I

Einleitung

Der Innovationsprozess der Automobilindustrie trägt dem gestiegenen Bedürfnis nach komfortableren und vor allem sichereren Fahrzeugen deutlich Rechnung: Moderne Autos sind bereits seit längerer Zeit mit einer Vielzahl von passiven Sicherheitssystemen wie z.B. Sicherheitsgurten und Airbags ausgestattet, welche die Überlebenschancen der Fahrzeuginsassen nach einem Unfall deutlich erhöhen. So konnte die jährliche Zahl der Verkehrstoten in Deutschland von über 21.000 in den 70er Jahren bis heute auf unter 7.000 gesenkt werden, obgleich sich die Anzahl der zugelassenen Fahrzeuge seitdem von 14 Mio auf 45 Mio mehr als verdreifacht hat. Dennoch gilt die Teilnahme am Straßenverkehr weiterhin als eine der gefährlichsten Aktivitäten.

Neben dem Aspekt der Fahrersicherheit spielt die effektive Nutzung der vorhandenen Straßenkapazitäten eine wichtige Rolle: Zunehmend werden die Grenzen dieser Kapazitäten erkennbar, was sich vor allem in Form von täglichen Staus während der Hauptverkehrszeiten äußert.

Zur Steigerung von Sicherheit und Effizienz des Straßenverkehrs werden daher seit längerer Zeit aktive Fahrerassistenzsysteme entwickelt. Derartige Systeme zielen darauf ab, drohende Gefahren und Verkehrsbehinderungen rechtzeitig zu erkennen, um den Fahrer entsprechend frühzeitig zu warnen oder sogar durch einen aktiven Fahrzeugeingriff zu unterstützen. Die aktuelle Kenntnis des Fahrzeugumfelds ist hierfür eine notwendige Voraussetzung. Grundsätzlich sind hierbei drei verschiedene Strategien denkbar, wie diese Informationen ins Fahrzeug gelangen können:

- mittels einer bordinternen Umfeldsensorik (z.B. über Radar- oder Ultraschallsensoren),
- durch eine fest installierte Infrastruktur in Form von Sensoren entlang der Straße oder
- durch einen Datenaustausch zwischen den Fahrzeugen.

Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht ein System, bei dem die dritte Strategie verfolgt wird: Grundgedanke dabei ist, die Technik selbstorganisierender Funknetze für einen direkten Austausch von verkehrsrelevanten Informationen wie z.B. Position und Geschwindigkeit zwischen den Fahrzeugen zu nutzen, um ein dezentrales Echtzeit-Verkehrsinformationssystem mit der Bezeichnung SOTIS (Self-Organizing Traffic Information System) zu realisieren.

Selbstorganisierende Funknetze bieten für den Einsatz im Straßenverkehr eine große Anzahl von möglichen Anwendungen. Durch die direkte und nahezu verzögerungsfreie Datenübertragung können Fahrzeuge in einer aktiven und kooperativen Form mit anderen Verkehrsteilnehmern auch in größerer Entfernung interagieren. Hieraus ergibt sich der entscheidende Vorteil, dass sich der Fahrer rechtzeitig auf eine kritische Situation einstellen kann, lange bevor eine Erfassung der Situation durch passive Sensoren bzw. den Fahrer selbst möglich ist.

Eine der charakteristischen Eigenschaften selbstorganisierender Funknetze ist, dass sie auf keinerlei bestehende Netzinfrastruktur angewiesen sind. Gegenüber Systemen, die auf einer Verkehrsdatenerfassung über fest installierte Sensoren entlang der Straße basieren, kann somit auf kostenintensive, ortsfeste Elemente zur Datenerfassung und -übertragung verzichtet werden. Dieser Vorteil kann ebenfalls genutzt werden, um neben fahrzeugrelevanten Anwendungen zur Erhöhung der Sicherheit und des Komforts im Straßenverkehr auch bidirektionale Kommunikationsanwendungen ohne aufwendige Netzinfrastruktur zu realisieren.

Selbstorganisierende Funknetze sind zwar unabhängig von einer bestehenden Infrastruktur, jedoch nicht vom Vorhandensein anderer Mobilstationen in Funkreichweite. Falls beispielsweise eine Multihop-Verbindung über eine die Funkreichweite übersteigende Entfernung aufgebaut werden soll, ist eine unterbrechungsfreie Kette von Zwischenstationen zum entsprechenden Kommunikationspartner notwendig. Derartige Kommunikationsanwendungen sind somit erst bei einem vergleichsweise großen Anteil ausgestatteter Fahrzeuge realisierbar, da erst dann notwendige Funkpartner mit einer ausreichend hohen Wahrscheinlichkeit zur Verfügung stehen.

