

5.2 Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation

Peter Tondl, Klaus Jobmann

Ein Fahrzeug zu fahren gehört zu den gefährlichsten Tätigkeiten, denen Menschen tagtäglich nachgehen. Viele Innovationen im Fahrzeugbau der letzten Jahrzehnte dienten daher der Erhöhung der Sicherheit der Verkehrsteilnehmer.

Passive Sicherheitssysteme können die Fahrzeuginsassen bei einem Unfall nur bei geringen Geschwindigkeiten wirkungsvoll schützen. Desweiteren sind sie nicht in der Lage, potenziell gefährliche Situationen zu erkennen und somit 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 Wahrnehmungreichweite des Fahrers zu ermöglichen und damit eine neue Qualität bezüglich der Sicherheit von Fahrer und Fahrzeug zu erreichen. Die sicherheitsrelevanten Aufgaben profitieren von dem Umstand, dass Fahrzeuge ihre gesammelten Sensordaten an Fahrzeuge ihrer Umgebung weitergeben, was diese wiederum befähigt, angepasst und schnell entsprechend sich verändernder Situationen zu handeln. Unabhängig von gegebenen Sichtverhältnissen kann somit beispielsweise auf eine ungewöhnlich starke Verzögerung eines weiter vorausfahrenden Fahrzeuges reagiert werden.

Die sich durch die direkte Kommunikation von Fahrzeugen untereinander ergebenden Möglichkeiten, sollen im Folgenden am Beispiel eines Verkehrsunfalls aufgezeigt werden. In einem derartigen Fall muss ein verunfalltes, aber noch kommunikationsfähiges Fahrzeug Verkehrsteilnehmer warnen, die in die durch den Unfall gefährlich gewordenen Bereiche einfahren oder sich bereits in ihnen befinden. Allgemeines Ziel ist es dabei, Informationen über den Unfall schnell und effizient an alle betroffenen Fahrzeuge weiterzugeben.

Dabei müssen zwei verschiedenartige Straßentypen unterschieden werden [MTGJ02]: 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 ausgebauten Bundesstraßen. Straßentyp B besitzt diese physikalischen Richtungstrenner nicht, es handelt sich somit um gewöhnliche Bundesstraßen, Landes- oder Kreisstraßen (Abbildung 5.1). Für den Straßentyp A bedeckt die Relevanzzone die Region, die sich in Fahrtrichtung hinter dem, sowie 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.

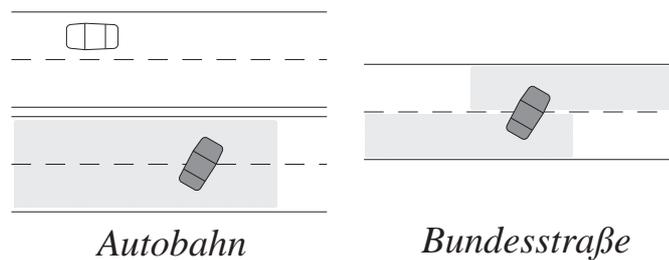


Abbildung 5.1: Relevanzzone und Straßentypen

Die Funkreichweite eines Fahrzeuges hängt im Wesentlichen von der verfügbaren Sendeleistung, den Antennenhöhen und den Eigenschaften des Funkkanals ab. Diese Faktoren bestimmen den direkt erreichbaren Abdeckungsgrad. Bei Verwendung omnidirektionale Antennen kann eine kreisförmige Abdeckung der Umgebung mit einem Radius von R_{comm} um den Sender herum angenommen werden. Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass ein Fahrzeug alle anderen Verkehrsteilnehmer in diesem Gebiet direkt und gleichzeitig erreichen kann.

Die erzielbare Informationsreichweite bezieht sich im Gegensatz zur Funkreichweite auf einzelne Nachrichten und ist als ein Maß dafür zu verstehen, welchen Weg eine Nachricht von der Quelle zur Senke zurückzu-

legen im Stande war. Bei der Benutzung von Multi-Hop-Techniken wird die Informationsreichweite im Allgemeinen sehr viel größer sein, als die Funkreichweite. 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.

Der hier 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 5.2). Dabei sorgt der Algorithmus dafür, dass Nachrichten nicht beliebig weit weitergegeben werden. Eine erste Version des Algorithmus wird vom Autor in [TG05] vorgestellt und anhand eines einspurigen Straßensystems untersucht.

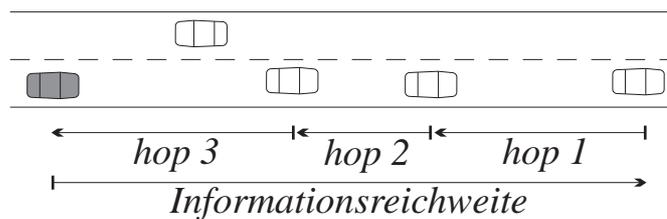


Abbildung 5.2: Informationsreichweite

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 der Nachricht für den Empfänger identisch null ist. Die Bedeutung einer Nachricht hängt sowohl von ihrem Inhalt ab, als auch von der räumlichen Entfernung zum Ort des Ereignisses.

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 allen möglichen Richtungen geschehen. Bei der Anwendung des Algorithmus wird vorausgesetzt, dass alle Fahrzeuge mit omnidi-

rektionalen Antennen ausgerüstet sind, so dass ein Sender alle Fahrzeuge innerhalb seiner Funkreichweite R_{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.

In einem ersten Schritt bestimmt der Algorithmus, ob die empfangene Nachricht für den Empfänger neu oder bereits bekannt ist. 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.

Ein eine Notfalleinrichtung empfangendes Fahrzeug bestimmt die mathematischen Eigenschaften dieser Nachricht in Abhängigkeit der eigenen Position, des Abstandes zwischen Fahrzeug und Unfallort, sowie des Abstandes des empfangenden Fahrzeugs zum weiterleitenden Fahrzeug im Fall einer bereits weitergeleiteten Nachricht. Entscheidet das Fahrzeug die Nachricht selbst nicht weiterzugeben, 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 Ursprungsnachricht bereits bekannt ist, wird die neu empfangene 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 Notfalleinrichtung empfängt, so 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.

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. Andere Fahrzeuge werden zunächst warten und den Prozess der Weitergabe beobachten. Beobachtende Fahrzeuge erhalten die Möglichkeit eines aktiven Einstiegs in den Prozess, indem der Algorithmus periodisch über die Weiterleitung von Nachrichten neu entscheidet. Dieses Verhalten bewirkt, dass die zur Verfügung stehenden Funkressourcen nicht unnötig belastet werden.

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

Abbildung 5.3 zeigt das Sende- und Empfangsverhalten des Vergleichssystems. Mit zunehmender Fahrzeugdichte steigt die Zahl der Aussendungen im System an. Im Diagramm sind mit SS die Übertragungen je Sekunde dargestellt, die von allen Fahrzeugen der Relevanzzone erzeugt werden. RS stellt die empfangenen Übertragungen je 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: Angenom-

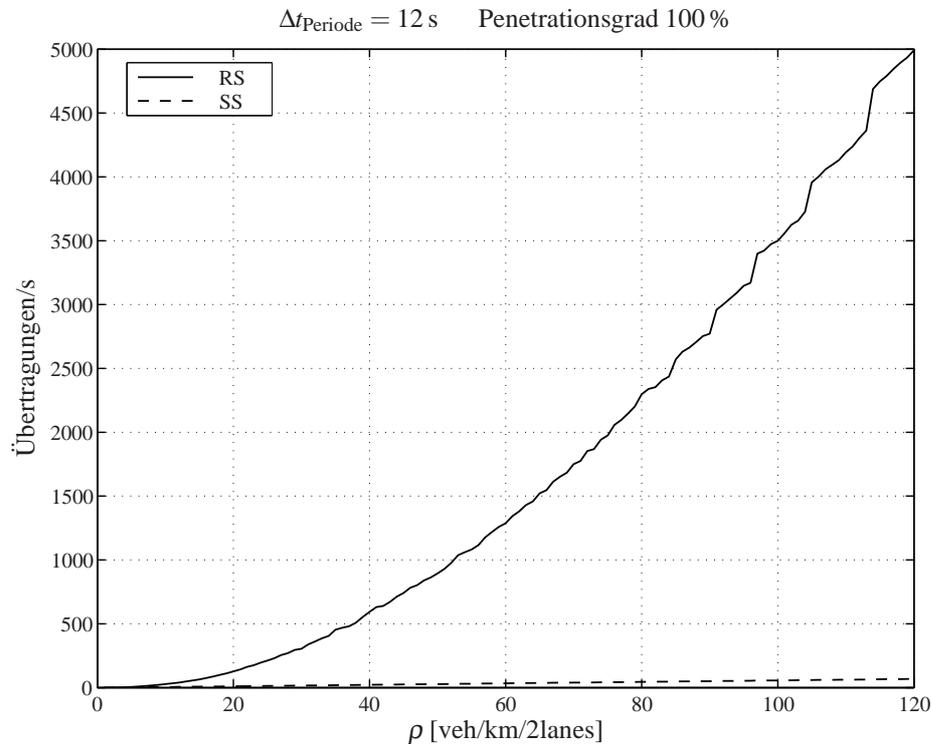


Abbildung 5.3: Sende-/Empfangsverhalten des Vergleichssystems

men 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.

Im Gegensatz zum Vergleichssystem zeigt das in Abbildung 5.4 dargestellte Verhalten des entwickelten Algorithmus eine Adaption an die gegebenen Verhältnisse. Nach einem linearen Anstieg im Bereich von Dichten unter fünf Fahrzeugen pro Kilometer und Doppelspur und einem deutlich abgeschwächten Anstieg im Bereich bis 12 veh/km/2lanes bleibt die Anzahl von Aussendungen über dem restlichen Bereich beinahe konstant.

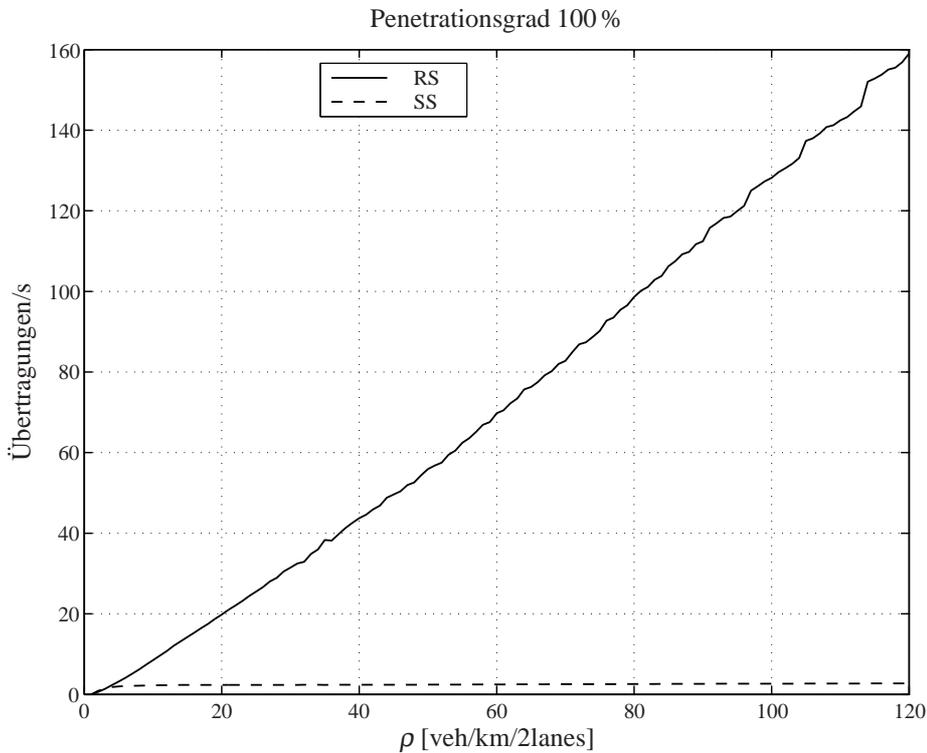


Abbildung 5.4: Sende-/Empfangsverhalten

Abbildung 5.5 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 ρ 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 $f_{load,VS} \sim \rho/4 \cdot f_{load,Algo}$. 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.

Neben dem Gewinn an Sicherheit durch direkte Verteilung von Notfallnachrichten zwischen Fahrzeugen versetzen zielgerichtete Informationen über die Verkehrslage einen Fahrzeugführer in die Lage, sein Verhalten den aktuellen Gegebenheiten anzupassen. Mit Hilfe des Traffic Message

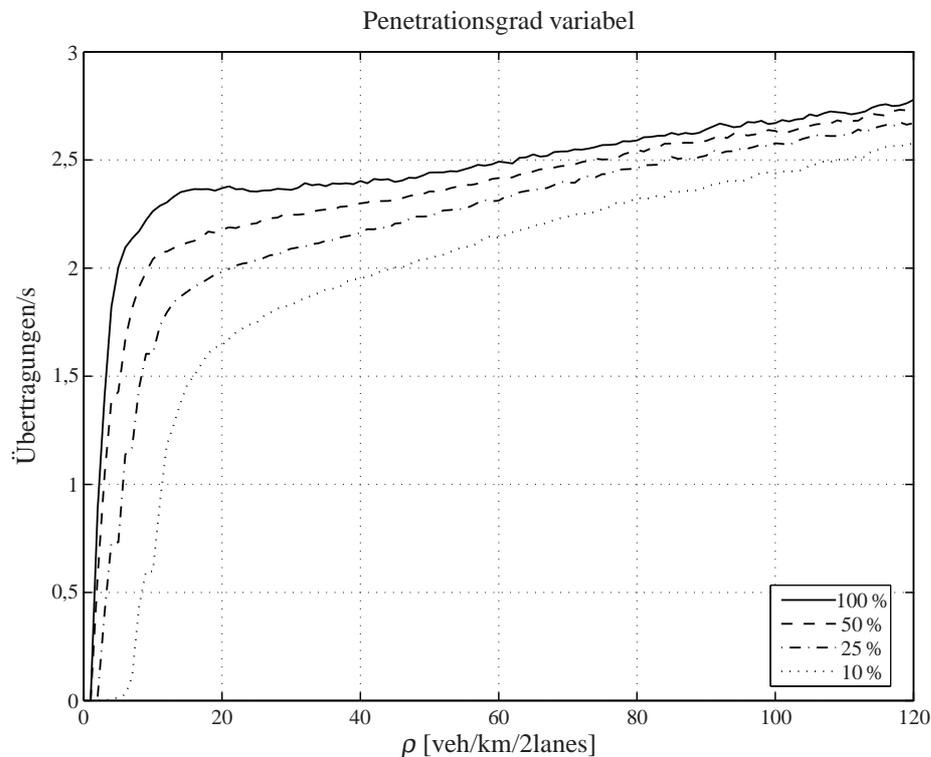


Abbildung 5.5: Sendeverhalten in Abhängigkeit vom Penetrationsgrad

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.

Verkehrsflussstörungen entstehen auf besonders stark befahrenen Streckenabschnitten auch ohne äußere Anlässe. Störungen dieser Art werden 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 verkehrsbe-

einflussenden Maßnahme ist daher die Fahrzeugflusserhaltung auch unter ungünstigen Bedingungen. Ist dies nicht möglich, wird als sekundäres Ziel eine optimierte Wiederherstellung des Flusses angestrebt.

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. 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 Horizont der Fahrerassistenz.