

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in drei Bereiche. Das erste Kapitel beschreibt zunächst den thematischen Hintergrund, formuliert die Fragestellung und gibt einen Überblick über die verwendeten Methoden. Im zweiten Bereich der Arbeit (Kapitel 2 bis 6) werden die Grundlagen sowie der Stand von Forschung und Technik im Bereich der V2X-Kommunikation erläutert. In dritten Bereich der Arbeit (Kapitel 7 bis 11) werden schließlich die Beschreibungen sowie die Ergebnisse der eigenen Untersuchungen zur hybriden Direktkommunikation in V2X-Netzen dargelegt.

1.1 Einordnung der Arbeit

Die Kommunikation von Fahrzeugen untereinander sowie die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und den stationären Anlagen als Teil einer kommunikativen Infrastruktur ermöglichen den Austausch von Informationen, die es dem jeweiligen Teilnehmer erlauben, ihr individuelles Wissen zu ergänzen und abzugleichen [10]. Für ein Fahrzeug ermöglicht die dadurch gewonnene Erweiterung des bisherigen Sensorumfeldes eine Verbesserung der Umgebungswahrnehmung. Konflikte mit anderen Verkehrsteilnehmern können so frühzeitiger erkannt und ggf. ausgeschlossen werden. Andererseits profitiert die Infrastruktur von einer ganzheitlichen Erfassung der Verkehrslage und erhält dadurch die Möglichkeit zu einer gezielten Verkehrsbeeinflussung [11].

Sowohl die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation (in der Literatur auch als Vehicle-to-Vehicle oder kurz V2V bezeichnet) als auch die Kommunikation zwischen den Fahrzeugen und der Infrastruktur (auch als Vehicle-to-Infrastructure oder V2I bezeichnet) verwenden dieselben Kommunikationstechnologien und bilden somit ein gemeinsames Netz. Die beiden Teilaspekte – V2V und V2I – werden deshalb auch gemeinsam als Vehicle-to-X (kurz: V2X) bezeichnet [12]. Alternativ zum Begriff V2X sind in europäischen Standards auch die Begriffe Car-to-X (bzw. C2X) und entsprechend Car-to-Car (C2C) bzw. Car-to-Infrastructure (C2I) gebräuchlich [10].

Aufgrund der Fahrzeuge, die als mobile Kommunikationsteilnehmer auftreten und die in der Kommunikationsarchitektur den überwiegenden Anteil der Endpunkte darstellen, ist das Gesamtnetz ständigen Veränderungen unterworfen. Die Teilnehmer nähern sich einander an und entfernen sich wieder voneinander. Die Relevanz für den wechselseitigen Austausch von Daten ist zeit- und ortsabhängig: Sie nimmt folglich zu und wieder ab. Ohne die Abhängigkeit von einer lokalen Infrastruktur bilden die Teilnehmer ein dynamisches, dezentrales Ad-hoc-Netz, das auch als Vehicular-Ad-hoc-Network (kurz VANET) bezeichnet wird [13].

Der Datenaustausch zwischen den Fahrzeugen einerseits und zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur andererseits stellt spezifische Anforderungen an die zu verwendenden Übertragungstechnologien [14]. Um einen zuverlässigen Informationsaustausch zu ermöglichen, der insbesondere bei der Nutzung von Informationen für sicherheitskritische Fahrfunktionen erforderlich ist, muss einerseits eine hinreichende Kommunikationsreichweite für eine ausreichende zeitliche und räumliche Vorausschau und andererseits eine für alle Teilnehmer geeignete Datenübertragungsrate gewährleistet sein [15][16]. Außerdem darf die Funktionalität des Netzes auch bei höheren Fahrzeug-Geschwindigkeiten nicht eingeschränkt sein [16]. Durch die Nutzung von Sicherheitsmechanismen – beispielsweise durch das Signieren

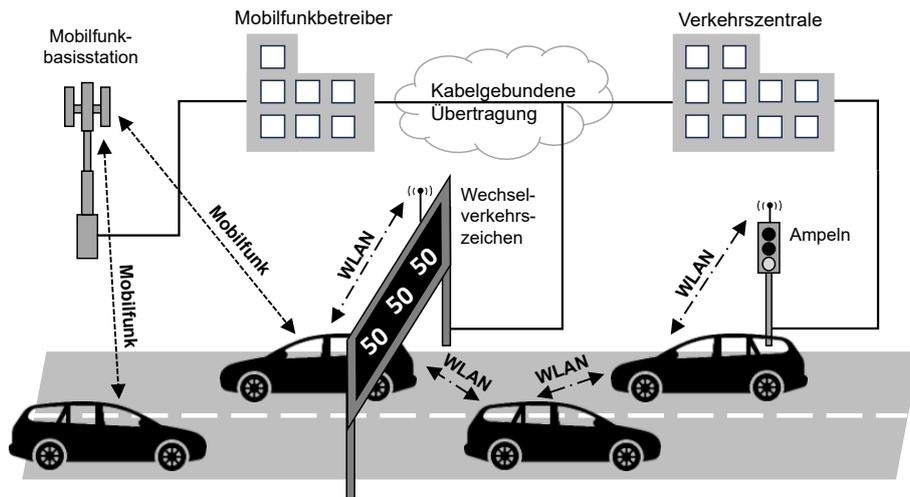


Abbildung 1: Übersicht über die bisherige Kommunikationsstruktur

und Authentifizieren von Nachrichten – muss zudem die Integrität der Inhalte sichergestellt werden, um eine missbräuchliche Verwendung zu unterbinden [17][18].