Die Basis der vorliegenden Arbeit bildet die verkehrsrelevante Anwendung SOTIS, welche bereits dann einen deutlichen Mehrwert für den Fahrer bieten soll, wenn nur ein sehr geringer Anteil aller Fahrzeuge mit einem entsprechenden System ausgestattet ist. Hierfür müssen geeignete Mechanismen der Informationsverbreitung entwickelt werden, die eine robuste Verbreitung von Verkehrsinformation auch dann gewährleisten können, wenn keine unterbrechungsfreie Kette von Zwischenstationen zur Weiterleitung von Datenpaketen existiert.

Ein wichtiger technischer Aspekt ist der Entwurf geeigneter Verfahren für den Zugriff auf das von den Teilnehmern gemeinsam genutzte Funkmedium. Da keinerlei feste Infrastruktur in Form von Basisstationen vorausgesetzt wird, muss die Organisation des Medienzugriffs in autonomer Form durch die Teilnehmer erfolgen. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass sich die Topologie des Netzes aufgrund der hohen Mobilität der Fahrzeuge in kürzester Zeit vollständig ändern kann. Die quantitative Untersuchung der Leistungsfähigkeit verschiedener bekannter sowie eines erweiterten Mehrfachzugriffsverfahrens vor dem Hintergrund der Anwendung SOTIS bildet einen wesentlichen Bestandteil dieser Arbeit.

Falls der Medienzugriff durch ein synchrones Verfahren realisiert wird, darf die Aussendung eines Teilnehmers nicht zu jedem beliebigen Zeitpunkt beginnen, sondern jeweils nur am Anfang eines Zeitschlitzes. Um das hierfür notwendige, gemeinsame Zeitraster zwischen Funkpartnern herzustellen, ist eine Zeitsynchronisation der Teilnehmer erforderlich. Für diese Aufgabe sind entsprechende Mechanismen zu entwickeln, die ohne eine zentrale Organisation durch ortsfeste Basisstationen auskommen.

Allen Untersuchungen innerhalb der vorliegenden Arbeit liegt die zentrale Annahme zugrunde, dass ein direkter Datenaustausch zwischen mobilen Fahrzeugen entlang der Straße erfolgt und nur ein begrenzter Anteil aller Fahrzeuge mit einem entsprechenden Funksystem ausgestattet ist. Die Definition eines realitätsnahen Modells der dynamischen Netzwerktopologie ist daher eine notwendige Voraussetzung für die quantitativen Analysen der vorgestellten Verfahren.

Gliederung der Arbeit

Im Anschluss an diese Einleitung wird zunächst in Kapitel 2 ein einführender Überblick zum Thema selbstorganisierende Funknetze gegeben. Die verschiedenen Ausprägungen dieser Technik werden vorgestellt und jeweils existierende Beispielsysteme präsentiert.

Das Konzept des dezentralen, selbstorganisierenden Verkehrsinformationssystems SOTIS wird in Kapitel 3 vorgestellt. Neben der grundlegenden Funktionsweise wird die verwendete Form der Informationsverbreitung beschrieben und anhand von Beispielen verdeutlicht.

In Kapitel 4 wird unter Berücksichtigung eines begrenzten Ausstattungsgrades der Fahrzeuge ein statistisches Modell der dynamischen Netzwerktopologie hergeleitet, welches durch gängige Messgrößen zur quantitativen Beschreibung des Straßenverkehrs parametriert werden kann. Auf Basis dieses Modells wird in Kapitel 5 die SOTIS-Informationsverbreitung quantitativ untersucht und mit konventionellen Mechanismen der Multihop-Kommunikation verglichen.

Die zum Thema Medienzugriff durchgeführten Arbeiten werden in Kapitel 6 vorgestellt: Zunächst werden verschiedene existierende Verfahren sowie ein neuartiges, erweitertes Reservierungsprotokoll beschrieben. Die Leistungsfähigkeit der Protokolle wird vor dem Hintergrund der Anwendung SOTIS mit Hilfe von Simulationen quantitativ erfasst, verglichen und bewertet.

Kapitel 7 beschäftigt sich mit den für einen synchronen Medienzugriff notwendigen Mechanismen zur Zeitsynchronisation. Die Untersuchung der erzielbaren Synchronisationsgenauigkeit wird in analytischer Form durchgeführt und mit Hilfe entsprechender Simulationen validiert.

Eine Übersicht der durchgeführten Untersuchungen und eine zusammenfassende Bewertung der dabei erzielten Ergebnisse in Kapitel 8 schließt diese Arbeit ab.

