

1 Einleitung

Seit etwa 10 Jahren werden Weitbereichsradarsensoren als Basis für prädiktive Fahrerassistenzsysteme in Serien-Pkw eingesetzt [Win03]. Die erste Anwendung war mit der automatischen Distanzregelung (Adaptive Cruise Control) ein reines Komfortsystem. Bereits 1995 bot Mitsubishi auf dem japanischen Markt ein solches System an, was jedoch nicht auf Radar sondern auf LIDAR¹ Scannern in Kombination mit einer Kamera basierte [Sch05]. Mercedes-Benz führte im April 1999 in der damaligen S-Klasse ein erstes radarbasiertes ACC-System mit der Bezeichnung Distronic® in den Markt ein [MS05]. Innerhalb weniger Jahre wurde die Geschwindigkeitsregelungsanlage in der überwiegenden Mehrzahl der Premiummodelle angeboten (z. B. 2000 im 7er BMW und 2002 im Audi A8) und hat sich mittlerweile als fester Bestandteil der Sonderausstattung von Oberklasse- und gehobenen Mittelklassefahrzeugen durchgesetzt. Bei der ACC-Funktion wird auf Basis der Sensordaten (Quer-, Längsabstand und Relativgeschwindigkeit des vorausfahrenden Fahrzeugs) die eingestellte Wunschgeschwindigkeit mittels moderatem Brems- und Motoreingriff entsprechend geregelt. Durch den begrenzten Erfassungsbereich der Weitbereichsradarsysteme (Winkelbereich von bis zu $\pm 10^\circ$ und Reichweiten von ca. 10 bis 150 m) wurde die erste ACC Generation für die vergleichsweise einfach zu automatisierende Verkehrssituation einer Autobahnfahrt mit Geschwindigkeiten von etwa 30 bis 180 km/h angeboten.

Später kamen zusätzlich Nahbereichsradarsensoren hinzu, mit denen ein Abbremsen bis zum Stillstand mit darauffolgendem Wiederanfahren gewährleistet wird (ACC Stop & Go). Mercedes führte eine solche Erweiterung von ACC als Distronic Plus® 2005 in der neuen S-Klasse ein. Eine weitere Anwendung für im Fahrzeugheck positionierte Nahbereichsradarsensoren ist die Überwachung des toten Winkels. Neben der Verbesserung von ACC als Komfortsystem werden auch zunehmend radarbasierende prädiktive Sicherheitssysteme angeboten, die bei einem bevorstehenden Auffahrunfall Sicherheitsmaßnahmen zur Reduzierung von Unfallfolgen auslösen [BS07]. Solche Maßnahmen können beispielsweise eine Bremsvorbereitung, die Aktivierung von reversiblen Gurtstraffern bzw. das Schließen von Seitenscheiben beinhalten. Durch die geschlossenen Scheiben soll während des Unfalls ein Eindringen von Gegenständen in den Innenraum vermieden werden. Mit der Pre-Safe® Bremsfunktion ist von Mercedes bereits ein System in den Markt eingeführt, das automatisch in die Fahrdynamik eingreift: Bei einer drohenden Kollision führt das Fahrzeug nach Missachtung mehrmaliger Warnungen durch den Fahrer eine Teilbremsung mit bis zu 40 % der maximalen Bremsleistung aus [SS07]. Dieser anhaltende Trend weg von einer reinen Komfortfunktion zum kombinierten Komfort- und Sicherheitssystem, welches in immer komplexeren Verkehrs-

¹Light Detection and Ranging

1 Einleitung

umgebungen (Überlandfahrten und Stadtverkehr) eingesetzt wird, stellt extrem hohe Anforderungen an die maschinelle Wahrnehmung. Um die steigenden Anforderungen bezüglich des Erfassungsbereichs, der Auflösung und der Zuverlässigkeit der Sensorik zu erfüllen, wird im zunehmenden Maße Sensordatenfusion mit mehreren Sensoren betrieben.

Die Integration dieser immer größeren Anzahl an Sensoren in das Fahrzeug ist eine äußerst komplexe Angelegenheit, welche die Berücksichtigung vieler verschiedener Randbedingungen, wie mechanische Einbaumöglichkeiten, potentielle Beeinflussung des Kühlluftstroms, Anforderungen des Sensors an sein Einbauumfeld, mögliche Witterungseffekte und nicht zuletzt den Einfluss auf das Fahrzeugdesign, umfasst. Unabhängig davon, wie vorteilhaft ein Sensorsystem für die Fahrumfelderfassung ist, wird es sich im automobilen Umfeld nicht durchsetzen, wenn der Einbau des Sensors nur mit gravierender Beeinträchtigung des Fahrzeugdesigns möglich ist.

