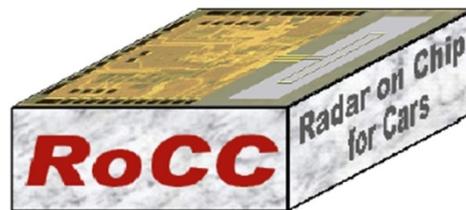




Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Business Unit  
Advanced Driver Assistance Systems  
**A.D.C. GmbH**



## **Abschlussbericht des BMBF-Projektes : "RoCC" Radar-on-Chip for Cars**

### **Teilvorhaben Continental 79GHz SiGe Nahbereichsradarsensorik**

**Förderkennzeichen: 13N9824**  
**Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2008 – 29.02.2012**

**Zuwendungsempfänger: A.D.C.**  
**Automotive Distance Control Systems GmbH**  
**Peter-Dornier-Str. 10**  
**88131 Lindau / B**

**Autoren:** *Dr. Joachim Massen*  
*Ulrich Möller*



## Inhalt

Zusammenfassung des Verbundprojektes: .....	2
I Einleitung .....	4
I.1 Aufgabenstellung .....	4
I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	4
I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	6
I.4 Wissenschaftlich und technischer Stand, an den angeknüpft wurde .....	8
I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	10
II Detaillierte Projektdarstellung .....	11
II.1 Ergebnisse des Vorhabens.....	11
II.1.1 API Die Systemspezifikation .....	11
II.1.2 APII: Sensorkonzepte und Design .....	15
II.1.2.1 Das Sensorsystem .....	15
Das Radarverfahren: .....	15
Die Winkelbildung durch Digitale Strahlformung .....	17
Die Kalibration .....	19
Das modulare Aufbaukonzept .....	24
II.1.2.2 Die Antennen.....	28
Substratintegrierte Hohlleiter-Schlitzantenne .....	34
II.1.3 APIV: Systemintegration .....	43
II.1.3.1 Aufbau und Verbindungstechnologie .....	43
II.1.3.2 Software .....	47
II.1.3.3 Aufbau der Demonstrationssensoren.....	49
II.1.4 APV: Bewertung .....	51
II.1.4.1 Sensorbewertung im Labor .....	55
II.1.4.2 Sensorbewertung auf Testständen .....	55
Entfernungsmessungen.....	57
Winkelmessungen .....	57
Geschwindigkeitsmessungen .....	59
Digitale Strahlformung und Winkeltrennung .....	62
Test der Rahmenbedingungen durch den Einbau im Fahrzeug.....	64
II.1.4.3 Sensorbewertung im Versuchsträger .....	66
Zusammenfassung .....	71
II.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	72
II.3 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	74
II.4 Veröffentlichungen der Ergebnisse .....	75
Anhang .....	76
Literatur.....	76
Abbildungsverzeichnis .....	80
Tabellenverzeichnis .....	82
Abkürzungsverzeichnis.....	82

## Zusammenfassung des Verbundprojektes:

Über drei Jahre forschten einige der bedeutendsten Unternehmen der Automobilindustrie am Thema Radarsensorik. Forschungsziel war die Entwicklung eines hochintegrierten, kostenoptimierten Fahrzeugradars für den Frequenzbereich 76 bis 81 Gigahertz (GHz) und die zuverlässige Abstandsmessung über einen sehr breiten Bereich zwischen fünf Zentimetern und 250 Meter. Durch die RoCC-Forschungsergebnisse werden radarbasierte Fahrerassistenzsysteme schon bald selbst in Kleinst- und Kleinwagen im Einsatz sein und dort die Sicherheit weiter verbessern. Radarbasierte Fahrerassistenzsysteme unterstützen beim Abstandhalten zum Vordermann und können Auffahrunfälle selbst bei widrigen Wetterverhältnissen, beispielsweise im Nebel, abmildern oder sogar verhindern. Sie sind bislang aus Kostengründen oft dem Premiumsegment vorbehalten. Das Forschungsbudget belief sich auf über 17 Millionen Euro und wurde zur Hälfte von den Projektpartnern getragen. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) beteiligte sich im Rahmen der „Innovationsallianz Automobilelektronik“ des „Informations- und Kommunikationstechnologie 2020“ (IKT 2020)-Programms mit 8,3 Millionen Euro.

Die RoCC-Forschungspartner hatten ihre Arbeit im September 2008 aufgenommen. Zum Projektteam gehörten Vertreter der gesamten automobilen Wertschöpfungskette. Seitens der Automobilhersteller waren das die BMW Forschung und Technik GmbH und die Daimler AG, seitens der Systemlieferanten der Automobilzulieferindustrie Continental und die Robert Bosch GmbH und als Chiphersteller und Projektleiter war die Infineon Technologies AG dabei. Unterstützt wurde die Forschungsarbeit von der Ruhr Universität Bochum, den Universitäten Erlangen-Nürnberg, Stuttgart und Ulm, der Hochschule Ulm und dem Ferdinand-Braun-Institut Berlin.

Das wichtigste Forschungsergebnis des RoCC-Projektes betrifft die Umstellung der Radarsensorik für die Abstandsmessung im Nahbereich zwischen fünf Zentimeter und 20 Meter auf den höheren Frequenzbereich von 77 bis 81 GHz, der gemeinhin mit 79 GHz bezeichnet wird. Heute sind für den Nahbereich Breitbandsensoren um 24 GHz üblich. In der Europäischen Union läuft im Jahr 2018 die 24-GHz-Frequenzzulassung für den Einsatz in Automobilanwendungen aus. Die Zulassung von Nahbereichssensoren um 24 GHz ist in Europa dann nicht mehr erlaubt und Neugeräte dürfen nur noch den Frequenzbereich um 79 GHz nutzen. Die RoCC-

Partner haben mit ihren Forschungsarbeiten die technischen Grundlagen für die Umstellung von 24 GHz auf 79 GHz geschaffen und dabei beachtet, dass die Kosten der zukünftigen höherfrequenten 79-GHz-Fahrzeugsensoren nicht über denen heutiger 24-GHz-Systeme liegen. Der Frequenzbereich von 76 bis 77 GHz wird wie bisher für Fernanwendungen in Abstandsregelungssystemen genutzt.

Die Einführung von höheren Frequenzen für Kfz-Radarsensorik unter Einhaltung eines engen Kostenrahmens war eine große Herausforderung an Halbleitertechnologie, Sensoraufbautechnik und den Einbau ins Fahrzeug. Durch eine enge Zusammenarbeit haben die Unternehmen hochintegrierte, kostenoptimierte Fahrzeugradarsensorik im Frequenzbereich von 76 bis 81 GHz sowohl für den Fernbereich bis zu 250 Meter Reichweite als auch für den Nahbereich mit einer Reichweite von fünf Zentimeter bis 20 Meter entwickelt.

Infineon steuerte sein Know-how in Halbleiter- und Gehäusetechnologien sowie im Chipdesign bei, um die benötigten hochperformanten Höchstfrequenzbausteine in siliziumbasierten Fertigungsprozessen herstellen zu können. Bosch und Continental erarbeiteten neuartige Sensorkonzepte und belegten, dass die zukünftigen 79-GHz-Radarsysteme selbst mit einer kompakteren Antennenbaugröße eine gute Winkel- und Ortsauflösung erreichen. Gleichzeitig haben sie robuste kostenoptimierte und zuverlässige Fertigungsmethoden entwickelt.

Die BMW Group und Daimler lieferten die Systemspezifikationen und führten grundlegende Machbarkeitsuntersuchungen zur Nutzung höherer Betriebsfrequenzen durch. Sie belegten, dass sich auch Radarsensoren, die den wesentlichen höheren 79-GHz-Frequenzbereich nutzen, so gut wie die heutigen 24-GHz-Sensoren designkonform verbauen lassen. Die abschließende Prüfung und Bewertung der entwickelten Radardemonstratoren im Auto war ein weiterer wesentlicher Beitrag der Fahrzeughersteller.

# **I Einleitung**

## **I.1 Aufgabenstellung**

Ziel des vom BMBF geförderten Verbundvorhabens RoCC war die Weiterführung der im Förderprojekt KOKON begonnenen Arbeiten zur Nutzbarmachung der SiGe-Technologie für den Frequenzbereich von 76 – 81 GHz. Dabei sollte das Kostenreduktionspotential der SiGe-Technologie durch eine Steigerung des Integrationsgrades ausgeschöpft werden. Gleichzeitig sollte demonstriert werden, dass die technischen Eigenschaften SiGe-basierter Sensoren, wie beispielsweise die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit, den aktuellen Anforderungen des Marktes gerecht werden können.

Die Continental A.D.C. GmbH arbeitete innerhalb des Gesamtvorhabens an einem Demonstrator eines zukünftigen Nahbereichsradarsensors bei 79 GHz. Ausgehend von einer grundlegenden Abstimmung der Systemspezifikation war ein produktionstaugliches Sensorkonzept auszuarbeiten, aus dem schließlich die Anforderungen an die SiGe-Chips abgeleitet werden sollten. Die Arbeiten wurden in enger Kooperation mit den Partnern im Konsortium durchgeführt. Die Kernaufgabe lag dann in der Erprobung einer für die SiGe-Technologie geeigneten Aufbau- und Verbindungstechnik, die sich für den vorliegenden Höchsthfrequenzbereich eignet, die unter den automobilen Randbedingungen zuverlässig eingesetzt werden kann und gleichzeitig kostengünstig produzierbar ist. Mit Hilfe dieser Arbeitsergebnisse war anschließend ein kompletter Radardemonstrator bestehend aus Antenne, SiGe-basiertem Höchsthfrequenz-Frontend sowie einer Elektronik-Einheit zur Rohdatenverarbeitung und Datenauswertung aufzubauen. Besonderes Augenmerk war dabei auf die Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit der HW- sowie der SW-Module zu richten. Der Aufbau der Antennen wurde in Kooperation mit dem Institut für Mikrowellentechnik der Universität Ulm durchgeführt. Abschließend sollte eine umfangreiche Charakterisierung im Labor erfolgen, um die Einsetzbarkeit einer auf SiGe-Komponenten aufbauenden Radartechnologie für Automobilanwendungen im Höchsthfrequenzbereich zwischen 76 und 81 GHz zu demonstrieren und den Funktionsumfang zu bestätigen.

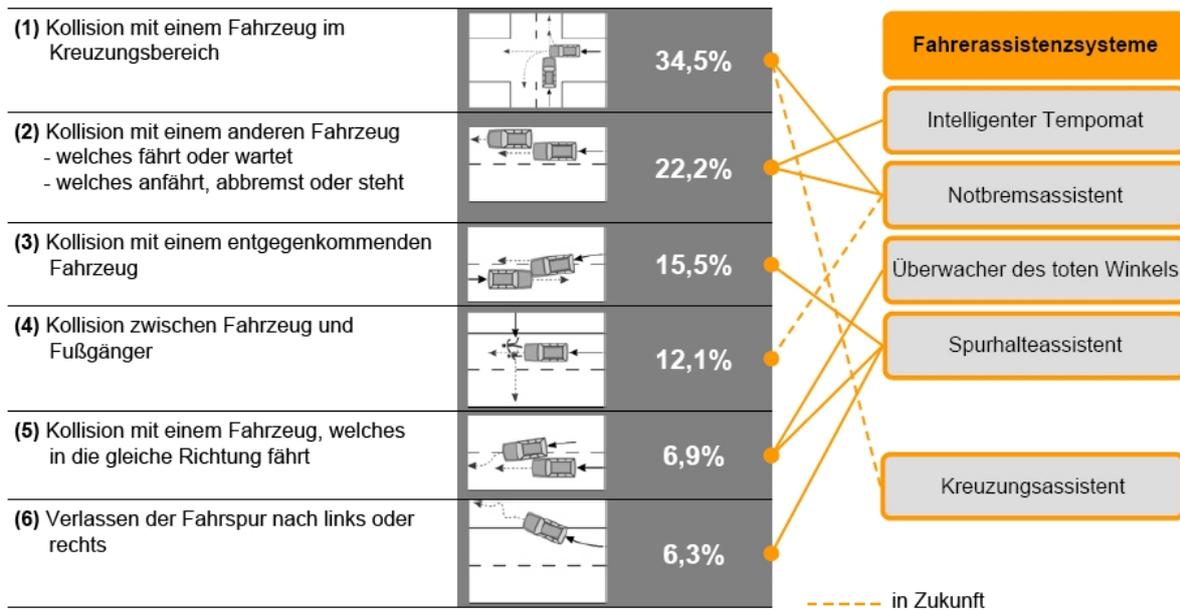
## **I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Steigerung von Komfort und Sicherheit sind heute ein wesentliches Differenzierungsmerkmal der Automobilhersteller und ihrer Zulieferindustrie im internationalen Wettbewerb [Jan10]. Fahrerassistenzsystemen und aktiven Sicherheitssystemen, die helfen, gefährliche Situationen frühzeitig zu erkennen und dadurch Unfälle zu vermeiden oder zumindest die Unfallschwere zu verringern, kommt dadurch inzwischen eine große Bedeutung zu [Bau07]. Derartige Systeme erfordern

Sensoren, die in der Lage sind, das Umfeld des Fahrzeuges zuverlässig und mit hinreichender Detailtreue zu erfassen.

Es war ein ausgesprochenes Ziel der EU-Kommission, die Anzahl der Verkehrstoten in einem Zeitraum von 10 Jahren bis 2010 zu halbieren. Dieses Ziel wurde zumindest in Deutschland nur knapp verfehlt. Einen Teil des Maßnahmenpaketes sollten dabei auch die elektronischen Sicherheitssysteme einnehmen.

Studien der NHTSA, der BAST [Bau07] und der Kfz-Versicherer [All06] zufolge ist ein Großteil der Verkehrsunfälle auf menschliches Versagen zurückzuführen. Damit existiert ein großes, bisher noch unausgeschöpftes Potenzial für automatische Systeme, die diese menschliche Unzulänglichkeit kompensieren können. Diese Aufgabe kann von vorausschauenden Fahrerassistenzsystemen übernommen werden. Elektronische Assistenten profitieren von einer wesentlich kürzeren Reaktionszeit, sie sind nicht abgelenkt oder müde und können die Situationsbeurteilung des Menschen ergänzen [Bis05].



Quelle: Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e.V. (GDV), ESV 2009, Paper Number 09-0317

Abbildung 1: Unterstützung von Assistenzsystemen für verschiedene Klassen von Verkehrsunfällen.

Um diese Arbeit zu leisten, benötigen die Assistenzsysteme Sensoren, die in der Lage sind, ihre Umgebung möglichst genau zu erfassen und zu vermessen [Win09]. Das bedeutet, die Sensoren müssen vorhandene Objekte erkennen und die Entfernung und Winkel relativ zum Fahrzeug messen. Dies funktioniert umso genauer, je größer die einem Radarsensor zur Verfügung stehende Bandbreite ist [Ras11]. Aktuell scheint sich die Meinung herauszubilden, dass für eine verlässliche Umgebungserfassung eine Bandbreite von etwa 1 – 2 GHz notwendig ist [And11]. Aus regulatorischer Sicht liegt damit ein sogenannter UWB-Sensor vor. Die Möglichkeit UWB-Sensoren in den Markt zu bringen ist durch die Frequenzregulierung eingeschränkt. Die Nutzung des technisch leichter zugänglichen Frequenzbereiches bei 24 GHz war bei Projektbeginn in der EU nur bis 2013

freigegeben. Danach sollte ein Wechsel in den Frequenzbereich zwischen 76 und 81 GHz erfolgen. Auf Betreiben von SARA wurde dieser Wechsel der Frequenzbänder inzwischen auf 2018 [EC11] verschoben, um den Produktionswechsel in den Lieferketten zeitlich zu entspannen.