II

Selbstorganisierende Funknetze

Für die folgenden Untersuchungen ist das Konzept der selbstorganisierenden Funknetze von zentraler Bedeutung. Ziel dieses Kapitels ist daher, einen einführenden Überblick über dieses Thema zu geben. Hierzu erfolgt eine Abgrenzung zu *zentral organisierten Funknetzen* und ein nachfolgender Überblick über die geschichtliche Entwicklung selbstorganisierender Funknetze. Desweiteren werden die verschiedenen Ausprägungen selbstorganisierender Funknetze klassifiziert und jeweils existierende Beispielsysteme präsentiert.

Abgrenzung zu zentral organisierten Funknetzen

Die meisten heute existierenden, bzw. im Aufbau befindlichen Funknetze sind zentral organisierte Funknetze, die an eine gegebene Netzinfrastruktur gebunden sind und daher auch *infrastrukturbasierte Netze* genannt werden. Sie werden insbesondere durch folgende Eigenschaften charakterisiert:

- Ortsfeste Basisstationen organisieren den Funkverkehr jeweils innerhalb eines bestimmten lokalen Bereichs (der *Funkzelle*).
- Mobilstationen kommunizieren im Allgemeinen nicht direkt untereinander, sondern jeweils mit der ihnen zugeordneten Basisstation, die für eine Weiterleitung des Sprachsignals bzw. der Daten innerhalb des Netzes sorgt.

Das Beispiel einer zentral organisierten Netzstruktur ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Um eine Kommunikationsbeziehung zwischen den beiden Mobilstationen **MS 1** und **MS 2** herzustellen, kommunizieren die Mobilstationen jeweils mit der Basisstation innerhalb ihrer Funkzelle. Die Verbindung zwischen den Basisstationen, bzw. in ein anderes Netz, wird über die Funkvermittlungstelle (*Mobile Switching Center*, MSC) hergestellt.

Im Gegensatz zu zentral organisierten Funknetzen sind *selbstorganisierende Funknetze* nicht auf eine bestehende Infrastruktur angewiesen, da die Kommunikation in *direkter* Form zwischen

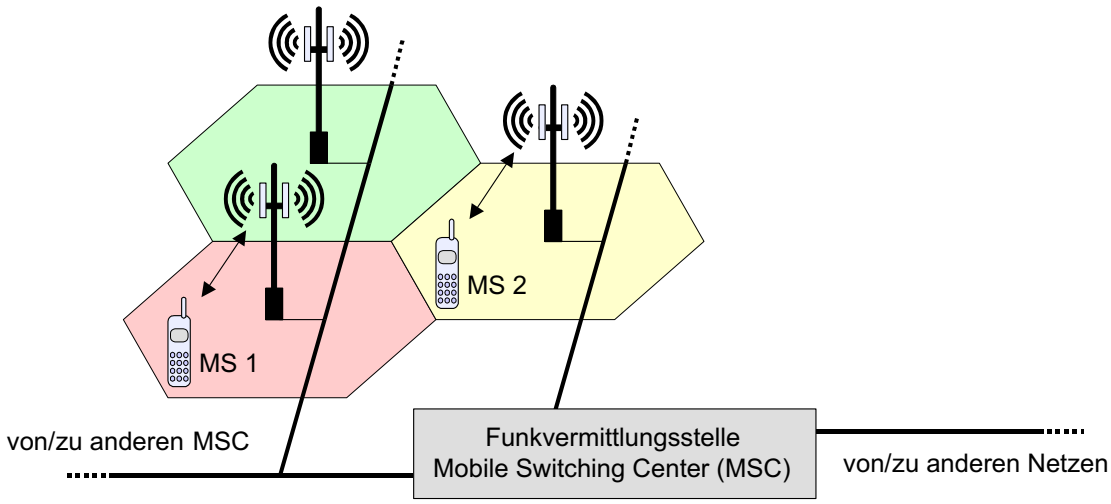

Abbildung 2.1: Beispiel eines zentral organisierten Funknetzes

Teilnehmern erfolgt. Zwischen den Mobilstationen entsteht somit ein spontanes Netzwerk, welches aus diesem Grund auch *Ad-hoc-Netz* oder *infrastrukturloses Netz* genannt wird. Die Organisation des Funknetzes geschieht hierbei in einer dezentralen und selbstorganisierenden Form [Perkins 2001; Frodigh u. a. 2000].