1.1 Stand der Technik

Funktionsbedingt müssen Radarsensoren für die Fahrumfelderfassung an hochgradig designrelevanten Positionen, insbesondere innerhalb der Fahrzeugfront oder des Fahrzeughecks, verbaut werden. Aufgrund der derzeit stark unterschiedlichen Frequenzbereiche von Nah- und Fernbereichsradarsensoren ergeben sich bei deren Integration unterschiedliche Situationen:

- **Fernbereichsradarsensoren**

(Long Range Radar)

LRR-Sensoren werden im Frequenzbereich zwischen 76 und 77 GHz betrieben. In diesem Frequenzbereich ist bei einigen Lackfarben (z. B. Silber-Metallic), die eine hohe Konzentration an Metallpartikeln aufweisen, eine Platzierung hinter lackierten Kunststoffflächen mit hohen Reflexionen verbunden. Deshalb wird eine Integration der LRR-Sensoren hinter in Wagenfarbe lackierten Flächen weitgehend vermieden. Die maximale Reichweite aktueller LRR-Sensoren beträgt etwa 250 m.



Abb. 1.1: Weitbereichsradarsensor
(Quelle: Fa. Robert Bosch)

- **Nahbereichsradarsensoren**

(Short Range Radar)

SRR-Sensoren werden als Schmalband-ISM²-Radare im Frequenzbereich zwischen 24,05 und 24,25 GHz und als UWB³-Radare im Frequenzbereich zwischen

²Industrial, Scientific and Medical Band

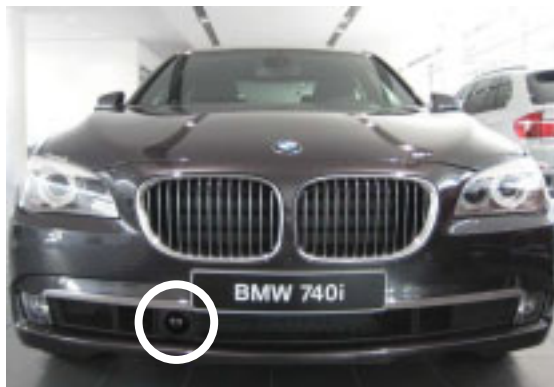
³Ultra Wide Band

21,65 und 26,65 GHz ausgelegt. Bedingt durch die höhere zugelassene mittlere Strahlleistung (Equivalent Isotropic Radiation Power) beträgt die Reichweite der Schmalband-SRR-Sensoren etwa 70 m und die der UWB-SRR-Sensoren etwa 30 m. Für alle SRR-Sensoren gilt, dass durch die im Vergleich zu LRR-Sensoren näherungsweise um den Faktor drei längere Wellenlänge der Einfluss von Lacksystemen weitaus geringer ist (siehe Abschnitt 5.3). Im Allgemeinen ist die Höhe der auftretenden Reflexionen tolerierbar und deshalb ein absolut designneutraler Einbau hinter lackierten Kunststoffflächen möglich. Heutige SRR-Sensoren werden gewöhnlich hinter den in Wagenfarbe lackierten Schürzen von Heck- oder Frontstoßfängern positioniert.

Um insbesondere Anwendungen der Radioastronomie und Erderkundung im gleichen Frequenzband vor Störungen zu schützen, wurde die Nutzungsdauer der UWB-SRR-Sensoren in Europa jedoch bis zum 1. Juli 2013 befristet und die Einbaurate auf maximal 7 % in der gesamten Fahrzeugflotte auf nationaler Ebene beschränkt. Ab diesem Stichtag ist ein Übergang in das 77 bis 81 GHz Band vorgesehen [Bun05, Bun04, ECC05, ECC04]. Damit ergeben sich für die Integration ähnliche Schwierigkeiten wie bei heutigen LRR-Sensoren.

In Anbetracht dieser Einschränkungen für die Integration von LRR-Sensoren bestehen bei den Automobilherstellern zwei gegensätzliche Einbaustrategien:

Einige Hersteller favorisieren unter der Prämisse „Technik zeigen“ offen sichtbare Sensoren. Häufig werden die Sensoren in einer Öffnung im unteren Teil des Stoßfängers platziert. In Abbildung 1.2 sind mit dem 7er BMW und dem Audi Q5 zwei aktuelle Beispiele für die offene Einbauweise zu sehen. Bei Audi stellen die sichtbaren LRR-Sensoren beim A5 und Q5 eine Trendwende gegenüber dem bisherigen verdeckten Einbau dar.



(a) BMW 7er



(b) Audi Q5

Abb. 1.2: Beispiele für offenen LRR-Sensorverbau

Der andere Ansatz besteht in einem weitgehend unauffälligen Einbau, der eine Abdeckung des Radarsensors notwendig macht. Ein verbreiteter Einbauort dieser abgedeck-

