

# 1 Einleitung

Assistenzsysteme zur Unterstützung des Fahrers in unterschiedlichen Fahrsituationen werden zunehmend im Kraftfahrzeug eingesetzt. Dabei werden zur Erfassung des Fahrzeugumfeldes abhängig von der Funktion verschiedene Sensortypen wie Ultraschall-, Infrarot-, Video- und Radarsensoren eingesetzt. Die Radarsensorik weist mehrere Vorteile auf, die sie für den Einsatz in Assistenzsystemen zu einem wichtigen Sensorprinzip machen. Radarsensoren ermöglichen bei großer Reichweite eine direkte und präzise Messung von Entfernung und Geschwindigkeit eines Objektes, und sie sind weitgehend unabhängig von den Witterungsverhältnissen.

Die Einstiegsanwendung der Radarsensorik im Automobilbereich ist die automatische Geschwindigkeitsregelung ACC (Adaptive Cruise Control), bei der die Geschwindigkeit des eigenen Fahrzeugs an die Geschwindigkeit voraus fahrender Fahrzeuge angepasst wird. Dabei werden Objekte in einem Winkelbereich von ca.  $\pm 8^\circ$  bis zu einer Entfernung von etwa 150 m erfasst. Der Frequenzbereich der Radarsensoren für diese Anwendung liegt bei 76 - 77 GHz.

Die aktuelle und zukünftige Entwicklung der Radarsensorik ist auf der Funktionsseite durch erweiterte Anforderungen der ACC-Funktion sowie den Einsatz von Radarsensoren in aktiven Sicherheitssystemen gekennzeichnet. Mittelfristige Anwendungen der Radarsensorik sind die ACC-Funktion mit zusätzlichem Abbremsen des Fahrzeugs bis zum Stillstand (ACC Stop & Go) sowie die Erkennung bevorstehender Aufprallsituationen und die Auslösung geeigneter Maßnahmen zur Verminderung der Schwere eines Unfalls, wie z.B. die Gurtstraffung.

Auf der Sensorseite bedeutet diese Entwicklung, dass steigende Anforderungen an Funktionalität und Zuverlässigkeit unter den engen Kostenanforderungen im Automobilbereich erfüllt werden müssen. Dies hat Auswirkungen auf Technologie und Systemkonzepte der Sensoren. Im Bereich der Sende-/Empfangsmodule der Radarsensoren ist derzeit eine Entwicklung hin zur Realisierung der Komponenten in SiGe-Bipolar-Technologie zu beobachten. Durch die enorme Steigerung der Grenzfrequenzen in den letzten Jahren stehen inzwischen leistungsfähige Signalquellen und Mischer im MMW-Bereich in SiGe-Technologie zur Verfügung. Aufgrund der hohen Integrationsdichte dieser Technologie und der Kostenvorteile gegenüber den bisher im Millimeterwellen-Bereich vorherrschenden GaAs- und InP-Technologien wird die monolithische Integration von vollständigen Sende-/Empfangsmodulen möglich.

In dieser Arbeit wird ein Systemkonzept untersucht, das auf einer Gruppenanordnung aus Sende-/Empfangsmodulen basiert. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Betrachtung der Eigenschaften einer solchen Gruppenanordnung in Verbindung mit der digitalen Strahlformung. Dabei werden spezielle Eigenschaften bei der Verwendung FMCW-modulierter Sendesignale näher untersucht. Da die monolithische Integration der Sende-/Empfangsmodule Voraussetzung für eine kosteneffektive Umsetzung des Konzeptes ist, wird außerdem die Integration wesentlicher Komponenten eines Sende-/Empfangsmoduls in SiGe-Technologie betrachtet und das Potential für Anwendungen in Frequenzbereichen oberhalb 100 GHz aufgezeigt.

In Kapitel 2 werden nach einer Betrachtung der Randbedingungen, die sich durch die Ausbreitungs- und Reflexionseigenschaften für Millimeterwellen-Radarsensoren ergeben, die Anforderungen an aktuelle und zukünftige Kfz-Radarsensoren diskutiert. Der grundlegende Aufbau des untersuchten Systemkonzeptes wird in Kapitel 3 dargestellt. Das Kapitel 4 beginnt mit der Untersuchung des Einflusses der Modulation des Sendesignals auf die Systemeigenschaften. Dabei werden auch die Randbedingungen berücksichtigt, die sich für integrierte Sende-/Empfangsmodule ergeben. Die für die weiteren Untersuchungen ausgewählte FMCW-Modulation wird anschließend näher betrachtet. Ein weiterer Abschnitt des Kapitels beschäftigt sich mit den Grundlagen der Array-Signalverarbeitung für die Schätzung der Objektposition bzw. für die Objekt-Abbildung in lateraler Richtung. In Kapitel 5 werden die Eigenschaften eines Arrays aus Sende-/Empfangsmodulen mit FMCW-modulierten Sendesignalen bezüglich der Schätzung von radialen und lateralen Objektkoordinaten analysiert und die Möglichkeiten dargestellt, die sich durch den zusätzlichen Freiheitsgrad unabhängig ansteuerbarer Signalquellen gegenüber bestehenden Systemen mit digitaler Strahlformung ergeben. Um die theoretisch beschriebenen Eigenschaften zu verifizieren, wurde ein Demonstrator, bestehend aus acht Sende-/Empfangsmodulen, aufgebaut. Der Sensor ist in Kapitel 6 beschrieben. Ein weiterer Abschnitt beschäftigt sich mit der Integration einiger Komponenten von Sende-/Empfangsmodulen in SiGe-Technologie. In Kapitel 7 werden die mit dem Demonstrator gewonnenen Messergebnisse dargestellt.

## 2 Radarsensorik im Automobil

Der Einsatz der Radarsensorik für die Erfassung des Fahrzeugumfeldes wurde bereits in den 50er Jahren in ersten Experimenten untersucht. In den 70er Jahren wurde der Forschungsaufwand verstärkt, um Radarsensoren zur frühzeitigen Erkennung von Aufprallsituationen für die Auslösung der damals aufkommenden Airbag-Systeme einzusetzen<sup>1</sup>. Die Systeme erreichten allerdings keine Marktreife, da sie die hohen Zuverlässigkeitsanforderungen nicht erfüllen konnten. Erst Ende der 90er Jahre wurden die ersten kommerziellen auf Radarsensoren basierenden Systeme zur automatischen Abstandsregelung in Oberklasse-Fahrzeugen angeboten. Dies wurde durch die Verfügbarkeit kostengünstiger Millimeterwellen-Komponenten und Fortschritte bei der digitalen Signalverarbeitungs-Hardware begünstigt. Zudem stellt die automatische Abstandsregelung aufgrund ihrer Einstufung als Komfortfunktion geringere Anforderungen an die Funktionalität und Zuverlässigkeit der Radarsensoren als sicherheitsrelevante Funktionen. Der Einsatz der ACC-Funktion ist auf einen Geschwindigkeitsbereich von ca. 30 - 200 km/h sowie auf Autobahnen und Bundesstraßen beschränkt. Die Sensoren werden im Frequenzbereich 76 - 77 GHz betrieben. Dieser Frequenzbereich ist inzwischen weltweit standardisiert. Die hohe Trägerfrequenz bietet den Vorteil, die für die ACC-Funktion erforderlichen Antennen-Öffnungswinkel von 3°-4° mit geringen Antennenabmessungen zu erreichen.

Zusätzlich zu den Sensoren für die ACC-Funktion, die einen großen Entfernungsbereich bis ca. 150 m in einem schmalen Winkelbereich abdecken, befinden sich bei vielen Automobilherstellern bzw. Zulieferern auch Nahbereichs-Radarsensoren in der Entwicklung. Diese Sensoren sind in mehreren Anwendungen einsetzbar. Beispiele sind die Überwachung des toten Winkels und die Unterstützung der ACC-Funktion, um die Regelung der Geschwindigkeit bis in den Stand zu ermöglichen (ACC Stop & Go). Ebenso können sie für die Erkennung bevorstehender Aufprallsituationen eingesetzt werden, um die frühzeitige Aktivierung passiver Sicherheitssysteme zu ermöglichen und die Unfallschwere zu verringern. Seit 2005 wird bereits ein System am Markt angeboten, das auf zwei Nahbereichssensoren basiert, deren Informationen bei Bremsmanövern für die Berechnung der von der Fahrsituation abhängigen optimalen Bremskraft verwendet werden [21].