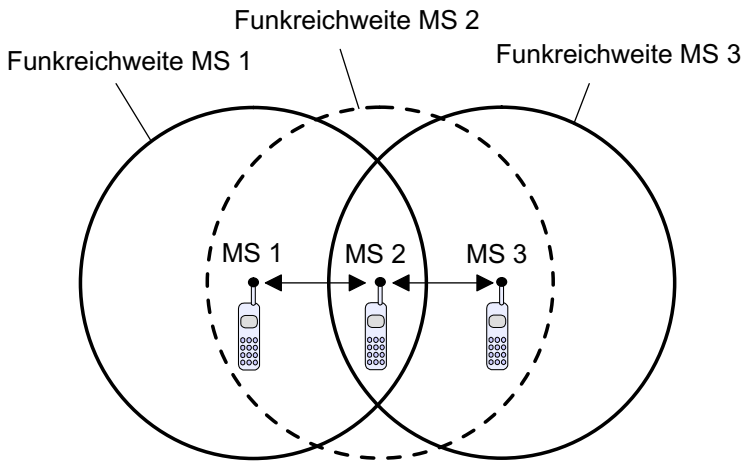

Abbildung 2.2: Beispiel eines selbstorganisierenden Funknetzes

Sofern sich zwei Mobilstationen in gegenseitiger Funkreichweite befinden, kann ein direkter Datenaustausch zwischen ihnen erfolgen, ohne dass ein Umweg über eine bestehende Infrastruktur notwendig ist. So können z.B. in Abbildung 2.2 die Mobilstationen **MS 1** und **MS 2** bzw. **MS 2** und **MS 3** in direkter Form miteinander kommunizieren, **MS 1** und **MS 3** jedoch nicht.

Falls auch eine Kommunikationsbeziehung zwischen **MS 1** und **MS 3** hergestellt werden soll, ist es notwendig, dass die mittlere der drei Mobilstationen zur Weiterleitung der Daten benutzt wird. Diese Form der Weiterleitung, bei denen Mobilstationen nicht nur als Endgeräte, sondern auch als Vermittlungsknoten für andere fungieren, wird *Multihop-Kommunikation* genannt. Selbstorganisierende Funknetze, bei denen eine Multihop-Kommunikation vorgesehen ist, werden dementsprechend auch als *Multihop-Ad-hoc-Netze* bezeichnet. Im Gegensatz dazu stehen die sogenannten *Single-Hop-Ad-hoc-Netze*, bei denen sich die Partner einer Kommunikationsbeziehung jeweils innerhalb der gegenseitigen Funkreichweite befinden müssen [Silvester und Kleinrock 1983b, a]. In der modernen Literatur wird für Ad-Hoc-Netze meist die Fähigkeit zur Multihop-Kommunikation als eine charakteristische Systemeigenschaft vorausgesetzt [Ramanathan und Redi 2002]. In diesen Fällen impliziert der Begriff *Ad-hoc-Netz* automatisch ein *Multihop-Ad-hoc-Netz*.

2.1 Entwicklung

Das Konzept selbstorganisierender Funknetze ist schon relativ lange ein Thema in Forschung und Entwicklung: Bereits Ende der sechziger Jahre begann die Arbeit am sogenannten *ALOHA Network*, welches zur drahtlosen Kommunikation zwischen Einrichtungen der Universität von Hawaii auf verschiedenen Inseln gedacht war. Auch wenn es sich dabei um ortsfeste Stationen handelte, bilden die dort entwickelten Prinzipien zum selbstorganisierenden Medienzugriff (*ALOHA-Protokolle*, siehe Abschnitt 6.3.1, Seite 71) eine wichtige Basis für die darauf folgenden Entwicklungen in diesem Bereich [Abramson 1970; Frodigh u. a. 2000].

In den siebziger und achtziger Jahren wurden selbstorganisierende Funknetze von der *Defense Advanced Research Projects Agency* (DARPA) unter der Bezeichnung *Packet Radio Networks* innerhalb der Projekte *PRNet* und *Survivable Adaptive Radio Networks* (SURAN) für Anwendungen im militärischen Bereich untersucht. Ziel der Forschungsvorhaben war, eine Datenübertragung für mobile Elemente (z.B. Soldaten, Panzer etc.) in einem Gebiet ohne bestehende Netzinfrastruktur zu ermöglichen. Hierbei wurde Ansätze für Medienzugriff und Wegewahl in Multihop-Netzen entwickelt (z.B. *CSMA*, siehe Abschnitt 6.3.2, Seite 73), die zum Teil heute noch in zivilen Systemen Verwendung finden [Kahn u. a. 1978; Ramanathan und Redi 2002].

Mit der rasant fortschreitenden Entwicklung der Computertechnik und der damit verbundenen Miniaturisierung der Geräte fanden tragbare, mobile Computer (sogenannte *Portables* und *Laptops*) in den neunziger Jahren eine immer größere Verbreitung. In dieser Zeit wurde das Thema Ad-hoc-Netze auch für den kommerziellen (nicht-militärischen) Bereich zunehmend interessant: