

# Dezentrale Verteilung von Verkehrsinformationen durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation

---

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik  
der Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

genehmigte

**Dissertation**

von

Dipl.-Ing. Peter Tondl  
geboren am 6. November 1966 in Crivitz

2006

1. Referent Prof. Dr.-Ing. Klaus Jobmann
2. Referent Prof. Dr.-Ing. Christian Grimm

Tag der Promotion: 24. Mai 2006

Hannoversche Beiträge zur Nachrichtentechnik

Band 2.12

**Peter Tondl**

**Dezentrale Verteilung von Verkehrsinformationen  
durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation**

Shaker Verlag  
Aachen 2006

## **Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2006

Copyright Shaker Verlag 2006

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5151-0

ISBN-13: 978-3-8322-5151-2

ISSN: 1616-5489

Shaker Verlag GmbH · Postfach 101818 · 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 · Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) · eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Kommunikationstechnik der Universität Hannover. Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Professor Klaus Jobmann, der diese Arbeit durch seine Unterstützung ermöglicht und im gesamten Entstehungsprozess mit konstruktiven Impulsen begleitet hat.

Ebenso danke ich meinen Kollegen am Institut für das hervorragende Arbeitsklima, ganz spezieller Dank geht an Andreas Heinrich, Michael Meincke, María Dolores Pérez Guirao und Sven Kopetzki für die fachlichen Diskussionen zu meiner Arbeit.

Für die kritische Durchsicht und Korrektur der Arbeit bin ich Simone Thiele zu ganz besonderem Dank verpflichtet.



## **Kurzfassung**

Ein Fahrzeug zu führen gehört zu den gefährlichsten Tätigkeiten, denen Menschen nahezu täglich nachgehen. Viele Innovationen im Fahrzeugbau der letzten Jahrzehnte dienten daher einer Erhöhung der Sicherheit von Verkehrsteilnehmern. Zukünftige aktive Sicherheitssysteme werden durch die Nutzung von Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation in der Lage sein, eine Erweiterung der Wahrnehmungsreichweite des Fahrers zu ermöglichen und damit eine neue Qualität bezüglich der Sicherheit von Fahrer und Fahrzeug zu erreichen.

Obwohl in einem Fahrzeug ein natürlicher Bedarf an Information über den umgebenden Verkehr besteht, existiert heute kein System, welches aufbauend auf Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation in einem permanenten Prozess einen Austausch zeitlich und örtlich relevanter Zustandsdaten zwischen diesen Verkehrsteilnehmern ermöglicht. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Algorithmen erlauben es, die Lücke zwischen der globalen Sicht zentral erfasster und aufbereiteter Verkehrszustandsdaten und der lokal begrenzten persönlichen Wahrnehmung des Fahrzeugführers zu schließen. Wird die Verkehrsentwicklung der letzten Jahrzehnte betrachtet, so kann eine signifikante Steigerung der durchschnittlichen täglichen Verkehrsbelastung festgestellt werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher ebenfalls Algorithmen vorgestellt, mit deren Hilfe über die Verbreitung lokal relevanter Informationen verkehrsstabilisierender Einfluss ausgeübt wird.

Durch die prinzipielle Begrenztheit der zur Verfügung stehenden Übertragungskapazität müssen in dem der Nachrichtenverteilung zu Grunde liegenden Funknetz fortschrittliche Techniken zur Verwaltung dieser knappen Ressource zur Anwendung kommen. Daher besteht das Hauptaugenmerk bei der Anwendung der vorgeschlagenen Algorithmen in einer Verminderung der Belastung des Funknetzes bei gleichzeitig schneller und effektiver Weitergabe der zu verbreitenden Nachrichten. Ein wesentliches Ergebnis dieser Arbeit ist, dass die Aufgabe der dezentralen Verteilung sicherheitsrelevanter Verkehrsinformationen in einem sich selbst regulierenden Funknetz zwischen Fahrzeugen ohne Zuhilfenahme einer festen Infrastruktur sowie mit normalen Sendeleistungen heute verfügbarer Systeme erfolgreich durchgeführt werden kann. Durch die Verbreitung lokal relevanter Fahrzeugzustandsdaten kann darüberhinaus verkehrsstabilisierender Einfluss ausgeübt werden.

Techniken wie die Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation werden mittel- und langfristig in Neuwagen Einzug halten. Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse können somit einen wertvollen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit im Fahrzeugverkehr der Zukunft leisten.

## **Schlagwörter**

Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation, Funknetz, Notfallnachricht, Informationsweiterleitung, Verkehrsflussoptimierung

## **Abstract**

Driving a vehicle is one of the most hazardous activities in our day-to-day live. Thus, many innovations in the car industry have been developed to increase safety. By using Inter-Vehicle Communication, pro-active safety systems of the future will be able to increase the driver's awareness and will therewith create a new level of safety for the driver and his environment at the same time.

Though there is an immanent need for information concerning the surrounding traffic, there is yet a system to be developed which will be capable of permanently exchanging data amongst participants of any given traffic scenario on a spacial as well as on a temporal level.

With the help of the algorithms developed in the context of this work, the gap between the global view of centrally gathered traffic data and the local (limited) perception of the driver can be bridged. Looking at the development of traffic during the last decades, there is a significant increase of the average daily traffic flow. Therefore, algorithms will be presented which will enhance a stable flow of traffic by distributing Floating Car Data amongst all vehicles. In a radio based network, the capacity for data transmission is limited. To counteract this limitation, advanced techniques for managing these resources are needed. The focus of using the suggested algorithms is to minimize stress upon the network and, at the same time, to forward and distribute data more quickly and effectively. An essential result of this work is, that decentralized distribution of safety relevant traffic information can take place in a wireless ad-hoc network between vehicles without a standard set up infra structure, using standard transmission power of communication systems already in operation. Furthermore, by spreading locally relevant Floating Car Data the traffic flow can also be increased.

In the long run, techniques like Inter-Vehicle Communication will be more widely spread in new vehicles than they are today. Hence, the results gained from this work may offer a valuable contribution in the area of safety to our driving in the future.

## **Keywords**

Inter-Vehicle Communication, Emergency Notification, multi-hop, information distribution, traffic flow optimization

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation für diese Arbeit . . . . .	2
1.2 Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2 Verkehrsflusserzeugung</b>	<b>5</b>
2.1 Klassifizierung von Verkehrsmodellen . . . . .	5
2.2 Zellulare Automaten . . . . .	6
2.3 Einspurverkehr . . . . .	6
2.4 Metastabile Hochflusszustände . . . . .	9
2.4.1 Modell nach Barlovic u.a. . . . .	10
2.4.2 Vergleich NaSch-Modell und VDR-Modell . . . . .	11
2.4.3 Alternativen zum VDR-Modell . . . . .	11
2.5 Synchronisierter Verkehr . . . . .	12
2.5.1 Nachzubildende Eigenschaften . . . . .	12
2.5.2 Antizipation von Geschwindigkeit und Bremsverhalten . . . . .	12
2.5.3 Bremslichtmodell nach Knospe u.a. . . . .	13
2.6 Mehrspurverkehr . . . . .	16
2.6.1 Modell nach Rickert u.a. . . . .	16
2.6.2 Modell nach Wagner u.a. . . . .	18
2.6.3 Modell nach Nagel u.a. . . . .	21
2.7 Weitere Modellverfeinerungen . . . . .	23
2.8 Modell zur Verkehrsflusserzeugung . . . . .	23

2.9	Evaluierung der Verkehrsflusserzeugung . . . . .	27
2.9.1	Fundamentaldiagramm . . . . .	28
2.9.2	Spurnutzung und Dichteinversion . . . . .	29
2.9.3	Relative Geschwindigkeiten . . . . .	29
2.9.4	Spontane Staubildung . . . . .	30
2.9.5	Dynamik in Abhängigkeit von Schwerlastverkehr . . . . .	31
2.9.6	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Nachrichtenübertragung</b>	<b>33</b>
3.1	Log-Distanz-Pfadverlustmodell . . . . .	33
3.2	Alternative Ausbreitungsmodelle . . . . .	35
3.3	Abschätzung des Pfadverlustexponenten . . . . .	35
3.4	Modell zur Nachrichtenübertragung . . . . .	37
3.5	Evaluierung der Nachrichtenübertragung . . . . .	39
3.5.1	Erzielbare Funkreichweiten . . . . .	39
3.5.2	Capturing . . . . .	39
3.5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Informationsweiterleitung</b>	<b>41</b>
4.1	Ausgangssituation . . . . .	41
4.2	Zonenkonzept . . . . .	42
4.3	Funk- und Informationsreichweite . . . . .	44
4.4	Kommunikationsdauer . . . . .	46
4.5	Zeit zwischen periodischen Aussendungen . . . . .	49
4.6	Bedeutung einer Nachricht . . . . .	50
4.7	Nutzen einer Nachrichtenwiederholung . . . . .	51
4.8	Algorithmus zur Informationsweiterleitung . . . . .	52
4.9	Evaluierung der Informationsweiterleitung . . . . .	58
4.9.1	Erstweiterleitung . . . . .	59
4.9.2	Gewinn an Informationsreichweite . . . . .	63
4.9.3	Sendeverhalten des entwickelten Algorithmus . . . . .	66
4.9.4	Gestörte Übertragungen und Verzögerungen . . . . .	70

4.9.5	Räumliche Verteilung der Übertragungen . . . . .	72
4.9.6	Informationsabdeckung . . . . .	74
4.9.7	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	81
<b>5</b>	<b>Verkehrsbeeinflussung</b>	<b>83</b>
5.1	Ausgangssituation . . . . .	83
5.2	Verkehrsflusserhaltung . . . . .	84
5.2.1	Infrastrukturelle Verkehrsflussoptimierung . . . . .	84
5.2.2	Infrastrukturlose Verkehrsflussoptimierung . . . . .	84
5.3	Verkehrsflusswiederherstellung . . . . .	85
5.3.1	Reduktion des Stauzuflusses . . . . .	85
5.3.2	Erhöhung des Stauabflusses . . . . .	85
5.4	Algorithmen zur Verkehrsbeeinflussung . . . . .	86
5.4.1	Verkehrsflussoptimierung . . . . .	86
5.4.2	Anfahroptimierung . . . . .	90
5.5	Evaluierung der Verkehrsbeeinflussung . . . . .	93
5.5.1	Verkehrsflussoptimierung . . . . .	93
5.5.2	Anfahroptimierung . . . . .	96
5.5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	99
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>101</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>103</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>105</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>109</b>
	<b>Index</b>	<b>117</b>
<b>A</b>	<b>Ergänzende Evaluierungen</b>	<b>123</b>
A.1	Verkehrsflusserzeugung . . . . .	123
A.1.1	Bremslichtreichweite . . . . .	124
A.1.2	Vorausschaudistanz . . . . .	126

A.1.3	Slack . . . . .	127
A.1.4	Sicherheitsabstand . . . . .	129
A.1.5	Rechtsüberholen . . . . .	130
A.1.6	Fluktuationswahrscheinlichkeiten . . . . .	130
A.1.7	Dynamik in Abhängigkeit des Schwerlastverkehrs . . . . .	135
A.1.8	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	135
A.2	Nachrichtenübertragung . . . . .	136
A.2.1	Capturing . . . . .	136
A.2.2	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	136
A.3	Informationsweiterleitung . . . . .	137
A.3.1	Sendeverhalten des entwickelten Algorithmus . . . . .	137
A.3.2	Gestörte Übertragungen und Verzögerungen . . . . .	138
A.3.3	Informationsabdeckung . . . . .	142
A.3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	142
A.4	Verkehrsbeeinflussung . . . . .	143
A.4.1	Verkehrsflussoptimierung . . . . .	143
A.4.2	Anfahroptimierung . . . . .	144
A.4.3	Zusammenfassung der Ergebnisse . . . . .	144

# Abkürzungsverzeichnis

## Formelzeichen

$B$	Kanalbandbreite
$B_{E_k}$	Kanalbandbreite des Empfängers $E_k$
$F$	Empfängerrauschzahl
$F$	Penetrationsgrad an ausgerüsteten Fahrzeugen
$F_{E_k}$	Empfängerrauschzahl des Empfängers $E_k$
$G_R$	Gewinn der Empfangsantenne
$G_T$	Gewinn der Sendeantenne
$G_{R,E_k}$	Gewinn der Empfangsantenne des Empfängers $E_k$
$G_{T,S_i}$	Gewinn der Sendeantenne des Senders $S_i$
$J$	Fahrzeugfluss
$J_c$	kritischer Fahrzeugfluss
$L$	Anzahl der Fahrbahnen in einer Fahrtrichtung
$N$	Thermisches Rauschen
$N_{E_k}$	Thermisches Rauschen des Empfängers $E_k$
$P_R$	Empfangsleistung
$P_T$	Sendeleistung
$P_{R,E_k,S_i}$	Empfangsleistung am Empfänger $E_k$ , verursacht durch den Sender $S_i$
$P_{T,S_i}$	Sendeleistung des Senders $S_i$
$R_{\text{comm}}$	Funkreichweite
$SINR$	Signal- zu Rauschabstand
$SINR_{E_k,S_i}$	Signal- zu Rauschabstand am Empfänger $E_k$ , verursacht durch den Sender $S_i$
$T_0$	Standardtemperatur (290 K)
$\Delta_{\text{slack}}^{lv}$	Slack für Fahrzeuge verringerter Maximalgeschwindigkeit (Schwerlastverkehr)
$\Delta_{\text{slack}}$	Slack für normale Fahrzeuge
$\Delta s_{\text{min}}$	minimaler Abstand für eine sichere Bremsung
$\Delta t_{\text{ack}}$	Wartezeit im Status Waiting for Acknowledgement
$\Delta t_{\text{delay}}$	Gesamtreaktionszeit von Mensch und Fahrzeug
$\Delta t_{\text{forward}}$	Wartezeit im Status Waiting to Forward

$\Delta t_{\text{free}}$	Wartezeit im Status Waiting for Free Channel
$\Delta t_{\text{min,wait}}$	minimale Wartezeit
$\Delta t_{\text{obs}}$	Wartezeit im Status Observation
$\Delta t_{\text{max},v}$	Maximale Dauer zwischen Wiederholungen einer Nachricht bei gegebener Geschwindigkeit $v$
$\Delta x_{\text{safety}}^{\text{ch}}$	zusätzlicher Sicherheitsabstand beim Spurwechsel
$\Delta x_{\text{WfA,max}}$	Maximalabstand nachrichtentechnisch aktiver Fahrzeuge im WfA-Zustand
$\Delta x_{\text{eff}}$	effektiver Abstand zwischen zwei Fahrzeugen
$\Delta x_{\text{safety}}$	zusätzlicher Sicherheitsabstand bei der Bestimmung von $\Delta x_{\text{eff}}$
$\Delta x_n$	Anzahl freier Zellen vor Fahrzeug $n$
$\Delta x_n^o$	Anzahl freier Zellen vor Fahrzeug $n$ auf der Nebenspur
$\Delta x_n^{o,b}$	Anzahl freier Zellen hinter Fahrzeug $n$ auf der Nebenspur
$\Delta x_{\text{WfA},n,n\pm 1}$	Abstand zwischen den nachrichtentechnisch aktiven Fahrzeugen $n$ und $n \pm 1$ im WfA-Zustand
$\Delta x_{\text{acc},n}$	Abstand des Fahrzeugs $n$ zum Unfallort
$\overline{PL}$	mittlerer Hauptpfadverlust
$\overline{PL}_0$	mittlerer Pfadverlust des Freifeld-Referenzabstands $d_0$
$\rho$	Fahrzeugdichte
$\rho_c$	kritische Fahrzeugdichte
$a$	Beschleunigung
$c_0$	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (299792458 m/s)
$d$	Vorausschaudistanz
$h$	Bremslichtreichweite
$k_B$	Boltzmannkonstante ( $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)
$l_{\text{veh}}^{\text{lv}}$	Länge von Fahrzeugen verringerter Maximalgeschwindigkeit (Schwerlastverkehr)
$l_{\text{Street}}$	Straßenlänge
$l_{\text{veh}}$	Länge normaler Fahrzeuge
$l_n$	Länge des Fahrzeugs $n$
$p_{\text{veh}}^{\text{lv}}$	Anteil Schwerlastverkehr am Gesamtverkehr
$p_0$	Fluktuationswahrscheinlichkeit stehender Fahrzeuge
$p_b$	Fluktuationswahrscheinlichkeit bremsender Fahrzeuge
$p_d$	Fluktuationswahrscheinlichkeit fahrender Fahrzeuge
$p_e$	Anteil ausgerüsteter Fahrzeuge
$t_{\text{acc}}$	Unfallzeitpunkt
$t_{\text{SU},S_i}$	Sendezeitpunkt einer Anfahrnachricht des Senders $S_i$
$t_{\text{TF},S_i}$	Sendezeitpunkt einer Verkehrsflussnachricht des Senders $S_i$
$v_{\text{max}}^{\text{lv}}$	Maximalgeschwindigkeit des Schwerlastverkehrs
$v_{\text{max}}$	allgemeine Maximalgeschwindigkeit

$v_{otr}$	maximale Geschwindigkeit bis zu der Rechtsüberholen erlaubt ist
$v_n$	Geschwindigkeit des Fahrzeugs $n$
$v_{max,n}$	maximale Geschwindigkeit des Fahrzeugs $n$
$v_{rel,n}$	relative Geschwindigkeit des Fahrzeugs $n$ bezogen auf $v_{max,n}$
$x_{acc}$	Unfallort
$x_{dir,t_{SU},E_k}$	Fahrtrichtung des Empfängers $E_k$ zum Sendezeitpunkt einer Anfahrnachricht
$x_{dir,t_{SU},S_i}$	Fahrtrichtung des Senders $S_i$ zum Sendezeitpunkt einer Anfahrnachricht
$x_{dir,t_{TF},E_k}$	Fahrtrichtung des Empfängers $E_k$ zum Sendezeitpunkt einer Verkehrsflussnachricht
$x_{dir,t_{TF},S_i}$	Fahrtrichtung des Senders $S_i$ zum Sendezeitpunkt einer Verkehrsflussnachricht
$x_{t_{SU},E_k}$	Position des Empfängers $E_k$ zum Sendezeitpunkt einer Anfahrnachricht
$x_{t_{SU},S_i}$	Position des Senders $S_i$ zum Sendezeitpunkt einer Anfahrnachricht
$x_{t_{TF},E_k}$	Position des Empfängers $E_k$ zum Sendezeitpunkt einer Verkehrsflussnachricht
$x_{t_{TF},S_i}$	Position des Senders $S_i$ zum Sendezeitpunkt einer Verkehrsflussnachricht

## A

Ack      Sendung aus WfA-Zustand, Position relativ zum Ereignisort

## D

Dest      gestörte Übertragung, Position relativ zum Ereignisort

## F

Forw      Sendung aus WtF-Zustand, Position relativ zum Ereignisort

## G

GG      Gegenverkehr

GL      Gleichverkehr

## H

HZ      Gefahrenzone (Hazardous Zone)

## L

L      links

## M

MA      mit Anfahrnachrichten

MC      mit Capturing

MV      mit Verkehrsflussnachrichten

### **N**

NZ Neutrale Zone (Neutral Zone)

### **O**

OA ohne Anfahrnachrichten

OC ohne Capturing

OV ohne Verkehrsflussnachrichten

OZ Gegenzone (Opposite Zone)

### **R**

R rechts

Rec Empfang, Position relativ zum Ereignisort

### **S**

Sent Sendung, Position relativ zum Ereignisort

SU Anfahrnachricht (Startup Message)

### **T**

TF Verkehrsflussnachricht (Traffic Flow Message)

TMC Traffic Message Channel

### **W**

Wait Verzögerung durch belegten Kanal, Position relativ zum Ereignisort

WfA Waiting for Acknowledgement

WtF Waiting to Forward

# Kapitel 1

## Einleitung

Ein Fahrzeug zu führen gehört zu den gefährlichsten Tätigkeiten, denen Menschen nahezu täglich nachgehen. Viele Innovationen im Fahrzeugbau der letzten Jahrzehnte dienten daher einer Erhöhung der Sicherheit von Verkehrsteilnehmern. Die entwickelten passiven Sicherheitssysteme können die Insassen eines Fahrzeugs bei einem Unfall mit geringen Geschwindigkeiten wirkungsvoll schützen. Sie sind jedoch nicht in der Lage, potenziell gefährliche Situationen zu erkennen und gegebenenfalls zu verhindern. Zukünftige aktive Sicherheitssysteme werden durch die Nutzung von erweiterten Kommunikationstechniken im Allgemeinen und der Realisierung von Multi-Hop-Techniken in der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation im Besonderen in der Lage sein, eine Erweiterung der Wahrnehmungsreichweite des Fahrers zu ermöglichen und damit eine neue Qualität bezüglich der Sicherheit von Fahrer und Fahrzeug zu erreichen. Die sicherheitsrelevanten Aufgaben profitieren dabei von dem Umstand, dass Fahrzeuge ihre Sensordaten an die Umgebung weitergeben, was eine angemessene und schnelle Reaktion auf mögliche Gefahrensituationen ermöglicht.

Zielgerichtete Informationen über die aktuelle Verkehrssituation versetzen einen Fahrzeugführer schon heute in die Lage, sein Verhalten den Gegebenheiten anzupassen. Mit Hilfe des Traffic Message Channels TMC kann beispielsweise über die Navigationsanlage des Fahrzeugs bei Bedarf ein Gebiet erhöhten Verkehrsaufkommens umfahren werden. Die Ausstrahlung von Verkehrsinformationen über Rundfunksender setzt jedoch eine möglichst genaue und zeitnahe Erfassung der den Meldungen zu Grunde liegenden Verkehrsdaten voraus, um Wirksamkeit entfalten zu können. Ein Problem dieser Vorgehensweise besteht in Analogie zu passiven Sicherheitssystemen in der fehlenden Möglichkeit der Ursachenvermeidung. Staus können beispielsweise erst erfasst und gemeldet werden, wenn sie bereits existieren.

Obwohl in einem Fahrzeug ein natürlicher Bedarf an Information über den umgebenden Verkehr besteht, existiert heute kein System, welches aufbauend auf Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation in einem permanenten Prozess einen Austausch zeitlich

und örtlich relevanter Zustandsdaten zwischen diesen Verkehrsteilnehmern ermöglicht. Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Algorithmen erlauben es, die Lücke zwischen der globalen Sicht zentral erfasster und aufbereiteter Verkehrszustandsdaten und der lokal begrenzten persönlichen Wahrnehmung des Fahrzeugführers zu schließen. Dabei wird die Verteilung der dazu notwendigen Daten ohne das Fluten des zu Grunde liegenden Funknetzes mit Nachrichten in alle möglichen Richtungen realisiert. Es wird keine unterstützend wirkende, fest installierte Infrastruktur angenommen, und insbesondere setzen die entwickelten Algorithmen keine zusätzliche Infrastruktur neben der Straße voraus. Bei der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Vorgehensweise für die Verbreitung von Notfallnachrichten wird beispielsweise ausgehend von der initialen Übertragung die Information dergestalt von den Fahrzeugen wiederholt, dass sich eine möglichst homogene Abdeckung des – bezogen auf die Information – relevanten Gebiets zu jedem Zeitpunkt ergibt.

Wird die Verkehrsentwicklung der letzten Jahrzehnte betrachtet, so kann eine signifikante Steigerung der durchschnittlichen täglichen Verkehrsbelastung festgestellt werden. Für die Zukunft zeichnet sich ab, dass allein mittels weiteren Ausbaus der Verkehrsinfrastruktur den wachsenden Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Straßensystems nicht mehr begegnet werden kann. Ist durch die Aufgabe, sicherheitsrelevante Informationen weiterleiten zu können, bereits die nötige Ausrüstung für Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation vorhanden, so kann diese zusätzlich zur Optimierung des Fahrzeugflusses verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher ebenfalls Algorithmen vorgestellt, mit deren Hilfe über die Verbreitung lokal relevanter Informationen verkehrsstabilisierender Einfluss ausgeübt wird.

### 1.1 Motivation für diese Arbeit

Um die Entwicklung eines Systems zur Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation zu unterstützen, wurde im Jahr 2000 das Projekt „FleetNet – Internet on the Road“ als Konsortium zwischen den Industrieunternehmen DaimlerChrysler AG, Fraunhofer Institut für offene Kommunikationssysteme (FOKUS), NEC Europe Ltd., Robert Bosch GmbH, Siemens AG, TEMIC Speech Dialog Systems GmbH und den Universitäten von Hannover und Mannheim, sowie den Technischen Universitäten von Hamburg-Harburg und Braunschweig ins Leben gerufen. Das Projekt wurde gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung. Es endete im Dezember 2003.

Eine Schlüsselanforderung an FleetNet bestand darin, das System zu befähigen, in den Fahrzeugen generierte Daten zwischen diesen verteilen zu können. Als Vertreterin der Universität Hannover beteiligte sich das damalige Institut für Allgemeine Nachrichtentechnik (heute Institut für Kommunikationstechnik) aktiv an dieser Her-

ausforderung. Insbesondere wurde die Aufgabe der Weiterleitung und Verbreitung sicherheitsrelevanter Nachrichten in dem zu entwickelnden System vom Autor dieser Arbeit wahrgenommen. Aufbauend auf den in FleetNet gewonnenen Erkenntnissen werden die vom Autor in diesem Projekt formulierten Ideen und Ansätze in der vorliegenden Dissertation konsequent weiterentwickelt und ausgebaut.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Die realitätsnahe Bewegung von Fahrzeugen ist die Grundlage der in dieser Arbeit vorgenommenen Untersuchungen über die Möglichkeiten der Kommunikation zwischen diesen Fahrzeugen. In Kapitel 2 wird beschrieben, welches Modell für die Erzeugung von Fahrzeugbewegung im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung kommt, und es wird das daraus entwickelte Regelwerk für die Simulation von mehrspurigem Straßenverkehr vorgestellt.

Bei der Nachbildung von Funksystemen zur Übertragung digitaler Daten werden in Abhängigkeit des benötigten Detaillierungsgrads ebenfalls verschiedene Modelle verwendet. In diese Modelle können Eigenschaften der zu Grunde gelegten Sende- und Empfangssysteme, sowie eine weitere große Zahl an Parametern einfließen. Auf der anderen Seite können für bestimmte Problemstellungen auch einfache Entscheider ausreichen, die lediglich die Entfernung zwischen einem Sender und einem Empfänger berücksichtigen. In Kapitel 3 wird beschrieben, welches Modell für die Übertragung von Nachrichten im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird.

Ziel des Kapitels 4 ist die Entwicklung einer Strategie, mit der Informationen mit möglichst geringen Bandbreitenanforderungen in einem Funknetz ohne feste Infrastruktur verteilt werden können. Der Fokus liegt auf für den Fahrzeugverkehr sicherheitsrelevanten Nachrichten wie beispielsweise Mitteilungen über plötzliche und starke Bremsvorgänge oder Unfälle. Es werden Konzepte entwickelt, mit deren Hilfe der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Algorithmus zur Informationsweiterleitung Wirksamkeit entfalten kann.

Ein weiterer Beitrag für mehr Sicherheit im Fahrzeugverkehr ist der Erhalt des fließenden Verkehrs. In Kapitel 5 werden daher Konzepte vorgestellt, die mit Hilfe der Verbreitung verkehrsrelevanter Daten durch Kommunikation von Fahrzeugen untereinander verkehrsflussoptimierende Maßnahmen unterstützen.

Der Zusammenfassung dieser Arbeit und ihrer Ergebnisse dient Kapitel 6.

Im Anhang finden sich weitere Details zu den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Evaluierungen.



# Kapitel 2

## Verkehrsflusserzeugung

Grundlage der in dieser Arbeit vorgenommenen Untersuchungen über die Möglichkeiten der Kommunikation zwischen Fahrzeugen ist die Nachbildung des Fahrzeugverkehrs. Im Folgenden soll daher beschrieben werden, welches Modell für die Erzeugung von Verkehr im Rahmen dieser Arbeit zur Anwendung kommt. Dazu wird zunächst auf die Eigenschaften der Klassen existierender Modelle eingegangen. In den folgenden Abschnitten wird das Grundmodell eines Zellularen Automaten vorgestellt und mögliche Verbesserungen zur Erzielung einer größeren Übereinstimmung zwischen empirisch bestimmtem und simuliertem Verhalten behandelt. Sowohl der Zellulare Automat als auch seine Erweiterungen besitzen im Kontext dieser Arbeit überragende Bedeutung, da sie die Basis aller Untersuchungen sind. Am Schluss des Kapitels wird das daraus entwickelte Regelwerk für die Simulation von Straßenverkehr vorgestellt und evaluiert.

### 2.1 Klassifizierung von Verkehrsmodellen

Eine Klassifizierung von Verkehrsmodellen ist auf vielfältige Weise möglich. Übliche Einteilungen beziehen sich auf die Auflösung, auf den Detailierungsgrad, auf die Dynamik oder auf die Art der verwendeten Variablen [1, 2].

Bezüglich der Auflösung wird zwischen mikroskopischen, makroskopischen und mesoskopischen Modellen unterschieden. In mikroskopischen Modellen sind die einzelnen Fahrzeuge unterscheidbar, während in makroskopischen Modellen versucht wird, globale Werte wie Fahrzeugdichte, -verteilung oder -geschwindigkeit nachzubilden. Mesoskopische Modelle sind eine Mischung aus beiden Varianten. Modelle wie das Cell-Transmission-Modell [3], die Erweiterung des Kühne-Kerner-Konhäuser-Modells aus [4], hydrodynamische und gas-kinetische Ansätze wie in [5, 6, 7] gehören beispielsweise zur makroskopischen Modellklasse. Gas-kinetische Modelle können

auch zur mesoskopischen Modellklasse gezählt werden. Einzelne Fahrzeuge werden nicht unterschieden, ihr Verhalten wird aber in Form von Wahrscheinlichkeiten berücksichtigt. In die Klasse der mikroskopischen Modelle gehören die unter anderem in [8, 9] behandelten Fahrzeugfolgemodelle und die Zellularautomaten-Modelle [10, 11, 12, 13, 14].

Eine Klassifizierung mikroskopischer Modelle ist weiterhin über den Detaillierungsgrad möglich. Mit „High Fidelity“-Modellen wird versucht, das Verhalten der Grundelemente des zu simulierenden Systems realistisch nachzubilden. Im Fall einer Verkehrssimulation wäre dies beispielsweise das Verhalten von Fahrzeugführern. Um den hohen Rechenaufwand dieser Modelle zu reduzieren begnügen sich „Low Fidelity“-Modelle im Gegensatz dazu mittels einfacher Regeln und einem hohen Abstraktionsgrad mit der Nachbildung interessierender Systemgrößen wie dem Fundamentaldiagramm oder der mittleren Geschwindigkeit im System [15].

Modelle mit stochastischen Eigenschaften enthalten im Gegensatz zu deterministischen Modellen auch Elemente, deren jeweiliges Verhalten für einen bestimmten Zeitpunkt nicht vollständig vorhersagbar ist. In allen Modellklassen sind Varianten möglich, die kontinuierlich oder diskret in Raum und Zeit sind. Eine Mischung ist ebenfalls möglich. Ein Beispiel für ein stochastisches Modell mit kontinuierlichem Raum wird in [16, 17] vorgestellt und analysiert.

## 2.2 Zellulare Automaten

Zellulare Automaten sind diskrete Modelle. Sie bestehen aus einer unbegrenzten, regulären Anordnung von Zellen, von denen sich jede in genau einem definierten Zustand befindet, wobei die Anzahl möglicher Zustände begrenzt ist. Die Anordnung der Zellen kann dabei mehrdimensional sein. Ebenfalls diskret in Zellularen Automaten ist die Zeit, wobei der Zustand einer Zelle zum Zeitpunkt  $t + 1$  eine Funktion der Zustände einer begrenzten Anzahl von Zellen zum Zeitpunkt  $t$  ist. Wie im Folgenden gezeigt wird, können mittels Zellularer Automaten alle wesentlichen Eigenschaften realen Fahrzeugverkehrs, mit Ausnahme des Beschleunigungsverhaltens, auf mikroskopischer Ebene nachgebildet werden.

## 2.3 Einspurverkehr

Zur Beschreibung des Zustandes einer Straße mit Hilfe eines Zellularen Automaten wird diese in Zellen der Länge 7,5 m unterteilt. Dies entspricht dem ungefähren Platzbedarf eines Fahrzeugs in dichtem Stau. Jede Zelle kann leer oder durch genau ein Auto besetzt sein. Die Fahrzeuge werden durch ihre momentane Geschwindig-

keit  $v$  charakterisiert, die die Werte  $v = 0, 1, 2, \dots, v_{\max}$  annehmen kann.  $v_{\max}$  entspricht dabei beispielsweise einer Geschwindigkeitsbeschränkung und ist deshalb im einfachsten Fall für alle Fahrzeuge gleich. Eine typische Konfiguration zeigt Abbildung 2.1. Ein Fahrzeug bewegt sich dabei von einer Zelle zu einer anderen, indem es einen Satz von Regeln anwendet, der im Folgenden erläutert wird.

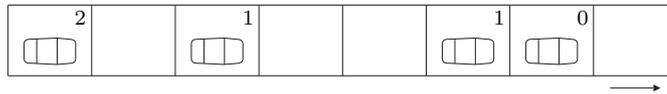


Abbildung 2.1: Konfiguration zur Zeit  $t$

Der Zustand einer Straße zum Zeitpunkt  $t + 1$  kann aus dem Zustand zum Zeitpunkt  $t$  nach dem Zellularautomatenmodell von Nagel und Schreckenberg aus [10] (NaSch-Modell) bestimmt werden, indem die folgenden Schritte auf alle Fahrzeuge gleichzeitig angewendet werden:

### Schritt 1

Beschleunigung

Wenn die Geschwindigkeit  $v_n$  des Fahrzeugs  $n$  geringer ist als die Maximalgeschwindigkeit  $v_{\max}$ , erhöhe die Geschwindigkeit des Fahrzeugs um eine Zelle pro Zeitschritt:

$$v_n(t + 1) := \min\{v_n(t) + 1, v_{\max}\}. \quad \square$$

### Schritt 2

Bremsen

Wenn die Geschwindigkeit  $v_n$  des Fahrzeugs  $n$  größer ist als die Anzahl freier Zellen  $\Delta x_n$  vor dem Fahrzeug, setze die Geschwindigkeit des Fahrzeugs gleich der Anzahl freier Zellen:

$$v_n(t + 1) := \min\{v_n(t + 1), \Delta x_n(t)\}. \quad \square$$

### Schritt 3

Fluktuation

Wenn die Geschwindigkeit  $v_n$  des Fahrzeugs  $n$  größer ist als Null, verringere die Geschwindigkeit des Fahrzeugs um eine Zelle pro Zeitschritt mit der Wahrscheinlichkeit  $p$ :

$$\text{Wenn } \text{rand}() < p, \text{ dann } v_n(t + 1) := \max\{v_n(t + 1) - 1, 0\}. \quad \square$$

**Schritt 4**

Fahren

Bewege Fahrzeug  $n$  um die Anzahl Zellen vorwärts, die durch seine Geschwindigkeit  $v_n$  vorgegeben ist:

$$x_n(t + 1) := x_n(t) + v_n(t + 1). \quad \square$$



Abbildung 2.2: Beschleunigung

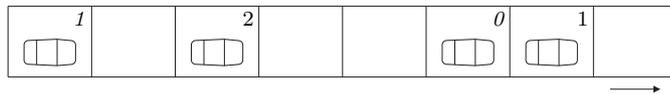


Abbildung 2.3: Bremsen

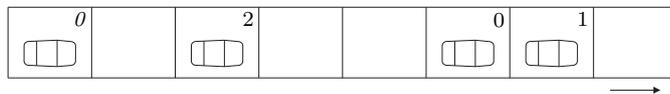


Abbildung 2.4: Fluktuation

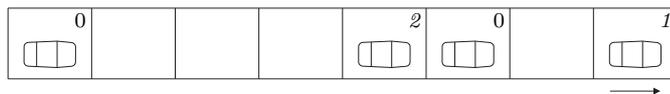


Abbildung 2.5: Fahren = Konfiguration zur Zeit  $t + 1$

Die Abbildungen 2.1 bis 2.5 verdeutlichen die Anwendung dieses minimalistischen Regelsatzes an Hand eines Beispiels. Der obige Regelsatz ist minimal in dem Sinn, dass bei Auslassen einer der Regeln kein realistisches Verhalten mehr möglich ist. Mit realistischem Verhalten ist hier das Auftreten spontaner Staus und die richtige Form des sogenannten Fundamentaldiagramms, das heißt des Zusammenhangs zwischen Dichte und Fahrzeugstrom, gemeint. Bei geringer Dichte ist der Strom proportional zu dieser, da die Autos fast nicht miteinander interagieren und somit bis auf geringfügige Geschwindigkeitsänderungen durch den Fluktuationsschritt mit

ihrer Maximalgeschwindigkeit  $v_{\max}$  fahren. Bei höherer Dichte wird die Interaktion wichtiger und es lassen sich Abweichungen vom linearen Verhalten beobachten. Schließlich dominiert die Interaktion zwischen den Fahrzeugen und der Strom nimmt mit steigender Dichte wieder ab.

Nagel und Schreckenberg haben für Einspurverkehr eine gute Übereinstimmung ihrer Simulationen mit realistischem Verkehrsverhalten gefunden. Für den Fall  $v_{\max} = 1$  lässt sich ihr Modell sogar vollständig analytisch bestimmen [11, 15, 18]. Für  $v_{\max} > 1$  führt dieser analytische Ansatz zu einer guten Beschreibung des beobachteten Verkehrsverhaltens [12].

Die Regeln des Modells erzeugen unfallfreies Fahren unabhängig von der Verkehrsausgangslage. Dies ist in der Praxis so nicht haltbar, da hier sehr wohl Bedingungen existieren, die zu Unfällen führen. Als ein Vorteil kann es aber gesehen werden, dass das Modell bereits nach kurzer Zeit zu Verkehrsmustern führt, in denen das Nichtauftreten von Unfällen wahrscheinlich ist und somit keine unrealistischen Bedingungen mehr vorliegen. Dabei ist das vorgestellte Modell in der Lage, grundlegende Beobachtungen realen Straßenverkehrs wie spontane Staubildung mit nur wenigen Regeln nachzubilden. Das Modell ist dabei minimal in dem Sinn, dass eine Vereinfachung der Regeln zu unrealistischem Verkehrsverhalten führt. Um eine feinere Modellierung des Fahrzeugverkehrs oder komplexere Situationen wie Mehrspurverkehr zu ermöglichen, muss das Modell jedoch erweitert werden.

## 2.4 Metastabile Hochflusszustände

Das ursprüngliche NaSch-Modell wird nicht dazu verwendet Fahrzeugverkehr auf mikroskopischer Ebene genau zu beschreiben. Für einen möglichst einfachen Aufbau des verwendeten Regelsatzes werden makroskopische Eigenschaften des Verkehrs durch lediglich einen Parameter beschrieben, die Fluktuationswahrscheinlichkeit  $p$ .

Empirische Untersuchungen zeigen, dass ab einer bestimmten Fahrzeugdichte metastabile Hochflusszustände mit Hystereseeffekt auftreten können [19, 20]. Als metastabile Zustände werden Zustände bezeichnet, in denen der Fahrzeugfluss  $J$  keine eindeutige Funktion der Fahrzeugdichte  $\rho$  ist. Wie Abbildung 2.6 zeigt, trifft dies für den Bereich  $\rho_1 \leq \rho \leq \rho_2$  in der Nähe des Flussmaximums zu. Fahrzeugflüsse mit  $J > J(\rho_1)$  sind somit nicht mehr stabil, sondern metastabil. Sie können bei hinreichend großem Störeinfluss sprunghaft in einen Zustand gestauten Verkehrs übergehen, mit entsprechend geringerem Fahrzeugfluss.

Die Existenz metastabiler Zustände geht mit einer Hysterese einher. Ergibt der Fahrzeugfluss und die Fahrzeugdichte zu einer bestimmten Zeit beispielsweise einen Punkt auf dem Hochflussast, so kann der Fluss bei Erhöhung der Dichte im ungestörten Fall weiter steigen. Fällt der Punkt für Fluss und Dichte jedoch auf Grund

einer Störung auf den gestauten Ast des Fundamentaldiagramms ( $\rho_1 < \rho \leq \rho_{\max}$ ), so erreicht der Fahrzeugfluss bei anschließender Verringerung der Fahrzeugdichte auf den Ausgangswert der Betrachtung nicht mehr seinen ursprünglichen Wert. Vielmehr ist der Fluss jetzt deutlich geringer.

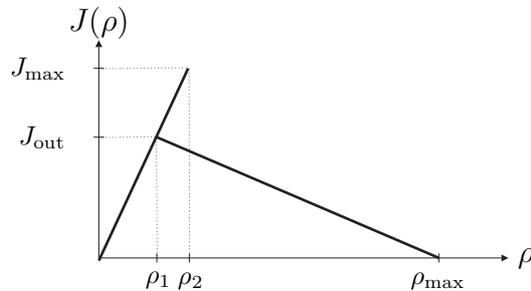


Abbildung 2.6: Schematisches Fundamentaldiagramm mit Hochflusszuständen

Der Fluss am Schnittpunkt der beiden Äste des Fundamentaldiagramms entspricht dem Ausfluss  $J_{\text{out}}$  aus einem großen Stau. Charakteristisches Merkmal für die Existenz von metastabilen Zuständen in einem Verkehrssystem ist somit, dass der Stauausfluss geringer ist als der maximale Fahrzeugfluss  $J_{\text{max}}$ . Empirische Studien zeigen, dass für beobachteten Verkehr das Verhältnis  $J_{\text{out}}/J_{\text{max}} \approx 2/3$  beträgt [21, 22, 19].

### 2.4.1 Modell nach Barlovic u.a.

Obwohl das NaSch-Modell bereits Tendenzen zur Bildung metastabiler Zustände zeigt, sind diese dennoch nicht sehr ausgeprägt [23]. Barlovic u.a. versetzen das NaSch-Modell durch Erweiterung seines Regelsatzes in die Lage, metastabile Zustände mit Hysterese zu erzeugen [24]. Dabei wird den Schritten 1 bis 4 des NaSch-Modells ein Schritt 0 vorangestellt, der eine geschwindigkeitsabhängige Fluktuation des Schrittes 3 bewirkt (Velocity-dependent Randomization – VDR).

#### Schritt 0

Geschwindigkeitsabhängige Fluktuation

$$p(v) = \begin{cases} p_0 & \text{für } v = 0 \\ p & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{mit } p_0 > p$$

□

Als mögliche Werte für die freien Parameter ihres Modells geben die Autoren  $v_{\max} = 5$ ,  $p = 1/64$  sowie  $p_0 = 3/4$  an.

### 2.4.2 Vergleich NaSch-Modell und VDR-Modell

Bei einem Vergleich der Fundamentaldiagramme des ursprünglichen NaSch-Modells und seiner VDR-Erweiterung lässt sich feststellen, dass für eine sehr geringe Fahrzeugdichte  $0 < \rho \ll 1$  mit  $\rho \in [0, 1]$  der zugehörige Fahrzeugfluss  $J$  durch  $J(\rho) \approx \rho(v_{\max} - p)$  beschrieben werden kann. Das heißt, der Fluss entspricht dem des NaSch-Modells mit der Fluktuationswahrscheinlichkeit  $p$ . Der Grund liegt darin, dass bei genügend geringer Dichte kaum Interaktionen zwischen den Fahrzeugen stattfinden können und daher das verzögerte Anfahren aus dem Stand noch keine Bedeutung hat. Für eine Fahrzeugdichte  $0 \ll \rho < 1$  ist der Fluss durch  $J(\rho) \approx (1 - p_0)(1 - p)$  gegeben. Gilt  $p \ll p_0$ , dann korrespondiert dieser Zustand mit dem des NaSch-Modells bei einer Fluktuationswahrscheinlichkeit von  $p_0$ . Bei einer Dichte von  $\rho \approx 1$  schließlich existieren nur noch Fahrzeuge mit  $v = 0$  oder  $v = 1$ . Die Zahl sich bewegendender Fahrzeuge geht gegen Null, so dass das gesamte Modell asymptotisch durch  $p_0$  bestimmt wird.

Wie Barlovic u.a. in ihrer Arbeit feststellen, ist das Auftreten von metastabilen Hochflusszuständen und Hysterese eng mit einem verminderten Fahrzeugfluss aus einem Stauausgang verbunden ( $J_{\text{out}} < J_{\text{max}}$ ) [24]. Ist der Ausfluss aus einem Stau maximal, löst sich jeder kleine Stau im Freiflussbereich sehr schnell wieder auf, da der Fluss höher ist als im Rest des Systems. Ist der Fahrzeugfluss wie oben beschrieben hingegen reduziert, ist die Fahrzeugdichte im Freiflussbereich geringer als die Dichte bei maximalem Fluss. Die Fahrzeuge interagieren kaum noch miteinander, so dass es zu keiner spontanen Staubildung mehr kommt. Obwohl das ursprüngliche NaSch-Modell bereits die Tendenz zur Bildung metastabiler Zustände aufweist, sind diese doch nur sehr gering ausgeprägt. Für den allgemeinen Fall mit einer Fluktuationswahrscheinlichkeit  $p > 0$  gilt für den Fahrzeugfluss aus einem Stau wie im VDR-Modell  $J_{\text{out}} < J_{\text{max}}$ , wobei jedoch  $J_{\text{out}}$  nur geringfügig kleiner als  $J_{\text{max}}$  ist [14]. Die einfache Erweiterung des NaSch-Modells auf das VDR-Modell ist somit ausreichend um das Verhalten des Modells grundlegend zu verändern. Statt vieler kleiner Staus lässt sich nun im gestauten Bereich ein phasenseparierter Zustand feststellen.

### 2.4.3 Alternativen zum VDR-Modell

Neben dem VDR-Modell wurden weitere Modifizierungen des NaSch-Modells vorgeschlagen. Im T<sup>2</sup>-Modell von Takayasu u.a. [25] hängt die Wahrscheinlichkeit für einen Verzögerungsschritt stehender Fahrzeuge von der Anzahl freier Zellen vor ihnen ab (raumbasierte Regel). Im BJH-Modell von Benjamin u.a. [26] erhöhen Fahrzeuge im folgenden Zeitschritt ihre Fluktuationswahrscheinlichkeit, wenn sie auf Grund ihres Vordermanns abbremsten mussten (zeitbasierte Regel). Diese Modelle wurden entwickelt, um das Anfahrverhalten gestoppter Fahrzeuge realistischer modellieren

zu können, nicht um metastabile Zustände zu erzeugen. Das Verhalten der Modelle ähnelt jedoch dem des VDR-Modells [15].

## 2.5 Synchronisierter Verkehr

Das NaSch-Modell und das VDR-Modell sind in der Lage Staudynamiken und unfallfreies Fahren zu beschreiben. Sie berücksichtigen jedoch nicht das Bestreben von Fahrzeugführern, die Fortbewegung möglichst komfortabel zu gestalten. Dies führt in beiden Modellen dazu, dass Fahrzeuge beispielsweise abrupt bremsen, wenn sie auf andere Fahrzeuge auffahren. In der Realität hingegen ist eine vorausschauende Fahrweise zu beobachten, bei der die Geschwindigkeit rechtzeitig und gleichmäßig den jeweiligen Umständen angepasst wird. Insbesondere werden Fahrer immer versuchen starke Bremsmanöver zu vermeiden, da dies den Fahrkomfort ganz wesentlich beeinträchtigt. Derartiges Verhalten kann für die Entstehung des in der Realität beobachtbaren synchronisierten Verkehrs von Bedeutung sein [15]. Generell kann davon ausgegangen werden, dass vorausschauendes Fahren zu weniger Staubildung führen wird, da abrupte und sich ab einer bestimmten Fahrzeugdichte fortpflanzende Bremsmanöver reduziert werden.

### 2.5.1 Nachzubildende Eigenschaften

Synchronisierter Verkehr besitzt eine Reihe von Eigenschaften, die durch ein entsprechendes Modell nachgebildet werden müssen. Dazu gehört, dass trotz einer im Vergleich zum Freifluss geringeren Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeugfluss dennoch sehr groß werden kann. Weiterhin können die Punkte für Fluss und Dichte, wie im Fundamentaldiagramm in Abbildung 2.6 dargestellt, im Bereich  $\rho \geq \rho_1$  einen zweidimensionalen Bereich abdecken. Das heißt, dass im Gegensatz zu dem Verhalten im Freifluss oder auf dem gestauten Ast eine Erhöhung oder Verringerung der Dichte jeweils sowohl zu einem niedrigeren als auch zu einem höheren Fluss führen kann.

Bei mehr als einer Spur je Richtung sind die Geschwindigkeiten der Fahrzeuge stark korreliert (synchronisiert). Aus dieser Eigenschaft resultiert die Bezeichnung für den synchronisierten Verkehr.

### 2.5.2 Antizipation von Geschwindigkeit und Bremsverhalten

Notwendig für vorausschauendes Fahren sind die Antizipation von Geschwindigkeit und Bremsverhalten des vorausfahrenden Fahrzeugs  $n + 1$  zum Zeitpunkt  $t + 1$ . Im

NaSch-Modell ist eine einfache Abschätzung der zukünftigen Geschwindigkeit des Vordermanns durch

$$v_{\text{anti},n+1}(t+1) = \min\{v_{n+1}(t), \Delta x_{n+1}(t)\} \quad (2.1)$$

gegeben, da das Fahrzeug im Freiflussbereich mindestens seine augenblickliche Geschwindigkeit beibehalten, oder ab einer bestimmten Annäherung an ein vorausfahrendes Fahrzeug ( $\Delta x_{n+1} < v_{n+1}$ ) auf die Anzahl freier Zellen vor sich reduzieren wird. Mit einer Fluktuationswahrscheinlichkeit  $p \ll 1$  liefert  $v_{\text{anti},n+1}(t+1)$  im Allgemeinen einen zu niedrigen Wert für die im nächsten Zeitschritt tatsächlich gefahrene Geschwindigkeit. In seltenen Fällen und nur bei Interaktion mit dem vorausfahrenden Fahrzeug kann die antizipierte Geschwindigkeit zu hoch sein. Um weiterhin unfallfreies Fahren zu garantieren ist somit die Einführung eines zusätzlichen Sicherheitsabstands  $\Delta x_{\text{safety}} \geq 1$  notwendig.

Eine Abschätzung des Bremsverhaltens ist durch eine das Bremslicht des vorausfahrenden Fahrzeugs  $n+1$  beschreibende Variable  $b_{n+1}$  möglich:

$$b_{n+1} = \begin{cases} 0 & \text{wenn Bremslicht aus} \\ 1 & \text{wenn Bremslicht an} \end{cases}$$

### 2.5.3 Bremslichtmodell nach Knospe u.a.

In Abhängigkeit des Abstands zum Vordermann sind nach Knospe u.a. folgende Möglichkeiten des Fahrverhaltens gegeben [27]:

#### Szenario 1

Bei großem Abstand zum Vordermann wird mit der maximalen Geschwindigkeit des Fahrzeugs gefahren, lediglich reduziert durch die Fluktuationswahrscheinlichkeit:

$$v_n = f(v_{\text{max}}, p) \quad \square$$

#### Szenario 2

Bei mittlerem Abstand reagieren die Fahrer auf Geschwindigkeitsänderungen ihres Vordermanns:

$$v_n = f(b_{n+1}) \quad \square$$

**Szenario 3**

Bei geringem Abstand wird das Fahren von dem Wunsch nach Unfallvermeidung dominiert:

$$v_n = f(\Delta x_n) \quad \square$$

**Szenario 4**

Das Beschleunigungsvermögen stehender Fahrzeuge oder von Fahrzeugen die bremsen mussten wird herabgesetzt.  $\square$

Mit den zusätzlichen Größen  $t_h$ ,  $t_s$ ,  $h$  und  $\Delta x_{\text{eff}}$  erweitern die Autoren die Regeln des NaSch-Modells auf die Regeln ihres Bremslichtmodells. Dabei definieren sie folgende Beziehungen:

$$t_h = \frac{\Delta x_n(t)}{v_n(t)} \quad \text{und} \quad t_s = \min\{v_n(t), h\} \quad , \quad (2.2)$$

sowie mit  $\Delta x_{\text{safety}} \geq 1$  und Gleichung 2.1:

$$\Delta x_{\text{eff},n}(t) = \Delta x_n(t) + \max\{v_{\text{anti},n+1}(t+1) - \Delta x_{\text{safety}}, 0\} \quad . \quad (2.3)$$

Um bei konstanter Geschwindigkeit die augenblickliche Position des Vordermanns zu erreichen, wird die Zeit  $t_h$  benötigt.  $t_h$  steht somit für den zeitlichen Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug.  $t_s$  symbolisiert den geschwindigkeitsabhängigen zeitlichen Interaktionsbereich, das heißt den Bereich, in dem der Vordermann das Verhalten des folgenden Fahrzeugs mitbestimmt. Der Parameter  $h$  definiert die Reichweite der Bremslichter und dient gleichzeitig als begrenzendes Element für  $t_s$ . Dadurch wird verhindert, dass Fahrzeuge auf die Bremslichter weit entfernter Fahrzeuge reagieren. In [27, Seite L479] zitierte Abschätzungen durch empirische Studien haben für  $h$  Werte zwischen 6s und 11s ergeben.  $\Delta x_{\text{eff}}$  ist der effektive Abstand zum Vordermann, bei dem sowohl dessen geschätzte Geschwindigkeit als auch ein Sicherheitsabstand zur Vermeidung von Unfällen mit eingehen.

Knospe u.a. geben nun die Regeln ihres erweiterten NaSch-Modells in ihrer Arbeit wie folgt an [27]:

**Schritt 0**

Geschwindigkeitsabhängige Fluktuation und Bremslicht

Leuchtet das Bremslicht  $b_{n+1}$  des vorausfahrenden Fahrzeugs  $n+1$ , wird die Fluktuationswahrscheinlichkeit zu  $p_b$  gesetzt. Für stehende Fahrzeuge gilt  $p_0$ , in allen anderen Fällen  $p_d$ . Zudem wird das eigene Bremslicht

für den Zeitschritt  $t + 1$  ausgeschaltet:

$$p(v_n, b_{n+1}) := \begin{cases} p_b & \text{wenn } b_{n+1} = 1 \text{ und } t_h < t_s \\ p_0 & \text{wenn } v_n = 0 \\ p_d & \text{sonst} \end{cases}$$

Setze  $b_n(t + 1) := 0$ . □

### Schritt 1

Beschleunigung

Wenn das eigene Bremslicht und das Bremslicht des Vordermanns nicht aktiv sind ( $b_n(t) = b_{n+1}(t) = 0$ ) oder  $t_h \geq t_s$  ist, dann gilt die Beschleunigungsregel des NaSch-Modells: Ist die Geschwindigkeit  $v_n(t)$  des Fahrzeugs  $n$  geringer als die Maximalgeschwindigkeit  $v_{\max}$ , erhöhe die Geschwindigkeit des Fahrzeugs um eine Zelle pro Zeitschritt:

$$v_n(t + 1) := \min\{v_n(t) + 1, v_{\max}\}. \quad \square$$

### Schritt 2

Bremsen

Wenn die Geschwindigkeit  $v_n(t + 1)$  des Fahrzeugs  $n$  größer ist als die Anzahl effektiv freier Zellen  $\Delta x_{\text{eff},n}(t)$  vor dem Fahrzeug, setze die Geschwindigkeit des Fahrzeugs gleich der Anzahl effektiv freier Zellen:

$$v_n(t + 1) := \min\{v_n(t + 1), \Delta x_{\text{eff},n}(t)\}.$$

Gilt zusätzlich  $v_n(t + 1) < v_n(t)$ , dann setze  $b_n(t + 1) := 1$ . □

### Schritt 3

Fluktuation

Wenn die Geschwindigkeit  $v_n(t + 1)$  des Fahrzeugs  $n$  größer ist als Null, verringere die Geschwindigkeit des Fahrzeugs um eine Zelle pro Zeitschritt mit der Wahrscheinlichkeit  $p$ :

Wenn  $\text{rand}() < p$ , dann  $v_n(t + 1) := \max\{v_n(t + 1) - 1, 0\}$ .

Gilt zusätzlich  $p = p_b$ , dann setze  $b_n(t + 1) := 1$ . □

### Schritt 4

Fahren

Bewege Fahrzeug  $n$  um die Anzahl Zellen vorwärts, die durch seine Geschwindigkeit  $v_n(t + 1)$  gegeben ist:

$$x_n(t + 1) := x_n(t) + v_n(t + 1). \quad \square$$

Im Schritt 0 wird die Fluktuationswahrscheinlichkeit  $p$  berechnet. Dabei gilt für stehende Fahrzeuge  $p = p_0$ , wodurch  $p_0$  zum bestimmenden Parameter für die Bewegung eines Staus entgegen der Fahrtrichtung wird. Sind die Bremslichter eines vorausfahrenden Fahrzeugs  $n + 1$  gesetzt, und sind beide Fahrzeuge in der Lage zu interagieren ( $t_h < t_s$ ), so wird  $p$  zu  $p_b$  gesetzt. In allen anderen Fällen gilt  $p = p_d$ . Im Schritt 1 erfolgt wie im NaSch-Modell die Beschleunigung des Fahrzeugs, ausgenommen die eigenen oder die Bremslichter des vorausfahrenden und sich im Interaktionsbereich befindlichen Fahrzeugs sind gesetzt. Im Schritt 2 erfolgt die Anpassung der Geschwindigkeit an den effektiven Abstand zum Vordermann, während im Schritt 3 die fluktuationsabhängige Geschwindigkeitsreduzierung durchgeführt wird. Erfolgt die Abbremsung durch das Bremslicht des Vordermanns, wird das eigene Bremslicht ebenfalls gesetzt. Im Schritt 4 schließlich fahren die Fahrzeuge.

Zusammenfassend bestimmen die Schritte 1 bis 3 die Geschwindigkeit eines Fahrzeuges, während im Schritt 0 die dynamischen Parameter des Modells bestimmt werden. Positionsänderungen werden im Schritt 4 durchgeführt.

