



Einleitung

Die Car-2-Car Kommunikation macht den Straßenverkehr durch verschiedene Applikationen sicherer und effizienter. Die Verkehrsteilnehmer können sich mit einem solchen Kommunikationssystem erstmals aktiv über die aktuelle Verkehrssituation austauschen oder direkt Nachrichten von entsprechender Verkehrsinfrastruktur erhalten¹. Grundlage hierfür ist neben dem eigentlichen Kommunikationssystem, welches Gegenstand dieser Arbeit ist, zum einen der Zugang zum fahrzeuginternen CAN Bus, über den die Nachrichten zum Fahrzeugstatus und damit auch zur Verkehrssituation gesammelt werden können. Zum anderen sind ein Satelliten-Navigationssystem zur Bestimmung der eigenen Position und eine digitale Karte in dem Car-2-Car System erforderlich. Dadurch kann der Sender die in einem Datenpaket abgelegten Nachrichten mit der entsprechenden Position und der betroffenen Fahrtrichtung versenden. Jeder Empfänger kann diese Angaben dann mit seiner eigenen Position und gewählten Fahrtroute abgleichen und die übermittelten Nachrichten so in seine Umgebung einordnen. Satelliten-Navigationssysteme sind heute bereits in einer Vielzahl von Fahrzeugen im Einsatz, sodass die Position und die digitale Karte grundsätzlich verfügbar sind.

Applikationen, die das Car-2-Car Kommunikationssystem nutzen, können vor verschiedenen Gefahren für die Verkehrssicherheit warnen: Stau, stark bremsende Fahrzeuge, Baustellen oder herannahende Rettungsfahrzeuge,

¹Manchmal wird der Begriff Car-2-X eingeführt, um zu verdeutlichen, dass nicht nur Fahrzeuge ausgerüstet werden können. In dieser Arbeit wird aber Car-2-Car als Ausdruck für das Gesamtsystem verwendet.

usw. Darüber hinaus können dem Fahrzeug und dem Fahrer zusätzliche Informationen über Tempolimits, Ampelphasen oder freie Parkplätze zur Verfügung gestellt werden.

Alle übertragenen Nachrichten sind dabei nicht nur für einzelne, sondern potentiell alle Empfänger in der näheren Umgebung relevant. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein Datenfunksystem auf der Basis von Broadcast-Nachrichten entworfen, beschrieben und quantitativ untersucht. Das System soll infrastrukturlos und selbstorganisierend arbeiten und dadurch robust, anpassungsfähig, flexibel und skalierbar sein. Es soll somit kein zellulARES Netz und auch kein flächendeckendes Mobilfunksystem aufgebaut werden. Stattdessen wird der Funkkanal immer dann und überall dort verwendet, wo Kommunikationsteilnehmer zufällig aufeinander treffen. Abbildung 1.1 zeigt beispielhaft die Übertragung von Broadcast-Nachrichten an alle Teilnehmer in Übertragungsreichweite. Das rote Auto in Fahrtrichtung, aber auch das blaue Fahrzeug auf der Gegenfahrbahn werden hier durch Übertragung eines einzigen Datenpaketes erreicht.

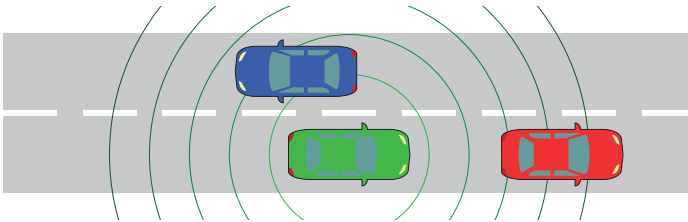


Abbildung 1.1: Übertragung von Nachrichten im Broadcastnetzwerk.
Mit nur einer Übertragung werden das rote Auto und das blaue Auto gleichzeitig informiert.

Die eingesetzte Technik muss möglichst preisgünstig verfügbar sein, damit sie von den Fahrzeugherstellern idealerweise serienmäßig in neue Fahrzeuge integriert wird, da ein entsprechender Nutzen erst mit steigender Ausstattungsrate erreicht werden kann. Zu den technischen Herausforderun-

gen beim Entwurf eines solchen Car-2-Car Systems zählen darüber hinaus die große Anzahl an Teilnehmern, die sich permanent ändernde Topologie des Netzwerks und die hohen Differenzgeschwindigkeiten insbesondere bei der Kommunikation mit den Fahrzeugen im Gegenverkehr. Fahrzeuge auf der entgegengesetzten Fahrbahn können Nachrichten „mitnehmen“ und die Datenpakete an weit entfernte Fahrzeuge übermitteln, die sich einer Gefahrensituation erst noch nähern. Für einen entsprechenden Nachrichtenaustausch stehen dabei aber aufgrund der hohen Geschwindigkeiten nur wenige Sekunden zur Verfügung. Ohnehin sollte die Übertragung einzelner Nachrichten möglichst schnell erfolgen, um den Funkkanal nicht zu lange zu blockieren, da bei der großen Teilnehmerzahl mit vielen zu versendenden Datenpaketen gerechnet werden muss. Gleichzeitig muss die Modulationswertigkeit niedrig sein, um eine robuste Übertragung zu gewährleisten. Deshalb sind trotz kleiner Paketgrößen hohe Datenraten und somit viel Bandbreite für den Systementwurf erforderlich.

Für die Car-2-Car Kommunikation wurden daher in Europa und Amerika sieben Kanäle mit einer Bandbreite von jeweils 10 MHz im Frequenzbereich zwischen 5,855 GHz und 5,925 GHz reserviert [ETS08, ETS10, IEE12]. Breitbandige Funkkanäle stellen für Einträgerverfahren eine zusätzliche Herausforderung dar, weil sich aufgrund der Mehrwegeausbreitung im Empfänger viele Sendesymbole überlagern und somit aufwendige Entzerrer erforderlich sind. Mehrträgerverfahren umgehen dieses Problem durch längere Symbolauern auf den einzelnen Trägern. Sie leiden aber unter einer großen Signaldynamik, die zu sinkender Effizienz und höheren Hardwarepreisen führt.

Neben der Modulationstechnik stellt auch der Kanalzugriff eine technische Herausforderung dar, weil dieser ohne zentrale Instanz also selbstorganisierend erfolgen muss.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt:

- In Kapitel 2 werden einige grundsätzliche Eigenschaften des hier betrachteten Car-2-Car Systems beschrieben. Dabei wird auf die

Besonderheiten eines Kommunikationssystems eingegangen, welches auf Broadcast-Nachrichten basiert und infrastrukturlos arbeitet.

- Kapitel 3 beschreibt zunächst die grundlegenden Eigenschaften des Funkkanals und leitet ein charakteristisches Modell für die 10 MHz breiten Kanäle im Frequenzbereich zwischen 5,855 GHz und 5,925 GHz her. Auf Basis dieses Modells werden dann ein mögliches Einträger- und ein mögliches Mehrträgerverfahren ausgelegt und hinsichtlich ihrer Performanz bewertet.
- Das Kapitel 4 widmet sich dem Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) als Einträger-Modulationstechnik, welche auf das Kanalmodell aus Kapitel 3 angepasst wird. Hierbei kommt ein starker Entzerrer mit einer aufwändigen Kanalschätzung zum Einsatz. Leider zeigt sich, dass vor allem die Kanaldrift zu hohen Bitfehlerwahrscheinlichkeiten führt.
- In Kapitel 5 wird die Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) Übertragungstechnik als Mehrträger-Modulationstechnik eingeführt und auf die Bedingungen des Funkkanals aus Kapitel 3 angepasst. In Kombination mit der differentiellen Modulation kann hier das Problem der starken Kanaldrift überwunden werden.
- Kapitel 6 zeigt auf, warum die große Signaldynamik des OFDM-Signals ein Problem für einfache, kosteneffiziente Übertragungssysteme darstellt. Anschließend werden Verfahren zur Reduktion der Signaldynamik vorgestellt und auf die Eignung in einem solchen System untersucht.
- Die Ergebnisse zur Modulationstechnik werden in Kapitel 7 zusammengefasst und der favorisierte Systementwurf wird vorgestellt.
- Die Herausforderung des selbstorganisierenden Kanalzugriffs ist Gegenstand von Kapitel 8. Nach einer Einführung in die Begriffe der

Selbstorganisation werden der Kanalzugriff selbst und die Kontrolle der Kanalbelegung in einem Car-2-Car Netzwerk beschrieben.

Insgesamt haben die Untersuchungen in dieser Arbeit gezeigt, dass die OFDM Übertragungstechnik einige Vorteile gegenüber der GMSK Modulationstechnik besitzt. Auf die Details des Systementwurfs wird im Folgenden eingegangen.



Systembeschreibung

Die Sicherheit im Straßenverkehr konnte durch die Einführung verschiedener technischer Maßnahmen kontinuierlich gesteigert werden. Zur Sicherung der Fahrzeuginsassen bei einem Unfall wurden die Gurtpflicht und Airbag-Systeme eingeführt. Zur Vermeidung von Unfällen kamen das Anti-Blockiersystem (ABS), das Elektronische Stabilitätsprogramm (ESP), Radare zur Abstandswarnung und Überwachung des toten Winkels und Kameras mit Spurhaltesystemen hinzu. Diesen Assistenzsystemen ist gemein, dass sie Informationen über die passive Umgebung sammeln.

Mit der Car-2-Car Kommunikation sollen Fahrzeugführer oder Assistenzsysteme erstmals von anderen Teilnehmern oder Infrastrukturelementen aktiv vor Gefahren wie einem Stau gewarnt werden. Darüber hinaus sind mit dieser Technik auch Komfortfunktionen vorstellbar, wie zum Beispiel Informationen zu Ampelphasen, wodurch der Straßenverkehr effizienter gestaltet werden kann. Aber nicht nur Fahrer und Fahrzeuge können Senke der übertragenen Nachrichten und Datenpakete sein, auch die Infrastrukturelemente können auf bestimmte Nachrichten reagieren. Ampelsteuerungen können zum Beispiel die Ampeln bei einer Einsatzfahrt von Rettungsfahrzeugen so schalten, dass den Rettungsfahrzeugen freie Fahrt über die Kreuzung garantiert werden kann [SSR16].

Tabelle 2.1 zeigt verschiedene Anwendungen mit warnendem oder informierendem Charakter und die jeweilige Quelle, welche die entsprechenden Nachrichten unter der jeweiligen Bedingung aussenden soll. Alle aufgeführten Anwendungen haben einen starken räumlichen Bezug - die Infor-

| Warnung vor | Quelle | Bedingung |
|------------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| Stauende | Fahrzeug im Stau | Stillstand auf (Schnell-)Straße |
| Stark bremsendes Fahrzeug | Bremsendes Fahrzeug | Starke Betätigung des Bremspedals |
| Baustelle | Absperrtafel | (Spur-)Sperrung aktiv |
| Rettungsfahrzeug | Rettungsfahrzeug | Einsatzfahrt |

| Information über | Quelle | Bedingung |
|------------------|---------------|-----------|
| Ampelphase | Ampel | - |
| Straßenschild | Straßenschild | - |
| Freier Parkplatz | Parkautomat | - |

Tabelle 2.1: Anwendungen in einem Car-2-Car System zur Steigerung der Sicherheit

mationen sind vornehmlich in der lokalen Umgebung der Quelle relevant. Die ausgesendeten Nachrichten sollten sich deshalb nicht nur an einzelne Empfänger sondern prinzipiell an alle Teilnehmer in der lokalen Umgebung richten. Solche Nachrichten werden als Broadcast bezeichnet.

Hierin besteht bereits ein wichtiger Unterschied zu vielen bekannten drahtlosen Kommunikationssystemen wie das Global System for Mobile Communications (GSM), in dem Nachrichten von Teilnehmern in einem zellularen und flächendeckenden Netz zunächst immer an eine Basisstation übermittelt werden. Diese besitzt einzig eine Verbindung zum Zielnetzwerk also zum Beispiel das Internet oder das Telefonnetz. Nur in Ausnahmefällen sendet die Basisstation die Nachricht erneut aus, weil sie für einen einzigen Teilnehmer in derselben Umgebung bestimmt ist.

Aus Applikationssicht wird sofort klar, dass ein solches Vorgehen für ein Car-2-Car System nicht effizient sein kann. Möchte ein Fahrzeug einen Stau melden, müsste es dieselbe Nachricht immer und immer wieder mit

unterschiedlichen Zielempfängern an die Basisstation schicken, die ihrerseits die Nachrichten gleich wieder aussendet, weil alle adressierten Empfänger innerhalb der von ihr zu versorgenden Zelle liegen. Damit ein solches System überall dort verfügbar ist, wo Fahrzeuge aufeinandertreffen könnten, müsste außerdem ein flächendeckendes Netz an Funkzellen aufgebaut werden. Stattdessen kann für die Car-2-Car Kommunikation die natürliche Broadcast-Funktion der drahtlosen Kommunikation ausgenutzt werden. So werden drahtlos ausgesendete Nachrichten ohnehin von allen anderen Teilnehmern in der Umgebung, die dann durch das Ausbreitungsverhalten der elektromagnetischen Welle bestimmt wird, empfangen. Bei GSM oder im Wireless Local Area Network (W-LAN) wird durch Adressierungstechniken sichergestellt, dass nur relevante Nachrichten weiterverarbeitet werden. Eine solche Technik kann im Car-2-Car System entfallen, sodass mit einer einzigen Übertragung bereits eine Vielzahl relevanter Empfänger erreicht wird.

Da weder der Empfänger adressiert werden muss noch eine Identifizierung des Absenders notwendig ist, kann auf die Verwaltung von Adressen in dem Car-2-Car Netzwerk verzichtet werden. Damit entfällt auch die Notwendigkeit von Routingtabellen oder Topologieplänen, was aufgrund der großen Anzahl und Dynamik der Fahrzeuge mit den einhergehenden ständigen Änderungen der Topologie ein immens großer Vorteil ist.

Einige Kommunikationsteilnehmer werden periodisch neue Nachrichten erzeugen, so zum Beispiel ein Straßenschild, welches über die Höchstgeschwindigkeit von 70 km/h auf dem Streckenabschnitt informiert. Andere Anwendungen benötigen die in Tabelle 2.1 genannten Bedingungen, um neue Nachrichten zu erzeugen. Bei der Warnung vor einem stark bremsenden Fahrzeug wäre dies eine übermäßig starke Betätigung des Bremspedals in einem Fahrzeug. Abbildung 2.1 zeigt die dafür notwendige Schnittstelle zum Controller Area Network (CAN) Bus, über den fahrzeugintern kabelgebunden Daten zum Fahrzeugstatus, also insbesondere auch über das Bremsverhalten übertragen werden. Die CAN-Schnittstelle bietet darüber

hinaus die Möglichkeit, Erkenntnisse aus empfangenen Nachrichten an die Fahrerassistenzsysteme weiterzuleiten.

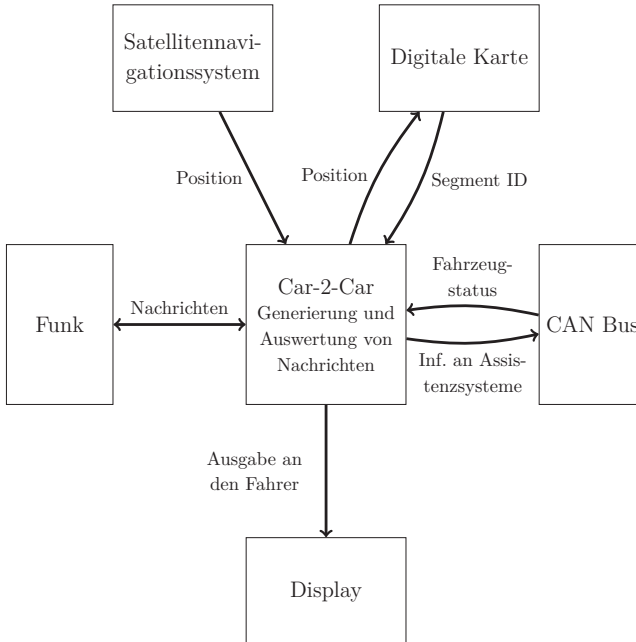


Abbildung 2.1: Systemkomponenten eines Car-2-Car Systems in einem Fahrzeug

In dem hier betrachteten Systemvorschlag empfängt jeder Teilnehmer sämtliche Nachrichten, die in seiner Umgebung gesendet und übertragen werden. Der Teilnehmer muss selbst überprüfen und entscheiden, welche Datenpakete und welche Nachrichten davon für ihn relevant sind. Dafür muss in jeder Nachricht neben der Erkenntnis selbst auch die entsprechende Position und die betroffene Fahrtrichtung enthalten sein. In Abbildung 2.1 ist dafür zum einen ein Satellitennavigationssystem wie zum Beispiel das