Für die Nahbereichssensoren ist derzeit der Frequenzbereich von 21.65 - 26.65 GHz

---

<sup>1</sup>Übersichten der Entwicklungsgeschichte von Kfz-Radarsensoren sind in [31, 88, 99] zu finden.

freigegeben. Da für Komponenten in diesem Frequenzbereich kostengünstigere Halbleitertechnologien verwendet werden, können diese Systeme zu geringeren Kosten eingeführt werden. Aufgrund des möglichen Störpotentials, insbesondere für Anwendungen der Radioastronomie und der Erd-Fernerkundung in diesem Frequenzbereich, ist die Verbreitung solcher Systeme in Europa auf 7% der Fahrzeugflotte auf nationaler Ebene beschränkt und zeitlich bis 2013 befristet [25]. Langfristig ist der Frequenzbereich 77-81 GHz für diese Systeme freigegeben [24].

Radarsensoren unterscheiden sich in zwei Aspekten wesentlich von Sensoren im optischen oder Infrarotbereich:

- die wesentlich niedrigere Frequenz und die damit verbundene größere Wellenlänge und
- die Kohärenz der Signale.

Die Verwendung kohärenter Signale ermöglicht zum einen die direkte und damit präzise Geschwindigkeitsmessung über die Doppler-Frequenzverschiebung, zum anderen wird die Empfindlichkeit gegenüber Störsignalen verringert.

### 2.1 Eigenschaften der Millimeterwellen-Radarsensorik

Durch die unterschiedliche Wellenlänge und die Kohärenz der Signale unterscheiden sich auch die Abbildungseigenschaften der Radarsensorik im Vergleich zu optischen Sensoren. Die wesentlichen Eigenschaften der Millimeterwellen-Radarsensorik werden im folgenden dargestellt.

**Freiraumausbreitung:** Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen führt bei Berücksichtigung von Sende- und Empfangspfad zu einer Abnahme der Leistungsdichte proportional zur vierten Potenz der Entfernung eines Objektes<sup>2</sup>. Für den Einsatz im Automobilbereich bedeutet dies einerseits, dass aufgrund der relativ geringen Entfernungen im Vergleich zu den klassischen Einsatzbereichen der Radarsensorik in Militäranwendungen und der Luftraumüberwachung nur moderate Sendeleistungen erforderlich sind, die mit kompakten Halbleiter-basierten Quellen bereitgestellt werden können. Andererseits ist z.B. für eine Verdopplung der Reichweite eine Erhöhung der Sendeleistung um 12 dB bei ansonsten gleicher Auslegung des Sensors erforderlich. Dies verdeutlicht, dass der Reichweite eines Radarsensors bei vorgegebener Technologie enge Grenzen gesetzt sind.

Zusätzlich zur Verringerung der Leistungsdichte durch die  $1/R^4$ -Abhängigkeit treten Verluste durch die atmosphärische Dämpfung sowie Witterungseinflüsse auf. Die atmo-

---

<sup>2</sup>siehe Gleichung 4.18.

sphärische Dämpfung bei Frequenzen im Millimeterwellenbereich wird durch molekulare Absorptionen durch Wasserdampf und Sauerstoff dominiert. Absorptionsresonanzen treten für Wasserdampf in den Frequenzbereichen um 22 GHz, 183 GHz und 323 GHz auf. Die wesentlichen Resonanzen von Sauerstoff treten in den Frequenzbereichen um 60 GHz und 118 GHz auf [20]. Die Dämpfung zwischen den Resonanzen steigt stetig mit zunehmender Frequenz an. Im Frequenzbereich um 77 GHz beträgt die Dämpfung ca. 0.5-1 dB/km, bei höheren Frequenzen um 140 GHz liegt sie um ca. 1 dB/km höher. Zusätzliche Dämpfungen für Nebel sind in Tabelle 2.1 dargestellt. Wenn man

Frequenz	94 GHz		140 GHz	
Wassergehalt der Luft [g/m <sup>3</sup> ]	0.5	0.1	0.5	0.1
optische Sichtweite	50 m	200 m	50 m	200 m
Dämpfung [dB/km]	2.0	0.5	3.5	0.7

**Tabelle 2.1:** Dämpfung für Bodennebel bei 94 GHz und 140 GHz aus [20].

die typische Reichweite aktueller Kfz-Radarsensoren von ca. 150 m berücksichtigt, ist erkennbar, dass die zusätzliche Dämpfung gegenüber anderen Einflüssen, wie der entfernungsbedingten Verringerung der Leistungsdichte, vernachlässigbar ist. Für optische Sensoren ergibt sich bei gleichen Witterungsbedingungen bereits eine deutliche Reduktion der Reichweite.

**Mehrwegeausbreitung:** Bei einem Kfz-Radar liegt aufgrund der reflektierenden Straßenoberfläche keine reine Freiraumausbreitung, sondern eine Mehrwegeausbreitung vor. Aufgrund der Kohärenz der Signale kommt es zu Interferenzen und damit zu entfernungsabhängigen Schwankungen der Empfangsleistung zwischen den Extremfällen einer vollständigen Auslöschung der Signale und einer Verdopplung der Feldstärke bzw. einer Erhöhung der Empfangsleistung um 6 dB. Für die resultierenden Interferenzmuster ist die Einbauhöhe des Sensors ein wichtiger Parameter. Zur Verringerung der Ausdehnung von Zonen destruktiver Interferenz ist eine möglichst hohe Einbauposition günstig. Ein weiterer Effekt der Mehrwegeausbreitung ist, dass auch verdeckte Fahrzeuge durch Mehrfachreflexionen zwischen Fahrbahn und Unterboden des direkt vorausfahrenden Fahrzeugs sichtbar werden [72].

**Reflexionseigenschaften:** Die Reflexionseigenschaften im Mikro- und Millimeterwellenbereich unterscheiden sich ebenfalls von denen im optischen Bereich. Während bei optischen Wellenlängen viele Oberflächen die einfallenden Signale in viele Raumrichtungen streuen, erscheinen Oberflächen im Mikrowellen- und Millimeterwellenbereich aufgrund der größeren Wellenlänge meist als glatt. Dadurch dominieren spiegelnde Re-

flexionen und es ergibt sich ein großer Dynamikumfang der wirksamen Rückstreuquerschnitte sowie eine starke Abhängigkeit der reflektierten Leistung vom Aspektwinkel [83]. Die Rückstreuquerschnitte<sup>3</sup> von Objekten im Straßenverkehr liegen für Frequenzen um 77 GHz im Bereich von ca.  $0.01 \text{ m}^2$  bis  $10000 \text{ m}^2$  bzw. zwischen  $-20 \text{ dBsm}$  und  $40 \text{ dBsm}$  [46].

## 2.2 Sensoren

Die aktuelle Generation der für die ACC-Funktion eingesetzten Radarsensoren erfasst einen Winkelbereich im Azimut von  $\pm 8^\circ$ , in der Elevation einen Bereich von ca.  $3^\circ - 4^\circ$ . Der geringe Öffnungswinkel der Antennenstrahlen ist durch die Forderung nach einer eindeutigen Spurzuordnung vorausfahrender Fahrzeuge bis zu Entfernungen von ca. 150 m bedingt. Ein häufig angegebener Richtwert für die Empfindlichkeit der Sensoren ist die Detektion eines Rückstreuquerschnittes von  $1 \text{ m}^2$  in 150 m Entfernung. Die geforderte Trennfähigkeit<sup>4</sup> zweier Objekte in radialer Richtung liegt bei ca. 1 m.