Als geeignete Parameterwerte geben die Autoren  $v_{\max} = 20$ ,  $h = 6$ ,  $\Delta x_{\text{safety}} = 7$ ,  $p_b = 0,94$ ,  $p_0 = 0,5$  sowie  $p_d = 0,1$  an. Das Bremslichtmodell ist in der Lage, Staus mit Freifluss und synchronisiertem Verkehr zu modellieren. Es reproduziert das Tunneln eines Staus durch einen synchronisierten Bereich, bei dem der Stau den Bereich synchronisierten Verkehrs ungestört durchwandern kann.

## 2.6 Mehrspurverkehr

Über die Modellierung von Mehrspurverkehr ist weit weniger bekannt als über die Modellierung von Einspurverkehr. Warteschlangenmodelle sind beispielsweise ihrer Natur entsprechend nicht „mehrspurig“. Mehrspurverhalten – und damit die Möglichkeit zu überholen – muss durch Vertauschen der Fahrzeugreihenfolge in der Warteschlange emuliert werden. Fahrzeugfolgemodelle vernachlässigen das Überholen langsamer Fahrzeuge auf mehrspurigen Straßen ebenfalls [15]. Ein weiteres vom verwendeten Modell unabhängiges Problem besteht in der Nachbildung des menschlichen Fahrverhaltens, das durch die Erweiterung auf Mehrspurverkehr weitere Freiheitsgrade erhält.

### 2.6.1 Modell nach Rickert u.a.

Rickert u.a. erweitern das ursprüngliche NaSch-Modell um vier Regeln, mit denen das Überholen auf mehrspurigen Straßen ermöglicht wird [28]. Regel 4 des in Abschnitt 2.3 beschriebenen Modells wird dabei in zwei Teile aufgespalten. Im ersten Teilschritt entscheidet jedes Fahrzeug, ob es die Spur wechseln will. Dabei bewegen

sich die Fahrzeuge im Fall einer positiven Entscheidung ausschließlich seitwärts. Im zweiten Teilschritt wird dann gemäß der Regel 4 des NaSch-Modells für die Fahrzeuge der einzelnen Spuren die Vorwärtsbewegung ausgeführt. Erst beide Teilschritte zusammen ergeben somit ein physikalisch realistisches Fahrverhalten.

Wie beim Einspurverkehr ist es auch beim Mehrspurverkehr notwendig, stochastisches Verhalten beim Spurwechsel zu erzeugen. Im Fall rein deterministischen Verhaltens kann es zu unrealistischen Effekten kommen, beispielsweise dem gleichzeitigen wiederholten Wechseln eines ganzen Verbands von Fahrzeugen von einer Spur zur anderen und wieder zurück. Dieses koordinierte Wechseln kann nur durch die Auflösung des Verbands oder durch das Überholtwerden von anderen, nicht zum Verband gehörenden Fahrzeugen unterbrochen werden.

Mit  $\Delta x_n$  als Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug = Anzahl freier Zellen zwischen den Fahrzeugen wechselt ein Fahrzeug  $n$  nach [28] genau dann die Spur, wenn die folgenden vier Bedingungen erfüllt sind:

### Bedingung 1

Vorausschauen

Befindet sich ein Fahrzeug unmittelbar voraus?

$$\Delta x_n < l$$

□

### Bedingung 2

Vergleichen

Ist die Situation auf der anderen Spur günstiger als auf der eigenen?

$$\Delta x_n^o > l^o$$

□

### Bedingung 3

Vermeiden von Behinderungen

Behindert der Wechsel ein Fahrzeug der Spur, auf die gewechselt werden soll?

$$\Delta x_n^{o,b} > l^{o,b}$$

□

### Bedingung 4

Fluktuation

$$\text{rand}() < p_{\text{change}}$$

□

$l$ ,  $l^o$  und  $l^{o,b}$  bestimmen, wie weit auf der eigenen und auf der Überholspur vorausgeschaut werden muss ( $l$  und  $l^o$ ).  $l^{o,b}$  bestimmt den Sicherheitsabstand zu nachfolgenden Fahrzeugen der Überholspur ( $o$  = „other lane“,  $b$  = „behind“). Als ein Beispiel für mögliche Startwerte schlagen die Autoren  $l = l^o = v + 1$ ,  $l^{o,b} = v_{\max}$  sowie  $p_{\text{change}} = 1$  vor. Dies bedeutet, dass das vorausschauende Verhalten der Fahrzeuge von ihrer Geschwindigkeit abhängig ist, während das rückblickende Verhalten durch die nicht bekannte Geschwindigkeit nachfolgender Fahrzeuge bestimmt wird und somit sicherheitshalber zu  $v_{\max}$  angenommen wird.

Gilt die Bedingung 1 für den Wechsel von rechts nach links und von links nach rechts gleichermaßen, wird symmetrisches Verkehrsverhalten erzeugt („amerikanisches Modell“). Gilt die Bedingung hingegen nur für den Wechsel von rechts nach links, wird asymmetrisches Verhalten erzeugt („deutsches Modell“). Stochastisches Verhalten wird mit einer Wechselwahrscheinlichkeit von  $p_{\text{change}} < 1$ , deterministisches Verhalten mit einer Wechselwahrscheinlichkeit von  $p_{\text{change}} = 1$  nachgebildet.

Nachteilig an den oben vorgestellten Bedingungen ist, dass sie keine hinreichend große Übereinstimmung mit dem beobachteten Verkehrsverhalten erreichen. Die Autoren stellen fest, dass in ihrem Modell ca. 90 % der Spurwechsel unter asymmetrischen Bedingungen durch einen Effekt erzeugt werden, bei dem die Spurwechsel eines folgenden Fahrzeugs durch die Spurwechsel eines vorausfahrenden Fahrzeugs initiiert werden („tailgating dance“). Als mögliche Lösung wird die Einführung eines gedächtnisbehafteten Spurwechsels vorgeschlagen, bei dem ein Fahrzeug nach einem Wechsel unabhängig von äußeren Bedingungen eine bestimmte Zeit auf der neuen Spur verbleibt. Desweiteren wird die in der Realität beobachtbare Dichteinversion, bei der ab einem bestimmten Fahrzeugfluss  $J_c \ll J_{\max}$  im asymmetrischen Fall mehr Fahrzeuge auf der linken als auf der rechten Spur fahren, nicht durch das vorgestellte Modell nachgebildet.

## 2.6.2 Modell nach Wagner u.a.

Wagner u.a. konzentrieren sich bei der Entwicklung eines Regelsets für realistischen Mehrspurverkehr in [29] auf die korrekte Nachbildung makroskopischer Eigenschaften wie dem Fundamentaldiagramm, der Spurnutzung als Funktion des Verkehrsflusses, der Reisezeit oder der Nettozeitlückenverteilung. Ziel war es, ein minimales mikroskopisches Modell zu entwickeln, das in der Lage ist, die makroskopischen Gesetze richtig nachzubilden. Aufbauend auf dem NaSch-Modell wird wiederum Regel 4 modifiziert, so dass Mehrspurverkehr nachgebildet werden kann.

Wie in Abschnitt 2.3 dargestellt, führt die Anwendung der Regeln des NaSch-Modells zu unfallfreiem Fahren. Das Modell begegnet diesem unrealistischem Verhalten dadurch, dass es zu Verkehrsmustern führt die Unfälle unwahrscheinlich werden lassen

und somit den Realitätsgrad des Modells wieder anheben. Schlecht entworfene Spurwechselregeln können aber erneut zu unrealistischen Situationen im Modell führen. Diese münden zwar auf Grund der unfallfreien Bewegung der Fahrzeuge in der Simulation ebenfalls nicht zu Unfällen, sie führen jedoch nunmehr auch zu unrealistischen Verkehrsmustern. Dies ist beispielsweise dann der Fall, wenn wechselwillige Fahrzeuge die Verkehrssituation hinter sich nicht berücksichtigen und bei einer Eigengeschwindigkeit von im Extremfall  $v = 0$  die Spur wechseln und sich damit unmittelbar vor ein Fahrzeug mit der Geschwindigkeit  $-v = v_{\max}$  platzieren. In diesem Fall wird das auffahrende Fahrzeug gezwungen seine Geschwindigkeit sofort auf  $v = 0$  zu reduzieren, was praktisch gesehen völlig unmöglich ist ( $a \rightarrow -\infty$ ). Die eigentlich erwarteten Stauwellen von Fahrzeugen werden durch kleine Störungen begrenzt, die sich über das gesamte System verteilen. Wagner u.a. versuchen derartige Konstellationen zu vermeiden, indem sie verbieten, dass wechselwillige Fahrzeuge nachfolgende Fahrzeuge der Überholspur behindern.

### Bedingung 1

Verbot der Behinderung nachfolgender Fahrzeuge

$$v_{\max}^{o,b} \leq \Delta x^{o,b} - 1 \quad \square$$

Obige Bedingung bedeutet, dass nach dem Spurwechsel ein nachfolgendes Fahrzeug für mindestens einen weiteren Schritt mit voller Geschwindigkeit fahren können muss. Desweiteren ist die Bedingung zwar notwendig, aber für einen tatsächlich auszuführenden Spurwechsel noch nicht ausreichend. Dafür muss bestimmt werden, ob das wechselwillige Fahrzeug einen Vorteil durch den Überholvorgang erzielen kann. Mit  $\Delta x^o$  als Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug der jeweils anderen Spur und asymmetrischen Verkehrsbedingungen müssen für den Wechsel von rechts nach links folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

### Bedingung 2

Gewünschte Geschwindigkeit auf eigener Spur nicht möglich

$$v_{\max} > \Delta x - 1 \quad \square$$

### Bedingung 3

Bessere Voraussetzungen auf der anderen Spur

$$\Delta x^o \geq \Delta x \quad \square$$

sowie für den Wechsel von links nach rechts:

**Bedingung 4**

Kein Fahrzeug voraus auf der linken Spur

$$v_{\max} < \Delta x - 1 - v_{\text{off}} \quad \square$$

**Bedingung 5**

Kein Fahrzeug voraus auf der rechten Spur

$$v_{\max} < \Delta x^o - 1 - v_{\text{off}} \quad \square$$

Über den Parameter  $v_{\text{off}}$  ist eine Verkehrsflusssteuerung möglich. Wird der Wert des Parameters erhöht, verringert sich der Verkehrsfluss bei dem die Überholspur eine höhere Dichte aufweist als die rechte Spur. Diese in Ländern mit dedizierter Überholspur beobachtbare Dichteinversion führt zu einer nicht optimalen Ausnutzung der Straßenkapazität. Ursache ist die Annahme der Fahrer, auf Grund des hohen Verkehrsaufkommens nicht rechtzeitig auf die Überholspur wechseln zu können und somit hinter einem langsameren Fahrzeug stecken zu bleiben.

Ein Nachteil obigen Regelsets ist, dass bei hoher Dichte sämtliche Fahrzeuge auf die Überholspur wechseln und die rechte Spur somit komplett frei wird. Dies ist leicht nachzuweisen: Angenommen die Dichte auf der Überholspur erreicht den Wert 1, dann ist Bedingung 4 nicht mehr zu erfüllen, so dass ein Rückwechseln auf die rechte Spur nicht mehr möglich ist.

Wagner u.a. korrigieren dieses Problem, indem sie mit der Wahrscheinlichkeit  $p_{\text{alt}} \approx 0,02$  ein alternatives Regelset benutzen, das aus der Sicherheitsbedingung 1 sowie einer Modifizierung der Bedingung 5 bei Auslassung der Bedingung 4 besteht:

**Bedingung 1**

Verbot der Behinderung nachfolgender Fahrzeuge

$$v_{\max}^{o,b} \leq \Delta x^{o,b} - 1 \quad \square$$

und

**Bedingung 6** (modifizierte Bedingung 5)

Genug Platz auf der rechten Spur

$$v \leq \Delta x^o - 1 \quad \square$$

Zusätzlich führen die Autoren ein Verbot des rechtsseitigen Überholens ab einer bestimmten Geschwindigkeit  $v_{\text{ban}}$  ein. Ein Fahrzeug der rechten Spur bremst bei

Erreichen eines Fahrzeugs der linken Spur soweit ab, dass es dieses nicht überholt. Mit einer geringen Wahrscheinlichkeit in der Größenordnung  $(p_{\text{brake}})(1-p_{\text{brake}})$  sowie einer geringen Geschwindigkeit ist ein Überholen auf der rechten Seite aber weiterhin möglich.

In der Summe kommen die Autoren zu folgenden Ergebnissen: Die oben beschriebenen Regeln führen zu einer Dichteinversion, wie sie auch in der Realität zu beobachten ist. Verglichen mit praktischen Messungen führen sie aber zu nicht korrekten Geschwindigkeitsdifferenzen zwischen den Fahrzeugen und zu einem zu hohen Verkehrsfluss auf der rechten Fahrbahn. Die Spurnutzungskurven bei hoher Dichte werden ebenfalls nicht korrekt modelliert. Weitere Probleme lassen sich auf die diskret zu beschreibende Maximalgeschwindigkeit zurückführen: Beispielsweise gelingt nur ein geringer Teil der begonnenen Überholmanöver, was im Widerspruch zu praktischen Beobachtungen steht.

### 2.6.3 Modell nach Nagel u.a.

In [30] stellen Nagel u.a. das oben beschriebene lückenbasierte Modell einem geschwindigkeitsbasierten Modell gegenüber. Wie zuvor entscheiden zwei Kriterien für das Wechseln von einer Fahrspur zur anderen: Sicherheit und Wechselwillen. Nur wenn beide Kriterien erfüllt sind, wird ein Wechselvorgang eingeleitet.

#### Bedingung 1

Sicherheit

Relativ zur eigenen Position darf sich im Bereich von  $[-\Delta x_{--}^o, \Delta x_+^o]$  kein Fahrzeug auf der Zielspur befinden.  $\square$

$\Delta x_{--}^o$  steht dabei für die Anzahl freier Zellen auf der Zielspur hinter dem wechselwilligen Fahrzeug,  $\Delta x_+^o$  für die entsprechende Anzahl freier Zellen vor dem Fahrzeug – wiederum auf der Zielspur. Als mögliche Parameter geben die Autoren für  $\Delta x_{--}^o = v_{\text{max}}$  sowie  $\Delta x_+^o = v$  an (das heißt  $[-v_{\text{max}}, v]$ ).  $v$  steht dabei für die Geschwindigkeit des wechselwilligen Fahrzeugs.

Mit  $d$  als „Vorausschaudistanz“ lässt sich der Wechselwillen eines Fahrzeugs wie folgt ausdrücken:

#### Bedingung 2

Wechselwillen (mit einem Fahrzeug innerhalb von  $d$  Zellen)

$L \leftarrow R$ :  $v \geq v_r$  OR  $v \geq v_l$

$L \rightarrow R$ :  $v < v_r$  AND  $v < v_l$   $\square$

Befindet sich innerhalb der Vorausschaudistanz kein weiteres Fahrzeug, werden  $v_r$  und  $v_l$  zu  $\infty$  angenommen. Das Prinzip der in Bedingung 2 definierten Regeln ist, dass ein Fahrzeug von links nach rechts wechselt, wenn der Grund für das Wechseln von rechts nach links weggefallen ist. Daher ist die  $L \rightarrow R$ -Regel die logische Negation der  $L \leftarrow R$ -Regel.

Die Vorausschaudistanz  $d$  spielt eine kritische Rolle bei der Anwendung der Bedingung 2. Bei großem  $d$  steigt die Tendenz, schon frühzeitig auf die linke Spur zu wechseln, also weit entfernt vom „störenden“ Fahrzeug. Dies führt bereits bei geringer Fahrzeugdichte zur Dichteinversion. Für  $d$  schlagen die Autoren einen Wert von 16 Zellen vor.

Mit Hilfe der Vorausschaudistanz kann die korrekte Spurnutzung in Prozent eingestellt werden, jedoch wird das Maximum der Dichteinversion bei zu niedriger Fahrzeugdichte erreicht (ca. 16 veh/km/lane im Gegensatz zu 28 veh/km/lane in der Realität). Nagel u.a. führen daher einen Parameter  $\Delta = 3$  ein, der diese Verschiebung über eine Modifizierung der  $L \rightarrow R$ -Regel korrigiert.

**Bedingung 3** (modifizierte Bedingung 2)

Wechselwillen (mit einem Fahrzeug innerhalb von  $d$  Zellen)

$$L \leftarrow R: \quad v \geq v_r \quad \text{OR} \quad v \geq v_l$$

$$L \rightarrow R: \quad v < v_r - \Delta \quad \text{AND} \quad v < v_l - \Delta \quad \square$$

Da die Einführung von  $\Delta$  eine stärkere Dichteinversion herbeiführt, muss zur Erzielung realistischen Fahrverhaltens die Vorausschaudistanz verkürzt werden. Die Autoren schlagen für den Fall der Anwendung von Bedingung 3 einen Wert von  $d = 7$  vor.

Nachteilig bei der Verwendung von  $\Delta$  ist der nunmehr auftretende Effekt, dass selbst bei hoher Fahrzeugdichte keine gleichmäßige Ausnutzung der Spuren mehr stattfindet. Um diesen Nachteil zu umgehen erweitern Nagel u.a. ihr Modell dahingehend, dass Fahrzeuge mit einer Eigengeschwindigkeit von  $v = 0$  symmetrische Wechselregeln benutzen. Dies bedeutet, dass ein unbewegtes Fahrzeug nur noch überprüft, ob die Geschwindigkeit auf der anderen Spur höher ist als die Geschwindigkeit auf der eigenen Spur. Ist dem so, wechselt das Fahrzeug unter Berücksichtigung des Sicherheitsgebots die Spur. Eine alternative Lösung sehen die Autoren in einer geschwindigkeitsabhängigen Vorausschaudistanz  $d = f(v)$ . Sie stellen aber fest, dass ihr Symmetrieansatz tatsächlich zu einer fast 50 %-igen Spurbelegung bei hoher Dichte führt [30, Seite 1431].

Langsame Fahrzeuge wie Lkw werden in dem Modell dadurch nachgebildet, dass 10 % aller Fahrzeuge eine reduzierte Maximalgeschwindigkeit attribuiert wird. Zu beachten ist dabei, dass mit dieser Reduzierung zwar die in den meisten Ländern

geltenden Geschwindigkeitsbegrenzungen für Lkw gut nachgebildet werden, nicht aber deren ebenfalls geringeres Beschleunigungsvermögen. Desweiteren nehmen auch Lkw in dem Modell von Nagel u.a. nur den Platz von Pkw ein. Eine Modellierung des erhöhten Platzbedarfs findet also ebenfalls nicht statt. Der Haupteffekt bei der Einführung langsamer Fahrzeuge in das Gesamtsystem ist jedoch die Verschiebung des maximalen Fahrzeugflusses hin zu einer höheren Fahrzeugdichte. In ihren Untersuchungen stellen die Autoren fest, dass die Einführung langsam fahrender Fahrzeuge einen stärkeren Einfluss auf die Dynamik des Systems hat als die Erweiterung von Ein- auf Zweispurverkehr. Begründet wird dies mit dem Auflaufen schneller Fahrzeuge auf langsame Fahrzeuge. Diese geraten dadurch in eine „Start-Stopp“-Dynamik, deren Stärke mit dem Abstand zum verursachenden Fahrzeug ansteigt. Im Zweispurverkehr werden diese „Verstopfungen“ durch zwei nebeneinander fahrende, langsame Fahrzeuge verursacht, eine Situation die in der Realität oft beobachtet werden kann.

Als weitere Parameter geben die Autoren an, in ihren Simulationen mit einer Zufälligkeit für die Geschwindigkeitsreduzierung von  $p = 0,25$  und einer Maximalgeschwindigkeit von  $v_{\max} = 5$  gearbeitet zu haben.

Als Nachteile ihres Modells geben Nagel u.a. an, dass Spurwechsel durch die von ihnen in [30] beschriebenen Regeln zu schnell durchgeführt werden. Im Gegensatz zu den in der Realität beobachtbaren drei Sekunden, werden Spurwechsel im Modell in einem Zeitschritt vollzogen, was einer Sekunde entspricht. Desweiteren kann es auf 3-spurigen Fahrbahnen zu einem Abarbeitungskonflikt kommen, wenn jeweils ein Fahrzeug der rechten und der linken Spur in dieselbe Zelle der Mittelspur wechseln wollen. Die Autoren lösen dieses Problem, indem sie  $L \leftarrow R$ -Spurwechsel nur in geraden und  $L \rightarrow R$ -Spurwechsel nur in ungeraden Zeitschritten zulassen.

## 2.7 Weitere Modellverfeinerungen

Eine Verfeinerung des Zellularautomaten-Modells besteht in der Herabsetzung der Zellengröße von 7,5 m auf 1,5 m. Wenn ein Zeitschritt weiterhin 1 s entspricht, folgt daraus eine Quantisierung der Geschwindigkeit in 5,4 km/h-Schritten sowie der Beschleunigung in  $1,5 \text{ m/s}^2$ -Schritten. Dies ist nur noch unwesentlich höher als die als komfortabel empfundene Beschleunigung von  $1,0 \text{ m/s}^2$ . Die Länge eines Fahrzeugs beträgt 5 Zellen.

## 2.8 Modell zur Verkehrsflusserzeugung

Basierend auf dem Bremslichtmodell nach Knospe u.a. und dem Modell für Mehrspurverkehr nach Nagel u.a. soll nunmehr das im Rahmen dieser Arbeit zur Anwen-

derung kommende Modell für die Verkehrsfusserzeugung entwickelt werden. Ergänzend zu den vorgenannten Modellen werden zusätzliche Parameter eingeführt, die ein realistischeres Überholverhalten von schwerlastverkehrsimulierenden Fahrzeugen ermöglichen. Fahrzeuge dieser Gruppe besitzen einen größeren Platzbedarf und eine geringere Maximalgeschwindigkeit als normale Fahrzeuge. Darüberhinaus wird das entwickelte Modell um die Möglichkeit erweitert, unter bestimmten Bedingungen das in dem verwendeten asymmetrischen Regelsatz geltende Rechtsüberholverbot aufzuheben. Dies dient einem natürlicheren Fahrzeugfluss bei sehr hoher Fahrzeugdichte.

### Schritt 0

Vorbereitung

Hilfs- und Zustandsvariablen:

$$t_h := \Delta x_n(t)/v_n(t), t_s := \min\{v_n(t), h\}, n_{\text{change}} := 0, b_n(t+1) := 0$$

Fluktuationswahrscheinlichkeit:

$$p(t) := \begin{cases} p_b & \text{wenn } b_{n+1}(t) = 1 \text{ und } t_h < t_s \\ p_0 & \text{wenn } v_n(t) = 0 \\ p_d & \text{sonst} \end{cases}$$

Sicherheitsbedingung mit  $\Delta x_-^o \leq \Delta x_{--}^o$ ,  $\Delta x_+^o \leq \Delta x_{++}^o$  und  $x_{n+j}^o(t) \forall j$ :

$$\Delta x_{\text{free},n}^o(t) := \begin{cases} 3 & \text{wenn } x_{n+j}^o(t) \neq [x_n(t) - \Delta x_{--}^o, x_n(t) + \Delta x_{++}^o] \\ 2 & \text{wenn } x_{n+j}^o(t) \neq [x_n(t) - \Delta x_{--}^o, x_n(t) + \Delta x_+^o] \\ 1 & \text{wenn } x_{n+j}^o(t) \neq [x_n(t) - \Delta x_-^o, x_n(t) + \Delta x_+^o] \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Angenommene Geschwindigkeiten vorausfahrender Fahrzeuge:

$$v_{\infty,n+1}^{(o)}(t+1) := \begin{cases} v_{n+1}^{(o)}(t+1) & \text{wenn} \\ & x_{n+1}^{(o)}(t) = [x_n(t) + 1, x_n(t) + d] \\ \infty & \text{sonst} \end{cases}$$

Effektiver Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug:

$$\Delta x_{\text{eff},n}(t) := \Delta x_n(t) + \max\{\min\{v_{n+1}(t), \Delta x_{n+1}(t)\} - \Delta x_{\text{safety}}, 0\} \quad \square$$

### Schritt 1

Beschleunigung

Wenn  $b_n(t) = b_{n+1}(t) = 0$  oder  $t_h \geq t_s$ , dann setze

$$v_n(t+1) := \min\{v_n(t) + 1, v_{\text{max},\text{street}}, v_{\text{max},n}\}. \quad \square$$

**Schritt 2**

Bremsen

$$v_n(t+1) := \min\{v_n(t+1), \Delta x_{\text{eff},n}(t)\}.$$

 Gilt  $v_n(t+1) < v_n(t)$ , dann setze  $b_n(t+1) := 1$ . □
**Schritt 3**

Fluktuation

 Wenn  $\text{rand}() < p(t)$ , dann setze  $v_n(t+1) := \max\{v_n(t+1) - 1, 0\}$ .

 Gilt zusätzlich  $p(t) = p_b$ , dann setze  $b_n(t+1) := 1$ . □
**Schritt 4** ( $a_v=0$ )

 Spurwechsel wenn  $v_n(t) = 0$ 

 Existiert eine rechte Spur für  $n$  und ist  $\Delta x_{\text{free},n}^{o,r}(t) \geq 2$ , dann setze

 $x_n(t) := x_n^{o,r}(t)$ ,  $n_{\text{change}} := 1$  wenn gilt:

$$v_{\infty,n+1}^{o,r}(t+1) > v_{\infty,n+1}(t+1).$$

 Existiert eine linke Spur für  $n$  und sind  $\Delta x_{\text{free},n}^{o,l} \geq 2$ ,  $n_{\text{change}} = 0$ , dann

 setze  $x_n(t) := x_n^{o,l}(t)$  wenn gilt:

$$v_{\infty,n+1}^{o,l}(t+1) > v_{\infty,n+1}(t+1). \quad \square$$

**Schritt 4** ( $a_v>0$ )

 Spurwechsel wenn  $v_n(t) > 0$ 

 Existiert eine rechte Spur für  $n$  und ist  $\Delta x_{\text{free},n}^{o,r}(t) \geq 1$ , dann setze

 $x_n(t) := x_n^{o,r}(t)$ ,  $n_{\text{change}} := 1$  wenn gilt:

$$v_n(t+1) \leq \min\{v_{\infty,n+1}(t+1), v_{\infty,n+1}^{o,r}(t+1)\} - \Delta_{\text{slack}}^{(lv)}.$$

 Existiert eine linke Spur für  $n$  und sind  $\Delta x_{\text{free},n}^{o,l} \geq 2$ ,  $n_{\text{change}} = 0$ , dann

 setze  $x_n(t) := x_n^{o,l}(t)$  wenn gilt:

$$\max\{v_n(t), v_n(t+1)\} \geq \min\{v_{\infty,n+1}(t+1), v_{\infty,n+1}^{o,l}(t+1)\},$$

 gilt zusätzlich  $\Delta x_{\text{free},n}^{o,l} = 3$ , dann setze  $v_n(t+1) := \max\{v_n(t), v_n(t+1)\}$ ,

 $b_n(t+1) := 0$ . □

**Schritt 4** ( $a_v > 0, \text{otr}$ )

Geschwindigkeitsabhängiges Überholverbot für Fahrzeuge der rechten Spur, wenn  $v_n(t) > 0$

Existiert eine linke Spur für  $n$  und sind  $\Delta x_{\text{free},n}^{o,l} < 2$ ,  $n_{\text{change}} = 0$ , dann setze  $v_n(t+1) := \max\{v_{\infty,n+1}^{o,l}(t+1) - 1, 0\}$ ,  $b_n(t+1) := 1$  wenn gilt:  
 $v_n(t+1) > \max\{v_{\infty,n+1}^{o,l}(t+1), v_{\text{otr}}\}$ . □

**Schritt 4** (b)

Fahren

$x_n(t+1) := x_n(t) + v_n(t+1)$ . □

In Schritt 0 wird die Größe der Fluktuationswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der eigenen Geschwindigkeit und dem Verhalten des vorausfahrenden Fahrzeugs bestimmt. Ist der relative Abstand zum Vordermann groß genug ( $t_h \geq t_s$ ), ist das Verhalten unabhängig vom vorausfahrenden Fahrzeug. Zudem wird das eigene Bremslicht zurückgesetzt. Schritt 1 beschleunigt das Fahrzeug für den folgenden Zeitschritt, wenn es seine Maximalgeschwindigkeit noch nicht erreicht hat und durch die Beschleunigung die zulässige Höchstgeschwindigkeit des Straßenabschnitts nicht überschritten wird. Das Fahrzeug beschleunigt nicht, wenn das eigene oder das Bremslicht des Vordermanns gesetzt ist und sich das vorausfahrende Fahrzeug im Interaktionsbereich befindet. In Schritt 2 wird die Geschwindigkeit dem effektiven Abstand zum Vordermann angepasst. Sollte das Fahrzeug durch diese Anpassung zum Abbremsen gezwungen werden, werden zusätzlich die Bremslichter eingeschaltet. Mit Hilfe der in Schritt 0 ermittelten Wahrscheinlichkeit  $p(t)$  wird das Fahrzeug in Schritt 3 weiter abgebremst. Auch in diesem Schritt kann ein Einschalten der Bremslichter erfolgen, wenn sich das vorausfahrende Fahrzeug im Interaktionsbereich befindet und seinerseits die Bremslichter gesetzt hat. Das Fortbewegen der Fahrzeuge in Schritt 4 wird in zwei Teilschritte untergliedert. Mit  $n+j \forall j$  als Ausdruck für alle Fahrzeuge einer Spur wird in Schritt 4(a) zunächst bestimmt, ob das Fahrzeug die Spur wechselt oder auf der alten Spur bleibt. Das Fahrzeug wechselt unter Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten ( $\Delta x_{\pm}^o$ ) und trimmenden Parametern (Slack  $\Delta_{\text{slack}}^{(lv)}$ , Vorausschaudistanz  $d$ ) die Spur, wenn das Fortkommen auf der eigenen Spur behindert wird oder werden könnte. Dabei gelten für das Wechseln von rechts nach links und für das Wechseln von links nach rechts asymmetrische Regeln („deutsches Modell“) mit Ausnahme von Fahrzeugen, die sich nicht bewegen. Diese verwenden eine symmetrische Regel. Wechselt das Fahrzeug die Spur, wird die Geschwindigkeit des Fahrzeugs wieder auf den Wert zum Zeitpunkt  $t$  gesetzt, wenn

die erweiterte Sicherheitsbedingung  $\Delta x_{\text{free},n}^o(t) = 2$  erfüllt ist und in den Schritten 2 oder 3 zuvor eine Reduktion erfolgte. Zusätzlich wird das eventuell gesetzte Bremslicht ausgeschaltet. Wird auf Grund nicht erfüllter Sicherheitsbedingungen ein Spurwechsel verhindert, und befindet sich auf der linken Spur ein Fahrzeug  $n + 1^{o,l}$  mit einer geringeren Geschwindigkeit, muss das Fahrzeug seine eigene Geschwindigkeit reduzieren um das langsamere Fahrzeug nicht rechts zu überholen, wenn seine Geschwindigkeit einen gewissen Wert ( $v_{\text{otr}}$ ) überschreitet. Ist die eigene Geschwindigkeit nicht höher als  $v_{\text{otr}}$ , darf auch rechts überholt werden. In Teilschritt 4 (b) erfolgt schließlich das eigentliche Fahren.

## 2.9 Evaluierung der Verkehrsflusserzeugung

Im folgenden Abschnitt sollen die Eigenschaften des allen Betrachtungen in dieser Arbeit zu Grunde liegenden Verkehrsmodells anhand simulativer Untersuchungen verdeutlicht werden. Es wird gezeigt, dass das Verkehrsmodell in der Lage ist, realitätsnahes Fahrverhalten von Fahrzeugen zu erzeugen.

Tabelle 2.1: Modellparameter Verkehrserzeugung

Parameter	Wert
$\Delta x_{++}^o$	$\max\{v_n(t), v_n(t+1)\}$
$\Delta x_{+}^o$	$\max\{\Delta x_{\text{safety}}^{ch}, \Delta x_{++}^o - \min\{v_{n+1}^o(t), v_{n+1}^o(t+1)\}\}$
$\Delta x_{--}^o$	$l_n - 1 + \max\{v_{n-1}^o(t), v_{n-1}^o(t+1)\}$
$\Delta x_{-}^o$	$\max\{l_n - 1 + \Delta x_{\text{safety}}^{ch}, \Delta x_{--}^o - \min\{v_n(t), v_n(t+1)\}\}$
$v_{\text{max}}$	25
$v_{\text{max}}^{lv}$	18
$l_{\text{veh}}$	5
$l_{\text{veh}}^{lv}$	10
$p_{\text{veh}}^{lv}$	0,15
$p_{d b 0}$	0, 1   0, 9   0, 5
$\Delta x_{\text{safety}}$	5
$\Delta x_{\text{safety}}^{ch}$	3
$\Delta x_{\text{slack}}$	3
$\Delta x_{\text{slack}}^{lv}$	1
$d$	15
$h$	4
$v_{\text{otr}}$	9

Mit  $\Delta x_n(t)$  als Position (Zelle) der Fahrzeugfront im Fall einer Fahrzeuglänge  $l_n > 1$  zeigt Tabelle 2.1 die gewählten Parameter für die angestellten Betrachtungen.

Anhang A.1 beschreibt ausführlich, wie die Werte der Tabelle gewonnen werden.

### 2.9.1 Fundamentaldiagramm

Die bedeutendste Messgröße zur Charakterisierung von Fahrzeugverkehr ist das Fundamentaldiagramm. Es beschreibt den funktionalen Zusammenhang  $J = J(\rho)$  zwischen der Fahrzeugdichte  $\rho$  und dem Fahrzeugfluss  $J$ , wie er in Abbildung 2.6 schematisch dargestellt ist.

Abbildung 2.7 zeigt als Einzelpunkte das Fundamentaldiagramm einer Simulation bei einer Mittelung über 60 s je Messwert sowie als durchgezogene Linie die Mittelung über zehn Simulationsläufe von jeweils einer Stunde Dauer. Der Anteil des langsam fahrenden Schwerlastverkehrs beträgt 15 %.

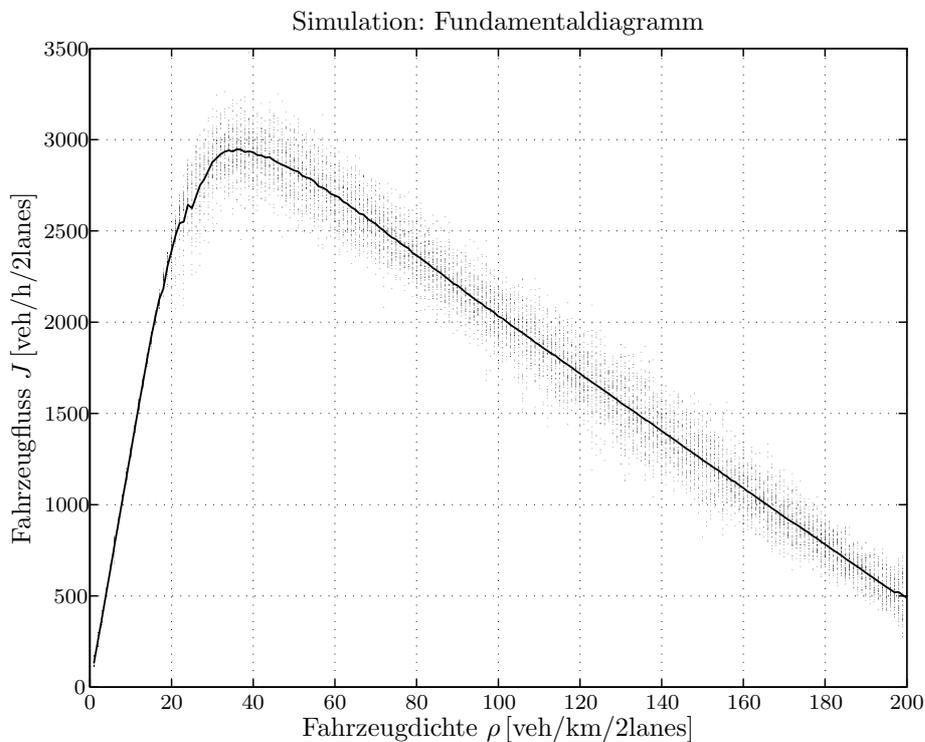


Abbildung 2.7: Fundamentaldiagramm

Zu erkennen ist der Freiflussbereich mit einer Dichte von  $\rho < 22$  veh/km/2lanes, der Bereich höherer Fluktuation um 30 veh/km/2lanes, sowie der Bereich synchronisierten und gestauten Verkehrs ab 40 veh/km/2lanes. Das aus den Simulationen gewonnene Fundamentaldiagramm besitzt das von der klassischen Theorie vorhergesagte Aussehen. Die Eckwerte 30, 80 und 160 veh/km/2lanes entsprechen den in [30] gezeigten, real gemessenen Werten aus [31] exakt, für 40 Fahrzeuge pro Kilometer und Doppelspur ist das Maximum des Verkehrsflusses etwas niedriger.

### 2.9.2 Spurnutzung und Dichteinversion

In Abbildung 2.8 ist das aus der Mittelung von zehn Simulationen gewonnene Spurwechselverhalten der Fahrzeuge anhand der Benutzung der rechten Fahrbahn dargestellt. Der Anteil des langsam fahrenden Schwerlastverkehrs beträgt wiederum 15 %. Die durch die in Abschnitt 2.6 beschriebenen asymmetrischen Wechselregeln bedingte, sowie im realen Verkehr beobachtbare Dichteinversion tritt bei einer Fahrzeugdichte ab 40 veh/km/2lanes auf. Deutlich erkennbar ist, dass die Inversion mit höherer Verkehrsdichte zwar wieder abnimmt, es aber zu keiner Inversion der Inversion kommt. Dieses Verhalten ist im realen Verkehr in Ländern mit Rechtsfahrgebot wie Deutschland ebenfalls zu beobachten. Im Vergleich zu den gemessenen Daten aus [31] erfolgt die Inversion bei einer etwas größeren Fahrzeugdichte.

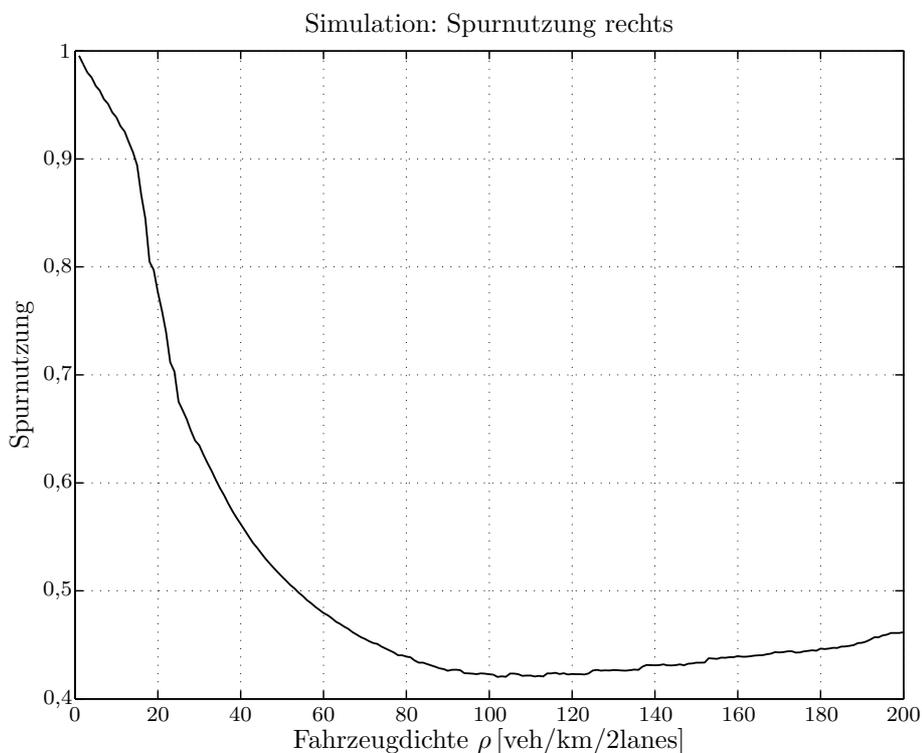


Abbildung 2.8: Spurnutzung und Dichteinversion

### 2.9.3 Relative Geschwindigkeiten

In Abbildung 2.9 ist das Verhältnis zwischen den gefahrenen Geschwindigkeiten der Fahrzeuge und ihren jeweiligen Maximalgeschwindigkeiten für die rechte und die linke Fahrspur dargestellt. Zu erkennen ist, dass bis zu einer Dichte von 25 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur mit mindestens 90 % der maximal möglichen Geschwindigkeit gefahren werden kann. Bei höherer Dichte wird die Interaktion der

Fahrzeuge untereinander stärker, so dass sie zu häufigeren Abbrems- und Überholvorgängen gezwungen werden. Bereits ab 50 veh/km/2lanes ist der Verkehr auf den einzelnen Spuren so stark angewachsen, dass nur noch mit 50 % der jeweils möglichen Geschwindigkeit gefahren werden kann.

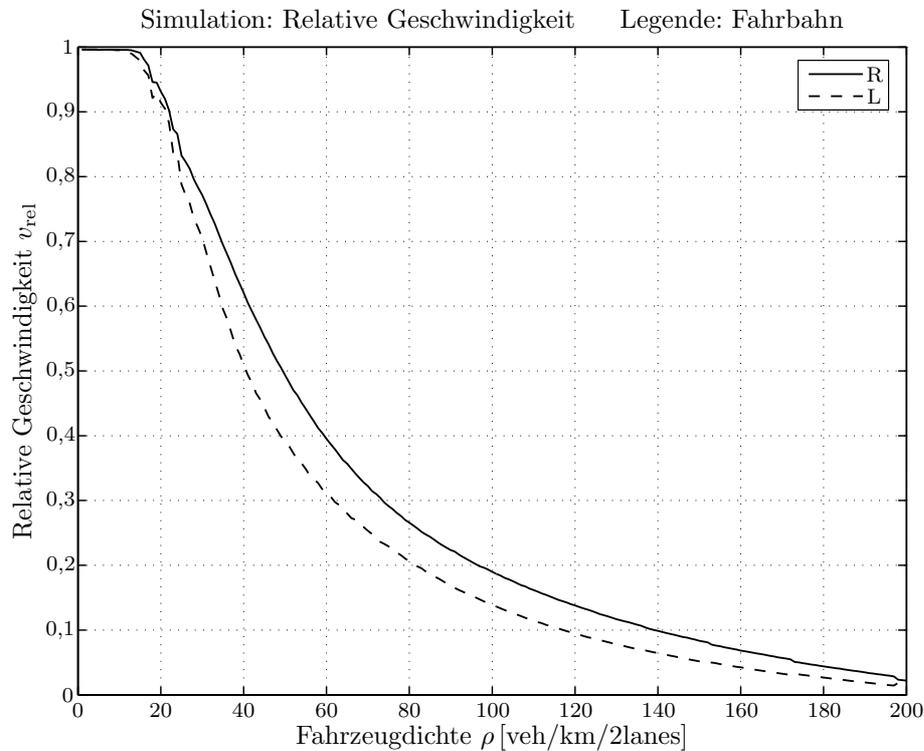


Abbildung 2.9: Geschwindigkeit im Verhältnis zur Maximalgeschwindigkeit

Auch bei absolutem Rechtsüberholverbot sind die gefahrenen Geschwindigkeiten auf der rechten Spur höher als auf der linken. Dies hängt damit zusammen, dass Fahrzeuge nur dann hohe Geschwindigkeiten fahren können, wenn die lokale Fahrzeugdichte gering ist. In diesem Fall aber entfällt der Grund für die Benutzung der linken Spur, so dass noch links befindliche Fahrzeuge infolge des Rechtsfahrgebots nach rechts wechseln. Die dargestellten Werte der Abbildung 2.9 stehen ebenfalls in guter Übereinstimmung mit den in [30] gezeigten, real gemessenen Werten aus [31].

### 2.9.4 Spontane Staubildung

Ein im realen Verkehr ab einer bestimmten Fahrzeugdichte beobachtbares Phänomen ist die spontane Staubildung, bei der es zu Fahrzeugstaus kommt, obwohl keine äußeren Ursachen wie beispielsweise Unfälle oder Fahrbahnverengungen vorhanden sind. Da es sich bei diesem „Stau aus dem Nichts“ um ein von den Fahrzeugführern durch nichtideales Fahren verursachtes kollektives Phänomen handelt, muss ein Verkehrsmodell in der Lage sein, spontane Staubildung bei ausreichender Verkehrsdichte erzeugen zu können.

Abbildung 2.10 zeigt die simulativ gewonnenen Trajektorien der Bewegungen einzelner Fahrzeuge in einer Fahrtrichtung über einen Zeitraum von 30 s bei einer Verkehrsdichte von 60 veh/km/2lanes. Wie Abbildung 2.7 zu entnehmen ist, gehört diese Dichte bereits zum gestauten Ast des Fundamentaldiagramms.

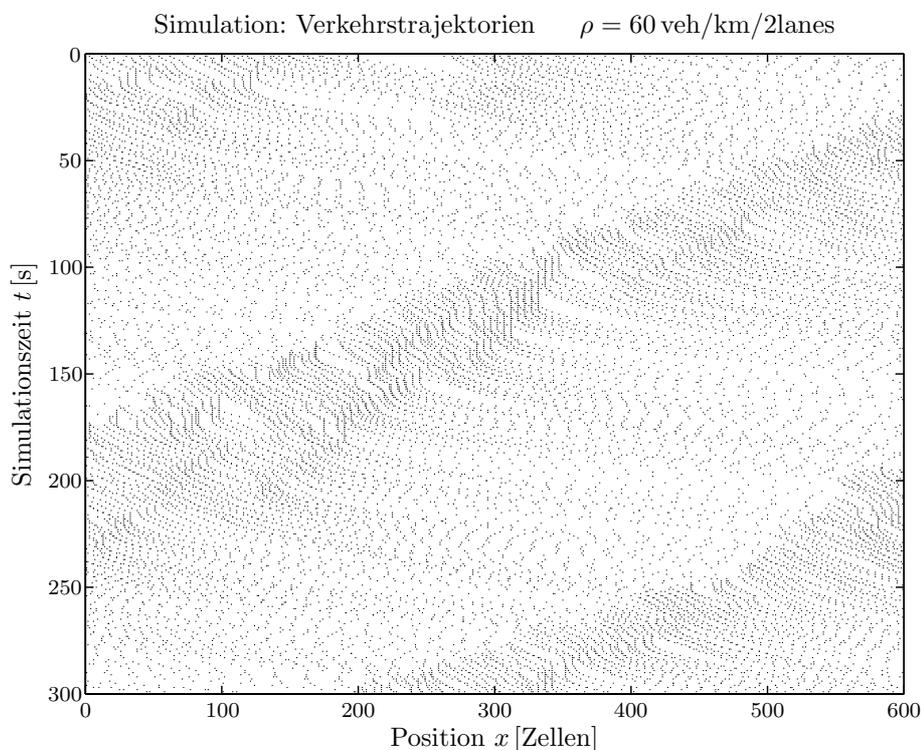


Abbildung 2.10: Verkehrstrajektorien

Erkennbar sind zwei ohne äußere Ursachen entstandene Staubereiche, von denen sich der zeitlich ältere, obere Stau mit 14 km/h bis 19 km/h, der zeitlich jüngere, untere mit 13 km/h bis 28 km/h entgegen der Fahrtrichtung bewegt. Diese Geschwindigkeiten entsprechen der in der Realität beobachteten Geschwindigkeit von 15 km/h, mit der sich spontane Staus weitgehend unabhängig von äußeren Gegebenheiten entgegen der Fahrtrichtung bewegen [21, 22, 19].

### 2.9.5 Dynamik in Abhängigkeit von Schwerlastverkehr

Wie in Abschnitt 2.6.3 beschrieben, hat die Einführung langsam fahrender Fahrzeuge auf die Dynamik des Gesamtsystems einen nicht unbedeutenden Einfluss. Der in Abbildung 2.11 gezeigte Vergleich zwischen einem System mit einem Anteil von 15 % langsam fahrenden Schwerlastverkehrs und einem System ohne diesen bestätigt diese Aussage. Zu erkennen ist, dass das Maximum des Verkehrsflusses bereits ab einer Dichte von 21 veh/km/2lanes erreicht wird. Dem schließt sich ein deutlich erkennbarer Plateaubereich an, bei dem trotz zunehmender Dichte der Fahrzeugfluss

konstant bleibt. Der ab einer Dichte von 40 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur höhere Fluss bei einem System ohne Schwerlastverkehr ist nicht mehr auf die unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten der beiden Fahrzeugarten rückführbar. Wie in Abbildung 2.9 gezeigt, sind die gefahrenen Geschwindigkeiten bei derartigen Dichten bereits weit unterhalb der möglichen Geschwindigkeiten gefallen. In diesem Bereich kommt vielmehr die Eigenschaft zum Tragen, dass Fahrzeuge des Schwerlastverkehrs mit zehn Zellen doppelt soviel Platz einnehmen wie normale Fahrzeuge. Der verfügbare Raum zwischen den Fahrzeugen ist somit geringer, die Interaktion und gegenseitige Behinderung dagegen größer.

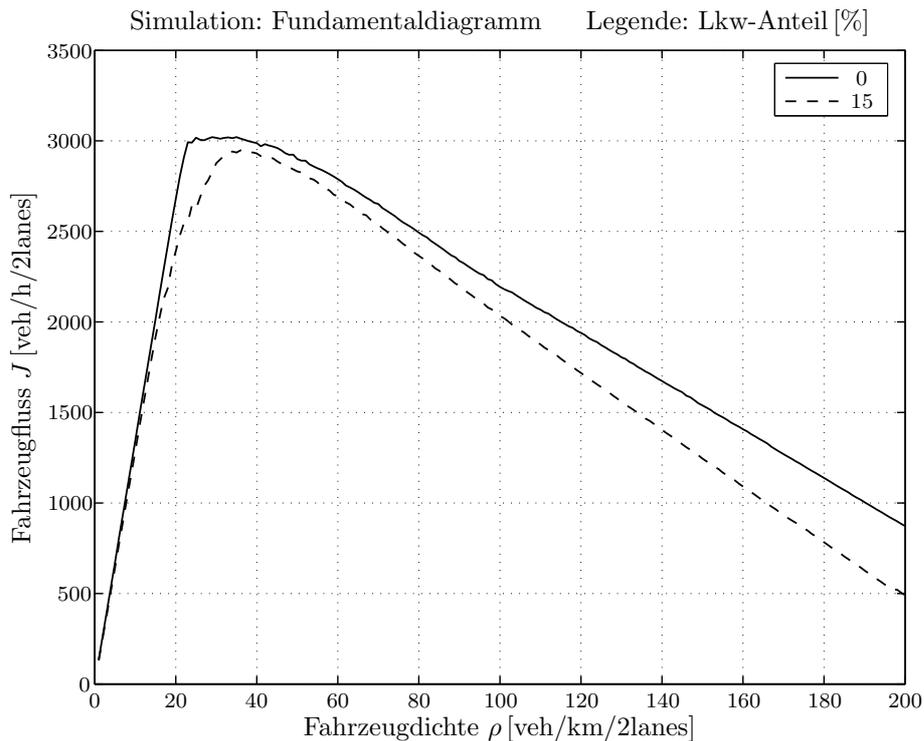


Abbildung 2.11: Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit des Lkw-Anteils

Auf das Spurwechselverhalten hat die Existenz langsam fahrender Fahrzeuge wie in Abbildung A.17 gezeigt, keinen wesentlichen Einfluss. Die Kurven stellen eine Mittelung über jeweils zehn Simulationsdurchläufe dar.

## 2.9.6 Zusammenfassung der Ergebnisse

In den Abschnitten 2.9.1 bis 2.9.5 wird gezeigt, dass das auf Knospe u.a. sowie Nagel u.a. basierende und in dieser Arbeit weiterentwickelte Verkehrsmodell in der Lage ist, realitätsnahen Verkehr zu erzeugen. Dies trifft sowohl für Vergleiche mit den gemessenen Werten aus [31, 21, 22, 19] zu als auch auf Beobachtungen, die im täglichen Verkehr auf Autobahnen selbst gemacht werden können.

# Kapitel 3

## Nachrichtenübertragung

Bei der Nachbildung von Funksystemen zur Übertragung digitaler Daten kommen in Abhängigkeit des benötigten Detaillierungsgrades verschiedene Modelle zum Einsatz. In diese Modelle können sowohl Eigenschaften der zu Grunde gelegten Sende- und Empfangssysteme als auch äußere Effekte wie beispielsweise Abschattung durch Gebäude oder Fading- und Dopplereffekte durch Bewegungen einfließen. Auf der anderen Seite können für bestimmte Problemstellungen auch einfache Entscheider ausreichen, die lediglich die Entfernung zwischen einem Sender und einem Empfänger berücksichtigen. Im folgenden Kapitel wird beschrieben und evaluiert, welches Modell für die Übertragung von Nachrichten im Rahmen dieser Arbeit verwendet wird.

### 3.1 Log-Distanz-Pfadverlustmodell

Für Abschätzungen über die von einem Sender zu einem Empfänger übertragene Leistung in einem drahtlosen System hat sich das Log-Distanz-Pfadverlustmodell ( $d^\alpha$ -Modell) als geeignet herausgestellt [32, 33, 34, 35, 36]. Dieses Modell berücksichtigt sowohl die Verringerung der Energiedichte der elektromagnetischen Welle durch deren Ausbreitung selbst als auch den durch die Eigenschaften des Ausbreitungsgebiets bedingten Verlust als Funktion der Entfernung  $d_{k,i}$ ,  $k, i \in \mathbb{N}$  zwischen einem Sender  $S_i$  und einem Empfänger  $E_k$ . Der Begriff Pfadverlust quantifiziert somit den Unterschied zwischen der vom Sender abgegebenen Leistung  $P_{T,S_i}$  und der am Empfänger nutzbaren Leistung  $P_{R,E_k,S_i}$ . Mögliche Antennengewinne auf Sende- und Empfangsseite können implizit oder explizit in die Quantität eingehen.

Das Modell wird beschrieben durch die Beziehung

$$\overline{PL}(d_{k,i}) \sim \left( \frac{d_{k,i}}{d_0} \right)^\alpha, \quad (3.1)$$

wobei  $\alpha$  einen von den Ausbreitungsbedingungen abhängigen Pfadverlustexponenten repräsentiert. Für die ungestörte Freiraumausbreitung gilt  $\alpha = 2$ . In realen Umgebungen steigt der Exponent in Abhängigkeit vorhandener Hindernisse wie Bergen, Gebäuden, Bewuchs oder Mauern. Der Pfadverlustexponent erhöht sich ebenfalls, wenn der Untergrund über dem eine Übertragung stattfindet in die erste Fresnelzone hineinreicht, Sender und Empfänger also in Relation zu den Höhen ihrer Antennen weit voneinander entfernt sind [37]. Für diese Ausbreitung im Freifeld gilt  $\alpha = 4$ . Der Pfadverlustexponent für eine bestimmte Umgebung muss im Allgemeinen durch Messungen wie in [38, 39, 40, 41] ermittelt werden. Typische Werte für  $\alpha$  sind in Tabelle 3.1 aufgeführt [42, Seite 107 ff.].

Tabelle 3.1: Typische Werte für den Pfadverlustexponenten

Umgebung	Pfadverlustexponent
Freiraumausbreitung	2
Freifeldausbreitung bei großen Distanzen	4
Mobilfunk im Stadtgebiet mit Sichtverbindung	2,7 - 4
Mobilfunk im Stadtgebiet mit Abschattungen	5 - 6
Ausbreitung in Gebäuden mit Sichtverbindung	1,6 - 1,8
Ausbreitung in Gebäuden mit Abschattungen	4 - 6
Ausbreitung in Fabrikgebäuden	2 - 3

Mit  $\overline{PL}_0(d_0)$  in dB als mittlerem Pfadverlust des Freifeld-Referenzabstandes  $d_0$ , der beschrieben werden kann durch

$$\overline{PL}_0(d_0) = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{4\pi f d_0}{c_0} \right) \text{ [dB]} \quad , \quad (3.2)$$

ergibt sich der logarithmierte, mittlere Hauptpfadverlust  $\overline{PL}(d_{k,i})$  zwischen einem Sender  $S_i$  und einem Empfänger  $E_k$  zu:

$$\overline{PL}(d_{k,i}) = \overline{PL}_0(d_0) + 10 \cdot \alpha \cdot \log_{10} \left( \frac{d_{k,i}}{d_0} \right) \text{ [dB]} \quad . \quad (3.3)$$

Für realistische Abschätzungen des Pfadverlusts ist es von Bedeutung, den Freifeld-Referenzabstand  $d_0$  in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen richtig zu wählen. In zellularen Systemen mit großen Reichweiten wird dieser beispielsweise oft auf 1000 m festgelegt, für mikrozellulare Systeme haben sich Werte um 100 m und für Systeme innerhalb von Gebäuden um 1 m als günstig erwiesen [43, 44, 45].

## 3.2 Alternative Ausbreitungsmodelle

Obwohl das Log-Distanz-Pfadverlustmodell für die schnelle Abschätzung der von einem Sender zu einem Empfänger übertragenen Leistung sehr gut geeignet ist, fasst es doch alle wesentlichen Ausbreitungseffekte in einem einzigen Parameter – dem Pfadverlustexponenten  $\alpha$  – zusammen. Daher wurden anspruchsvollere Modelle entwickelt, die zusätzliche Faktoren berücksichtigen, welche sich in verschiedenen Szenarien ändern können. Für Außenbedingungen sind dies beispielsweise Modelle von Okumura [38], Hata [39], Walfisch und Bertoni [46] sowie das Wideband PCS Microcell-Modell [43]. Im Kontext dieser Arbeit werden diese Modelle aber nicht weiter betrachtet, da das  $d^\alpha$ -Modell eine für die hier durchgeführten Systemlevel-Simulationen ausreichende Realitätsnähe und Genauigkeit bietet.

## 3.3 Abschätzung des Pfadverlustexponenten

Da eine messtechnische Bestimmung des Pfadverlustexponenten im Rahmen dieser Arbeit ausgeschlossen ist, muss eine Annäherung an realitätsnahe Bedingungen auf anderem Weg stattfinden. Eine Möglichkeit dazu ist die Abschätzung von  $\alpha$  über die Faktoren Funkreichweite  $R_{\text{comm}}$  und Sendeleistung  $P_{T,S_i}$ , wenn ein bestimmtes Übertragungssystem – real oder fiktiv – und dessen erzielbare Reichweite bekannt ist oder angenommen wird. Die folgenden Ausführungen orientieren sich dabei an der in Europa zulässigen Sendeleistung von 100 mW EIRP des WLAN-Standards nach IEEE 802.11 b [47], sowie der damit messtechnisch ermittelten Reichweite von ca. 150 m im 2 MBit/s-Modus [48].