Bei der V2X-Kommunikation werden bislang hauptsächlich zwei Kommunikationstechnologien genutzt, die sowohl einzeln als auch kombiniert in unterschiedlichen Architekturansätzen eingesetzt werden. Der eine Ansatz präferiert eine WLAN-basierte direkte Kommunikation zwischen den Teilnehmern, während der andere Ansatz für die Datenübertragung mobilfunk-basierte Datendienste nutzt. Die bisher verwendete Struktur eines V2X-Netztes ist in der Abbildung 1 dargestellt. Dabei spielt die jeweilige Übertragungstechnologie – aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften – eine fest definierte Rolle: Die WLAN-basierte Technologie kommt in erster Linie für die direkte Kommunikation zwischen den Teilnehmern zum Einsatz, während die Anbindung an ein zentral-organisiertes Netz über Mobilfunk erfolgt.

Mittlerweile steht jedoch für den Mobilfunk eine Erweiterung zur Verfügung, die auch ohne die Notwendigkeit einer Infrastruktur einen direkten Informationsaustausch ermöglicht [19]. Diese erweiterte Technologie steht somit in direkter Konkurrenz zur WLAN-basierten Direktkommunikation.

1.2 Motivation und Ziele der Arbeit

Neben den Themen des automatisierten Fahrens und der Elektromobilität ist die Vernetzung von Fahrzeugen einer der Schwerpunkte in den aktuellen Entwicklungsbemühungen der Automobilindustrie [20][21]. Neben der Vernetzung des Fahrers (bzw. seiner Geräte) mit dem Fahrzeug wird dabei hauptsächlich die Kommunikation des Fahrzeugs nach außen betrachtet [20]. Durch den Informationsaustausch des Fahrzeugs mit seiner Umgebung bieten sich neue Möglichkeiten, durch die sich – neben der Effizienz und dem Fahrkomfort – vor allem auch die Sicherheit des Fahrzeugnutzers und der anderen Verkehrsteilnehmer erhöhen lassen [18]. Durch den Informationsaustausch mit anderen Fahrzeugen und mit stationären Kommunikationspartnern kann das begrenzte Sensorumfeld eines Fahrzeugs räumlich erweitert und inhaltlich ergänzt werden [18]. Durch die Auswertung eines ak-

tuellen und vollständigen Umfeldmodells des Fahrzeugs kann der Fahrer frühzeitig vor drohenden Gefahren gewarnt werden, wodurch sich Unfälle vermeiden lassen [22]. Diese Informationen können auch von den Fahrerassistenzsystemen und von den automatisierten Fahrfunktionen ausgewertet werden, um rechtzeitig drohende Konflikte zu erkennen und sie möglichst zu vermeiden [22].

Gegenwärtig sind in Europa nur wenige Fahrzeuge auf dem Markt, die herstellerunabhängig über einen einheitlichen Kommunikationsstandard Informationen austauschen können [23]. Für die Automobilhersteller ist ein solcher Kommunikationsweg jedoch eine grundlegende Voraussetzung für die Einführung von hochautomatisierten Fahrfunktionen [14]. Der zeitnahe Informationsaustausch zwischen den Fahrzeugen ist unter anderem für die Absprache von Fahrmanövern unabdingbar [14]. Automatisierte Fahrzeuge müssen ihre jeweiligen Intentionen mit den anderen Verkehrsteilnehmern abstimmen können, um einen möglichst reibungslosen Verkehrsfluss zu realisieren.

Es gibt bereits einen spezifischen WLAN-Standard für die V2X-Kommunikation und für die nachgelagerten standardisierten Protokolle. Damit ist bereits eine Technologie für den herstellerübergreifenden Informationsaustausch vorhanden, die schon im Rahmen mehrerer Forschungsprojekte untersucht und bewertet worden ist [14][24]. Die Untersuchungen zeigen jedoch, dass es bei einer hohen Marktdurchdringung und bei einer großen Anzahl von Verkehrsteilnehmern in einer Region – insbesondere im urbanen Raum – infolge einer Überlastung des Kommunikationskanals durchaus zu Problemen kommen kann, die eine sichere Übertragung von Informationen gefährden [25]. Außerdem hat sich gezeigt, dass in bestimmten Anwendungsfällen und in spezifischen Situationen die Übertragungreichweite zu gering ist, um alle betroffenen Empfänger zu informieren. Die WLAN-basierte Kommunikation bildet jedoch auf Grund ihrer Vorzüge – der geringen Latenzen und der Unabhängigkeit von Basisstationen der Mobilfunkbetreiber – die zentrale Komponente der sicherheitskritischen Nahbereichs-Kommunikation zwischen den Verkehrsteilnehmern [10][14]. Auch die Betreiber der Verkehrsinfrastruktur setzen auf diese Technologie. In mehreren europäischen Ländern werden bereits Verkehrsleiteinrichtungen und Baustellenwarnanlagen mit derartigen Funksystemen ausgerüstet [14].

Mit den Weiterentwicklungen im Bereich der Mobilfunkstandards ergeben sich neue Möglichkeiten, auch den Mobilfunk für die direkte V2X-Kommunikation zu nutzen [14]. Eine infrastrukturlose, direkte und serviceorientierte Kommunikation kann – analog zur WLAN-basierten V2X-Kommunikation – niedrigere Latenzen ermöglichen [26].

Durch diese Weiterentwicklungen wird der Mobilfunk zu einer potenziellen Technologie, die geeignet erscheint, bei der Nahbereichs-Kommunikation einerseits zwischen den Fahrzeugen und andererseits zwischen den Fahrzeugen und der Infrastruktur als Ergänzung, als Unterstützung oder als Rückfallebene für die WLAN-basierte direkte Kommunikation zu dienen [14]. Dabei ist – neben ihrer prinzipiellen Eignung hinsichtlich Reichweite, Latenzen und Datendurchsatz – auch ihr Verhalten im mobilen Einsatz von Interesse [14].

Durch eine Kombination der beiden Übertragungstechnologien zu einem hybriden Netz sollen die jeweiligen Vorzüge dieser Technologien ausgenutzt werden, um bei der Übertragung sicherheitsrelevanter Informationen die Zuverlässigkeit zu verbessern.

In hochmobilen Ad-hoc-Netzen, bei denen mit ständig wechselnden Teilnehmern zu rechnen ist, kommt es insbesondere auf eine situationsabhängige Organisation des Informationsflusses an.

Eine weitere Herausforderung besteht in der Lenkung des Informationsflusses über die beiden Kommunikationstechnologien, um trotz einer Überlast eines der beiden Kanäle dennoch eine sichere Datenübertragung zu gewährleisten.

Der hybride Einsatz beider Technologien bedeutet jedoch keine reine Redundanz zur Erhöhung der Übertragungssicherheit. Jede der beiden Technologie hat spezifische Vorteile, die in konstruktiver Weise miteinander kombiniert werden können, um die Verfügbarkeit von sicherheitskritischen Informationen zu verbessern. Durch die Realisierung der Konzepte zur dynamischen und situativen Anpassung und Verteilung des Datenflusses sollen Informationen über Gefahrenstellen und mögliche Konflikte zwischen den Verkehrsteilnehmern zuverlässig verbreitet werden, um dadurch die Verkehrssicherheit zu erhöhen.

1.3 Forschungsfragen

Durch die vorliegende Arbeit soll im Kern die Frage beantwortet werden, in welcher Weise die aktuell verfügbaren Übertragungstechnologien der V2X-Kommunikation in einer solchen Kombination eingesetzt werden können, dass sie den Anforderungen sicherheitskritischer Anwendungen hinsichtlich einer zuverlässigen Informationsverbreitung besser gerecht werden. Daraus leiten sich die Forschungsfragen ab, die die Konzepte zur Umsetzung und die Rahmenbedingungen einschließen:

1. Wie können geeignete Modelle aussehen, um das Übertragungsverhalten der eingesetzten Technologien zu beschreiben? Für die Untersuchung der hybriden V2X-Netze werden Übertragungsmodelle benötigt, die die individuellen Eigenschaften der Technologien abbilden, so dass sich sinnvolle Möglichkeiten zu deren Kombination ermitteln lassen.
2. Wie können Konzepte aussehen, um einen hybriden Betrieb unterschiedlicher Übertragungstechnologien in einem gemeinsamen V2X-Netz zu realisieren? Die Eigenschaften der Kommunikationstechnologien sollen konstruktiv kombiniert werden, um die Zuverlässigkeit bei der Verbreitung sicherheitskritischer Informationen zu verbessern.
3. Welche Rolle spielen die Ausstattungsraten der Verkehrsteilnehmer mit den unterschiedlichen Übertragungstechnologien? Die Ausstattung der Verkehrsteilnehmer mit einer entsprechenden Übertragungstechnologie ist die Voraussetzung für eine zuverlässige Informationsverbreitung in einem hybriden Netz.
4. Wie kann die Verteilung der Kommunikationslast über die unterschiedlichen Technologien erfolgen? Bei der Verwendung unterschiedlicher Übertragungstechnologien innerhalb eines hybriden Netzes ergibt sich zwangsläufig eine Aufteilung der Kommunikation. Die Verteilung der Last kann einen direkten Einfluss auf die Übertragungseigenschaften haben.
5. Welchen Einfluss haben die unterschiedlichen Frequenzbereiche auf die Ergebnisse der Untersuchungen? Mit unterschiedlichen Übertragungstechnologien ergeben sich auch Möglichkeiten, die Kommunikation in unterschiedlichen Frequenzbereichen durchzuführen, was die Übertragungseigenschaften beeinflussen kann.
6. Wie lässt sich die Einbindung von vulnerablen Verkehrsteilnehmern, wie z.B. Fußgängern oder Radfahrern, durch den Einsatz hybrider V2X-Netze verbessern? Bisher war die direkte Einbindung von nicht-motorisierten Verkehrsteilnehmern nicht ohne

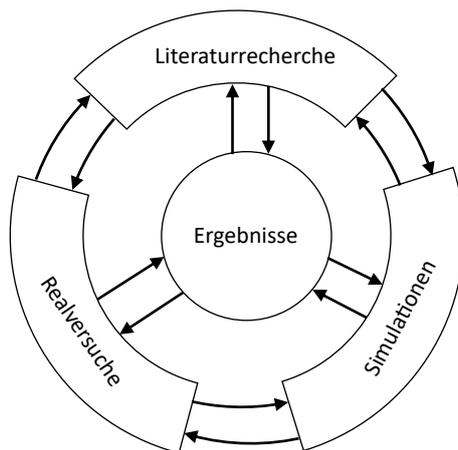


Abbildung 2: Verwendeter multi-methodischer Ansatz

weiteres möglich, da Mobiltelefone, als übliche Endgeräte zu Kommunikation mit solchen Verkehrsteilnehmern, nicht den für die V2X-Kommunikation vorgesehenen Frequenzbereich unterstützen.

1.4 Methodik und Vorgehen

Für die Untersuchung dieser Forschungsfragen müssen Methoden gefunden werden, die dazu geeignet sind, belastbare Antworten zu liefern. Diese Methoden müssen einerseits in einem angemessenen und definierbaren Zeitrahmen zu Ergebnissen führen und müssen andererseits den wissenschaftlichen Standards entsprechen.

In der vorliegenden Arbeit wurde ein multi-methodischer Ansatz gewählt, der sowohl auf Literaturrecherchen als auch auf empirischen Untersuchungsmethoden basiert [27] (siehe Abbildung 2).

Zu Beginn der Untersuchung wurde eine Anforderungsanalyse durchgeführt, um zu ergründen, welchen Systemeigenschaften und Rahmenbedingungen die einzelnen Kommunikationstechnologien gerecht werden müssen. Insbesondere sollte ermittelt werden, welche zeitliche und räumliche Vorausschau für ein gegebenes Verkehrsumfeld erforderlich ist, um durch einen Informationsaustausch kritische Fahrsituationen zu vermeiden. Diese Analyse erfolgte durch Literaturrecherchen zu den Regularien im Straßenverkehrswesen einerseits und zu vorangegangenen wissenschaftlichen Arbeiten und Forschungsprojekten andererseits.

Parallel zu dieser Anforderungsanalyse wurden die technischen und strukturellen Eigenschaften der potenziellen Kommunikationstechnologien ermittelt. Auch das erfolgte durch Literaturrecherchen zu den vorhandenen Standards und Spezifikationen einerseits und zu bereits veröffentlichten Forschungsergebnissen andererseits. Darüber hinaus wurden eigene Messungen durchgeführt, um unter identischen Rahmenbedingungen die einzelnen Übertragungstechnologien für die V2X-Kommunikation und deren Eigenschaften direkt miteinander vergleichen zu können.

Durch eine Analyse der Anforderungen und der Eigenschaften der Technologien wurden Konzepte entwickelt, die es ermöglichen sollen, die Verfügbarkeit von Informationen zu

verbessern und – bei Bedarf – die anfallende Kommunikationslast auf WLAN und Mobilfunk aufzuteilen mit dem Ziel, dadurch eine hybride Kommunikation zu organisieren und sie dynamisch anzupassen. Hierbei muss unter anderem betrachtet werden, wie eine Lastüberwachung, eine Erfassung der Kommunikationspartner und deren Eigenschaften sowie der Verbindungsaufbau und -abbau realisiert werden können, um einen zuverlässigen Informationsaustausch zu gewährleisten. Dabei war auch eine zielgerichtete Priorisierung von Nachrichten und Inhalten zu berücksichtigen.

Um die Realisierbarkeit der entwickelten Konzepte prüfen zu können und um deren Eigenschaften und Verhalten im verkehrlichen Umfeld beurteilen zu können, wurde eine geeignete Simulationsumgebung aufgebaut. Sie bietet die Möglichkeit, eine kritische Anzahl von Verkehrsteilnehmern mit ihrem Kommunikationsaufkommen realitätsnah abzubilden. Hierzu werden mehrere eigenständige Simulationsumgebungen im Verbund eingesetzt, um alle notwendigen Teilaspekte in dem geforderten Detailierungsgrad darstellen zu können. So werden Simulationswerkzeuge zur Verkehrsmodellierung mit Werkzeugen für die Simulation von drahtlosen Netzwerken kombiniert. Die Konzepte wurden zur Simulation auf konkrete und aussagekräftige Szenarien übertragen.

Die aus jeder Untersuchungsmethode (Literaturrecherche, Messung und Simulation) gewonnenen Ergebnisse wurden jeweils als Input für die nächste Untersuchungsmethode verwendet. Beispielsweise wurde aus den Ergebnissen der Literaturrecherche eine erste Simulationsumgebung erstellt. Die bisher bekannten und für die Simulation verwendeten Modelle für die Verbreitung von Nachrichten konnten jedoch nicht unreflektiert auf die Szenarien der hybriden V2X-Kommunikation angewendet werden. Eigene Messungen im realen Verkehrsumfeld dienten dazu, die bestehenden Modelle zu evaluieren und neue, besser geeignete, Modelle zu finden, die dann in der nächsten Stufe der Simulation für komplexe Szenarien mit einer Vielzahl an Verkehrsteilnehmern angewendet werden konnten.

Die einzelnen Untersuchungsmethoden wurden so lange im Verbund angewendet, bis entweder die Forschungsfragen hinreichend gut beantwortet werden konnten oder aber ihr Potenzial zum Erkenntnisgewinn erschöpft war.

1.5 Bedeutung des Vorhabens

Eine maßgebliche Herausforderung für ein VANET besteht in der Realisierung einer zuverlässigen Informationsverbreitung trotz einer verbindungslosen Übertragung zwischen hochmobilen Teilnehmern, bei der nur bedingt festgestellt werden kann, ob die Informationen tatsächlich alle adressierten Empfänger erreichen. Umso wichtiger ist es – insbesondere für sicherheitskritische Anwendungsfälle –, solche Übertragungstechnologien zu etablieren, die ein hohes Maß an Zuverlässigkeit bei der Übertragung ermöglichen.

Bei einem zunehmenden Abstand zwischen Sender und Empfänger und bei Hindernissen auf dem Übertragungsweg sinkt die Rate der erfolgreich übertragenen Nachrichten und damit auch die Zuverlässigkeit der Übertragung.

Deshalb setzt die V2X-Kommunikation auf das zyklische Versenden der Nachrichten. Falls eine Nachricht den Empfänger nicht erreicht, besteht so immerhin die Möglichkeit, dass er eine der darauffolgenden Nachrichten erhält und ihr die benötigten Informationen entnehmen kann. Je größer die Anzahl der fehlgeschlagenen Übertragungsversuche ist, desto länger wird die Verzögerung bis hin zu einem gänzlich erfolglosen Kommunikationsversuch. Sicherheitskritische Anwendungsfälle, in denen Konflikte zwischen Verkehrsteilneh-

mern vermieden werden sollen, sind auch in der Regel zeitkritisch, sodass Verzögerungen bei der Kommunikation ein gewichtiges Problem darstellen.

Die Erhöhung der Zuverlässigkeit der Kommunikation ist somit ein zentrales Ziel, um die Funktionalität der sicherheitskritischen Anwendungen zur Konflikt- und Kollisionsvermeidung zu verbessern und damit auch die Akzeptanz der Nutzer zu erhöhen. Eine verbesserte Zuverlässigkeit ist auch eine Voraussetzung für den Einsatz künftiger automatisierter Fahrfunktionen, die ebenfalls als sicherheitskritische Funktionen anzusehen sind.

Die aktuell verfügbaren Übertragungstechnologien für die direkte V2X-Kommunikation wurden bereits hinsichtlich ihrer Eignung in konkreten Szenarien untersucht. Dabei zeigten sich in ihren Übertragungseigenschaften – trotz der identischen Ausrichtung auf ein konkretes Aufgabengebiet – dennoch technologiespezifische Unterschiede [28][29][26][30][31][32][22][33][34]. Diese Unterschiede führen zu individuellen Vor- bzw. Nachteilen hinsichtlich der Anforderungen in den sicherheitsrelevanten Anwendungsfällen. Damit ergibt sich ein Potenzial für eine zweckvolle und konstruktive Kombination der einzelnen Technologien zu einem gemeinsamen hybriden V2X-Netz. Durch den hybriden Einsatz verschiedener Übertragungstechnologien soll die Zuverlässigkeit eines V2X-Netzes erhöht werden, weil die Schwächen der einen Technologie durch die Stärken der anderen kompensiert werden.

Dem Ansatz einer Kombination beider Technologien zur Direktkommunikation, die dieselben Anwendungsfälle abdecken, wurde bisher jedoch kaum Aufmerksamkeit geschenkt. Die bisherigen Untersuchungen zu heterogenen Netzen für die V2X-Kommunikation haben lediglich hierarchische Ansätze verfolgt, bei denen die jeweilige Technologie eine konkrete vordefinierte Rolle übernimmt (siehe Abbildung 1). Diese Ansätze werden im Abschnitt 6.1 beschrieben.

In den bisherigen Untersuchungen zur Nutzung verschiedener Technologien für die Direktkommunikation in einem gemeinsamen Gebiet wurde ihr Einsatz in erster Linie nur unter dem Aspekt der Interoperabilität betrachtet [35][36][37]. In diesen Fällen wurden die Technologien parallel, jedoch nicht in einer gemeinsamen Netzarchitektur angewendet. Der Fokus lag dabei auf der Untersuchung der wechselseitigen Beeinflussung bei der Übertragung, jedoch nicht auf einer konstruktiven wechselseitigen Ergänzung.

Durch die Entscheidung, WLAN zunächst als Basis für die V2X-Kommunikation in Europa einzusetzen, und durch die mittlerweile steigende Anzahl von Mobilfunkanbindungen in den Fahrzeugen – beispielsweise für Infotainment-Anwendungen oder eCall – ist künftig mit einer Verbreitung beider Technologien zu rechnen [14][38]. Jedoch werden nicht immer alle Fahrzeuge beide Kommunikationswege unterstützen.

Die Herausforderung besteht also darin, die Kommunikationspartner technologieübergreifend zu identifizieren und die Informationsverbreitung in einem Netz aus beweglichen und wechselnden Teilnehmern zu organisieren. Neben den Eigenschaften der einzelnen Übertragungstechnologien und der Größe des Netzes müssen auch die Anforderungen des jeweiligen Anwendungsfalls berücksichtigt werden: Sie haben u.a. einen Einfluss auf das erforderliche Verbreitungsgebiet und auf die tolerierbaren Latenzzeiten. Im Umfeld der selbstorganisierten Ressourcenzuordnung der mobilfunkbasierten Direktkommunikation soll u.a. untersucht werden, wie sich dieser Modus mit einer Vielzahl ständig wechselnder Kommunikationspartner realisieren lässt.

Die nachfolgenden Kapitel beschäftigen sich zunächst mit den Eigenschaften und der grundlegenden Struktur von V2X-Netzen (Kapitel 2) sowie mit den Anforderungen der sicherheitskritischen Anwendungen an die eingesetzten Übertragungstechnologien (Kapitel 3).

Diesen Anforderungen werden die Herausforderungen gegenübergestellt, die bei der drahtlosen Übertragung in hochmobilen Netzen auftreten (Kapitel 4). Im Kapitel 5 werden die künftigen Übertragungstechnologien mit ihren Eigenschaften beschrieben.

Im Kapitel 6 wird der aktuelle Stand der Forschung auf dem Gebiet der hybriden V2X-Netze diskutiert, bevor schließlich in den darauffolgenden Kapiteln der eigene Beitrag zu diesem Themengebiet vorgestellt wird.

Die Messungen sowie die Ergebnisse der Übertragungseigenschaften der in der vorliegenden Arbeit betrachteten Technologien im realen Verkehrsraum werden im Kapitel 7 beschrieben. Die Darlegung der aus den Messergebnissen abgeleiteten Übertragungsmodelle bildet den Gegenstand des Kapitels 8. Aus den Ergebnissen der Messungen und der Modellbildung konnten konkrete Konzepte für den Einsatz der Übertragungstechnologien im hybriden V2X-Netz abgeleitet werden (Kapitel 9). Für die Untersuchung dieser Konzepte in den verschiedensten Szenarien wurde eine Simulationsumgebung erstellt, deren Aufbau und Funktion im Kapitel 10 beschrieben wird. Die Ergebnisse der Simulationen zu den verschiedenen hybriden Konzepten werden schließlich in Kapitel 11 vorgestellt.

Den Abschluss der vorliegenden Arbeit bilden eine Zusammenfassung (Kapitel 12) und ein Fazit (Kapitel 13).

2 Vernetzung von Verkehrsteilnehmern

Die Mobilität ist seit jeher ein wichtiger Aspekt in der Entwicklung einer Gesellschaft und in deren ökonomischen Fortschritt. Die Möglichkeiten, mit den jeweils zur Verfügung stehenden Verkehrsmitteln Personen und Waren zeitnah und sicher durch den Verkehrsraum zu bewegen, sind durch eine ständige Weiterentwicklung geprägt. Der auf dem Landweg zur Verfügung stehende Verkehrsraum wird durch das über einen langen Zeitraum hinweg gewachsene Netz an Verkehrsinfrastruktur bestimmt. Eine Erweiterung dieser Infrastruktur mit dem Ziel, den aktuellen Anforderungen an die Mobilität bei einem wachsenden Verkehrsaufkommen gerecht zu werden, ist aufgrund der räumlichen Begebenheiten nur bedingt möglich und erfordert außerdem hohe Investitionen [39].

Daraus ergibt sich die Anforderung, die zur Verfügung stehenden Kapazitäten der Verkehrsinfrastruktur im Rahmen der begrenzten organisatorischen und technischen Möglichkeiten bestmöglich zu nutzen. Beispielsweise ist der Verzicht auf den Individualverkehr oder zumindest dessen Einschränkung zu Gunsten des öffentlichen Personennahverkehrs ein Ansatz, durch den der Verkehrsraum besser ausgenutzt werden kann. Dieser Ansatz lässt sich jedoch nur punktuell realisieren. Außerdem erfasst er auch nur einen Teil des gesamten Verkehrsaufkommens. Gerade in einem exportorientierten Land – wie Deutschland – gewinnt ein reibungsloser Warenverkehr eine markante wirtschaftliche Bedeutung. Aufgrund seiner zentralen Position in Europa gewinnt Deutschland zudem eine große Bedeutung für den Durchgangsverkehr und als ein Umschlagplatz für Waren. Die Grundvoraussetzung dafür ist eine leistungsstarke Verkehrsinfrastruktur.