Die Komplexität der Radarsensorik wird an der Vielfalt der existierenden Systemlösungen deutlich. Sowohl seitens der Modulationsverfahren als auch bezüglich der eingesetzten Antennenkonzepte finden sich viele in der Radartechnik bekannte Ansätze. Als Modulationsverfahren werden FMCW-, Zwei-Frequenz-FSK-, Puls-Doppler- und Pseudo-Noise-Modulation eingesetzt oder in Prototypen untersucht. Unter den verwendeten Antennentypen finden sich quasioptische Antennen mit dielektrischen Linsen, Reflektorantennen, Hornantennen und planare Patch-Antennen. Als Auswertungskonzepte für die Winkelmessung werden die geschaltete oder permanente Mehrfach-Strahlformung (Multiple-Beam) mit festen Raumrichtungen, das Monopuls-Verfahren sowie mechanische und elektronische Strahlschwenkung eingesetzt. Eine Zusammenstellung und Diskussion der unterschiedlichen Antennenkonzepte für Kfz-Radarsensoren ist in [36] zu finden.

Das am häufigsten eingesetzte Modulationsverfahren ist die FMCW-Modulation. Für die Auswahl des Modulationsverfahrens sind, wie in Abschnitt 4.2.3.2 diskutiert wird, die Anforderungen der Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessung, aber auch Aspekte wie die erforderliche Empfindlichkeit, Dynamik oder die Eigenschaften bei der Detektion bewegter Objekte relevant.

Bei den Antennentypen sind die Multiple-Beam-Antennen am weitesten verbreitet.

---

<sup>3</sup>Der Rückstreuquerschnitt (RCS) eines Objektes beschreibt das Verhältnis der Leistungsdichte der einfallenden Welle zur gleichmäßig in alle Raumrichtungen abgestrahlten Leistung für ein Objekt im Fernfeld. Der RCS beschreibt das Rückstreuverhalten eines Objektes unabhängig von der Ausrichtung der Antenne und der Objektentfernung.

<sup>4</sup>Um den oft mehrdeutig verwendeten Begriff *Auflösung* zu vermeiden, wird in dieser Arbeit der Begriff *Trennfähigkeit* für die Eigenschaft eines Radarsensors verwendet, zwei Objekte in einer der Koordinaten Entfernung, Geschwindigkeit oder Winkel zu unterscheiden.

Aus Sicht der Detektionseigenschaften sind die wichtigsten Anforderungen der ACC-Funktion an die Antenne ein hoher Gewinn, um eine große Reichweite zu ermöglichen, ein geringer Öffnungswinkel sowie geringe Nebenkeulen von mindestens -25 dB, um die unerwünschte Detektion von stark reflektierenden außerhalb des Sichtbereiches liegenden Objekten zu vermeiden. Hinzu kommen durch die Automobilanwendung gegebene Randbedingungen wie geringe Kosten, Eignung zur Fertigung in großen Stückzahlen und einfache Integration des Sensors in das Fahrzeug.

Zukünftige Generationen der ACC-Funktion werden den Einsatzbereich auch auf Landstraßen erweitern. Aufgrund der geringeren Kurvenradien ist daher mindestens eine Verdopplung des Azimut-Winkelbereiches auf  $\pm 16^\circ$  erforderlich [72]. Weitere Anforderungen an zukünftige Fernbereichssensoren sind eine höhere Empfindlichkeit sowie eine bessere Entfernung- und Winkeltrennfähigkeit.

Für die Nahbereichssensoren ergeben sich andere Anforderungen als für die bei der ACC-Funktion eingesetzten Sensoren. Für Nahbereichsfunktionen ist die Erfassung eines Azimut-Winkelbereiches von mindestens  $\pm 60^\circ$  erforderlich, einzelne Anwendungen fordern bis zu  $\pm 80^\circ$ . Die Entfernungstrennfähigkeit muss deutlich höher liegen als bei der ACC-Funktion, so dass eine Signalbandbreite von bis zu 4 GHz notwendig ist. Der zu erfassende Entfernungsbereich erstreckt sich bis ca. 30 m. Hinzu kommt mit zunehmender Sicherheitsrelevanz der Systeme eine erhöhte Anforderung an die Zuverlässigkeit der Sensordaten.