Ein wichtiger Aspekt für die erzielbare Reichweite einer Funkübertragung ist das Verhältnis der am Empfänger  $E_k$  gewollten Leistung  $P_{R,E_k,S_i}$  eines Nutzsenders  $S_i$  zu den Leistungen, die am Empfänger  $E_k$  unerwünscht sind. Dieses als Signal-Rausch-Abstand bekannte Verhältnis kann – unter der Annahme, dass sich mögliche Störleistungen  $P_{R,E_k,S_j}$  wie weißes gaußsches Rauschen verhalten – mit  $N_{E_k}$  als thermischem Rauschen des betrachteten Empfängers und  $j \in \mathbb{N}$  wie folgt dargestellt werden:

$$SINR_{E_k,S_i} = \frac{P_{R,E_k,S_i}}{N_{E_k} + \sum_{j \neq i} P_{R,E_k,S_j}} . \quad (3.4)$$

Die Empfangsqualität ist in diesem Fall an den  $SINR$  gekoppelt: Je größer der Wert für den Signal-Rausch-Abstand ist, umso höher ist die Qualität des Empfangs. Im Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass ein  $SINR$  von mindestens 10 dB erforderlich ist, um einen störungsfreien Empfang zu gewährleisten.

Mit den Antennengewinnen  $G_{T,S_i}$  auf Sender- und  $G_{R,E_k}$  auf Empfängerseite kann

die empfangene Nutzleistung  $P_{R,E_k,S_i} = f(d_{k,i})$  mittels

$$P_{R,E_k,S_i}(d_{k,i}) = \frac{P_{T,S_i} \cdot G_{T,S_i} \cdot G_{R,E_k}}{\overline{PL}(d_{k,i})} \quad (3.5)$$

direkt oder mit Hilfe von

$$P_{R,E_k,S_i}(d_{k,i}) [\text{dBm}] = P_{T,S_i} [\text{dBm}] + G_{T,S_i} [\text{dB}] + G_{R,E_k} [\text{dB}] - \overline{PL}(d_{k,i}) [\text{dB}] \quad (3.6)$$

in logarithmierter Form berechnet werden.

Das physikalisch unvermeidliche Rauschen kann sich aus dem im Empfänger erzeugten thermischen Rauschen, den Gleichkanal- und Adjazentkanal-Interferenzen in FDMA- und TDMA-Systemen oder den Mehrfachzugriffs-Interferenzen in CDMA-Systemen zusammensetzen. Im Folgenden soll lediglich das thermische Rauschen  $N$  betrachtet werden, das über folgende Beziehung berechnet werden kann:

$$N_{E_k} = k_B \cdot T_0 \cdot B_{E_k} \cdot F_{E_k} \quad (3.7)$$

Hierbei steht  $k_B$  für die Boltzmannkonstante,  $T_0$  für die Standardtemperatur,  $B_{E_k}$  für die Bandbreite sowie  $F_{E_k}$  für die Rauschzahl des Empfängers  $E_k$ . Die in Tabelle 3.2 für  $B_{E_k}$  und  $F_{E_k}$  angegebenen Werte orientieren sich dabei wieder an Systemen nach dem WLAN-Standard IEEE 802.11 b.

Tabelle 3.2: Parameter zur Abschätzung des Pfadverlustexponenten

Parameter	Wert
$k_B$	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
$T_0$	290 K
$B_{E_k}$	22 MHz
$F_{E_k}$	5 dB
$f$	2,4 GHz
$c_0$	299792458 m/s
$d_{k,i}$	150 m
$d_0$	1 m
$P_{T,S_i}$	20 dBm
$G_{T,S_i}$	0 dB
$G_{R,E_k}$	0 dB

Eine Abschätzung des Pfadverlustexponenten ist nunmehr wie folgt möglich: Bei einem geforderten minimalen  $SINR$  von 10 dB sowie einer ungestörten Übertragung

ergibt sich eine Mindestempfangsleistung  $P_{R,\min}$  von  $-83,56$  dBm. Diese Empfangsleistung bedingt nach (3.6) und den Werten aus Tabelle 3.2 einen maximalen Hauptpfadverlust  $\overline{PL}_{\max}$  von  $103,56$  dB. Bei einem Freifeld-Referenzabstand  $d_0 = 1$  m ergibt sich zudem mit (3.2) ein mittlerer Referenzpfadverlust  $\overline{PL}_0$  von  $40,05$  dB.

Werden die ermittelten Werte in (3.3) eingesetzt, führt dies schließlich zu einem Exponenten von  $\alpha = 2,9$  für das Log-Distanz-Pfadverlustmodell.

### 3.4 Modell zur Nachrichtenübertragung

Der Nachrichtenübertragung des in Abschnitt 4.8 beschriebenen Algorithmus wird in dieser Arbeit das klassische ALOHA-Verfahren zu Grunde gelegt, welches unter anderem in [49] und [50] vom maßgeblichen Entwickler des ALOHANET Norman Abramson beschrieben wird. Dabei wird von den beteiligten Stationen weder der Zugriff auf das gemeinsame Übertragungsmedium koordiniert noch werden Senderservierungen oder -ankündigungen vorgenommen. Jeder Sendewunsch kann zu beliebigen Zeiten initiiert werden und beliebig lange dauern. Sobald mehr als eine Station zur gleichen Zeit auf Sendung sind, kann dies zu einer Kollision führen.

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten einfachen Modell zur Nachrichtenübertragung hängt der Erfolg eines Sendevorgangs nur vom  $SINR$  ab, welches der Nutzsender  $S_i$  am Empfänger  $E_k$  erzeugt. Ist der  $SINR$  während der gesamten Übertragungszeit mindestens so groß wie ein bestimmter Schwellwert, gilt die Übertragung als gültig und die Daten können an höhere Schichten des Systems weitergegeben werden. Unterschreitet der  $SINR$  während der Übertragung den Schwellwert, werden alle empfangenen Daten dieser Sendung verworfen.

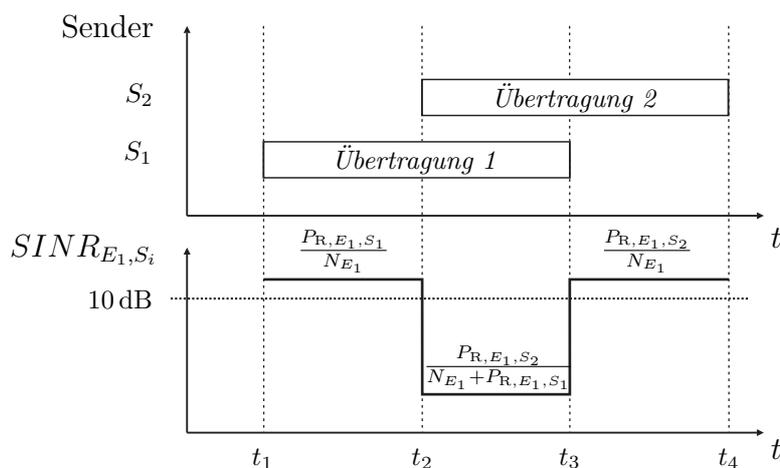


Abbildung 3.1: Übertragung mit  $P_{R,E_1,S_2} = P_{R,E_1,S_1}$

Abbildung 3.1 illustriert das oben beschriebene Verhalten. Zum Zeitpunkt  $t_1$  beginnt Sender  $S_1$  seine Aussendung. Am Empfänger  $E_1$  erzeugt beispielsweise eine Empfangsleistung von  $P_{R,E_1,S_1} = 6,974 \text{ pW}$  einen  $SINR_{E_1,S_1}$  von 12 dB über dem thermischen Rauschen ( $N_{E_1} = 0,44 \text{ pW}$ ). Die Aussendung liegt über dem Schwellwert von 10 dB, der laut des hier verwendeten Modells für einen einwandfreien Empfang mindestens notwendig ist. Der Empfänger detektiert die Übertragung und logt sich auf die Übertragung des von  $S_1$  verschickten Datenpakets auf. Zum Zeitpunkt  $t_2$  beginnt Sender  $S_2$  mit seiner Aussendung. Im Fall des Beispiels erzeugt  $S_2$  an  $E_1$  eine gleich große Empfangsleistung wie  $S_1$ , was einen  $SINR_{E_1,S_1}$  von nur noch ca. 0 dB zur Folge hat.  $E_1$  ist nicht mehr in der Lage, die Aussendung von  $S_1$  zu erkennen und logt demzufolge den Empfang des Datenpakets aus. Beide Sender –  $S_1$  wie  $S_2$  – werden ab dem Zeitpunkt  $t_2$  von  $E_1$  gleichermaßen nur noch als Störung wahrgenommen. Der ab  $t_3$  auftretende  $SINR_{E_1,S_2} = 12 \text{ dB}$  der Übertragung von  $S_2$  führt an  $E_1$  ebenfalls nicht zu einer gültigen Übertragung, da der Anfang des Datenpakets nicht empfangen werden konnte. Beide Aussendungen sind somit für  $E_1$  verloren.

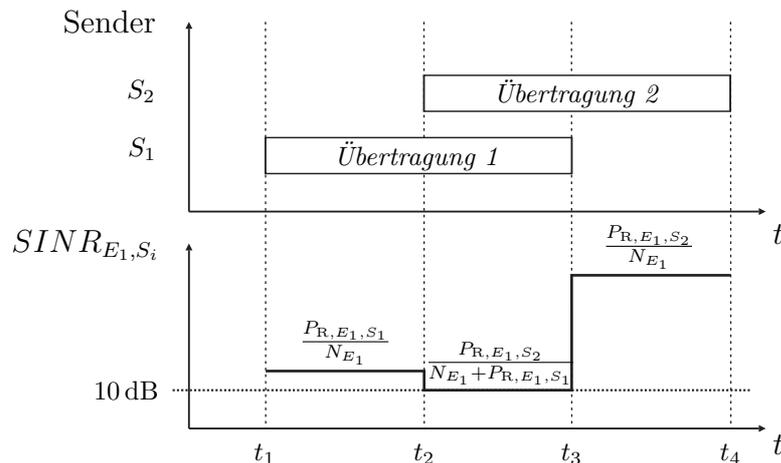


Abbildung 3.2: Übertragung mit  $P_{R,E_1,S_2} \gg P_{R,E_1,S_1}$

Im Unterschied zur Abbildung 3.1 ist in Abbildung 3.2 der Fall dargestellt, in dem die störende Aussendung von  $S_2$  an  $E_1$  eine sehr viel größere Empfangsleistung hervorruft als dies die Übertragung von  $S_1$  bewirkt. Beispielsweise folgt einer Empfangsleistung von  $P_{R,E_1,S_2} = 74,14 \text{ pW}$  bei Verwendung der oben aufgeführten Werte für  $P_{R,E_1,S_1}$  und  $N_{E_1}$  ein  $SINR_{E_1,S_2}$  von 10 dB über  $S_1$  und  $N_{E_1}$ , oder ein  $SINR_{E_1,S_2}$  von 22 dB über  $N_{E_1}$  alleine. Bei einer derartigen Konstellation bricht der Empfänger die Übertragung des Datenpakets von  $S_1$  ab und logt sich auf die Übertragung von  $S_2$  auf. Dieses in der Literatur vielfach beschriebene und in dem Modell für den Medienzugriff in dieser Arbeit ebenfalls verwendete Verfahren des „Capturing“ bewirkt, dass Übertragungen trotz auftretender Kollisionen unter bestimmten Bedingungen dennoch erfolgreich sein können [51, 52, 53, 54, 55].

## 3.5 Evaluierung der Nachrichtenübertragung

Im Folgenden werden die Auswirkungen der Parameter Sendeleistung  $P_{T,S_i}$  und Pfadverlustexponent  $\alpha$  auf die erzielbare Funkreichweite, sowie des bei den Simulationen verwendeten Capturings näher betrachtet.

### 3.5.1 Erzielbare Funkreichweiten

Wird das in den obigen Abschnitten beschriebene Log-Distanz-Pfadverlustmodell zu Grunde gelegt, ergeben sich in Abhängigkeit der Sendeleistung  $P_{T,S_i}$  in mW und des Pfadverlustexponenten  $\alpha$  die in Abbildung 3.3 gezeigten Funkreichweiten  $R_{\text{comm}}$  in m.

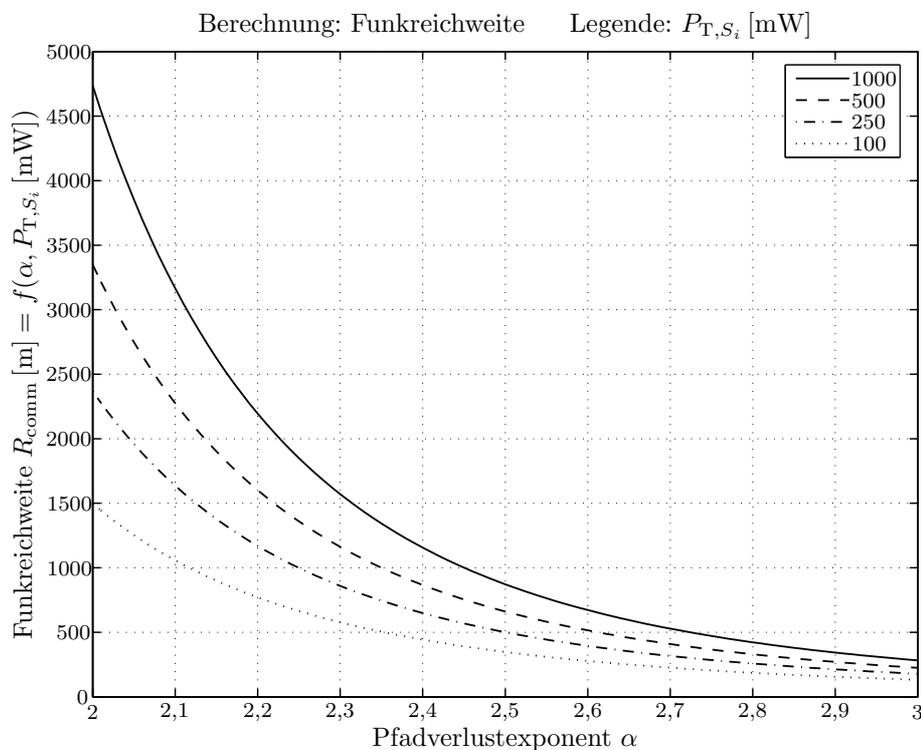


Abbildung 3.3: Funkreichweite  $R_{\text{comm}}$  in Abhängigkeit vom Pfadverlustexponenten  $\alpha$  und der Sendeleistung  $P_{T,S_i}$

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Wert 2,9 für  $\alpha$  ergeben sich für eine Sendeleistung von 100 mW eine Funkreichweite von 155 m, für 1000 mW maximal 342 m.

### 3.5.2 Capturing

Abbildung 3.4 zeigt das Verhältnis der Anzahl gestörter Nachrichtenübertragungen bei aktivem Capturing zu der Anzahl gestörter Übertragungen bei inaktivem Cap-

turing in Abhängigkeit zur Fahrzeugdichte. Die Fahrzeugdichte gilt dabei jeweils für Hin- und Rückrichtung. Die Kurve wurde aus den Mittelwerten gestörter Übertragungen von jeweils zehn Simulationsdurchläufen (Abbildung A.18) gewonnen und zeigt, dass bei aktivem Capturing mit einer bis zu zehn Prozent geringeren Übertragungsverlustrate zu rechnen ist.

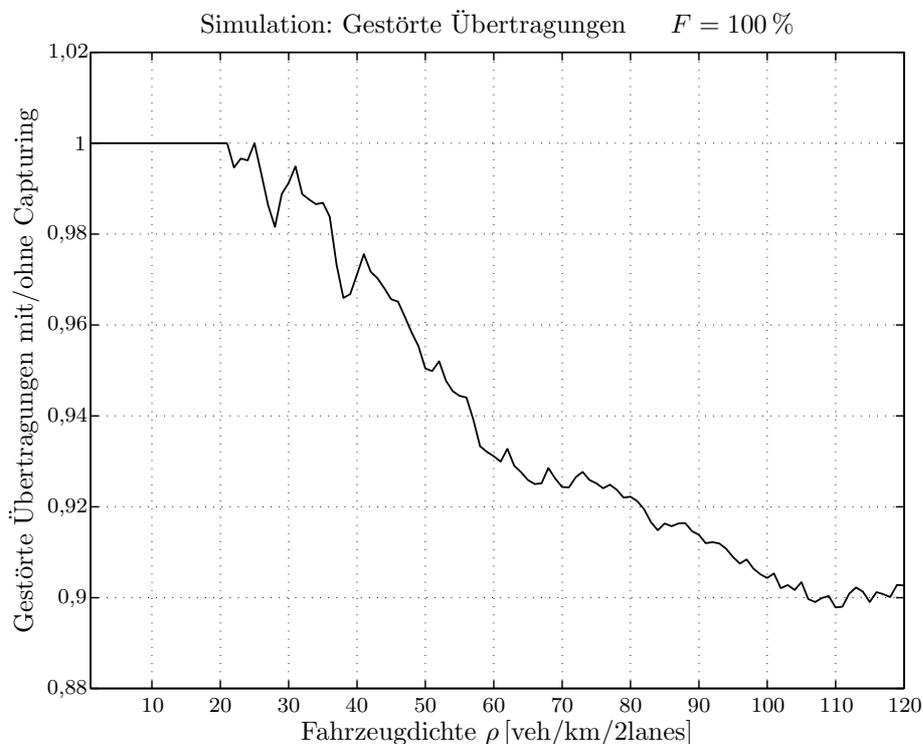


Abbildung 3.4: Verhältnis gestörter Übertragungen mit/ohne Capturing

### 3.5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Eine realitätsnahe Variation der erzielbaren Reichweite ist nur über eine Änderung der Sendeleistung umsetzbar, da der Pfadverlustexponent, wie in Tabelle 3.1 gezeigt, von den nicht beeinflussbaren Ausbreitungsbedingungen abhängt. Eine weitere Möglichkeit der Reichweitensteigerung besteht in der Verwendung gerichteter Antennen. Im Kontext dieser Arbeit wird allerdings immer von omnidirektional strahlenden Antennen ausgegangen, da es, beispielsweise bedingt durch die nicht definierte Ausrichtung des Fahrzeugs zum Unfallzeitpunkt im Fall eines durch ein Unfallfahrzeug repräsentierten Senders, keine bevorzugte Senderichtung geben kann.

Abbildung 3.3 verdeutlicht, dass die Erzielung einer Funkreichweite von beispielsweise mehr als 500 m bei dem zu Grunde gelegten Modell zu hohen Sendeleistungen führt. Da bei einem realen System die mögliche abstrahlbare Leistung begrenzt ist, sind für die Überbrückung größerer Entfernungen weitere Maßnahmen notwendig.

# Kapitel 4

## Informationsweiterleitung

Ziel des folgenden Kapitels ist die Entwicklung einer Strategie, mit der Informationen mit möglichst geringen Bandbreitenanforderungen in einem Funknetz ohne feste Infrastruktur verteilt werden können. Der Fokus liegt dabei auf für den Fahrzeugverkehr sicherheitsrelevanten Nachrichten wie beispielsweise Mitteilungen über plötzliche und starke Bremsvorgänge oder Unfälle. Dazu werden zunächst mögliche Ausgangsszenarien näher beleuchtet. Neben Betrachtungen über die zu erwartenden Randbedingungen bei der Kommunikation von Fahrzeugen untereinander werden Konzepte entwickelt, mit deren Hilfe der im Rahmen dieser Arbeit entworfene und am Ende des Kapitels vorgestellte und evaluierte Algorithmus zur Informationsweiterleitung Wirksamkeit entfalten kann.

### 4.1 Ausgangssituation

Die Ausgangssituation bei der Weiterleitung sicherheitsrelevanter Nachrichten ist abhängig von den zu Grunde liegenden Szenarien. Bei der in dieser Arbeit hauptsächlich betrachteten Weiterleitung von Notfallnachrichten sind drei mögliche Situationen zu untersuchen:

#### **Szenario 1**

Durch den Unfall wird das Sendegerät des Fahrzeuges zerstört bevor eine vollständige Notfallnachricht gesendet werden kann.

#### **Szenario 2 (Worst-Case)**

Das Sendegerät ist vor seiner Zerstörung in der Lage genau eine vollständige Notfallnachricht zu senden.

**Szenario 3**

Das Sendegerät ist auch nach einem Unfall funktionsfähig. □

Situation 1 bedarf keiner weiteren Betrachtung, da in diesem Fall ein Algorithmus nicht zur Anwendung kommen kann. Situation 3 repräsentiert das Gegenteil zur ersten Situation, da auf den Unfallort zufahrende Fahrzeuge durch ein verunfalltes Fahrzeug selbst gewarnt werden. Daher ist eine zusätzliche Warnung durch andere Fahrzeuge unter Anwendung eines Weiterleitungsalgorithmus zwar vorteilhaft, jedoch nicht unbedingt erforderlich. In diesem Kapitel wird daher ausschließlich das Worst-Case-Szenario betrachtet. Dies bedeutet, dass es nur eine einzige Nachricht gibt, die vom Unfallfahrzeug ausgesendet werden kann. Unabhängig von dieser ungünstigen Ausgangslage soll dennoch jedes entsprechend ausgestattete Fahrzeug mit einer möglichst geringen Anzahl von Nachrichtenwiederholungen erreicht werden können. Ungeachtet des Fehlens einer festen Infrastruktur soll das „Gefahrengebiet“ darüberhinaus zumindest über einen bestimmten Zeitraum kontinuierlich mit Information über das betreffende Ereignis versorgt werden können. Das angestrebte Ziel ist somit die Erweiterung der Wahrnehmungsreichweite von Verkehrsteilnehmern in räumlicher wie zeitlicher Hinsicht.

## 4.2 Zonenkonzept

Im Fall eines Unfalls möchte das verunfallte Fahrzeug Verkehrsteilnehmer, die in die durch den Unfall gefährlich gewordenen Bereiche einfahren oder sich bereits in ihnen befinden, warnen. Das Ziel ist es dabei, Informationen über den Unfall schnell und effizient an alle betroffenen Fahrzeuge weiterzugeben.

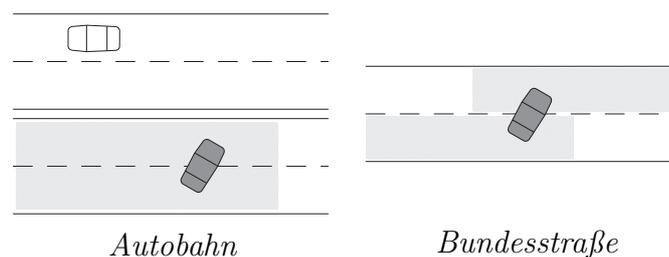


Abbildung 4.1: Relevanzzone und Straßentypen

Dabei müssen zwei verschiedenartige Straßentypen unterschieden werden [56]: Straßentyp A besitzt bauliche Maßnahmen zur Trennung der Richtungsfahrbahnen, beispielsweise in Form von Leitplanken. Bei diesem Typ handelt es sich also um Autobahnen oder autobahnähnlich ausgebaute Bundesstraßen. Straßentyp B besitzt

diese physikalischen Richtungstrenner nicht, es handelt sich somit um gewöhnliche Bundesstraßen, Landes- oder Kreisstraßen (Abbildung 4.1). Für den Straßentyp A bedeckt die Relevanzzone die Region, die sich in Fahrtrichtung hinter dem Unfallfahrzeug und auf der Seite des Unfalls befindet. Der Begriff Relevanzzone verdeutlicht, dass die Information über den Unfall für Fahrzeuge in dieser Zone eine gewisse Relevanz, also Bedeutung, besitzt. Auf Autobahnen betrifft ein Unfall normalerweise nur die Fahrbahnseite, auf der der Unfall stattgefunden hat. Für den Straßentyp B wird ein verunfalltes Fahrzeug im Allgemeinen beide Fahrbahnrichtungen involvieren. Konsequenterweise befinden sich alle Verkehrsteilnehmer, die sich dem Unfall nähern, in der Relevanzzone, und zwar unabhängig davon, aus welcher Richtung sie dies tun.

**Definition 4.1** (Relevanzzone)

Die Relevanzzone kennzeichnet die Fahrbahnabschnitte einer Straße, in denen die Information über ein Ereignis für das informierte Fahrzeug eine Bedeutung besitzt.  $\square$

Relativ zum verunfallten Fahrzeug lassen sich die Fahrbahnen einer Straße zusätzlich in verschiedene Verkehrszonen einteilen:

**Definition 4.2** (Gefahrenzone)

Fahrzeuge in der Gefahrenzone bewegen sich auf den Unfallort zu und sind nicht durch bauliche Maßnahmen wie beispielsweise Leitplanken von dem Unfallfahrzeug getrennt. Sie können somit direkt in den Unfall involviert werden.  $\square$

**Definition 4.3** (Neutrale Zone)

Fahrzeuge der Neutralen Zone bewegen sich immer vom Unfallort weg. Sie können nicht direkt in den Unfall involviert werden. Eine Neutrale Zone existiert nur, wenn die Fahrbahnen der Straße richtungsweise durch bauliche Maßnahmen getrennt sind.  $\square$

**Definition 4.4** (Gegenzone)

Fahrzeuge der Gegenzone bewegen sich im Allgemeinen vom Unfallort weg. Im Fall von baulichen Maßnahmen zur Richtungstrennung der Fahrbahnen können sie sich auch auf den Unfallort zubewegen, da die Gegenzone in diesem Fall die gesamte Fahrbahn umfasst, die nicht zum Unfallfahrzeug gehört.  $\square$

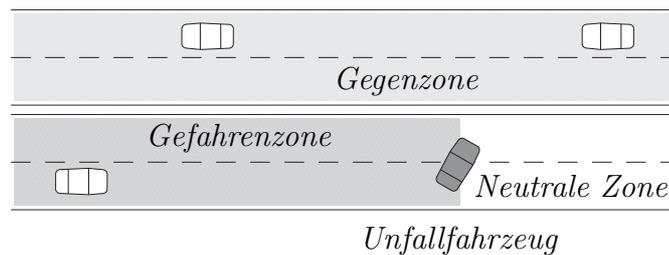


Abbildung 4.2: Verkehrszonen bei Straßen mit physikalischer Richtungstrennung

In Abbildung 4.2 wird die Einteilung der Fahrbahnen sowie des darauf fließenden Verkehrs in verschiedene Zonen am Beispiel einer Bundesautobahn gezeigt. Besitzt die Straße keine bauliche Trennung der Fahrbahnen wie in Abbildung 4.3, entfällt die Neutrale Zone, da sich das Unfallfahrzeug nicht mehr einer bestimmten Fahrtrichtung zuordnen lässt. Desweiteren existiert in diesem Fall eine sich in beide Richtungen ausdehnende Gefahrenzone.

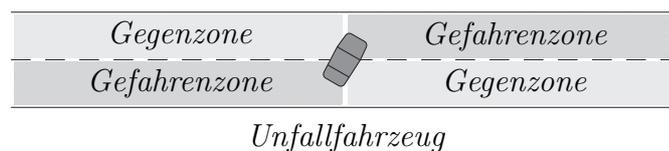


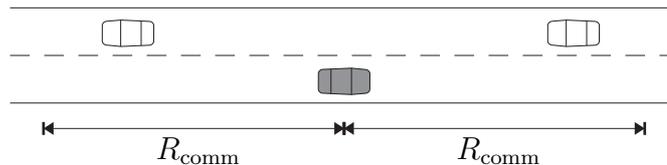
Abbildung 4.3: Verkehrszonen bei Straßen ohne physikalische Richtungstrennung

Die größte Relevanz besitzt die Nachricht über ein verunfalltes Fahrzeug in der Gefahrenzone, da Fahrzeuge dieser Zone direkt in den Unfall involviert werden können. Somit stimmen Relevanzzone und Gefahrenzone in ihrer räumlichen Richtung überein. Der Unterschied in den Definitionen besteht in der zu Grunde liegenden Sichtweise: Während das Konzept der Gefahrenzone eine rein verkehrsbezogene Sicht repräsentiert, ist das Konzept Relevanzzone allgemeiner: Selbst nach dem Passieren einer Gefahrenstelle muss die Relevanz einer Nachricht für das passierende Fahrzeug nicht schlagartig auf Null sinken. Das Ereignis selbst stellt zwar keine Gefahr mehr da, jedoch kann das Fahrzeug weiterhin Aufgaben im Weiterleitungsprozess wahrnehmen. Der Begriff Relevanzzone steht damit sowohl für eine verkehrs- als auch für eine nachrichtenbezogene Sichtweise.

### 4.3 Funk- und Informationsreichweite

Die Funkreichweite eines Fahrzeuges hängt im Wesentlichen von der verfügbaren Sendeleistung, den Antennenhöhen und den Eigenschaften des Funkkanals ab. Die-

se Faktoren bestimmen den direkt erreichbaren Abdeckungsgrad. Bei Verwendung omnidirektionaler Antennen kann eine kreisförmige Abdeckung der Umgebung mit einem Radius von  $R_{\text{comm}}$  um den Sender herum angenommen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass ein Fahrzeug alle anderen Verkehrsteilnehmer in diesem Gebiet direkt und gleichzeitig erreichen kann.

Abbildung 4.4: Funkreichweite  $R_{\text{comm}}$ 

Die erzielbare Informationsreichweite bezieht sich auf einzelne Nachrichten und ist als ein Maß dafür zu verstehen, welchen Weg die Nachricht von der Quelle zur Senke zurückzulegen im Stande war. Bei der Benutzung von Multi-Hop-Techniken wird die Informationsreichweite im Allgemeinen sehr viel größer sein als die Funkreichweite (Abbildung 4.5). Als Ausnahme kann eine Übertragung gelten, bei der ein Multi-Hop nicht zustande gekommen ist und auf Grund hoher Interferenzen der Empfang des Signals im Außenbereich der Funkreichweite noch, die Dekodierung des Nachrichteninhaltes aber nicht mehr möglich ist.

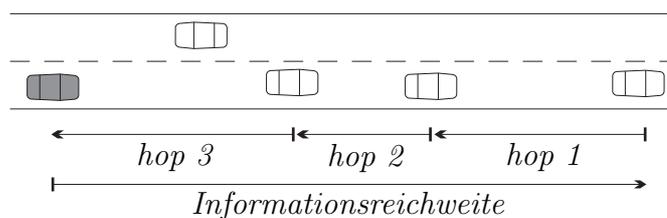


Abbildung 4.5: Informationsreichweite

Der in Abschnitt 4.8 vorgestellte Algorithmus versucht die Informationsreichweite einer Nachricht über die Funkreichweite hinaus auszudehnen. Dies soll durch die Weitergabe der Nachrichten über mehrere Fahrzeuge hinweg erreicht werden (Abbildung 4.5). Dabei sorgt der Algorithmus dafür, dass Nachrichten nicht beliebig weit weitergegeben werden.

## 4.4 Kommunikationsdauer

Die mögliche Kommunikationsdauer zwischen zwei Fahrzeugen ist abhängig von deren relativer Geschwindigkeit. Mit steigender Relativgeschwindigkeit verkürzt sich die Dauer der möglichen Kommunikation. Somit besteht ein problematischer Fall darin, wenn sich zwei Fahrzeuge entgegenkommen. Diese Art der Kommunikation wird von dem in Abschnitt 4.8 vorgestellten Algorithmus jedoch benötigt, um resistenter gegen Abrisse in der Weiterleitungskette zu sein. Studien über die mögliche Kommunikationsdauer zwischen Fahrzeugen werden unter anderem in [57, 58] vorgestellt. In der klassischen Fahrzeugtheorie werden die Werte der vorkommenden Geschwindigkeiten als normalverteilt angenommen [10, 59]. Neuere Untersuchungen in [60] gehen von einer komplexeren Verteilung aus, im Rahmen der hier vorgenommenen Abschätzung werden aber die Annahmen der klassischen Theorie als ausreichend betrachtet. Die Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion  $f_v(v)$  der Geschwindigkeit genügt somit der Form:

$$f_v(v) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(v-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad (4.1)$$

wobei gemäß der üblichen Bezeichnungen  $\mu$  und  $\sigma^2$  die Durchschnittsgeschwindigkeit und die Varianz der Geschwindigkeit darstellen. Die Wahrscheinlichkeits-Verteilungsfunktion  $F_V(v) = P(v \leq V)$  ergibt sich durch Integration zu:

$$P(v \leq V) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^V e^{-\frac{(v-\mu)^2}{2\sigma^2}} dv \quad . \quad (4.2)$$

Betrachtet werden sollen zwei Fahrzeuge mit den jeweiligen Geschwindigkeiten  $v_1$  und  $v_2$ , wobei  $v_1$  und  $v_2$  normalverteilte Zufallsvariablen sind.  $P(\Delta v) = P(v_2 - v_1)$  bezeichnet die Wahrscheinlichkeit der Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v$  der beteiligten Fahrzeuge. Gemäß der Gesetze der Statistik stellt  $\Delta v$  ebenfalls eine normalverteilte Zufallsvariable dar, wobei  $\mu_{\Delta v} = \mu_2 - \mu_1$  und  $\sigma_{\Delta v}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$  gilt. Durch die Bedingung  $\mu_2 = \mu_1$  ist die Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion  $f_{\Delta v}(\Delta v)$  symmetrisch zum Nullpunkt.

Der Abstand  $\Delta x$  zwischen den Fahrzeugen kann als Funktion der relativen Geschwindigkeit  $\Delta v$  und der Zeit  $t$  berechnet werden:  $\Delta x(t) = \Delta v \cdot t$ . Aus diesem Grund ist  $\Delta x$  ebenfalls eine normalverteilte Zufallsvariable. Die Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v$  kann sowohl positive als auch negative Werte annehmen. Beispielsweise gilt für den Fall, dass das Referenzfahrzeug ein Fahrzeug überholt  $\Delta v > 0$ , für den Fall, dass das Referenzfahrzeug von einem Fahrzeug überholt wird  $\Delta v < 0$ . Beide Fälle sind unter praktischen Gesichtspunkten identisch. Daher können die Betrachtungen für  $F_V(\Delta v) = P(\Delta v \leq V)$  auf den Fall  $\Delta v \geq 0$  beschränkt werden:

$$P(\Delta v \leq V) = \frac{2}{\sigma_{\Delta v} \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^V e^{-\frac{(\Delta v - \mu_{\Delta v})^2}{2\sigma_{\Delta v}^2}} d\Delta v \quad . \quad (4.3)$$

Der Abstand zwischen zwei Fahrzeugen, innerhalb dessen direkte Kommunikation möglich ist, reicht von  $\Delta x = -R_{\text{comm}}$  bis  $\Delta x = R_{\text{comm}}$ , wobei  $R_{\text{comm}}$  der Funkreichweite aus Abbildung 4.4 entspricht. Die Wegstrecke mit der Möglichkeit direkter Kommunikation entspricht somit  $\Delta x = 2 \cdot R_{\text{comm}}$ .

Die Wahrscheinlichkeits-Verteilungsfunktion  $F_T(t) = P(t \leq T)$  kann mittels

$$\begin{aligned} d\Delta v_{(\text{opp})} &= |\Delta v'_{(\text{opp})}(t_{(\text{opp})})| \cdot dt_{(\text{opp})} \\ \Delta x &= 2 \cdot R_{\text{comm}} \end{aligned} \quad (4.4)$$

aus (4.3) durch Substitution gewonnen werden:

$$P(t \leq T) = \frac{2}{\sigma_{\Delta v} \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^T e^{-\frac{(2 \cdot R_{\text{comm}} - \mu_{\Delta v})^2}{2\sigma_{\Delta v}^2}} \cdot |\Delta v'(t)| dt \quad . \quad (4.5)$$

Betrachtet werden sollen wiederum zwei Fahrzeuge mit den jeweiligen Geschwindigkeiten  $v_1$  und  $v_2$ , wobei  $v_1$  und  $v_2$  normalverteilte Zufallsvariablen sind.  $P(\Delta v_{\text{opp}}) = P(v_2 + v_1)$  stellt die Wahrscheinlichkeit der Geschwindigkeitsdifferenz  $\Delta v_{\text{opp}}$  der beteiligten Fahrzeuge dar. Gemäß der Gesetze der Statistik stellt  $\Delta v_{\text{opp}}$  ebenfalls eine normalverteilte Zufallsvariable dar, wobei  $\mu_{\Delta v_{\text{opp}}} = \mu_2 + \mu_1$  und  $\sigma_{\Delta v_{\text{opp}}}^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2$  gilt.

Um die Kommunikationsdauer für Gegenverkehr zu berechnen, muss  $v$  durch  $\Delta v_{\text{opp}}$  in (4.2) zu  $F_V(\Delta v_{\text{opp}}) = P(\Delta v_{\text{opp}} \leq V)$  substituiert werden:

$$P(\Delta v_{\text{opp}} \leq V) = \frac{1}{\sigma_{\Delta v_{\text{opp}}} \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^V e^{-\frac{(\Delta v_{\text{opp}} - \mu_{\Delta v_{\text{opp}}})^2}{2\sigma_{\Delta v_{\text{opp}}}^2}} d\Delta v_{\text{opp}} \quad , \quad (4.6)$$

woraus wiederum mit den Substitutionen aus (4.4) die Wahrscheinlichkeits-Verteilungsfunktion  $F_T(t_{\text{opp}}) = P(t_{\text{opp}} \leq T)$  gewonnen werden kann:

$$P(t_{\text{opp}} \leq T) = \frac{1}{\sigma_{\Delta v_{\text{opp}}} \sqrt{2\pi}} \cdot \int_0^T e^{-\frac{(2 \cdot R_{\text{comm}} - \mu_{\Delta v_{\text{opp}}})^2}{2\sigma_{\Delta v_{\text{opp}}}^2}} \cdot |\Delta v'_{\text{opp}}(t_{\text{opp}})| dt_{\text{opp}} \quad . \quad (4.7)$$

Für die Abschätzung möglicher Kommunikationsdauern müssen nunmehr die Parameter der zu Grunde liegenden Verteilung bestimmt werden. Die in [61] durchgeführten empirischen Untersuchungen haben ergeben, dass im Schnitt mit einem

Anteil von 14,9% Schwerlastverkehr am Gesamtfahrzeugverkehr zu rechnen ist. Die Daten aus [62] deuten für diese Verkehrsart auf eine Geschwindigkeit von 85 km/h hin.

Eine Eigenschaft der Normalverteilung besteht darin, dass der Flächeninhalt unter der Kurve im Intervall von  $-\infty$  bis zum ersten Wendepunkt in Näherung 0,158 beträgt. Wird der Anteil des Schwerlastverkehrs geringfügig höher als in [61] angegeben mit 15,8% angesetzt, und wird davon ausgegangen, dass dieser maximal 85 km/h schnell ist, so kann die Standardabweichung direkt durch  $\sigma = \mu - v_{\max, \text{Lkw}}$  bestimmt werden. Mit  $\mu = v_{\text{avg}}$  ergeben sich die Parameter der Verteilung (4.2) beispielsweise zu  $\mu = 130$  km/h und  $\sigma = 45$  km/h. Werte für die Wahrscheinlichkeit einer Kommunikationsdauer  $T$  bei der im Rahmen dieser Arbeit hauptsächlich betrachteten Funkreichweite von  $R_{\text{comm}} = 150$  m zeigt Abbildung 4.6.

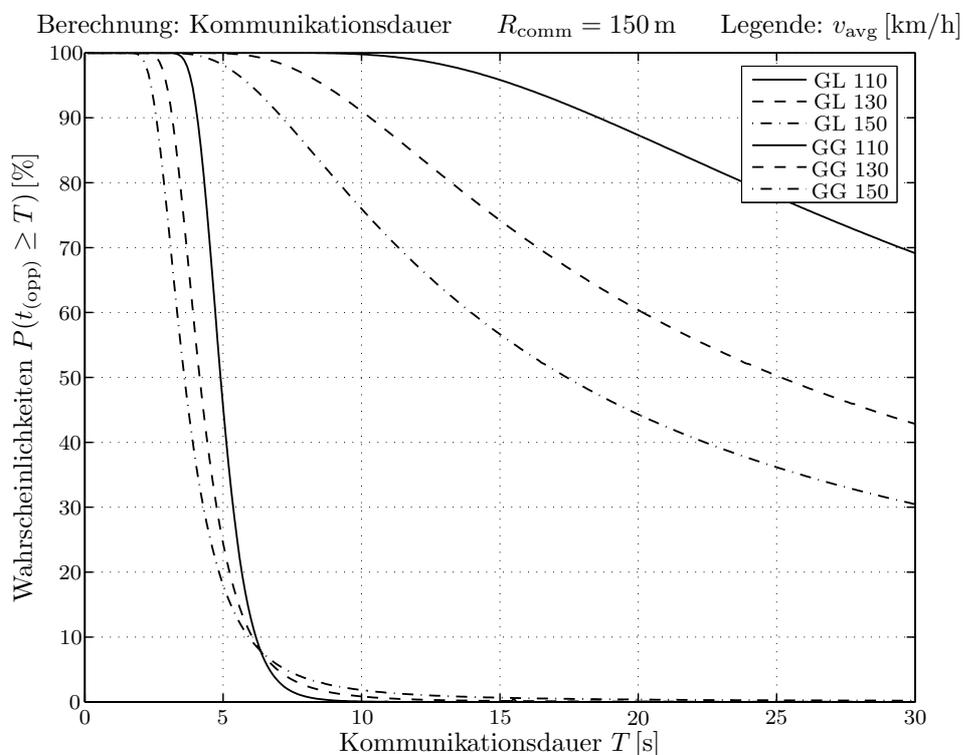


Abbildung 4.6: Wahrscheinlichkeiten möglicher Kommunikationsdauern für Gleich- und Gegenverkehr in Abhängigkeit der Durchschnittsgeschwindigkeit  $v_{\text{avg}}$

Wie erwartet stellt Gegenverkehr das anspruchsvollere Szenario für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen dar, da bereits ab einer Übertragungszeit von 3 Sekunden kein sicherer Kontakt mehr gewährleistet ist. Resultierend aus den in Abbildung 4.6 dargestellten Werten, muss ein Kommunikationssystem unter den gegebenen Voraussetzungen somit in der Lage sein, mit maximal 3 Sekunden Kontaktzeit eine Übertragung durchzuführen.

## 4.5 Zeit zwischen periodischen Aussendungen

Neben den zu erwartenden Kommunikationsdauern ist zudem die Zeit wichtig, die zwischen den periodischen Aussendungen einer Notfallnachricht liegen darf. Dies kann durch eine einfache Überlegung abgeschätzt werden: In Folge des in Abbildung 4.7 dargestellten Unfalls wird zur Zeit  $t_{\text{acc}}$  eine Notfallnachricht durch das Unfallfahrzeug  $A$  gesendet. Fahrzeug  $B$  befindet sich zum Zeitpunkt  $t_{\text{acc}}$  gerade noch nicht in direkter Kommunikationsreichweite, so dass es die Ursprungsnachricht nicht empfangen kann ( $\Delta x_{\text{acc},B}(t_{\text{acc}}) > R_{\text{comm}}$ ). Fahrzeug  $B$  bewegt sich auf den Ort des Unfalls zu. Bedingung ist nun, dass das Fahrzeug  $B$  spätestens dann gewarnt werden soll, wenn es den Abstand zum Unfallpunkt erreicht hat, der für ein sicheres Abbremsen aus der gegebenen Geschwindigkeit notwendig ist.

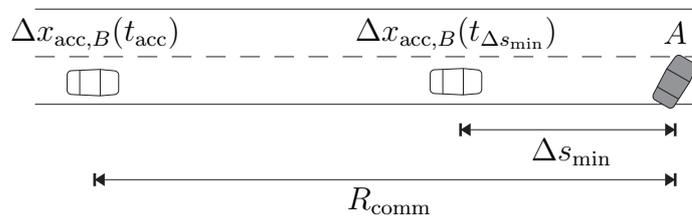


Abbildung 4.7: Maximale Zeit zwischen periodischen Aussendungen

Angenommen Fahrzeug  $B$  bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von  $v = 200 \text{ km/h}$  auf den Unfallpunkt zu, die Gesamtreaktionszeit von Mensch und Auto beträgt  $\Delta t_{\text{delay}} = 1,4 \text{ s}$ , und die maximal mögliche Verzögerung des Fahrzeugs ist  $-a = 5 \text{ m/s}^2$ . Dann ergibt sich für diese Werte unter Benutzung von (4.8) der minimale Abstand für eine sichere Bremsung zu  $387 \text{ m}$ . Im Fall einer Geschwindigkeit von  $v = 130 \text{ km/h}$  verringert sich der Mindestabstand auf  $181 \text{ m}$ .

$$\Delta s_{\text{min}} = -\frac{v^2}{2a} + v \cdot \Delta t_{\text{delay}} \quad (4.8)$$

Um die maximale Dauer zwischen zwei Wiederholungen zu berechnen, müssen nun die Zeiten  $t_{R_{\text{comm}}}$ , wenn Fahrzeug  $B$  den Kommunikationsradius von  $A$ , und  $t_{\Delta s_{\text{min}}}$ , wenn Fahrzeug  $B$  den Mindestabstand für eine sichere Bremsung erreicht, betrachtet werden. Mit Hilfe von (4.9) ergibt sich die maximale Dauer zwischen zwei Wiederholungen zu  $\Delta t_{\text{max},200} = 11 \text{ s}$  für  $v = 200 \text{ km/h}$  und  $\Delta t_{\text{max},130} = 22,7 \text{ s}$  für  $v = 130 \text{ km/h}$ .

$$\Delta t_{\text{max}} = t_{\Delta s_{\text{min}}} - t_{R_{\text{comm}}} = \frac{R_{\text{comm}} - \Delta s_{\text{min}}}{v} \quad (4.9)$$

Wie Tabelle 4.1 aus [63] zeigt, ist der angenommene Wert  $-a = 5 \text{ m/s}^2$  für die

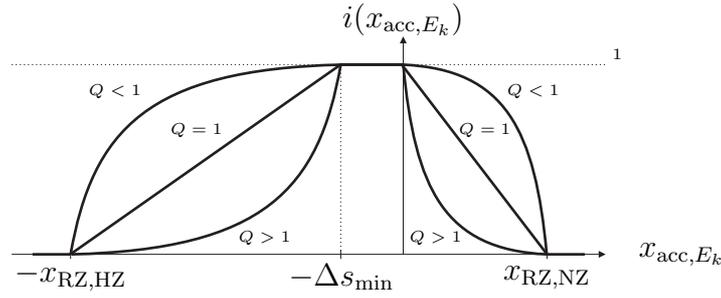
Bremsverzögerung eines Fahrzeuges geringer als im Normalfall erwartet werden darf. Sowohl dieser Wert als auch die hohe Geschwindigkeit von  $v = 200 \text{ km/h}$  können verwendet werden, um einen zusätzlichen Sicherheitsgewinn zu erzielen.

Tabelle 4.1: Exemplarische Werte möglicher Bremsverzögerungen  $-a$ 

	$-a \text{ [m/s}^2\text{]}$
Trockene Asphaltfahrbahn oder Schwarzdecke	7,5 - 8,0
Nasse Asphaltfahrbahn oder Schwarzdecke	6,0
Trockene Betonfahrbahn	7,5
Nasse Betonfahrbahn (neue Bauart)	7,0
Nasse Betonfahrbahn (alte Bauart)	5,0
Trockenes Pflaster (Verbundsteine)	7,0
Nasses Pflaster (Verbundsteine)	5,5
Trockenes Kopfsteinpflaster	6,0
Nasses Kopfsteinpflaster	5,0
Trockener Sand oder Kies	5,5
Nasser Sand oder Kies	4,5
Schneebedeckte Fahrbahn	2,0 - 3,0
Eis (abhängig von der Eistemperatur)	0,5 - 2,0
Lkw, unbeladen, trockene Fahrbahn	5,0
PKW, nasse Fahrbahn	4,5
PKW, nasser Asphalt	5,5
PKW, beladen, trockener Beton	6,0
PKW, trockene Fahrbahn	6,5
PKW, ABS	7,5
PKW, besonders griffige Fahrbahn	8,0

## 4.6 Bedeutung einer Nachricht

Die Entscheidung, ob empfangene Nachrichten weitergegeben werden sollen oder nicht, wird anhand verschiedener Berechnungen durchgeführt. Jede Nachricht besitzt mathematisch formulierbare Eigenschaften für den jeweiligen Empfänger. Ein Fahrzeug, das eine Nachricht empfangen hat, wird diese beispielsweise nur löschen, wenn die Bedeutung  $i$  der Nachricht für den Empfänger  $E_k$  identisch Null ist. Die Bedeutung einer Nachricht hängt sowohl von ihrem Inhalt ab als auch von der räumlichen Entfernung zum Ort des Ereignisses. Wie in Abbildung 4.8 dargestellt, lässt sich eine Funktion  $i(x_{acc,E_k})$  definieren, die die Bedeutung einer Nachricht in Abhängigkeit von ihrem Ursprungsort beschreibt.


 Abbildung 4.8: Nachrichtenbedeutung als Funktion zur Basis  $Q$ 

Mit  $Q \in \mathbb{R}^+ \setminus 0$  gilt:

$$i(x_{\text{acc}, E_k}, Q) = \begin{cases} \frac{1}{Q-1} \cdot \left( Q^{\frac{x_{\text{RZ}, \text{HZ}} + x_{\text{acc}, E_k}}{x_{\text{RZ}, \text{HZ}} - \Delta s_{\text{min}}}} - 1 \right) & \text{für } -x_{\text{RZ}, \text{HZ}} \leq x_{\text{acc}, E_k} \leq -\Delta s_{\text{min}} \\ 1 & \text{für } -\Delta s_{\text{min}} \leq x_{\text{acc}, E_k} \leq 0 \\ \frac{1}{Q-1} \cdot \left( Q^{\frac{x_{\text{RZ}, \text{NZ}} - x_{\text{acc}, E_k}}{x_{\text{RZ}, \text{NZ}}}} - 1 \right) & \text{für } 0 \leq x_{\text{acc}, E_k} \leq x_{\text{RZ}, \text{NZ}} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.10)$$

Mit Hilfe von (4.10) kann die Anzahl von Wiederholungen derselben Nachricht minimiert werden.  $x_{\text{RZ}}$  kennzeichnet die Ausdehnung der Relevanzzone.  $\Delta s_{\text{min}}$  steht für den in Abschnitt 4.5 beschriebenen minimalen Abstand für eine sichere Bremsung.

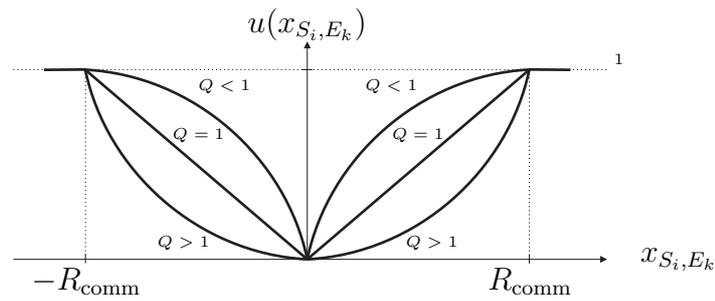
## 4.7 Nutzen einer Nachrichtenwiederholung

Ebenso wie im Fall der Bedeutung einer Nachricht lässt sich der Nutzen  $u$  einer Nachrichtenwiederholung in Abhängigkeit zur Entfernung vom Aussender  $S_i$  definieren. Im Gegensatz zu der zuvor dargestellten Abhängigkeit ist diese Entfernung nicht mehr nachrichtenbezogen, sondern bezogen auf die Position des wiederholenden Fahrzeugs zum Zeitpunkt der Aussendung.

Mit  $Q \in \mathbb{R}^+ \setminus 0$  gilt:

$$u(x_{S_i, E_k}, Q) = \begin{cases} \frac{1}{Q-1} \cdot \left( Q^{\frac{-x_{S_i, E_k}}{R_{\text{comm}}}} - 1 \right) & \text{für } -R_{\text{comm}} \leq x_{S_i, E_k} \leq 0 \\ \frac{1}{Q-1} \cdot \left( Q^{\frac{x_{S_i, E_k}}{R_{\text{comm}}}} - 1 \right) & \text{für } 0 \leq x_{S_i, E_k} \leq R_{\text{comm}} \\ 1 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4.11)$$

Auch mit Hilfe der in Abbildung 4.9 dargestellten und in (4.11) formulierten, den Nutzen einer Nachrichtenwiederholung beschreibenden Funktion  $u(x_{S_i, E_k})$ , lassen sich Wiederholungen gleicher Nachrichten minimieren.  $R_{\text{comm}}$  steht für die in Abbil-

Abbildung 4.9: Wiederholungsnutzen als Funktion zur Basis  $Q$ 

dung 4.4 gezeigte Funkreichweite eines Fahrzeuges,  $E_k$  für den Nachrichteneempfänger.

## 4.8 Algorithmus zur Informationsweiterleitung

Nach den vorhergegangenen Überlegungen bezüglich der Kontaktzeiten zwischen Fahrzeugen und der mathematischen Eigenschaften von Nachrichten soll nunmehr der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Weiterleitungsalgorithmus beschrieben werden. Eine erste Version des Algorithmus wurde vom Autor in [64] vorgestellt und anhand eines einspurigen Straßensystems untersucht.

Der Algorithmus erlaubt es, den Bereich innerhalb der Relevanzzone zu erweitern, in dem ein Fahrzeug in der Lage ist, Nachrichten zu empfangen. Dies soll ohne das Fluten des zu Grunde liegenden Funknetzes mit Nachrichten in alle möglichen Richtungen geschehen. Bei der Anwendung des Algorithmus wird vorausgesetzt, dass alle Fahrzeuge mit omnidirektionalen Antennen ausgerüstet sind, so dass ein Sender alle Fahrzeuge innerhalb seiner Funkreichweite  $R_{\text{comm}}$  direkt erreichen kann. Es wird keine unterstützend wirkende, fest installierte Infrastruktur angenommen, insbesondere setzt der entwickelte Algorithmus keine zusätzliche Infrastruktur neben der Straße voraus. Jedes ausgerüstete Fahrzeug ist in der Lage, beispielsweise über ein satellitengestütztes Ortungssystem seine Position bestimmen zu können. Diese Voraussetzung ist für das Funktionieren des Algorithmus notwendig.

Innerhalb des Algorithmus wird zwischen zwei Arten von Nachrichten unterschieden:

### Definition 4.5 (Notfallnachricht)

Eine Notfallnachricht wird ausgelöst, wenn ein ausgerüstetes Fahrzeug einen Unfall verursacht, oder in eine unfallähnliche Situation gerät. Ressourcen für diese Nachrichtenart müssen nicht angefordert werden.  $\square$

**Definition 4.6** (Weitergeleitete Nachricht)

Ein weitergeleitete Nachricht ist eine ausgesendete Nachricht, die durch die Weiterleitungsregeln und Weiterleitungsstrategien des verwendeten Algorithmus verursacht wird. Ressourcen für diese Nachrichtenart müssen angefordert werden.  $\square$

Gemäß der in Abschnitt 4.1 durchgeführten Überlegungen wird angenommen, dass ein Unfallfahrzeug unter allen Umständen zur Aussendung mindestens einer Nachricht in der Lage ist.

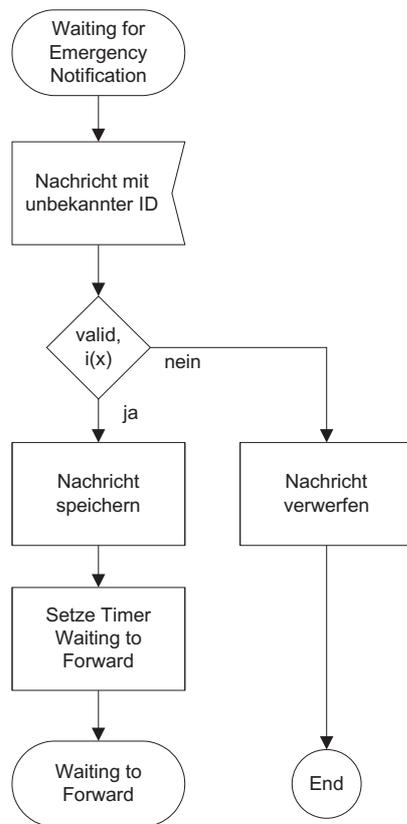


Abbildung 4.10: Weiterleitungsalgorithmus – Waiting for Emergency Notification

In einem ersten Schritt bestimmt der Algorithmus, ob die empfangene Nachricht für den Empfänger neu oder bereits bekannt ist (Abbildung 4.10). Für jede neue Nachricht wird ein eigener Weiterleitungsprozess gestartet. Bedingt durch das Prinzip der Weiterleitung von Nachrichten ist es wahrscheinlich, dass eine Nachricht mehr als einmal empfangen wird. Zu diesem Zweck führt jedes Fahrzeug eine Liste mit bereits erhaltenen Nachrichten. Bereits bekannte Nachrichten verbleiben solange in der Liste, bis ihre Bedeutung oder Gültigkeitsdauer identisch Null ist, während unbekannte Nachrichten der Liste hinzugefügt werden.

Eine Notfallnachricht mit einem internen Zähler  $I_{\text{count}} = 0$  kennzeichnet eine von einem verunfallten Fahrzeug gesendete Originalnachricht. Eine weitergeleitete Nachricht zeichnet sich durch einen Zählerstand  $I_{\text{count}} \geq 1$  aus und kann für das empfangende Fahrzeug neu oder bekannt sein. Dies muss durch einen Vergleich mit bereits empfangenen Nachrichten bestimmt werden (Abbildungen 4.10, 4.11). Falls das verunfallte Fahrzeug in der Lage ist, mehr als eine Notfallnachricht zu senden, wird es diese periodisch wiederholen. In diesem speziellen Fall kann eine Notfallnachricht mit  $I_{\text{count}} = 0$  auch mehrfach empfangen werden.

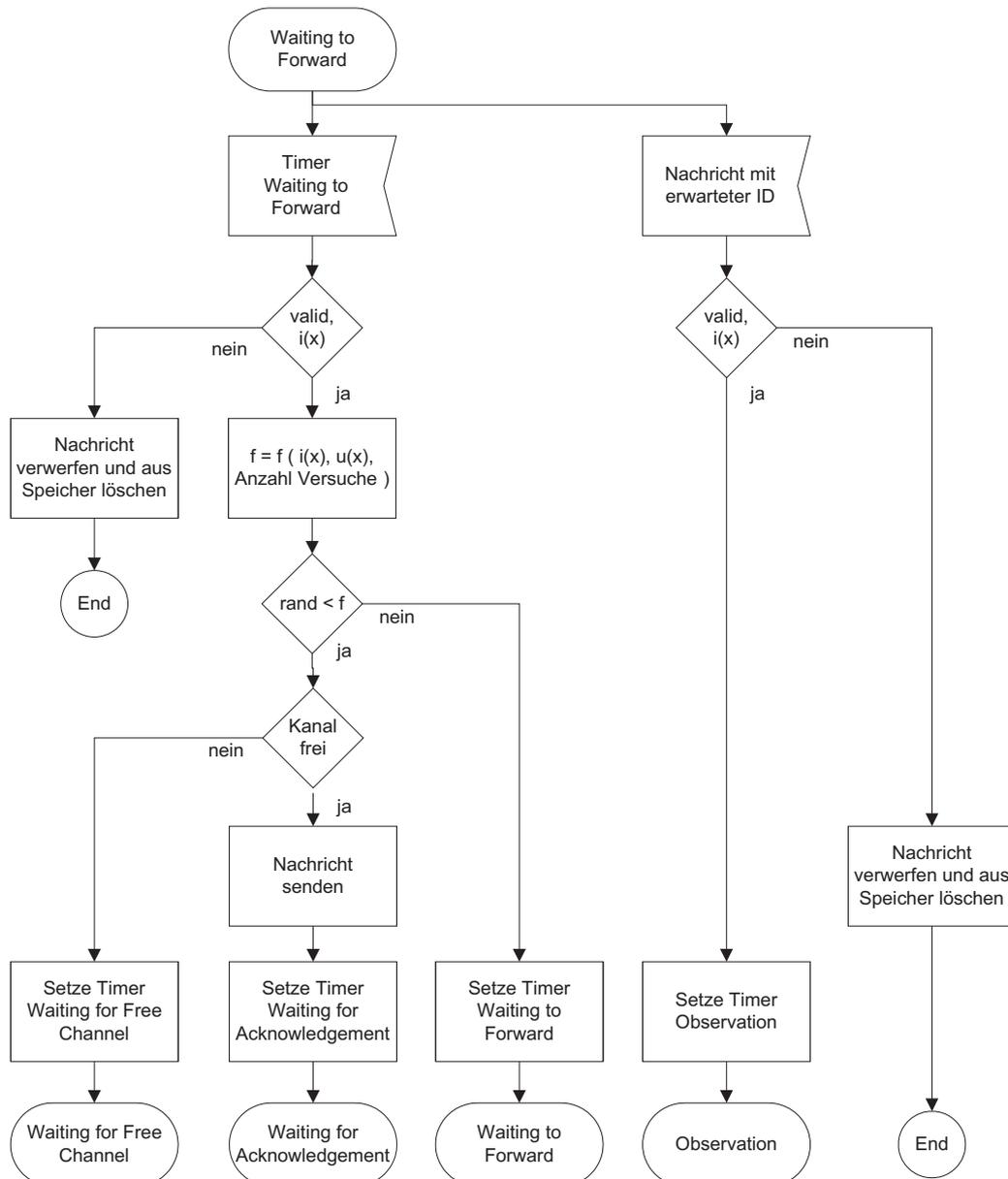


Abbildung 4.11: Weiterleitungsalgorithmus – Waiting to Forward

Ein eine Notfallnachricht empfangendes Fahrzeug prüft zunächst, ob die Nachricht neu oder bereits bekannt ist. Es bestimmt die mathematischen Eigenschaften dieser Nachricht in Abhängigkeit der eigenen Position, des Abstands  $\Delta x_{acc, E_k}$  zwischen Fahrzeug und Unfallort sowie des Abstands  $\Delta x_{S_i, E_k}$  des empfangenden Fahrzeugs  $E_k$  zum weiterleitenden Fahrzeug  $S_i$  im Fall einer weitergeleiteten Nachricht. Je gefährlicher die Position, umso höher ist beispielsweise die Wahrscheinlichkeit eine Nachricht weiterzuleiten. Aus diesem Grund können Fahrzeuge der Gefahrenzone eine höhere Weiterleitungswahrscheinlichkeit als Fahrzeuge anderer Zonen haben. Handelt es sich um eine neue Nachricht, wechselt das Fahrzeug anschließend in den Waiting to Forward-Status.

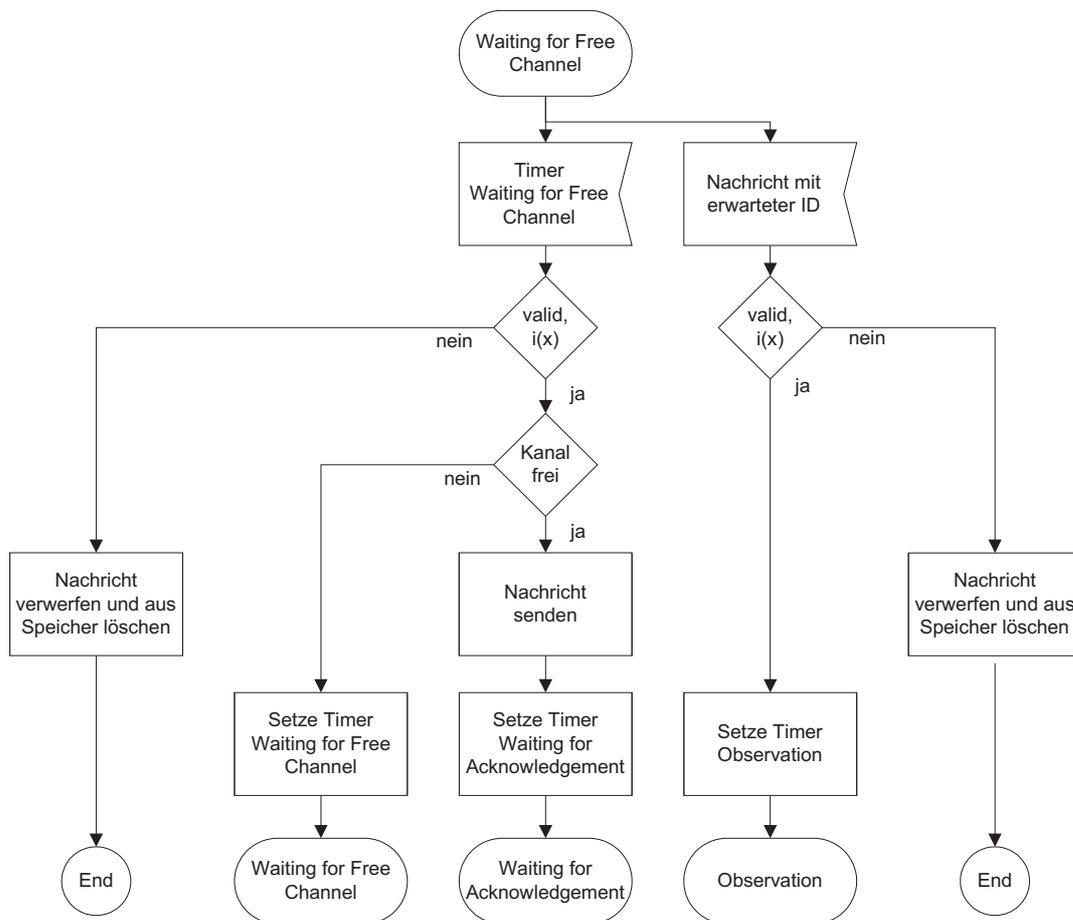


Abbildung 4.12: Weiterleitungsalgorithmus – Waiting for Free Channel

Entscheidet das Fahrzeug im Waiting to Forward-Status die Nachricht nicht weiterzuleiten, wird diese auf einen internen Speicher gelegt, so dass sie für einen späteren Weiterleitungsversuch zur Verfügung steht. Wird während dieser Versuche eine weitergeleitete Nachricht über den gleichen Sachverhalt empfangen wie es dem Fahrzeug durch den Empfang der Notfallnachricht bereits bekannt ist, wird die weitergeleitete Nachricht als implizite Bestätigung eines erfolgreich durchgeführten Weiterleitungsprozesses angesehen.

Ziel dieses Verhaltens ist es, den Algorithmus sowohl widerstandsfähiger gegen Unterbrechungen in der Weiterleitungskette zu machen als auch ein Fluten des Netzes mit zahllosen Wiederholungen und expliziten Bestätigungen von Nachrichten zu vermeiden. Gesetzt den Fall, dass das Fahrzeug keine weitergeleitete Nachricht als Bestätigung der erhaltenen Notfallnachricht empfängt, wird es in periodischen Abständen und mit steigender Wahrscheinlichkeit versuchen, einen eigenen Weiterleitungsprozess einzuleiten. Die Versuche werden erst eingestellt, wenn entweder eine implizite Bestätigung durch ein anderes Fahrzeug empfangen wurde oder die Bedeutung der Notfallnachricht auf Null gesunken ist.

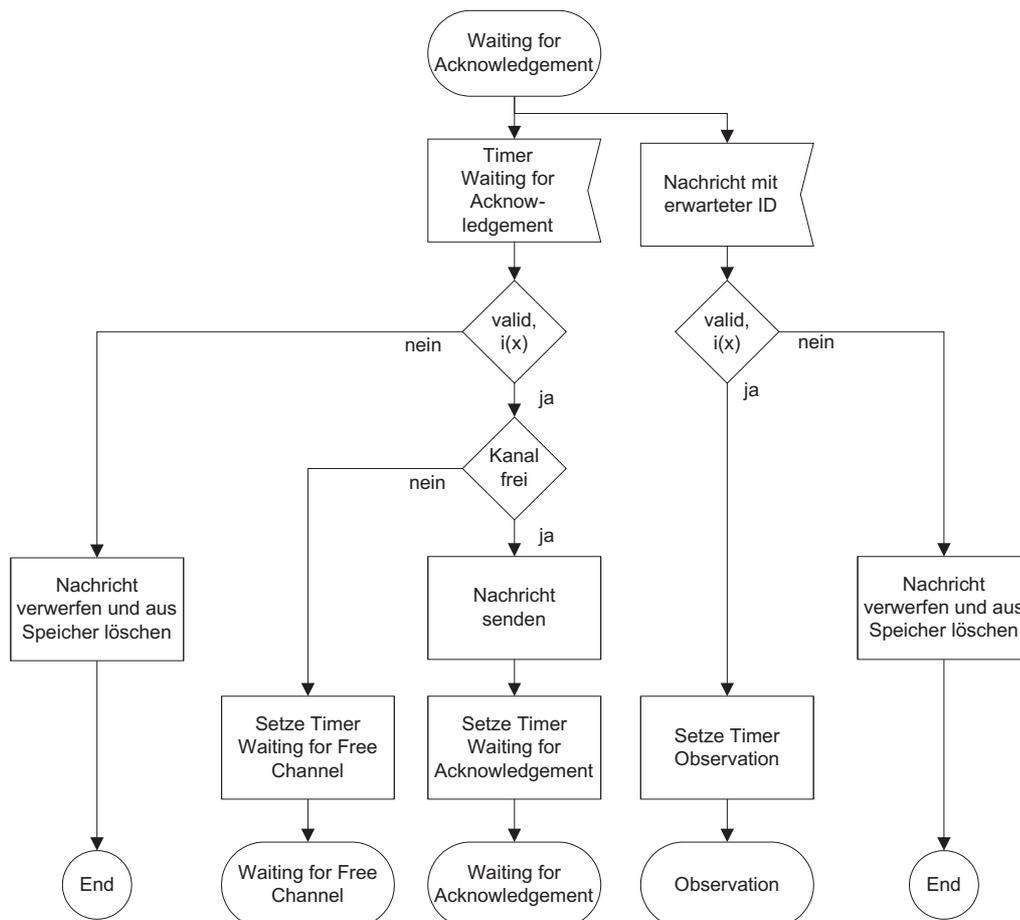


Abbildung 4.13: Weiterleitungsalgorithmus – Waiting for Acknowledgement

Entscheidet sich das Fahrzeug, die Weiterleitungsaufgabe zu übernehmen, wechselt es nach dem Senden der Nachricht in den Waiting for Acknowledgement-Status (Abbildung 4.13). In diesem Status wird es die Notfallnachricht solange wiederholen, bis eine entsprechende Bestätigung in Form einer weitergeleiteten Nachricht empfangen wurde. In diesem Fall kann das sendende Fahrzeug sicher sein, dass seine Wiederholung von anderen Fahrzeugen empfangen wurde und der Weiterleitungsprozess nicht abbricht. Die Anzahl periodischer Wiederholungen ist prinzipiell unbegrenzt.

Das Fahrzeug wird wie zuvor die Aussendungen einstellen, sobald die Bedeutung der Nachricht auf Null gesunken ist. Ziel dieses Verhaltens ist es wiederum, den Algorithmus widerstandsfähiger gegenüber Unterbrechungen der Weiterleitungskette zu machen. Das jeweils letzte wiederholende Fahrzeug wird seine Aufgabe solange ausüben, bis ein anderes Fahrzeug die Weiterleitung übernimmt.

In jedem Zustand – auch während des Wartens auf einen freien Kanal (Abbildung 4.12) – wird bei Empfang einer impliziten Bestätigung durch ein anderes Fahrzeug in den Observation-Status gewechselt (Abbildung 4.14). Das Fahrzeug verharrt in diesem Zustand, solange es in bestimmten Mindestabständen weitere Bestätigungen des Weiterleitungsprozesses empfängt und die Bedeutung der Nachricht nicht auf Null gesunken ist. Sollten die Bestätigungen ausbleiben, wechselt es in den Waiting to Forward-Status und nimmt somit den aktiven Weiterleitungsprozess wieder auf.

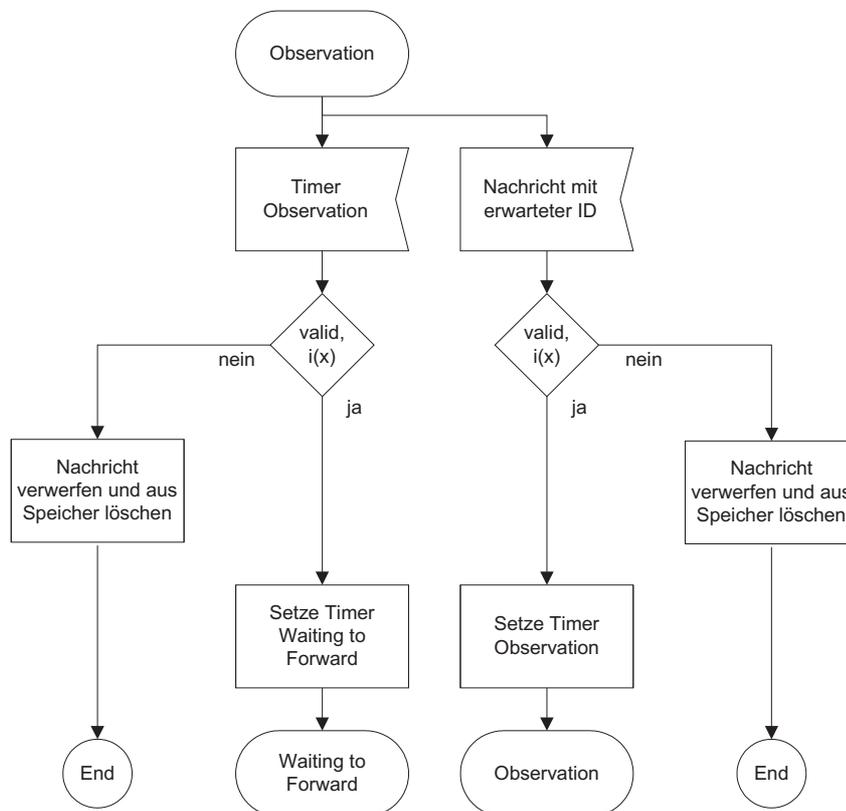


Abbildung 4.14: Weiterleitungsalgorithmus – Observation

Der Algorithmus stellt sicher, dass nicht jedes eine Nachricht empfangende Fahrzeug diese auch weitersenden wird. Am Weiterleitungsprozess beteiligen sich aktiv nur die Fahrzeuge, für die die Bedeutung der Nachricht hoch genug ist. Dies wird gesteuert über eine Reihe von Abhängigkeiten bezüglich der Weiterleitungswahrscheinlichkeit. Andere Fahrzeuge werden zunächst warten und den Prozess der Weitergabe beob-

achten. Beobachtende Fahrzeuge erhalten die Möglichkeit eines aktiven Einstiegs in den Prozess, indem der Algorithmus periodisch über die Weiterleitung von Nachrichten neu entscheidet. Dieses Verhalten stellt sicher, dass die zur Verfügung stehenden Funkressourcen nicht unnötig belastet werden.

## 4.9 Evaluierung der Informationsweiterleitung

Es wird begonnen mit Untersuchungen, unter welchen Bedingungen der Algorithmus zur Weiterleitung von Nachrichten Wirksamkeit entfalten und welcher Gewinn an Informationsreichweite im Mittel erreicht werden kann. Im Anschluss werden die Eigenschaften und das Verhalten des entwickelten Algorithmus dargestellt. Die den Untersuchungen zu Grunde liegende Fahrzeugdichte gilt jeweils pro Fahrtrichtung. Ihr maximaler Wert (dichtestmögliche Anordnung der Fahrzeuge) in Abhängigkeit des Schwerlastverkehrsanteils kann mit (4.12) bestimmt werden:

$$\rho_{\max} = f(p_{\text{veh}}^{lv}, l_{\text{veh}}, l_{\text{veh}}^{lv}) = \frac{1}{p_{\text{veh}}^{lv} \cdot l_{\text{veh}}^{lv} + (1 - p_{\text{veh}}^{lv}) \cdot l_{\text{veh}}} \quad (4.12)$$

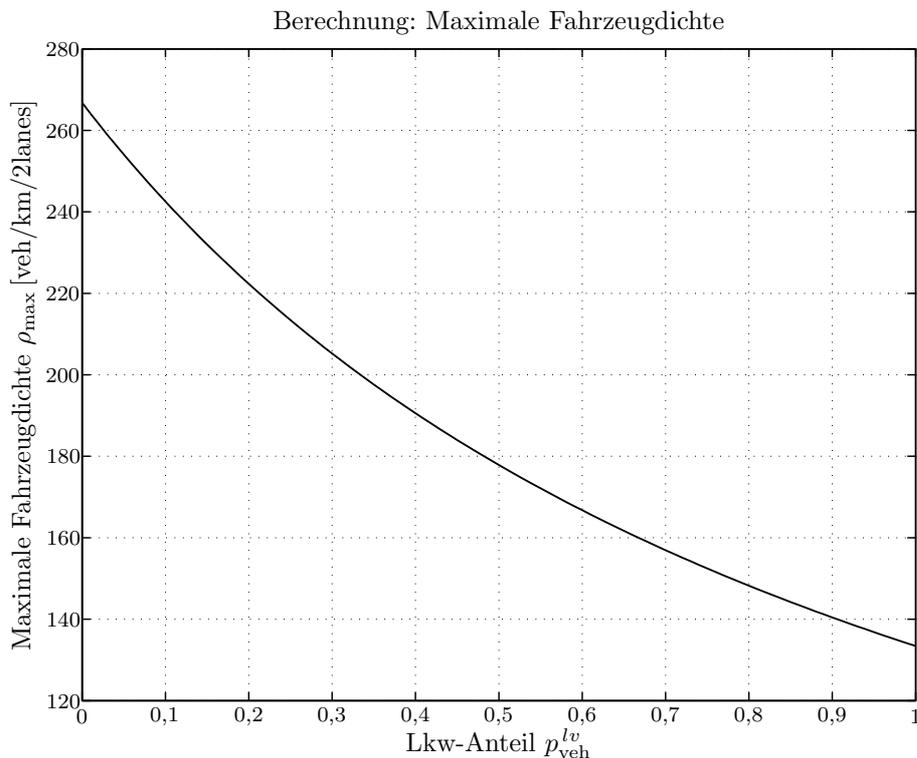


Abbildung 4.15: Maximale Fahrzeugdichte in Abhängigkeit des Lkw-Anteils  $p_{\text{veh}}^{lv}$

Die folgenden Simulationen basieren auf den Werten aus Tabelle 2.1. Damit ergibt sich die maximale Fahrzeugdichte zu 232 veh/km/2lanes.

### 4.9.1 Erstweiterleitung

Der Erfolg des Algorithmus basiert in der Anfangsphase primär auf dem Vorhandensein von mindestens einem weiteren ausgestatteten Fahrzeug innerhalb der direkten Kommunikationsreichweite des verunfallten Fahrzeuges, welches den Weiterleitungsprozess aufnehmen kann. Unter Benutzung der in Abschnitt 4.2 vorgestellten Verkehrszonen wird von drei verschiedenen Situationen ausgegangen:

#### Szenario 1

Ausschließlich Fahrzeuge der Gefahrenzone beteiligen sich am Weiterleitungsprozess.

#### Szenario 2

Ausschließlich Fahrzeuge der Gegenzone beteiligen sich am Weiterleitungsprozess.

#### Szenario 3

Fahrzeuge aller Zonen beteiligen sich am Weiterleitungsprozess.

Ziel ist es zunächst zu ermitteln, ob ein Algorithmus mit Fahrzeugen der Gefahrenzone auskommt, oder ob die Beteiligung von Fahrzeugen aller Zonen für eine erfolgreiche Weiterleitung notwendig ist. Für alle Situationen wird jeweils angenommen, dass das verunfallte Fahrzeug nur zur Aussendung einer einzigen Notfalleinrichtung in der Lage ist.

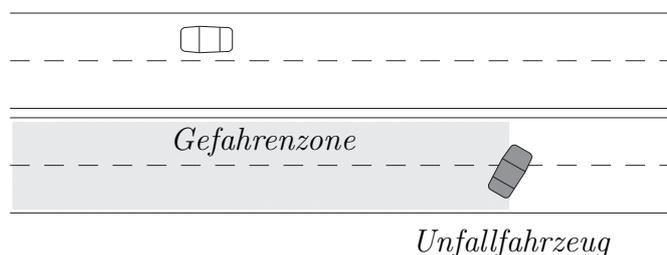


Abbildung 4.16: Gefahrenzone

In einem ersten Schritt werden für die unterschiedlichen Szenarien die jeweiligen Wahrscheinlichkeiten berechnet, dass mindestens ein weiteres ausgestattetes Fahrzeug in den betrachteten Zonen zum Zeitpunkt der Aussendung in Funkreichweite

ist. Die Betrachtungen erstrecken sich auf unterschiedliche Verkehrsdichten und Ausstattungsgrade.

Bei gleichförmiger Bewegung kann die Zeitspanne zwischen den Ankünften zweier Fahrzeuge an einem Wegpunkt zur Bestimmung des Abstands zwischen diesen benutzt werden. Bei konstanten Geschwindigkeiten ist daher eine Verteilungsfunktion für Zeitlücken geeignet, um die Abstände zwischen Fahrzeugen zu beschreiben. Über die Wahrscheinlichkeits-Verteilungsfunktion für Abstände ist damit eine Bestimmung von Aufenthaltswahrscheinlichkeiten von Fahrzeugen möglich.

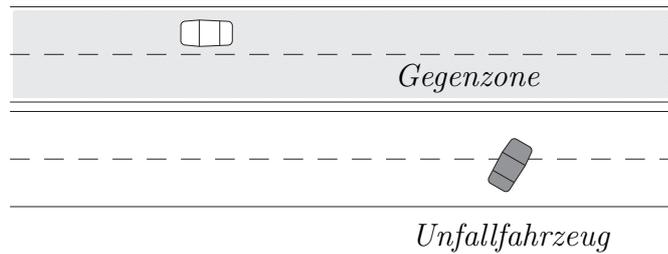


Abbildung 4.17: Gegenzone

In der klassischen Verkehrstheorie wird die Poissonverteilung als geeignete Beschreibung für die Verteilung von Zeitlücken zwischen Fahrzeugen vorgeschlagen [59, 65, 66]. Die allgemeine Form der Poissonverteilung kann wie folgt dargestellt werden:

$$P(X = n) = \frac{\lambda^n}{n!} \cdot e^{-\lambda} \quad . \quad (4.13)$$

Bei gegebener Verkehrsdichte  $\rho$  und  $F$  als Penetrationsgrad ausgerüsteter Fahrzeuge kann die Wahrscheinlichkeit, genau  $n$  ausgestattete Fahrzeuge  $E_k$  in einem Bereich der Länge  $\Delta x$  zu finden, wie folgt berechnet werden:

$$P(E_k = n) = \frac{(\Delta x \cdot \rho \cdot F)^n}{n!} \cdot e^{-\Delta x \cdot \rho \cdot F} \quad . \quad (4.14)$$

Dabei entspricht  $\Delta x = 2 \cdot R_{\text{comm}}$  der in Abschnitt 4.4 beschriebenen Wegstrecke, innerhalb derer direkte Kommunikation zwischen zwei Fahrzeugen möglich ist.

Für den speziellen Fall „mindestens ein weiteres Fahrzeug“ kann die Poissonverteilung durch eine Exponentialfunktion beschrieben werden. Gleichung (4.15) stellt die exponentielle Wahrscheinlichkeits-Verteilungsfunktion  $F_{\Delta x}(\Delta x_{E_k}) = P(\Delta x_{E_k} \leq \Delta x)$  für mindestens ein weiteres ausgestattetes Fahrzeug  $E_k$  innerhalb der direkten Kommunikationsreichweite  $2 \cdot R_{\text{comm}}$  dar:

$$P(\Delta x_{E_k} \leq 2 \cdot R_{\text{comm}}) = 1 - e^{-2 \cdot R_{\text{comm}} \cdot \rho \cdot F} \quad . \quad (4.15)$$

Bei ausschließlicher Berücksichtigung der Gefahrenzone sind Werte von mindestens 50 % für die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Erstweiterleitung bei geringer Fahrzeugdichte (10 veh/km/2lanes) und einer Funkreichweite von  $R_{\text{comm}} = 150$  m erst für Penetrationsgrade ab 50 % und mehr möglich. Wie Abbildung 4.18 zeigt, ist selbst im Fall einer Ausrüstung aller Fahrzeuge für geringe Fahrzeugdichten keine höhere Wahrscheinlichkeit als 80 % erreichbar. Bei einer hohen Fahrzeugdichte von 40 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur ist für diese Wahrscheinlichkeit ein Penetrationsgrad von mindestens 25 % erforderlich.

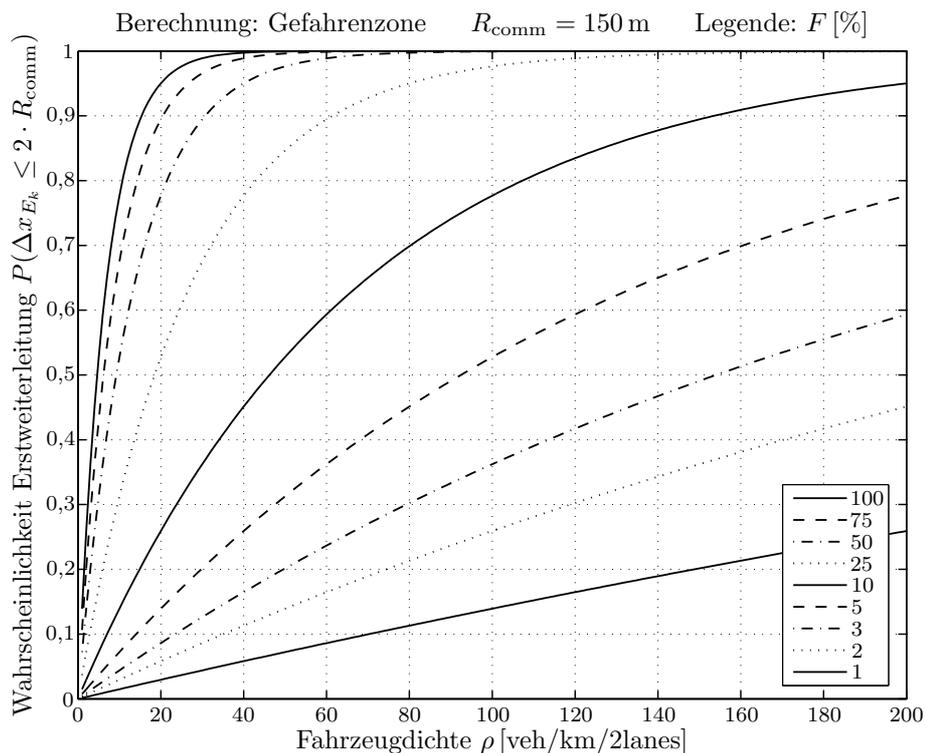


Abbildung 4.18: Erstweiterleitung durch Fahrzeuge der Gefahrenzone in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad  $F$

Abbildung 4.19 verdeutlicht, dass eine 50 %-Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Erstweiterleitung durch Fahrzeuge der Gegenzone bei einer Fahrzeugdichte von 20 veh/km/2lanes ab einem Penetrationsgrad von 10 % möglich ist. Ein Ausrüstungsgrad von mindestens 25 % ist notwendig, wenn diese Wahrscheinlichkeit auch bei einer geringen Fahrzeugdichte von 10 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur erreicht werden soll.

Werden wie in Abbildung 4.20 alle Zonen in die Betrachtung einbezogen, ist eine 80 %-Wahrscheinlichkeit bereits für eine geringe Fahrzeugdichte erreichbar, wenn der Ausrüstungsgrad mindestens 25 % beträgt. Der erforderliche Penetrationsgrad für eine 50 %-Wahrscheinlichkeit beträgt 10 %.

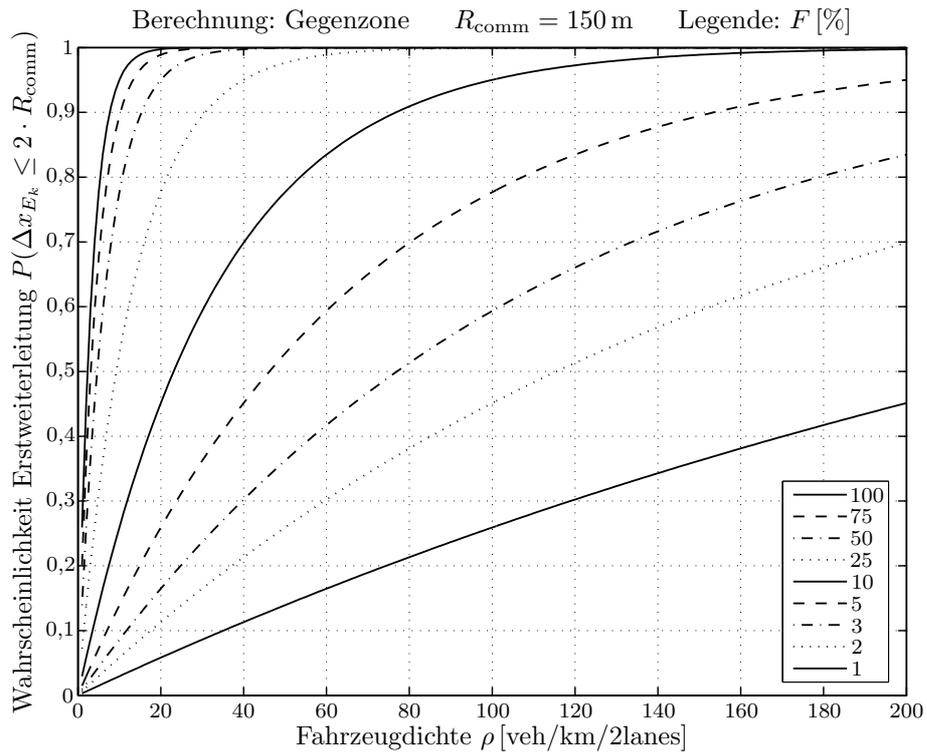


Abbildung 4.19: Erstweiterleitung durch Fahrzeuge der Gegenzone in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad  $F$

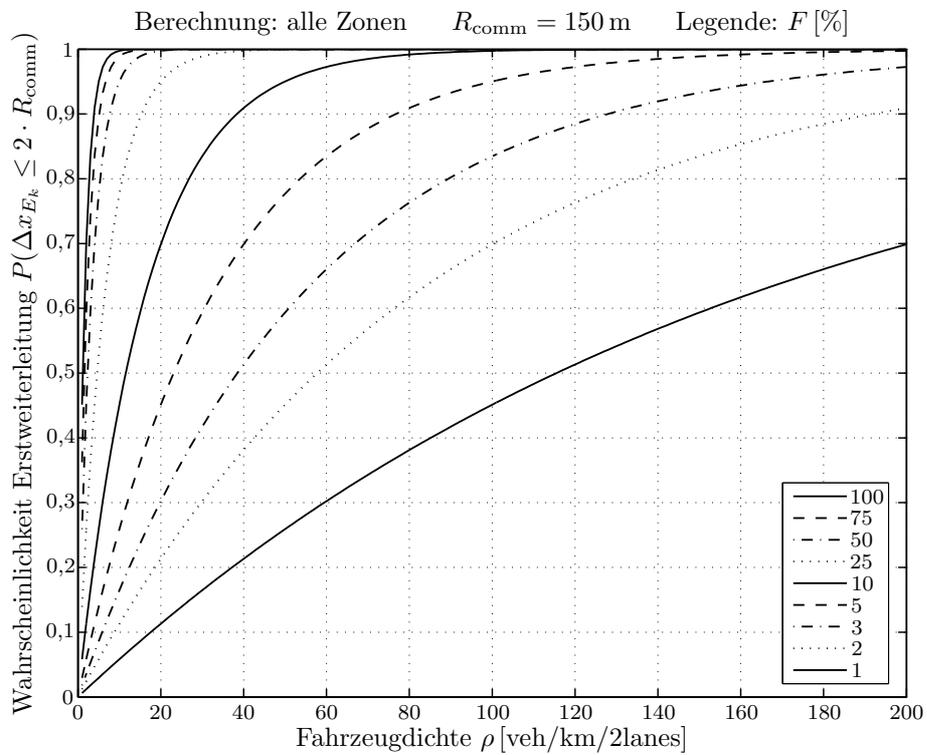


Abbildung 4.20: Erstweiterleitung in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad  $F$

### 4.9.2 Gewinn an Informationsreichweite

Im Folgenden werden einfache Abschätzungen vorgestellt, die die Weiterleitung von Nachrichten über mehrere Hops zeigen. Dabei sind Fahrzeuge der Gefahrenzone und der Gegenzone an der Weiterleitung beteiligt. Die Wahrscheinlichkeit für die Weiterleitung wird für verschiedene Penetrationsgrade und Fahrzeugdichten betrachtet.

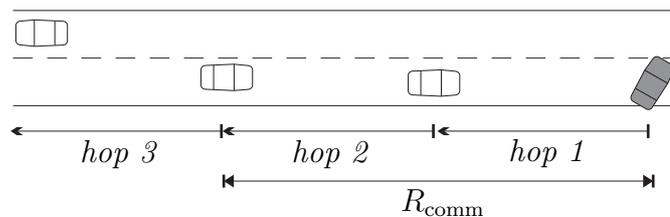


Abbildung 4.21: Gewinn an Informationsreichweite

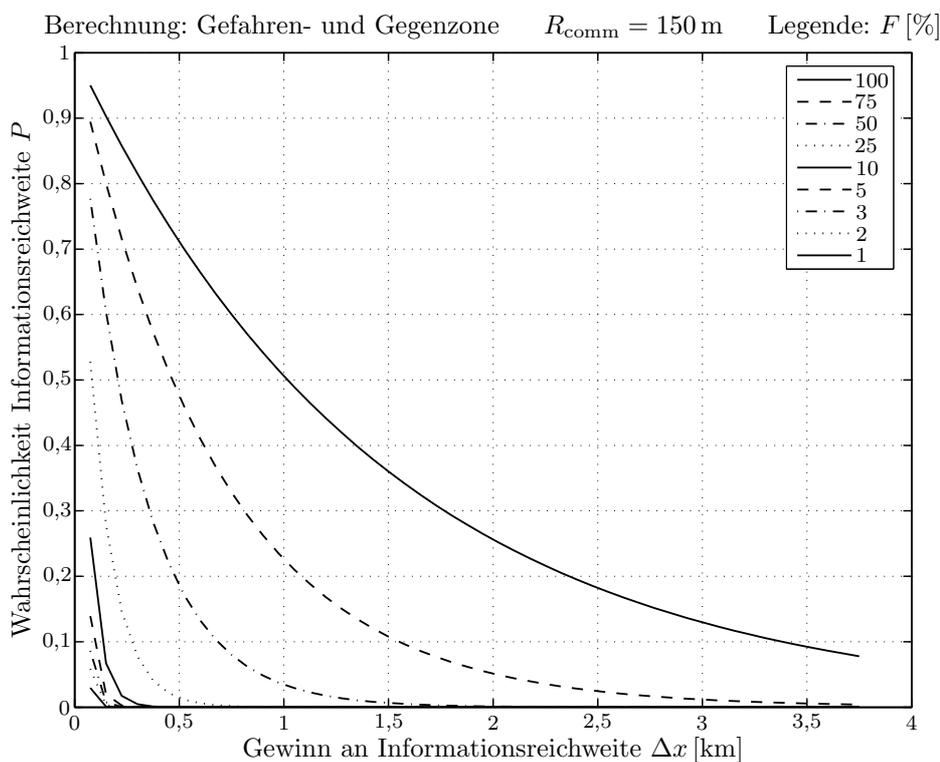


Abbildung 4.22: Informationsreichweite in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad  $F$  bei einer Fahrzeugdichte von  $\rho = 10 \text{ veh/km/2lanes}$

In den Diagrammen zeigt die x-Achse den Gewinn an Informationsreichweite, der durch Weiterleitung einer Nachricht erreicht werden kann. Den Überlegungen liegt das in Abbildung 4.21 dargestellte Modell zu Grunde. Für jeden Hop wird vereinfachend angenommen, dass das empfangende Fahrzeug  $E_k$   $R_{\text{comm}}/2$  vom sen-

denden Fahrzeug  $S_i$  entfernt ist. Jeder Hop korrespondiert somit zu einer Distanz von  $R_{\text{comm}}/2$ , also der halben Sendereichweite. Wie in Abbildung 4.9 verdeutlicht, entspricht der Wert für die halbe Sendereichweite einem annehmbaren Wert für den Nutzen einer Nachrichtenwiederholung.

In den folgenden Betrachtungen bleiben Maßnahmen des in Abschnitt 4.8 vorgestellten Algorithmus zur Erhöhung der Weiterleitungswahrscheinlichkeit wie Mehrfachwiederholungen und physikalische Transporte von Nachrichten durch die am Weiterleitungsprozess beteiligten Fahrzeuge unberücksichtigt. Insofern repräsentieren die Kurven eine konservative Abschätzung der zu erwartenden Informationsreichweiten.

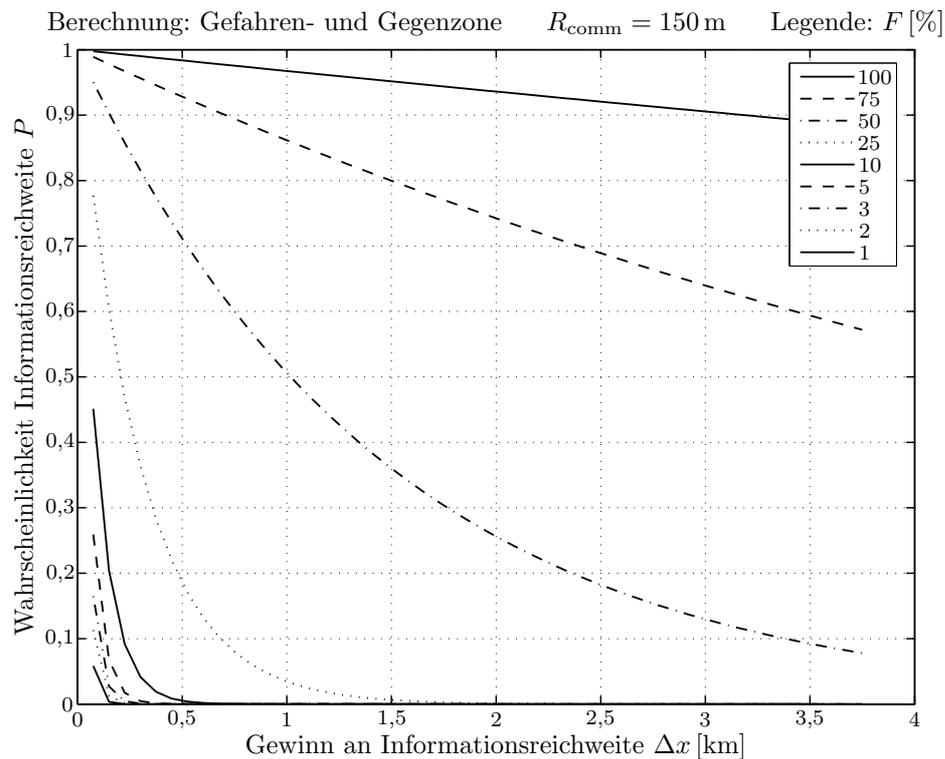


Abbildung 4.23: Informationsreichweite in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad  $F$  bei einer Fahrzeugdichte von  $\rho = 20 \text{ veh/km/2lanes}$

In den Abbildungen 4.22 und 4.23 ist der zu erwartende Gewinn an Informationsreichweite für geringe und mittlere Fahrzeugdichten von 10 und 20 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur dargestellt. Zu erkennen ist, dass, ausgehend von einer 50 %-Wahrscheinlichkeit, selbst bei hohen Penetrationsgraden keine wesentliche Distanzüberbrückung möglich ist. Im Fall hoher und sehr hoher Dichte, wie in den Abbildungen 4.24 und 4.25 dargestellt, ist bei vollständiger Ausrüstung aller Fahrzeuge ein Abreißen der Weiterleitungskette nicht mehr beobachtbar. Für geringe Penetrationsgrade von beispielsweise 10 % ist aber selbst bei einer Fahrzeugdichte von  $60 \text{ veh/km/2lanes}$  eine Weiterleitungsdistanz von über einem Kilometer sehr unwahrscheinlich.

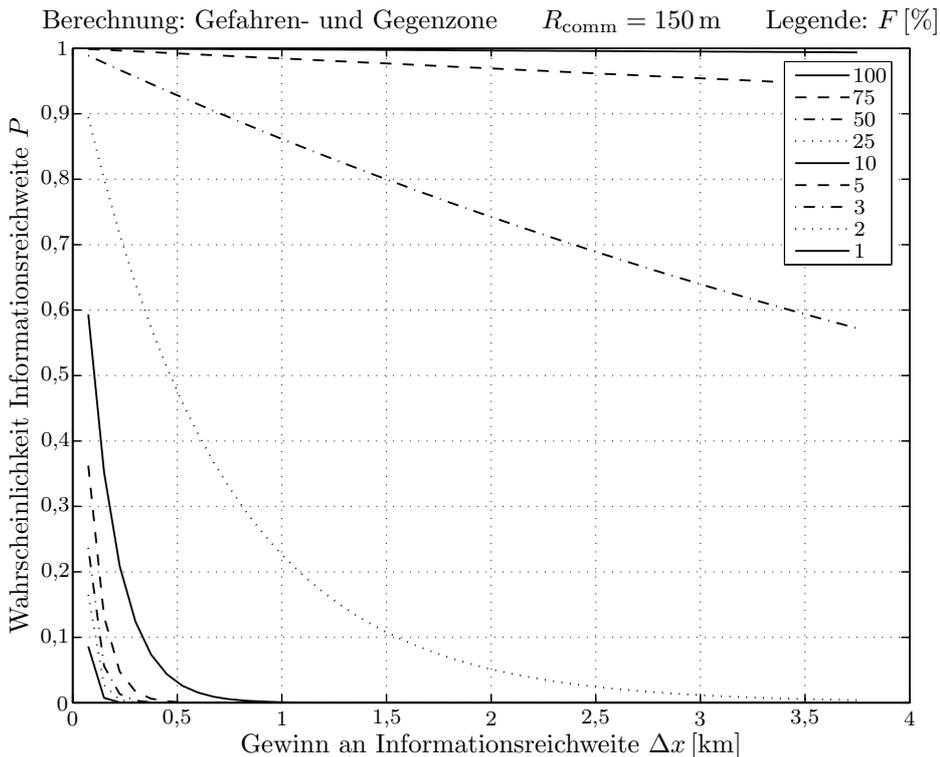


Abbildung 4.24: Informationsreichweite in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad  $F$  bei einer Fahrzeugdichte von  $\rho = 30 \text{ veh/km/2lanes}$  ...

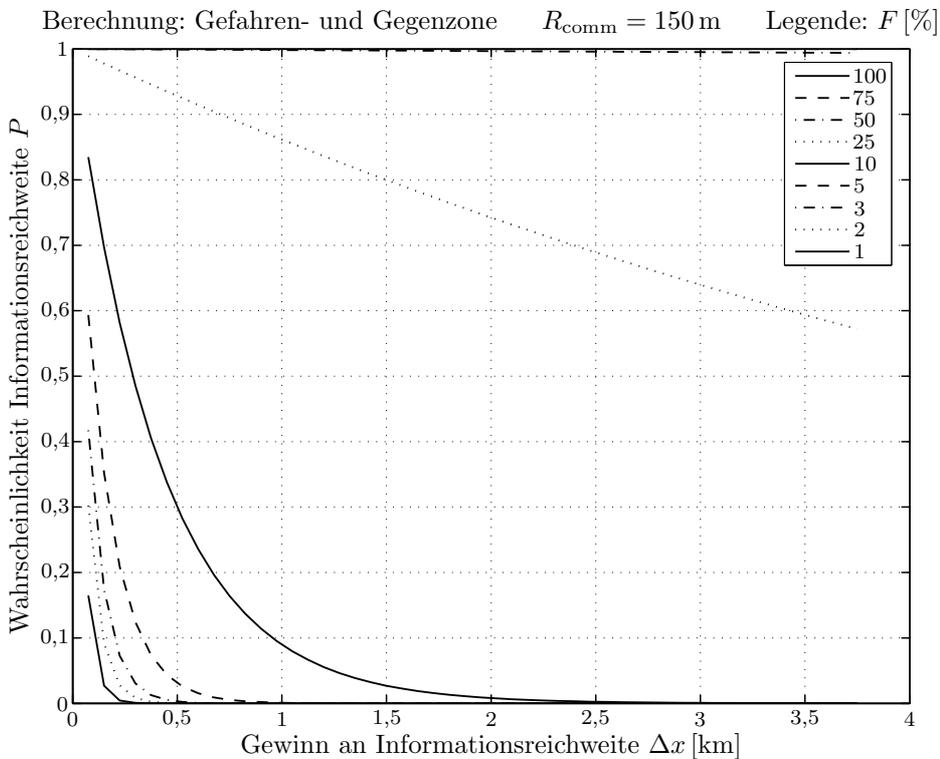


Abbildung 4.25: ... sowie bei einer Fahrzeugdichte von  $\rho = 60 \text{ veh/km/2lanes}$

### 4.9.3 Sendeverhalten des entwickelten Algorithmus

Nach den generellen Betrachtungen der vorangegangenen Abschnitte soll nun der in dieser Arbeit entwickelte Algorithmus untersucht werden. Den in den Abschnitten 4.9.3 bis 4.9.6 vorgestellten, simulativ ermittelten Ergebnissen liegen dabei die in Tabelle 4.2 gezeigten Parameter sowie das in Abschnitt 4.1 beschriebene Worst-Case-Szenario zu Grunde.

Tabelle 4.2: Simulationsparameter Informationsweiterleitung

Parameter	Wert
$l_{\text{Zelle}}$	1,5 m
$l_{\text{Simulation}}$	10.000 m
$\Delta t_{\text{Simulation}}$	1 h
$\Delta t_{\text{Übertragung}}$	10 ms
$P_{\text{T}}$	100 mW
$x_{\text{RZ,HZ}}$	2000 Zellen
$x_{\text{RZ,NZ}}$	400 Zellen
$Q$	1,0

Die Diagramme stellen, mit Ausnahme der Nachrichtentrajektorien, eine Mittelung über zehn Simulationsdurchläufe dar. Zu beachten ist, dass das für den Nachrichtenaustausch initiale Ereignis keine Verkehrsbehinderung zur Folge hat. Die Fahrzeuge können ihre jeweiligen Verkehrszonen also ohne äußere Beeinflussung durchfahren. Aufgetragen ist die Zahl gesendeter oder empfangener Übertragungen, wie sie in den Abbildungen 3.1 und 3.2 beispielhaft dargestellt sind, je Zeiteinheit über der Fahrzeugdichte  $\rho$  oder der Position  $\Delta x$  relativ zum Ereignisort. Der Ereignisort ist der Ort, an dem die Erstübertragung, beispielsweise in Form einer Notfallnachricht, initiiert wird. Eine Position mit negativem Wert ist dabei in Fahrtrichtung hinter, eine Position mit positivem Wert in Fahrtrichtung vor dem Ereignisort. Für Fahrzeuge der Gegenseite gilt die umgekehrte Entsprechung. Fahrzeuge der Gefahrenzone und der Neutralen Zone bewegen sich in positionsbasierten Diagrammen somit von links nach rechts, Fahrzeuge der Gegenzone von rechts nach links.

Zur besseren Einschätzung wird die Wirkungsweise des Algorithmus einem Vergleichssystem gegenübergestellt, welches nach dem Prinzip quasi-isochroner Wiederholungen arbeitet. Dabei wird eine empfangene Nachricht von einem Fahrzeug der Relevanzzone solange periodisch wiederholt, bis das Fahrzeug die Zone verlässt. Bei diesem einfachen System unterliegt die Aussendung der beteiligten Fahrzeuge keiner weiteren Steuerung, es wird lediglich auf einen freien Kanal geprüft. Ist der Kanal zum geplanten Sendezeitpunkt belegt, wird nach einer Wartezeit ein neuer Versuch unternommen. Sowohl die Bestimmung der Wartezeit als auch die Periodizität der

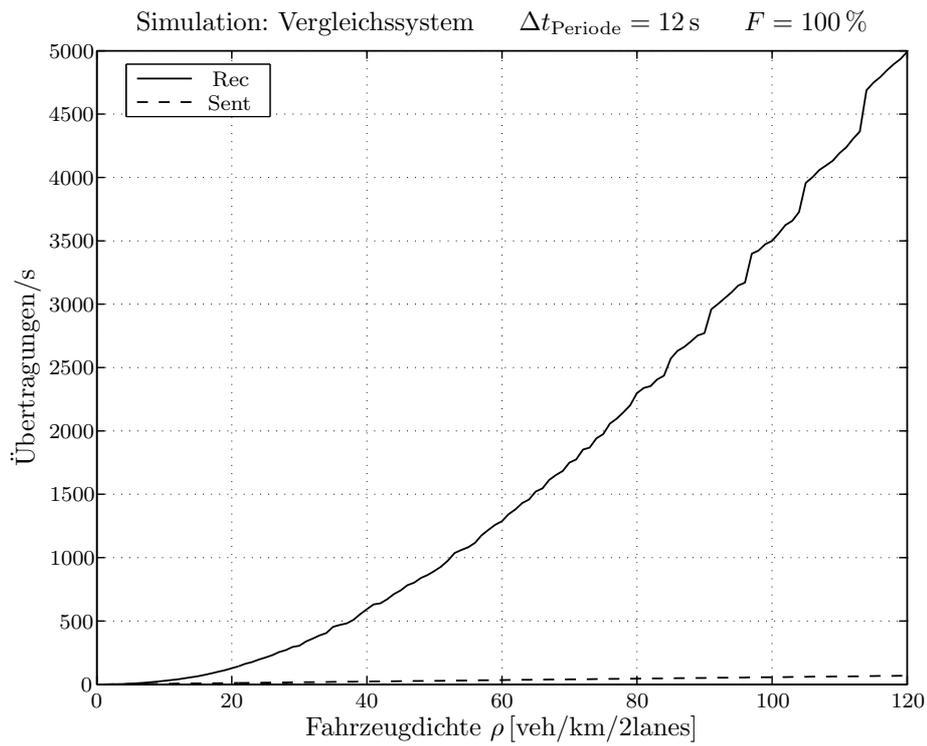


Abbildung 4.26: Sende-/Empfangsverhalten des Vergleichssystems

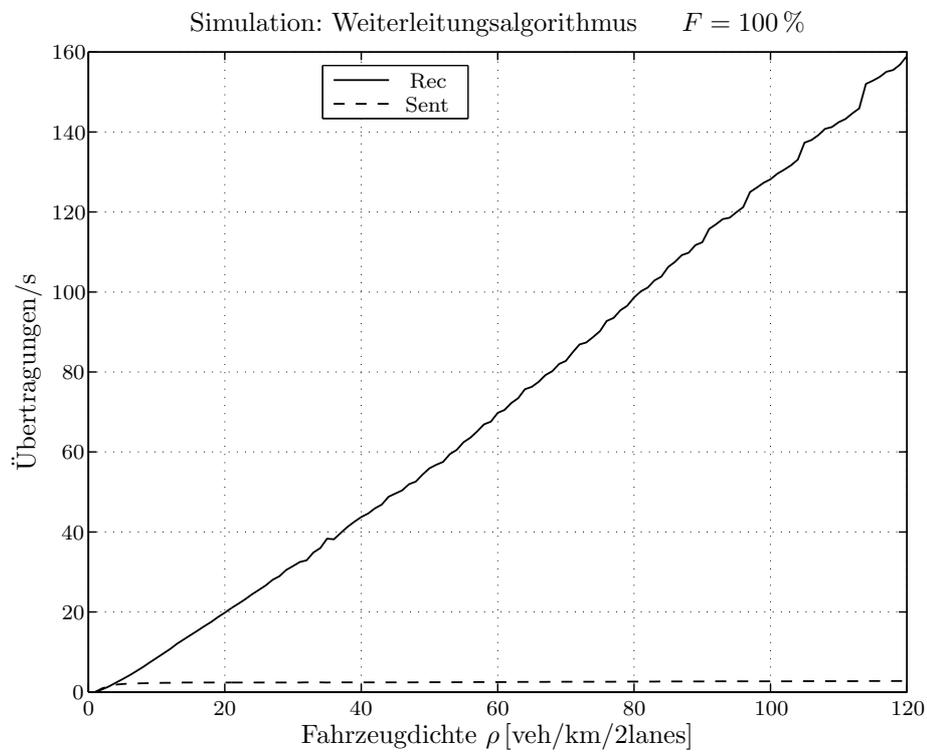


Abbildung 4.27: Sende-/Empfangsverhalten

Aussendungen beinhaltet eine stochastische Komponente, so dass Synchronitäten zwischen den Fahrzeugen vermieden werden.

Abbildung 4.26 zeigt das Sende- und Empfangsverhalten des Vergleichssystems. Mit zunehmender Fahrzeugdichte steigt die Zahl der Aussendungen im System. Im Diagramm sind mit SS die Übertragungen je Sekunde dargestellt, die von allen Fahrzeugen der Relevanzzone erzeugt werden. RS stellt die empfangenen Übertragungen pro Sekunde dar. Zu erkennen ist, dass bei der vom Vergleichssystem verwendeten Vorgehensweise mit zunehmender Fahrzeugdichte die Belastung durch Aussendungen in der Relevanzzone linear, die Belastung der Fahrzeuge mit empfangenen und damit zu bearbeitenden Übertragungen sogar quadratisch steigt. Dieses Verhalten lässt sich anhand einer einfachen Überlegung nachvollziehen: Angenommen innerhalb der Relevanzzone kann jedes Fahrzeug die Aussendungen jedes anderen Fahrzeugs empfangen. Wird weiterhin vereinfachend angenommen, dass jedes Fahrzeug nur eine Übertragung aktiv vornimmt, so ergibt sich als Funktion der Fahrzeuganzahl  $N$  innerhalb der Relevanzzone für die Aussendungen die Beziehung  $f_{\text{trans}} \sim N$ , für die empfangenen Übertragungen  $f_{\text{rec}} \sim N(N-1) = N^2 - N$ , da die eigenen Aussendungen jeweils nicht mitgezählt werden. Das Verhalten des Vergleichssystems ist somit statisch, es bietet keine Anpassung an die Dichte und die Aktivität der Fahrzeuge.

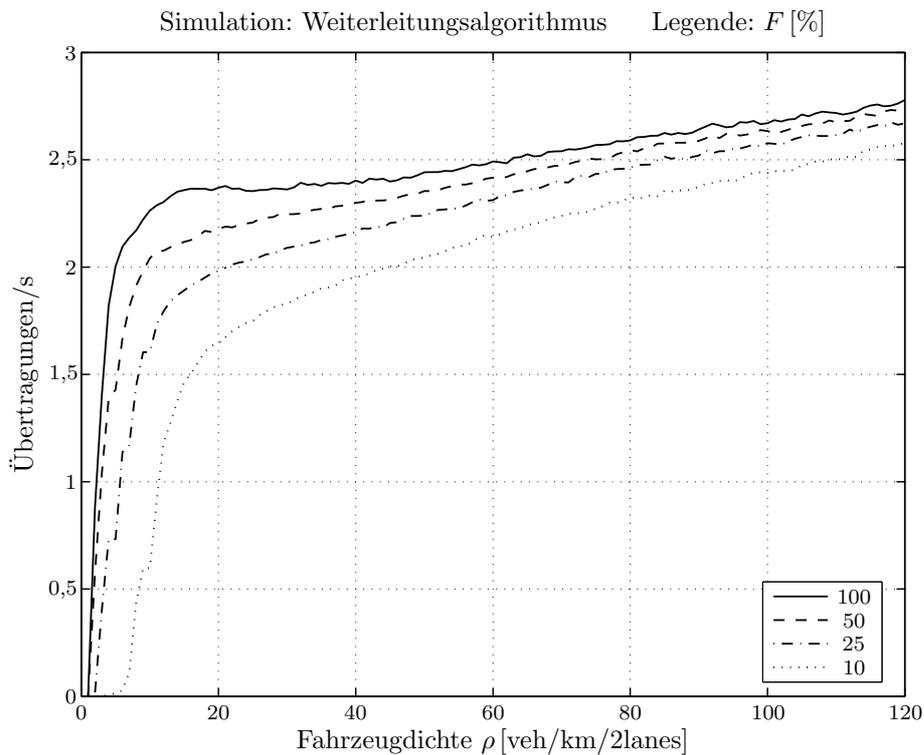


Abbildung 4.28: Sendeverhalten in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad  $F$

Im Gegensatz zum Vergleichssystem zeigt das in Abbildung 4.27 dargestellte Verhalten des entwickelten Algorithmus eine Adaption an die gegebenen Verhältnisse.