1 Einleitung

ten LRR-Sensoren stellt der Bereich des Kühlergrills dar. Aber gerade der Kühlergrill ist bei heutigen Fahrzeugen ein wesentliches Gestaltungselement mit hohem Wiedererkennungswert für die Marke. Eine solche Radarabdeckung (ein so genanntes Radom⁴) soll sich idealerweise den Erfordernissen des Fahrzeugdesigns anpassen sowie hinsichtlich der Wellenausbreitung möglichst neutral verhalten. Hier kann es zu konkurrierenden Forderungen kommen, die keinen in jeder Hinsicht optimalen Einbau zulassen. Um die Hochwertigkeit von Premiumfahrzeugen auszudrücken wird der Kühlergrill oftmals mit Chromapplikationen gestaltet, die auch auf dem Radom dargestellt werden sollen. Eine Radom-Ausführung in „Aspik“-Optik stellt eine gängige Möglichkeit dar, Abdeckungen mit solchen Chromapplikationen für Kühlergrill aber auch Markenzeichen-Plaketten zu realisieren [Dai98, Hel05]. In Abbildung 1.3 ist exemplarisch das als Markenemblem gestaltete Radom des Toyota Crown und das Radom der Mercedes E-Klasse im Kühlergrill dargestellt. Diese Radome bestehen aus einer visuell transparen-



(a) Markenplakette als Radom beim Toyota Crown (b) Radom im Kühlergrill der Mercedes E-Klasse

Abb. 1.3: Beispiele für LRR-Radome in „Aspik“-Optik

ten Kunststoffdeckplatte, in der rückseitig das Muster des Markenzeichens bzw. der Kühlerverstreber durch Vertiefungen eingelassen ist. Um die Chromoptik zu imitieren wird in den Vertiefungen durch Bedampfung eine molekulare Metallschicht (z. B. Indium) aufgebracht und schließlich mit undurchsichtigen Kunststoff hinterspritzt. Die Metallschicht muss dabei sehr dünn im Vergleich zur Eindringtiefe der Radarfrequenz sein, um weitgehend transparent für Millimeterwellen zu sein. Im sichtbaren Frequenzbereich wirkt die Schicht durch die weit kürzere Wellenlänge reflektierend und der visuelle Metallic-Eindruck wird beibehalten. Durch den mehrschichtigen Aufbau weist ein solches Radom eine vergleichsweise hohe Dämpfung auf.

Die Radome in „Aspik“-Optik sind beidseitig weitgehend eben ausgestaltet. Oftmals ist es jedoch erwünscht auf dem Radom abgebildete Designelemente, wie Steg- oder Rippenstrukturen, plastisch hervorzuheben. Bei der Audi AG hat man sich bei der C6 Modellreihe (Audi A6, S6 und RS6) sowie der D3 Modellreihe (Audi A8 und S8) dafür

⁴Die Bezeichnung *Radom* setzt sich aus den englischen Worten Radar und Dome zusammen und beschreibt ursprünglich die kuppelförmigen Abdeckungen bei Radargroßanlagen.

entschieden, die LRR–Radare unterhalb des Kennzeichenträgers und innerhalb des für die Marke sehr charakteristischen Singleframe Kühlergrills zu integrieren. In Abbildung 1.4 sind beispielhaft die Kühlergrille der Audi S8 und A8 12 Zylinder Modelle einschließlich Radom dargestellt. In beiden Fällen wurden die horizontalen Stege durch erhabene



(a) Kühlergrill Audi S8



(b) Kühlergrill Audi A8 12 Zylinder

Abb. 1.4: Kühlergrilloptik der aktuellen Audi S8 und A8 12 Zylinder Modelle mit Radom für den Weitbereichsradsensor

Strukturen auf der Abdeckung fortgesetzt, die vertikalen Stege hingegen ausgesetzt. Beim Audi A8 12 Zylinder wurde auf die Darstellung der vertikalen Strebe verzichtet, obwohl diese weit weniger stark ausgeprägt ist als die horizontale. Hier zeigt sich eine bekannte Einschränkung in der Gestaltung von Radomen: Radome mit vorwiegend vertikal ausgerichteten, erhabenen (oder vertieften) Strukturen führen oftmals zu einer systematisch fehlerhaften Winkelmessung des Sensors und werden deshalb weggelassen.

1.2 Ziele und Inhalt der Arbeit

Die Ziele dieser Arbeit waren theoretische und experimentelle Untersuchungen, um die Ursache für die bei einer Gestaltung von Radomen auftretenden Degradationen der Radareigenschaften zu erklären, und aufbauend auf diese Ergebnisse Gegenmaßnahmen zu entwickeln, die ein Radomkonzept mit maximaler Freiheit für das Design bei minimaler Beeinflussung des Radars erlauben. Im Rahmen der theoretischen Untersuchungen wurde ein Messplatz zur Bestimmung der relativen komplexen Permittivität von Kunststoffen und Lacken im Millimeterwellenbereich aufgebaut. Die gemessenen Materialparameter bilden die Grundlage für eine modellhafte Beschreibung der Wellenausbreitung durch Radome. Mit Hilfe dieser Modelle sollen Kompensationsmaßnahmen zur Realisierung von vertikalen Strukturen und stark reflektierenden Lackschichten auf dem Radom entwickelt und umgesetzt werden. Um diese Kompensationsmaßnahmen mit realen Sensoren zu testen, wurden verschiedene experimentelle Messungen durchgeführt und Sensordaten realer Messfahrten aufgenommen und ausgewertet.