Die drahtlose Übertragung von Informationen zwischen Verkehrsteilnehmern, die den Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit bildet, bietet die Möglichkeit, mobile Systeme im Verkehrsumfeld miteinander zu vernetzen und zahlreiche Anwendungsfälle zu bedienen, wodurch sich die Mobilität der Verkehrsteilnehmer verbessern lässt.

2.1 Grundsätzliche Zielsetzung

Um im Zusammenspiel der einzelnen Verkehrsteilnehmer eine große Wirkung zu erreichen, müssen diese sowohl individuell als auch in ihrer Gesamtheit von der wechselseitigen Kommunikation profitieren. Das lässt sich erreichen, indem die Verkehrsteilnehmer ihr individuelles Wissen mit ihren Kommunikationspartnern teilen und auf diese Weise allen Beteiligten eine verbesserte Wahrnehmung des Verkehrsumfeldes ermöglichen.

Die gegenwärtig verfügbaren Fahrzeuge besitzen eine Vielzahl von Sensoren, die sowohl den Zustand des Fahrzeugs als auch sein direktes Umfeld registrieren können. Diese Sensoren stellen die Informationsbasis des individuellen Fahrzeugs bereit, die potenziell für die Weitergabe an andere Verkehrsteilnehmer genutzt werden kann [40].

Für die Eigenwahrnehmung stehen dem Fahrzeug beispielsweise Beschleunigungs- und Drehratensensoren zur Verfügung, mit denen die Fahrdynamik erfasst werden kann [41]. Satellitengestützte Lokalisierungssysteme – wie beispielsweise GPS – ermöglichen die globale Positionsbestimmung des Fahrzeugs. Gemeinsam mit weiteren Sensoren – beispielsweise mit einem Lenkwinkelsensor und einem Raddrehzahlsensor – kann das Fahrzeug sein Bewegungsprofil im Raum erfassen [42].

Die Umgebung des Fahrzeugs wird durch Radarsensoren, Kameras oder Ultraschallsensoren überwacht [40]. Dabei verfügt jede Art von Sensoren über individuelle Eigenschaften

bezüglich der Reichweite, des Sichtbereichs und der Art der Wahrnehmung. Deshalb werden häufig unterschiedliche Sensoren gemeinsam verwendet. So lassen sich beispielsweise mit Radarsensoren Objekte in ihrer Bewegung gut erfassen, während Kameras auch Spurmarkierungen und Verkehrsschilder erkennen können. Neben dem Erfassungsbereich und der Art der wahrnehmbaren Umgebungsbedingungen unterscheiden sich die einzelnen Sensoren auch hinsichtlich ihrer zeitlichen und räumlichen Auflösung, wodurch die Qualität der von den Sensoren bereitgestellten Informationen zusätzlich beeinflusst wird [40].

Neben den technischen Systemen zur Wahrnehmung des Umfeldes sind natürlich auch die menschlichen Verkehrsteilnehmer – die Fußgänger, die Radfahrer sowie die Fahrer der Fahrzeuge – in der Lage, die Umgebung wahrzunehmen und dadurch die Informationsbasis zu erweitern, sofern es eine Schnittstelle gibt, über die sie ihr Wissen weitergeben können [43].

Aufgrund der eingeschränkten eigenen Wahrnehmung des Umfeldes im Verkehrsraum hinsichtlich der Reichweite, des Erfassungsbereichs und der Art der Erfassung ergibt sich die Notwendigkeit einer Erweiterung der individuellen Informationsbasis durch die Kommunikation mit anderen Verkehrsteilnehmern.

Da die Informationen, die ein Verkehrsteilnehmer anderen Verkehrsteilnehmern zur Erweiterung ihres Wissens zur Verfügung stellen kann, auf der Informationsbasis beruhen, die er durch die eigenen Mittel zur Wahrnehmung ermittelt hat, hängt letztlich auch die Qualität der weitergegebenen Informationen von der Qualität der eigenen Wahrnehmung ab. Der Empfänger potenzieller Informationen kann sie nur dann zur Erweiterung der eigenen Wahrnehmung nutzen, wenn diese Informationen die eigene Informationsbasis konstruktiv ergänzen und sie dadurch zu einem konsistenten Gesamtbild beitragen.

Die infolge des Informationsaustausches mit anderen Verkehrsteilnehmern erweiterte Wahrnehmung der Umgebungssituation können verschiedene Arten von Assistenzsystemen dazu nutzen, die Verkehrsteilnehmer bei ihrer Bewegung durch den Verkehrsraum zu unterstützen.

Die Assistenzsysteme im Bereich der Mobilität verfolgen drei zentrale Ziele, die auch für die Vernetzung von Verkehrsteilnehmern, als Informationsquelle dieser Assistenzsysteme, gelten.

Das erste und wichtigste Ziel ist die Erhöhung der Verkehrssicherheit. Im Ergebnis des Austauschs von Informationen und der dadurch verbesserten Umfeldwahrnehmung sollen die Verkehrsteilnehmer frühzeitiger und gezielter auf potenzielle Konfliktsituationen aufmerksam werden, um sie nach Möglichkeit zu verhindern. Dabei steht die Vermeidung – oder wenigstens die Verminderung – von Sach- und vor allem von Personenschäden im Vordergrund, wodurch dieses Ziel an die erste Stelle rückt [44].