Nach einem linearen Anstieg im Bereich einer Dichte unter fünf Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur sowie einem deutlich abgeschwächten Anstieg im Bereich bis 12 veh/km/2lanes bleibt die Anzahl von Aussendungen über dem restlichen Bereich beinahe konstant. Abbildung 4.28 verdeutlicht dieses Verhalten in einer vergrößerten Darstellung. Parallel dazu steigt die Belastung der Fahrzeuge durch empfangene und auszuwertende Übertragungen nur noch linear an. Bei den zu Grunde gelegten Parametern und  $\rho$  als Fahrzeugdichte in veh/km/2lanes genügt die Mehrbelastung der Fahrzeuge des Vergleichssystems  $VS$  bei einem Penetrationsgrad  $F = 100\%$  gegenüber der Belastung bei Verwendung des Algorithmus näherungsweise der Beziehung  $f_{\text{load},VS} \sim \rho/4 \cdot f_{\text{load},Algo}$ . Dies entspricht beispielsweise bei einer Dichte von 20 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur der 5-fachen, bei einer Dichte von 120 veh/km/2lanes der 30-fachen Mehrbelastung gegenüber dem System mit angewendetem Algorithmus.

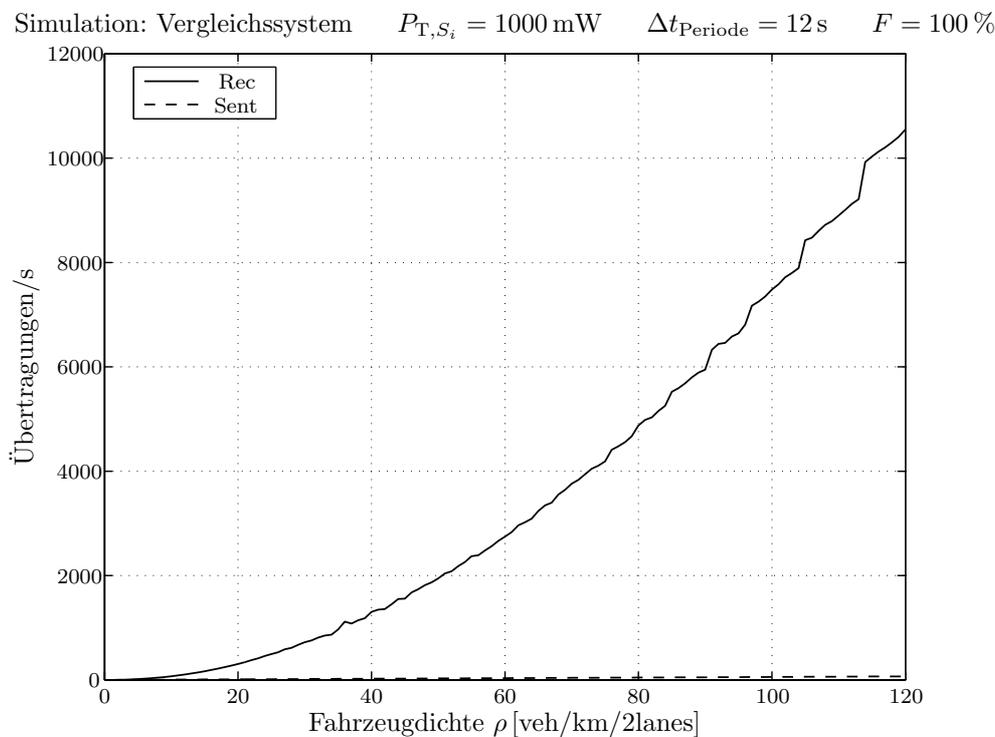


Abbildung 4.29: Sende-/Empfangsverhalten des Vergleichssystems bei zehnfach höherer Sendeleistung  $P_{T,S_i}$

Deutlicher noch als zuvor zeigt sich die Anpassungsfähigkeit des Algorithmus an unterschiedliche Bedingungen im Fall einer Sendeleistungserhöhung auf 1000 mW und der damit einhergehenden maximalen Funkreichweite von 342 m, wie in Abbildung 4.30 dargestellt. Während im Vergleichssystem durch die höhere Funkreichweite ein weiterer Anstieg der Belastung durch empfangene Nachrichten stattfindet (Abbildung 4.29), reagiert der Weiterleitungsalgorithmus mit einer Verringerung der Aussendungen und hält damit die Anzahl der von den Fahrzeugen zu verarbeitenden

Nachrichten auf nahezu gleichem Niveau (Abbildung A.20). Darüber hinaus werden über einen weiten Bereich unterschiedliche Penetrationsgrade nahezu vollständig ausgeglichen.

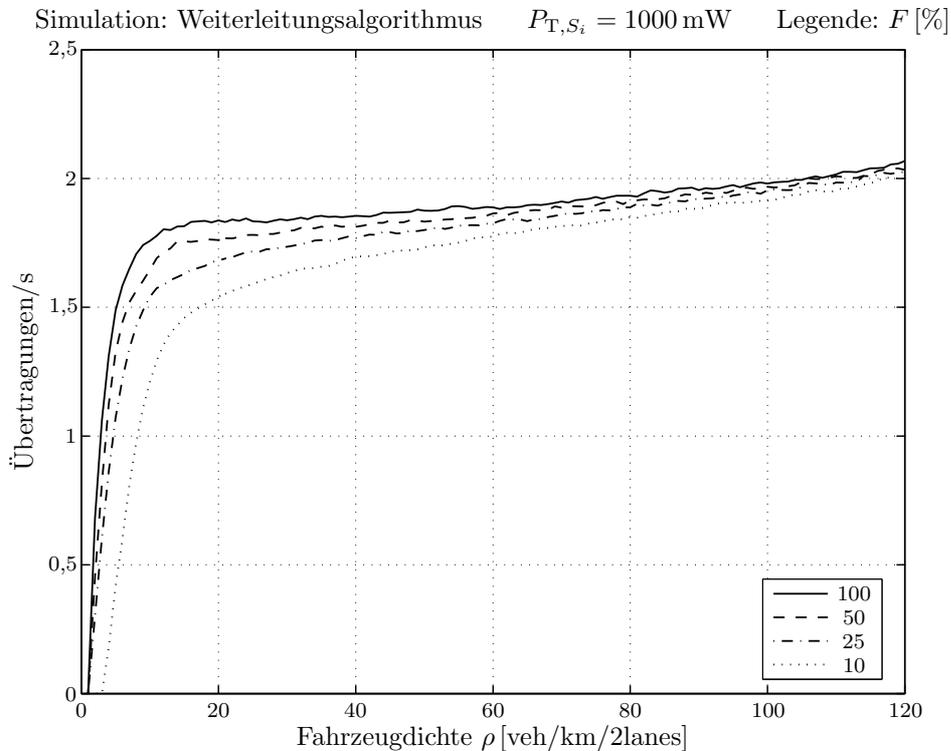


Abbildung 4.30: Sendeverhalten in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad  $F$  bei zehnfach höherer Sendeleistung  $P_{T,S_i}$

#### 4.9.4 Gestörte Übertragungen und Verzögerungen

Abbildung 4.31 zeigt das Verhalten des Vergleichssystems bezüglich gestörter Übertragungen und Sendeverzögerungen durch einen belegten Kanal. Dabei steht die mit DS bezeichnete Kurve für die Anzahl von Übertragungen, die von den Fahrzeugen als nicht empfangbar eingestuft werden, die mit WS bezeichnete Kurve für die Anzahl von Verzögerungen einer geplanten Aussendung, dies jeweils pro Sekunde und in Abhängigkeit der Fahrzeugdichte. Gestörte Übertragungen können sowohl von Kollisionen bei sich zeitlich überschneidenden Aussendungen verursacht werden als auch von einem Absinken des  $SINR$  unter den minimal erforderlichen Wert, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben. Dies ist beispielsweise immer dann der Fall, wenn das empfangende Fahrzeug während der Übertragung den Sendebereich des sendenden Fahrzeugs verlässt.

Erkennbar ist, dass im Fall der Sendeverzögerung wiederum mit einem linearen Anstieg zu rechnen ist, während die Zahl gestörter Übertragungen quadratisch mit

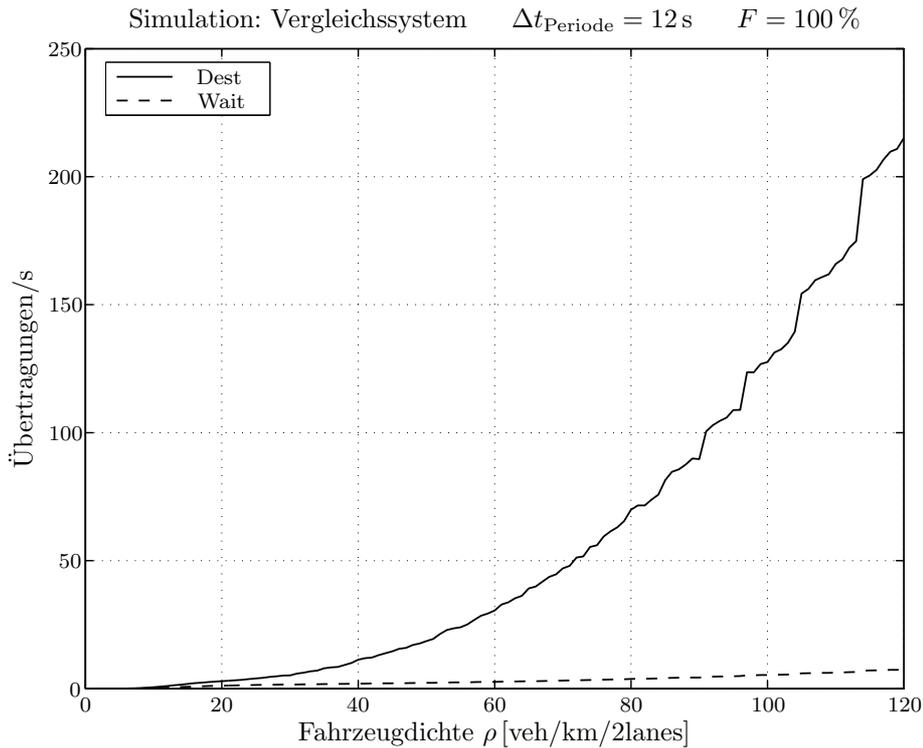


Abbildung 4.31: Gestörte Übertragungen und Verzögerungen des Vergleichssystems

zunehmender Fahrzeugdichte steigt. Für die Plausibilitätsprüfung dieses Verhaltens im Vergleichssystem gilt das in Abschnitt 4.9.3 Gesagte entsprechend.

Abbildung 4.32 zeigt das Verhalten eines Systems bezüglich gestörter Übertragungen und Sendeverzögerungen durch einen belegten Kanal bei Anwendung des Weiterleitungsalgorithmus. Erkennbar ist, dass beide Anstiege, sowohl der der Anzahl gestörter Übertragungen als auch jener der Anzahl an Sendeverzögerungen, ab einer Fahrzeugdichte von 15 veh/km/2lanes maximal nur noch linearer Natur sind. Ausgedrückt in absoluten Zahlen ergibt sich in Abhängigkeit zur Fahrzeugdichte ein maximaler Unterschied um den Faktor 100 zugunsten des Systems mit Weiterleitungsalgorithmus.

Einhergehend mit der in Abschnitt 4.9.3 beschriebenen geringeren Anzahl vorgenommener Aussendungen als Reaktion des entwickelten Algorithmus auf eine Erhöhung der Sendeleistung, kommt es zu einer ebenfalls verringerten Anzahl an Übertragungsstörungen und Verzögerungen (Abbildung A.21).

Mit steigender benötigter Übertragungszeit steigt auch die Wahrscheinlichkeit für Parallelausendungen und damit von Störungen während des Übertragungsvorgangs. In Abbildung 4.33 ist daher das Verhalten eines Systems mit einer im Vergleich zu den übrigen Betrachtungen zehnfach höheren Übertragungszeit dargestellt. Während die längere Übertragungszeit, wie in den Abbildungen A.19 und A.22 gezeigt,

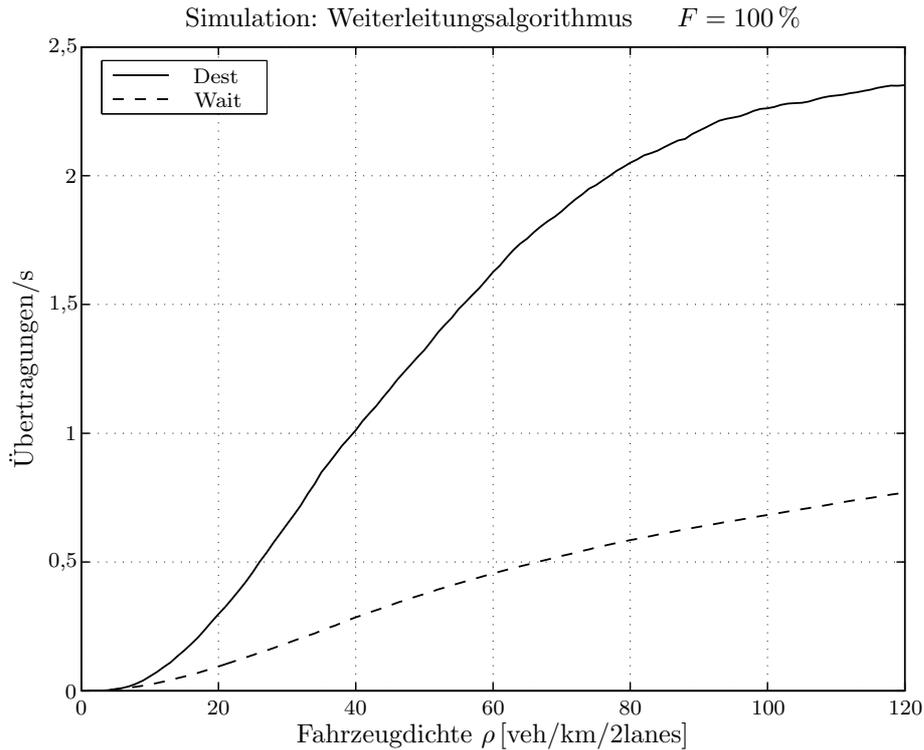


Abbildung 4.32: Gestörte Übertragungen und Verzögerungen

keinen Einfluss auf das Sende-/Empfangsverhalten und die Sendezustandsverteilung hat, steigt sowohl die Anzahl der gestörten Übertragungen als auch die Anzahl an Sendeverzögerungen durch einen belegten Kanal an. Beide Anstiege bleiben aber mit einer maximalen Steigerung der Absolutwerte von 40% für die höchste Fahrzeugdichte im unkritischen Bereich. Für die Verzögerungen stellt sich darüberhinaus ab einer Dichte von 60 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur ein nahezu konstantes Verhalten ein.

#### 4.9.5 Räumliche Verteilung der Übertragungen

Nach den generellen Betrachtungen der Eigenschaften eines Systems mit Anwendung des entwickelten Algorithmus und dem Vergleich mit einem System welches nach dem Prinzip quasi-isochroner Wiederholungen arbeitet, soll in diesem Abschnitt die räumliche Verteilung der Übertragungen über die Relevanzzone diskutiert werden.

Abbildung 4.34 zeigt ein Beispiel für die räumliche Sendeverteilung bei einer Fahrzeugdichte von 60 veh/km/2lanes bei Anwendung des Weiterleitungsalgorithmus. Die Positionen der x-Achse haben dabei die in der Einführung zu Abschnitt 4.9.3 erläuterte Bedeutung. Jeder Punkt steht für die Anzahl von Aussendungen, die an der entsprechenden Position respektive Zelle begonnen wurde, unabhängig von welchem Fahrzeug. Zu erkennen ist die nahezu gleichmäßige Verteilung der Über-

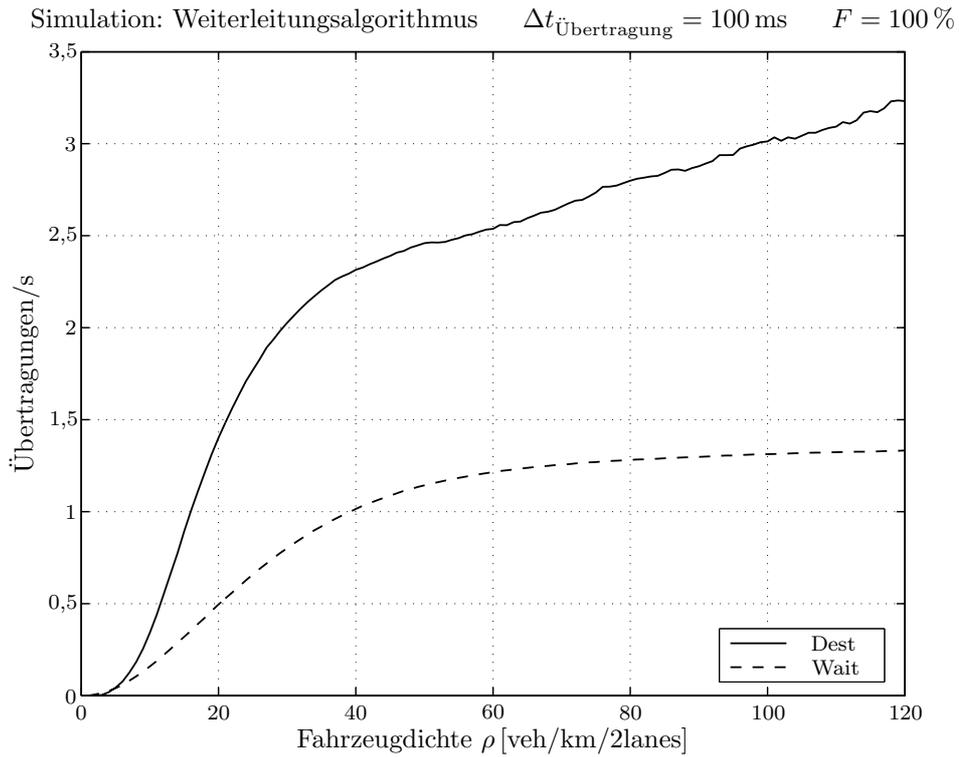


Abbildung 4.33: Gestörte Übertragungen und Verzögerungen bei zehnfach längerer Übertragungszeit  $\Delta t_{\text{Übertragung}}$

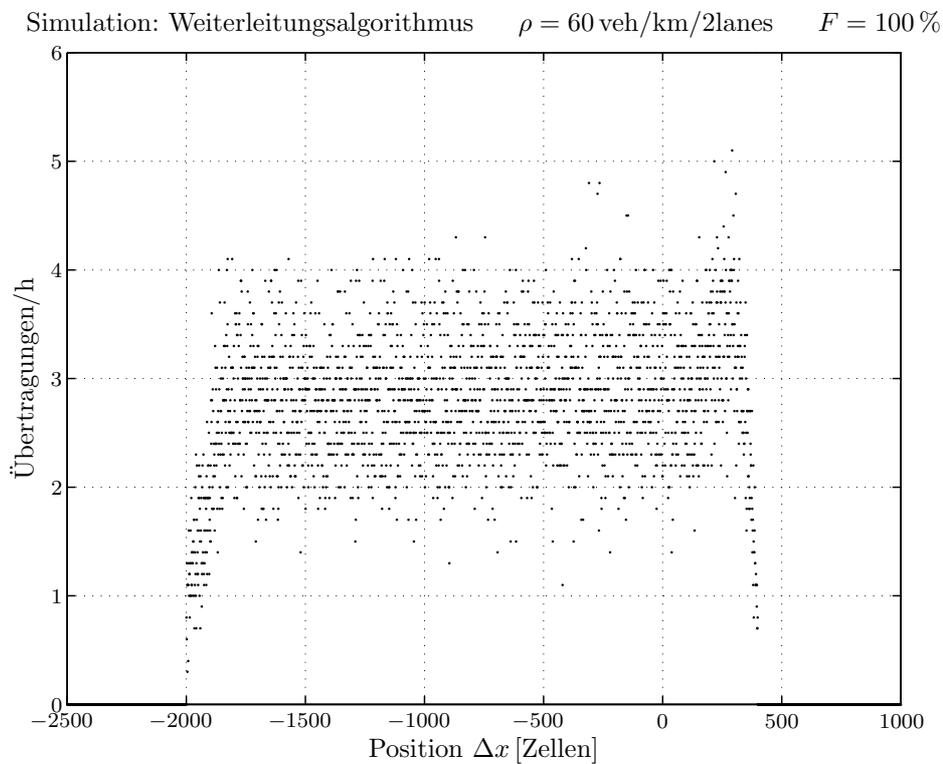


Abbildung 4.34: Räumliche Sendeverteilung

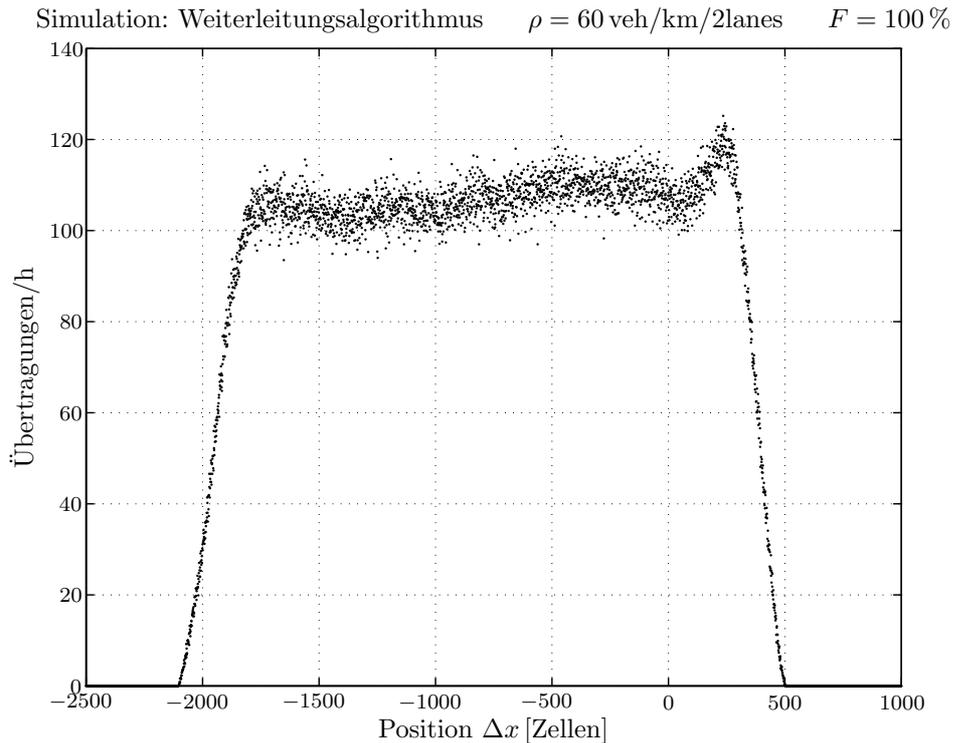


Abbildung 4.35: Räumliche Empfangsverteilung

tragungen über die gesamte Relevanzzone von  $\Delta x = -2000$  bis  $\Delta x = 400$ . Dass die Relevanzzone über die Position Null in den Bereich der Neutralen Zone verlängert ist, begründet sich in der für das Funktionieren des Algorithmus notwendigen rechtzeitigen Versorgung von Fahrzeugen der Gegenzone mit Informationen über das relevante Ereignis. Fahrzeugen der Gegenzone kommt, wie in Abschnitt 4.9.1 gezeigt, eine elementare Bedeutung zu, um den Algorithmus sowohl erfolgreicher bei der Erstweiterleitung als auch unanfälliger gegen Abrisse der Weiterleitungskette zu gestalten. Im Unterschied zu den vorherigen Diagrammen sind aus Gründen der Zweckmäßigkeit die Übertragungen pro Stunde dargestellt.

Abbildung 4.35 zeigt die zur Abbildung 4.34 gehörende Empfangsverteilung, wiederum in Übertragungen je Stunde. Deutlich zu erkennen ist der sehr schnelle Anstieg an empfangenen Übertragungen für die in die Relevanzzone einfahrenden Fahrzeuge sowie die Konstanz der Versorgung innerhalb dieser.

#### 4.9.6 Informationsabdeckung

Vorrangiges Designziel bei der Entwicklung des Weiterleitungsalgorithmus ist die Versorgung von Fahrzeugen innerhalb der Relevanzzone mit Informationen ohne Einsatz fester Infrastruktur sowohl in räumlicher als auch in zeitlicher Hinsicht bei gleichzeitiger minimaler Belastung der Funkschnittstelle.

Ausgehend von der initialen Übertragung beispielsweise in Form einer Notfallnachricht wird die Information dergestalt von den Fahrzeugen wiederholt, dass sich eine möglichst homogene Abdeckung des, bezogen auf die Information, relevanten Gebiets zu jedem Zeitpunkt ergibt. Abbildung 4.36 verdeutlicht die räumliche Komponente dieser Informationsabdeckung.

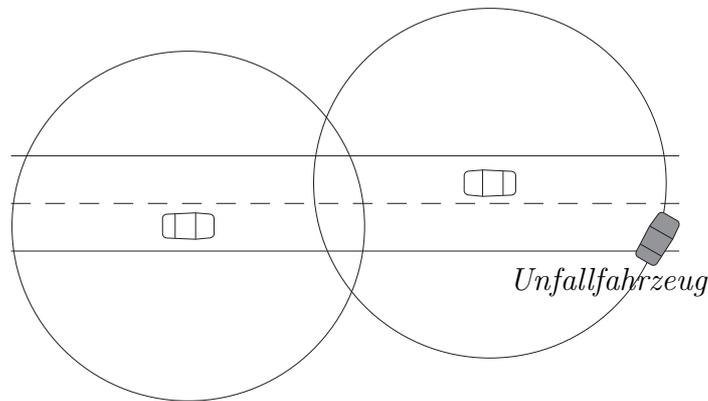


Abbildung 4.36: Informationsabdeckung

Abbildung 4.37 zeigt die Nachrichtentrajektorien für den Fall einer Verkehrsdichte von 30 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur.

Ähnlich wie im Fall der Verkehrstrajektorien steht jeder Punkt des Diagramms für die Aussendung eines Fahrzeugs auf der dazu gehörigen Position zum jeweiligen Zeitpunkt. Deutlich erkennbar ist die weitgehende Homogenität der Übertragungen in beiden Dimensionen. Im Zeitbereich der ersten 100 Sekunden ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Information entgegen der Fahrtrichtung von näherungsweise 120 km/h ablesbar.

Abbildung 4.38 zeigt beispielhaft für die Dauer einer Stunde, dass die Informationsabdeckung bei genügend hoher Verkehrsdichte und Penetrationsrate auch über einen längeren Zeitraum gewährleistet werden kann. In Abbildung 4.40 ist dies für den Fall einer Verkehrsdichte von 60 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur dargestellt. Bei dem Vergleich beider Diagramme ist zu erkennen, dass sowohl in der Dichte der Punkte als auch in ihrer Homogenität bezüglich Raum und Zeit kein Unterschied zwischen den verschiedenen Verkehrsdichten besteht. Dieses Verhalten entspricht dem in Abschnitt 4.9.3 erläuterten und in Abbildung 4.28 dargestellten Sendeverhalten des entwickelten Algorithmus. Dennoch bilden sich bei der zu Grunde liegenden Verkehrsdichte des zweiten Falls bereits erste Strukturen in den Nachrichtentrajektorien heraus.

Abbildung 4.39 verdeutlicht diese Strukturen für den Zeitraum der ersten 600 Sekunden nach Auslösung der initialen Übertragung. Erkennbar ist, dass sich die strukturelle Anordnung sofort nach Beginn des Weiterleitungsprozesses herausbildet.

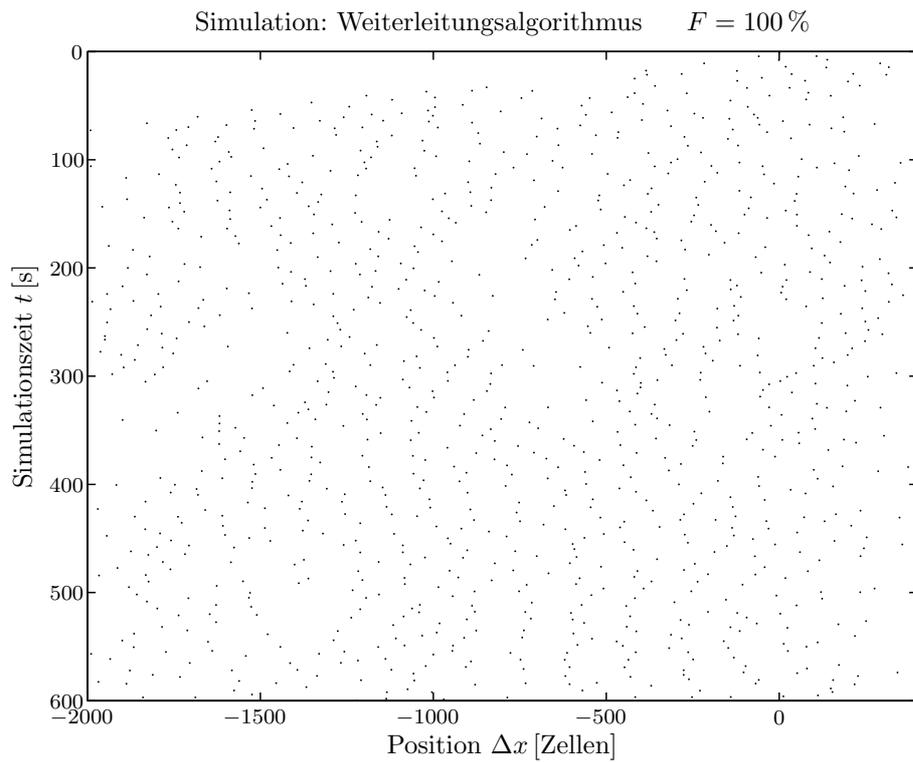


Abbildung 4.37: Informationsabdeckung über 600 s bei  $\rho = 30$  veh/km/2lanes

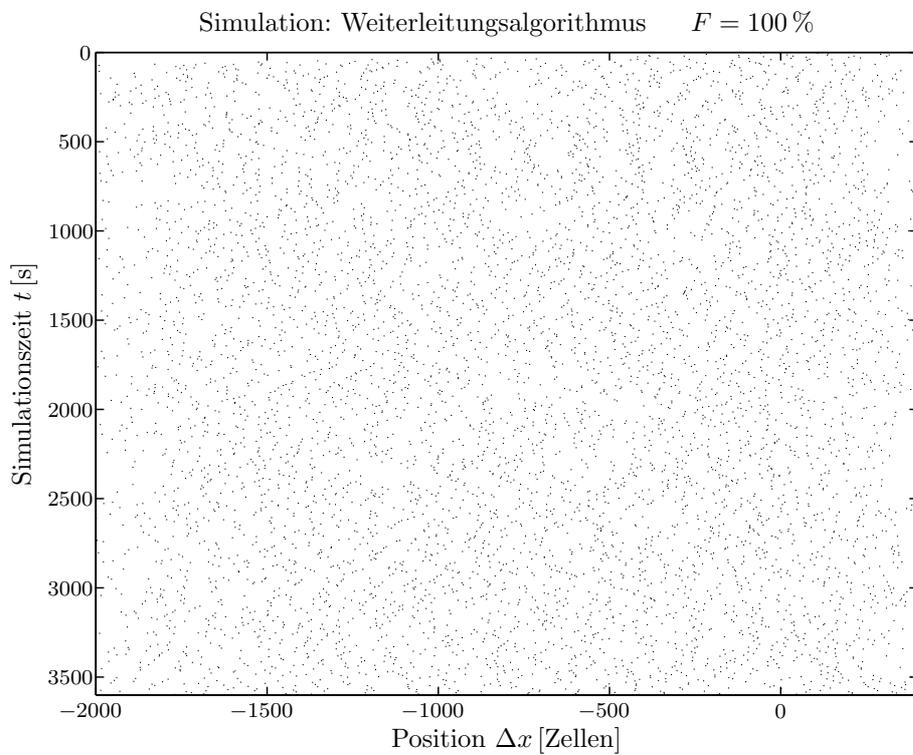


Abbildung 4.38: Informationsabdeckung über 1 h bei  $\rho = 30$  veh/km/2lanes

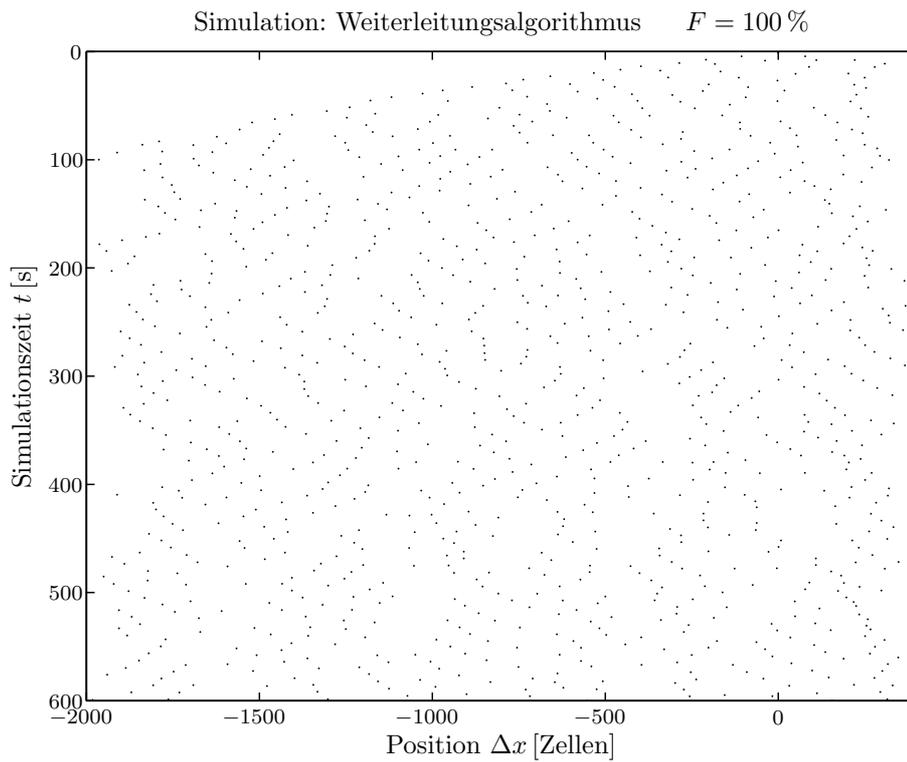


Abbildung 4.39: Informationsabdeckung über 600 s bei  $\rho = 60$  veh/km/2lanes

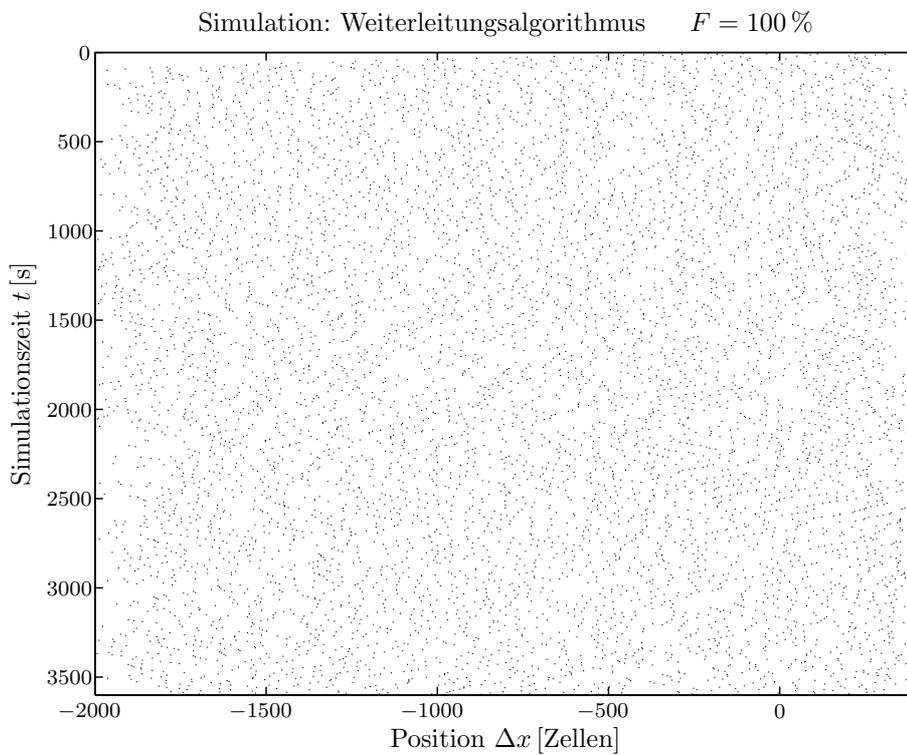


Abbildung 4.40: Informationsabdeckung über 1 h bei  $\rho = 60$  veh/km/2lanes

Die sich herausbildenden Strukturen stellen die Antwort des entwickelten Algorithmus auf die sich erhöhende Verkehrsdichte und damit die Anzahl an potenziell weiterleitungswilligen Fahrzeugen dar. Um die zur Verfügung stehende Kapazität der Funkschnittstelle für die Erfüllung der Aufgabe der Informationsabdeckung nicht mehr als nötig in Anspruch zu nehmen, muss durch den Algorithmus gewährleistet sein, dass die nachrichtenbezogen unabhängig voneinander agierenden Fahrzeuge einer Selbstzurückhaltung unterworfen werden.

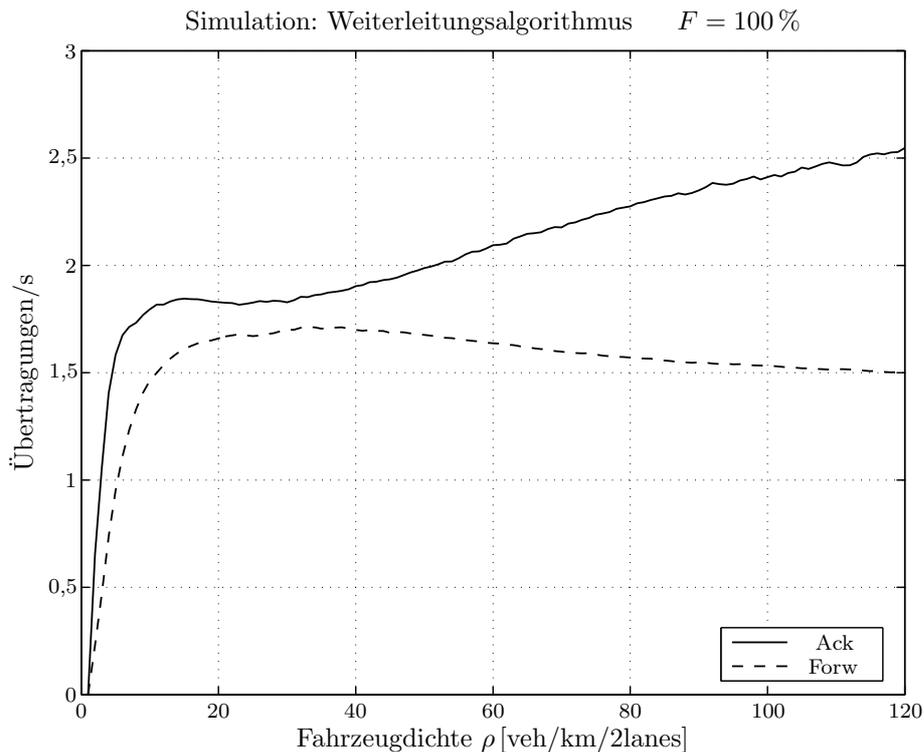


Abbildung 4.41: Sendezustandsverteilung

Wie in Abschnitt 4.8 beschrieben, wechseln Fahrzeuge die eine neue Nachricht empfangen haben zunächst in den Waiting to Forward-Status (Abbildung 4.11). Empfangen sie während dieser ersten Wartezeit eine weitere weitergeleitete Nachricht desselben Inhalts, wechseln sie aus dem Waiting to Forward-Status direkt in den Observation-Status (Abbildung 4.14) ohne selbst zuvor aktiv am Weiterleitungsprozess teilgenommen zu haben. Steigt die Zahl weiterleitungsbereiter Fahrzeuge in der Relevanzzone an, steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass neu hinzukommende Fahrzeuge gleich in den Beobachtungszustand wechseln. Dies führt dazu, dass aktive Fahrzeuge zunehmend seltener indirekte Bestätigungen des Weiterleitungsprozesses durch andere Fahrzeuge in Form wiederholter Übertragungen desselben Inhalts empfangen. Abbildung 4.41 verdeutlicht dieses Verhalten.

Mit zunehmender Verkehrsdichte steigen zunächst sowohl die aus dem Waiting to Forward-Status (WtF) heraus initiierten (Forw) als auch die aus dem Waiting

for Acknowledgement-Status (WtA) heraus periodisch gesendeten Übertragungen (Ack). Ab einer Verkehrsdichte von 40 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur wird jedoch der Anteil an Aussendungen aus dem WtF-Status geringer, während der Anteil aus dem WfA-Status steigt.

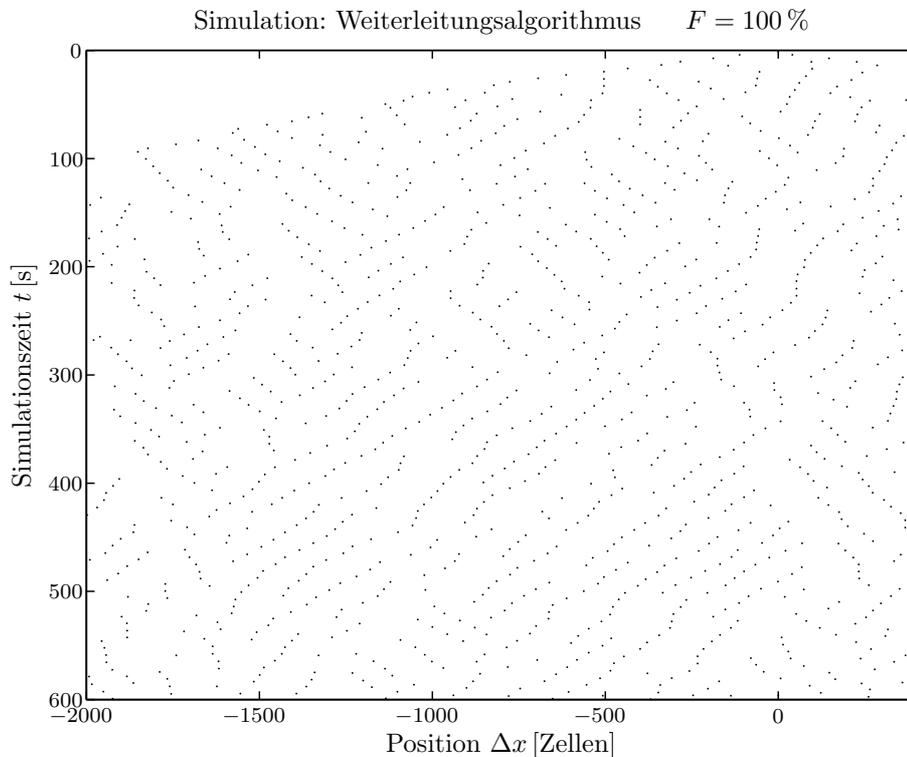


Abbildung 4.42: Informationsabdeckung über 600 s bei  $\rho = 90$  veh/km/2lanes

Dieses Verhalten führt zur Bildung von „Waiting for Acknowledgement-Ketten“, was bedeutet, dass die getätigten Aussendungen zunehmend von denselben Fahrzeugen vorgenommen werden. Die WfA-Ketten entstehen in diesen Fällen durch die Eigenbewegung der jeweiligen Fahrzeuge. Abbildung 4.42 verdeutlicht die Kettenbildung bei einer Verkehrsdichte von 90 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur. Zu erkennen ist, dass sowohl Fahrzeuge der Gefahrenzone (Ketten zusammengehöriger Punkte von links nach rechts) als auch Fahrzeuge der Gegenzone (rechts nach links) am Weiterleitungsprozess beteiligt sind. Die Abbildungen A.24 und A.25 zeigen die Kettenbildungen beider Verkehrszonen zusätzlich in getrennter Darstellung.

Im Extremfall von verkehrsdichtebestimmten fast stehenden Fahrzeugen zeigt sich die Fähigkeit des Algorithmus, ohne einen äußeren Eingriff einer übergeordneten Instanz die aktiven Fahrzeuge des Weiterleitungsprozesses in nahezu äquidistanten Entfernungen voneinander „anzuordnen“. Abbildung 4.43 zeigt diesen Fall für eine Verkehrsdichte von 200 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur und einer Sendeleistung von 100 mW, Abbildung 4.44 für die gleichen Werte bei einer um den Faktor 10 höheren Sendeleistung. Bei einem derartig nahe an der maximalen Fahr-

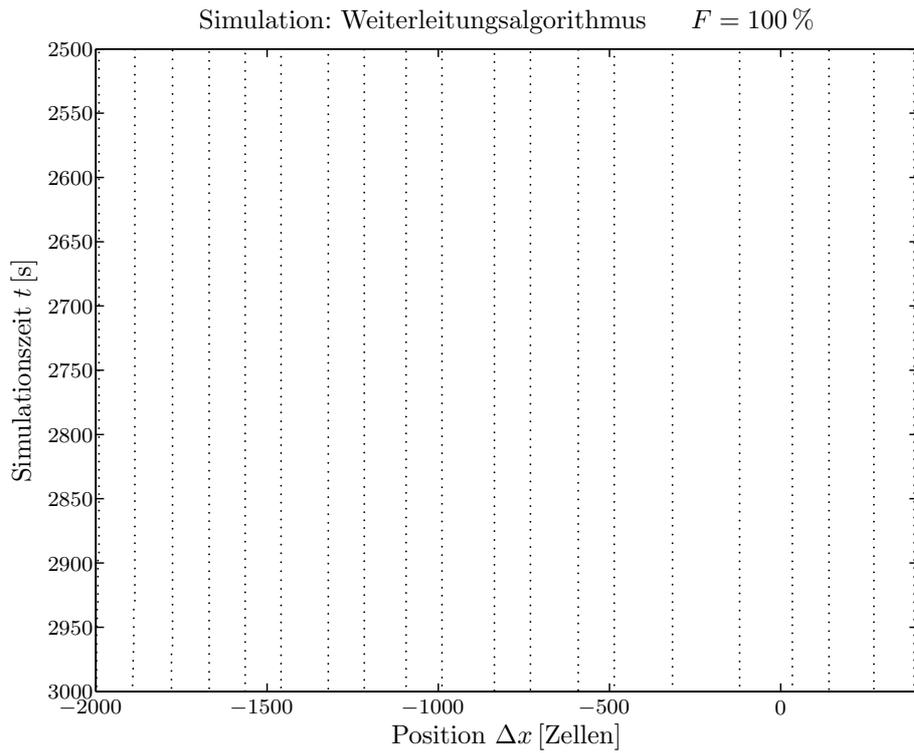


Abbildung 4.43: Informationsabdeckung über 500 s bei  $\rho = 200$  veh/km/2lanes

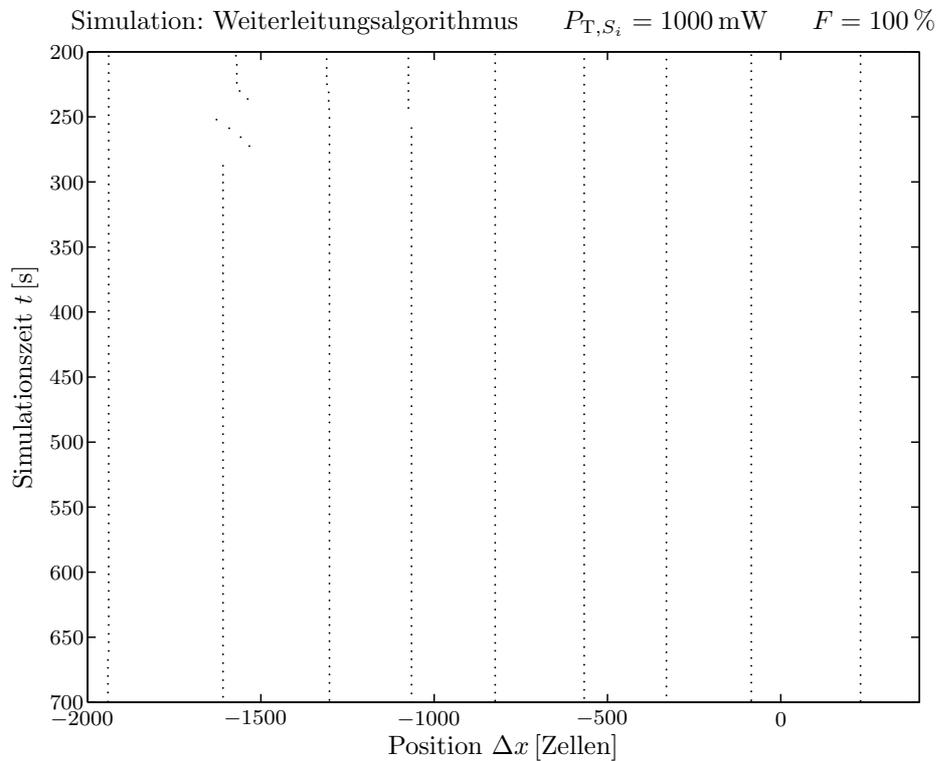


Abbildung 4.44: Informationsabdeckung über 500 s bei  $\rho = 200$  veh/km/2lanes und zehnfacher Sendeleistung  $P_{T,s_i}$

zeugdichte liegenden Wert für  $\rho$  (Abbildung 4.15) kommt es nur noch sporadisch zu kurzen Bewegungswellen. Die dargestellten Zeitausschnitte wurden zusätzlich so gewählt, dass währenddessen nahezu keine Bewegungen von Fahrzeugen stattfinden.

Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 3.5.1 ermittelten maximalen Funkreichweiten für die jeweiligen Sendeleistungen lässt sich feststellen, dass in beiden Fällen die mittleren Abstände der aktiven Fahrzeuge von 190 m und 400 m gut mit den maximal erlaubten Abständen harmonieren. Für diese gilt die in (4.16) dargestellte einfache Beziehung:

$$\Delta x_{\text{WfA,max}} = 2 \cdot R_{\text{comm}} \quad . \quad (4.16)$$

Entspricht der Abstand zwischen aktiven, stehenden Fahrzeugen exakt dem Maximalabstand, gilt also  $\Delta x_{\text{WfA},n,n\pm 1} = \Delta x_{\text{WfA,max}}$ , so werden alle Fahrzeuge mit Informationen versorgt ohne eine Nachricht gleichen Inhalts von zwei verschiedenen Fahrzeugen zu empfangen. Der Maximalabstand entspricht somit dem Abstand, bei dem die Belastung der Informationsweiterleitung zu Grunde liegenden Funknetzes am geringsten ist. Versorgungslücken durch Schwankungen zwischen den tatsächlichen Abständen aktiver Fahrzeuge sind jedoch nur zu vermeiden, wenn diese geringer als der maximale Abstand sind. Durch die Arbeitsweise des entwickelten Algorithmus wird weiterhin gefordert, dass die tatsächlichen Abstände größer als die maximale Funkreichweite sind, so dass gilt:

$$R_{\text{comm}} < \Delta x_{\text{WfA},n,n\pm 1} \leq \Delta x_{\text{WfA,max}} \quad . \quad (4.17)$$

### 4.9.7 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Aufgabe der dezentralen Verteilung sicherheitsrelevanter Verkehrsinformationen in einem sich selbst regulierenden Funknetz zwischen Fahrzeugen kann wie in den Abschnitten 4.9.1 bis 4.9.6 gezeigt, ohne Zuhilfenahme einer festen Infrastruktur erfolgreich durchgeführt werden. Dabei ist der in dieser Arbeit entwickelte Algorithmus in der Lage, die Belastung der Funkschnittstelle sowohl unabhängig von der Verkehrsdichte und damit der Zahl weiterleitungsbereiter Fahrzeuge als auch unabhängig von Sendeleistung und Übertragungsdauer nahezu konstant und auf niedrigem Niveau zu halten.



# Kapitel 5

## Verkehrsbeeinflussung

Ein Beitrag für mehr Sicherheit im Fahrzeugverkehr ist der Erhalt des fließenden Verkehrs. Im folgenden Kapitel sollen daher Konzepte vorgestellt und evaluiert werden, die mit Hilfe der Verbreitung verkehrsrelevanter Information durch Kommunikation von Fahrzeugen untereinander verkehrsflussoptimierende Maßnahmen unterstützen können.

### 5.1 Ausgangssituation

Zielgerichtete Informationen über die Verkehrslage versetzen einen Fahrzeugführer in die Lage, sein Verhalten den aktuellen Gegebenheiten anzupassen. Mit Hilfe des Traffic Message Channels TMC kann beispielsweise über die Navigationsanlage des Fahrzeugs bei Bedarf ein Gebiet erhöhten Verkehrsaufkommens umfahren werden. Die Ausstrahlung von Verkehrsinformationen über Rundfunksender setzt jedoch eine möglichst genaue und zeitnahe Erfassung der den Meldungen zu Grunde liegenden Verkehrsdaten voraus, um Wirksamkeit entfalten zu können. Ein Problem dieser Vorgehensweise besteht in der fehlenden Möglichkeit zur Ursachenvermeidung. Staus können beispielsweise erst erfasst und gemeldet werden, wenn sie bereits existieren.

Derartige Verkehrsflussstörungen entstehen auf besonders stark befahrenen Streckenabschnitten auch ohne äußere Anlässe. Wie in Abschnitt 2.9.4 beschrieben, werden Störungen dieser Art durch nichtideales Fahrverhalten der Verkehrsteilnehmer hervorgerufen. Die dadurch auftretenden Schwankungen der Fahrzeuggeschwindigkeiten müssen durch nachfolgende Fahrer ausgeglichen werden. Auf diese Weise können Schwingungen entstehen, welche im Extremfall bis zum Stillstand von Fahrzeugen führen. Primäres Ziel jeder verkehrsbeeinflussenden Maßnahme ist daher die Fahrzeugflusserhaltung auch unter ungünstigen Bedingungen. Ist dies nicht möglich, wird als sekundäres Ziel eine optimierte Wiederherstellung des Flusses angestrebt.

## 5.2 Verkehrsflusserhaltung

Wird die Verkehrsentwicklung der letzten Jahrzehnte betrachtet, so kann eine signifikante Steigerung der durchschnittlichen täglichen Verkehrsbelastung festgestellt werden. Für die Zukunft zeichnet sich ab, dass allein mittels weiteren Ausbaus der Verkehrsinfrastruktur den wachsenden Anforderungen an die Leistungsfähigkeit des Straßensystems nicht mehr begegnet werden kann. Als Konsequenz gilt es, durch intelligente Einflussnahme auf den Fahrzeugverkehr die vorhanden Ressourcen effizienter zu nutzen und mögliche Kapazitätsreserven zu schaffen [67, 68].

### 5.2.1 Infrastrukturelle Verkehrsflussoptimierung

Die infrastrukturelle Verkehrsbeeinflussung basiert in erster Linie auf dem Einsatz von Wechselverkehrszeichen an hochbelasteten und unfallreichen Strecken des Fernverkehrsnetzes. Eine positive Verkehrsbeeinflussung ist durch die Harmonisierung des Verkehrsablaufs durch adaptive Geschwindigkeitsbeschränkungen, der bedarfsgerechten Umleitung von Verkehrsströmen auf Alternativrouten sowie von temporären Kapazitätserhöhungen durch die Freigabe des Seitenstreifens möglich. Mittels Streckenbeeinflussungsanlagen ist es möglich, Unfälle um bis zu 30 %, schwere Unfälle um bis zu 50 % zu reduzieren [69].

Mit intelligenter Infrastruktur allein ist das Niveau der Verkehrssicherheit jedoch nur bis zu einem bestimmten Grad verbesserbar. Auch ist es aus ökonomischen Gründen nicht sinnvoll, aufwendige Verkehrsbeeinflussungsanlagen für das gesamte Fernstreckennetz eines Landes zu realisieren. Eine weitere Steigerung von Sicherheit und Verkehrsfluss ist somit nur durch das Zusammenwirken infrastruktureller Maßnahmen und Entwicklungen im Fahrzeug selbst möglich.

### 5.2.2 Infrastrukturlose Verkehrsflussoptimierung

Mittels Austausch von Zustandsdaten unter Zuhilfenahme drahtloser Kommunikation können Fahrzeuge in die Lage versetzt werden, vorhandene Assistenzsysteme mit Informationen über den von der eigenen Sensorik erfassten Umgebungsbereich hinaus zu versorgen [70]. Im Unterschied zu allgemeinen, über TMC ausgestrahlten Verkehrsinformationen sind die über direkte Kommunikation zwischen den Fahrzeugen verteilten Daten hochaktuell und lokal relevant. Da die Inhalte der Nachrichten über den Sichtbereich des Fahrzeugführers hinausgehen können, ist eine frühzeitige Reaktion sowohl des Fahrers als auch vorhandener Assistenzsysteme möglich. Dem Einsatz von Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation folgt somit ein erweiterter Möglichkeitsbereich der Fahrerassistenz.

Eine Form von Fahrerassistenzsystemen hält unter der Bezeichnung „Adaptive Cruise Control“ (ACC) verstärkt Einzug in neue Fahrzeuge. Umfangreiche Untersuchungen über die Beeinflussungsmöglichkeiten von Fahrzeugverkehr über die ACC zeigen deutlich das Potenzial dieser Technologie [71, 72, 73, 74, 75, 76]. So entstehen bereits ab ACC-Ausrüstungsgraden von 20 % keine Staus nur auf Grund hoher Fahrzeugdichte [77, 78] mehr. Der stabilisierende Einfluss von ACC auf den Fahrzeugfluss und die reduzierende Wirkung auf großräumige Staus wird unter anderem in [79, 80] gezeigt.

