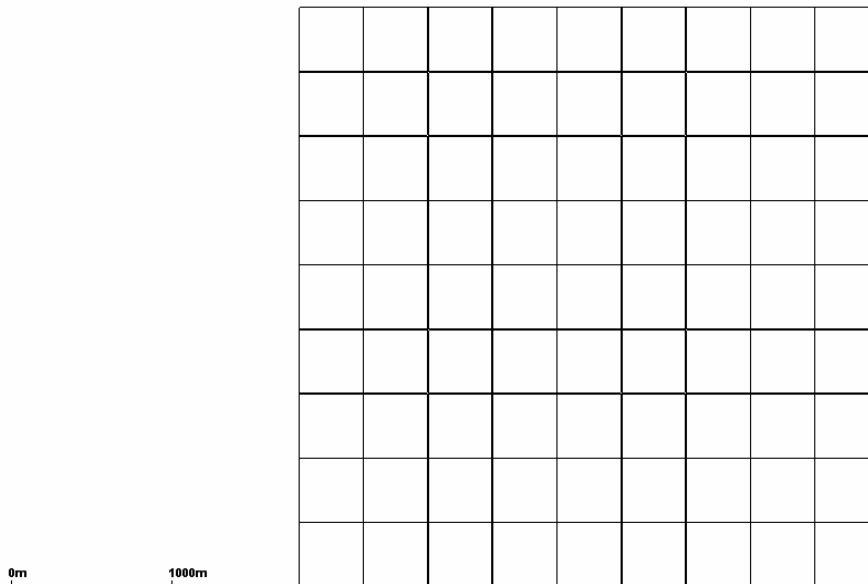
### 4.3.1 Grundlegende Struktur

Wie schon öfters erwähnt, werden die Simulationen mit der Verkehrssimulation „SUMO“ des deutschen Luft- und Raumfahrtzentrums durchgeführt. Um für zwei Fahrzeuge festzustellen,

ob sie miteinander kommunizieren können, wurde SUMO mit den entsprechenden Methoden erweitert, die eine spätere statistische Auswertung ermöglichen (siehe Anfang dieses Kapitels).

In den durchgeführten Simulationen wird die Funkverbindung durch keine Hindernisse beeinträchtigt. Ausschlaggebend, ob eine Verbindung zwischen zwei Fahrzeugen aufgebaut werden kann oder nicht, sind lediglich der verwendete Ausstattungsgrad und der verwendete Sendradius.

Für die statistische Analyse wird in dieser Arbeit das in Abbildung 4.3. dargestellte Verkehrsnetz verwendet. Insgesamt befinden sich hier 100 Kreuzungen, welche durch Ampelanlagen geregelt werden. Jede der 360 Kanten (beachte: Kanten dürfen nur in eine Richtung entlang gefahren werden) besitzt eine Fahrspur und ist ca. 392 m lang. Daraus ergibt sich eine Ausdehnung des Szenarios von ca. 3,5 km in vertikale und 3,5 km in horizontale Richtung. In SUMO wird wie in einem normalen Koordinatensystem die horizontale Position eines Fahrzeuges als x-Position und die vertikale Position als y-Position bezeichnet.



*Abbildung 4.3.: Das analysierte Verkehrsnetz*

Die Fahrzeuge gelangen in das Verkehrsnetz durch die Erstellung einer Konfigurationsdatei. Dabei handelt es sich um die gleiche Datei, die für die Aufrechterhaltung eines konstanten Flusses zuständig ist. Ein Ausschnitt dieser Datei befindet sich in Abbildung 4.4. Hier werden in einem Intervall, welches von Zeitschritt null bis Zeitschritt 299 läuft, von der Straße „0/0to0/1“ (Startpunkt) insgesamt 59 Fahrzeuge zur Straße 0/9to1/9 (Endpunkt) entsendet. Durch die „flow id“ ist diese Anweisung eindeutig bestimmt. Für einen konstanten Fluss über

3000 Zeitschritten, der für die Simulationen verwendet wird, ist die Erzeugung mehrerer hundert Routenanweisungen notwendig.

```
<interval begin="0" end="299">
```

a) Intervall mit Start- und Endpunkt

```
<flow id="0" from="0/0to0/1" to="0/9to1/9" no="59"/>
```

b) Eindeutige Anweisung für eine bestimmte Route

**Abbildung 4.4.:** Teilausschnitt einer Konfigurationsdatei für die Erzeugung von Fahrzeugen und Routen

Die Routen unterscheiden sich dabei nur in ihrem Anfangspunkt und ihrem Endpunkt. So bewegen sich alle Fahrzeuge geradlinig durch das Netz und biegen nicht ab. Startpunkte stellen diejenigen Kanten dar, die sich am Rande des Verkehrsnetzes befinden und in dieses hinein führen. Demgegenüber sind Kanten Endpunkte einer Route, wenn sich diese am Rande des Verkehrsnetzes befinden und aus diesem hinaus führen (Abbildung 4.5.). Dadurch gibt es 40 unterschiedliche Routen mit verschiedenen Start- und Endpunkten. Außerdem besteht jede Route aus neun Kanten. Wurden SUMO die Routen mitgeteilt, fahren Fahrzeuge auf diesen bestimmten Routen durch die Simulation.

Fahrzeuge fahren aus der Simulation hinaus

Fahrzeuge fahren in die Simulation hinein

Fahrzeuge fahren aus der Simulation hinaus

Fahrzeuge fahren in die Simulation hinein

Fahrzeuge fahren aus der Simulation hinaus      Fahrzeuge fahren in die Simulation hinein

**Abbildung 4.5.:** Start- und Endpunkte einer Route

Zwischen Zeitschritt 302 und Zeitschritt 3302 schwankt die Anzahl der sich in dem Verkehrsnetz befindenden Fahrzeuge zwischen 2261 und 2444. Nur aus diesem Intervall fließen die Daten für die abschließende Analyse mit ein. Dadurch wird die Erhaltung statistisch signifikanter Ergebnisse sichergestellt. Für alle Fahrzeuge sind die Routen gleich lang. Da jedes Fahrzeug mit höchstens 50 km/h fahren darf, ergeben sich unterschiedliche Fahrzeiten durch verschiedene Wartezeiten an den Ampeln.

#### 4.3.2 Simulationsdurchführung

In einer ersten Versuchsreihe wird der Senderadius konstant bei 10 m gehalten. Der Ausstattungsgrad wird dabei ausgehend von 0,5 % auf 50 % sukzessive erhöht. Bei der zweiten Versuchsreihe wird ein fester Ausstattungsgrad von 10 % gewählt. Der Senderadius wird dabei von anfangs 1 m bis auf 50 m erhöht. Es wird mit der ersten Versuchsreihe verglichen, inwieweit sich die Ergebnisse verändert haben. In den Tabellen 4.1. und 4.2. sind nochmals alle Parameter zusammengefasst, die für das wesentliche Verständnis für den Aufbau des Szenarios erforderlich sind.

Parameter	Wert
Szenarioausdehnung in m	3525,5 x 3525,5
Anzahl der Fahrzeuge	2261 bis 2444
Simulationsdauer in SUMO	3881 s (für Statistik 3000 s)
Simulationsdauer real	je nach Ausrüstungsgrad 5 min bis 10 h
Ausrüstungsgrade (variabel)	0,005;0,01;0,02;0,03;0,04;0,05;0,06;0,07 0,08;0,09;0,1;0,2;0,3;0,4;0,5
Senderadius (fest) in m	10
Fahrdauer in s	258 bis 599

**Tabelle 4.1.:** Simulationsaufbau für die erste Versuchsreihe

Parameter	Wert
Szenarioausdehnung in m	3525,5 x 3525,5
Anzahl der Fahrzeuge	2261 bis 2444
Simulationsdauer in SUMO	3881 s (für Statistik 3000 s)
Simulationsdauer real	40 min
Ausrüstungsgrad (fest)	0,1
Senderadius (variabel) in m	1;2;3;4;5;6;7;8;9;10;20;30;40;50
Fahrdauer in s	258 bis 599

**Tabelle 4.2.:** Simulationsaufbau für die zweite Versuchsreihe

## 4.4. Analyse der Ergebnisse

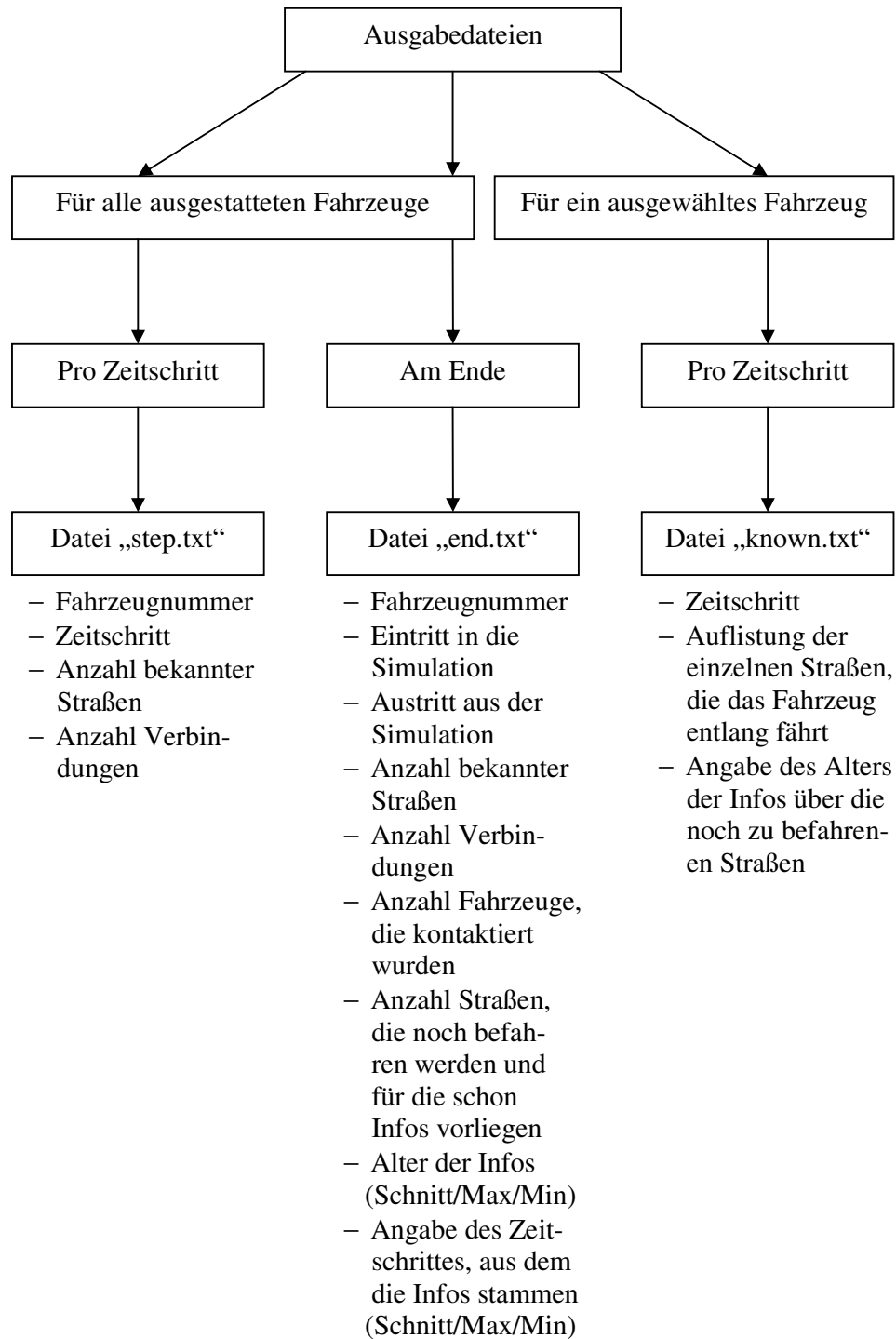
Während der Simulationsdurchführung werden die statistischen Daten jedes einzelnen Fahrzeuges in die Dateien „step.txt“ und „end.txt“ geschrieben, sofern das Fahrzeug in der Lage ist, mit anderen zu kommunizieren. In der dritten Datei „known.txt“ wird für das Fahrzeug mit der Nummer 444\_4 aufgezeigt, zu welchen Zeitpunkten es Informationen über Straßen erhält, die es später noch entlang fährt. Für die statistischen Auswertungen werden die Inhalte der Dateien in „Microsoft-Excel“ importiert und analysiert. Aus Abbildung 4.6. auf der nächsten Seite ist ersichtlich, welche Informationen die einzelnen Dateien liefern können.

Alle drei Dateien unterscheiden sich im Hinblick auf die Anzahl an ausgegebenen Informationen, die ein Fahrzeug während der Durchfahrung des Verkehrsnetzes gesammelt hat. Um verstehen zu können, wie diese einzelnen Informationen entstehen, bedarf es einiger Erläuterungen.

Jedes Fahrzeug unterhält eine Liste von Kanten (Straßen), die es bisher befahren hat. Im Falle einer Funkverbindung (die Bedingungen für einen Kommunikationsaufbau zwischen zwei Fahrzeugen wurden schon erläutert) tauscht ein Fahrzeug mit einem anderen diese Liste aus. Dadurch vergrößert sich die Anzahl der hier abgespeicherten Kanten kontinuierlich. Jede dieser Kanten besitzt zusätzlich einen Zeitstempel, der angibt, von welchem Zeitpunkt die Information stammt. Mit dieser zusätzlichen Angabe wird der ältere Kanteneintrag entfernt und durch den Neuen ersetzt, wenn die Information „jünger“ ist. Eine Kante kann nicht doppelt abgespeichert werden. In „step.txt“ wird aufgeführt, wie viele Kanten zu einem Zeitschritt ein bestimmtes Fahrzeug bereits in seine Kantenliste aufgenommen hat. Diese Angabe erfolgt für jedes Fahrzeug. Demgegenüber gibt „end.txt“ die Anzahl an bekannten Kanten pro ausgestattetes Fahrzeug *nach* dem Verlassen der Simulation an. Da es im Verkehrsnetz insgesamt 360 Kanten gibt, stellt dieser Wert ein Maximum an Kanten dar, die ein Fahrzeug in seiner Liste abgespeichert haben kann. Das Minimum liegt bei neun Kanten, da ein Fahrzeug insgesamt neun Straßen entlang fährt. Es wird erwartet, dass die Anzahl an bekannten Kanten maßgeblich vom Ausstattungsgrad und vom Senderadius beeinflusst wird.

Darüber hinaus gibt es noch eine Reihe weiterer Variablen, die die Abhängigkeit der Ergebnisse vom Ausstattungsgrad und Senderadius dokumentieren sollen. In Abbildung 4.6. sind die weiteren Informationen aufgelistet, die die Datei „end.txt“ liefert. Nicht alle Variablen können einen im Voraus schlecht vorhersagbaren Wert erreichen. So ist die Anzahl an kontaktierten Fahrzeugen auf die Menge an Fahrzeugen in der Simulation ebenso begrenzt, wie die Höchstzahl bekannter Kanten und die Anzahl von Straßen, die noch befahren werden, jedoch schon in der Kantenliste stehen. Die Anzahl an Verbindungen pro Fahrzeug mit

anderen wird zwar ständig mit dem Ausrüstungsgrad und dem Senderadius steigen, eine Höchstgrenze ist jedoch schlecht vorhersagbar.



**Abbildung 4.6.:** Ausgabedateien und deren Informationen



Ein weiterer Punkt, der untersucht wird, ist das Alter der Informationen über die Straßen, das einem Fahrzeug mit der Kantenliste übermittelt wird. Dieses Alter ist ein Zeichen für die Verwendbarkeit der Kanteninformationen. Liegt die Herkunft dieser Informationen schon zu weit zurück, können sie nicht mehr gültig sein. Erhält z.B. ein Fahrzeug Informationen (Stau) zu einer Straße, die schon sehr weit zurück liegen, haben sich die Straßenbedingungen eventuell schon wieder verändert. Ein Stau hat sich ggf. aufgelöst. In der Datei „known.txt“ sind alle neun Straßen aufgelistet, die das Fahrzeug mit der Nummer 444\_4 entlang fährt. Bekommt es Informationen zu einer Straße, wird in die Datei das Alter der Information in Zeitschritten eingetragen. Da die Datei nur die Werte für das Fahrzeug 444\_4 ausgibt, ist die Aussagekraft sehr gering. Deswegen gibt auch „end.txt“ das Alter der Informationen über noch zu befahrene Kanten an. Dabei wird neben der Angabe des Alters in Zeitschritten auch die Information gegeben, von welchem Zeitschritt die Information über die Kante stammt. Für beides wird zu jedem Fahrzeug ein Mittelwert ausgegeben sowie ein maximaler Wert und ein minimaler Wert. Durch die Bildung von Mittelwerten über alle Fahrzeuge kann die Aussagekraft nun deutlich erhöht werden.

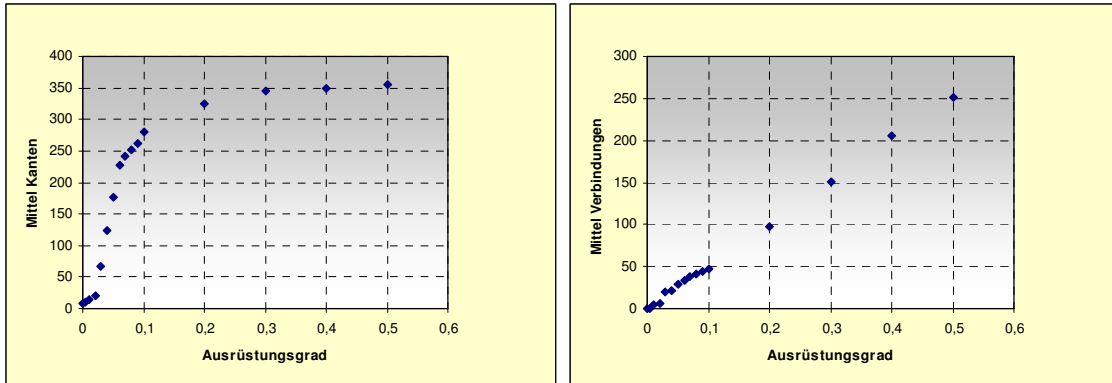
Zum Abschluss wird ein Blick auf die Fahrdauer eines Fahrzeuges geworfen. Diese Zeit gibt an, wie lange ein Fahrzeug für die Durchquerung des Verkehrsnetzes benötigt. Es wird untersucht, ob die Anzahl bekannter Kanten und die Anzahl an Verbindungen von der Fahrdauer abhängig sind.

#### 4.4.1 Einfluss des Ausstattungsgrades auf die Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen zeigen eine erhebliche Beeinflussung durch den Ausstattungsgrad auf. Bei drei Kriterien entspricht die Kurve einer Funktion der Form  $f(x) = e^{-\frac{1}{x}}$ . Der Grund liegt in der Beschränktheit dieser Kriterien durch Extrema. So kann die mittlere Anzahl bekannter Kanten der Fahrzeuge einen Wert zwischen neun und 360 annehmen (Abbildungen 4.7. a) und c)). Auch die Anzahl an Straßen, die bereits vor der Überfahrung in die Kantenliste aufgenommen wurden, ist durch null und acht begrenzt (Abbildung 4.7. f)). Die acht kommt aus der Tatsache zu Stande, dass für die erste überfahrene Kante (Straße) keine neueren Informationen vorliegen können. Zwischen einem Ausstattungsgrad von 0,5 und 10 % können hinsichtlich der drei Kriterien die größten Fortschritte erzielt werden. Hier ist dessen Einfluss am größten und nimmt durch das langsame Erreichen der oberen Schranke mit steigenden Prozentwerten ab.

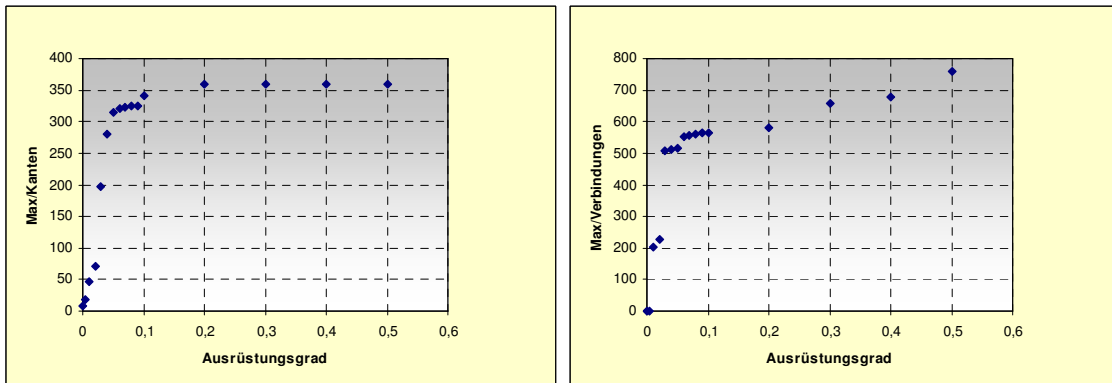
Die Abbildungen 4.7. b), d) und e) deuten eine weitere Steigung bis zu einem Ausstattungsgrad von 100 % an. Zwar ist auch hier eine Beschränktheit durch die Anzahl an Fahrzeugen in der Simulation gegeben, jedoch ist der Wert von 2261 Fahrzeugen (minimale Fahrzeug-

anzahl) mit 54 bei 0,5 % noch lange nicht erreicht. Bei b) und e) liegt sogar eine lineare Funktion vor, die durch den Ursprung verläuft. Nur bei Abbildung d) zeigt der Kurvenverlauf keine genaue Form, jedoch auch eine ansteigende Tendenz. Die Tabelle mit den statistischen Daten befindet sich im Anhang.



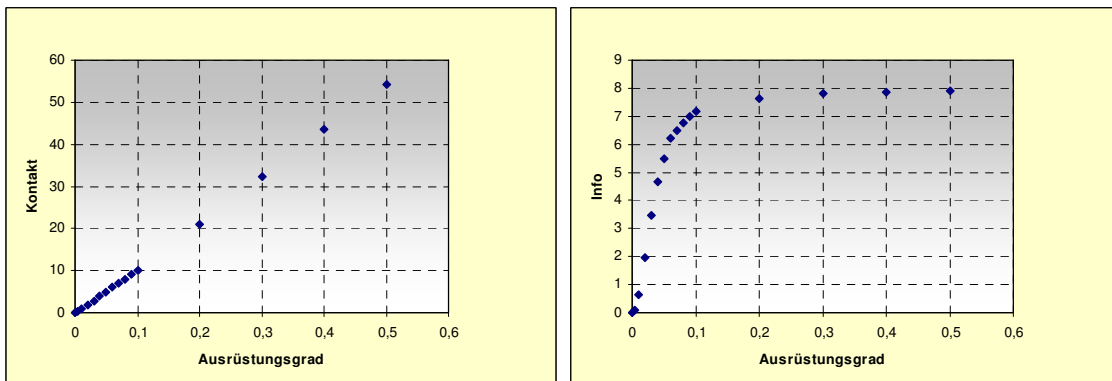
a) Bekannte Kanten eines Fahrzeuges im Mittel

b) Verbindungen eines Fahrzeuges im Mittel



c) Bekannte Kanten eines Fahrzeuges als Maximum

d) Verbindungen eines Fahrzeuges als Maximum



e) Anzahl kontaktierter Fahrzeuge

f) Bereits bekannte, noch zu befahrene Straße

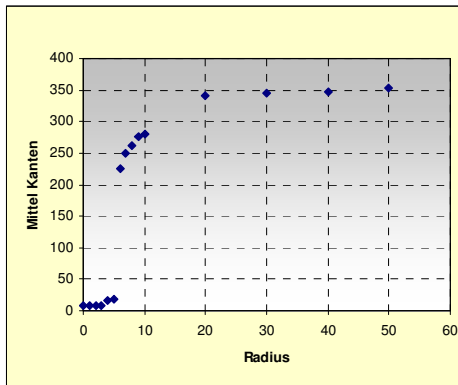
Abbildung 4.7.: Abhängigkeit der wichtigsten Kriterien vom Ausstattungsgrad

#### 4.4.2 Einfluss des Senderadius auf die Simulationsergebnisse

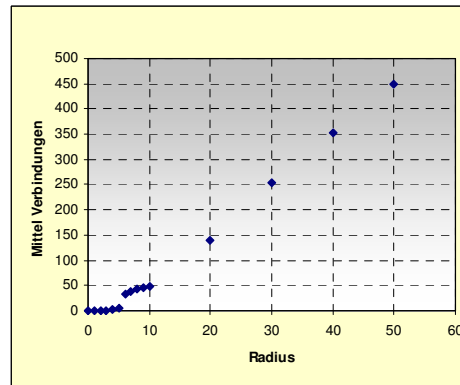
Nach Betrachtung der Kurvenverläufe aus Abbildung 4.8. ist auch eine Abhängigkeit der einzelnen Kriterien vom Senderadius zu erkennen. Erste Verbindungen mit anderen Fahrzeugen sind mit einem Radius von ca. vier Metern möglich. Doch zufrieden stellende Ergebnisse bezüglich der Anzahl an bekannten Kanten oder der Anzahl an Straßen, über die schon Informationen vorliegen und noch befahren werden, sind erst ab einem Senderadius von sechs Metern erreichbar. Auf den ersten Blick erscheint es kaum vorstellbar, bereits mit diesem Radius Verbindungen aufbauen zu können. Werden jedoch die Eigenschaften des Szenarios genauer betrachtet, lassen sich hierfür zwei Gründe ableiten. So besitzt jede Straße lediglich eine Fahrspur in beide Richtungen. Die Fahrzeuge fahren sehr dicht aneinander vorbei und können ihre Kantenlisten austauschen. Außerdem begegnen sich an Kreuzungen Fahrzeuge, die aus unterschiedlichen Richtungen kommen. Auch an diesen Punkten ist der Abstand zwischen zwei Fahrzeugen geringer als sechs Meter, wodurch Verbindungen aufgebaut werden können. Die Geschwindigkeit der Fahrzeuge spielt hinsichtlich des Verbindungsaufbaus keine Rolle, da in den Simulationen nur geprüft wird, ob sich ein Fahrzeug im Funkbereich befindet oder nicht. In der Realität sieht dies anders aus, da für eine Übertragung noch Zeit benötigt wird (siehe Kapitel drei).

Neben dem großen Sprung innerhalb der Kurven bei einem Senderadius von sechs Metern fällt noch auf, dass bereits mit einem Senderadius von 20 m die mittlere Anzahl bekannter Kanten bei 340,5 liegt. Auch liegen hier schon einigen Fahrzeugen Informationen über alle 360 Kanten vor bzw. es stehen alle Kanten in den Kantenlisten der Fahrzeuge. Ebenfalls wird beim Kriterium aus Abbildung 4.8. f) mit dem gleichen Senderadius von 20 m das Maximum von acht mit 7,6 fast erreicht. Demnach nimmt der Einfluss des Senderadius auf die Ergebnisse bei einer Größe von 20 m deutlich ab.

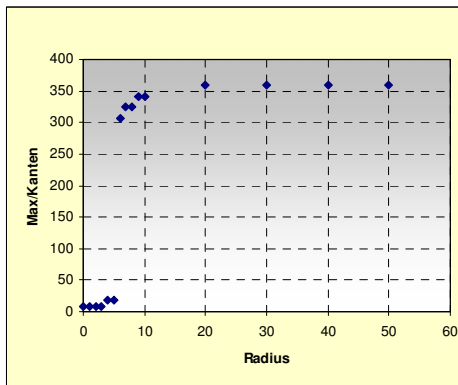
Die Kurvenverläufe von Abbildung 4.8. a), c) und f) sind identisch mit dem einer Exponentialfunktion, allerdings erst ab einem Radius von drei Metern. Durch den konstanten Kurvenverlauf bis zu einem Radius von drei Metern und dem großen Sprung bei sechs Metern liegt in keiner Abbildung eine lineare Funktion vor. Es kann lediglich festgehalten werden, dass bei den Abbildungen b), d) und e) die Anzahlen mit größer werdendem Radius weiter steigen werden. Der Kurvenverlauf über die Anzahl kontaktierter Fahrzeuge könnte auf den ersten Blick ab drei Metern auch identisch mit dem einer Parabel sein. Allerdings erscheint dies als unwahrscheinlich, da auch mit einem Radius von größer oder gleich 390 m andere Kreuzungen erreicht werden und die Anzahl kontaktierter Fahrzeuge dann deutlich steigt. Bei diesem Radius ist ein ähnlicher oder noch größerer Sprung innerhalb des Kurvenverlaufes zu erwarten, da nun auch alle ausgestatteten Fahrzeuge auf den Straßen oberhalb und unterhalb der aktuell befahrenen Straße erreicht werden können.



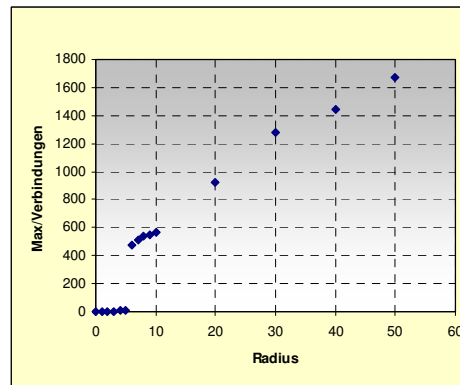
a) Bekannte Kanten eines Fahrzeuges im Mittel



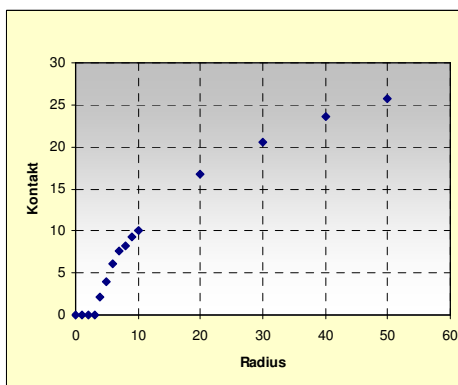
b) Verbindungen eines Fahrzeuges im Mittel



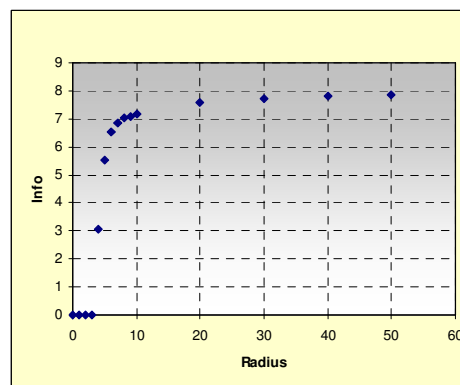
c) Bekannte Kanten eines Fahrzeuges als Maximum



d) Verbindungen eines Fahrzeuges als Maximum



e) Anzahl kontaktierter Fahrzeuge



f) Bereits bekannte, noch zu befahrene Straße

Abbildung 4.8.: Abhängigkeiten der wichtigsten Kriterien vom Senderadius

#### 4.4.3 Ausstattungsgrad gegen Senderadius

Die Streudiagramme in den Abbildungen 4.7. und 4.8. stellen graphische Hilfsmittel dar, die die Ergebnisse der Simulationen veranschaulichen. Aus diesen ist eindeutig eine Abhängigkeit zwischen den einzelnen Kriterien und dem Ausstattungsgrad sowie dem Senderadius zu erkennen. Wenn eine Vermutung für einen Zusammenhang zweier Werte vorliegt, liegt es nahe, diese Vermutung durch mathematische Verfahren zu bestätigen. Das Maß, welches die Stärke dieses Zusammenhanges angibt, ist der *empirische Korrelationskoeffizient* [Sta01]. Dieser wird bestimmt durch

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.3)$$

und heißt *Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient*. Der Wertebereich liegt bei  $-1 \leq r \leq 1$ . Zusätzlich ist noch die Art des gemessenen Zusammenhanges von Interesse. Hierfür können für  $r$  drei Fälle unterschieden werden:

$r > 0$ : Korrelation ist positiv; gleichsinniger linearer Zusammenhang;

Werte  $(x_i, y_i)$  haben die Tendenz, um eine Gerade mit positiver Steigung zu liegen

$r < 0$ : Korrelation ist negativ; gegensinniger linearer Zusammenhang;

Werte  $(x_i, y_i)$  haben die Tendenz, um eine Gerade mit negativer Steigung zu liegen

$r = 0$ : Keine Korrelation; unkorreliert; es ist kein linearer Zusammenhang vorhanden

Ist die Korrelation nicht gleich null, wird noch zwischen einer *schwachen*, *mittleren* und *starken* Korrelation unterschieden. Diese lassen sich grob einordnen in

$|r| < 0,5 \triangleq$  „schwache Korrelation“

$0,5 \leq |r| < 0,8 \triangleq$  „mittlere Korrelation“

$0,8 \leq |r| \triangleq$  „starke Korrelation“

Mit Hilfe dieser Definitionen ist die Stärke des linearen Zusammenhanges zweier Größen bestimmbar. Es können vom Korrelationskoeffizienten nur lineare Zusammenhänge erfasst werden.

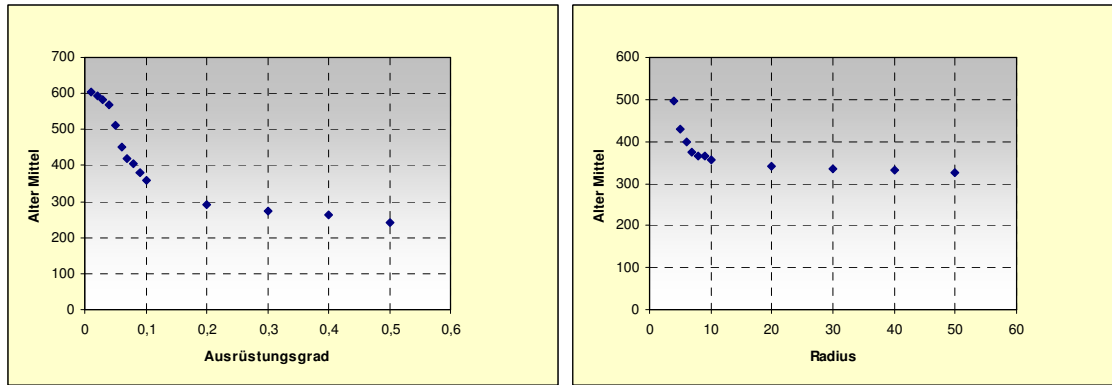
In dieser Diplomarbeit interessiert die Fragestellung, ob die mittlere Anzahl bekannter Kanten aller Fahrzeuge größer vom Ausstattungsgrad oder größer vom Senderadius beeinflusst wird. Nach Berechnung der Korrelationskoeffizienten ergibt sich eine mittlere Korrelation zwischen dem Ausstattungsgrad und der mittleren Anzahl an Kanten aller Fahrzeuge von  $r = 0,7753$  und eine ebenfalls mittlere Korrelation zwischen dem Senderadius und dem selben Kriterium von  $r = 0,7399$ . Diese beiden Ergebnisse deuten an, dass auf die mittlere Anzahl bekannter Kanten der Ausstattungsgrad und auch der Senderadius einen fast gleichen Einfluss ausüben. Die lineare Abhängigkeit vom Ausstattungsgrad ist nur geringfügig größer. Dies liegt an dem konstanten Kurvenverlauf in Abbildung 4.8. a) bei einem Senderadius zwischen null und drei Metern.

Folglich bleibt festzuhalten, dass sowohl ein bestimmter Ausstattungsgrad als auch ein bestimmter Senderadius vorliegen muss, um eine reibungslose Kommunikation zwischen den Fahrzeugen zu ermöglichen. Eine abschließende Aussage, dass eine der beiden Größen einen größeren Einfluss auf die mittlere Anzahl der Kanten hat, kann an dieser Stelle nicht getroffen werden.

#### 4.4.4 Alterstruktur der Informationen

Die Informationen über die Straßenverhältnisse sind nur so lange brauchbar, wie sie noch gültig sind. Ist eine gewisse Zeitspanne vergangen, muss davon ausgegangen werden, dass schon neue Informationen über die Straße vorliegen. Aus diesem Grund wird jetzt untersucht, wie alt die Kanteneinträge in den Kantenlisten der Fahrzeuge sind. Dabei wird nur das durchschnittliche Alter in Zeitschritten betrachtet und nicht die Informationen, aus welchem Zeitschritten die Einträge stammen. Wie schon in den anderen Auswertungen wird das Informationsalter dem Ausrüstungsgrad und dem Senderadius gegenübergestellt.

Aus den Graphen in Abbildung 4.9. auf der nächsten Seite ist eindeutig zu erkennen, dass mit einem größeren Ausstattungsgrad und einem größeren Senderadius das durchschnittliche Alter der Kanteneinträge sinkt. Doch anders als im Punkt 4.4.1 und 4.4.2 scheint die Abhängigkeit des Alters vom Ausstattungsgrad größer zu sein, als vom Senderadius (Tabellen siehe Anhang). So schwankt das mittlere Alter in Abbildung 4.9. a) zwischen 242 und 605 Zeitschritten und bei b) lediglich zwischen 326 und 496 Zeitschritten. Ab einem Ausstattungsgrad von 10 % und einem Senderadius von 10 m können hinsichtlich des Informationsalters mit 358 Zeitschritten zufrieden stellende Ergebnisse erreicht werden. Dazu ist auch die Fahrdauer interessant, die die Fahrzeuge für die Durchquerung des Verkehrsnetzes benötigen. Im nun folgenden Punkt wird diese untersucht.



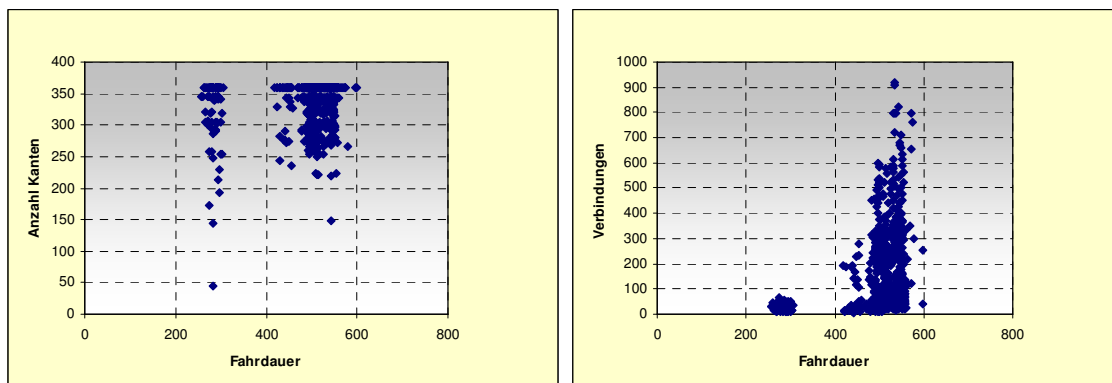
a) Abhängigkeit zwischen dem Informationsalter und dem Ausstattungsgrad

b) Abhängigkeit zwischen dem Informationsalter und dem Senderadius

Abbildung 4.9.: Das mittlere Informationsalter in Abhängigkeit zum Ausstattungsgrad und Senderadius

#### 4.4.5 Fahrdauer der Fahrzeuge

Bei lediglich 9 % der Fahrzeuge liegt die Fahrdauer durch die Simulation zwischen 258 und 399 Zeitschritten. Folglich benötigen 91 % aller Fahrzeuge zwischen 400 und 599 Zeitschritte für die Durchfahrt des Verkehrsnetzes. Unabhängig von der Fahrdauer können die Fahrzeuge eine bestimmte Anzahl an Kanten in ihre Kantenliste aufnehmen. Die Anzahl an Verbindungen ist hingegen mehr abhängig von der Fahrdauer, jedoch spielt dieses Kriterium bei der Bewertung der Güte der Kommunikation zwischen den Fahrzeugen nicht die entscheidende Rolle. Die beiden Aussagen können durch die Abbildung 4.10. unterstützt werden. Die Fahrdauer ist dabei unabhängig vom Ausstattungsgrad und vom Senderadius.



a) Anzahl Kanten von jedem Fahrzeug

b) Anzahl Verbindungen von jedem Fahrzeug

Abbildung 4.10.: Anzahl Kanten und Verbindungen in Abhängigkeit zur Fahrdauer

Da die meisten Fahrzeuge eine Fahrdauer von mehr als 400 Zeitschritten aufweisen können, kann das mittlere Informationsalter von 358 Zeitschritten mit einem Ausstattungsgrad von 10 % und einem Senderadius von 10 m als zufrieden stellend betrachtet werden.

## 4.5 Marktchancen

Im Unterkapitel 4.4 wurden die Ergebnisse der Simulationen dargestellt und analysiert. Dabei stellte sich heraus, dass eine gewisse Prozentzahl von Fahrzeugen mit der Funktechnologie ausgestattet sein muss, damit diese Informationen über die Straßen erhalten können. Nach den Graphen in Abbildung 4.7. liegt diese Zahl bei ca. 10 %, das durchschnittliche Alter dieser Informationen (Kanteneinträge) bei 358 Zeitschritten. Es hat sich schon öfters gezeigt, dass eine Einführung von neuen Technologien nicht von heute auf morgen möglich ist. Deswegen ist ein kontinuierliches Ansteigen der Anzahl von ausgestatteten Fahrzeugen zu erwarten. Bis etwa jedes zehnte Fahrzeug in der Lage ist, mit anderen kommunizieren zu können, kann schlecht vorhergesagt werden. Jedoch sind die 10 % auch nicht als utopisch anzusehen.

Die Preise für Navigationssysteme mit GPS-Empfänger sind in den letzten Jahren deutlich gesunken. Da diese Technologie für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation notwendig ist, erhöht dieser Fakt ebenfalls die Chancen für eine erfolgreiche Markteinführung.

Einen letzten interessanten Punkt stellen die verwendeten Antennen dar, die das Senden und Empfangen der Daten ermöglichen. Dabei gewährleisten diese unterschiedliche Senderadien. Wird eine sehr leistungsstarke Antenne verwendet, kann ein großer Senderadius erreicht werden. Allerdings wird die Gefahr von Inferenzen zwischen gesendeten Nachrichten größer. Nach den Simulationsergebnissen würde ein Senderadius von 20 m bereits ausreichen. Allerdings ist dies stark vom Verkehrsszenario abhängig. Auf einer Autobahn mit mehreren Spuren und hoher Geschwindigkeit muss der Sendebereich erhöht werden. In Bezug auf die Marktchancen bringt ein hoher Ausstattungsgrad die Gefahr von Interferenzen mit sich. Dann muss die Anzahl der zur Verfügung stehenden Frequenzen erhöht werden. Ansonsten wäre die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen für den Massenmarkt nicht geeignet und würde die Marktchancen verringern und den Sinn dieser Kommunikation (Gefahrenwarnung) aufheben.

Zusammenfassend können der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation gute Marktchancen eingeräumt werden, wenn auch eine Einführung für den Massenmarkt hinsichtlich eines geringen Preises und Reservierung von mehrerer Frequenzen ermöglicht werden kann. Durch den Preisverfall bei den Navigationsgeräten stehen die Chancen hierzu gut.



## **Kapitel 5.**

### **Zusammenfassung und Ausblick**

#### **5.1. Zusammenfassung**

Diese Arbeit beschäftigte sich in drei Schritten mit der Analyse und Optimierung der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation im Straßenverkehr. Mit dieser neuen Art der gegenseitigen Informationsübermittlung ist es möglich, andere Verkehrsteilnehmer vor Gefahrenstellen wie z.B. Nebel oder Aquaplaning zu warnen. Auch einen Stauhinweis an andere Fahrzeuge stellt ein denkbares Szenario dar. Der Informationsaustausch vollzieht sich über die Versendung von Datenpaketen, die zwischen den Fahrzeugen ausgetauscht werden. Hierzu muss ein Fahrzeug in der Lage sein, die Datenpakete senden, empfangen und auszuwerten zu können. Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten, wie die Fahrzeuge ihre Nachrichten verbreiten können. Die Wahl der jeweiligen Variante ist dabei von dem Empfänger oder den Empfängern anhängig.

Als Erstes erfolgte die Festlegung, dass ein Verkehrsnetz ein MANET darstellt. Nachdem dessen grundlegende Eigenschaften erläutert wurden, erfolgte eine Einführung in die Routingverfahren, die speziell für die MANET's entwickelt worden sind. Diese kommen immer dann zum Einsatz, wenn sich Sender und Empfänger nicht im gegenseitigen Sendebereich befinden und die Datenpakete über mehrere Fahrzeuge (Knoten) zugestellt werden müssen. In diesem Zusammenhang fungieren die Fahrzeuge als Router, da sie auch für die Weiterleitung der Informationen verantwortlich sind. Für einen mathematischen Einstieg in die Routing-Algorithmen wurde zunächst das Dijkstra-Verfahren erläutert. Mit diesem Verfahren können kürzeste Wege von einem Knoten zu allen anderen Knoten in einem Graphen ermittelt werden. Dieser klassische Algorithmus eignet sich zwar nicht für die Zustellung der Datenpakete in einem MANET, jedoch haben viele Algorithmen ihren Ursprung im Dijkstra-Verfahren. Auch die Intention eines Algorithmus, so schnell wie möglich ein Ziel zu erreichen, ist äquivalent zum Dijkstra-Algorithmus.

Von denen für MANET's geeigneten Routingverfahren wurden drei untersucht. Nach der Einteilung der Verfahren in topologiebasierte (DSR und AODV) und positionsbasierte Routingverfahren (GPSR) wurden diese hinsichtlich verschiedener Kriterien untersucht. Die Ergebnisse stammten dabei aus den Literaturquellen. Es erfolgte außerdem noch eine Untergliederung in Autobahnszenarien und Stadtszenarien. Dabei stellte sich heraus, dass alle drei Routingverfahren in Autobahnszenarien insbesondere mit der Zustellung der Datenpakete bestens zurecht kommen; mit leichten Vorteilen für GPSR. In einem Stadtszenario, welches sich durch das Vorkommen von zahlreichen Hindernissen, die die Funkübertragung stören könnten, kennzeichnet, haben allerdings alle Verfahren Probleme mit der Zustellung der Datenpakete; insbesondere GPSR. Auch die anderen untersuchten Kriterien zeigen die einzelnen Schwächen und Stärken der Verfahren auf. Es erfolgte die Festlegung, dass in einem Autobahnszenario GPSR die beste Arbeit verrichten kann. Aus welchen Gründen ein MANET und das Verwenden von Routingverfahren Probleme mit sich bringen bzw. aus welchem Grund die Schwächen der Verfahren entstehen können, wurde anschließend analysiert. Zum Abschluss wurden noch die Sicherheitsaspekte innerhalb eines MANET's zusammengetragen.

Losgelöst von dem Wesen eines MANET's wurden anschließend im zweiten Schritt die Anforderungen und Herausforderungen an die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation erarbeitet. Dazu wurde insbesondere die verwendete Funkverbindung analysiert und festgelegt, welche Funktechnik am besten für die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation geeignet ist.

Neben der Funktechnik wurden auch die versendeten Datenpakete intensiv erörtert. Es erfolgten Aussagen hinsichtlich des Inhaltes eines Datenpaketes, dessen Übertragungsdauer und mögliche Störungen während der Übertragung. Eine Störungsmöglichkeit stellt dabei eine Kollision von gesendeten Datenpaketen dar. Hierzu wurde ein bereits entwickeltes Kollisionsvermeidungsverfahren weiter optimiert. Dadurch kann die Wahrscheinlichkeit des Kollidierens von Datenpaketen vermindert werden.

Im dritten Schritt wurden mit dem Verkehrssimulationsprogramm SUMO vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt einige Simulationen hinsichtlich des Nutzens einer Kommunikation zwischen Fahrzeugen durchgeführt. Dazu musste SUMO um die entsprechenden Methoden erweitert werden. Es stellte sich nach den Simulationen heraus, dass bereits ein Ausstattungsgrad von 10 % und ein Senderadius von 10 m sehr gute Ergebnisse bezüglich bekannter Straßen oder anderen Kriterien liefern. Allerdings sind die erhaltenen Ergebnisse maßgeblich von dem verwendeten Verkehrsnetz abhängig. Dennoch konnten schon einige Aussagen hinsichtlich der Marktchancen der Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation getroffen werden. Die wichtigste ist sicherlich, dass bereits ein niedriger Ausstattungsgrad von 10 % ordentliche Informationen über das Verkehrsnetz an die Fahrzeuge liefern kann.

## 5.2. Erweiterungsmöglichkeiten

In dieser Arbeit wurde die Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation umfangreich analysiert. Aus Zeitgründen mussten allerdings einige Fragestellungen offen gelassen werden. Es konnten nicht alle auftretenden Probleme vollständig analysiert und gelöst werden, so dass noch weiterer Forschungsbedarf besteht. Einige Punkte, die einer weiteren Untersuchung bedürfen, sollen hier kurz Erwähnung finden.

### **Datei „step.txt“**

Von den drei Ausgabedateien wurde die Datei „step.txt“ in den Analysen vom vierten Kapitel nicht explizit betrachtet. Diese schlüsselt die Anzahl bekannter Kanten und die Anzahl an Verbindungen von jedem Fahrzeug weiter auf. Ist z.B. interessant, wie viele Verbindungen pro Zeitschritt zwischen den Fahrzeugen stattfinden, kann diese Anzahl anhand der Daten ermittelt werden. Auch befinden sich hier Angaben zu der Anzahl von Kanten, die ein Fahrzeug zu einem bestimmten Zeitschritt schon in seine Kantenliste aufgenommen hat. Mit dieser Datei können noch Analysen hinsichtlich der beiden Kriterien durchgeführt werden.

### **Verwendung anderer Szenarien**

Das in dieser Diplomarbeit verwendete Verkehrsnetz besitzt bestimmte Parameter. So ist zu erwarten, dass bei Verwendung eines anderen Szenarios nicht die gleichen Ergebnisse vorliegen werden. Auch wäre es interessant zu wissen, ob die Ergebnisse in einem Stadtszenario erheblich von den vorliegenden abweichen. Dazu muss SUMO um die Möglichkeit erweitert werden, Gebäude oder andere Hindernisse abbilden zu können. Dies erfolgt durch die Implementierung von geschlossenen Polygonzügen.

### **Auslösezeitpunkte**

Es ist noch nicht ganz klar, wodurch eine Versendung von Datenpaketen ausgelöst werden kann. Zwar konnten in dieser Arbeit schon einige Aussagen hinsichtlich dieses Punktes getroffen werden, jedoch fehlen die Ergebnisse aus Simulationen. Auch Tests in real world-Szenarien sind denkbar. Jedoch sind für Tests in real world-Szenarien große Finanzmittel notwendig, da die Fahrzeuge erst umgerüstet werden müssen. Durch Hinzugewinnung von Sponsoren (siehe fleetNet [fle]) könnte solch ein Projekt finanzierbar werden.

### **Kollisionsvermeidungsverfahren**

Im dritten Kapitel wurde ein optimiertes Kollisionsvermeidungsverfahren vorgestellt. Dieses Verfahren ist jedoch noch nicht in Simulationen getestet worden. Aus diesem Grund stellt auch dieser Punkt ein weiteres Forschungsprojekt dar.

### **Routingverfahren**

Im zweiten Kapitel wurden die Ergebnisse der Untersuchungen dargestellt, die mit den Routingverfahren durchgeführt wurden. Um noch bessere Ergebnisse erhalten zu können, müssen diese Verfahren weiter optimiert werden. Für die statistische Analyse dieser Verfahren muss SUMO um die entsprechenden Routingverfahren erweitert werden.

Mit den MANET's werden weiterhin umfangreiche Forschungen betrieben. So finden jährlich einige internationale Konferenzen statt, die neue Simulationsergebnisse dokumentieren. Hierzu erscheinen jährlich Bücher, die dem interessierten Leser wärmstens empfohlen werden können [Nik04][Pie03].

## Anhang A.

### Xml-Datei zur Steuerung des Verkehrsflusses

Mit Hilfe dieser Datei werden die Fahrzeuge und Routen generiert. Über die DOS-Eingabeaufforderung muss der Inhalt der Datei bestätigt werden. Dabei erfüllen die Anweisungen im nachfolgendem Auszug folgende Aufgaben:

- `<flows>` – An diesem Punkt wird die xml-Datei eingeleitet.
- `<interval begin="0" end="299">` – Hier wird das Intervall mit Start- und Zielangabe eingeleitet.
- `flow-id` – Jede Flussnummer darf nur einmal vorkommen. Dadurch kann jeder Fluss genau zugeordnet werden. Ist eine Nummer in der Xml-Datei doppelt enthalten, erscheint eine Fehlermeldung innerhalb der DOS-Eingabeaufforderung.
- `from` – Diese Anweisung gibt diejenige Kante an, von der die Fahrzeuge in die Simulation gelangen.
- `to` – Hier steht die Kante, von der die Fahrzeuge die Simulation wieder verlassen, wenn sie diese Kante erreicht haben.
- `no` – Diese Zahl gibt die Anzahl an Fahrzeugen wieder, die in dem angegebenen Intervall in das Verkehrsnetz gelangen. Es werden nicht alle Fahrzeuge gleichzeitig generiert, sondern innerhalb des Intervalls nacheinander entsendet.
- `</interval>` – Mit diesem Ausdruck wird das Intervall, in dem Flüsse generiert werden, beendet.
- `</flows>` – Durch das Setzen dieser Anweisung wird die xml-Datei beendet.

```

<flows>
<interval begin="0" end="299">
<flow id="0" from="0/0to0/1" to="0/9to1/9" no="59"/>
<flow id="1" from="1/0to1/1" to="1/9to0/9" no="59"/>
<flow id="2" from="2/0to2/1" to="2/9to1/9" no="59"/>
<flow id="3" from="3/0to3/1" to="3/9to2/9" no="59"/>
<flow id="4" from="4/0to4/1" to="4/9to3/9" no="59"/>
<flow id="5" from="5/0to5/1" to="5/9to4/9" no="59"/>
<flow id="6" from="6/0to6/1" to="6/9to5/9" no="59"/>
<flow id="7" from="7/0to7/1" to="7/9to6/9" no="59"/>
<flow id="8" from="8/0to8/1" to="8/9to7/9" no="59"/>
<flow id="9" from="9/0to9/1" to="9/9to8/9" no="59"/>
<flow id="10" from="0/0to1/0" to="9/0to9/1" no="59"/>
<flow id="11" from="0/1to1/1" to="9/1to9/2" no="59"/>
<flow id="12" from="0/2to1/2" to="9/2to9/3" no="59"/>
<flow id="13" from="0/3to1/3" to="9/3to9/4" no="59"/>
<flow id="14" from="0/4to1/4" to="9/4to9/5" no="59"/>
<flow id="15" from="0/5to1/5" to="9/5to9/6" no="59"/>
<flow id="16" from="0/6to1/6" to="9/6to9/7" no="59"/>
<flow id="17" from="0/7to1/7" to="9/7to9/8" no="59"/>
<flow id="18" from="0/8to1/8" to="9/8to9/9" no="59"/>
<flow id="19" from="0/9to1/9" to="9/9to9/8" no="59"/>
<flow id="20" from="0/9to0/8" to="0/0to1/0" no="59"/>
<flow id="21" from="1/9to1/8" to="1/0to2/0" no="59"/>
<flow id="22" from="2/9to2/8" to="2/0to3/0" no="59"/>
<flow id="23" from="3/9to3/8" to="3/0to4/0" no="59"/>
<flow id="24" from="4/9to4/8" to="4/0to5/0" no="59"/>
<flow id="25" from="5/9to5/8" to="5/0to6/0" no="59"/>
<flow id="26" from="6/9to6/8" to="6/0to7/0" no="59"/>
<flow id="27" from="7/9to7/8" to="7/0to8/0" no="59"/>
<flow id="28" from="8/9to8/8" to="8/0to9/0" no="59"/>
<flow id="29" from="9/9to9/8" to="9/0to8/0" no="59"/>
<flow id="30" from="9/9to8/9" to="0/9to0/8" no="59"/>
<flow id="31" from="9/8to8/8" to="0/8to0/7" no="59"/>
<flow id="32" from="9/7to8/7" to="0/7to0/6" no="59"/>
<flow id="33" from="9/6to8/6" to="0/6to0/5" no="59"/>
<flow id="34" from="9/5to8/5" to="0/5to0/4" no="59"/>
<flow id="35" from="9/4to8/4" to="0/4to0/3" no="59"/>
<flow id="36" from="9/3to8/3" to="0/3to0/2" no="59"/>
<flow id="37" from="9/2to8/2" to="0/2to0/1" no="59"/>
<flow id="38" from="9/1to8/1" to="0/1to0/0" no="59"/>
<flow id="39" from="9/0to8/0" to="0/0to0/1" no="59"/>
</interval>

<interval begin="300" end="599">
<flow id="40" from="0/0to0/1" to="0/9to1/9" no="6"/>
<flow id="41" from="1/0to1/1" to="1/9to0/9" no="6"/>
.
.
.
</flows>

```

## Anhang B.

### Statistische Daten

In diesem Anhang befinden sich die Tabellen, in denen die statistischen Werte enthalten sind. Hieraus wurden die Kurvenverläufe im vierten Kapitel erstellt. Der Inhalt der Tabellen erklärt sich mit Hilfe des vierten Kapitels dieser Diplomarbeit.

#### B.1 Abhängigkeit vom Ausstattungsgrad

Ausrüstungsgrad	Mittel Kanten	Mittel Verbindungen	Max/Kanten	Max/Verbindungen	Fahrzeuge	Kontakt	Info
0	9	0	9	0	0	0	0
0,005	10,6	0,4	19	2	42	0,4	0,1
0,01	14,1	4,9	46	202	106	0,8	0,7
0,02	20,4	6,7	71	227	193	1,8	2,0
0,03	67,9	19,3	197	508	297	2,9	3,5
0,04	122,9	21,2	281	511	409	3,9	4,6
0,05	177,2	28,3	315	514	520	5,0	5,5
0,06	227,4	34,0	320	552	628	6,0	6,2
0,07	241,2	37,4	322	558	726	7,0	6,5
0,08	252,3	40,9	324	559	823	7,9	6,8
0,09	262,2	44,3	324	563	945	9,1	7,0
0,1	280,3	47,7	342	563	1042	10,0	7,2
0,2	324,8	97,7	360	581	2191	21,1	7,6
0,3	345,5	150,2	360	659	3351	32,3	7,8
0,4	349,3	205,2	360	678	4502	43,5	7,9
0,5	354,6	251,6	360	761	5646	54,1	7,9

*Tabelle B.1.: Abhängigkeit der einzelnen Kriterien vom Ausstattungsgrad*

## B.2 Abhängigkeit vom Senderadius

Radius	Mittel Kanten	Mittel Verbindungen	Max/Kanten	Max/Verbindungen	Fahrzeuge	Kontakt	Info
0	9	0	9	0	1042	0	0
1	9	0	9	0	1042	0	0
2	9	0	9	0	1042	0	0
3	9	0	9	0	1042	0	0
4	15,3	2,1	18	7	1042	2,1	3,1
5	17,3	3,9	18	12	1042	3,9	5,5
6	226,1	33,3	306	475	1042	6,0	6,5
7	250,0	38,4	324	511	1042	7,6	6,9
8	262,9	42,8	324	536	1042	8,3	7,0
9	276,9	44,6	342	552	1042	9,3	7,1
10	280,3	47,7	342	563	1042	10,0	7,2
20	340,5	140,2	360	919	1042	16,8	7,6
30	344,3	254,8	360	1282	1042	20,6	7,7
40	346,4	351,9	360	1447	1042	23,6	7,8
50	354,1	448,6	360	1668	1042	25,7	7,8

*Tabelle B.2.: Abhängigkeit der einzelnen Kriterien vom Senderadius*

## B.3 Altersstruktur

Ausrüstungsgrad	Alter Mittel
0,01	605,378
0,02	593,072
0,03	583,645
0,04	568,799
0,05	513,106
0,06	449,727
0,07	419,139
0,08	406,379
0,09	380,066
0,1	357,552
0,2	291,347
0,3	272,019
0,4	262,471
0,5	241,697

Radius	Alter Mittel
1	Keine Daten
2	Keine Daten
3	Keine Daten
4	495,892
5	429,548
6	399,009
7	375,380
8	366,533
9	364,680
10	357,552
20	342,082
30	335,835
40	332,248
50	326,437

*Tabelle B.3.: Abhängigkeit des mittleren Alters vom Ausrüstungsgrad und vom Senderadius*



## B.4 Fahrdauer

Für die Fahrdauer wird nur ein Auszug aller Daten angegeben. In der Tabelle ist die Fahrzeugnummer mit der zugehörigen Fahrdauer angegeben.

Fahrzeugnummer	Fahrdauer
79_2	542
72_2	543
54_2	579
70_4	284
61_4	556
118_0	494
88_0	553
87_1	532
103_1	533
53_5	526
56_5	526
105_2	505
88_2	509
93_2	524
130_0	275
158_0	495
143_0	501
127_0	503
131_0	515
132_0	515
158_1	494
145_1	494
159_2	493
156_2	493
131_2	512
137_2	512
122_2	544
140_3	296
159_3	492
144_3	543
125_3	543
124_3	544
150_4	295
149_4	456
158_4	493
156_4	493
141_4	543
86_3	541
103_3	542
110_4	297
115_4	510
114_4	511
119_4	512
116_4	512
87_4	521

Abbildung B.4.: Fahrzeuge und deren Fahrdauer

## **Anhang C.**

### **Berechnung der Korrelationskoeffizienten**

Im letzten Teil des Anhangs kann die Berechnung des Korrelationskoeffizienten, der im vierten Kapitel für den Ausstattungsgrad und dem Senderadius berechnet wurde, nachvollzogen werden. Als Hilfsmittel wurde Microsoft-Excel verwendet.

Ausrüstungsgrad (x)	Mittel Kanten (y)	
0	9	
0,005	10,6	
0,01	14,1	
0,02	20,4	
0,03	67,9	
0,04	122,9	
0,05	177,2	
0,06	227,4	
0,07	241,2	
0,08	252,3	
0,09	262,2	
0,1	280,3	
0,2	324,8	
0,3	345,5	
0,4	349,3	
0,5	354,6	
<b>0,1221875</b>	<b>191,2251965</b>	
<b>(Mittelwert von x)</b>	<b>(Mittelwert von y)</b>	

$(x_i - \bar{x})$	$(y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})$	$(x_i - \bar{x})^2$	$(y_i - \bar{y})^2$
-0,1221875	-182,2251965	22,26564119	0,01492979	33206,0222
-0,1171875	-180,6061488	21,16478307	0,01373291	32618,581
-0,1121875	-177,1591587	19,87504312	0,01258604	31385,3675
-0,1021875	-170,8262327	17,45630566	0,01044229	29181,6018
-0,0921875	-123,3632436	11,37254902	0,00849854	15218,4899
-0,0821875	-68,36211577	5,61851139	0,00675479	4673,37887
-0,0721875	-13,98288876	1,009389783	0,00521104	195,521178
-0,0621875	36,17130036	-2,249402741	0,00386729	1308,36297
-0,0521875	49,9263187	-2,605529757	0,00272354	2492,6373
-0,0421875	61,08464559	-2,577008486	0,00177979	3731,33393
-0,0321875	70,99067656	-2,285012402	0,00103604	5039,67616
-0,0221875	89,03488032	-1,975461407	0,00049229	7927,20991
0,0778125	133,594977	10,39535915	0,00605479	17847,6179
0,1778125	154,2495872	27,42750472	0,03161729	23792,9351
0,2778125	158,1106543	43,92511614	0,07717979	24998,979
0,3778125	163,3619449	61,7201848	0,14274229	26687,125
<b>230,5379732</b>	<b>260304,84</b>	<b>230,5379732</b>	<b>260304,84</b>	<b>260304,84</b>
<b>(Summe)</b>	<b>(Summe)</b>	<b>(Zähler)</b>	<b>(Nenner)</b>	<b>(Ergebnis)</b>

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

Radius (w)	Mittel Kanten (z)	$(w_i - \bar{w})$	$(z_i - \bar{z})$	$(w_i - \bar{w}) * (z_i - \bar{z})$	$(w_i - \bar{w})^2$	$(z_i - \bar{z})^2$
0	9	-13	-174,3458841	2266,496493	169	30396,4873
1	9	-12	-174,3458841	2092,150609	144	30396,4873
2	9	-11	-174,3458841	1917,804725	121	30396,4873
3	9	-10	-174,3458841	1743,458841	100	30396,4873
4	15,3	-9	-168,0	1512,349041	81	28237,0324
5	17,3	-8	-166,0	1328,233483	64	27565,6904
6	226,1	-7	42,8	-299,324493	49	1828,47249
7	250,0	-6	66,7	-400,0053098	36	4444,56244
8	262,9	-5	79,6	-397,9450895	25	6334,41177
9	276,9	-4	93,6	-374,3285559	16	8757,61673
10	280,3	-3	96,9	-290,7425781	9	9392,36075
20	340,5	7	157,1	1099,964608	49	24692,2886
30	344,3	17	161,0	2736,389645	289	25909,4404
40	346,4	27	163,0	4402,129461	729	26582,6389
50	354,1	37	170,8	6319,386551	1369	29170,6694
<b>13</b> <b>(Mittelwert von x)</b>	<b>183,3458841</b> <b>(Mittelwert von y)</b>			<b>23656,01743</b> <b>(Summe)</b>	<b>3250</b> <b>(Summe)</b>	<b>314501,133</b> <b>(Summe)</b>
				<b>23656,0174</b> <b>(Zähler)</b>	<b>31970,7473</b> <b>(Nenner)</b>	<b>0,73992695</b> <b>(Ergebnis)</b>

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

# Literaturverzeichnis

- [AZ] ARD/ZDF-online Studie 2004, 10.2004  
<http://www.ard.de/intern/basisdaten/-/id=8192/nid=8192/did=186476/kzousj/index.html>
- [Bau03] Bauer, Manfred: Vermessung und Ortung mit Satelliten: GPS und andere satellitengestützte Navigationssysteme, 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2003, Herbert Wichmann Verlag, 3. Kapitel
- [Bel57] Bellman, R. E.: *Dynamic Programming*. Princeton University Press., 1957.
- [Bla00] Blazevic, Ljubica, Silvia Glordano und Jean-Yves Le Boudec: Self-Organizing Wide-Area Routing. In: Proceedings of SCI 2000/ISAS 2000, Orlando, July 2000.
- [Car00] CarTalk 2000 Projekt; <http://www.cartalk2000.net>
- [DC] Sicher auf der Interstate, 10.2004, [www.daimlerchrysler.com/Projects/c2c/channel/documents/293720\\_kommunikation.pdf](http://www.daimlerchrysler.com/Projects/c2c/channel/documents/293720_kommunikation.pdf)
- [Die00] Diestel, Reinhard: Graphentheorie, 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage 2000, Springer
- [Dom02] Domschke, Wolfgang, Drexl, Andreas: Einführung in Operations Research, 5., überarbeitete und erweiterte Auflage 2002, Springer
- [Epp03] Eppele, Klaus: Drahtlos in die Zukunft, 2003
- [Fle] Das fleetNet-Projekt, <http://www.fleetnet.de>
- [Fle02] Hartenstein, Hannes, Mauve, Martin: FleetNet – Internet on the road, 2002
- [Gab69] Gabriel, K., Sokal, R.: *A new statistical approach to geographic variation Analysis*; Systematic Zoolgy, Seiten 259–278, 1969
- [Hei03] Hein, Mathias, Dr. Bernd Maciejewski: Wireless LAN - Funknetze in der Praxis, 2003, Franzis'
- [Hen03] Prof. Dr. A. Henning, Peter: Taschenbuch Multimedia, 3., bearbeitete Auflage, 2003, Fachbuchverlag Leipzig
- [Hof94] Hoffman, G., Nielsen, S.: Beschreibung von Verkehrsabläufen an signalisierten Knotenpunkten, Bundesministerium für Verkehr, Abt. Straßenbau; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik - Heft 693, 1994, Bonn
- [Joh96] Johnson, David B., David A. Maltz: Mobile Computing, Kapitel 5 - Dynamic Source Routing, Seiten 153–181. Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [Ka00] Karp, B. and Kung, H.T., Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks, in *Proceedings of the Sixth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom 2000)*, Boston, MA, August, 2000, pp. 243-254.
- [Kar00] Karp, B., *Geographic Routing for Wireless Networks*, Ph.D. Dissertation, Harvard University, Cambridge, MA, October, 2000.
- [Kgl03] Kargl, Frank: Sicherheit in Mobilen ad hoc Netzwerken, Dissertation, 2003

- [Kie01] Kienzle, Jörg: Analyse von Einzelfahrzeugdaten – Verkehr verstehen –, Diplomarbeit August 2001
- [Köh03] Köhre, Thomas: Wireless Lan – Das kabellose Netzwerk 2003, Markt+ Technik Verlag
- [Kos] Kosch, Timo: Den Horizont der Fahrerassistenz erweitern: Vorausschauende Systeme durch Ad-hoc Vernetzung, BMW Group Forschung und Technik
- [Kra] Krajzewicz, Daniel: SUMO - Simulation of Urban MObility - User Documentation
- [Li00] Li, J., J. Jannotti, D. S. J. De Couto, D. R. Karger und R. Morris: A scalable location service for geographic ad hoc routing. In Proceedings of the 6th Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM) 2000; Seite 120-130, Boston, MA, USA, 2000
- [Lo03] Lochert, Christian: Ad-Hoc Routing für Kommunikation zwischen Fahrzeugen in Stadt-szenarien, Diplomarbeit, 2003
- [Ma01] Mauve, Martin, Jörg Widmer, Hannes Hartenstein. A Survey on Position-Based Routing in Mobile Ad-Hoc Networks. IEEE Network, 2001
- [Mau02] Mauve, Martin, Position-Based Routing for Inter-Vehicle Communication, 2002
- [Mon] The CMU Monarch Wireless and Mobility Extensions to ns-2.  
[www.monarch.cs.rice.edu/cmu-ns.html](http://www.monarch.cs.rice.edu/cmu-ns.html)
- [Mor00] Morris, Robert, Jannotti, John, Kaashoek, Frans, Li, Jinyang und Decouto, Douglas: CarNet: A Scalable Ad Hoc Wireless Network System. In: Proc. Of the 9th ACM SIGOPS European workshop: Beyond the PC: New Challenge for the Operating System, Kolding, Denmark, September 2000.
- [Neu00] Neubert, Lutz: Statistische Analyse von Verkehrsdaten und die Modellierung von Verkehrsfluss mittels zellulärer Automaten, Dissertation Mai 2000
- [Nik04] Nikolaidis, Ioanis, Barbeau, Michel: Ad-Hoc, Mobile, and Wireless Networks, Third International Conference, ADHOC-NOW 2004, Vancouver, Canada, July 2004, Proceedings, Springer
- [Ns2] ns-2 Netzwerksimulator; [www.isi.edu/nsnam/ns/](http://www.isi.edu/nsnam/ns/)
- [Par97] 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.
- [Pe01] Perkins, Charles E., Royer, E.: "The Ad Hoc On-Demand Distance Vector Protocol", in Ad Hoc Networking, Boston, Addison-Wesley, 2001
- [Per00] Perkins, Charles E. Ad hoc Networking, Addison-Wesley Professional 2000
- [Pie03] Pierre, Samuel, Barbeau, Michel: Ad-Hoc, Mobile, and Wireless Networks, Second International Conference, ADHOC-NOW 2003, Montreal, Canada, October 2003, Proceedings, Springer
- [Rot02] Roth, Jörg: Mobile Computing, 1. Auflage 2002, dpunkt.verlag
- [Sch00] Schiller, Jochen: Mobilkommunikation, 2000, Addison-Wesley
- [Sma] Smarte Netze, 10.2004, [www.daimlerchrysler.com/Projects/c2c/channel/documents/104861\\_Projekt\\_Fleetnet.pdf](http://www.daimlerchrysler.com/Projects/c2c/channel/documents/104861_Projekt_Fleetnet.pdf)
- [Sta01] Fahrmeir, Ludwig, Künstler, Rita, Pigeot, Iris, Tutz, Gerhard: Statistik, 3. Auflage, Springer 2001

- [Sum] Verkehrssimulationsprogramm „Sumo“, 10.2004, <http://sumo.sourceforge.net/>
- [Tan03] Tanenbaum, Andrew S.: Computernetzwerke, 4., überarbeitete Auflage 2003, Pearson Studium, Kapitel 5.2 - Routing-Algorithmen
- [Te] [http://www.telematik.informatik.uni-karlsruhe.de/lehre/alt/vorlesungen/Tele1-Folien\\_WS9697/K12-Mobi/sld013.htm](http://www.telematik.informatik.uni-karlsruhe.de/lehre/alt/vorlesungen/Tele1-Folien_WS9697/K12-Mobi/sld013.htm), Wintersemester 1996/1997
- [Tia02] TIAN, JING, ILLYA STEPANOV und KURT ROTHERMEL: Spatial Aware Geographic Forwarding for Mobile Ad Hoc Networks. Technischer Bericht TR2002/01, University of Stuttgart, 2002.
- [Tou80] Toussaint, G.: The relative neighborhood graph of a finite planar set; Pattern Recognition, S. 261–268, 1980
- [Web02] Weber, Nicolas, Brügge, Daniel: Ad Hoc Protokolle, Oktober 2002
- [Wol01] Wollert, Jörg F., Das Bluetooth-Handbuch, 2001, Franzis Verlag
- [Zon] Zone Routing Protocol,  
[www.ist.lu/users/thomas.engel/](http://www.ist.lu/users/thomas.engel/) 2002\_adhoc\_workshop/ws3.ppt

# Index

## A

Access Point, 3, 8  
adaptiver Algorithmus, 10  
Algorithmus von Dijkstra, 2, 4, 13  
AODV, 10, 12, 17, 26, 30, 44  
asynchroner Datendienst, 42

## B

Beacon, 11, 19, 29, 37  
Bluetooth, 40  
broadcast, 3, 20, 44, 53, 54

## C

CSMA/CA, 42, 49

## D

D-GPS, 1  
Digraph, 13  
DSDV, 4, 10, 12  
DSR, 10, 12, 16, 19, 25, 30, 44  
DSSS, 41

## E

empfängerinitiierte Protokolle, 51  
empirischer Korrelationskoeffizient, 70  
Exposed Node Problem, 51  
exterior face, 23

## F

Flooding, 10

## G

geocast, 4, 9, 10, 44, 53  
GG, 23, 31  
GPS, 1, 9, 11, 19, 37, 73  
GPSR, 12, 19, 26, 30, 37, 44, 55  
Greedy-Eigenschaft, 20  
GSR, 12, 30

## H

Hidden Terminal Problem, 49  
Hiperlan, 3, 40  
Hop, 9, 20, 25, 28  
Host, 9  
hybrid, 12

## I

IEEE 802.11 Standard, 3, 39, 41, 49  
IEEE 802.11 a, 40  
IEEE 802.11 b, 9, 40, 46  
IEEE 802.11 g, 40  
IEEE 802.11 p, 40  
interior face, 23,

## K

Knoten, 3  
    boshafter Knoten, 32  
    egoistischer Knoten, 32  
    fehlerhafter Knoten, 32  
Korrelationskoeffizient, 70

## L

Latenzzeit, 12, 17, 19, 25, 28  
LLC, 41  
Location Service, 19, 28  
LSR, 4, 12

## M

MAC, 41, 48  
MANET, 1, 7, 9, 15, 20, 29, 36, 49  
makroskopisch, 5  
MARCH-Protokoll, 52  
markierter Knoten, 13  
mikroskopisch, 5, 25  
multicast, 3  
multihop, 3, 9,  
multimodal, 5,



**N**

nichtadaptiver Algorithmus, 10  
Nutzergleichgewicht, 2  
Nutzeroptimum, 2

**P**

piggybacking, 21, 25, 37  
planar, 23, 31  
PLCP, 41, 47  
proaktiv, 11

**R**

reaktiv, 12, 16  
Rechte-Hand-Regel, 23  
RNG, 23, 31  
Router, 9  
Routingverfahren, 4  
    positionsbasiert, 9, 11, 19, 25, 30  
    topologiebasiert, 10, 12, 16, 19, 25  
RTS-CTS-Mechanismus, 43, 50

**S**

SDMA, 43  
senderinitiierte Protokolle, 51  
Simulationseigenschaften, 26, 63  
singlehop, 3, 9,  
SUMO, 5, 25, 30, 32, 48, 54, 55

**T**

Topologie, 44

**U**

unicast, 3, 4, 9, 10, 43, 44, 53

**V**

Verkehrsnetz, 35  
Verkehrsszenario, 35

**W**

Wireless-LAN, 7, 40, 46

**Z**

ZRP, 12

## **Ehrenwörtliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Berlin, den 10.01.2005

Sebastian Lehr