Das zweite Ziel ist die Steigerung der Verkehrseffizienz. Der zur Verfügung stehende Verkehrsraum ist begrenzt, sodass eine wachsende Herausforderung darin besteht, für alle Verkehrsteilnehmer ausreichende Kapazitäten bereitzustellen, um einen reibungslosen Verkehrsfluss zu gewährleisten. Durch eine verbesserte Umfeldwahrnehmung lassen sich die zur Verfügung stehenden Verkehrsräume gezielter nutzen, weil die Verkehrsteilnehmer dadurch eine erweiterte Übersicht über die jeweilige Verkehrssituation erhalten. Das macht es möglich, die verfügbaren Kapazitäten zu erkennen und zu nutzen.

Das dritte Ziel ist die Steigerung des Nutzerkomforts. Auch wenn die Bewegung eines Verkehrsteilnehmers durch den Verkehrsraum einem konkreten Zweck dient, sollte er sie doch

möglichst stressfrei und komfortabel absolvieren können. Eine erweiterte Informationsbasis kann auch dazu beitragen, den optimalen Weg durch den Verkehrsraum zu ermitteln, um den Verkehrsteilnehmer zügig und entspannt an sein Ziel zu führen.

In der Praxis sind alle drei Ziele miteinander verwoben, weil die Erreichung des einen Ziels auch die anderen Ziele beeinflussen kann. So lässt sich beispielsweise durch eine Erhöhung der Verkehrssicherheit oder der Verkehrseffizienz auch der Nutzerkomfort steigern.

2.2 Einordnung der Begriffe

Im Rahmen der Architektur der V2X-Kommunikation sind Übertragungen zwischen verschiedenen Typen von Teilnehmern vorgesehen. Die einzelnen Teilnehmer unterscheiden sich sowohl hinsichtlich ihrer Eigenschaften als Verkehrsteilnehmer als auch hinsichtlich ihrer Kommunikationsmöglichkeiten und Übertragungswege [14].

Die in der vorliegenden Arbeit betrachteten Netze beinhalten hauptsächlich mobile Teilnehmer, sie können aber auch stationäre Komponenten und eine an sie angebundene Backend-Architektur enthalten. Das Gesamtnetz lässt sich somit in einen Funknetzwerkanteil und einen Backendnetzwerkanteil aufteilen, wobei nur das Funknetzwerk in jedem Fall erforderlich ist. Die V2X-Netze können im Hinblick auf die beteiligten Kommunikationspartner in die folgenden vier Gruppen unterteilt werden:

- V2V – Die Vehicle-to-Vehicle-Kommunikation beinhaltet den direkten Informationsaustausch zwischen den motorisierten Verkehrsteilnehmern. Sie bilden die Knoten in einem dynamischen Ad-hoc-Netzwerk, das aufgrund der eingeschränkten Reichweite der verwendeten Funkübertragungstechnologie lokal auf ein bestimmtes Gebiet begrenzt ist [14].
- V2I – Die Vehicle-to-Infrastructure-Kommunikation ermöglicht die Einbindung stationärer Knoten in die V2X-Kommunikation. Dabei handelt es sich in erster Linie um die verkehrstechnische Infrastruktur, die beispielsweise Ampelanlagen und Schilderbrücken enthält. Diese können auch den Zugang zu einem nachgeschalteten Backend ermöglichen [12].
- V2P – Die Personen, die an der Vehicle-to-Pedestrian-Kommunikation beteiligt sind, unterscheiden sich von den anderen Teilnehmern sowohl in ihren verkehrlichen als auch in ihren kommunikativen Eigenschaften [12]. Aus der Sicht des Straßenverkehrs handelt es sich bei ihnen um vulnerable Verkehrsteilnehmer (auch Vulnerable Road Users, VRU) – beispielsweise um Fußgänger und Radfahrer [45].
- V2N – Ein Netzwerk im Sinne der Vehicle-to-Network-Kommunikation ist eine öffentliche oder nicht-öffentliche Kommunikationsinfrastruktur, über die sich ein Verkehrsteilnehmer mit Knoten außerhalb der eigentlichen Verkehrsnetzwerk verbinden kann. Im Gegensatz zur V2I-Kommunikation stellen diese stationären Knoten keine eigenen Informationen bereit, sondern dienen lediglich als Gateway [12].

Für bestimmte Übertragungswege kommen spezifische Übertragungstechnologien zum Einsatz, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht wurden. Die Verbreitung einer Information über das Netz erfolgt nicht zwingend nur auf einem einzigen Übertragungsweg – beispielsweise von einem Fahrzeug zu einem anderen Fahrzeug –, sondern es können mehrere parallele oder serielle Übertragungsschritte erforderlich sein, bis die Information alle adressierten Empfänger erreicht hat. Unterschiedliche Teilaspekte der V2X-Kommunikation kön-