## 5.3 Verkehrsflusswiederherstellung

Für die Wiederherstellung des Verkehrsflusses bei einer Störung und den Abbau des damit verbundenen Staus existieren zwei in ihrer Wirkung identische Möglichkeiten. Zum einen kann durch die Reduktion des Zuflusses von Fahrzeugen in den gestörten Bereich hinein dem Stau seine Existenzgrundlage entzogen werden. Zum anderen ist es durch ein beschleunigtes Abführen von Fahrzeugen aus dem gestörten Bereich heraus möglich einen Stau schneller abzubauen. Beide Möglichkeiten sollen im Folgenden näher betrachtet werden.

### 5.3.1 Reduktion des Stauzuflusses

Eine Maßnahme zur Reduktion des Stauzuflusses ist die Umleitung von Fahrzeugen auf alternative Strecken, wie in Abschnitt 5.2.1 angedeutet. Dabei muss sichergestellt sein, dass die Umleitung eine wirkliche Alternative darstellt, der Zeitverlust durch die neue Strecke also nicht größer ist als der mit dem Durchfahren des gestörten Bereichs verbundene Zeitaufwand.

Die Verringerung der Durchschnittsgeschwindigkeit der Fahrzeuge vor dem Staubereich stellt eine weitere Möglichkeit dar. Dabei ist zu beachten, dass das Herabsetzen der Geschwindigkeiten im Normalfall zu geringeren Abständen zwischen den Fahrzeugen führt, was den erzielbaren Effekt minimiert. Können die ursprünglichen Abstände konstant gehalten werden, ist jedoch eine signifikante Senkung des Verkehrsflusses erzielbar.

### 5.3.2 Erhöhung des Stauabflusses

Eine Erhöhung des Stauabflusses ist in allen Situationen möglich, in denen der maximale Fahrzeugfluss nicht erreicht wird. Dies ist, wie in Abbildung 2.6 schematisch dargestellt, bei unkoordiniertem Anfahren der Fahrzeuge aus dem Stand gegeben [21, 22, 19]. In Fällen koordinierten Anfahrens, beispielsweise vor Ampeln

oder Bahnübergängen, sollte der erzielbare Fahrzeugfluss daher höher sein als bei einem Anfahren aus einer Stausituation heraus.

Beide Situationen unterscheiden sich prinzipiell. Ampelschaltungen oder das Öffnen von Bahnschranken wirken als Signal auf alle Fahrzeugführer gleichzeitig, welche sich in Sichtweite der Anlagen befinden. Sie ermöglichen demzufolge koordiniertes Handeln. Das Erzielen eines ähnlichen Verhaltens bei der Ausfahrt aus einem Stau setzt somit die Verfügbarkeit gleichwertiger Informationen für die Fahrzeugführer zur Verkürzung der individuellen Reaktionszeiten voraus.

## 5.4 Algorithmen zur Verkehrsbeeinflussung

Der Ansatz, durch Hinweise an den Fahrzeugführer das Fahrverhalten zu optimieren, gehört zu den verkehrsbeeinflussenden Maßnahmen. Internationale Entwicklungen zielen hauptsächlich auf diese Form der Verkehrssteuerung [81, 82, 83], da Eingriffe von außen in der Regel nicht von der jeweiligen Gesetzgebung abgedeckt werden. Ist durch die in Kapitel 4 vorgestellte Anforderung, sicherheitsrelevante Informationen weiterleiten zu können, bereits die nötige Ausrüstung für Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation vorhanden, so kann diese ebenfalls zur Optimierung des Fahrzeugflusses verwendet werden. Im Folgenden werden daher Algorithmen vorgestellt, mit deren Hilfe über die Verbreitung lokal relevanter Informationen verkehrsstabilisierender Einfluss ausgeübt werden kann.

### 5.4.1 Verkehrsflussoptimierung

Primäres Ziel einer verkehrsbeeinflussenden Maßnahme ist der Erhalt des fließenden Verkehrs. Eine Möglichkeit zur Umsetzung dieses Ziels ist die in Abschnitt 5.2.2 beschriebene Idee, Schwankungen des Fahrverhaltens durch gezielte Hinweise an den Fahrzeugführer zu reduzieren und damit einen verbesserten Verkehrsfluss zu erreichen.

$$e(t) = \begin{cases} 1 & \text{wenn gilt:} \\ & t > t_{\text{TF},S_j} + \Delta t_{\text{Trigger,TF}} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.1)$$

Voraussetzung für das Funktionieren des Algorithmus ist das Führen einer Geschwindigkeits-Historie. Jedes Fahrzeug speichert seine in der Vergangenheit gefahrene Geschwindigkeit für einen endlichen, bis in die Gegenwart reichenden Zeitabschnitt. Die Unterschreitung einer definierten mittleren Geschwindigkeit über diesen Zeitabschnitt führt zum Auslösen eines internen Signals. Die der Auslösung zu Grunde

gelegte Geschwindigkeit ist dabei abhängig von der Geschwindigkeit, die im Entscheidungsschritt zuvor zur Generierung des Signals geführt hat.

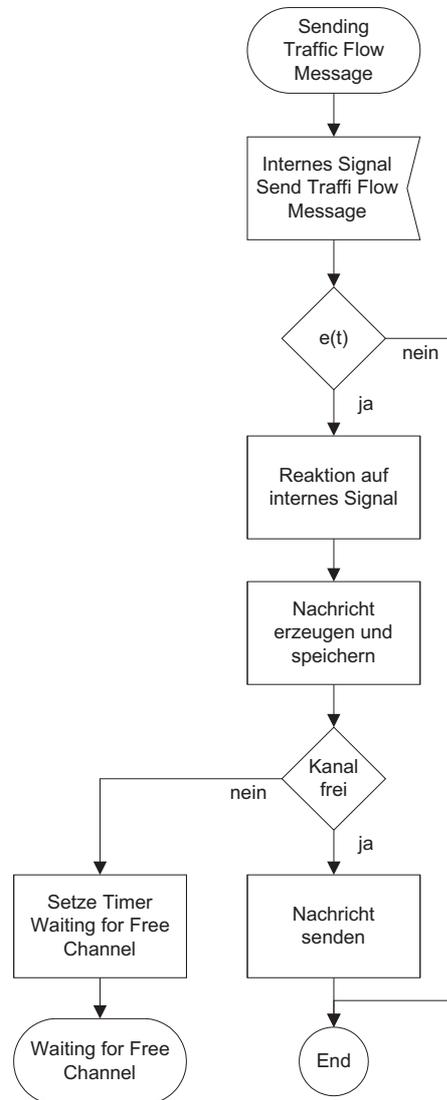


Abbildung 5.1: Verkehrsflussoptimierung – Sending Traffic Flow Message

$$i(x) = \begin{cases} 1 & \text{wenn für die empfangene Verkehrsflussnachricht gilt:} \\ & x_{t_{TF}, S_i} > x_{t_{TF}, E_k} \quad \text{und} \\ & x_{dir, t_{TF}, S_i} = x_{dir, t_{TF}, E_k} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.2)$$

Das Fahrzeug entscheidet mit Hilfe von (5.1) sowie mittels des in Abbildung 5.1 gezeigten Ablaufs, ob das der Signalauslösung zu Grunde liegende Ereignis an andere Fahrzeuge weitergegeben werden soll. Die Entscheidung fällt positiv aus, wenn das Senden der letzten eigenen Verkehrsflussnachricht lange genug her ist und sich keine

gültige Nachricht gleichen Inhalts eines anderen Fahrzeugs im Nachrichtenspeicher befindet. Als gültig werden alle Nachrichten eingestuft, die ein definiertes Alter nicht überschreiten und jeweils von Fahrzeugen stammen, die zum Sendezeitpunkt sowohl in die gleiche Richtung fahren als auch vor dem empfangenden Fahrzeug positioniert sind.

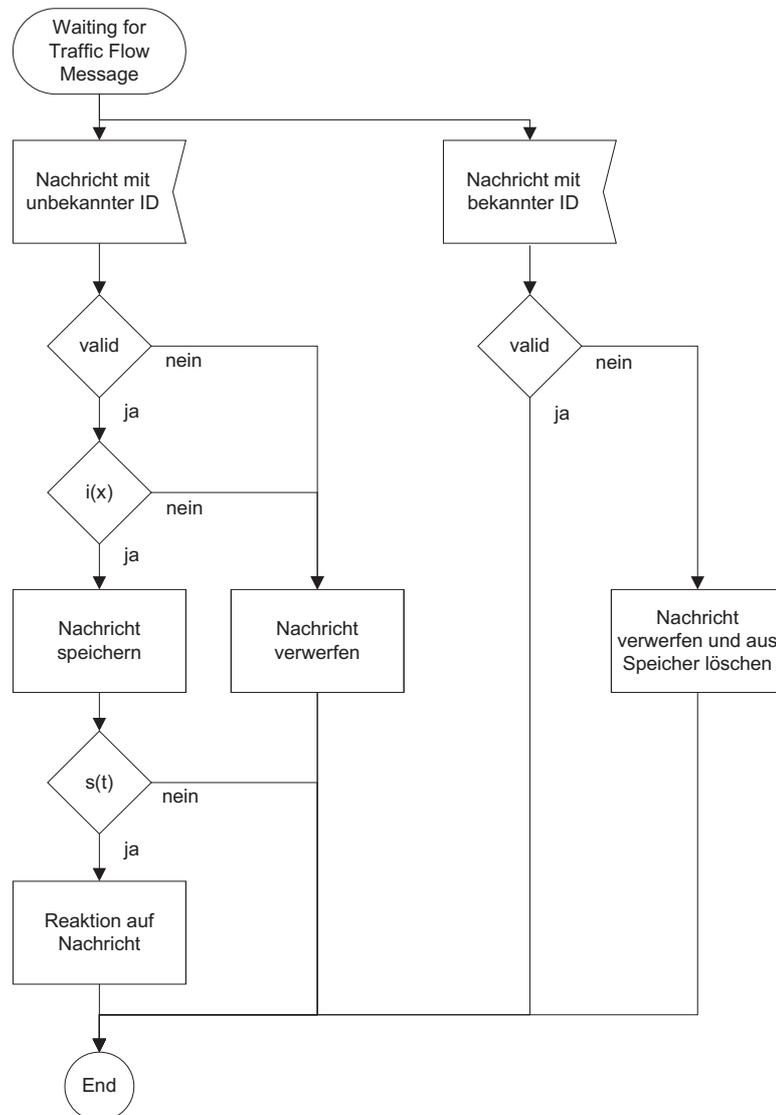


Abbildung 5.2: Verkehrsflussoptimierung – Waiting for Traffic Flow Message

Bei dem sendenden Fahrzeug erfolgt bei positiver Entscheidung eine Modifizierung des Fahrverhaltens. Diese bewirkt eine Verringerung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit für das betreffende Fahrzeug. Die Geschwindigkeitsreduktion unterliegt keiner zeitlichen Beschränkung. Sie wird aufgehoben, wenn der Grund für die Beschränkung nicht mehr gegeben ist. Wird durch den in Abbildung 5.2 dargestellten Ablauf eine empfangene Verkehrsflussnachricht nach Prüfung sowohl ihrer

Bedeutung durch (5.2) als auch ihres zeitlichen Abstandes zur letzten angezeigten Nachricht durch (5.3) dem Führer eines Fahrzeugs zur Anzeige gebracht, so wird im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, dass der Fahrer darauf, neben der zuvor erläuterten Geschwindigkeitsreduktion, mit einem erhöhten, aber zeitlich begrenzten Grad an Aufmerksamkeit reagiert. Moduliert wird die Aufmerksamkeitserhöhung durch ein Herabsetzen der Fluktuationswahrscheinlichkeiten  $p_{d|b|0}$  des betreffenden Fahrzeugs für eine definierte Dauer.

$$s(t) = \begin{cases} 1 & \text{wenn mit } TF, S_{i-1} \text{ als letzter angezeigter Verkehrsflussnachricht gilt:} \\ & t > t_{TF, S_{i-1}} + \Delta t_{\min, TF} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.3)$$

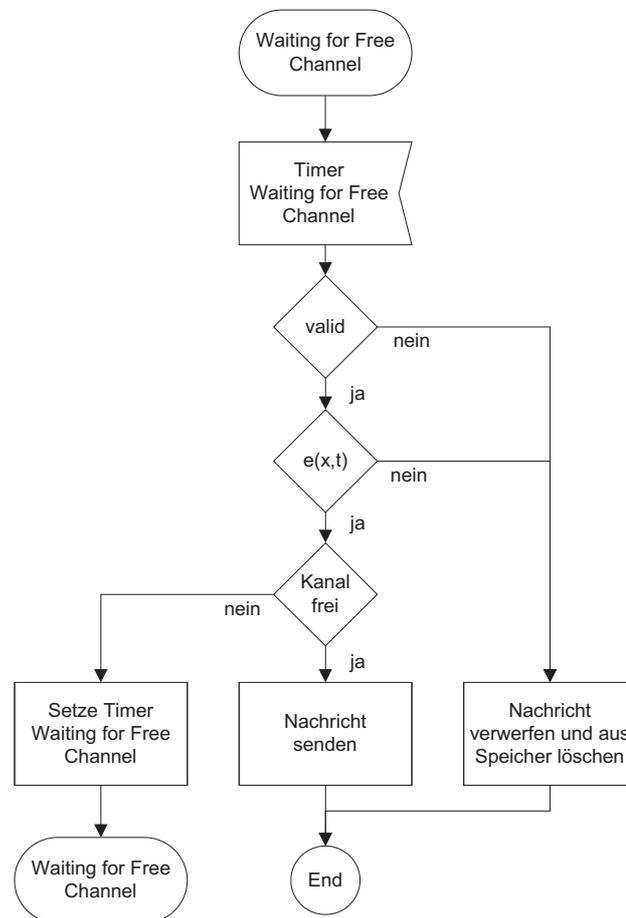


Abbildung 5.3: Verkehrsfluss-/Anfahrtoptimierung – Free Channel

Ist das Senden einer Nachricht auf Grund eines belegten Kanals nicht möglich, wird eine zufällige Zeit gewartet und der Sendeversuch wiederholt, wenn der Grund für die Aussendung weiterhin gegeben ist (Abbildung 5.3).

Empfangene Nachrichten, die entweder nicht bedeutend oder nicht mehr gültig sind, werden aus dem Nachrichtenspeicher des Fahrzeugs gelöscht.

### 5.4.2 Anfahroptimierung

Sekundäres Ziel einer verkehrsbeeinflussenden Maßnahme ist die Wiederherstellung des fließenden Verkehrs, falls dieser zum Erliegen gekommen ist. Eine Möglichkeit zur Umsetzung dieses Ziels ist die in Abschnitt 5.3.2 beschriebene Idee, durch Optimierung des Anfahrverhaltens geringere Standzeiten und damit einen erhöhten Fahrzeugfluss zu realisieren.

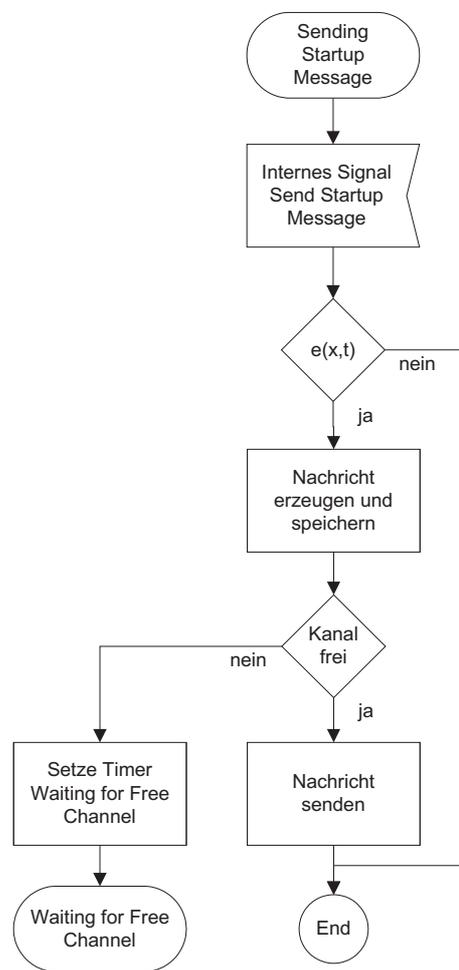


Abbildung 5.4: Anfahroptimierung – Sending Startup Message

Voraussetzung für das Funktionieren des Algorithmus ist wiederum das Führen einer Geschwindigkeits-Historie. Wie in Abschnitt 5.4.1 speichert jedes Fahrzeug seine in der Vergangenheit gefahrene Geschwindigkeit für einen endlichen, bis in die Gegenwart reichenden Zeitabschnitt. Die Erkennung eines definierten Musters in der

Historie führt zum Auslösen eines internen Signals. Abbildung 5.5 verdeutlicht diesen Fall für einen Zeitabschnitt von acht Sekunden. Das Signal wird in dem dargestellten Beispiel ausgelöst, wenn ein Fahrzeug nach einer Standzeit von mindestens fünf Sekunden wieder angefahren ist und die Fahrt seitdem, sowie für mindestens drei Sekunden nicht mehr unterbrochen wurde.

$t_{-7}$	$t_{-6}$	$t_{-5}$	$t_{-4}$	$t_{-3}$	$t_{-2}$	$t_{-1}$	$t_0$
0	0	0	0	0	$v > 0$	$v > 0$	$v > 0$

$t \longrightarrow$

Abbildung 5.5: Suchmuster

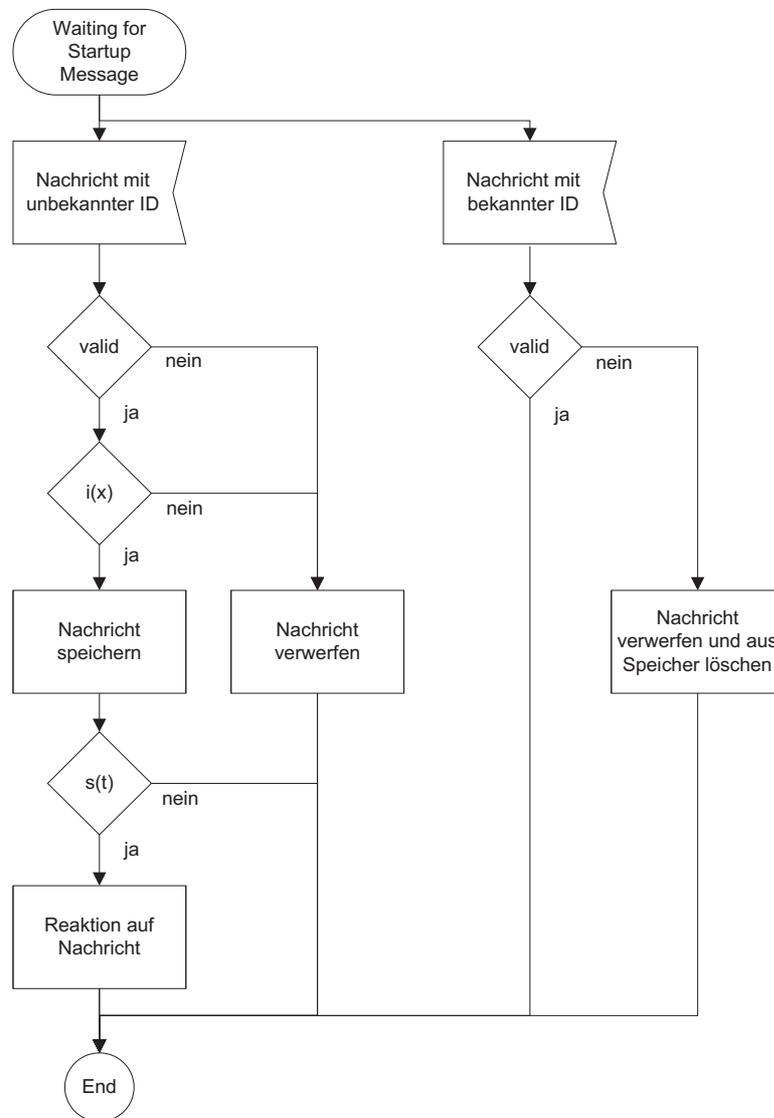


Abbildung 5.6: Anfahrtoptimierung – Waiting for Startup Message

Das Fahrzeug entscheidet mit Hilfe von (5.4) sowie mittels des in Abbildung 5.4 gezeigten Ablaufs, ob das der Signalauslösung zu Grunde liegende Ereignis an andere Fahrzeuge weitergegeben werden soll. Die Entscheidung fällt positiv aus, wenn das Senden der letzten eigenen Anfahrnachricht lange genug her ist und sich keine gültige Nachricht gleichen Inhalts eines anderen Fahrzeugs im Nachrichtenspeicher befindet. Als gültig werden alle Nachrichten eingestuft, die ein definiertes Alter nicht überschreiten und jeweils von Fahrzeugen stammen, die zum Sendezeitpunkt sowohl in die gleiche Richtung fahren als auch vor dem empfangenden Fahrzeug positioniert sind.

$$e(x, t) = \begin{cases} 1 & \text{wenn für alle Anfahrnachrichten im Speicher gilt:} \\ & t > t_{\text{SU}, S_j} + \Delta t_{\text{Trigger}, \text{SU}} \quad \text{und} \\ & x_{t_{\text{SU}, S_j}} > x_{t_{\text{SU}, E_k}} \quad \text{und} \\ & x_{\text{dir}, t_{\text{SU}, S_j}} = x_{\text{dir}, t_{\text{SU}, E_k}} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.4)$$

Bei dem sendenden Fahrzeug erfolgt keine Modifizierung des Fahrverhaltens, da das initiale Ereignis, also das Anfahren, bereits in der Vergangenheit liegt. Die Reaktion liegt somit ausschließlich auf der Seite des empfangenden Fahrzeugs. Wird durch den in Abbildung 5.6 dargestellten Ablauf eine empfangene Anfahrnachricht nach Prüfung sowohl ihrer Bedeutung durch (5.5) als auch ihres zeitlichen Abstandes zur letzten angezeigten Nachricht durch (5.6) dem Führer eines Fahrzeugs zur Anzeige gebracht, so wird im Rahmen dieser Arbeit davon ausgegangen, dass der Fahrer darauf mit einem erhöhten, aber zeitlich begrenzten Grad an Aufmerksamkeit reagiert. Moduliert wird die Aufmerksamkeitserhöhung wie zuvor erläutert durch ein Herabsetzen der Fluktuationswahrscheinlichkeiten  $p_{d|b|0}$  des betreffenden Fahrzeugs für eine definierte Dauer.

$$i(x) = \begin{cases} 1 & \text{wenn für die empfangene Anfahrnachricht gilt:} \\ & x_{t_{\text{SU}, S_i}} > x_{t_{\text{SU}, E_k}} \quad \text{und} \\ & x_{\text{dir}, t_{\text{SU}, S_i}} = x_{\text{dir}, t_{\text{SU}, E_k}} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.5)$$

Ist das Senden einer Nachricht auf Grund eines belegten Kanals nicht möglich, wird eine zufällige Zeit gewartet und der Sendeversuch wiederholt, wenn der Grund für die Aussendung weiterhin gegeben ist (Abbildung 5.3).

$$s(t) = \begin{cases} 1 & \text{wenn mit } \text{SU}, S_{i-1} \text{ als letzter angezeigter Anfahrnachricht gilt:} \\ & t > t_{\text{SU}, S_{i-1}} + \Delta t_{\text{min}, \text{SU}} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (5.6)$$

Empfangene Nachrichten, die entweder nicht bedeutend oder nicht mehr gültig sind, werden aus dem Nachrichtenspeicher des Fahrzeugs gelöscht.

## 5.5 Evaluierung der Verkehrsbeeinflussung

Es wird begonnen mit Untersuchungen über die Auswirkungen der Algorithmen auf den erzielbaren Fahrzeugfluss. Es werden die Eigenschaften und das Verhalten der entwickelten Algorithmen dargestellt. Die Diagramme stellen jeweils eine Mittelung über zehn Simulationsdurchläufe dar.

### 5.5.1 Verkehrsflussoptimierung

Zweck einer von einem Fahrzeug gesendeten Verkehrsflussnachricht ist der Erhalt des fließenden Verkehrs. Im Vergleich der Abbildungen 5.7 und 5.8 zeigt sich, dass die Fahrzeuge ab einer Verkehrsdichte von 20 veh/km/2lanes mit der Generierung derartiger Nachrichten beginnen. Nach Abbildung 2.9 beträgt die fahrbare Geschwindigkeit bei dieser Dichte 90 % der Wunschgeschwindigkeit. Sinkt die im Mittel gefahrene Geschwindigkeit auf 30 % bis 40 %, erreicht die Aussendung der Nachrichten ihr Maximum. Abbildung 5.9 verdeutlicht diesen Fall. Dargestellt ist die Zahl an Übertragungen pro ausgerüstetem Fahrzeug in Abhängigkeit der Fahrzeugdichte und damit der möglichen Geschwindigkeit. Zu erkennen ist, dass unabhängig vom Penetrationsgrad die jeweiligen Kurvenverläufe nahezu identisch sind. Dies ist bedingt durch (5.1) auch nicht anders zu erwarten, da ein Fahrzeug seine Entscheidung, eine Verkehrsflussnachricht zu senden, nur von der Historie seiner eigenen gefahrenen Geschwindigkeit abhängig macht.

Tabelle 5.1: Simulationsparameter Verkehrsflussoptimierung

Parameter	Wert
$\Delta t_{\text{off},p_{d b} 0}$	20 s
$\Delta t_{\text{min,TF}}$	60 s
$\Delta t_{\text{Trigger,TF}}$	60 s .. 120 s

Abbildung 5.10 zeigt die Anzahl der unter Berücksichtigung von (5.3) akzeptierten und somit dem Führer des betreffenden Fahrzeugs zur Anzeige gebrachten Verkehrsflussnachrichten in Abhängigkeit der Fahrzeugdichte und des Penetrationsgrads. Bedingt durch die geringere Zahl gesendeter Nachrichten bei einem niedrigen Ausrüstungsgrad, liegen die dargestellten Kurven deutlich auseinander. Durch einen Vergleich der Penetrationsgrade 10 % und 100 % ist der reduzierende Einfluss von (5.3) auf die Zahl der angezeigten Verkehrsflussnachrichten zu erkennen. So beträgt

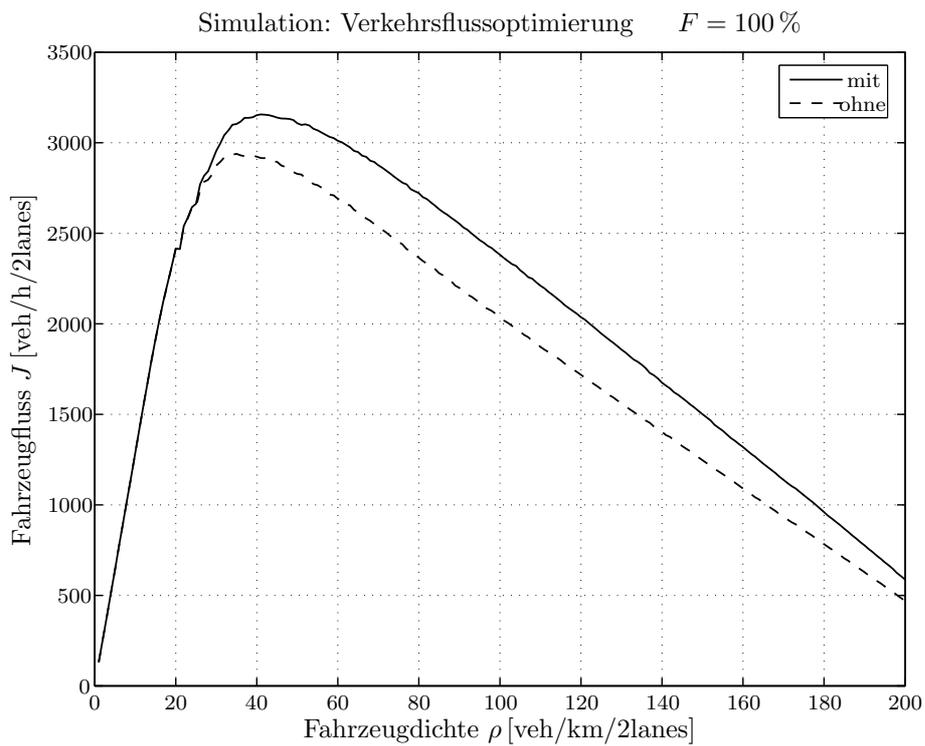


Abbildung 5.7: Fundamentaldiagramm mit und ohne Verkehrsflussoptimierung

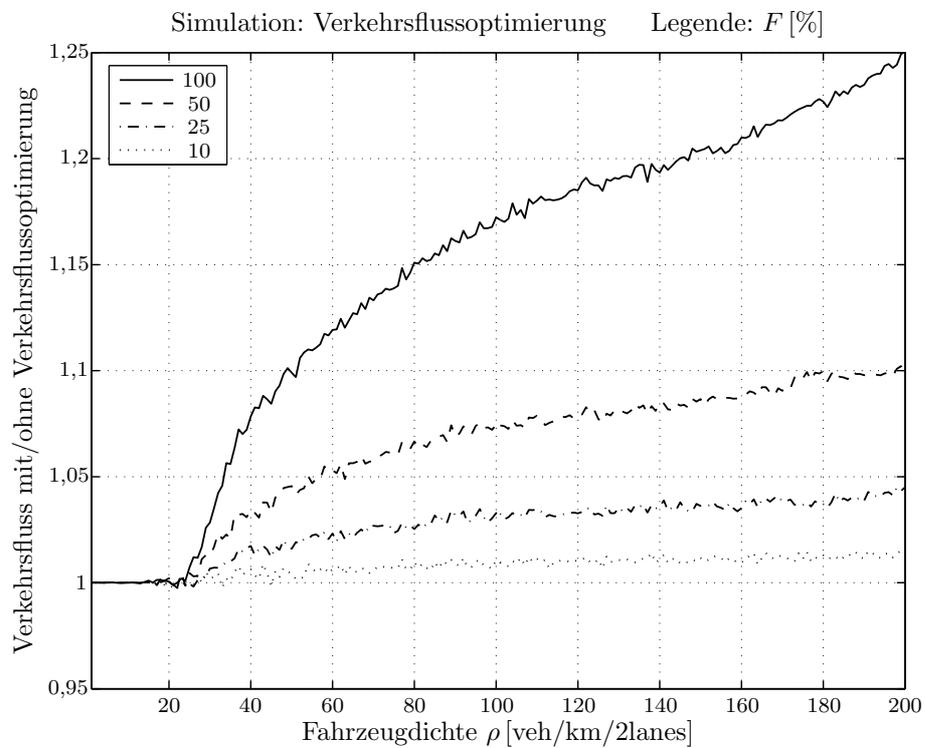


Abbildung 5.8: Verhältnis Verkehrsfluss mit/ohne Verkehrsflussoptimierung

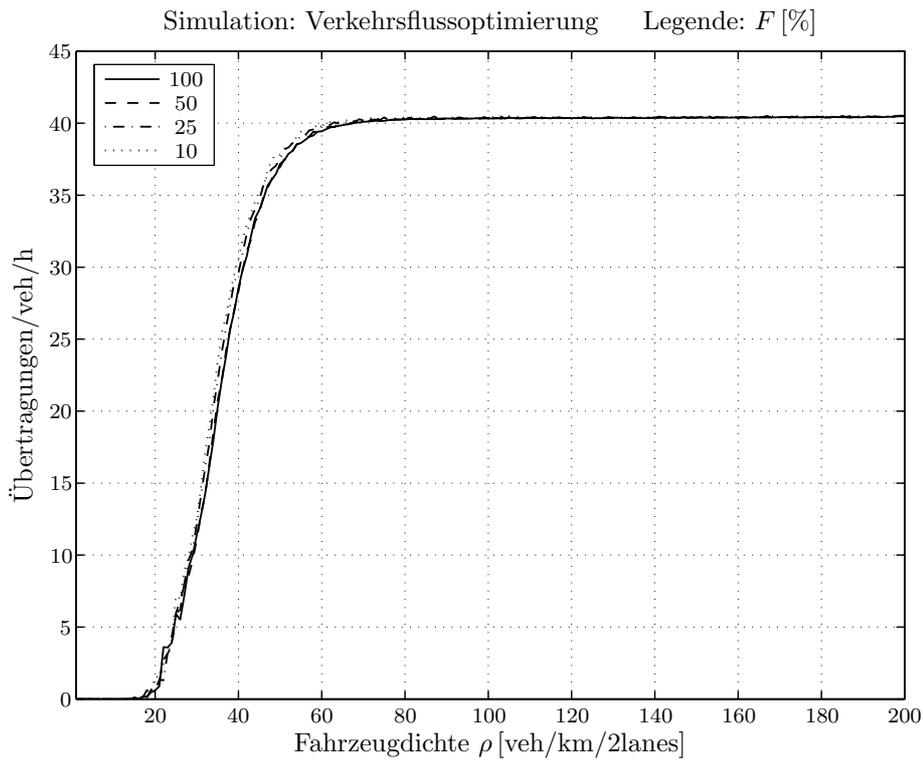


Abbildung 5.9: Gesendete Verkehrsflussnachrichten

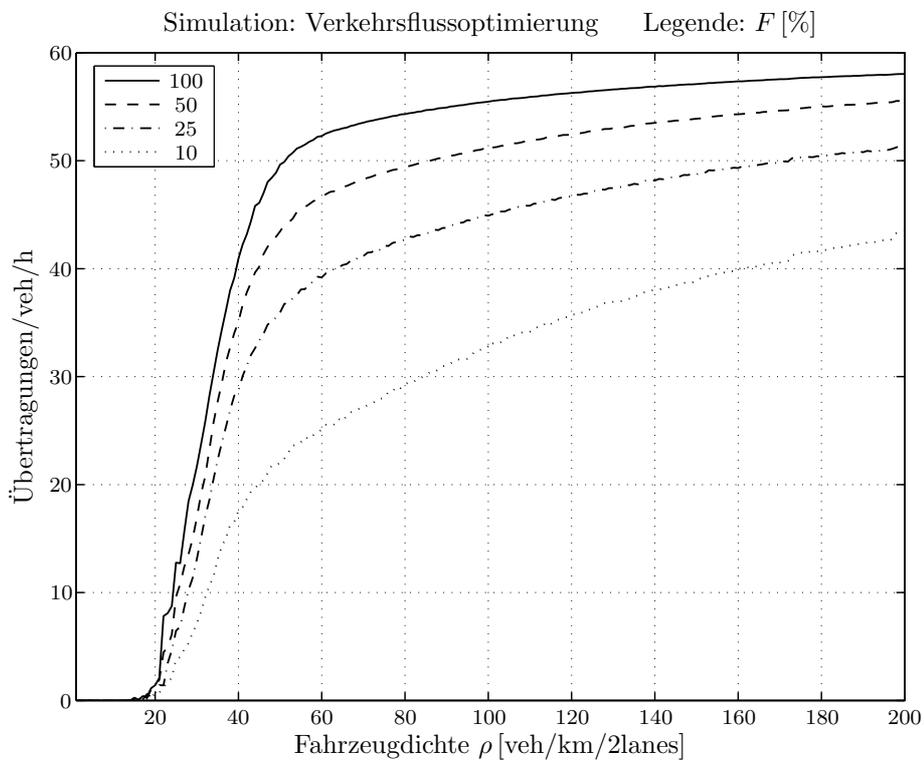


Abbildung 5.10: Akzeptierte Verkehrsflussnachrichten

beispielsweise im Fall einer Verkehrsdichte von 200 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur der Unterschied zwischen den beiden Ausrüstungsgraden, bezüglich der angezeigten Nachrichten, lediglich dreißig Prozent.

### 5.5.2 Anfahroptimierung

Ist der Fahrzeugverkehr zum Stillstand gekommen, bleibt als letzte Möglichkeit der Verkehrsflusssteigerung nur noch das koordinierte Anfahren. Eine von einem Fahrzeug gesendeten Anfahrnachricht dient diesem Zweck.

Tabelle 5.2: Simulationsparameter Anfahroptimierung

Parameter	Wert
$\Delta t_{\text{off},p_d b 0}$	20 s
$\Delta t_{\text{min},\text{SU}}$	60 s
$\Delta t_{\text{Trigger},\text{SU}}$	60 s
Suchmuster $\Delta t_{v=0}$	10 s
Suchmuster $\Delta t_{v>0}$	6 s

Im Vergleich der Abbildungen 5.11 und 5.12 ist zu erkennen, dass die Fahrzeuge wie zuvor ab einer Verkehrsdichte von 20 veh/km/2lanes mit der Generierung derartiger Nachrichten beginnen, jedoch im Unterschied zu den Verkehrsflussnachrichten und bezogen auf die Fahrzeugdichte, nur mit einer geringen Steigerungsrate. Ab einer Dichte von annähernd 100 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur ist die gegenseitige Behinderung der Fahrzeuge groß genug geworden, um diese vermehrt zum Stillstand zu bringen, was zu einer erhöhten Generierung und Aussendung von Anfahrnachrichten führt. Im Vergleich der Abbildungen 5.13 und 5.14 ist jedoch zu erkennen, dass die Aktivität eines Fahrzeugs im Hinblick auf die Aussendung von Anfahrnachrichten mit steigendem Penetrationsgrad sinkt. Dies ist eine Konsequenz der Anwendung von (5.4), da die Fahrzeuge dadurch, im Unterschied zu den Verkehrsflussnachrichten, ihre Entscheidung zur Aussendung einer Anfahrnachricht auch von den empfangenen Nachrichten anderer Fahrzeuge abhängig machen.

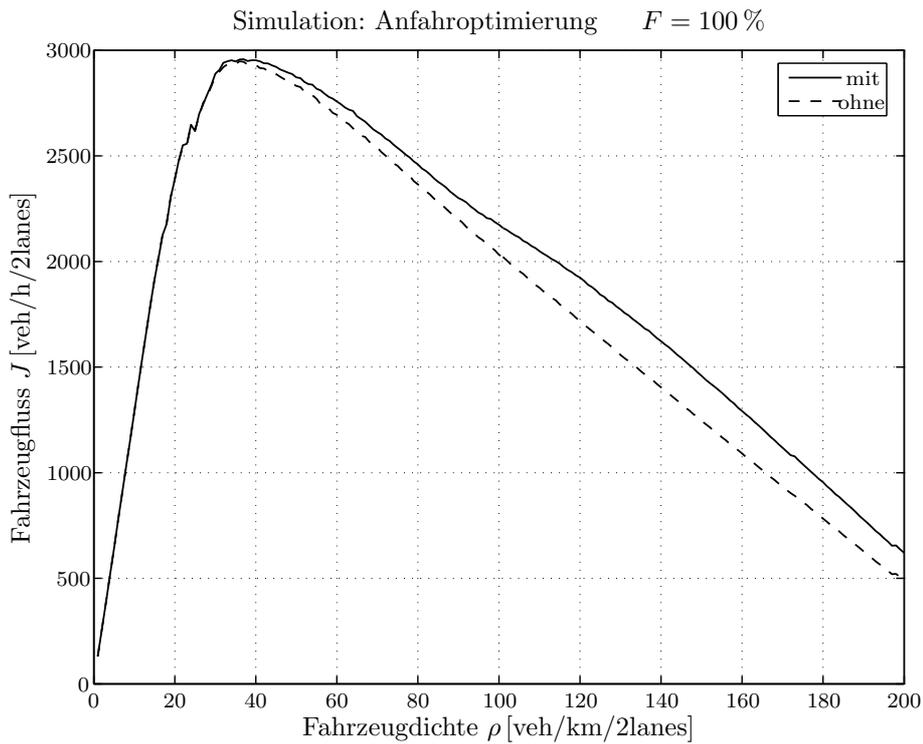


Abbildung 5.11: Fundamentaldiagramm mit und ohne Anfahrtoptimierung

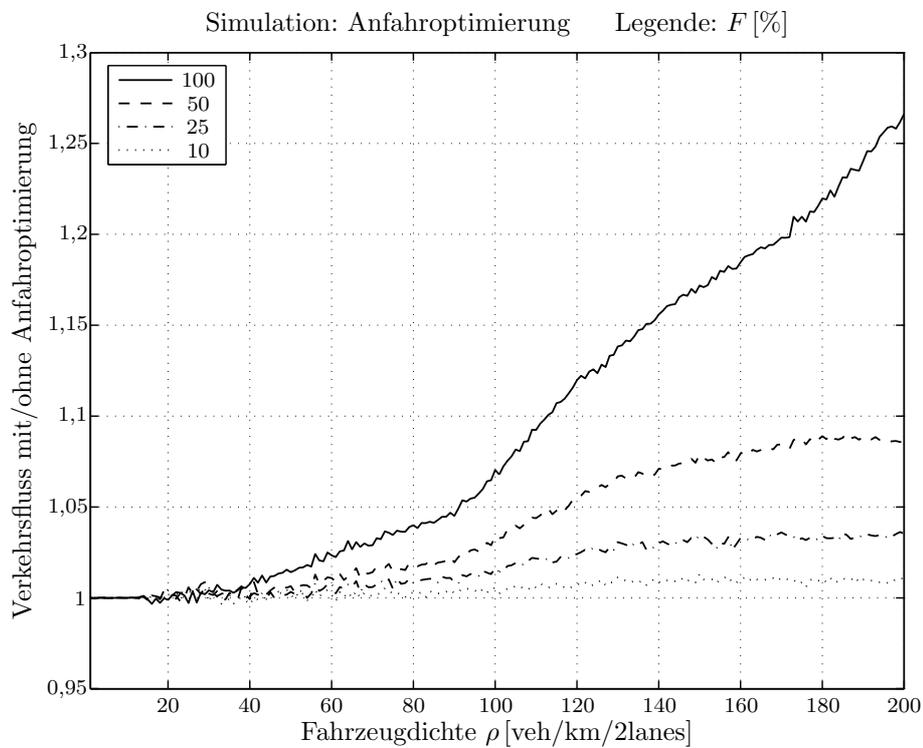


Abbildung 5.12: Verhältnis Verkehrsfluss mit/ohne Anfahrtoptimierung

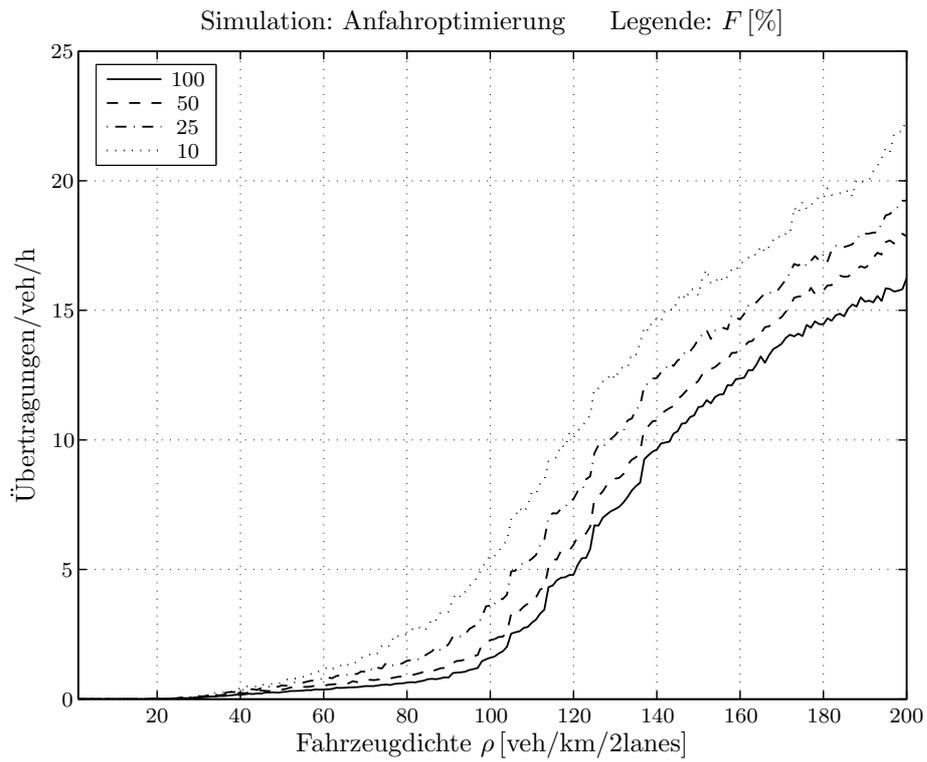


Abbildung 5.13: Gesendete Anfahrnachrichten

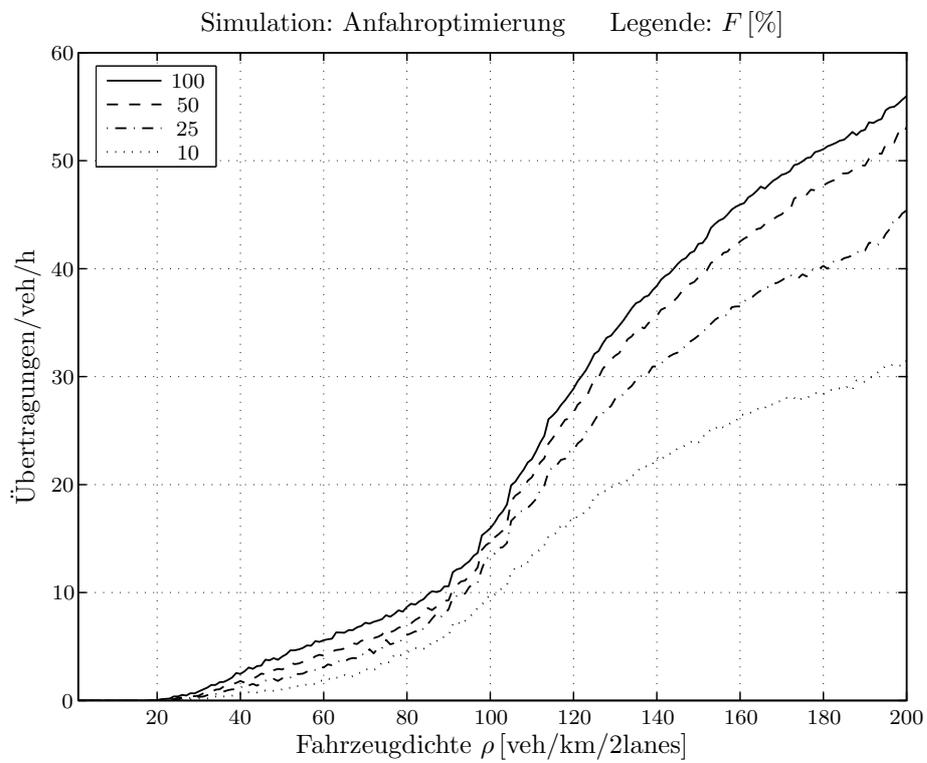


Abbildung 5.14: Akzeptierte Anfahrnachrichten

### 5.5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch die Abbildungen 5.8 und 5.12 wird gezeigt, dass durch die Koordinierung des Fahrverhaltens mittels Aussendung lokal relevanter Fahrzeugzustandsdaten, verkehrsstabilisierender Einfluss ausgeübt werden kann. Dabei ist eine Steigerung des Fahrzeugflusses von bis zu 25 % möglich. Bei geringem Ausrüstungsgrad ist diese notwendige Koordinierung der Fahrzeugführer nur noch eingeschränkt realisierbar und somit die erzielbare Wirkung geringer.

Prinzipbedingt greift das Konzept der Anfahroptimierung nur bei einer hohen Verkehrsdichte, da erst in diesem Fall die Fahrzeuge häufiger zum Stillstand kommen. Die Aussendung von Verkehrsflussnachrichten bewirkt hingegen bereits ab 40 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur einen spürbaren positiven Effekt. Dabei bleibt wie in den Abbildungen A.26 und A.27 gezeigt, die Belastung des zu Grunde liegenden Funknetzes in einem akzeptablen Rahmen.



# Kapitel 6

## Zusammenfassung

Gegenstand dieser Arbeit ist die Entwicklung und Evaluierung von Algorithmen für die Weiterleitung sicherheits- und verkehrsrelevanter Informationen wie Notfallnachrichten und Sensordaten durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation. Informationen dieser Art werden beispielsweise in Unfallsituationen von dem betreffenden Fahrzeug automatisch generiert und an die nähere Umgebung weitergegeben. In dieser Arbeit wird das räumliche Gebiet, in dem eine derartige Nachricht Bedeutung besitzt, als Relevanzzone bezeichnet. Die Wirkungsweise der Algorithmen basiert sowohl auf der Einteilung der Fahrbahnen in verschiedene Verkehrszonen als auch auf Konzepten wie der Bedeutung einer Nachricht und dem Nutzen einer Nachrichtenwiederholung. Durch die prinzipielle Begrenztheit der zur Verfügung stehenden Übertragungskapazität müssen in dem der Nachrichtenverteilung zu Grunde liegenden Funknetz fortschrittliche Techniken zur Verwaltung dieser knappen Ressource zur Anwendung kommen. Daher besteht das Hauptaugenmerk bei der Anwendung der vorgeschlagenen Algorithmen in einer Verminderung der Belastung des Funknetzes bei gleichzeitig schneller und effektiver Weitergabe der zu verbreitenden Nachrichten.

Das Ziel der multiplen Abhängigkeiten innerhalb eines Weiterleitungsprozesses liegt darin, nur Fahrzeuge Nachrichten wiederholen und damit das Funknetz belasten zu lassen, wenn ein genügend großer Vorteil für den gesamten Prozess damit verbunden ist. Fahrzeuge der Gefahrenzone tragen bei der Weiterleitung sicherheitsrelevanter Nachrichten die höchste Verantwortung, da die betreffende Information für sie die mit Abstand größte Bedeutung besitzt. Fahrzeuge der anderen Verkehrszonen helfen dabei, mögliche Unterbrechungen der Weiterleitungskette unter ungünstigen Umständen wie geringer Verkehrsdichte oder einem niedrigen Penetrationsgrad an ausgerüsteten Fahrzeugen zu verhindern.

Zunächst wird gezeigt, dass das in dieser Arbeit weiterentwickelte Modell zur Verkehrsfluss erzeugung in der Lage ist, realitätsnahen Straßenverkehr nachzubilden.

Dies trifft sowohl für Vergleiche mit gemessenen Werten als auch auf Beobachtungen, die im täglichen Verkehr auf Autobahnen selbst gemacht werden können zu.

Eine sinnvolle Variation der erzielbaren Reichweite in einem Funknetz ist über eine Änderung der Sendeleistung realisierbar. Eine weitere Möglichkeit der Reichweitensteigerung besteht in der Verwendung gerichteter Antennen. Im Kontext dieser Arbeit wird allerdings immer von omnidirektional strahlenden Antennen ausgegangen, da es, beispielsweise bedingt durch die nicht definierte Ausrichtung des Fahrzeugs zum Unfallzeitpunkt im Fall eines durch ein Unfallfahrzeug repräsentierten Senders, keine bevorzugte Senderichtung geben kann. Es wird gezeigt, dass die Erzielung einer Funkreichweite von beispielsweise mehr als 500 m bei dem verwendeten Modell zu hohen Sendeleistungen führt. Da bei einem realen System die mögliche abstrahlbare Leistung begrenzt ist, sind für die Überbrückung größerer Entfernungen weitere Maßnahmen notwendig.

Ein wesentliches Ergebnis dieser Arbeit ist, dass die Aufgabe der dezentralen Verteilung sicherheitsrelevanter Verkehrsinformationen in einem sich selbst regulierenden Funknetz zwischen Fahrzeugen ohne Zuhilfenahme einer festen Infrastruktur sowie mit normalen Sendeleistungen heute verfügbarer Systeme erfolgreich durchgeführt werden kann. Dabei ist der in dieser Arbeit entwickelte Algorithmus in der Lage, die Belastung der Funkschnittstelle sowohl unabhängig von der Verkehrsdichte – und damit der Zahl weiterleitungsbereiter Fahrzeuge – als auch unabhängig von Sendeleistung und Übertragungsdauer nahezu konstant und auf niedrigem Niveau zu halten. Durch die Verbreitung lokal relevanter Fahrzeugzustandsdaten kann darüberhinaus verkehrsstabilisierender Einfluss ausgeübt werden. Dies gilt sowohl für den fließenden Verkehr als auch für den Verkehr, der auf Grund hoher Fahrzeugdichte vermehrt zum Stillstand kommt.

Die Hersteller von Automobilen lassen einen ungebrochenen Trend zu besser ausgestatteten Fahrzeugen auch in der Mittelklasse und bei kleinen Fahrzeugen erkennen. Ähnlich der zunehmenden Verbreitung von Airbags, Klimaanlage und anderen Ausstattungsmerkmalen kann eine weitere Steigerung des Ausrüstungsgrads von Navigationssystemen und Telematikanwendungen erwartet werden [84]. Aus diesem Grund ist die Annahme gerechtfertigt, dass sich auf Techniken wie der Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation basierende Systeme mittel- und langfristig in Neuwagen finden werden. Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse können somit einen wertvollen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit im Fahrzeugverkehr der Zukunft leisten.

# Tabellenverzeichnis

2.1	Modellparameter Verkehrserzeugung . . . . .	27
3.1	Typische Werte für den Pfadverlustexponenten . . . . .	34
3.2	Parameter zur Abschätzung des Pfadverlustexponenten . . . . .	36
4.1	Exemplarische Werte möglicher Bremsverzögerungen $-a$ . . . . .	50
4.2	Simulationsparameter Informationsweiterleitung . . . . .	66
5.1	Simulationsparameter Verkehrsflussoptimierung . . . . .	93
5.2	Simulationsparameter Anfahroptimierung . . . . .	96
A.1	Ausgangswerte zur Parametersuche . . . . .	123
A.2	Ermittelter Parametersatz . . . . .	135



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Konfiguration zur Zeit $t$ . . . . .	7
2.2	Beschleunigung . . . . .	8
2.3	Bremsen . . . . .	8
2.4	Fluktuation . . . . .	8
2.5	Fahren = Konfiguration zur Zeit $t + 1$ . . . . .	8
2.6	Schematisches Fundamentaldiagramm mit Hochflusszuständen . . . .	10
2.7	Fundamentaldiagramm . . . . .	28
2.8	Spurnutzung und Dichteinversion . . . . .	29
2.9	Geschwindigkeit im Verhältnis zur Maximalgeschwindigkeit . . . . .	30
2.10	Verkehrstrajektorien . . . . .	31
2.11	Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit des Lkw-Anteils . . . . .	32
3.1	Übertragung mit $P_{R,E_1,S_2} = P_{R,E_1,S_1}$ . . . . .	37
3.2	Übertragung mit $P_{R,E_1,S_2} \gg P_{R,E_1,S_1}$ . . . . .	38
3.3	Funkreichweite $R_{\text{comm}}$ in Abhängigkeit vom Pfadverlustexponenten $\alpha$ und der Sendeleistung $P_{T,S_i}$ . . . . .	39
3.4	Verhältnis gestörter Übertragungen mit/ohne Capturing . . . . .	40
4.1	Relevanzzone und Straßentypen . . . . .	42
4.2	Verkehrszonen bei Straßen mit physikalischer Richtungstrennung . . .	44
4.3	Verkehrszonen bei Straßen ohne physikalische Richtungstrennung . .	44
4.4	Funkreichweite $R_{\text{comm}}$ . . . . .	45
4.5	Informationsreichweite . . . . .	45

---

4.6	Wahrscheinlichkeiten möglicher Kommunikationsdauern für Gleich- und Gegenverkehr in Abhängigkeit der Durchschnittsgeschwindigkeit $v_{\text{avg}}$ . . . . .	48
4.7	Maximale Zeit zwischen periodischen Aussendungen . . . . .	49
4.8	Nachrichtenbedeutung als Funktion zur Basis $Q$ . . . . .	51
4.9	Wiederholungsnutzen als Funktion zur Basis $Q$ . . . . .	52
4.10	Weiterleitungsalgorithmus – Waiting for Emergency Notification . . .	53
4.11	Weiterleitungsalgorithmus – Waiting to Forward . . . . .	54
4.12	Weiterleitungsalgorithmus – Waiting for Free Channel . . . . .	55
4.13	Weiterleitungsalgorithmus – Waiting for Acknowledgement . . . . .	56
4.14	Weiterleitungsalgorithmus – Observation . . . . .	57
4.15	Maximale Fahrzeugdichte in Abhängigkeit des Lkw-Anteils $p_{\text{veh}}^{lv}$ . . .	58
4.16	Gefahrenzone . . . . .	59
4.17	Gegenzone . . . . .	60
4.18	Erstweiterleitung durch Fahrzeuge der Gefahrenzone in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad $F$ . . . . .	61
4.19	Erstweiterleitung durch Fahrzeuge der Gegenzone in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad $F$ . . . . .	62
4.20	Erstweiterleitung in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad $F$ . . . . .	62
4.21	Gewinn an Informationsreichweite . . . . .	63
4.22	Informationsreichweite in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad $F$ bei einer Fahrzeugdichte von $\rho = 10$ veh/km/2lanes . . . . .	63
4.23	Informationsreichweite in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad $F$ bei einer Fahrzeugdichte von $\rho = 20$ veh/km/2lanes . . . . .	64
4.24	Informationsreichweite in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad $F$ bei einer Fahrzeugdichte von $\rho = 30$ veh/km/2lanes . . . . .	65
4.25	Informationsreichweite in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad $F$ bei einer Fahrzeugdichte von $\rho = 60$ veh/km/2lanes . . . . .	65
4.26	Sende-/Empfangsverhalten des Vergleichssystems . . . . .	67
4.27	Sende-/Empfangsverhalten . . . . .	67
4.28	Sendeverhalten in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad $F$ . . . . .	68
4.29	Sende-/Empfangsverhalten des Vergleichssystems bei zehnfach höherer Sendeleistung $P_{T,s_i}$ . . . . .	69

4.30	Sendeverhalten in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad $F$ bei zehnfach höherer Sendeleistung $P_{T,S_i}$ . . . . .	70
4.31	Gestörte Übertragungen und Verzögerungen des Vergleichssystems . .	71
4.32	Gestörte Übertragungen und Verzögerungen . . . . .	72
4.33	Gestörte Übertragungen und Verzögerungen bei zehnfach längerer Übertragungszeit $\Delta t_{\text{Übertragung}}$ . . . . .	73
4.34	Räumliche Sendeverteilung . . . . .	73
4.35	Räumliche Empfangsverteilung . . . . .	74
4.36	Informationsabdeckung . . . . .	75
4.37	Informationsabdeckung über 600 s bei $\rho = 30$ veh/km/2lanes . . . . .	76
4.38	Informationsabdeckung über 1 h bei $\rho = 30$ veh/km/2lanes . . . . .	76
4.39	Informationsabdeckung über 600 s bei $\rho = 60$ veh/km/2lanes . . . . .	77
4.40	Informationsabdeckung über 1 h bei $\rho = 60$ veh/km/2lanes . . . . .	77
4.41	Sendezustandsverteilung . . . . .	78
4.42	Informationsabdeckung über 600 s bei $\rho = 90$ veh/km/2lanes . . . . .	79
4.43	Informationsabdeckung über 500 s bei $\rho = 200$ veh/km/2lanes . . . . .	80
4.44	Informationsabdeckung über 500 s bei $\rho = 200$ veh/km/2lanes und zehnfacher Sendeleistung $P_{T,S_i}$ . . . . .	80
5.1	Verkehrsflussoptimierung – Sending Traffic Flow Message . . . . .	87
5.2	Verkehrsflussoptimierung – Waiting for Traffic Flow Message . . . . .	88
5.3	Verkehrsfluss-/Anfahroptimierung – Free Channel . . . . .	89
5.4	Anfahroptimierung – Sending Startup Message . . . . .	90
5.5	Suchmuster . . . . .	91
5.6	Anfahroptimierung – Waiting for Startup Message . . . . .	91
5.7	Fundamentaldiagramm mit und ohne Verkehrsflussoptimierung . . . . .	94
5.8	Verhältnis Verkehrsfluss mit/ohne Verkehrsflussoptimierung . . . . .	94
5.9	Gesendete Verkehrsflussnachrichten . . . . .	95
5.10	Akzeptierte Verkehrsflussnachrichten . . . . .	95
5.11	Fundamentaldiagramm mit und ohne Anfahroptimierung . . . . .	97
5.12	Verhältnis Verkehrsfluss mit/ohne Anfahroptimierung . . . . .	97
5.13	Gesendete Anfahrnachrichten . . . . .	98

---

5.14 Akzeptierte Anfahrnachrichten . . . . .	98
A.1 Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit der Bremslichtreichweite $h$ . . . . .	124
A.2 Spurnutzung in Abhängigkeit der Bremslichtreichweite $h$ . . . . .	125
A.3 Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit der Vorausschaudistanz $d$ . . . . .	125
A.4 Spurnutzung in Abhängigkeit der Vorausschaudistanz $d$ . . . . .	126
A.5 Geschwindigkeit im Verhältnis zur Maximalgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Vorausschaudistanz $d$ . . . . .	127
A.6 Spurnutzung in Abhängigkeit des Slacks $\Delta_{\text{slack}}$ . . . . .	128
A.7 Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit des Sicherheitsabstands . . . . .	128
A.8 Spurnutzung in Abhängigkeit des Sicherheitsabstands $\Delta x_{\text{safety}}$ . . . . .	129
A.9 Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit der Geschwindigkeit $v_{\text{otr}}$ . . . . .	130
A.10 Spurnutzung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit $v_{\text{otr}}$ . . . . .	131
A.11 Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit $p_d$ . . . . .	131
A.12 Spurnutzung in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit $p_d$ . . . . .	132
A.13 Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit $p_b$ . . . . .	132
A.14 Spurnutzung in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit $p_b$ . . . . .	133
A.15 Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit $p_0$ . . . . .	133
A.16 Spurnutzung in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit $p_0$ . . . . .	134
A.17 Spurnutzung in Abhängigkeit des Lkw-Anteils . . . . .	134
A.18 Gestörte Übertragungen mit und ohne Capturing (absolut) . . . . .	136
A.19 Sende-/Empfangsverhalten bei zehnfach längerer Übertragungszeit $\Delta t_{\text{Übertragung}}$ . . . . .	137
A.20 Sende-/Empfangsverhalten bei zehnfach höherer Sendeleistung $P_{T,S_i}$ . . . . .	138
A.21 Gestörte Übertragungen/Verzögerungen bei zehnfach höherer Sendeleistung $P_{T,S_i}$ . . . . .	139
A.22 Sendezustandsverteilung bei zehnfach längerer Übertragungszeit . . . . .	140
A.23 Sendezustandsverteilung bei zehnfach höherer Sendeleistung $P_{T,S_i}$ . . . . .	140
A.24 Informationsabdeckung über 600 s, Gefahrenzone . . . . .	141
A.25 Informationsabdeckung über 600 s, Gegenzone . . . . .	141
A.26 Gesendete Verkehrsflussnachrichten (absolut) . . . . .	143
A.27 Gesendete Anfahrnachrichten (absolut) . . . . .	144

# Literaturverzeichnis

- [1] HOOGENDOORN, S.P. und P.H.L. BOVY: *State-of-the-art of Vehicular Traffic Flow Modelling*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering, 215(4):283–303, 2001.
- [2] HELBING, D.: *Traffic and related self-driven many-particle systems*. Rev. Mod. Phys., 73(4):1067–1141, 2002.
- [3] MUNOZ, L., XIAOTIAN SUN, R. HOROWITZ und L. ALVAREZ: *Traffic density estimation with the cell transmission model*. In: *American Control Conference, 2003. Proceedings of the 2003*, Band 5, Seiten 3750–3755 vol.5, 2003.
- [4] ROSSWOG, S. und P. WAGNER: *Towards a macroscopic modeling of the complexity in traffic flow*. Phys. Rev. E, 65(3):036106, 2002.
- [5] KERNER, B.S. und P. KONHÄUSER: *Structure and parameters of clusters in traffic flow*. Phys. Rev. E, 50(1):54–83, 1994.
- [6] HELBING, D.: *Gas-kinetic derivation of Navier-Stokes-like traffic equations*. Phys. Rev. E, 56(3):2366, 1996.
- [7] TREIBER, M., A. HENNECKE und D. HELBING: *Derivation, properties, and simulation of a gas-kinetic-based, nonlocal traffic model*. Phys. Rev. E, 59(1):239–253, 1999.
- [8] LUBASHEVSKY, I., P. WAGNER und R. MAHNKE: *A Bounded Rational Driver Model*. 2002.
- [9] EISSFELDT, N. und P. WAGNER: *Effects of anticipatory driving in a traffic flow model*. Eur. Phys. J. B, 33:121–129, 2003.
- [10] NAGEL, K. und M. SCHRECKENBERG: *A Cellular Automaton Model for Freeway Traffic*. J. Phys. I. France 2, Seiten 2221–2229, 1992.
- [11] SCHADSCHNEIDER, A. und M. SCHRECKENBERG: *Cellular automaton models and traffic flow*. Journal of Physics A, 26:L679 – L683, 1993.

- [12] SCHRECKENBERG, M., A. SCHADSCHNEIDER, K. NAGEL und N. ITO: *Discrete stochastic models for traffic flow*. Physical Review E, 51:2939–2949, 1995.
- [13] SCHRECKENBERG, M., A. SCHADSCHNEIDER und K. NAGEL: *Zellularautomaten simulieren Straßenverkehr*. Physikalische Blätter, 52(5):460–462, 1996.
- [14] EISENBLÄTTER, B., L. SANTEN, A. SCHADSCHNEIDER und M. SCHRECKENBERG: *Jamming transition in a cellular automaton model for traffic flow*. Phys. Rev. E, 57:1309 – 1314, 1998.
- [15] SCHADSCHNEIDER, A.: *Physik des Straßenverkehrs*. Skript zur Vorlesung, Institute of Theoretical Physics, Cologne University, 2004.
- [16] KRAUSS, S., P. WAGNER und C. GAWRON: *Continuous limit of the Nagel-Schreckenberg model*. Phys. Rev. E, 54(4):3707–3712, 1996.
- [17] NAMAZI, A., N. EISSFELDT, P. WAGNER und A. SCHADSCHNEIDER: *Boundary-induced phase transitions in a space-continuous traffic model with non-unique flow-density relation*. Eur. Phys. J. B, 30:559–570, 2002.
- [18] SCHADSCHNEIDER, A.: *Diskrete stochastische Systeme in niedrigen Dimensionen: Die Physik des Straßenverkehrs*. Habilitation, Universität Köln, 1999.
- [19] KERNER, B.S. und H. REHBORN: *Experimental Properties of Phase Transitions in Traffic Flow*. Phys. Rev. Lett., 79:4030 – 4033, 1997.
- [20] HELBING, D.: *Empirical traffic data and their implications for traffic modeling*. Phys. Rev. E, 55:R25 – R28, 1997.
- [21] KERNER, B.S. und H. REHBORN: *Experimental features and characteristics of traffic jams*. Phys. Rev. E, 53:R1297 – R1300, 1996.
- [22] KERNER, B.S. und H. REHBORN: *Experimental properties of complexity in traffic flow*. Phys. Rev. E, 53(5):R4275–R4278, 1996.
- [23] KRAUSS, S., P. WAGNER und C. GAWRON: *Metastable states in a microscopic model of traffic flow*. Phys. Rev. E, 55(5):5597–5602, 1997.
- [24] BARLOVIC, R., L. SANTEN, A. SCHADSCHNEIDER und M. SCHRECKENBERG: *Metastable states in cellular automata for traffic flow*. Eur. Phys. J. B, 5:793 – 800, 1998.
- [25] TAKAYASU, M. und H. TAKAYASU: *1/f Noise in a Traffic Model*. Fractals, 1:860–866, 1993.

- 
- [26] BENJAMIN, S.C., N.F. JOHNSON und P.M. HUI: *Cellular automata models of traffic flow along a highway containing a junction*. J. Phys. A, 29:3119 – 3127, 1996.
- [27] KNOSPE, W., L. SANTEN, A. SCHADSCHNEIDER und M. SCHRECKENBERG: *Towards a realistic microscopic description of highway traffic*. J. Phys. A, 33:L477 – L485, 2000.
- [28] RICKERT, M., K. NAGEL, M. SCHRECKENBERG und A. LATOUR: *Two lane traffic simulations using cellular automata*. Physica A, 231:534–550, 1996.
- [29] WAGNER, P., K. NAGEL und D.E. WOLF: *Realistic multi-lane traffic rules for cellular automata*. Physica A, 234:687–698, 1997.
- [30] NAGEL, K., D.E. WOLF, P. WAGNER und P. SIMON: *Two-lane traffic rules for cellular automata: A systematic approach*. Physical Review E, 58:1425–1437, 1998.
- [31] WIEDEMANN, R. (Herausgeber): *Beschreibung des Staus*. Beiträge zur Theorie des Straßenverkehrs. Köln, Germany, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Auflage, 1995.
- [32] RAPPAPORT, T.S. und L.B. MILSTEIN: *Effects of radio propagation path loss on DS-CDMA cellular frequency reuse efficiency for the reverse channel*. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 41(3):231–242, 1992.
- [33] WANG, X. und T. BERGER: *Medium Access and Minimum Co-Channel Separation in Wireless Sensor Networks*. In: *Conferences on Information Sciences and Systems (CISS)*, Princeton, NJ, USA, 2004.
- [34] WU, Q. und C. WILLIAMSON: *Dynamic Channel Rate Assignment for Multi-Radio WLANs*. In: *Proceedings of the IASTED Conference on Wireless Networks and Emerging Technologies (WNET)*, Seiten 149–154, Banff, AB, USA, 2005. Department of Computer Science, University of Calgary.
- [35] SHENG, HONGSAN, LI ZHAO und A. M. HAIMOVICH: *On Coding and Bandwidth Scaling in Ultra-Wideband Communications*. In: *39th Annual Conference on Information Sciences and Systems*, Baltimore, MD, USA, 2005.
- [36] SRIVASTAVA, G., J.F. CHICHARO und P. BOUSTEAD: *Power Efficient Topologies in Connected Ad-hoc Networks*. In: *Proceedings of the 10th IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 2005.

- [37] GREEN, D.B. und A.S. OBAIDAT: *An accurate line of sight propagation performance model for ad-hoc 802.11 wireless LAN (WLAN) devices*. In: *Communications, 2002. ICC 2002. IEEE International Conference on*, Band 5, Seiten 3424–3428 vol.5, 2002.
- [38] OKUMURA, Y., E. OHMORI, T. KAWANO und K. FUKUDA: *Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service*. Review of the Electrical Communication Laboratory, 6:825–873, 1968.
- [39] HATA, M.: *Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services*. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 29:317–325, 1980.
- [40] ANDERSEN, J.B., T.S. RAPPAPORT und S. YOSHIDA: *Propagation measurements and models for wireless communications channels*. Communications Magazine, IEEE, 33(1):42–49, 1995.
- [41] ERRICOLO, D. und P.L.E. USLENGHI: *Propagation Path Loss - A Comparison Between Ray-Tracing Approach and Empirical Models*. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 50(5):766–768, 2002.
- [42] RAPPAPORT, T.S.: *Wireless Communications: Principles and Practice (2nd Edition)*. Prentice Hall PTR; 2 edition (December 31, 2001), 2001.
- [43] FEUERSTEIN, M.J., K.L. BLACKARD, T.S. RAPPAPORT, S.Y. SEIDEL und H.H. XIA: *Path loss, delay spread, and outage models as functions of antenna height for microcellular system design*. Vehicular Technology, IEEE Transactions on, 43(3):487–498, 1994.
- [44] PANDIARAJAN, V. und L.L. JOINER: *Undedicated HAAP based Architecture for Cellular Data Transfers*. In: *Proceedings of the IEEE Southeast Conference*, Seiten 23–26, 2000.
- [45] JELITTO, J., A.N. BARRETO und HONG LINH TRUONG: *Power and rate adaptation in IEEE 802.11a wireless LANs*. In: *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Spring. The 57th IEEE Semiannual*, Band 1, Seiten 413–417 vol.1, 2003.
- [46] WALFISCH, J. und H.L. BERTONI: *A theoretical model of UHF propagation in urban environments*. Antennas and Propagation, IEEE Transactions on, 36(12):1788–1796, 1988.
- [47] *Supplement To IEEE Standard For Information Technology- Telecommunications And Information Exchange Between Systems- Local And Metropolitan Area Networks- Specific Requirements- Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) And Physical Layer (PHY) Specifications: Higher-speed Physical Layer Extension In The 2.4 GHz Band- IEEE Std 802.11b-1999*, 2000.

- 
- [48] ANASTASI, G., E. BORGIA, M. CONTI und E. GREGORI: *Wi-fi in ad hoc mode: a measurement study*. In: *Pervasive Computing and Communications, 2004. PerCom 2004. Proceedings of the Second IEEE Annual Conference on*, Seiten 145–154, 2004.
- [49] ABRAMSON, N.: *Development of the ALOHANET*. *Information Theory, IEEE Transactions on*, 31(2):119–123, 1985.
- [50] ABRAMSON, N.: *The Throughput of Packet Broadcasting Channels*. *Communications, IEEE Transactions on* [legacy, pre - 1988], 25(1):117–128, 1977.
- [51] DAVIS, D. und S. GRONEMEYER: *Performance of Slotted ALOHA Random Access with Delay Capture and Randomized Time of Arrival*. *Communications, IEEE Transactions on* [legacy, pre - 1988], 28(5):703–710, 1980.
- [52] LAU, C.T. und C. LEUNG: *Capture models for mobile packet radio networks*. *Communications, IEEE Transactions on*, 40(5):917–925, 1992.
- [53] CHEUN, K. und S. KIM: *Joint delay-power capture in spread-spectrum packet radio networks*. *Communications, IEEE Transactions on*, 46(4):450–453, 1998.
- [54] BARTON, S.K.: *Capture and Spatial Reuse in Ad hoc Wireless Networks Employing Collision Avoidance Protocols*. In: *COST 273, Towards Mobile Broadband Multimedia Networks 1th Management Committee Meeting*, Brussels, Belgium, 2001.
- [55] WARE, C., J. CHICHARO und T. WYSOCKI: *Simulation of capture behaviour in IEEE 802.11 radio modems*. In: *Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Fall. IEEE VTS 54th*, Band 3, Seiten 1393–1397 vol.3, 2001.
- [56] MEINCKE, M., P. TONDL, M. D. PÉREZ GUIRAO und K. JOBMANN: *Wireless Adhoc Networks for Inter-Vehicle Communication*. In: *16. DFN-Arbeitstagung über Kommunikationsnetze*, Düsseldorf, 2002.
- [57] RUDACK, M., M. MEINCKE und M. LOTT: *On the Dynamics of Ad Hoc Networks for Inter Vehicle Communications (IVC)*. In: *Proceedings of the International Conference on Wireless Networks (ICWN'02)*, 2002.
- [58] RUDACK, M., M. MEINCKE, K. JOBMANN und M. LOTT: *On traffic dynamical aspects of inter vehicle communications (IVC)*. In: *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th*, Band 5, Seiten 3368–3372, 2003.
- [59] LEUTZBACH, W.: *Introduction to the Theory of Traffic Flow*. Springer Verlag, Berlin, 1988.

- [60] VOLLMER, D. und A. HILLER: *Problemorientierte Verkehrsmodellierung auf Bundesautobahnen*. Technischer Bericht, 09 May 2001 2001.
- [61] NEUBERT, L.: *Statistische Analyse von Verkehrsdaten und die Modellierung von Verkehrsfluss mittels zellularer Automaten*. Ph.D., Gerhard-Mercator-Universität Duisburg, 2000.
- [62] KIENZLE, J.: *Analyse von Einzelfahrzeugdaten*. Diplomarbeit, Universität Stuttgart, 2001.
- [63] *Tabelle möglicher Bremsverzögerungen*. Online: <http://www.internetratgeberrecht.de/Verkehrsrecht/Rechner/rechner-bremsweg.htm>, last Access: 14 October 2005.
- [64] TONDL, P. und M.D. PÉREZ GUIRAO: *Forwarding of Emergency Notifications in One-dimensional Networks*. In: FRANZ, W., H. HARTENSTEIN und M. MAUVE (Herausgeber): *Inter-Vehicle-Communications Based on Ad Hoc Networking Principles – The FleetNet Project*, Seiten 83–116. Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe, 2005.
- [65] BEYER, HACKEL, PIEPER und TIEDGE: *Wahrscheinlichkeitsrechnung und mathematische Statistik*. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1997.
- [66] BENZ, T., L. SCHÄFERS, C. STILLER und D. VOLLMER: *Feasibility Study on Truck Planning on European Motorways*. ITS project PROMOTE-CHAFFEUR, Deliverable D08.1, 1999.
- [67] *Verkehrsbericht 2000*. Technischer Bericht, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2000.
- [68] *Straßenbaubericht 2004*. Technischer Bericht, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr – Referat S 10, 2004.
- [69] *Telematik im Verkehr – Kollektive Verkehrsbeeinflussungsmaßnahmen auf Bundesfernstraßen*. Technischer Bericht, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Abteilung Straßenbau, Straßenverkehr – Referat S 28, 2003.
- [70] KHAN, M.A. und L. BOLONI: *Convoy driving through ad-hoc coalition formation*. In: *IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS 2005)*, San Francisco, California, 2005.
- [71] BAREKET, Z., P.S. FANCHER, H. PENG, K. LEE und C.A. ASSAF: *Methodology for assessing adaptive cruise control behavior*. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on, 4(3):123–131, 2003.

- 
- [72] DARBHA, S. und K.R. RAJAGOPAL: *Intelligent Cruise Control Systems And Traffic Flow Stability*. Technischer Bericht UCB-ITS-PRR-98-36, California Partners for Advanced Transit and Highways, December 1, 1998 1998.
- [73] KERNER, B.S.: *Experimental Features of Self-Organization in Traffic Flow*. Phys. Rev. Lett., 81(17):3797–3800, 1998.
- [74] SCHOBER, M., A. ESKANDARIAN, R.D. KÜHNE und H. WEHLAN: *Comparing Driving Behavior for Manual, Conventional and Automated Cruise Control Driving in Car-Following by Scenarios Based on an Advanced Driver Performance Map*. In: *Intelligent Transportation Systems Safety and Security*, Miami, Florida, USA, 2004.
- [75] ZHOU, J. und H. PENG: *Range policy of adaptive cruise control vehicles for improved flow stability and string stability*. Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on, 6(2):229–237, 2005.
- [76] ZOU, X. und D. LEVINSON: *Evaluation of Impacts of Adaptive Cruise Control on Mixed Traffic Flow*. In: *Proceedings of International Conference on Traffic and Transportation Studies*, Seiten 762–779, Guilin, China, 2002.
- [77] TREIBER, M. und D. HELBING: *Microsimulations of Freeway Traffic Including Control Measures*. Automatisierungstechnik, 49:478–484, 2001.
- [78] DAVIS, L.C.: *Effect of adaptive cruise control systems on traffic flow*. Phys. Rev. E, 69(6):8, 2004.
- [79] KERNER, B.S.: *Control of Spatial-Temporal Congested Traffic Patterns at Highway Bottlenecks*. Technischer Bericht, 2003.
- [80] KIKUCHI, S., N. UNO und M. TANAKA: *Impacts of Shorter Perception-Reaction Time of Adapted Cruise Controlled Vehicles on Traffic Flow and Safety*. J. Transp. Engrg., 129(2):146–154, 2003.
- [81] HUPPE, X., J. DE LAFONTAINE, M. BEAUREGARD und F. MICHAUD: *Guidance and control of a platoon of vehicles adapted to changing environment conditions*. In: *Systems, Man and Cybernetics, 2003. IEEE International Conference on*, Band 4, Seiten 3091–3096 vol.4, 2003.
- [82] BRACKSTONE, M. und M. McDONALD: *Driver behaviour and traffic modelling. Are we looking at the right issues?* In: *Intelligent Vehicles Symposium, 2003. Proceedings. IEEE*, Seiten 517–521, 2003.
- [83] REGAN, M.A. und K.L. YOUNG: *Use of manual Speed Alerting and Cruise Control Devices by Drivers in New South Wales*. Technischer Bericht 219, Monash University Accident Research Centre, February 2004 2004.

- [84] KÄMPF, K. und H. KELLER: *Wirkungspotentiale der Verkehrstelematik zur Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur und Verkehrsmittelnutzung*. Technischer Bericht FE-Nr. 96.584/1999, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, 2001.

# Index

## Symbols

*SINR*..... 35–37, 70

## A

Abdeckung ..... 2, 45, 75

Abdeckungsgrad ..... 45

Abschattung ..... 33

Abstand

effektiv ..... 15, 16, 24

Signal-Rausch- ..... 35

Adaptive Cruise Control ..... 85

Airbag ..... 102

ALOHA ..... 37

Anfahr

-nachricht ..... 92

-optimierung ..... 89–91

-verhalten ..... 90

Antenne

Höhe der ..... 44

omnidirektional strahlend ..... 40, 45, 52

Antennengewinn ..... 33

Antizipation

der Geschwindigkeit ..... 12, 13

des Bremsverhaltens ..... 12, 13

Aufgaben

sicherheitsrelevante ..... 1

Ausbreitung

Bedingung ..... 40

elektromagnetische Welle ..... 33

Freifeld ..... 34

Freiraum ..... 34

Aussendung

periodisch ..... 49

## B

Bandbreite ..... 36

Anforderung ..... 3, 41

Beschleunigung ..... 15, 24

Bestätigung

explizit ..... 56

implizit ..... 55–57

Bremsen ..... 7, 15, 25

Bremslichtreichweite ..... 14

Bremsverzögerung

eines Fahrzeugs ..... 50

## C

Capturing ..... 38–40, 136

## D

Daten

digital ..... 3, 33

verkehrsrelevante ..... 3

Dichteinversion . 18, 20–22, 29, 124, 126,  
127

Dynamik

Gesamtsystem ..... 31

Start-Stopp ..... 23

## E

Einspurverkehr ..... 9, 16, 17, 23

Empfangs-

leistung ..... 37, 38

system ..... 3

verteilung ..... 74

Entscheider ..... 3, 33

Ereignisort ..... 66

Erst-

übertragung ..... 66

- weiterleitung.....61, 62, 74  
 Exponentialfunktion ..... 60
- F**  
 Fahren.....8, 15, 26  
 Fahrzeug  
 -dichte....5, 9–12, 22–24, 28–30, 40, 58, 61, 63, 64, 66, 68–72, 81, 85, 126, 127, 136–139  
 -fluss ..... 2, 9–12, 18, 23, 24, 28, 31, 85, 86, 90, 93, 123, 124, 126, 129, 130  
 -flusserhaltung ..... 83  
 -folgemodelle.....6  
 -geschwindigkeit.....5  
 -strom ..... 8  
 -verkehr ..... 3, 5, 6, 9  
 -verteilung ..... 5  
 Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation 1, 2, 7, 84, 86  
 Fahrzeugtheorie  
 klassische ..... 46  
 Fluktuation.....7, 10, 14, 15, 17, 25, 28  
 Fluktuations-  
 schritt ..... 8  
 wahrscheinlichkeit..9, 11, 13, 14, 16, 24, 26, 89, 92, 123, 130  
 Fluten.....2, 52, 56  
 Freifeld  
 Referenzabstand.....34, 37  
 Freifluss.....12, 16  
 Freiflussbereich.....11, 13, 28  
 Fundamentaldiagramm..6, 8, 10–12, 18, 28, 31, 124, 126, 129, 130, 135  
 Funk  
 -übertragung.....35  
 -reichweite.35, 39, 40, 44, 45, 47, 48, 52, 59, 61, 69, 81, 102, 138  
 Funk-  
 kanal  
 Eigenschaften ..... 44
- netz...2, 3, 41, 52, 81, 101, 102, 142  
 schnittstelle  
 Kapazität ..... 78  
 system ..... 3, 33
- G**  
 Gültigkeitsdauer ..... 53  
 Gefahrenzone . 43, 44, 55, 59, 61, 63, 66, 79, 101, 137, 142  
 Gegenzone43, 59–63, 66, 74, 79, 137, 142  
 Generierung  
 Anfahrnachricht.....96  
 Verkehrsflussnachricht ..... 93, 143  
 Geschwindigkeits-Historie ..... 86, 90  
 Geschwindigkeitsdifferenz  
 Wahrscheinlichkeit der.....46, 47
- H**  
 Handeln  
 koordiniertes.....86  
 Hochflusszustand  
 metastabil ..... 9–11  
 Hysterese.....9, 11  
 -effekt.....9
- I**  
 Informationen  
 sicherheitsrelevante ..... 2, 86  
 verkehrsrelevante.....83  
 Informations-  
 abdeckung ..... 74–80, 141, 142  
 reichweite ..... 45, 58, 63–65  
 Infrastruktur.....52  
 feste...2, 3, 7, 41, 42, 52, 74, 81, 84, 102, 142  
 intelligent.....84  
 Interaktion  
 Bereich ..... 14, 16, 26  
 zwischen Fahrzeugen ..... 9, 11, 29  
 Interferenz ..... 45  
 Adjazentkanal.....36  
 Gleichkanal ..... 36

- Mehrfachzugriff ..... 36
- K**
- Ketten  
  Waiting for Acknowledgement .... 79
- Klassifizierung  
  von Verkehrsmodellen ..... 5
- Kollision ..... 37
- Kommunikation  
  zwischen Fahrzeugen 3, 5, 41, 46–48,  
  60, 83, 84
- Kommunikations-  
  dauer ..... 46–49  
  radius ..... 49  
  reichweite ..... 49, 59, 60  
  system ..... 48  
  technik ..... 1
- Konstante  
  Boltzmann ..... 36
- Kontaktzeit ..... 48, 52
- L**
- Leistung  
  abstrahlbar ..... 40
- M**
- Mehrfachwiederholung ..... 64
- Mehrspurverkehr ..... 9, 16–18, 23
- Modell  
  -klassen ..... 6  
  amerikanisches ..... 18  
  BJH- ..... 11  
  Cell-Transmission- ..... 5  
  deterministisch ..... 6  
  deutsches ..... 18, 26  
  diskret ..... 6  
  Fahrzeugfolge- ..... 6, 16  
  gas-kinetisch ..... 5  
  geschwindigkeitsbasiert ..... 21  
  High Fidelity ..... 6  
  hydrodynamisch ..... 5  
  kontinuierlich ..... 6
- lückenbasiert ..... 21
- Log-Distanz-Pfadverlust- ..... 33, 39
- Low Fidelity ..... 6
- makroskopisch ..... 5
- Medienzugriff ..... 38
- mesoskopisch ..... 5
- mikroskopisch ..... 5
- Nachrichtenübertragung ..... 37
- NaSch- ..... 10–18
- stochastisch ..... 6
- VDR- ..... 11, 12
- Warteschlange ..... 16
- Multi-Hop ..... 45  
  -Techniken ..... 1, 45
- N**
- Nachricht  
  Bedeutung einer ..... 50  
  weitergeleitete ..... 53–56, 78
- Nachrichten  
  sicherheitsrelevante ..... 3, 41
- Nachrichtenwiederholung  
  Nutzen einer ..... 51
- Navigationssystem ..... 102
- Nettozeitlückenverteilung ..... 18
- Neutrale Zone ..... 43, 44, 66, 74, 137
- Normalverteilung ..... 48
- Notfallnachricht 2, 41, 49, 52, 54–56, 59,  
  66, 75, 101, 137
- O**
- Ortungssystem  
  satellitengestützt ..... 52
- P**
- Penetrationsgrad .. 60, 61, 63, 64, 68–70,  
  101
- Pfadverlust ..... 33, 34  
  -exponent ..... 34–36, 39, 40  
  Haupt- ..... 34, 37  
  Referenz- ..... 37
- Poissonverteilung ..... 60

- R**
- Rauschen  
  thermisches ..... 35, 36, 38  
  weißes gaußsches ..... 35
- Rauschzahl  
  Empfänger ..... 36
- rechtsseitiges Überholen ..... 27  
  Verbot ..... 20, 30
- Regel  
  raumbasiert ..... 11  
  zeitbasiert ..... 11
- Regelsatz ..... 9  
  asymmetrisch ..... 18, 24, 26  
  Erweiterung ..... 10  
  minimalistisch ..... 8  
  symmetrisch ..... 18, 22, 26
- Relevanzzone .. 42–44, 51, 52, 66, 68, 72,  
  74, 78, 101
- S**
- Schwerlastverkehr ..... 28, 29, 31  
  Simulation von ..... 24
- Sende-  
  leistung 35, 39, 40, 44, 69–71, 79–81,  
  102, 138–140, 142  
  leistungserhöhung ..... 69  
  richtung ..... 40  
  system ..... 3  
  verteilung ..... 72, 73  
  verzögerung ..... 72  
  zustandsverteilung .. 72, 78, 139, 140
- Sensordaten ..... 1
- Sensorik ..... 84
- Sicherheit ..... 1, 3, 7, 21, 83, 84
- Sicherheits-  
  abstand ..... 13, 14, 18, 123, 129  
  aspekt ..... 26  
  bedingung ..... 20, 24, 27  
  gebot ..... 22  
  gewinn ..... 50  
  systeme  
    aktiv ..... 1, 7  
    passiv ..... 1
- Signal  
  -auslösung ..... 87, 92  
  internes ..... 86, 91
- Simulation  
  Systemlevel- ..... 35  
  Verkehrs- ..... 6  
  von Straßenverkehr ..... 5
- Spurnutzung .... 18, 21, 22, 29, 123, 125,  
  126, 128, 129, 131–134  
  Verhalten ..... 127
- Spurwechsel ..... 25
- Standardtemperatur ..... 36
- Status  
  Observation ..... 57, 78  
  Waiting for Acknowledgement 56, 79  
  Waiting to Forward ..... 55, 57, 78
- Stau  
  -abfluss ..... 85  
  -ausfluss ..... 10, 11  
  -ausgang ..... 11  
  -bereich ..... 31, 85  
  -bildung ..... 12, 30  
  -dynamik ..... 12  
  -situation ..... 86  
  -welle ..... 19  
  -zufluss ..... 85  
  aus dem Nichts ..... 30  
  spontan ..... 8, 9, 11, 31  
  Tunneln ..... 16
- Synchronität  
  Vermeidung von ..... 68
- System  
  CDMA ..... 36  
  FDMA ..... 36  
  mikrozellular ..... 34  
  TDMA ..... 36  
  zellular ..... 34

- T**  
 Tailgating Dance ..... 18  
 Traffic Message Channel ..... 1, 83, 84  
 Trajektorien  
   Nachrichten ..... 66, 75, 137, 142  
   Verkehr ..... 31, 75
- U**  
 Ursachenvermeidung ..... 1, 83
- V**  
 Varianz  
   der Geschwindigkeit ..... 46  
 Vergleichssystem ..... 66–71  
 Verkehr  
   synchronisiert ..... 12, 16, 28  
 Verkehrs-  
   aufkommen  
     erhöhtes ..... 83  
   beeinflussung ..... 83, 84  
     -anlagen ..... 84  
     infrastrukturell ..... 84  
   belastung ..... 84  
   daten ..... 83  
   fluss 18, 20, 21, 28, 31, 84–86, 94, 97,  
     123  
     -erzeugung ..... 24  
     -nachricht ..... 87–89  
     -optimierung ..... 87, 88  
     -störung ..... 83  
     -steuerung ..... 20  
   fluss-  
     steigerung ..... 96, 144  
   informationen  
     Ausstrahlung von ..... 83  
     sicherheitsrelevante 7, 81, 102, 142  
   lage ..... 83  
   theorie  
     klassische ..... 60  
   zone ..... 43, 44, 59, 66, 79, 101, 137  
 Verlustrate  
   Übertragung ..... 40
- Vorausschaudistanz . 21, 22, 26, 123, 126,  
 127
- W**  
 Wahrnehmungsreichweite ..... 1, 7, 42  
 Wahrscheinlichkeits  
   -Dichtefunktion ..... 46  
   -Verteilungsfunktion ..... 46, 47  
 Wahrscheinlichkeits-  
   Verteilungsfunktion ..... 60  
     exponentielle ..... 60  
 Wechseln  
   koordiniertes ..... 17  
 Weiterleitungs-  
   algorithmus .... 3, 41, 42, 45, 46, 52,  
     56–59, 64, 66, 68, 69, 71, 72, 74,  
     75, 78, 79, 81, 102, 138, 142  
   distanz ..... 64  
   kette ..... 46, 56, 57, 64, 74, 101  
   prozess ..... 53, 55–57, 59, 64, 75, 78  
   regeln ..... 53  
   strategien ..... 53  
   wahrscheinlichkeit ..... 55, 57, 64
- Welle  
   elektromagnetische ..... 33
- Wiederholung  
   quasi-isochron ..... 66, 72
- Worst-Case-Szenario ..... 42, 66
- Z**  
 Zelle ..... 6  
 Zellengröße ..... 23  
 Zellularer Automat ..... 5–7, 23  
 Zufallsvariable ..... 46, 47  
 Zustand  
   phasensepariert ..... 11



# Anhang A

## Ergänzende Evaluierungen

Ergänzend zu den Evaluierungsabschnitten der vorangegangenen Kapitel werden nachfolgend weitere Ergebnisse vorgestellt und diskutiert. Diese sollen der Erklärung und Vervollständigung vorangegangener Untersuchungen und Simulationen dienen.

### A.1 Verkehrsflusserzeugung

Im Folgenden werden detaillierte Betrachtungen zu den in Abschnitt 2.9 benutzten Parametern für die Erzeugung des Verkehrsflusses angestellt. Es werden die Auswirkungen der Parameter Bremslichtreichweite  $h$ , Vorausschaudistanz  $d$ , Sicherheitsabstand  $\Delta x_{\text{safety}}$ , Slack  $\Delta_{\text{slack}}$  sowie der Fluktuationswahrscheinlichkeiten  $p_{d,0,b}$  und der Aufweichung des Rechtsüberholverbots durch  $v_{\text{otr}}$  auf den Fahrzeugfluss und die Spurnutzung der Fahrzeuge betrachtet. Es wird jeweils einer der Parameter variiert. Es findet keine Mittelung durch mehrere Simulationen mit gleichen Parameterwerten, aber unterschiedlichen Ausgangssituationen statt.

Mit  $\Delta x_n(t)$  als Position (Zelle) der Fahrzeugfront im Fall einer Fahrzeuglänge  $l_n > 1$  zeigt Tabelle A.1 die gewählten Ausgangswerte für die folgenden Betrachtungen.

Tabelle A.1: Ausgangswerte zur Parametersuche

Parameter	Wert
$\Delta x_{++}^o$	$\max\{v_n(t), v_n(t+1)\}$
$\Delta x_+^o$	$\max\{\Delta x_{\text{safety}}^{ch}, \Delta x_{++}^o - \min\{v_{n+1}^o(t), v_{n+1}^o(t+1)\}\}$
$\Delta x_{--}^o$	$l_n - 1 + \max\{v_{n-1}^o(t), v_{n-1}^o(t+1)\}$
$\Delta x_-^o$	$\max\{l_n - 1 + \Delta x_{\text{safety}}^{ch}, \Delta x_{--}^o - \min\{v_n(t), v_n(t+1)\}\}$
$v_{\text{max}}$	25
$v_{\text{max}}^{lv}$	18

### A.1.1 Bremslichtreichweite

Der Einfluss der Bremslichtreichweite auf das Fundamentaldiagramm verdeutlicht Abbildung A.1. Zu erkennen ist, dass mit Ausnahme einer Reichweite von Eins, die Auswirkungen auf den Fahrzeugfluss nahezu vernachlässigbar sind. Im Bereich metastabiler Hochflusszustände zwischen 20 und 40 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur sind bei diesem Wert geringfügig höhere Flüsse erreichbar. Weiterhin ist erkennbar, dass bei zwar dichtem, aber noch fließendem Verkehr im Bereich von 40 bis 80 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur der Fahrzeugfluss höheren Schwankungen unterworfen ist als bei allen anderen Werten.

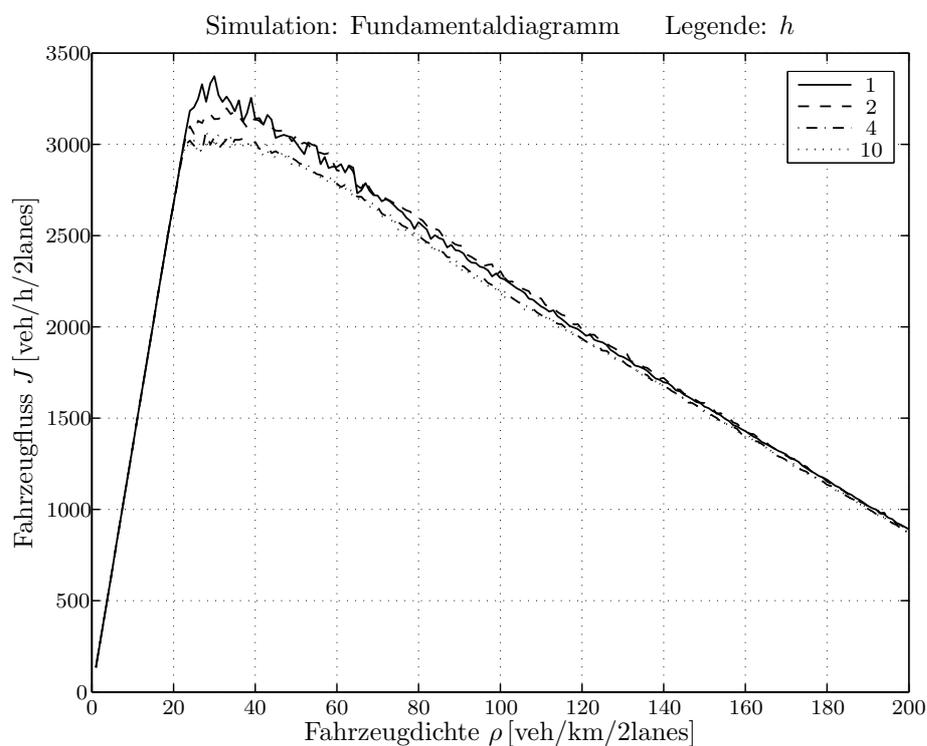


Abbildung A.1: Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit der Bremslichtreichweite  $h$

Bei freiem oder im Wesentlichen ungestört fließendem Verkehr bis zu einer Dichte von 40 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur ist kein Einfluss auf das Spurwechselverhalten der Fahrzeuge über die Variation der Bremslichtweite feststellbar. Dies ändert sich signifikant bei einer Dichte um 90 veh/km/2lanes. Zwar tritt die Dichteinversion bei höheren Werten für den Parameter nur unwesentlich früher ein, der Verlauf der erzielten Dichteumkehrung ist jedoch ungleich ausgeprägter. Das Maximum der Inversion ist mit 95 veh/km/2lanes bei 42 % erreicht. Wie Abbildung A.2 verdeutlicht, ergibt sich ab einer Bremslichtreichweite von 4 kein nennenswerter Unterschied mehr im Kurvenverlauf.

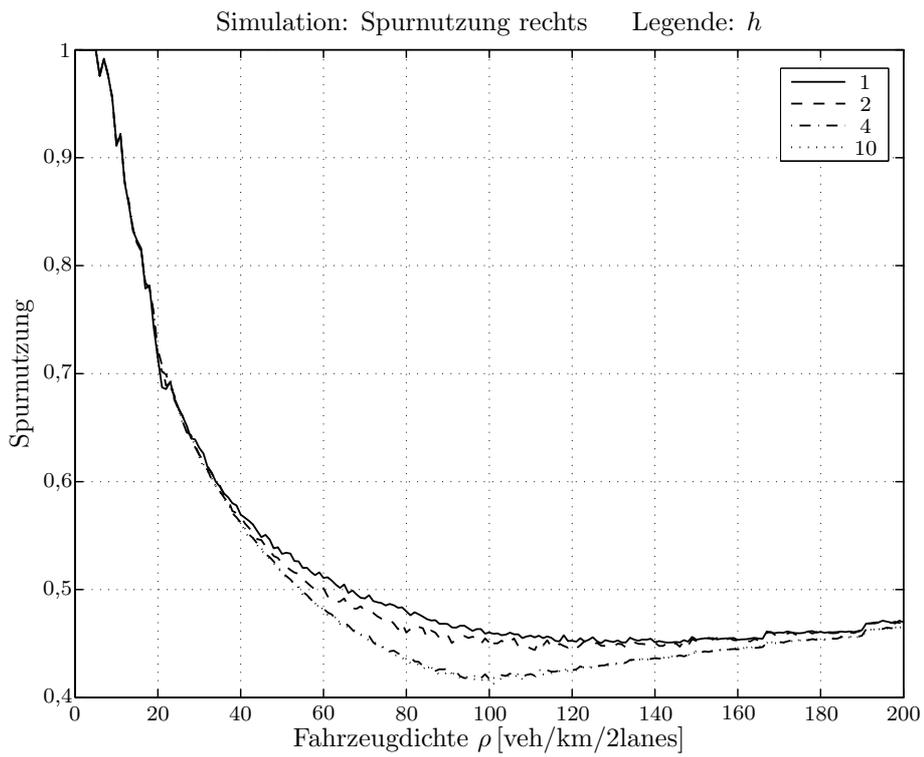


Abbildung A.2: Spurnutzung in Abhängigkeit der Bremslichtreichweite  $h$

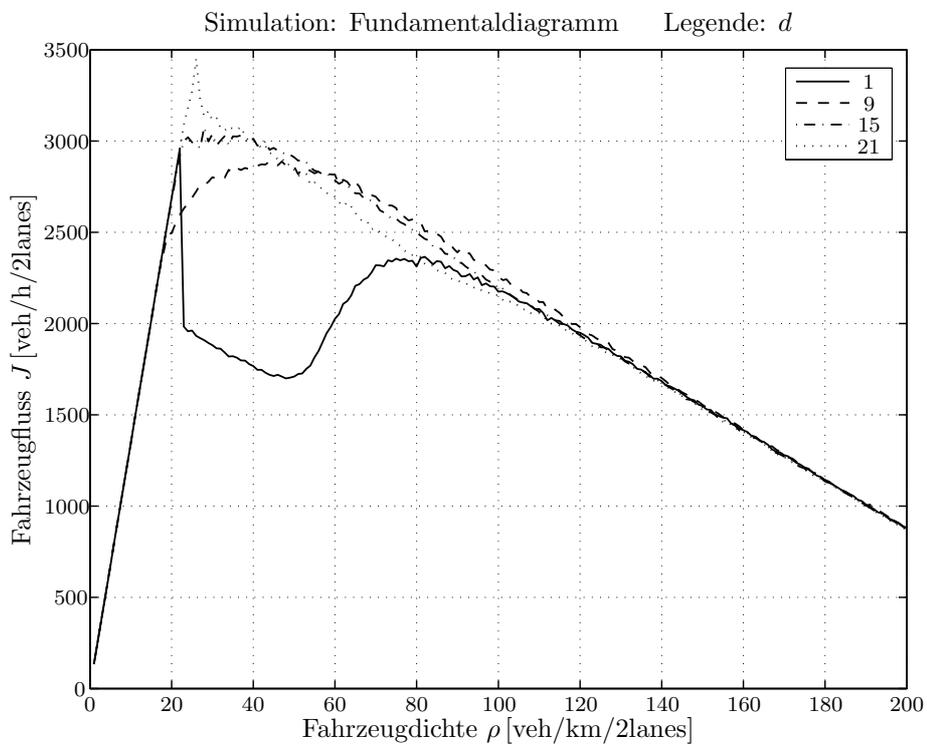


Abbildung A.3: Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit der Vorausschaudistanz  $d$

## A.1.2 Vorausschaudistanz

Eine Antizipation der Geschwindigkeit ist mit Werten kleiner eins nicht möglich. Wie in Schritt 0 im Abschnitt 2.8 gezeigt, wird in diesem Fall die angenommene Geschwindigkeit  $v_{\infty, n+1}^{(o)}(t+1)$  eines vorausfahrenden Fahrzeugs unabhängig von seiner Entfernung immer zu  $\infty$  gesetzt. Auch für den möglichen Wert Eins ist der in Abbildung A.3 dargestellte Kurvenverlauf des Fundamentaldiagramms noch unrealistisch. In Abhängigkeit der gewählten Werte ist der maximale Fluss bei verschiedenen Fahrzeugdichten einstellbar. Bei größeren Distanzen ist zusätzlich ein Absinken des Fahrzeugflusses bei hohen Dichten zu beobachten.

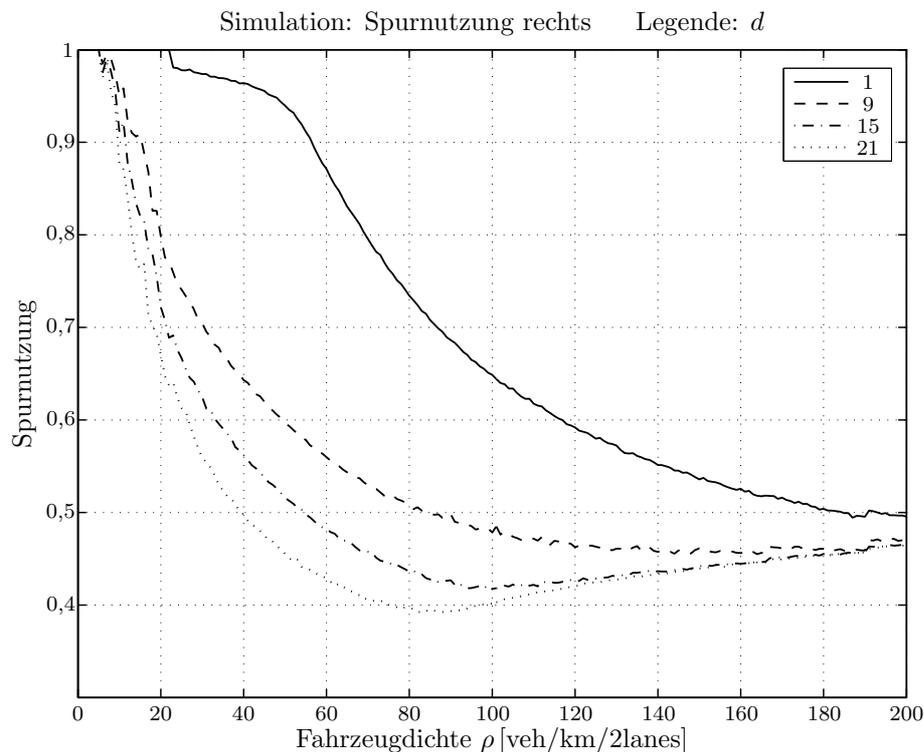


Abbildung A.4: Spurnutzung in Abhängigkeit der Vorausschaudistanz  $d$

Bezüglich des in Abbildung A.4 dargestellten Spurwechselverhaltens gilt das oben Gesagte in gleicher Weise. Die Fahrzeuge zeigen bis hin zu hohen Dichten keine Bereitschaft einen Spurwechsel durchzuführen, wenn die Vorausschaudistanz zu klein gewählt wird. Bei sehr hohen Werten für die Vorausschaudistanz wiederum ist eine Dichteinversion bis unter 40% möglich, da die Fahrzeuge auch noch sehr weit vorausfahrende Fahrzeuge in ihre Berechnungen mit einbeziehen.

Selbst bei einer geringen Fahrzeugdichte werden mit niedrigen Werten für die Vorausschaudistanz nicht die für die Fahrzeuge möglichen Geschwindigkeiten erreicht. Wie Abbildung A.5 zeigt, werden für einen Wert  $d = 1$  bei einer Dichte von 40 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur nur noch 30% der Wunschgeschwindigkeit

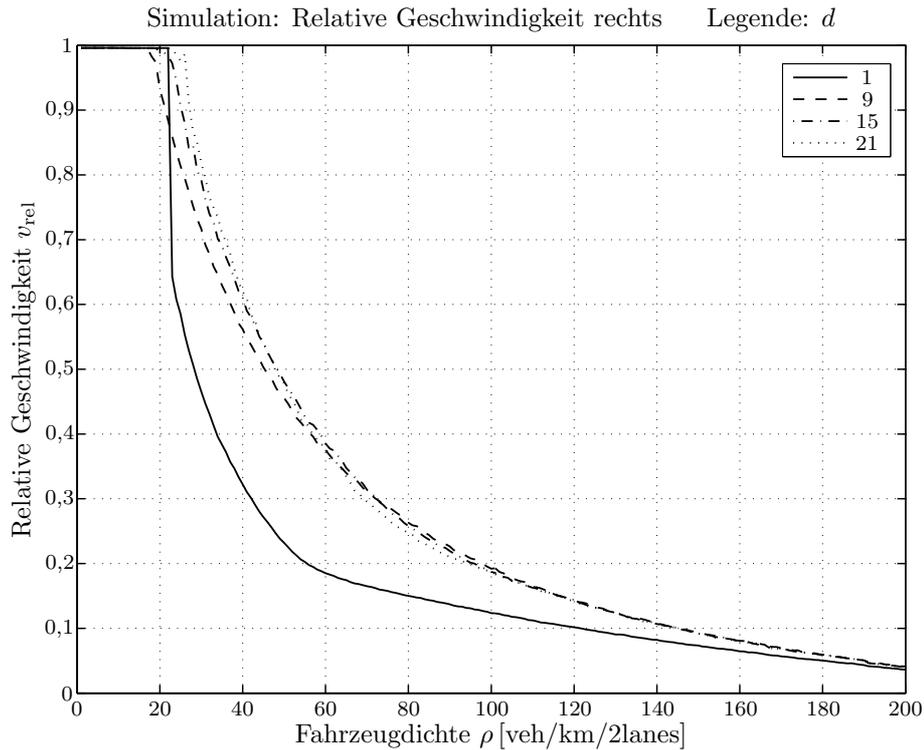


Abbildung A.5: Geschwindigkeit im Verhältnis zur Maximalgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Vorausschaudistanz  $d$

erreicht, im Gegensatz zu 60 % für höhere Werte von  $d$ . Für eine Fahrzeugdichte ab 60 veh/km/2lanes wird die Vorausschaudistanz durch das Zusammenrücken der Fahrzeuge zunehmend bedeutungsloser. Die relativen Geschwindigkeiten der Fahrzeuge unterscheiden sich ab einem Wert von  $d \geq 15$  nicht mehr voneinander.

### A.1.3 Slack

Der Einfluss des Parameters  $\Delta_{\text{slack}}^{(lv)}$  beschränkt sich auf die Bereitwilligkeit der Fahrzeuge, bei Anwendung eines asymmetrischen Regelsets einen Spurwechsel von links nach rechts durchzuführen ( $L \rightarrow R$ ). Das in Abbildung A.6 gezeigte Verhalten beschreibt dabei den Einfluss des für normale Fahrzeuge geltenden Parameters  $\Delta_{\text{slack}}$ . Der für den Schwerlastverkehr geltende Parameter  $\Delta_{\text{slack}}^{lv}$  ist für alle Simulationen fest zu eins gesetzt. Damit besitzen Fahrzeuge geringerer Maximalgeschwindigkeit generell einen höheren Rückwechselwillen als normale Fahrzeuge. In Abhängigkeit von  $\Delta_{\text{slack}}$  tritt die Dichteinversion bei verschiedenen Fahrzeugdichten auf. Auch ihr Ausprägungsgrad steigt mit steigenden Werten für den Slack. Ab einem Wert von  $\Delta_{\text{slack}} = 3$  ist nahezu keine Veränderung mehr im Spurnutzungsverhalten festzustellen.

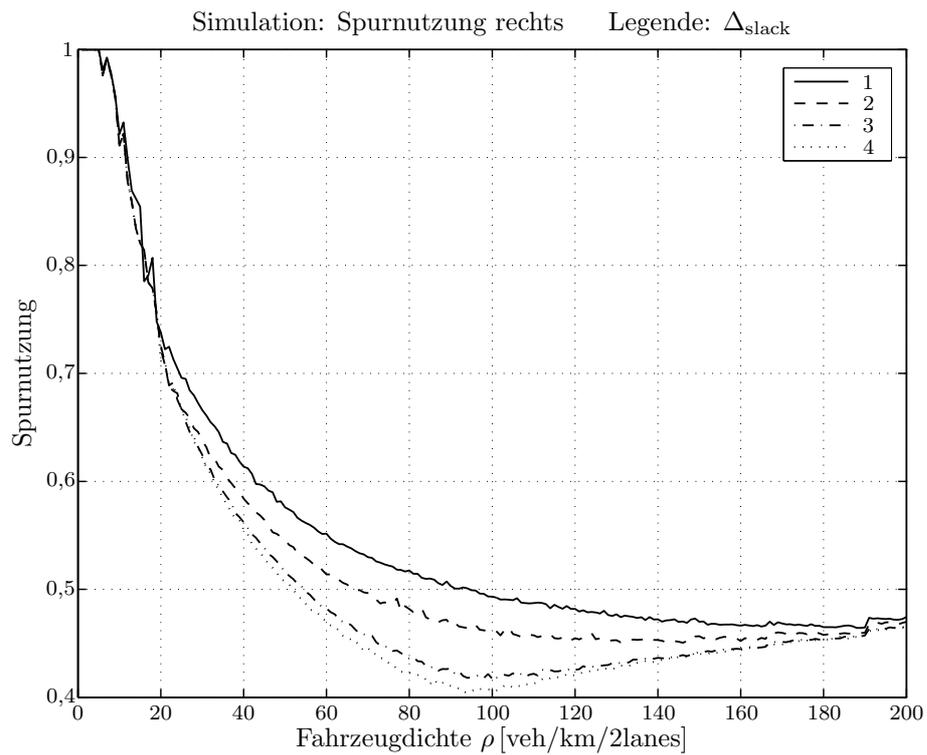


Abbildung A.6: Spurnutzung in Abhängigkeit des Slacks  $\Delta_{\text{slack}}$

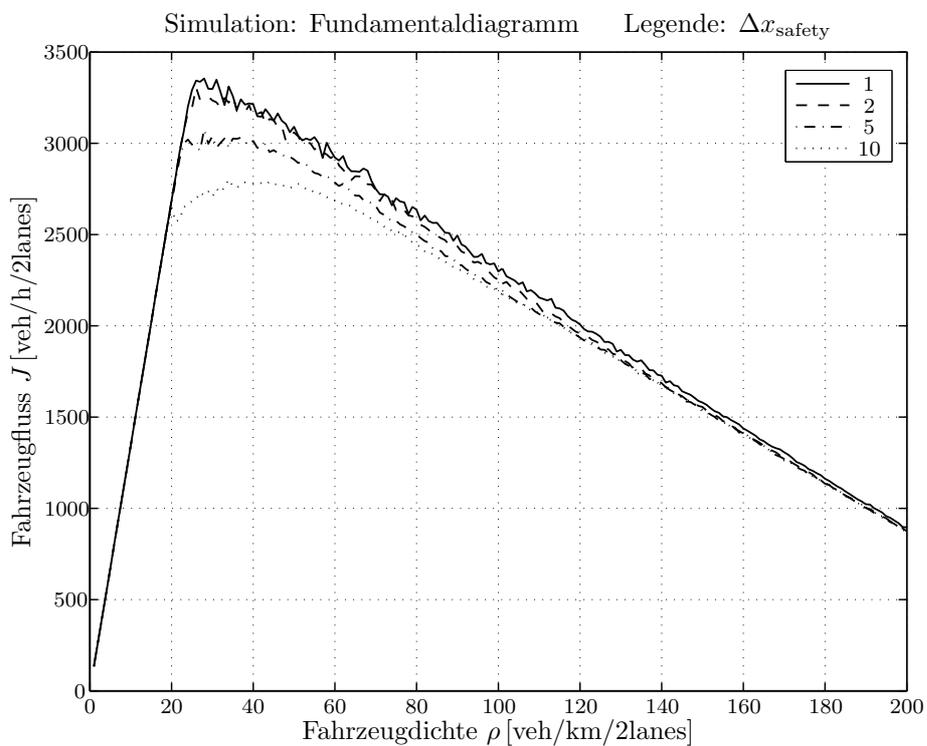


Abbildung A.7: Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit des Sicherheitsabstands  $\Delta x_{\text{safety}}$

### A.1.4 Sicherheitsabstand

Wie im Abschnitt 2.8 aufgeführt, muss für ein sicheres Fahren  $\Delta x_{\text{safety}} \geq 1$  gelten. Die Bedingung verhindert aber lediglich ein Ineinanderfahren der Fahrzeuge. Das Fahren „Stoßstange an Stoßstange“ ist damit weiterhin möglich. Wie aus Abbildung A.7 ersichtlich, hat der Sicherheitsabstand für kleine Werte zwar einen Einfluss auf das Fundamentaldiagramm, dieser ist aber nicht sehr bedeutend. Er resultiert im Wesentlichen in einer Glättung der Kurven. Höhere Werte des Sicherheitsabstandes führen jedoch zu einer wesentlichen Verringerung des Fahrzeugflusses. Der Einfluss auf das in Abbildung A.8 gezeigte Spurwechselverhalten ähnelt dem in Abschnitt A.1.1 beschriebenen Verhalten. Ab einem Sicherheitsabstand von 5 ist keine signifikante Änderung im Kurvenverlauf des Spurwechselverhaltens mehr zu beobachten.

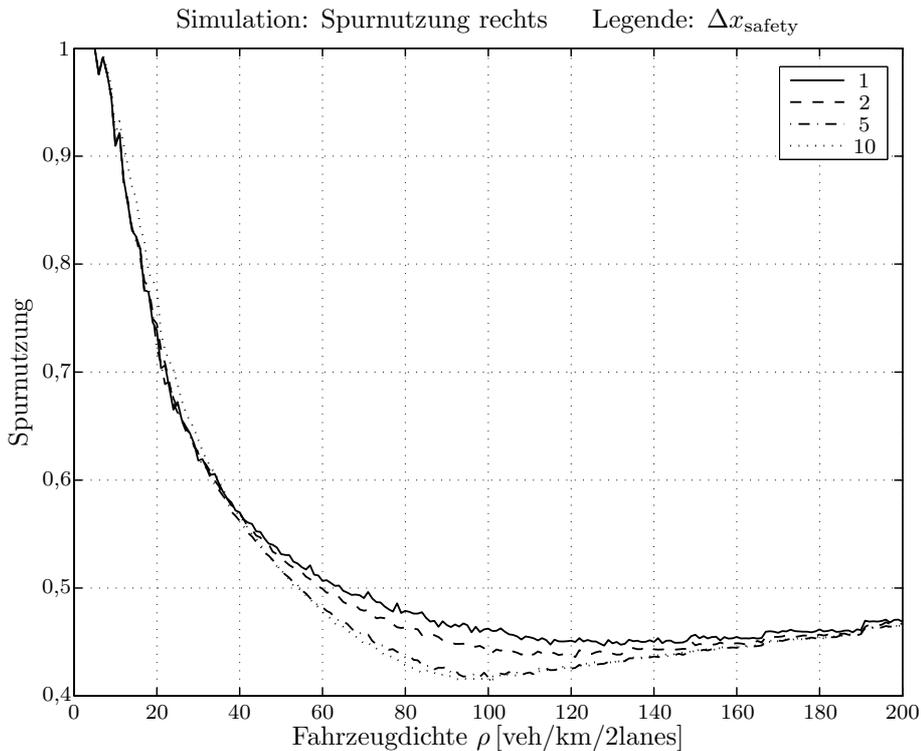


Abbildung A.8: Spurnutzung in Abhängigkeit des Sicherheitsabstands  $\Delta x_{\text{safety}}$

Bedingt durch den nur geringen Einfluss auf das Fundamentaldiagramm und das Inversionsverhalten des spurwechselbezogenen Sicherheitsabstands  $\Delta x_{\text{safety}}^{ch}$  ist dieser nicht Gegenstand zusätzlicher Untersuchungen und wird für alle Simulationen fest auf den Wert 3 gesetzt.

### A.1.5 Rechtsüberholen

Ein in der realen Welt oft zu beobachtendes Verhalten ist es, bei geringen Geschwindigkeiten und hohen Verkehrsdichten auch rechts zu überholen. Diese Fahrweise wird durch den Parameter  $v_{otr}$  nachgebildet. Abbildung A.9 zeigt, dass das Fundamentaldiagramm durch die Aufweichung des Rechtsüberholverbots ganz wesentlich im Bereich hoher Verkehrsdichten beeinflusst werden kann. Erkennbar ist, dass für Dichten ab 22 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur der Fahrzeugfluss in nahezu linearer Abhängigkeit des Parameters  $v_{otr}$  variiert werden kann.

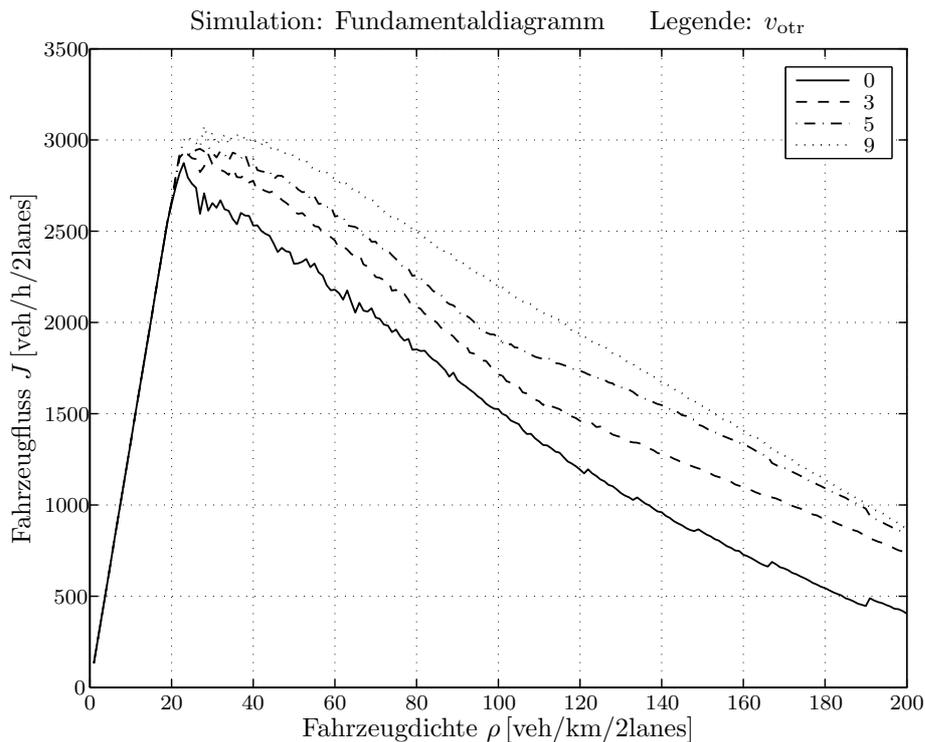


Abbildung A.9: Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit der Geschwindigkeit  $v_{otr}$

Bezogen auf das in Abbildung A.10 dargestellte Spurwechselverhalten verursacht die Möglichkeit zum Rechtsüberholen nur im Bereich sehr hoher Dichten einen erkennbaren Effekt. Bei höheren Werten für  $v_{otr}$  nähern sich die Kurven stärker der 50 %-Marke, die für die im realen Verkehr bei sehr hohen Dichten zu beobachtende gleichmäßige Ausnutzung aller Fahrzeugspuren steht.

### A.1.6 Fluktuationswahrscheinlichkeiten

Prinzipbedingt haben die für die Nachbildung realen Fahrzeugverkehrs verwendete Fluktuationswahrscheinlichkeiten großen Einfluss auf das gesamte Verhalten des Modells, stellen sie doch die stochastische Komponente in den Simulationen dar.

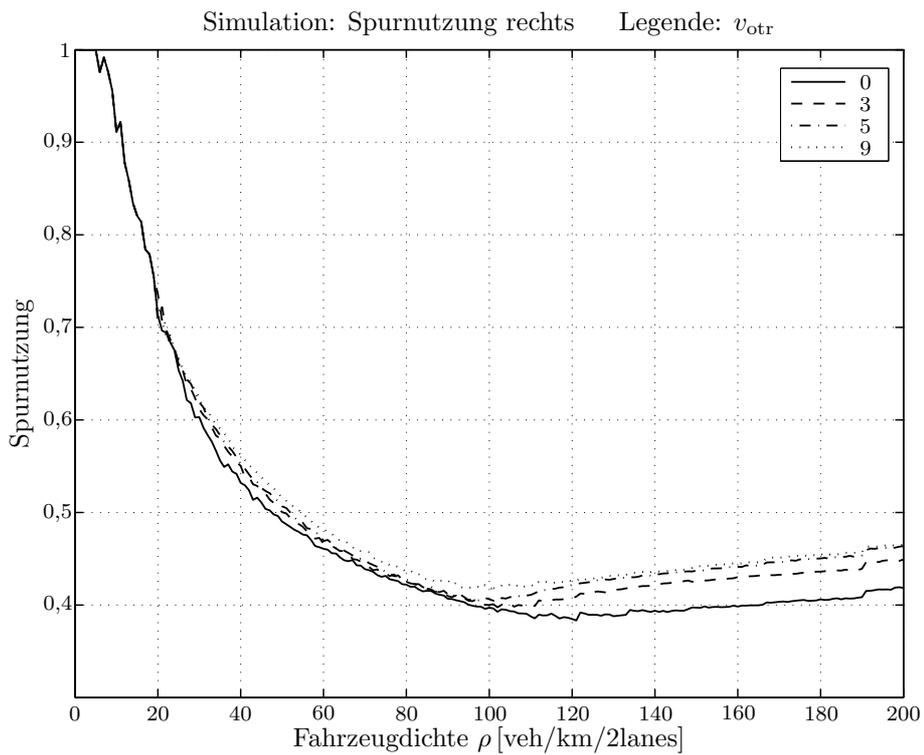


Abbildung A.10: Spurnutzung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit  $v_{otr}$

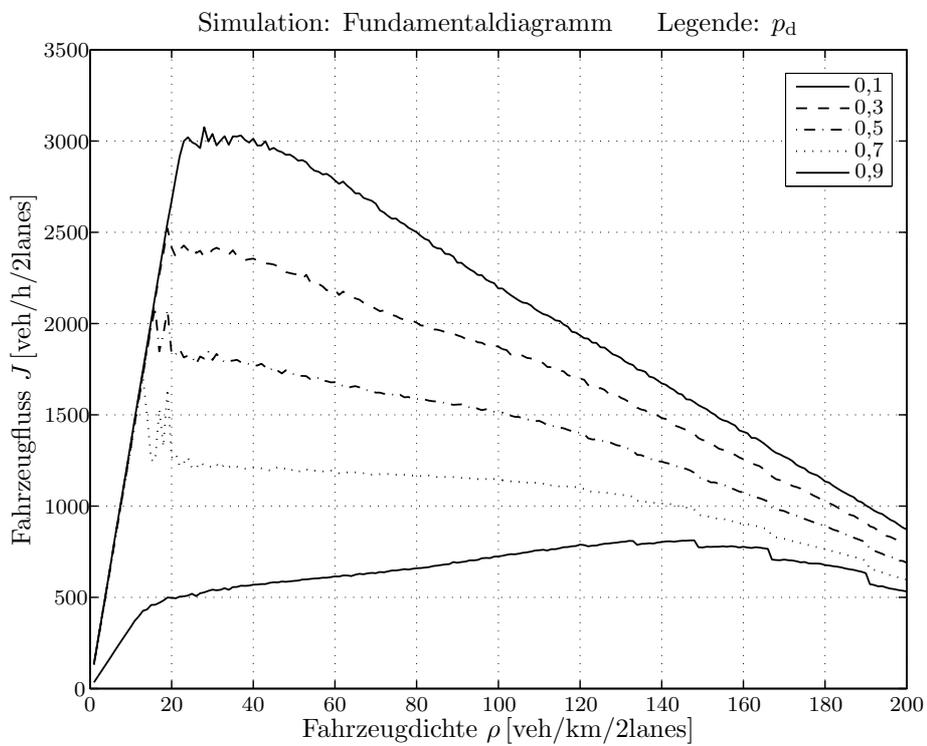


Abbildung A.11: Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit  $p_d$

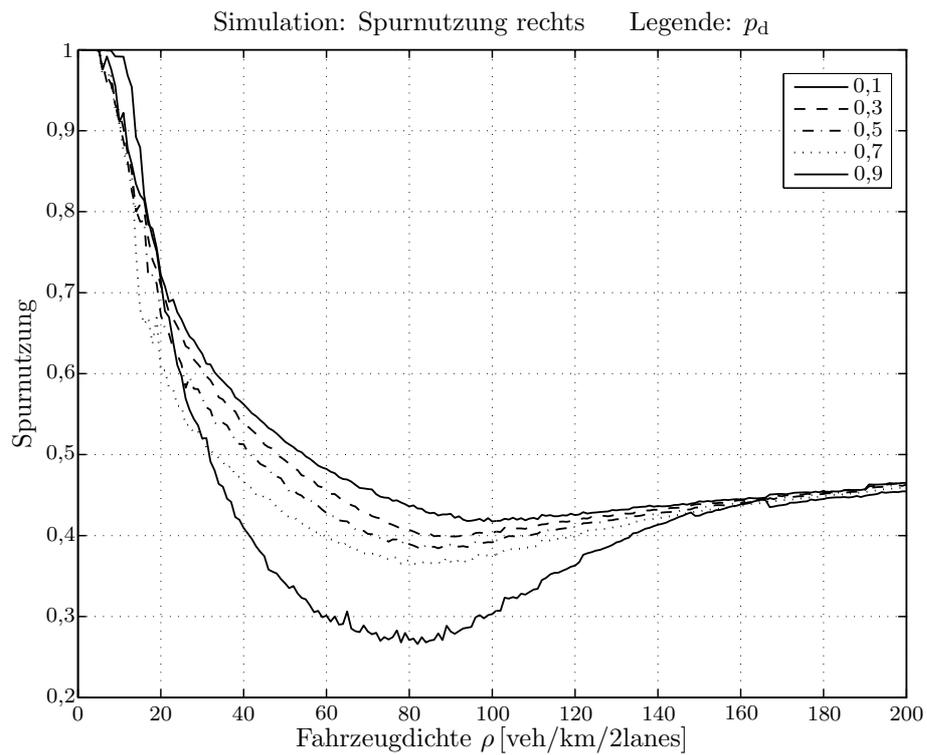


Abbildung A.12: Spurnutzung in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit  $p_d$

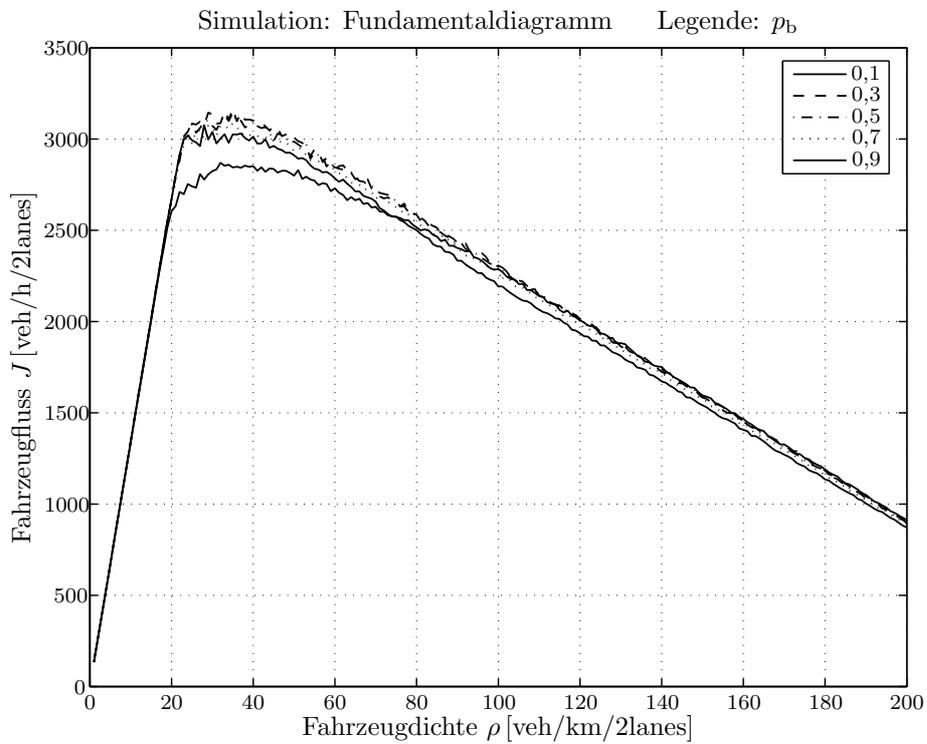
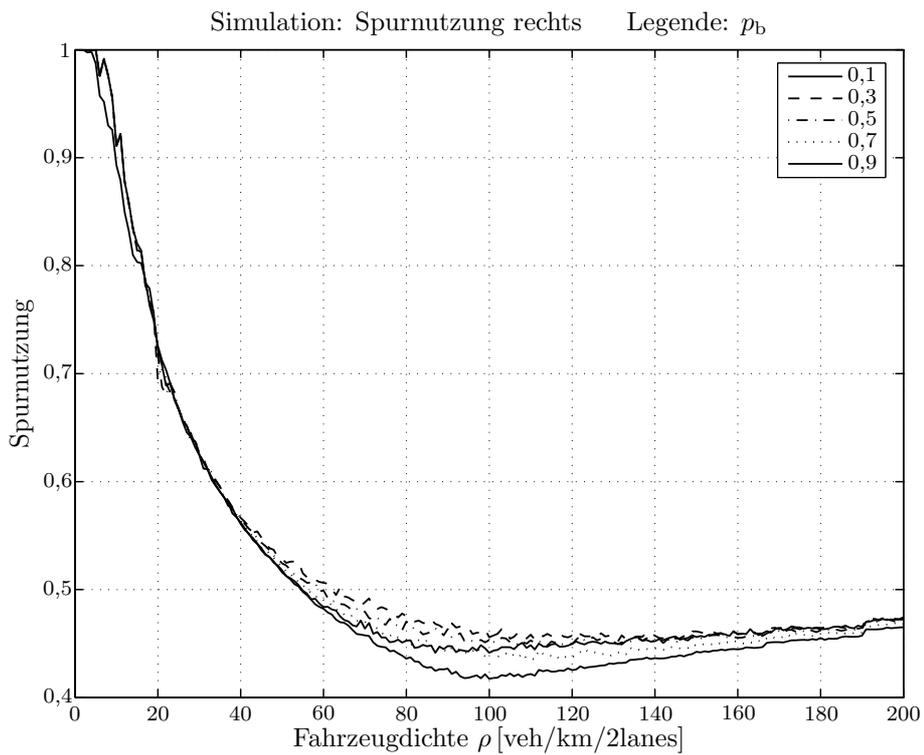
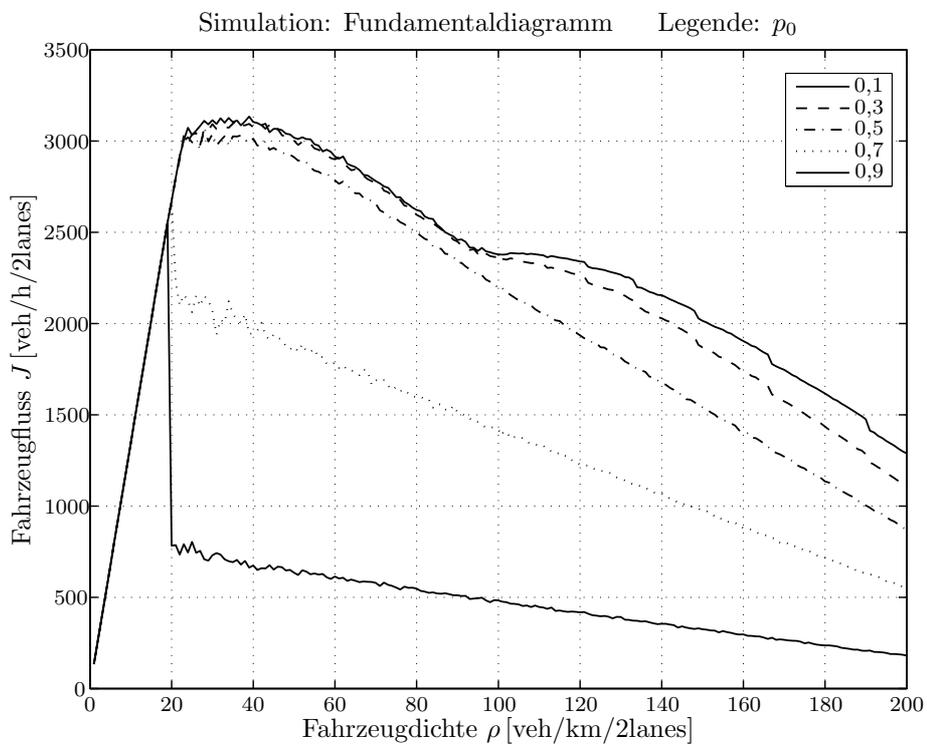


Abbildung A.13: Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit  $p_b$

Abbildung A.14: Spurnutzung in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit  $p_b$ Abbildung A.15: Fundamentaldiagramm in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit  $p_0$

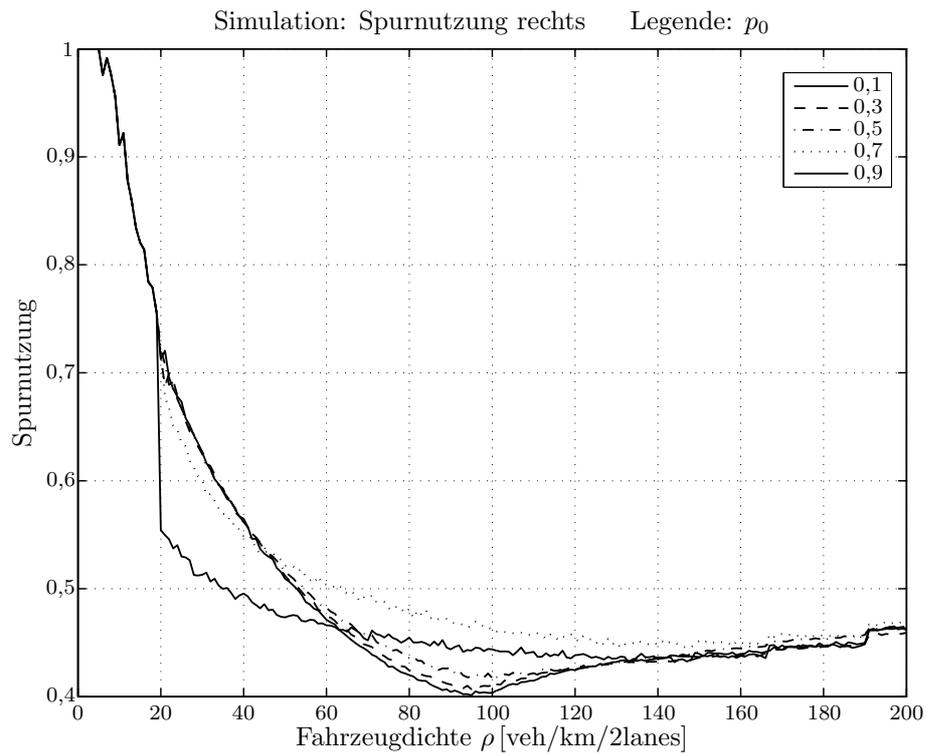


Abbildung A.16: Spurnutzung in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit  $p_0$

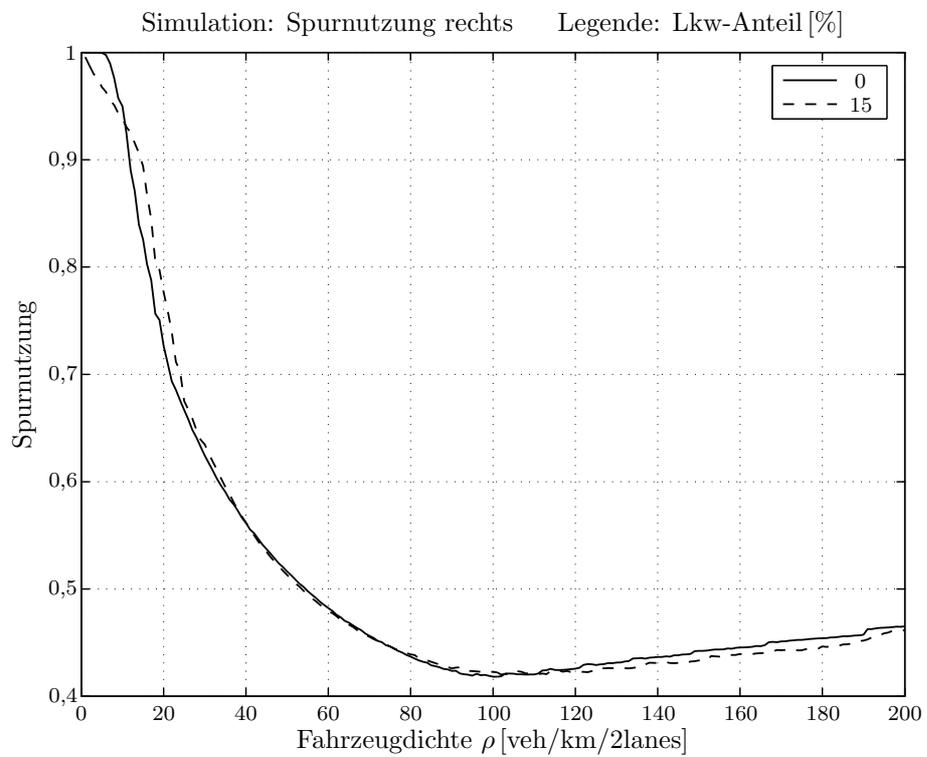


Abbildung A.17: Spurnutzung in Abhängigkeit des Lkw-Anteils

Wie die Abbildungen A.11 bis A.16 zeigen, haben besonders die Wahrscheinlichkeiten für fahrenden und stehenden Verkehr gravierende Auswirkungen sowohl auf das Fundamentaldiagramm als auch auf das Spurwechselverhalten der Fahrzeuge.

### A.1.7 Dynamik in Abhängigkeit des Schwerlastverkehrs

Wie in Abschnitt 2.9.5 bereits angedeutet, hat die Existenz langsam fahrender Fahrzeuge auf das Spurwechselverhalten keinen wesentlichen Einfluss. Abbildung A.17 verdeutlicht diese Aussage.

### A.1.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch Evaluierung der in den Abschnitten A.1.1 bis A.1.7 gezeigten Kurvenverläufe, werden bei der Simulation von Fahrzeugbewegungen ergänzend zur Tabelle A.1 die in Tabelle A.2 aufgeführten Werte verwendet.

Tabelle A.2: Ermittelter Parametersatz

Parameter	Wert
$\Delta x_{\text{safety}}$	5
$\Delta x_{\text{safety}}^{ch}$	3
$\Delta_{\text{slack}}$	3
$\Delta_{\text{slack}}^{lv}$	1
$d$	15
$h$	4
$v_{\text{otr}}$	9
$p_b$	0,9
$p_0$	0,5
$p_d$	0,1

## A.2 Nachrichtenübertragung

Im Folgenden werden zu Abschnitt 3.5 ergänzende Ergebnisse vorgestellt.

### A.2.1 Capturing

Abbildung A.18 zeigt die Anzahl gestörter Nachrichtenübertragungen bei aktivem Capturing (MC) und bei inaktivem Capturing (OC) in Abhängigkeit zur Fahrzeugdichte. Die Fahrzeugdichte gilt dabei jeweils für Hin- und Rückrichtung. Die Kurven wurde aus den Mittelwerten gestörter Übertragungen von jeweils zehn Simulationen durchlaufen gewonnen.

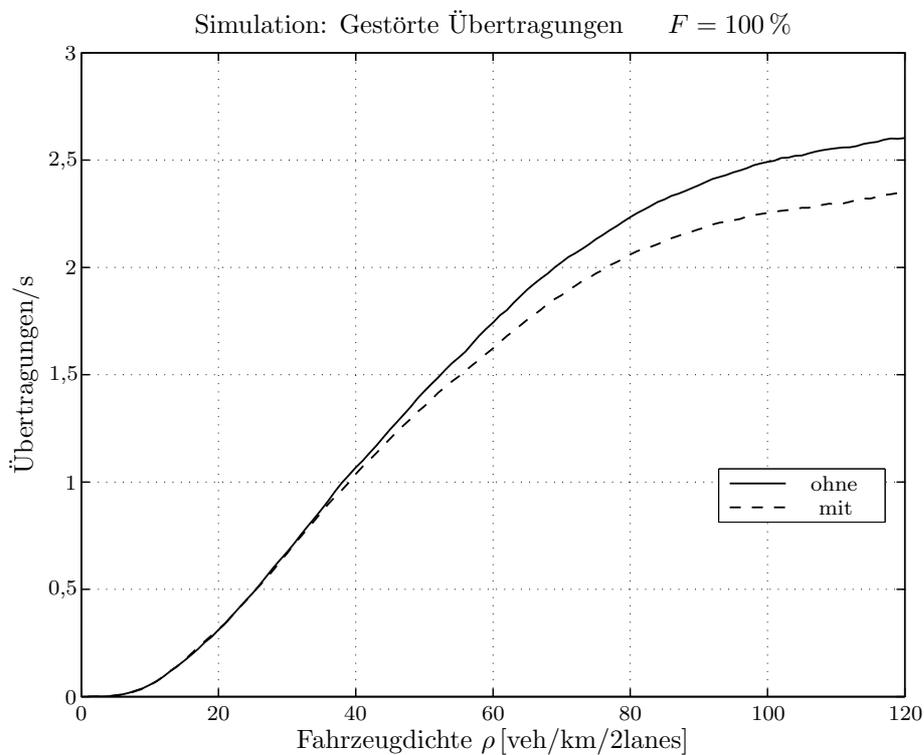


Abbildung A.18: Gestörte Übertragungen mit und ohne Capturing (absolut)

### A.2.2 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Kurven zeigen, dass bei aktivem Capturing ab einer Fahrzeugdichte von 40 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur mit einer signifikant geringeren Anzahl an gestörten Übertragungen zu rechnen ist.

## A.3 Informationsweiterleitung

Im Folgenden werden zu Abschnitt 4.9 ergänzende Ergebnisse vorgestellt. Die Diagramme stellen, mit Ausnahme der Nachrichtentrajektorien, eine Mittelung über zehn Simulationsdurchläufe dar. Zu beachten ist, dass das für den Nachrichtenaustausch initiale Ereignis keine Verkehrsbehinderung zur Folge hat. Die Fahrzeuge können ihre jeweiligen Verkehrszonen also ohne äußere Beeinflussung durchfahren. Aufgetragen ist die Zahl gesendeter oder empfangener Übertragungen, wie sie in den Abbildungen 3.1 und 3.2 beispielhaft dargestellt sind, je Zeiteinheit über der Fahrzeugdichte  $\rho$  oder der Position  $\Delta x$  relativ zum Ereignisort. Der Ereignisort ist der Ort, an dem die Erstübertragung, beispielsweise in Form einer Notfallnachricht, initiiert wird. Eine Position mit negativem Wert ist dabei in Fahrtrichtung hinter, eine Position mit positivem Wert in Fahrtrichtung vor dem Ereignisort. Für Fahrzeuge der Gegenseite gilt die umgekehrte Entsprechung. Fahrzeuge der Gefahrenzone und der Neutralen Zone bewegen sich in positionsbasierten Diagrammen somit von links nach rechts, Fahrzeuge der Gegenseite von rechts nach links.

### A.3.1 Sendeverhalten des entwickelten Algorithmus

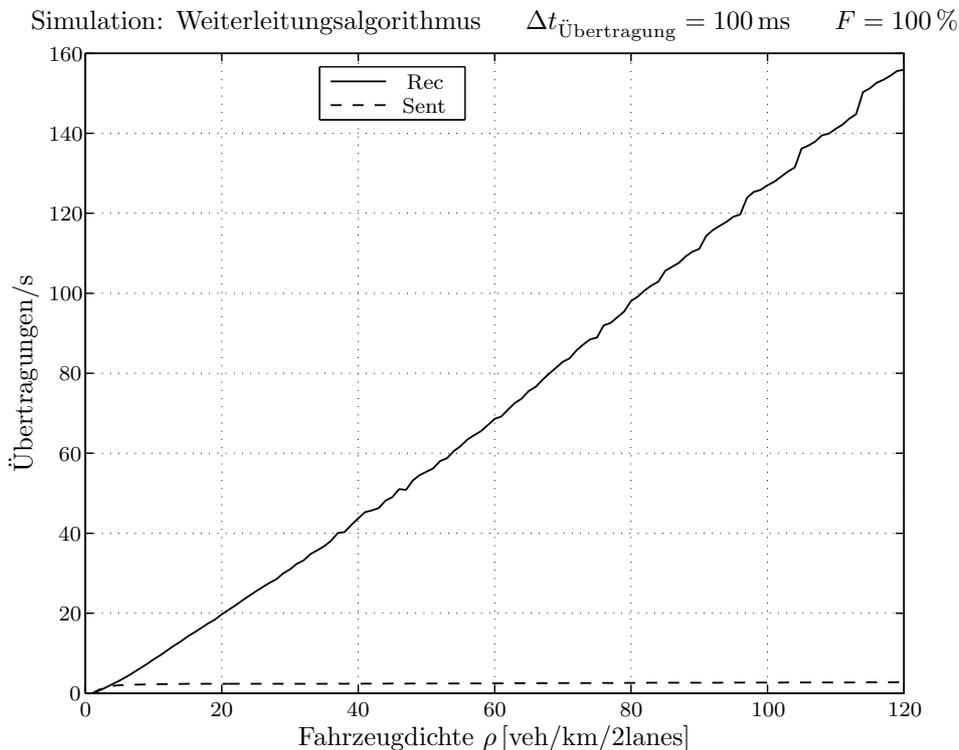


Abbildung A.19: Sende-/Empfangsverhalten bei zehnfach längerer Übertragungszeit  $\Delta t_{\text{Übertragung}}$

Abbildung A.19 zeigt das Sende- und Empfangsverhalten eines Systems unter Anwendung des in Abschnitt 4.8 beschriebenen Weiterleitungsalgorithmus, bei zehnfach längerer Übertragungszeit. Verglichen mit Abbildung 4.27 lässt sich feststellen, dass die höhere Dauer für eine Übertragung keine negativen Auswirkungen auf das System hat.

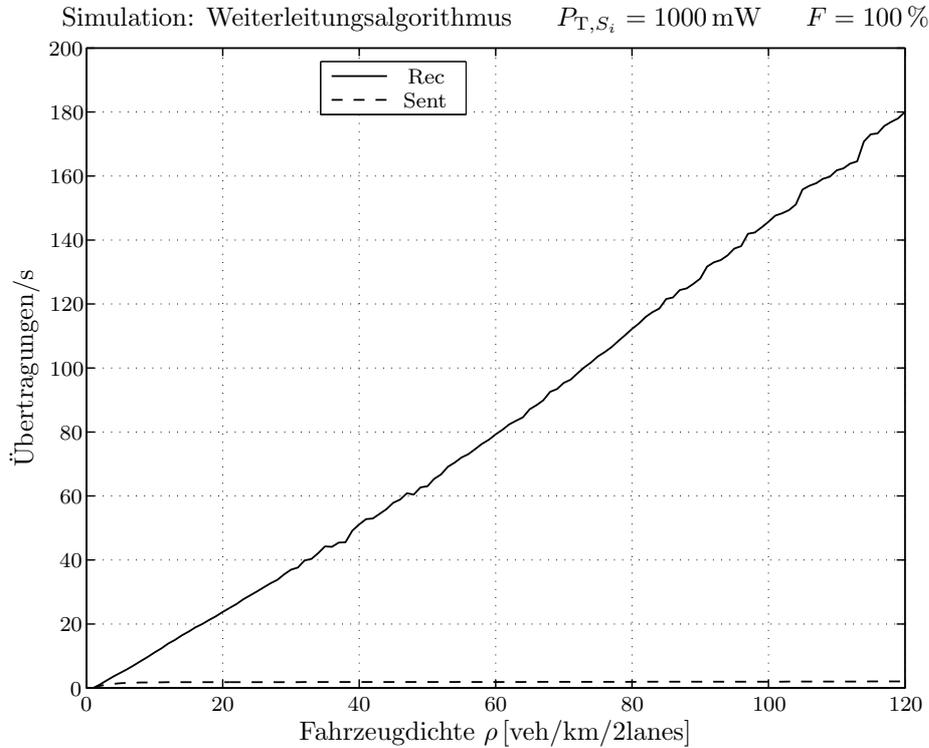


Abbildung A.20: Sende-/Empfangsverhalten bei zehnfach höherer Sendeleistung  $P_{T,S_i}$

Die gleiche Aussage kann für das System bei Benutzung der ursprünglichen Übertragungszeit von 10 ms, aber bei Anwendung einer zehnfach höheren Sendeleistung festgestellt werden. Entsprechend der höheren Funkreichweite steigt die Zahl empfangener Nachrichten zwar an, bedingt durch den Regelungsmechanismus des Weiterleitungsalgorithmus jedoch nur in geringem Maße.

### A.3.2 Gestörte Übertragungen und Verzögerungen

Abbildung A.21 zeigt das Verhalten eines Systems bezüglich gestörter Übertragungen und Sendeverzögerungen durch einen belegten Kanal bei Anwendung des Weiterleitungsalgorithmus und zehnfach höherer Sendeleistung. Erkennbar ist, dass beide Anstiege, sowohl der der Anzahl gestörter Übertragungen als auch jener der Anzahl an Sendeverzögerungen, ab einer Fahrzeugdichte von 10 veh/km/2lanes maximal nur noch linearer Natur sind.

Einhergehend mit der in Abschnitt 4.9.3 beschriebenen geringeren Anzahl vorgenommener Aussendungen als Reaktion des entwickelten Algorithmus auf eine Erhöhung der Sendeleistung, kommt es zu einer ebenfalls verringerten Anzahl an Übertragungsstörungen und Verzögerungen.

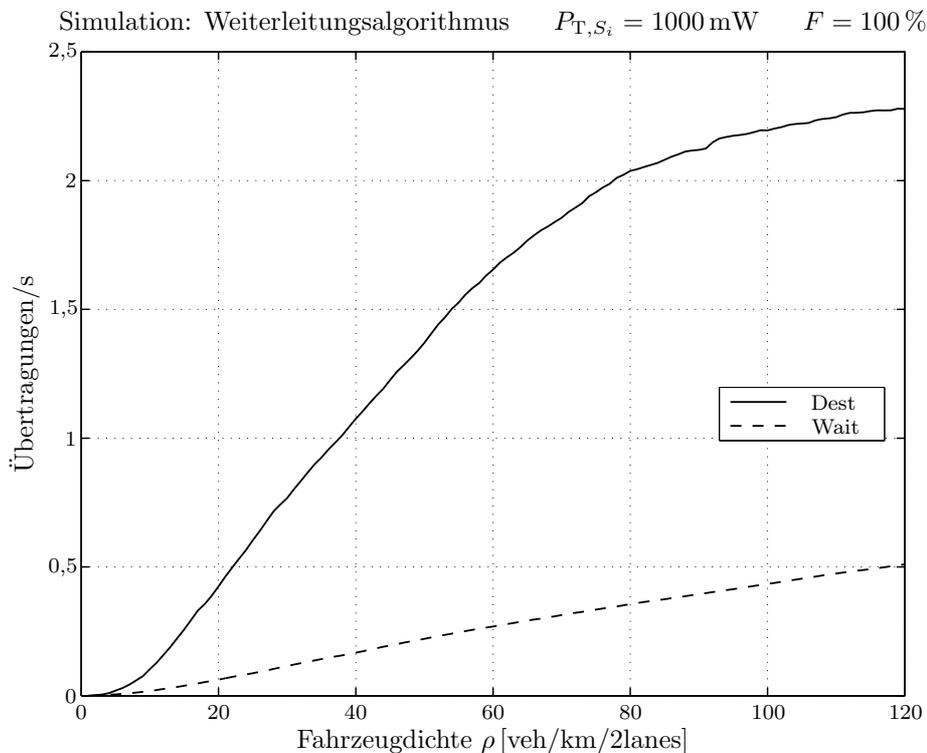


Abbildung A.21: Gestörte Übertragungen/Verzögerungen bei zehnfach höherer Sendeleistung  $P_{T,S_i}$

Mit steigender benötigter Übertragungszeit steigt auch die Wahrscheinlichkeit für Parallelaussendungen und damit von Störungen während des Übertragungsvorgangs. In Abbildung 4.33 ist daher das Verhalten eines Systems mit einer im Vergleich zu den übrigen Betrachtungen zehnfach höheren Übertragungszeit dargestellt. Während die längere Übertragungszeit, wie in den Abbildungen A.19 und A.22 gezeigt, keinen Einfluss auf das Sende-/Empfangsverhalten und die Sendezustandsverteilung hat, steigt sowohl die Anzahl der gestörten Übertragungen als auch die Anzahl an Sendeverzögerungen durch einen belegten Kanal an. Beide Anstiege bleiben aber mit einer maximalen Steigerung der Absolutwerte von 40% für die höchste Fahrzeugdichte im unkritischen Bereich. Für die Verzögerungen stellt sich darüberhinaus ab einer Dichte von 60 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur ein nahezu konstantes Verhalten ein.

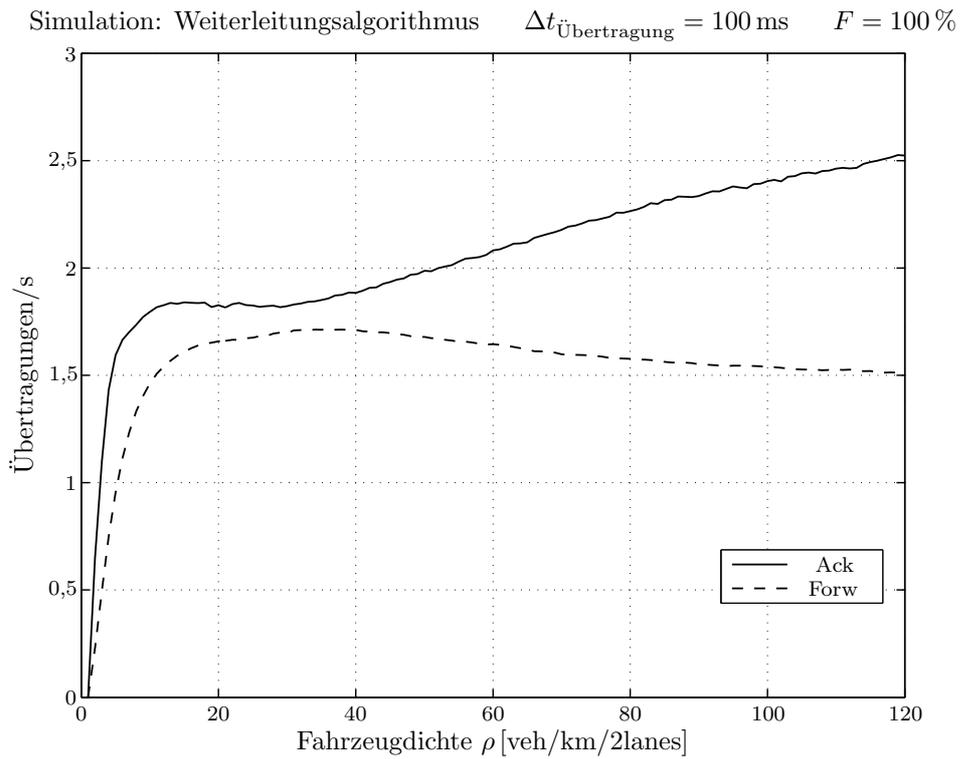


Abbildung A.22: Sendezustandsverteilung bei zehnfach längerer Übertragungszeit  $\Delta t_{\text{Übertragung}}$

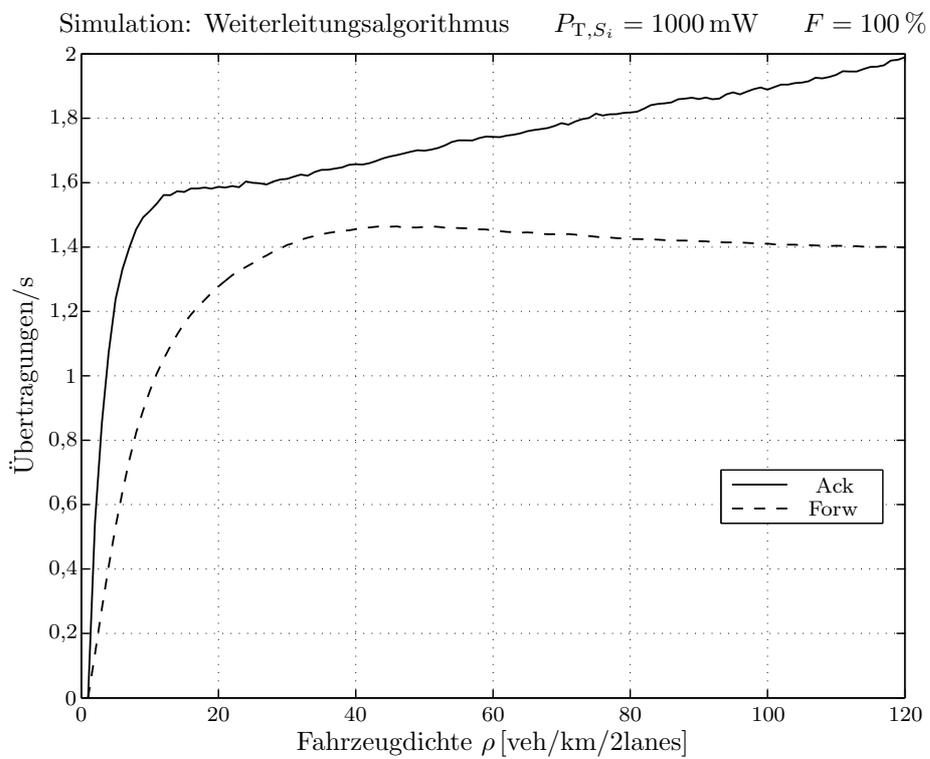


Abbildung A.23: Sendezustandsverteilung bei zehnfach höherer Sendeleistung  $P_{T,S_i}$

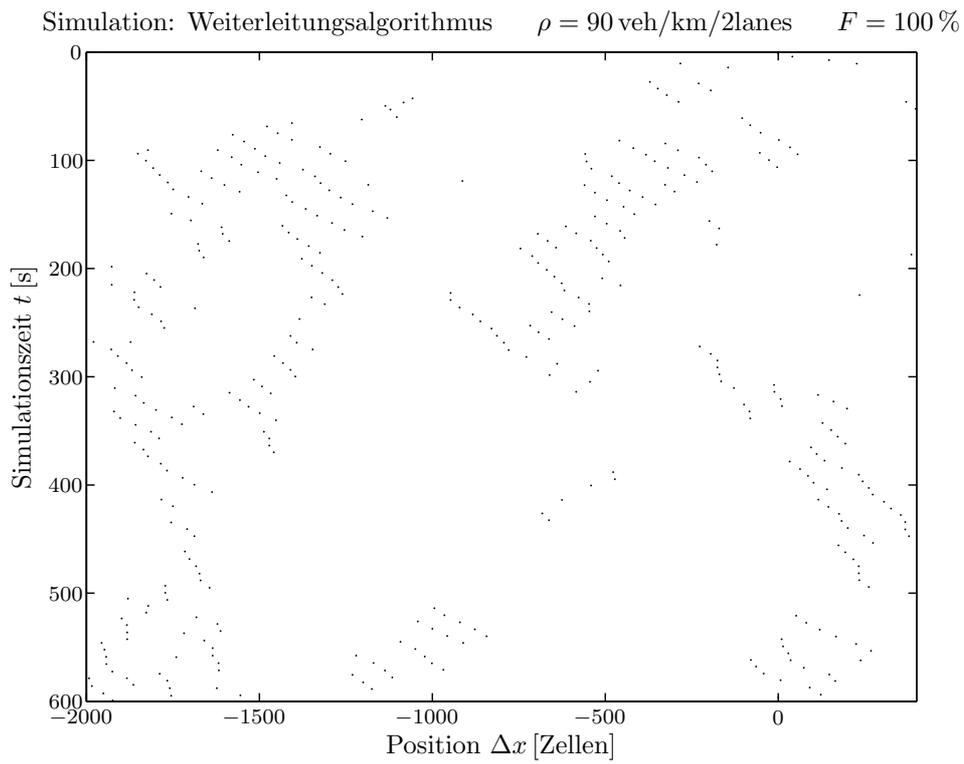


Abbildung A.24: Informationsabdeckung über 600 s, Gefahrenzone

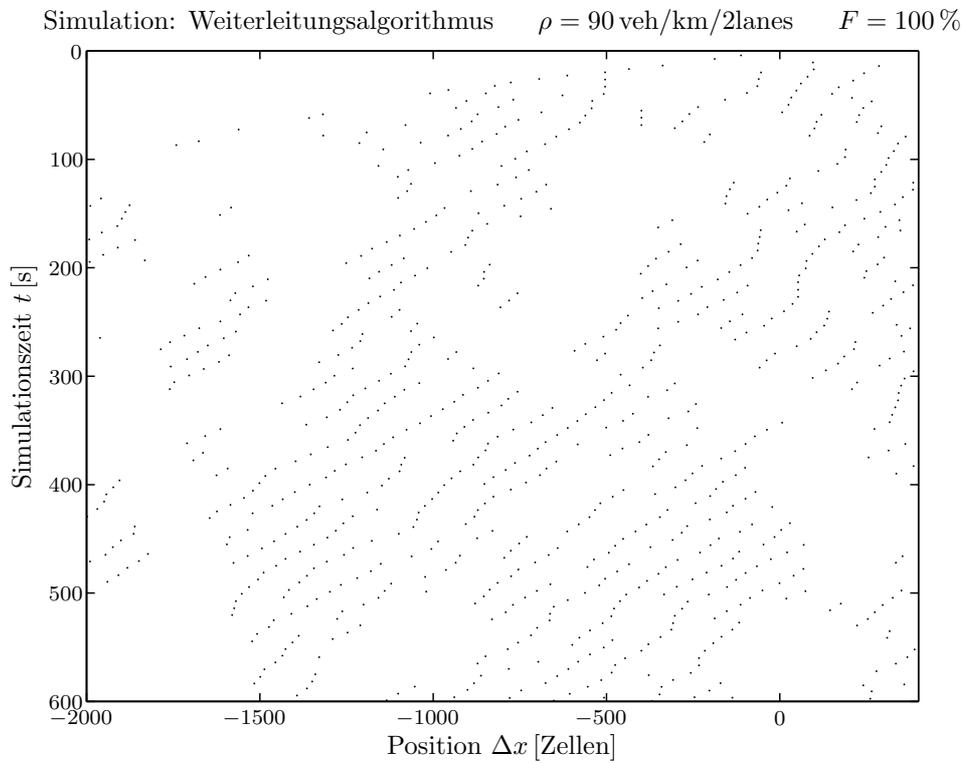


Abbildung A.25: Informationsabdeckung über 600 s, Gegenzone

### **A.3.3 Informationsabdeckung**

Die Abbildungen A.24 und A.25 zeigt die Nachrichtentrajektorien für den Fall einer Verkehrsdichte von 90 Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur über einen Zeitraum von 600 Sekunden getrennt für die Gefahrenzone und die Gegenzone.

Ähnlich wie im Fall der Verkehrstrajektorien steht jeder Punkt des Diagramms für die Aussendung eines Fahrzeugs auf der dazu gehörigen Position zum jeweiligen Zeitpunkt. Die Abbildungen verdeutlichen die Aufteilung der Weiterleitungsaufgabe zwischen den Zonen. Erkennbar ist die große Bedeutung der Gegenzone.

### **A.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse**

Die Aufgabe der dezentralen Verteilung sicherheitsrelevanter Verkehrsinformationen in einem sich selbst regulierenden Funknetz zwischen Fahrzeugen kann ohne Zuhilfenahme einer festen Infrastruktur erfolgreich durchgeführt werden. Dabei ist der in dieser Arbeit entwickelte Algorithmus in der Lage, die Belastung der Funkschnittstelle sowohl unabhängig von der Verkehrsdichte und damit der Zahl weiterleitungsbereiter Fahrzeuge als auch unabhängig von Sendeleistung und Übertragungsdauer nahezu konstant und auf niedrigem Niveau zu halten. Ergänzend zu den Aussagen in Abschnitt 4.9.7 lässt sich die Unverzichtbarkeit der Gegenzone für das Funktionieren des Weiterleitungsalgorithmus feststellen.

## A.4 Verkehrsbeeinflussung

Im Folgenden werden zu Abschnitt 5.5 ergänzende Ergebnisse vorgestellt. Die Diagramme stellen jeweils eine Mittelung über zehn Simulationsdurchläufen dar.

### A.4.1 Verkehrsflussoptimierung

Zweck einer von einem Fahrzeug gesendeten Verkehrsflussnachricht ist der Erhalt des fließenden Verkehrs. Im Vergleich der Abbildungen 5.7 und 5.8 zeigt sich, dass die Fahrzeuge ab einer Verkehrsdichte von 20 veh/km/2lanes mit der Generierung derartiger Nachrichten beginnen. Abbildung A.26 zeigt die dabei auftretende Belastung des zu Grunde liegenden Funknetzes mit gesendeten Verkehrsflussnachrichten.

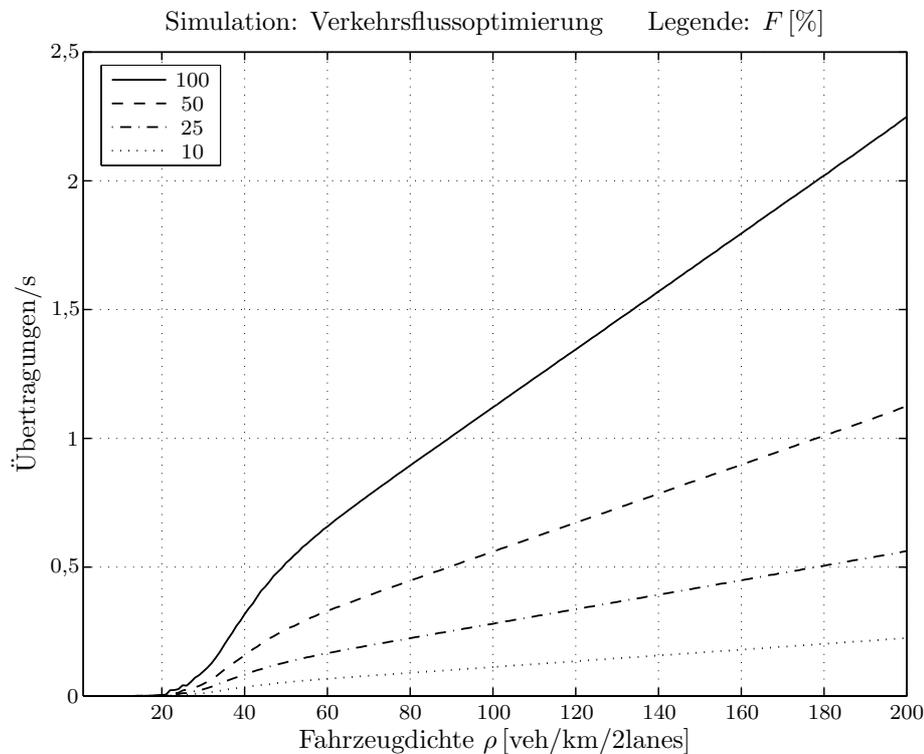


Abbildung A.26: Gesendete Verkehrsflussnachrichten (absolut)

## A.4.2 Anfahroptimierung

Ist der Fahrzeugverkehr zum Stillstand gekommen, bleibt als letzte Möglichkeit der Verkehrsflusssteigerung nur noch das koordinierte Anfahren. Eine von einem Fahrzeug gesendete Anfahrnachricht dient diesem Zweck. Abbildung A.27 zeigt die dabei auftretende Belastung des zu Grunde liegenden Funknetzes mit gesendeten Anfahrnachrichten.

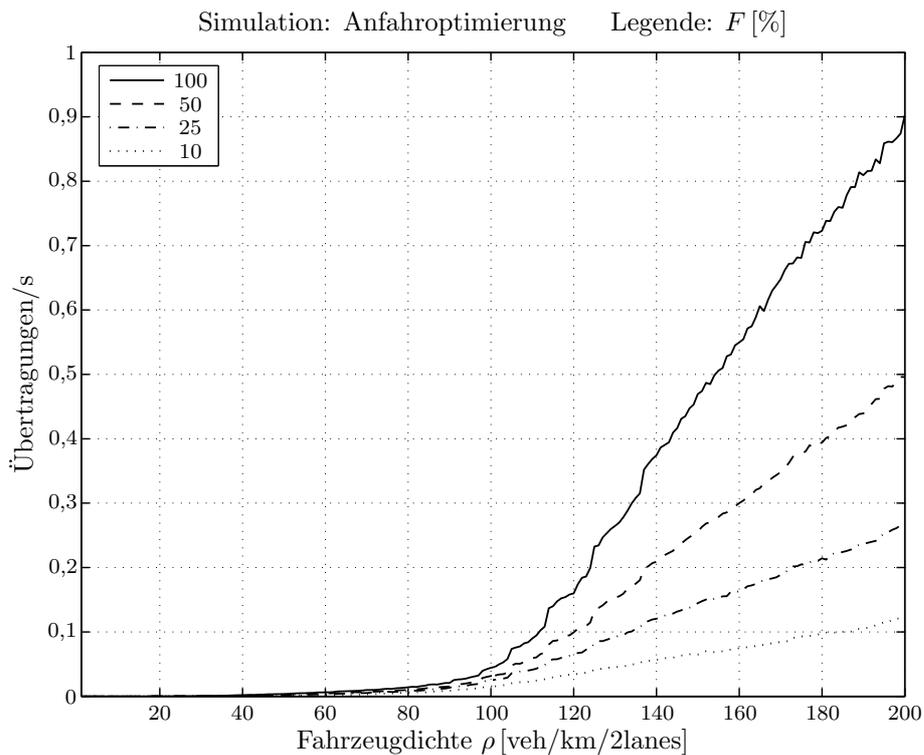


Abbildung A.27: Gesendete Anfahrnachrichten (absolut)

## A.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch die Abbildungen A.26 und A.27 wird gezeigt, dass die Realisierung von verkehrsflussoptimierenden Maßnahmen durch Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation ohne eine übermäßig starke Belastung des zu Grunde liegenden Funknetzes umgesetzt werden kann.