Während sich die kostengünstige SiGe-Technologie bei 24GHz bereits fest etabliert hat, ist der Ersatz der teuren GaAs-Bausteine durch SiGe-Komponenten bei 79GHz gerade in vollem Gange. Die Projektergebnisse aus RoCC haben dazu einen merklichen Teil beigetragen.

Die Continental A.D.C. GmbH ist einer der führenden Hersteller von Radarsystemen für automobile Anwendungen. 1999 erfolgte die Einführung des ersten ACC-Seriensystems mit einem Weitbereichsradar in der Mercedes S-Klasse. In 2004 folgte die zweite Generation dieses Systems in Serie auf dem Markt. Darüber hinaus war die Continental A.D.C. GmbH ab 2005 Systemlieferant eines 24 GHz Nahbereichsradars. Gleichzeitig wurde bereits an der 3. Generation eines hochauflösenden, mechanisch scannenden Radars bei 77GHz für den Nah und Fernbereich gearbeitet, der inzwischen in Serie ist.

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Verbundvorhabens „Kfz-Höchstfrequenz-Elektronik KOKON“ (Förderkennziffer 01M3161) [Mas08], [Sch07] konnte vom Konsortium, gebildet aus Atmel, Bosch, Continental, DaimlerChrysler und Infineon, anhand einzelner neuentwickelter diskreter SiGe-Komponenten demonstriert werden, dass ein Umstieg von GaAs auf SiGe bei einer Frequenz von 76-81GHz technisch machbar ist. In der Continental A.D.C. GmbH wurde ein NBR-Demonstrator aufgebaut, mit dessen Hilfe grundlegende Untersuchungen zum Potenzial der Technologie durchgeführt wurden. Diese Arbeiten sollen im Projekt RoCC fortgeführt werden, um die Möglichkeiten zur Kostenreduktion und Miniaturisierung auszuschöpfen und die Technologie auf einen wettbewerbsfähigen Stand zu bringen. Durch eine Reduktion der Sensorkosten könnten die Systeme für alle Fahrzeugklassen zugänglich werden und damit die Sicherheit für alle Verkehrsteilnehmer erhöhen. Die Sicherheit für alle zu verbessern war ein ausgesprochenes Ziel von RoCC.

### I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Verbundprojekt gliederte sich entsprechend einem V-Modell in 5 Arbeitspakete:

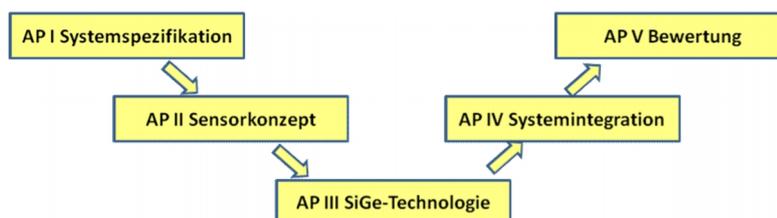


Abbildung 2: Struktur des Verbundvorhabens.

Die Continental, A.D.C.GmbH beteiligte sich an den folgenden Themen:

**AP I Systemspezifikation:**

Gemeinsam mit den Automobilherstellern BMW und Daimler sollten die Anforderungen durch zukünftige Assistenzfunktionen abgeschätzt und auf ihre Realisierbarkeit durch moderne Sensortechnologien überprüft werden. Besondere Aufmerksamkeit sollte den Themen gegenseitige Störung, Frequenzregulierung und Fahrzeugeinbau gewidmet werden.

**AP II Sensorkonzept:**

Abgeleitet aus dem Anforderungsprofil von AP I waren neue Sensorkonzepte zu entwerfen und das Radarverfahren anzupassen. Das Radarverfahren war einzubetten in eine neue Systemarchitektur und ein Modulkonzept, das eine optimierte Partitionierung der neuen höherintegrierten SiGe-Komponenten erforderte. Auf der Basis von Modellrechnungen mussten die charakteristischen Kenngrößen und System-Parameter definiert werden, die auch in die Spezifikation der SiGe-Bausteine einfließen.

**AP IV Systemintegration:**

Die in AP II definierten Sensorkonzepte sollten in Form von Demonstrationssensoren praktisch aufgebaut werden. Neben dem Schaltungsdesign und der Programmierung neuer Softwaremodule mussten geeignete Aufbau- und Verbindungstechnologien evaluiert werden. Die wesentlichen Module waren eine digitale Elektronikeinheit für die Steuerung und Datenauswertung, eine HF-Einheit zur Umsetzung des Radarverfahrens, sowie die Antennen und der mechanische Aufbau. Die SW lässt sich einteilen in Module zur Ablaufsteuerung, zur Radarrohdatenverarbeitung, zur Datenauswertung und zur Visualisierung. Zur Steigerung der Zuverlässigkeit sollen neben der AVT auch Algorithmen zur Interferenzunterdrückung, Selbstdiagnose und Selbstjustierung untersucht werden.

**AP V Bewertung:**

Anhand der aufgebauten Sensoren sollte die Leistungsfähigkeit der 79GHz-SiGe-Technologie in der Praxis demonstriert werden. Dazu mussten zuerst die typischen Kenngrößen, die das Radarsystem auszeichnen, im Labor vermessen werden. Anschließend war geplant, die für potentielle Anwendungen interessanten Eigenschaften der Sensoren auf speziellen Prüfständen zu ermitteln.

**Unterauftragnehmer der Continental A.D.C. GmbH:**

**- Universität Ulm, Institut für Mikrowellentechnik**

Die neuen Sensorkonzepte ließen sich nur mit angepassten, miniaturisierten Antennenstrukturen realisieren. Diese wurden im Rahmen einer Kooperation von der Universität Ulm entworfen, optimiert, als Prototypen aufgebaut und getestet. Zu diesem Zweck begleitete uns die Universität Ulm über die gesamte Projektlaufzeit.

**Zeitplanung**

Die Systemspezifikation (API) und Konzepterstellung (APII) war für das erste Projektjahr geplant, der Sensoraufbau im 2. Projektjahr und die Charakterisierung der Sensoren im 3. Projektjahr. Nach der Spezifikation der SiGe-Module kam es zu einer Verdichtung der Arbeiten bei der Herstellung der SiGe-Komponenten beim Modullieferanten Infineon. Um die Situation zu entspannen, wurden die Komponenten für Bosch und Continental

sequentiell aufgebaut und die Bauteile für Continental mit einem zeitlichen Abstand von ca. 9 Monaten fertiggestellt. Damit konnten wir die Sensoren zwar noch innerhalb der Projektlaufzeit aufbauen, die Evaluierung wurde dann aber in einer Verlängerung von einem halben Jahr durchgeführt. Der Projektpartner Daimler begleitete uns in dieser Verlängerungsphase, um die Demonstratoren auch noch im Fahrzeug zu testen. Zusätzlich zur ursprünglichen Planung wurde auch bei Continental ein Testfahrzeug aufgebaut, um die SW an das Fahrzeug adaptieren zu können und die Sensordaten auch in einer realen Umgebung bewerten zu können. Den zeitlichen Ablauf der Arbeitspakete zeigt die folgende Skizze:

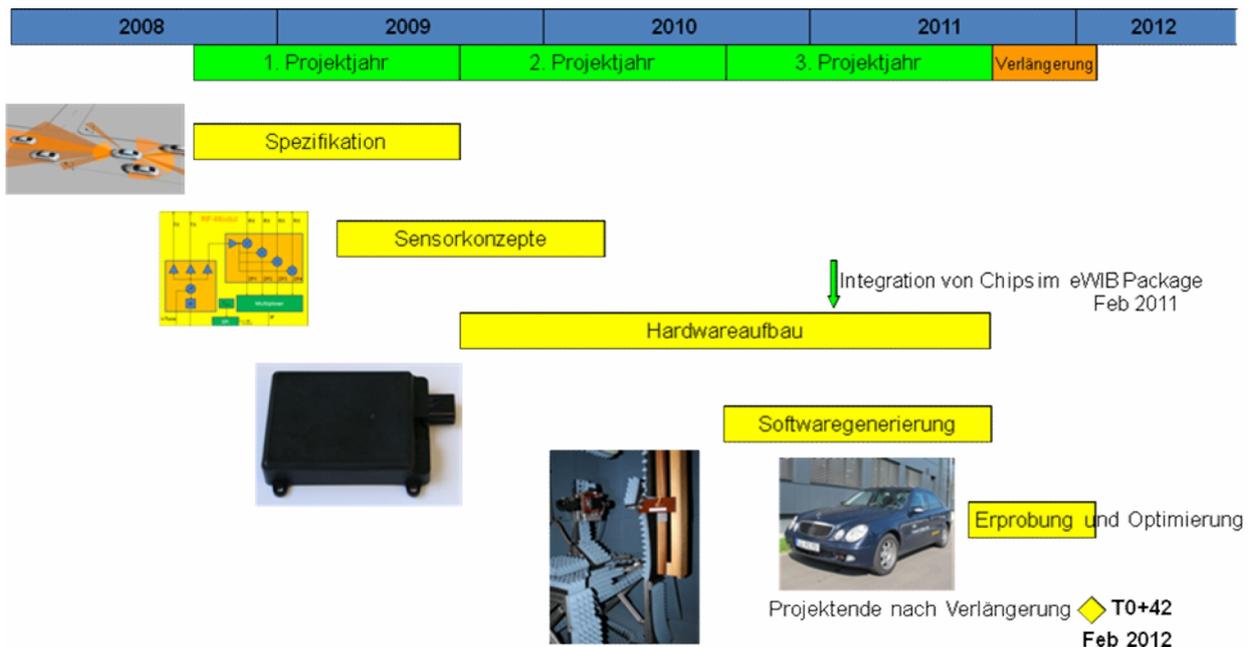


Abbildung 3: Ablauf des Teilprojektes bei Continental.

Mithilfe der Verlängerung konnten wir die Bewertung der Sensoren abschließen und unsere anvisierten Projektziele vollständig erreichen

#### I.4 Wissenschaftlich und technischer Stand, an den angeknüpft wurde



Abbildung 4: KOKON-Sensor.

Das Projekt RoCC sollte an das Vorgängerprojekt KOKON [Sch07], [Mas08] anknüpfen und die erfolgreichen Arbeiten fortführen. Wichtigstes Ergebnis des Continental-Teilprojektes in KOKON war ein Demonstrator eines 79GHz UWB SiGe-Nahbereichsradarsensors. Er konnte Fahrzeuge bis zu einer Entfernung von ca. 30m detektieren und den Ablagewinkel über die Messung der Phasendifferenz zwischen 2 Empfangsantennen bestimmen.

Das Projekt KOKON wurde gestartet, um den

Frequenzwechsel für UWB-Sensoren von 24 GHz auf 76-81GHz, der durch die Regulierung vorgegeben wurde, in die Wege zu leiten. Es konnte gezeigt werden, dass der geforderte Frequenzwechsel technisch möglich, aber im Vergleich zu 24GHz, trotz der kostengünstigen SiGe-Technologie, noch relativ teuer war. Die Aufbautechnik, für die bei der höheren Frequenz benötigten, kleineren Strukturen und Materialien waren kostenintensiver. Mit den steigenden Erwartungen an die Leistungsfähigkeit der Sensoren wächst außerdem gleichzeitig die Anzahl der einzusetzenden Halbleiterbauelemente im HF-Modul. Damit erhöht sich im gleichen Maße der Kostendruck auf diese Komponenten. Die SiGe-Technologie bietet die Möglichkeit, zur Kostenkompensation die Integrationsdichte entsprechend zu erhöhen. Diesen Vorteil zu nutzen, um den Frequenzwechsel möglichst kostenneutral zu gestalten, war Ziel des Nachfolgeprojektes RoCC.

Das neue Frequenzband bietet diverse Vorteile [Blo09]. Die SRR- (76-81GHz) und LRR- (77GHz)Anwendungen lassen sich durch eine gemeinsame Technologie realisieren und können damit in einer gemeinsamen Sensorplattform integriert werden. Die reduzierten Antennenabmessungen bei vergleichbaren Eigenschaften machen kleinere Bauformen und Gewichte der Sensoren möglich. Die höhere Trägerfrequenz hat auch eine größere Dopplerauflösung zur Folge. Daneben wurden aber auch technische Herausforderungen identifiziert, die im Folgeprojekt bearbeitet werden sollten. Der konzentrierten Wärmeezeugung sollte sowohl auf Systemebene als auch auf Komponentenebene begegnet werden. Die Fähigkeit der Sensoren, mehrere Ziele in derselben Entfernung zu unterscheiden und ihre Winkel zu bestimmen, sollte verbessert werden. Dies ist nur durch schmalere Strahlbündel und mehr Strahlen möglich. Ihre Realisierung in HW durch Phased-Array Antennen ist nach wie vor kostenintensiv. Flexibler und durch die Kostensenkung der Rechenleistung begünstigt, ist die Digitale Strahlformung.

### **Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden**

Die Systemtechnik von Radarsensoren sowie ihre Nutzung für Fahrerassistenzfunktionen unterliegen allgemein einer großen Zahl von Schutzrechten. Durch die Anwendung eines Radars mit einer Chirp-Sequence-Modulation, mit Schlitzantennen und einer Winkelbildung durch Digitale Strahlformung wurde beispielsweise vom entsprechenden, bekannten Stand der Technik Gebrauch gemacht. Für die im Rahmen von RoCC durchgeführte Systemdemonstration wurden keine Schutzrechte angemeldet.

### **Literatur, Informations- und Dokumentationsdienste**

Depatisnet, Informationsdienst des Deutschen Patentamtes

Literaturliste siehe Anhang

## I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Kooperation innerhalb des Konsortiums wird durch das V-Modell der Projektstruktur verdeutlicht. Es gibt mit dem Projektfortschritt auch die Technologietiefe und damit die Lieferkette wieder. Das Modell zeigt die wichtigsten Schnittstellen der projektinternen Zusammenarbeit.

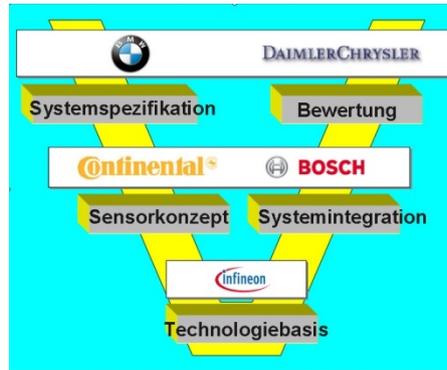


Abbildung 5: V-Modell der Projektstruktur und der Arbeitspakete.

Die Continental, A.D.C. GmbH arbeitete schwerpunktmäßig mit folgenden Partnern bei den aufgelisteten Themenschwerpunkten zusammen:

Partner	Kooperationsthemen
BMW	Sensorspezifikation API, Sensorverbau APV
Daimler	Sensorspezifikation API, Sensortest APV
Bosch	Standardisierungsfragen API
Infineon	Spezifikation und Aufbau der SiGe-Module APII (APIII)
Universität Ulm	Konzeption und Aufbau der Antennen APII

Tabelle 1: Kooperationsthemen von Continental innerhalb des Konsortiums

Durch die Einbindung von Partnern der kompletten Lieferkette schloss das Konsortium die Kompetenzen der gesamten Wertschöpfung ein, die für eine nachfolgende Produktentwicklung notwendig sind. Das schuf optimale Voraussetzungen für einen erfolgreichen Projektabschluss.

## II Detaillierte Projektdarstellung

### II.1 Ergebnisse des Vorhabens

#### II.1.1 API Die Systemspezifikation

In Kooperation mit den Fahrzeugherstellern wurden mögliche Einsatzgebiete zukünftiger Sensoren und zugehörige Szenarien diskutiert, um die Anforderungen an die Sensoren abzuleiten und auf ihre Realisierbarkeit hin zu überprüfen. Während die Einführung der modernen Fahrerassistenzsysteme in Form von Komfortsystemen stattfand, die dem Fahrer lästige und ermüdende Aufgaben in langweiligen Situationen abnehmen sollten, wie z.B. Fahrregelungsaufgaben bei Folgefahrten, zeigt die kontinuierliche Marktbeobachtung, dass Sicherheitssysteme in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewannen. Sie rücken nicht nur beim Endkunden stärker in den Mittelpunkt, sondern liegen auch in der Politik im Fokus des Interesses. Das Ziel der EU, die Anzahl der Verkehrstoten immer weiter zu reduzieren, lässt sich voraussichtlich nur mithilfe aktiver Sicherheitssysteme erreichen. Um die Sicherheit im Straßenverkehr zu erhöhen, wurden von der EU Projekte wie z.B. PReVENT gefördert, die die Entwicklung neuer Sicherheitstechnologien und Funktionen im Automobil zum Ziel hatten. Automobilhersteller entwickelten vorausschauende Crash-Strategien, wie beispielsweise die Pre-Safe Funktion von Daimler. Die Zulieferer arbeiten an einer Vernetzung der Sensoren und Sicherheitsfunktionen. So wird bei Continental der Ansatz verfolgt, Funktionen und Komponenten der passiven und aktiven Sicherheit in dem umfassenden Sicherheitssystem ContiGuard zu integrieren. Ziel des Projektes RoCC ist, die anvisierten Sicherheitsfunktionen einem breiteren Kundenkreis zugänglich zu machen. Dazu ist es notwendig, die Preise der Sensoren weiter zu reduzieren.

Typische Assistenzfunktionen, die die Fahrsicherheit erhöhen sollen, sind beispielsweise verschiedene Ausprägungsformen von Bremsassistenten zur Schadensreduzierung und zum Fußgängerschutz, Totwinkelüberwachungs- und Spurwechselassistenten, die Precrashdetektion an der Fahrzeugfront, am Heck sowie an den Seiten, ein Kreuzungs- und Abbiegeassistent, diverse Unterstützungsfunktionen zum Einparken sowie Rückfahrhilfen. Sie sollen helfen Unfälle möglichst zu vermeiden oder wenigstens ihre Auswirkungen zu minimieren. Dazu kommen neue Funktionen, wie Baustellenassistenten oder Ausweichassistenten, die den Fahrzeuglenker bei der Querführung unterstützen.

Nicht zu vergessen sind auch Weiterentwicklungen der Komfortfunktionen wie ACC und Stop&Go für den typischen Einsatz in Großstädten. Mit der zunehmenden Urbanisierung, die in den folgenden Jahren erwartet wird, kommt diesen Funktionen eine stetig wachsende Bedeutung zu.

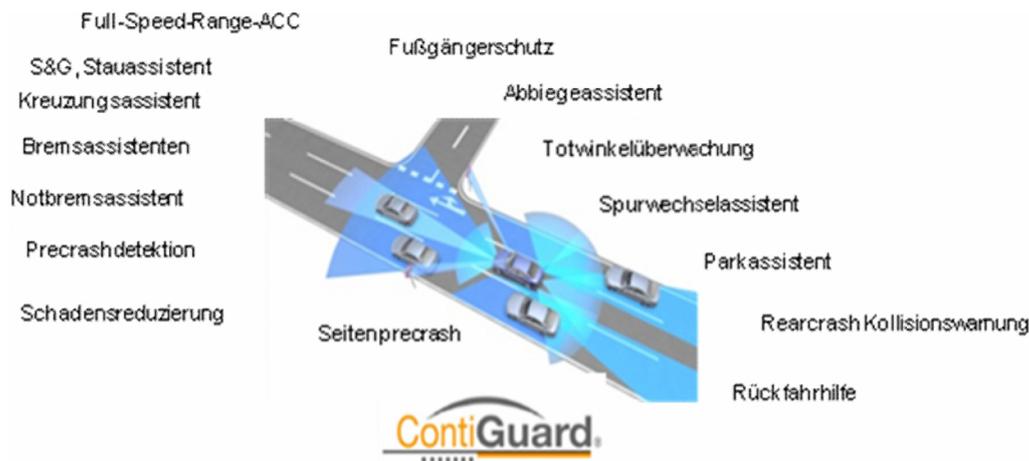


Abbildung 6: Typische Applikationen im näheren Fahrzeugumfeld.

Der Einsatz der Sensoren in Sicherheitssystemen bedingt hohe Anforderungen an die Qualität der Messdaten, sowie die Ausfallsicherheit und Zuverlässigkeit der Geräte. Es sind Algorithmen zu entwerfen, mit denen sich die Sensoren selbst überprüfen können, SW-Module zur Kalibration und zur Selbstdiagnose. Die gewünschte, zunehmende Verbreitung der Systeme im Sicherheitsbereich macht es notwendig, die Radarverfahren so zu konzipieren, dass eine gegenseitige Störung der Systeme möglichst unwahrscheinlich wird. Den Trend, die Sensoren zunehmend zur Steigerung der Fahrzeugsicherheit einzusetzen, soll folgende Übersicht verdeutlichen:



Abbildung 7: Markttrends bei Fahrerassistenzsystemen.

Bei der Spezifikation des Sensors treffen sich die Anforderungen von verschiedenen Funktionen mit teilweise sehr unterschiedlichen Ergebnissen. In der Regel weist jede Applikation ihre ureigenen kritischen Parameter auf, die entsprechend streng zu

spezifizieren sind. Allen Anforderungen gleichermaßen gerecht zu werden, kann, wenn überhaupt, nur einem hochpreisigen High-End Sensor gelingen. Möchte man hingegen ausgewählte Anwendungen mit einem günstigeren Sensor realisieren, z.B. um Sicherheitsanwendungen auch in einfacheren Fahrzeugklassen zu integrieren und so einem breiteren Kundenkreis zugänglich zu machen, ist es notwendig, die Anforderungen auf die jeweiligen Kernparameter einzugrenzen und die Spezifikation an die benötigte Funktion möglichst optimal anzupassen. Da sich einzelne Applikationen teilweise sehr stark unterscheiden, z.B. in Reichweite und Auflösung, besteht auch die Möglichkeit den Betrieb eines Sensors in mehrere Modi aufzuteilen. Das bedeutet die Sensoren können so ausgelegt werden, dass sie in mehreren Betriebsmodi sequentiell oder situativ umschaltbar arbeiten können und so auch an mehrere Applikationen angepasst werden können.

Radarsysteme zur Fahrzeugumfeldbeobachtung werden je nach Reichweite in Nah-(SRR) Mittel-(MRR) und Fernbereichsradar (LRR) unterschieden. Nahbereichsradar ermöglicht die Detektion von bewegten und unbewegten Zielen im Bereich von ca. 0 bis 30m. Mit einem MRR-Sensor sollte die Detektion von Objekten bis 80 oder gar 100 m möglich sein, mit einem LRR sogar über 200m.

Trägt man dem Megatrend der fortschreitenden Urbanisierung Rechnung, so kommt zukünftig Sensoren, die sich für den Einsatz in Großstädten zur Anwendung in sogenannten Cityassistenten eignen, möglicherweise eine besondere Bedeutung zu. Innerstädtische Szenarien sollten demnach bei der Auslegung zukünftiger Sensoren besonders berücksichtigt werden. Bei den im Stadtverkehr typischen Geschwindigkeiten bis zu 60km/h zeichnet sich eventuell eine weitere Sensorklasse ab, die voraussichtlich zwischen den SRR und MRR-Sensoren anzusiedeln sein wird.

Um der Vielzahl an Applikationen und Anforderungen gerecht zu werden, verfolgten wir die Strategie eine Basisplattform zu konzipieren, die möglichst einfach und flexibel an die verschiedensten Funktionen anpassbar sein sollte. Zu diesem Zweck wurde ein skalierbarer Systemansatz und ein modularer Aufbau gewählt. Das Basis-HF-Modul wurde mit acht digitalen Kanälen, 2 TX und 4 RX Kanälen ausgerüstet. Damit sollten bereits viele Funktionen darstellbar sein. Eine Anpassung an den notwendigen Beobachtungsbereich kann durch ein einfach austauschbares Antennenmodul vorgenommen werden. Reichweite und Entfernungsauflösung sind über eine parametrierbare Software einzustellen.

In Abstimmung mit den Vorstellungen der beteiligten Fahrzeughersteller erwiesen sich folgende Parameter als relativ unkritisch:

Frequenzband	79 GHz
Bandbreite	UWB
Radarverfahren	Pulskompression
Winkelmessverfahren	DBF
Winkelmessgenauigkeit	+/- 0,5°
Entfernungsmessgenauigkeit	+/- 0,05m
Geschwindigkeitsmessgenauigkeit	0,05m/s

Geschwindigkeitsmessbereich (eindeutig)	-500 ... +250km/h *)
Zykluszeit	40ms, abhängig von Funktion
Abmessungen	95 x 85 x 25 mm <sup>3</sup>
Betriebstemperatur	automotive

*Tabelle 2: Wunschspezifikation der Automobilhersteller*

\*) In den ersten Demonstrationssensoren konnte lediglich ein eindeutiger Messbereich von 90km/h zur Verfügung gestellt werden. Diese Einschränkung wurde gegen Ende des Projektes durch die Schaffung eines zusätzlichen SW-Moduls behoben. Dieses Modul kann in 2 Zyklen eine Plausibilisierung durchführen und die Mehrdeutigkeiten ausschließen. Damit kann eine Vervielfachung des Eindeutigkeitsbereiches erzielt werden.

Die folgenden Parameter haben einen sensiblen Einfluss auf die technische und finanzielle Konzeption der Sensoren:

Reichweite	abh. von HF Modul und Antenne (Beob.-bereich)
Beobachtungsbereich (Winkel)	abh. von Antenne
Winkelauflösung (Zieltrennung)	abh. von Anz. dig Strahlen u. Beob.-bereich
Entfernungsauflösung	abh. von HF-Modul und SW (Rechenleistg/Reichw)

*Tabelle 3: kritische Parameter der Sensorspezifikation*

Die in Tabelle 3 aufgeführten Parameter sind einzeln in weiten Bereichen einstellbar. Zusammen sind sie allerdings nicht frei wählbar, jedenfalls nicht ohne erheblichen Einfluss auf die Kostenstruktur. Eine Vergrößerung des Beobachtungsbereiches reduziert die empfangene Energie und damit die Reichweite. Beides zu vergrößern ist nur durch eine Steigerung der Sendeleistung und /oder die Empfindlichkeit, also über einen erheblichen zusätzlichen technischen Aufwand und auch nur bis zu einem gewissen Limit möglich. Dieses Limit ist in der Sendeleistung durch die Frequenzregulierung gegeben. Ein großer Beobachtungsbereich in Kombination mit einer hohen Winkelauflösung kann nur durch zusätzliche digitale Kanäle erreicht werden. Diese zusätzlichen Kanäle bedeuten eine Skalierung der HW-Bausteine und der Rechenleistung und damit der Kosten. Die Entfernungsauflösung in Kombination mit einer großen Reichweite hätte einen immensen zusätzlichen Rechenaufwand zur Folge, der ebenfalls direkt in die Kosten eingeht.

Für die genannten Parameter ist eine optimierte Anpassung an die jeweilige Applikation zwingend erforderlich. Eine Lösung ist ein Betrieb des Sensors in mehreren Modi, die im Betrieb vom Sensor umschaltbar sind, situativ oder zeitlich gesteuert.

Eine besondere Herausforderung bilden die Wünsche an die Entfernungsauflösung und den großen Winkelmessbereich. Die hohe Auflösung wird für Funktionen wie die Parkassistenten, den Fußgängerschutz, den Notbremsassistenten oder die Erkennung von Precrashszenarien benötigt. Der große Beobachtungsbereich entstammt u.a. dem Bedürfnis auch noch dicht vor dem Fahrzeug einen Bereich mindestens der Breite des Fahrzeuges entsprechend zu erkennen. Dies ist für die Früherkennung und Bewertung von

Gefahrensituationen unverzichtbar. [INV05] Ein getrennter SRR-Modus bietet sich damit an.

## II.1.2 APII: Sensorkonzepte und Design

Die Ziele des Arbeitspaketes waren:

- Auswahl und Anpassung des Radarverfahrens
- Ausarbeitung der Systemarchitektur
- Auslegung eines modularen Aufbaukonzeptes
- Definition der charakteristischen Kenngrößen
- Untersuchung von Kalibrierungskonzepten für DBF
- Partitionierung der SiGe-Bausteine und Spezifikation
- Auswahl und Optimierung des Antennenkonzeptes (mit Unterauftragnehmer, Universität Ulm)

### II.1.2.1 Das Sensorsystem

#### Das Radarverfahren:

Zur Messung der Entfernung und Geschwindigkeit wurde die Methode der Pulskompression ausgewählt, auch als „chirp sequence modulation“ bezeichnet. Das ist ein gepulstes FMCW-Verfahren mit linearer Frequenzmodulation [Lük09], [Win10]. Es gestattet die bestmögliche Nutzung der Signalleistung, der Bandbreite und der Messzeit.

Das Sendesignal wird mit Hilfe eines VCOs (Voltage Controlled Oscillator) generiert und über dessen Steuerspannung in seiner Frequenz sehr schnell linear verändert (beispielsweise in ca.  $8\mu\text{s}$  um 1 GHz, um eine gute Auflösung der Entfernung zu erreichen). Man spricht dabei von einer Frequenzrampe oder auch einem Chirp (siehe Bild 8). Die Frequenzrampen werden periodisch wiederholt (alle  $10\mu\text{s}$ ), wobei es jedoch noch eine kleine zufällige Verjitterung ihrer Anfangszeitpunkte gibt. Diese Verjitterung führt zu einer starken Abnahme der Empfindlichkeit für nicht korrelierte Einstrahlungen von anderen Sensoren. Damit wird vermieden, dass Störungen z.B. durch andere Fahrzeuge zu sogenannten Geisterobjekten führen können, welche für Sicherheitsfunktionen sehr kritisch sind.

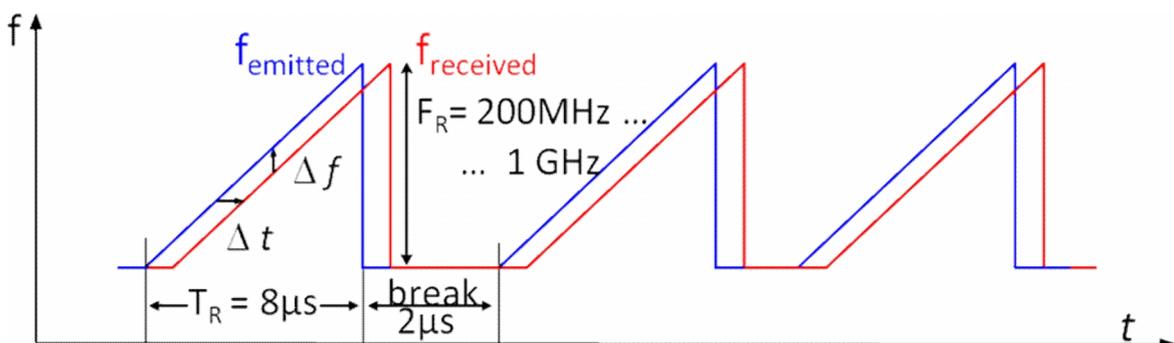


Abbildung 8: Frequenzmodulation im RoCC Sensor.

Das Empfangssignal wird mit der Sendefrequenz gemischt und somit in den niederfrequenten Bereich verschoben. Nach der Mischung ist das Empfangssignal eines einzelnen Objekts für jede Frequenzrampe eine sinusförmige Schwingung. Hat das Objekt die radiale Relativgeschwindigkeit Null zum Radarsystem, so ist die Frequenzdifferenz  $\Delta f$  zwischen empfangenem Signal und gesendetem Signal konstant und dabei proportional zur Signallaufzeit  $\Delta t$  mit  $\Delta f = \Delta t \times (df/dt)_{\text{Frequenzrampe}}$ . Die Frequenzdifferenz ist damit proportional zur radialen Entfernung  $r = c \cdot \Delta t / 2$ . Sie ist durch die Relativgeschwindigkeit noch um die Dopplerfrequenz verschoben, welche aber näherungsweise vernachlässigbar ist. Gibt es mehrere Objekte, so ist das Empfangssignal eine Überlagerung mehrerer sinusförmiger Schwingungen unterschiedlicher Frequenz. Sie werden nach einer DFT der abgetasteten Empfangssignale im Frequenzraum identifiziert. Jede der diskreten Frequenzstützstellen  $j$  der DFT korrespondiert zu einer Entfernung  $r$  und kann deshalb analog zu Pulsradaren auch als Entfernungstor bezeichnet werden.

Über aufeinanderfolgende Frequenzrampen  $k$  fallen für jedes Entfernungstor  $j$  (also jede der 112 betrachteten Frequenzstützstellen) komplexe Spektralwerte  $e(j,k)$  an. Gibt es in der zu einem Entfernungstor korrespondierenden Entfernung genau ein Objekt, so rotiert der komplexe Spektralwert in diesem Entfernungstor  $j$  über die Frequenzrampen mit der Dopplerfrequenz, da sich von Frequenzrampe zu Frequenzrampe die Entfernung (im mm-Bereich oder darunter) und damit die Phasenlage der zugehörigen Schwingung gleichförmig ändert.

Mehrere Objekte mit unterschiedlicher Relativgeschwindigkeit im selben Entfernungstor werden dadurch getrennt, dass für jedes Entfernungstor über die in aufeinanderfolgenden Frequenzrampen anfallenden komplexen Spektralwerte eine zweite DFT gerechnet wird. Nach dieser zweiten DFT für die Relativgeschwindigkeiten ergibt sich ein zweidimensionales komplexwertiges Spektrum, wobei die einzelnen Zellen als Entfernungs-Relativgeschwindigkeits-Tore bezeichnet werden können und durch Objekte Leistungsspitzen am jeweils zugehörigen Entfernungs-Relativgeschwindigkeits-Tor auftreten.

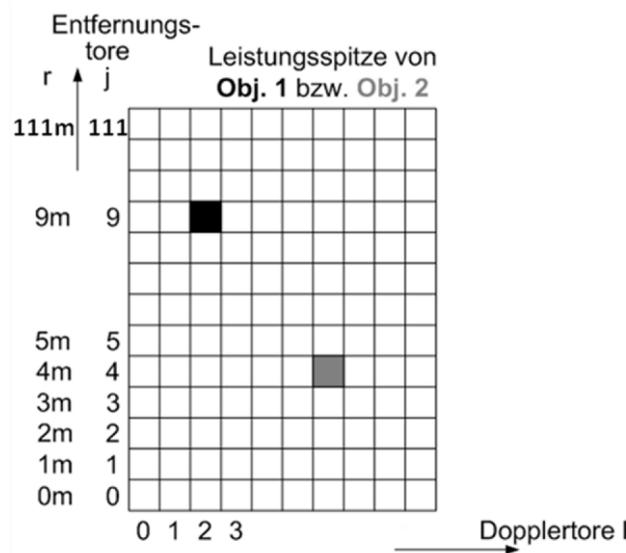


Abbildung 9: Zweidimensionales, komplexwertiges Spektrum nach der zweiten DFT.

Die Abtastung und die Fensterfunktion der Fouriertransformation beschränken die Auflösung und die Reichweite der Entfernungsmessung (bzw. der eindeutigen Geschwindigkeitsmessung). In den RoCC-Sensoren wählten wir im ersten Aufbau (MRR-Modus) einen Frequenzhub (Bandbreite) von 0,2GHz und erhielten damit eine Länge der Entfernungstore (Entfernungsauflösung) von 1m. Bei einer Anzahl von 112 Entfernungstoren ergibt sich ein maximaler Entfernungsmessbereich von 0 bis 111m. Für einen SRR-Modus kann auch ein Frequenzhub von 1GHz genutzt werden, der die Entfernungsauflösung auf 20cm verbessert, aber dementsprechend die Reichweite auf 22m reduziert. Innerhalb von diesem Bereich kann ein RoCC-Sensor fest eingestellt werden.

Das Verfahren ist insbesondere für den Nahbereich so einzustellen, dass eine möglichst hohe Auflösung der Entfernungs- und Geschwindigkeitsmessungen erreicht wird. Gleichzeitig sollten eine möglichst hohe Reichweite und ein großer eindeutiger Messbereich für die Geschwindigkeit zur Verfügung stehen. Nach einer Optimierung der typischen Kenngrößen, der Pulsdauer, des Frequenzhubes, der Wiederholfrequenz und der Abtastrate könnte dies durch einen Multimodebetrieb erreicht werden, der aber noch nicht implementiert wurde.

Zwei wesentliche Vorteile dieses Radarverfahrens sind:

- Entfernung und Relativgeschwindigkeit werden direkt und unabhängig gemessen; dadurch gibt es keine Mehrdeutigkeiten, wie in einem herkömmlichen FMCW-Verfahren, und zum anderen ist die Änderung der gemessenen Entfernung redundant zur direkt gemessenen Relativgeschwindigkeit, was eine gegenseitige Überprüfung erlaubt,
- hohe Störsicherheit gegenüber Störeinstrahlungen.

Durch beide Punkte werden die RoCC-Sensoren sehr robust für die Implementierung von Sicherheitsfunktionen. Das Ziel ist eine möglichst hohe Verfügbarkeit der Sensoren im Sicherheitsbereich zu erreichen.

### **Die Winkelbildung durch Digitale Strahlformung**

In der Vergangenheit wurde von automobilen Radarsensoren häufig eine quasi-optische Strahlformung genutzt mithilfe von Reflektoren und Linsen [Win09], [Men10], [Has12]. Systeme mit guter Winkelabbildung nutzen entweder eine mechanisch schwenkbare Antenne [Win07] oder eine elektronisch gesteuerte Gruppenantenne [Win09], [Men10], [Has12]. Der Kostenfaktor der Antenne und die mechanische Stabilität sprechen für das Antennenarray. Die Schwierigkeit liegt in der aufwendigen Ansteuerung bzw. der Auswertung der Antennensignale. Mit der Einführung der kostengünstigen SiGe-Technologie und einer immer kostengünstigeren Rechenleistung erscheint es zunehmend wirtschaftlicher, Arrays aus synchron arbeitenden Empfangsantennen zu benutzen. Nach

der parallelen Verarbeitung und der Digitalisierung wird die Phasendifferenz zwischen den einzelnen Antennen ausgewertet. Der klassische Ansatz liefert die Richtung durch das Maximum der Leistung aus einem räumlichen Filter, dem sogenannten Strahlformer.

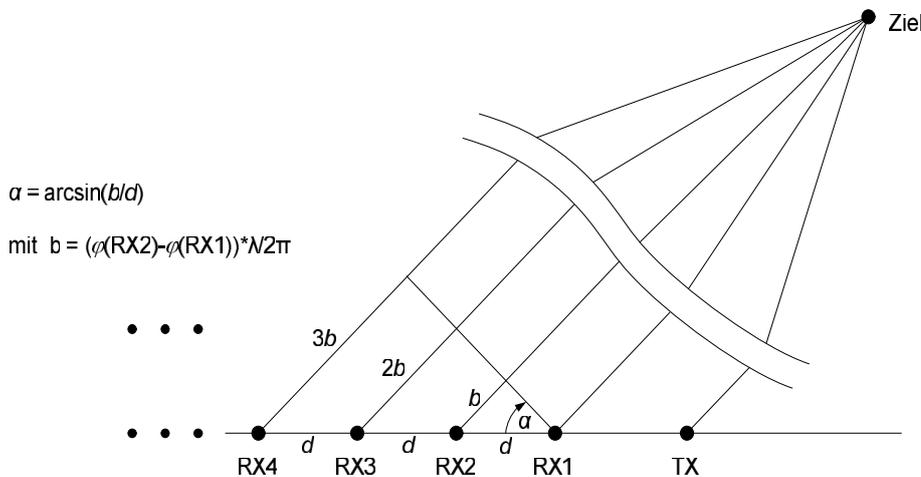


Abbildung 10: Prinzip der Digitalen Strahlformung.

Der RoCC Sensor nutzt ein MIMO (Multiple Input Multiple Output) Verfahren im Zeitmultiplex [Feg09]. Zwei abwechselnd betriebene Senderantennen und 4 nacheinander geschaltete Empfangsantennen [Kee95] entsprechen einem virtuellen Antennenarray aus acht Elementen, die in unserem Fall linear, im gleichen Abstand von jeweils  $1,75\lambda$  angeordnet sind [Feg08]. Dieser Antennenabstand führt zu einem Winkelbereich von  $\pm 17,2^\circ$  in dem die Winkelmessung eindeutig wäre. Die Einzelelemente haben jedoch ein breiteres Strahlungsdiagramm das den gewünschten Sichtbereich von etwa  $\pm 30^\circ$  abdeckt. Da der Sichtbereich größer ist als der eindeutige Winkelbereich, bilden sich Mehrdeutigkeiten in der Winkelmessung. Diese Winkelmehrdeutigkeit wird später in der Radarsignalverarbeitung, dem sogenannten Tracker aufgelöst. Die Digitale Strahlformung ist implementiert in Form einer FFT. Das eigentlich aus 8 Samplingwerten bestehende Array wird mit 8 Nullen aufgefüllt. Durch dieses „Zero-Padding“ erhält man 16 Werte, von denen jeder einzelne eine räumliche Empfindlichkeitscharakteristik aufweist, die dem typischen Strahlungsdiagramm einer Antenne entspricht [Win10]. Wir sprechen daher von 16 digitalen Strahlen oder Antennenkeulen, die sich in ihrer Ausrichtung jeweils um  $2,15^\circ$  unterscheiden. Da durch das Zero-Padding die Breite der Keulen nicht geändert wird, müssen sie sich partiell überlappen. Man erhält keine bessere Auflösung, nur eine bessere Interpolation. Über das Ergebnis ihrer Vermessung wird in II.1.4.2 (S. 62) berichtet.

Da die Anzahl verwendbarer Antennenelemente immer noch begrenzt ist, ergibt das klassische Digital Beamforming nur eine eingeschränkte Winkeltrennfähigkeit. Um diese zu verbessern, können hochauflösende Schätzverfahren eingesetzt werden, wie z.B. der MUSIC-Algorithmus (Multiple Signal Classification), der auf R. Schmidt [Schm86] zurückgeht, die eine deutlich bessere Unterscheidung von Zielen zulassen. Dies hängt im Wesentlichen davon ab, ob der erforderliche Rechenaufwand vom Sensor zur Verfügung gestellt werden kann.

## Die Kalibration

Für die Zuverlässigkeit eines Verfahrens, das auf der Phasenauswertung beruht, ist es ausschlaggebend, welche sonstigen Effekte diese Phasenlage beeinflussen können und mit welchen Messfehlern zu rechnen ist. Auf der Basis von Simulationsrechnungen untersuchten wir Abweichungen des Gains und der Phasen in den einzelnen Antennenelementen, Ungenauigkeiten in der Anordnung des Antennenarrays, die wechselseitige Kopplung zwischen den Elementen und Kombinationen der Effekte mit Berücksichtigung von Rauscheinflüssen. Die Ergebnisse demonstrieren die Bedeutung einer Kalibration. Die Simulationen zeigten, dass schon kleine Fehler ausreichend sind, die Verlässlichkeit einer Richtungsschätzung dramatisch zu reduzieren.

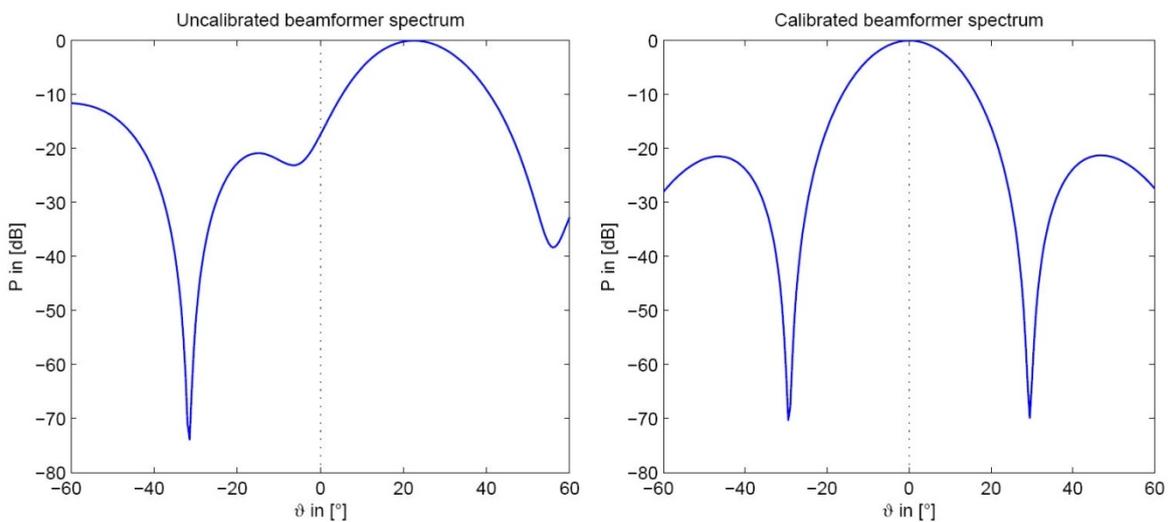


Abbildung 11: Spektrum des Strahlformers ohne und mit Kalibration (eine Quelle bei  $0^\circ$ ).

Wir konnten demonstrieren, dass eine Richtungsschätzung besonders empfindlich ist gegenüber Phasenfehlern der Empfangsantennen sowie Abweichungen in der geometrischen Anordnung der Antennenelemente. Aber auch Gainabweichungen und Überkopplungen können dazu führen, dass eine Richtungsschätzung unmöglich wird.

Es wurden verschiedene Kalibrationsmethoden untersucht, dazu gehören die globale Kalibration [Lan06], eine erweiterte Version der standardisierten globalen Kalibration [Lan07], die von einer optimalen Skalierung der Kalibrationsmessungen ausgeht, und die lokale Kalibration.

Die untersuchten Kalibrationsmethoden unterscheiden sich in der benötigten Anzahl der Stützstellen für die Kalibration, dem benötigten Speicherbedarf für die Gitterpunkte und dem Rechenaufwand zur Ermittlung der Kalibrationsmatrix.

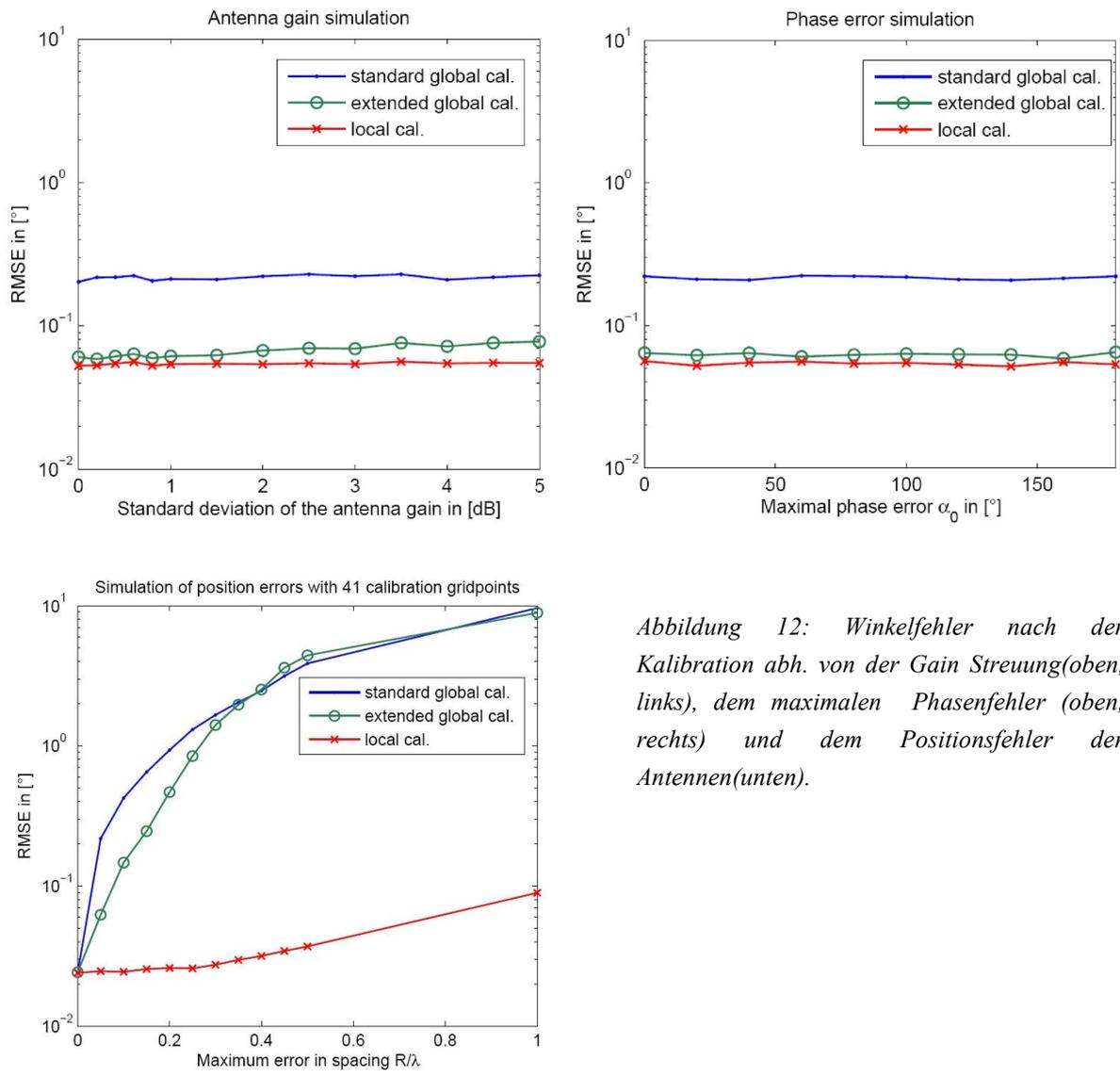


Abbildung 12: Winkelfehler nach der Kalibration abh. von der Gain Streuung (oben, links), dem maximalen Phasenfehler (oben, rechts) und dem Positionsfehler der Antennen (unten).

Die besten Ergebnisse liefert die lokale Kalibration. Die Leistungsfähigkeit der lokalen Kalibration profitiert von der großen Anzahl von Kalibrationspunkten. Für die anderen Kalibrationsmethoden genügt eine geringere Anzahl von Kalibrationsmessungen. Positionsfehler in der Anordnung der Antennenelemente zeigen den größten Einfluss auf die Genauigkeit der Richtungsschätzung.

Bei den oben untersuchten Kalibrationsmethoden handelt es sich um sogenannte Offline-Verfahren zur Korrektur stabiler Fehler. Diese Methoden können einmalig am Ende der Produktion angewendet werden.

### Online-Kalibration:

Der Betrieb der Fahrzeuge über lange Zeiträume und die damit verbundenen Alterungseinflüsse der Komponenten, Umwelteinflüsse wie beispielsweise die Einwanderung von Feuchtigkeit, sowie Änderungen von Betriebsparametern im Einsatz, z.B. durch Erwärmung, führen dazu, dass die einmal eingeführte Kalibration nach und nach verloren geht. Einflüsse, die während der Sensorlebenszeit auftreten, lassen sich daher nur durch Methoden korrigieren, die ebenfalls in der Betriebszeit möglichst vom Sensor selbst durchgeführt werden können. Die hohen Genauigkeitsanforderungen bei Anwendungen im Sicherheitsbereich machen es notwendig über derartige Maßnahmen, sogenannte Autokalibrationsverfahren, nachzudenken.

Zu diesem Zweck wurden Fehler untersucht, die in den einzelnen Empfangskanälen auftreten können, sowie Fehler, die sich aus der Überkopplung zwischen den verschiedenen Kanälen eines Arrays ergeben können. Zu den sogenannten Kanalfehlern gehören typischerweise Fehler in der Phase und im Gain. Die angewendeten Verfahren zur Richtungsbestimmung waren der klassische Strahlformer sowie hochauflösende Verfahren wie MUSIC[Schm86].

Zur quantitativen Behandlung wurde ein Fehlermodell für das Sensorarray erstellt.

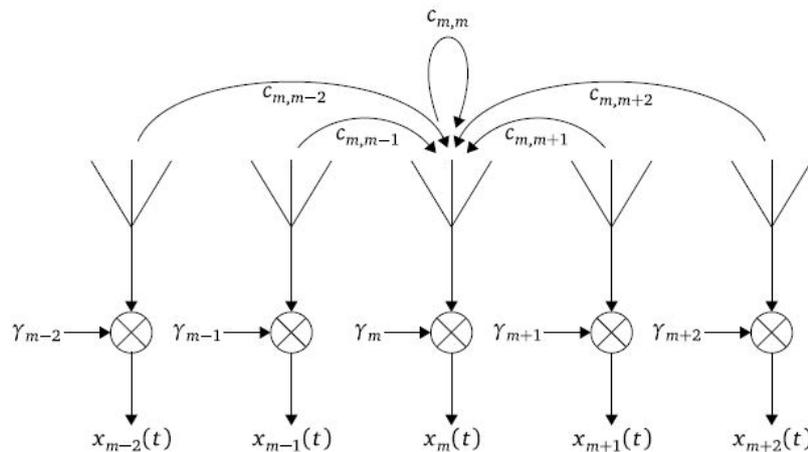


Abbildung 13: Schemaskizze des Fehlermodells des Sensorarrays.

Dabei beschreiben  $\gamma$  die Kanalfehler und  $C$  die Kopplungsparameter. Begonnen wurde mit einer Abschätzung der Fehlereinflüsse auf die Winkelbildung auf Basis einer Monte-Carlo-Simulation mit 1000 Versuchen. Genutzt wurde der konventionelle Strahlformer und ein Beispielszenario mit einem Target unter einem Winkel von  $10^\circ$ , einem SNR von 20dB, einem Array mit 8 Kanälen und einem Abstand der Arrayelemente von  $0,5\lambda$ .

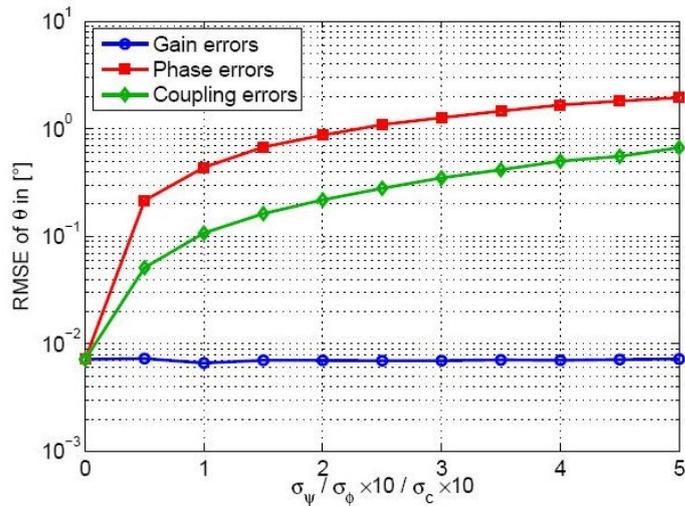


Abbildung 14: Winkelfehler abhängig von den Fehlern der Einflussparameter.

Im Ergebnis kann zusammengefasst werden, dass alle betrachteten Fehler eine maßgebliche Rolle spielen, wobei sich Gainfehler nur bei Mehrzielszenarien, nicht aber bei Situationen mit einem einzigen Target bemerkbar machen.

Für ein autonom agierendes System wurde folgender Ablaufplan entworfen:

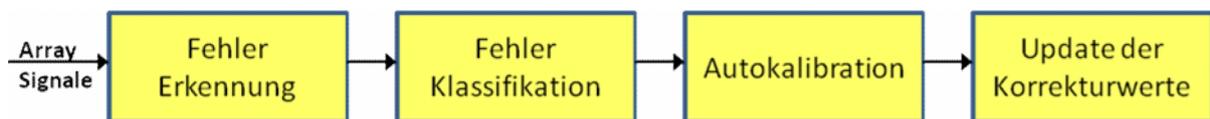


Abbildung 15: Ablaufschema der Autokalibration.

Ein wichtiger erster Schritt in der Praxis ist die Erkennung von Abweichungen im Rechenmodell. Die Grundlage hierfür bildet ein Algorithmus zur Fehlererkennung, der die Methode der linearen Regression und eine Analyse der Residuen nutzt. Nach der Detektion signifikanter Modellfehler werden die erforderlichen Autokalibrationsmechanismen in Gang gesetzt. Die gewählten Verfahren zur Autokalibration waren die Töplitzkorrektur für die Kanalfehler sowie das NSF-Kriterium und die Iterative MUSIC Methode zur Korrektur von Überkopplungen.

Zur Analyse der Leistungsfähigkeit von Autokalibrationsmechanismen wurden unterschiedliche Szenarien mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen durchgerechnet.

#### Kanalfehler:

Zu den Fehlern in den einzelnen Kanälen des Sensorarrays gehören Abweichungen im Gain und in der Phase. Berechnet wurde das Verhalten der Autokalibrationsmethoden abhängig von der Größe der auftretenden Fehler, d.h. der Varianz von Gain und Phase. Beispielhaft gerechnet wurde ein Mehrzielszenario mit Zielen bei 3° und 10°. Es zeigt sich klar, dass wir in der Lage sind mit den angewendeten Methoden die Kalibrationsfehler deutlich zu reduzieren. Einzige Ausnahme ist der Fall von sehr kleinen Fehlern in den Ausgangsgrößen. Hier wird das Ergebnis nach der Anwendung etwas schlechter. Leider

wird mit steigendem Fehler in den Ausgangsgrößen auch das Ergebnis der Autokalibration schlechter.

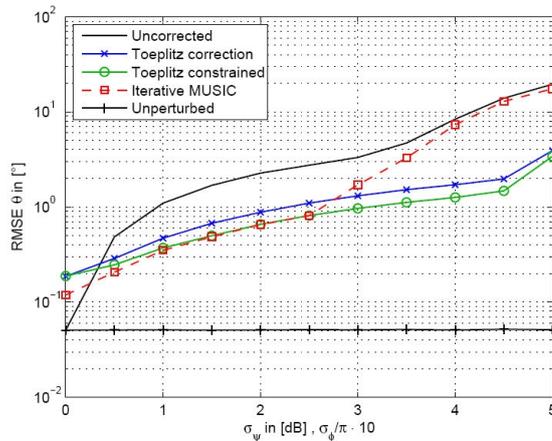


Abbildung 16: Fehler nach der Kalibration abhängig von Fehlern vor der Kalibration.

Kopplungsfehler:

Zur Untersuchung wie Autokalibrationsmechanismen die Auswirkung von Kopplungen zwischen den Kanälen reduzieren können, wird dasselbe Sensormodell benutzt, ein Sensor mit 8 Kanälen und einem Elementabstand von  $0,5\lambda$ . Beispielhaft gezeigt wird wieder ein Mehrzielszenario mit Zielen bei  $4^\circ$  und  $10^\circ$ . Für die Monte-Carlo-Simulation werden jeweils 1000 Versuche gerechnet. Das Ergebnis der Kalibrationsroutinen wird wieder dargestellt in Abhängigkeit des auftretenden Kopplungsfehlers. Es ist ersichtlich, dass die genutzten Kompensationsverfahren beide sehr effizient arbeiten und das schon bei sehr kleinen Werten des Kopplungsfehlers.

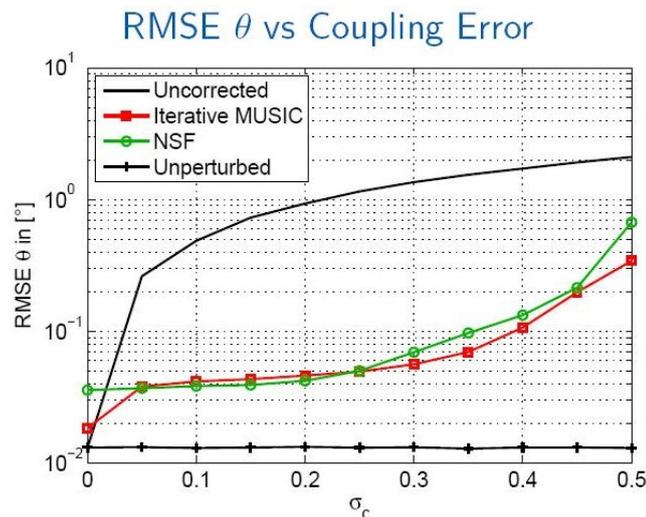


Abbildung 17: Fehler nach Kalibration beim Auftreten von Überkopplungen.

Die erzielten Ergebnisse der Autokalibrationsverfahren lassen auf eine erfolgreiche Anwendung hoffen mit einem vertretbaren Aufwand an Rechenleistung.

## **Das modulare Aufbaukonzept**

Für den Sensoraufbau wurde ein Konzept entworfen, das sich aus drei Modulen zusammensetzte:

- einem NF-Modul, der Steuer- und Auswerteeinheit (ECU)
- einem HF-Modul, zur Erzeugung und Verarbeitung der Mikrowellenstrahlung
- einem Antennenmodul zur Abstrahlung und dem Empfang

Das modulare Konzept sollte gewährleisten, die Technologie möglichst flexibel und skalierbar an zukünftige Bedürfnisse anpassen zu können, z.B. für den Einsatz in unterschiedlichen Applikationen.

## **Das NF-Modul (ECU):**

Die ECU hat im Wesentlichen die Aufgabe die Datenerfassung d.h. den Messzyklus zu steuern, die analogen Signale aufzubereiten, zu digitalisieren und auszuwerten. Die Auswertung kann mit der Übergabe der Objektdaten über CAN an einen Zentralrechner im Fahrzeug enden, wie im Projekt RoCC. Bei manchen Systemen übernimmt der Sensor aber auch die Funktion der Applikation, d.h. die Fahrzeugansteuerung. Die HW-Ressourcen sind entsprechend zu kalkulieren.

Die ECU übernimmt auch die Steuerung des HF-Moduls. Dazu gehören insbesondere die Regelung der Sendefrequenz und die Kontrolle der SiGe-Bausteine über die SPI-Schnittstelle. Zur Messung der Winkel ist die Erfassung und Digitalisierung der Signale von allen Empfangsantennen gleichzeitig notwendig.

## **Aufgaben der Datenauswertung**

Die Anwendung des beschriebenen Radarverfahrens liefert Leistungsspitzen in einem dreidimensionalen Datenfeld mit den Dimensionen Entfernung, Relativgeschwindigkeit und Winkel. Aus dem Pegel und der Entfernung dieser sogenannten Peaks wird der zugehörige Reflektionsquerschnitt (RCS = Radar Cross Section) geschätzt.

Peaks, welche näherungsweise gleiche Relativgeschwindigkeit haben und örtlich gesehen in einem ähnlichen Bereich liegen, werden unter der Hypothese von realen Fahrzeugen zusammengefasst – typischerweise gibt es an Fahrzeugen unterschiedliche Reflexionspunkte, z. B. am Heck und am Unterboden (weil die Straße als fast idealer Spiegel wirkt, ist der Fahrzeugunterboden radartechnisch sichtbar). Nach dieser Zusammenfassung erhält man die sogenannten Ziele, welche in jedem Zyklus eine Momentaufnahme der Situation darstellen.

Die Ziellisten werden in einen Kalmantracker gespeist. Über die Historienbildung (Verfolgung von Zielen über mehrere Zyklen) wird die Bewegung der Objekte abgeschätzt. Die Objekthypothesen werden auf Plausibilität überprüft. Falsche Hypothesen und Mehrdeutigkeiten werden beseitigt. Der Ausgang des Trackers liefert die sogenannte Objektliste, welche die Situation mit dem Wissen von aufeinanderfolgenden Zyklen beschreibt. Aus dieser Objektliste wird anschließend durch eine Situationsanalyse und - Interpretation dasjenige Objekt bestimmt, welches für die jeweilige Fahrerassistenzfunktion

die größte Relevanz besitzt, um daraus im Funktionsblock die Fahrzeugreaktionen abzuleiten.

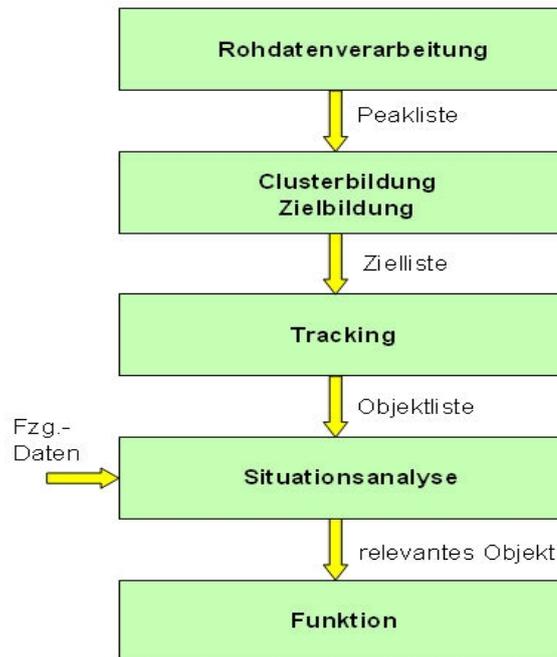


Abbildung 18: SW-Module und übergebene Datenlisten

Die abgebildeten Aufgaben sollen durch das folgende HW-Konzept umgesetzt werden:

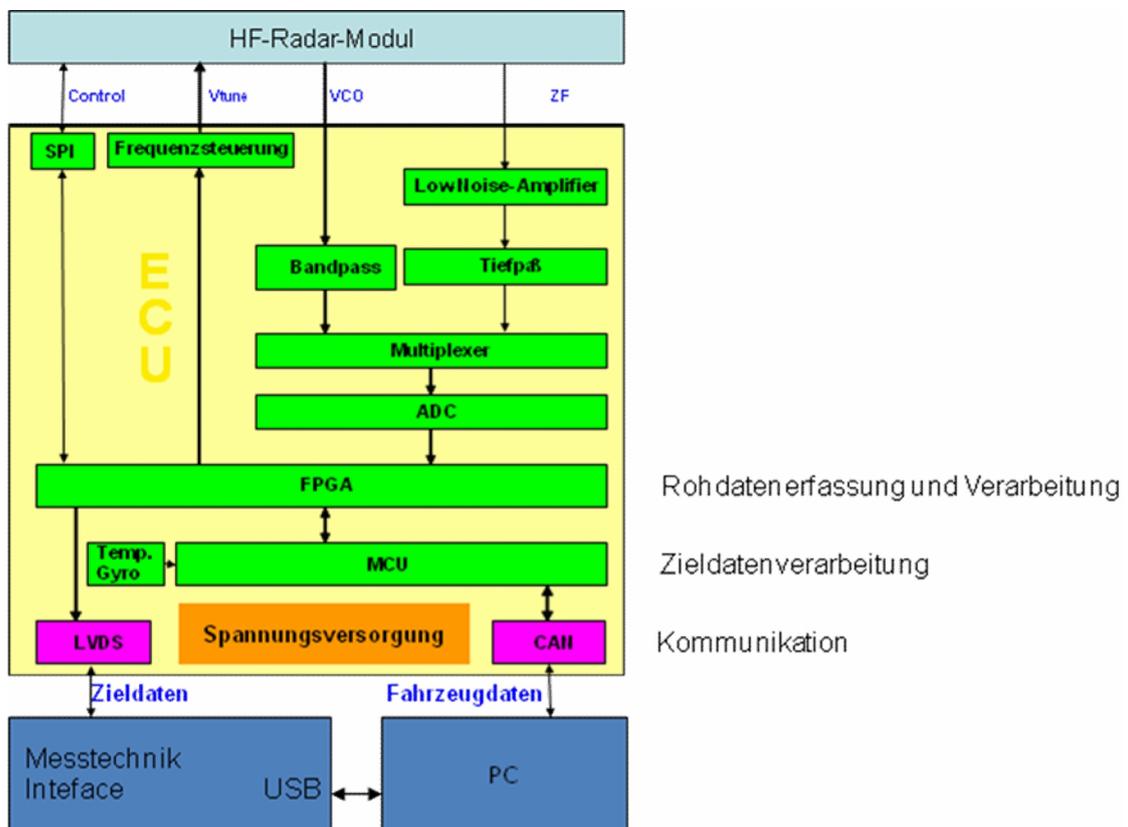


Abbildung 19: Blockschaltbild der ECU / NF-Platine.

Die Rohdatenverarbeitung, beispielsweise die Durchführung der Fourierausswertungen zur Bildung der Entfernungswerte, der Geschwindigkeitswerte und der Winkelinformationen bis zur Bildung der Peak-Liste, wird auf einem FPGA ausgeführt. Die SW-Module von der Zielbildung bis zur Situationsanalyse ebenso wie die Bewertung diverser Störungen zur Erhöhung der Ausfallsicherheit sind in einem Mikrocontroller integriert.

Da das ECU-Modul einen großen Teil zur Gesamtverlustleistung beiträgt, werden Methoden erprobt, die Verlustleistung auf dem ECU-Board durch Rationierung der HW-Ressourcen zu reduzieren. Ein nicht unbeträchtlicher Teil der HW-Entwicklung floss in den Aufbau einer Spannungsversorgung, die möglichst wenig Störungen auf den analogen Teil der Signalverarbeitung ausübt. Dieser Wunsch wurde berücksichtigt bei der Platzierung der Spannungsversorgung, dem Layout, sowie dem genutzten Frequenzspektrum, das in den Schaltnetzteilen zur Spannungswandlung genutzt wird.

Auch der Aufbau des NF-Boards folgte dem Leitgedanken Störungen möglichst zu vermeiden. Zu diesem Zweck wurden störende Module wie Schaltnetzteile, Versorgungsfilterung und digitale Signalverarbeitung auf der Platinenseite zusammengefasst, die der HF-Platine abgewandt ist, während die stöempfindlichen Einheiten, abgeschirmt durch die Masse-Lage auf der anderen Seite, der Kleinsignalseite mit niedrigem Rauschen, angeordnet werden, die der HF-Seite zugewandt ist. Auf der Kleinsignalseite befinden sich neben der Signalaufbereitung nur die Kontroll-ICs der Spannungsaufbereitung oder Linearregler. Der Boardverbindungsstecker ist am weitesten vom Kfz-Stecker entfernt. Unmittelbar neben der Boardverbindung ist die Signalaufbereitung platziert, um die Signalwege kurz zu halten.

### **Das HF-Modul:**

Zur Realisierung der Digitalen Strahlformung werden 2 Sendekanäle und 4 Empfangskanäle zur Verfügung gestellt. Dazu werden auf dem HF-Board 2 integrierte SiGe-Bausteine verwendet, ein Sende- und ein Empfangsbaustein. Die gewählte Partitionierung gestattet eine größtmögliche Flexibilität bei der Skalierung zukünftiger Produkte und ihrer Anpassung an unterschiedliche Applikationen. Außerdem wird die Anzahl der 79GHz-führenden Leitungen weitestgehend minimiert. Die Leitungsführung wird differentiell ausgeführt, um unempfindlicher gegenüber Störungen zu werden. Der Sendebaustein verfügt im Wesentlichen über einen spannungsgesteuerten Oszillator, über dessen Regelspannung die notwendigen Frequenzrampen erzeugt werden. Zur Messung der Frequenz wird ein Frequenzteiler benutzt, der die 79GHz in einen digital messtechnisch leicht zugänglichen Bereich überführt. Aus dem VCO werden über 3 Leistungsverstärker 3 kohärente Signale mit hoher Ausgangsleistung von etwa 9 dBm abgeleitet, die jeweils unabhängig voneinander gesteuert werden können. Eines der abgeleiteten Signale wird dem (Empfangs-)Mischerbaustein zugeführt, der aus 4 Einzelmischern besteht. Diese

Anzahl genügt, um die Eingangssignale der 4 Empfangsantennen parallel in den ZF-Bereich zu überführen.

Um die Anzahl der Signale, die über die Board-Steckverbindung geführt werden müssen, nicht zu groß werden zu lassen, werden die 4 ZF-Signale der Empfangskanäle über einen Multiplexer geführt.

Zur Steuerung aller Funktionen, inklusive dem Auslesen der Daten aus Temperatur- und Leistungssensoren auf dem SiGe-Baustein, wird eine SPI-Schnittstelle zur Verfügung gestellt.

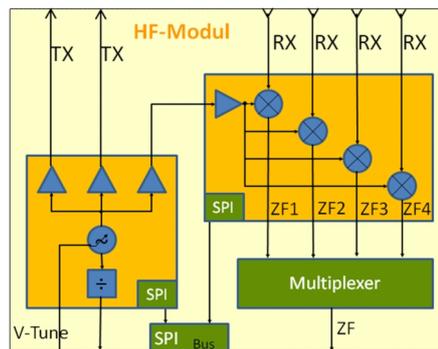


Abbildung 20: Blockschaltbild des HF-Moduls.

### Typische Kenngrößen:

Zur Beurteilung ob das Systemkonzept erfolgreich umgesetzt werden kann, ob der Sensor eine hinreichende Signalqualität liefert und die angestrebte Reichweite erzielt werden kann, dient die Signalbilanz über die Übertragungskette [Lud02]. Der RoCC-Sensor war für eine Reichweite von 60m konzipiert. Diese sollte für alle relevanten Objekte erreicht werden, also beispielsweise auch für Motorradfahrer. Auf dieser Grundlage wurde die folgende Bilanz erstellt. Die Herausforderung war, diese Eckdaten im praktischen Aufbau zu erreichen.

Parameter	Wert	Einheit	Bilanz	
Frequenz	7,90E+10	Hz		
Wellenlänge	3,80E-03	m		
Antennenfußpunktleistung	7	dBm	7	dBm
Antennengewinn Tx	18	dB	18	dB
Entfernung	60	m		
Zweiwegedämpfung	-153,00	dB	-153,00	dB
Ziel RCS	2	m <sup>2</sup>		
Ziel RCS	3,0	dBm <sup>2</sup>	3,0	dB
Antennengewinn Rx	18	dB	18	dB
<b>Empfangsleistung</b>			<b>-107</b>	<b>dBm</b>

Tabelle 4: Leistungsbilanz für einen RoCC Sensor.

Voraussetzung für die ermittelten Leistungsdaten sind typische, mittlere Werte für die Radarrückstreuquerschnitte, die aus gesammelten Daten zusammengestellt wurden:

Ziele	$\sigma$ [ m <sup>2</sup> ]	$\sigma$ [ dBsm ]
Mensch	~ 0.1 ... 1	~ -10 ... 0
Motorrad	~ 1..3	~ 0 ... 5
PKW	~ 10 ... 30	~ 10 ... 15
LKW	~100 ...500	~ 20 ... 27

Tabelle 5: Typische Radarquerschnitte

## II.1.2.2 Die Antennen



Unterauftrag der Universität Ulm - Institut für Mikrowellentechnik

### Einleitung

Das Ziel dieses, an der Universität Ulm im Unterauftrag von Continental ADC bearbeiteten Arbeitspaketes war die Entwicklung einer kostengünstigen, planaren Antenne für ein 79 GHz Kfz-Radar. Die genaue Spezifikation der Anforderungen an das Antennendesign wurde im Laufe des Bearbeitungszeitraumes überarbeitet und das Antennendesign dementsprechend verbessert und neu ausgerichtet. Als potentielle Kandidaten für den zu verwendenden Antennentyp wurden Patch-, Grid- und Schlitzantennen untersucht. Als ein geeignetes Konzept wurde schließlich eine Hohlleiter-Schlitzantenne ausgewählt und ein Antennenfrontend für den RoCC-Demonstrationssensor entwickelt. Der erste Abschnitt dieses Berichts beschäftigt sich mit den Spezifikationen einer Antenne für einen Kfz-Radarsensor. Danach wird auf die zu Beginn des Berichtszeitraumes untersuchten Patchkonzepte eingegangen. Ein vielversprechendes, alternatives Antennenkonzept stellt die anschließend gezeigte Gridantenne dar. Schließlich beschäftigt sich der letzte Teil des Berichts ausführlich mit der Entwicklung der, im Demonstrationssensor eingesetzten, Hohlleiter-Schlitzantenne.

### Sensorkonzept und Anforderungen an die Antenne

Der RoCC-Demonstrationssensor verwendet ein 2×4 TX/RX Antennenarray, um mittels eines TDM-MIMO Prinzips acht virtuelle Kanäle für einen Digital Beamforming (DBF) Winkeltrennalgorithmus zu erzeugen. Abbildung 21 zeigt die prinzipielle Anordnung der planaren Antennen auf dem HF-Substrat des Sensors. Dabei sind in blau die beiden Sende- und in rot die vier Empfangsantennen dargestellt. Da ein Zeitmultiplexverfahren angewandt wird, gibt es insgesamt acht auswertbare

Signalpfade, z.B. Tx2 nach Rx1, Tx1 nach Rx2. Mathematisch entspricht dies einer Faltung der Sende- und Empfangsantennenpositionen. In Abbildung 21 sind die entstandenen virtuellen Antennenpositionen in grün dargestellt. Mittels eines DBF-Algorithmus kann die FMCW-Radarantwort aus den acht aufgenommenen Samples berechnet und somit eine höhere Winkelauflösung erzielt werden.

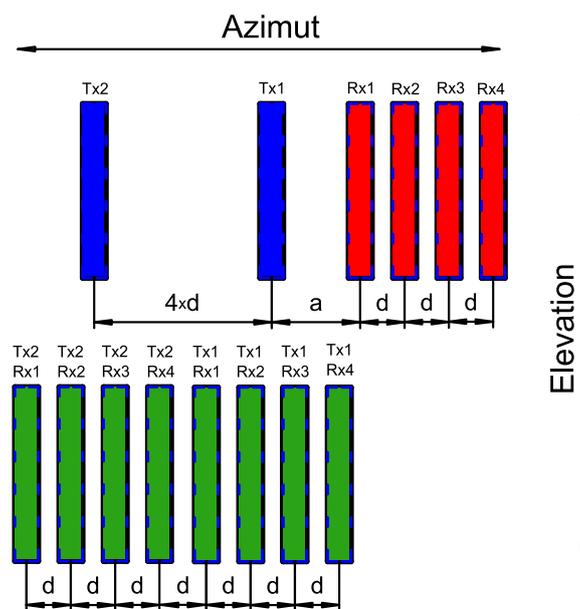


Abbildung 21: Positionen der realen und synthetischen Antennen.

Aus diesen Rahmenbedingungen leitet sich für die zu konstruierenden Einzelantennen des Arrays die Charakteristik einer hohen Bündelung in Elevation und einer breiten Keule im Azimut ab. Zudem sollte ein möglichst geringer Abstand zwischen den Antennenstreifen erreicht werden, um Mehrdeutigkeiten im sichtbaren Winkelbereich des Antennendiagramms auszuschließen. Für die RoCC-Sensorantenne wurde als anfängliche Spezifikation eine 3dB-Keulenbreite in Elevation von  $10^\circ$  und im Azimut von  $50^\circ$ , sowie ein Gewinn von 18 dB festgelegt. Die Bandbreite sollte zu Beginn des Projekts das gesamte 79 GHz UWB-Frequenzband für SRR abdecken. Unter anderem in parallel laufenden Arbeiten 0 stellte sich heraus, dass eine geringere Bandbreite für die Auflösung von Kfz-Radarzielen ausreichend ist. Deshalb wurde die Bandbreite nicht mehr als wichtigstes Ziel definiert und die Untersuchungen auch in Richtung MRR ausgeweitet.

## Patchantennen

Als Antennenkonzepte wurden ein Patch mit Via-Käfig gespeist durch einen substratintegrierten Hohlleiter (SIW – Substrate Integrated Waveguide), sowie ein serielles Patcharray mit differentieller Speisung untersucht. Patchantennen sind prinzipiell sehr schmalbandig und weisen nur wenige Prozent relative Bandbreite auf. Da die Bandbreite einer Antenne direkt im Zusammenhang zum abgedeckten Volumen steht, ist sie beim Patch somit proportional zur Höhe und umgekehrt proportional zur Wurzel der Permittivität des verwendeten Substrats. Deshalb fiel die Wahl auf ein 508  $\mu\text{m}$  dickes Rogers RO3003 Substrat für das Patch mit Via-Käfig (siehe Abbildung 22). Gespeist wird es über einen Schlitz durch einen SIW im darunter liegenden Substrat. Da somit jedoch Mehrlagentechnik, hier bestehend aus zwei Lagen RO3003 und einem Bondingfilm RO3001, benötigt wird, ist die Herstellung aufwendig und fehleranfällig. So führt z.B. eine Lagenverschiebung leicht zu einer Fehlanpassung und einem verzerrten Antennendiagramm. Ein Vorteil dieses Konzepts ist die Verwendung des SIW als verdeckte Speiseleitung, wodurch insbesondere bei einer Arrayanordnung parasitäre Abstrahlung durch das Verteilnetzwerk ausgeschlossen werden kann.

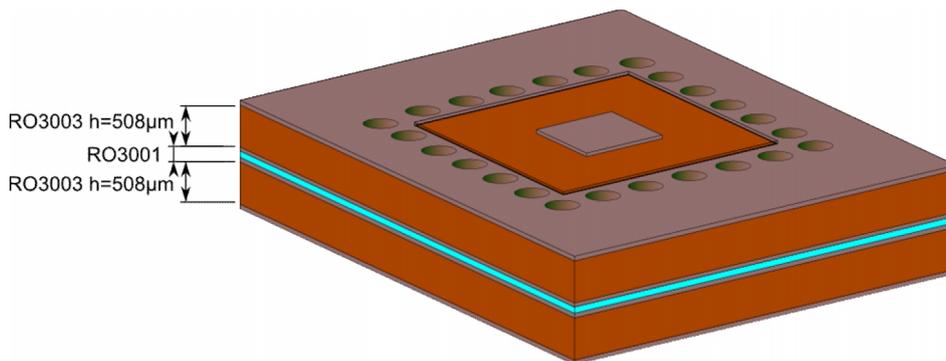


Abbildung 22: Patchantenne mit Via-Käfig und SIW-Speisung.

Das serielle Patcharray basiert im resonanten Fall auf einer gleichphasigen Anregung von Patchelementen über eine Mikrostreifenleitung. Dies ist bei dicken Substraten problematisch, da Mikrostreifenleitungen vor allem an Diskontinuitäten ungewollte Abstrahlung hervorrufen. Das untersuchte Array wurde deshalb auf einem 254  $\mu\text{m}$  dicken RO3003 entworfen. Über die Dimensionierung der Patchelemente lassen sich dabei das Nebenkeulenniveau und der Gewinn gut einstellen. Das serielle Konzept und das verwendete dünne Substrat jedoch machen diesen Antennentyp eher schmalbandig. Eine breitbandigere Alternative ist die „traveling wave“ Anregung bzw. Dimensionierung eines seriellen Patcharrays mit einem Lastwiderstand als Abschluss, dies wurde im Rahmen dieses Projekts jedoch nicht untersucht.

Ein großes Problem von Patchantennen ist die starke Anregung von Oberflächenwellen. Diese werden an Substratkanten gebrochen, abgestrahlt und interferieren mit der gewollten Abstrahlung im Fernfeld. Somit verringert sich die Effizienz der Antenne, und die Abstrahlcharakteristik zeigt unter Umständen eine starke Welligkeit. Eine Unterdrückung von Oberflächenwellen lässt sich durch spezielle Filterstrukturen, so genannte Electromagnetic Bandgap Structures (EBG), oder durch einen

Via-Käfig um das Patch herum erreichen. Diese Maßnahmen erhöhen meist auch die Direktivität, benötigen jedoch eine gewisse Mindestfläche und sind technologisch aufwendig. Im Hinblick auf eine Arrayanordnung wird der Einzelelementabstand erhöht, und somit verringert sich der Winkeleindeutigkeitsbereich.

Beide Konzepte für den Einsatz von Patchantennen wurden nur in Grundzügen ausgearbeitet und nicht weiterverfolgt, da sie zum Zeitpunkt des ersten Zwischenberichts 2010 als weniger aussichtsreich zur Erfüllung der Anforderung an den RoCC-Sensor erschienen.

### Mikrostreifenleitungs-Gridantenne

Das Konzept der Gridantenne wurde bereits 1964 zum ersten Mal von Kraus [1] vorgeschlagen. Eine erste Anwendung auf Mikrostreifenleitungstechnik wurde in [2] realisiert. Die erste numerische Analyse und weitere Optimierungen der Gridantenne wurden in [3-5] gezeigt. In den letzten Jahren wurde die Antenne schließlich auf LTCC-Technologie adaptiert [6] und mittels eines SIW gespeist [7]. Außerdem konnte im Rahmen dieses RoCC-Unterauftrags eine neuartige, differentielle Speisung [8] gezeigt werden [9].

### Funktionsweise

In der üblicherweise verwendeten Form aus Mikrostreifenleitungen gehört die Gridantenne zu den planaren Mikrostreifenleitungsantennen, die entweder resonant oder als „travelling wave“-Anordnung betrieben werden können. Eine Struktur aus rechteckigen Leitungsschleifen bildet das Gitter der Antenne. Eine rechteckige Einzelzelle, wie in Abbildung 23 gezeigt, hat eine schmale,  $\lambda_g/2$  lange Seite und eine breite,  $\lambda_g$  lange Seite. Somit stellt sich eine Momentanstromverteilung ein wie durch die Pfeile in Abbildung 23 angedeutet. Dabei überlagert sich die Abstrahlung der in grün gezeichneten Ströme konstruktiv, und der in rot destruktiv. Verbindet man diese Einzelzellen über  $\lambda_g/2$  lange Leitungsstücke strahlen die Elemente gleichphasig ab und es entsteht eine schmale Keule in der E-Ebene und eine breite Keule in der H-Ebene. Fügt man auch Elemente an der Seite dieser Kette an entsteht die typische zweidimensionale Gitterstruktur. Es lässt sich somit eine linear polarisierte, pencil-beam Abstrahlcharakteristik erzeugen.

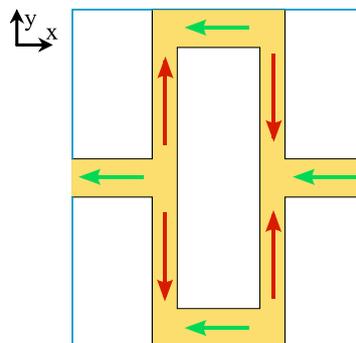


Abbildung 23: Momentanstromverteilung der Einzelzelle einer Gridantenne.

## Speisenetzwerk

Die Gridantenne bietet verschiedene Speisemöglichkeiten, unter anderem mittels eines Vias, über eine Schlitzkopplung, oder direkt über eine Mikrostreifenleitung. In dieser Arbeit wurde die Schlitzkopplung aus einem SIW heraus auf das Verbindungsstück einer Gridantenne untersucht. Abbildung 24 zeigt den Übergang von SIW auf die Mikrostreifenleitung des Gitters in Mehrlagentechnik. Dabei ist in einer 508  $\mu\text{m}$  dicken Substratlage RO3003 mittels Via-Reihen ein SIW realisiert. Über einen Schlitz in der oberen Massemetallisierung koppelt die Welle auf das Gitter über, welches sich auf dem darüber gelegenen 254  $\mu\text{m}$  dicken Substrat befindet. Mittels eines Bondingfilms RO3001 werden beide Lagen miteinander verbunden. Der Schlitz muss dabei circa  $\lambda_g/2$  entfernt vom kurzgeschlossenen Ende des Hohlleiters platziert werden. In einem weiteren Schritt wird die Resonanzlänge des Schlitzes bestimmt. Der Schlitz kann dabei als Übertrager repräsentiert werden und weist je nach Schlitzbreite und -versatz somit ein anderes Übersetzungsverhältnis auf. Da die Geometrie des substratintegrierten Hohlleiters und somit seine Ersatzimpedanz vorgegeben ist, kann in einen gewissen Impedanzbereich über die entsprechende Schlitzgeometrie auf die Mikrostreifenleitung des Gitters transformiert werden.

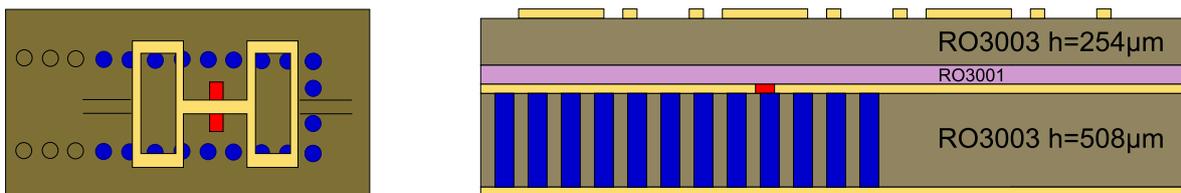


Abbildung 24: Schlitzkopplung von SIW auf Grid; links Draufsicht; rechts Lagenaufbau.

## Weiterentwicklung für den Einsatz im Sensor

Wie bereits erwähnt kann das Gitter in Resonanz betrieben werden, was jedoch die relative Bandbreite auf wenige Prozent einschränkt. Als „travelling wave“ Antenne dagegen weist sie eine größere Bandbreite auf und ist weniger empfindlich gegenüber Fertigungstoleranzen. Dieses Konzept wurde hierbei in abgeänderter Form angewandt. Dabei wird die Antenne mit einem einzelnen Gitterelement abgeschlossen welches auf die Zuleitungsimpedanz angepasst ist, um somit den sonst üblichen Abschlusswiderstand zu ersetzen. Um die geforderte Elevationsbündelung (E-Ebene) von circa  $8^\circ$  zu erhalten müssen 10 Einzelzellen zusammengefügt werden. Diese können mittels einer Zweiter-Vollwellenanalyse einzeln optimiert werden. Hierbei ist ein wichtiges Ziel eine Phasendrehung von  $180^\circ$  bei der Transmission zu erreichen. Außerdem kann durch die Durchgangsdämpfung die abgestrahlte Leistung und somit die Belegung der entstehenden Apertur eingestellt werden. Diese einzeilige Antenne wird um eine weitere Zeile auf  $2 \times 10$  Elemente erweitert, um eine höhere Bündelung in der H-Ebene (Azimut) zu erhalten (siehe Abbildung 25). Diese Gridantenne kann wiederum als Einzelelement eines Arrays aufgefasst werden. Dabei ist bei der Platzierung ein gewisser Mindestabstand zwischen den Elementen einzuhalten, da sonst die Mikrostreifenleitungen der angrenzenden Gitter stark miteinander kapazitiv verkoppeln. Im Fall der

betrachteten Antenne ergeben sich somit ein Elementabstand von  $1,65\lambda$  und ein Eindeutigkeitsbereich von  $\pm 17,5^\circ$ . Für die Speisung wird die Schlitzkopplung verwendet, wobei zwei Schlitze unter den mittleren Verbindungsstücken platziert werden und schließlich ein Leistungsteiler in SIW-Technik die Signale zusammenführt. Wiederum können so große Verteilnetzwerke mit geringen Verlusten und ohne parasitäre Abstrahlung durch die SIW-Technik realisiert werden.

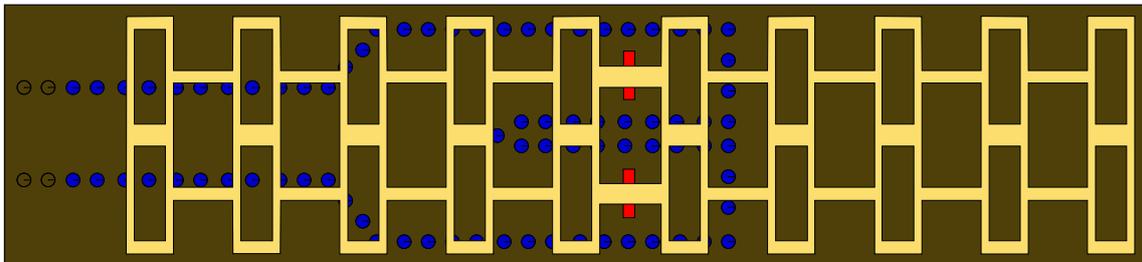


Abbildung 25: Schlitzkopplung von SIW auf zweizeiliges Gitter.

### Messungen und Ergebnis

Abbildung 26 zeigt den Vergleich der Abstrahlcharakteristiken der Simulation und der Messung jeweils für den Azimut (H-Ebene) und für die Elevation (E-Ebene). Im Azimut zeigt das Fernfeld der Antenne eine hohe Nebenkeulendämpfung von über 19 dB. Die 3dB-Keulbreite liegt bei circa  $30^\circ$  und der Abstand zwischen den ersten Nullstellen beträgt  $70^\circ$ . Die Hauptkeule weist bei der Simulation in der Elevation eine 3dB-Breite von  $8^\circ$  und eine Nebenkeulendämpfung von 15 dB auf. Bei der Messung hingegen ist die Hauptkeule um circa ein Grad gekippt und weist höhere Nebenkeulen auf. Diese Abweichung lässt sich durch einen Fertigungsfehler erklären. Beim Zusammenkleben der beiden RO3003 Substratlagen trat ein Versatz in Längsrichtung des Gitters auf. Hierbei wird das Gitter nicht mehr durch den Schlitz zentriert, sondern leicht versetzt angeregt und es kommt zu einer Phasenverschiebung. Wie ebenfalls in Abbildung 26 dargestellt, lässt sich dies durch eine nachträgliche Simulation der Lagenverschiebung um circa  $150\mu\text{m}$  nachvollziehen.

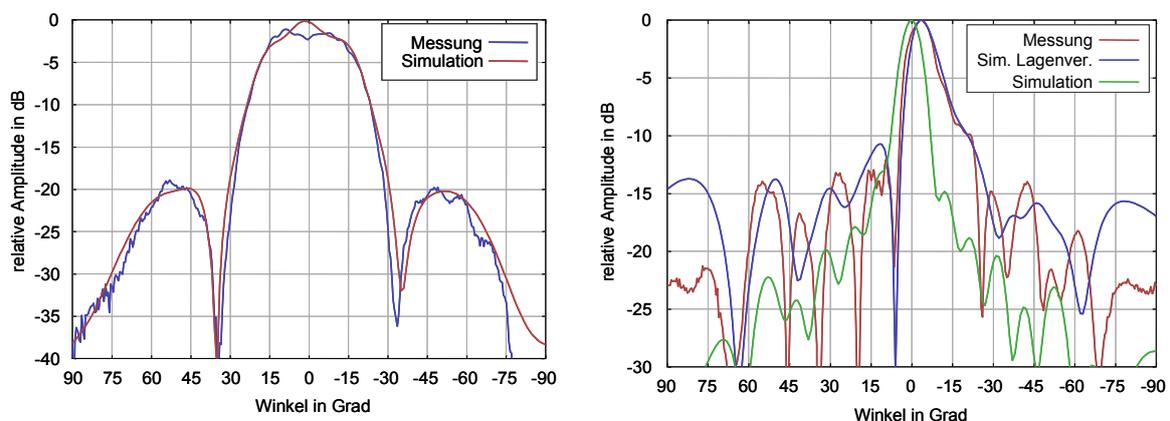


Abbildung 26: Vergleich von Messung und Simulation der Abstrahlcharakteristiken in Azimut (links) und Elevation (rechts).

Der gemessene absolute Gewinn der Gridantenne aus  $2 \times 10$  Elementen beträgt 16,1 dB inklusive aller SIW-Zuleitungsverluste. Die nutzbare Bandbreite, bei welcher eine stabile Abstrahlcharakteristik und eine gute Anpassung gegeben sind, beträgt circa 2-3 GHz. Ein großer Nachteil dieses Antennenkonzepts ist die aufwendige Mehrlagentechnik und die damit verbundene Fehleranfälligkeit bei der Fertigung.

## Substratintegrierte Hohlleiter-Schlitzantenne

### Einleitung

Im Rahmen des RoCC-Projekts wurden Hohlleiter-Schlitzantennen in substratintegrierter Form (SIW) untersucht, welche in ähnlicher Form ihren Ursprung in 0 und 0 haben. Dabei werden Ober- und Unterseite des Hohlleiters durch die Massemetallisierungen des Substrats und die Hohlleiterseitenwände durch Via-Reihen ersetzt. Die obere, breite Hohlleiterwand wird bei einer resonanten Schlitzantenne mit Schlitzöffnungen in regelmäßigen Abständen versehen welche verschiedene Formen annehmen können, wie Abbildung 27 zeigt. Form a) stellt einen von der Mittenachse versetzten Schlitz dar. Bei b) wird der Schlitz auf der Mittenachse gedreht. Die gebogene Form c) ist neu und weist die Besonderheit auf, dass bei konstantem Versatz von der Mittenachse die Belegung mittels des Anstellwinkels der Flügel 0 eingestellt werden kann. Bei Form d) handelt es sich um die ebenfalls weniger bekannte, so genannte Z-Form 0. Form e) ist schließlich die Kombination aus a) und b). Im Rahmen dieser Arbeit wurde nur Form a) betrachtet, da diese einfacher zu analysieren ist. Außerdem erzeugen die Schlitzformen b), d) und e) einen gewissen Kreuzpolarisationsanteil.

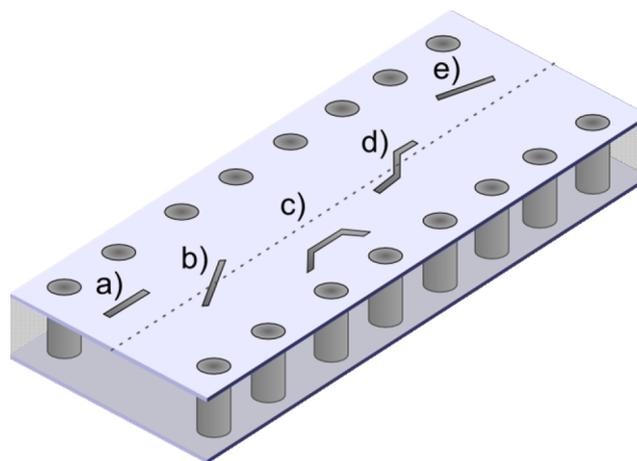


Abbildung 27: Verschiedene Schlitztypen in einem substratintegrierten Hohlleiter.

## Entwurf

Der erste Schritt beim Entwurf einer substratintegrierten Hohlleiter-Schlitzantenne ist die sinnvolle Wahl der Hohlleitergeometrie. Die originalen Abmessungen des E-Band-Hohlleiters betragen in der Breite 3,1 mm und in der Höhe 1,56 mm. Ein dementsprechender substratintegrierter Hohlleiter hat in diesem Frequenzband aufgrund der Permittivität des Substrats kleinere Abmessungen. Abbildung 28 zeigt die Ausbreitungskonstante  $\beta$  über der effektiven Hohlleiterbreite  $a$  bei der Mittenfrequenz von 79 GHz für die Grund- ( $TE_{10}$ ) und die erste höhere Mode ( $TE_{20}$ ). Damit nur die Grundmode im SIW ausbreitungsfähig ist muss somit die Breite, inklusive eines gewissen Schutzbereichs, unter 2200  $\mu\text{m}$  liegen. Andererseits sollte die Breite so groß wie möglich gewählt werden, damit der Verlauf der Ausbreitungskonstante möglichst flach ist und somit die Phasendrehung zwischen den Schlitzen über der Frequenz annähernd linear ist 0. Außerdem wird dadurch der Versatz der Schlitze größer und die Antenne somit einfacher zu fertigen.

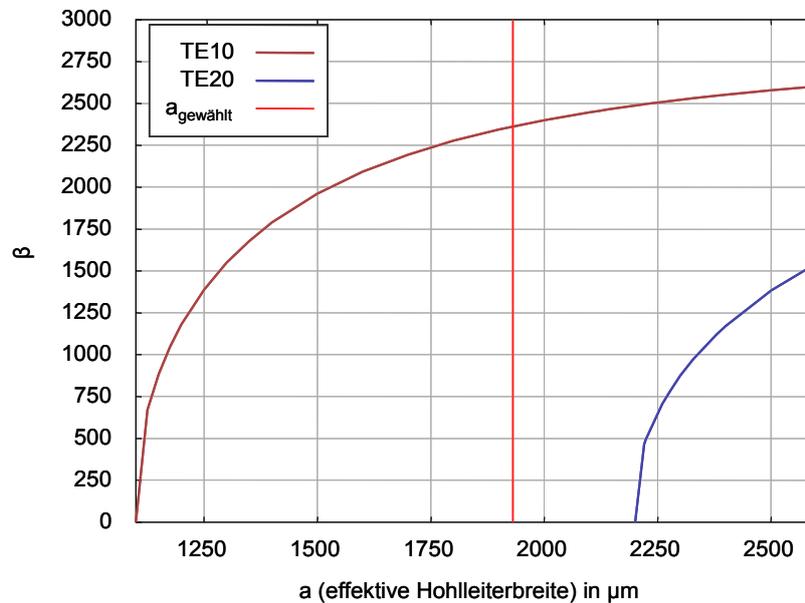


Abbildung 28: Ausbreitungskonstante über effektiver Hohlleiterbreite eines SIW bei 79 GHz.

Das Standardverhältnis eines Hohlleiters von 2:1 wird in der Regel beim SIW nicht eingehalten. Im Fall des verwendeten Substrats RO3003 stehen folgende Substratdicken und somit SIW-Höhen zur Auswahl: 127, 254, 508, 768, 1536  $\mu\text{m}$ . Hierbei sollte möglichst ein dickes Substrat verwendet werden. Zum einen verringern sich die Verluste des Hohlleiters umgekehrt proportional mit der Höhe und zum anderen ist der Versatz der Schlitze stark von der Höhe abhängig (siehe Abbildung 29). Passt man einen Schlitz in Resonanz an verschiedene Substratdicken an und lässt den Versatz dabei konstant, so zeigt sich, dass die Abstrahlung mit der Höhe abnimmt 0. Für ein Design mit vielen Schlitzen bringt ein hohes Substrat somit den Vorteil, dass sich die Schlitzpositionen

entzerren und somit weniger eng um die Mittenachse konzentrieren. Für das endgültige Design wurde das Substrat mit 768  $\mu\text{m}$  Dicke gewählt.

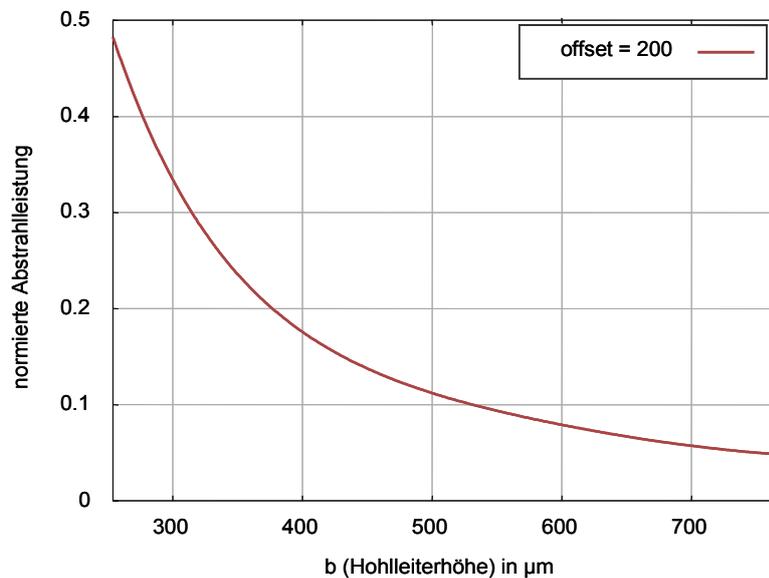


Abbildung 29: Normierte Abstrahlleistung eines Schlitzes mit 200  $\mu\text{m}$  Versatz über Hohlleiterhöhe.

### **Einzelschlitzanalyse**

Der nächste Schritt zum präzisen Entwurf von Schlitzantennen ist die Vollwellensimulation eines Einzelschlitzes. Dies wurde mittels des Frequenzbereichs-Solvers in CST Microwave Studio (MWS) 0 durchgeführt. Da der verwendete, von der Mittenachse versetzte Längsschlitz lediglich die transversalen Ströme im Hohlleiter stört, kann dieser in einem Ersatzschaltbild als einfache Paralleladmittanz aufgefasst werden. Hierbei gibt es zwei Möglichkeiten die Admittanz eines Schlitzes aus den Streuparametern zu bestimmen. Die erste Methode ist in *Abbildung 30* als Ein-Tor-Simulationsmodell mit entsprechendem Ersatzschaltbild 0 dargestellt. Hierbei wird ein kurzes Hohlleiterstück mit einem Kurzschluss abgeschlossen. Der zu untersuchende Schlitz wird  $\lambda_g / 4$  (geführte Wellenlänge bei der Mittenfrequenz) vom Kurzschluss entfernt platziert und somit in eine parallel geschaltete offene Leitung transformiert. Über eine  $\lambda_g / 2$  lange Leitung wird die normierte Ersatzadmittanz des Schlitzes schließlich direkt in  $S_{11}$  sichtbar.

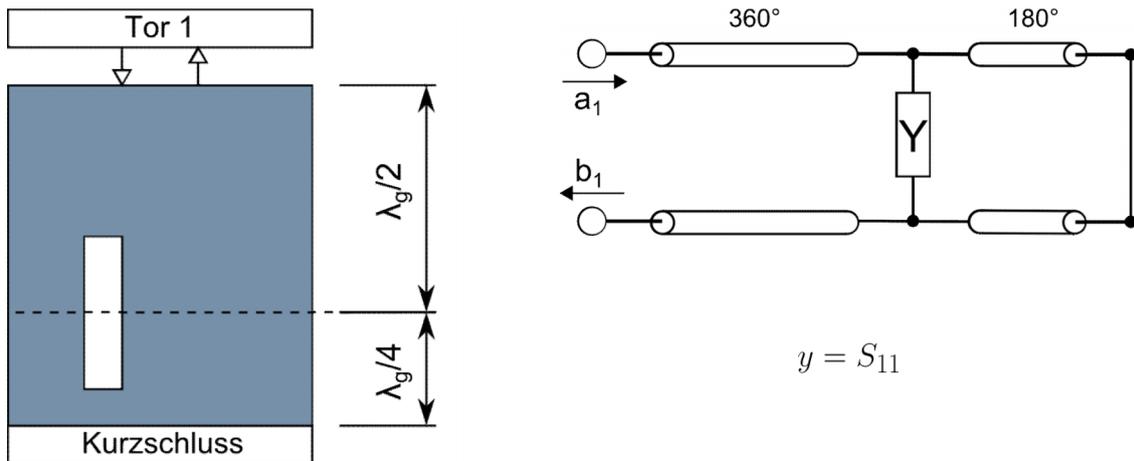


Abbildung 30: Ein-Tor-Simulationsmodell und Ersatzschaltbild des Einzelschlitzes.

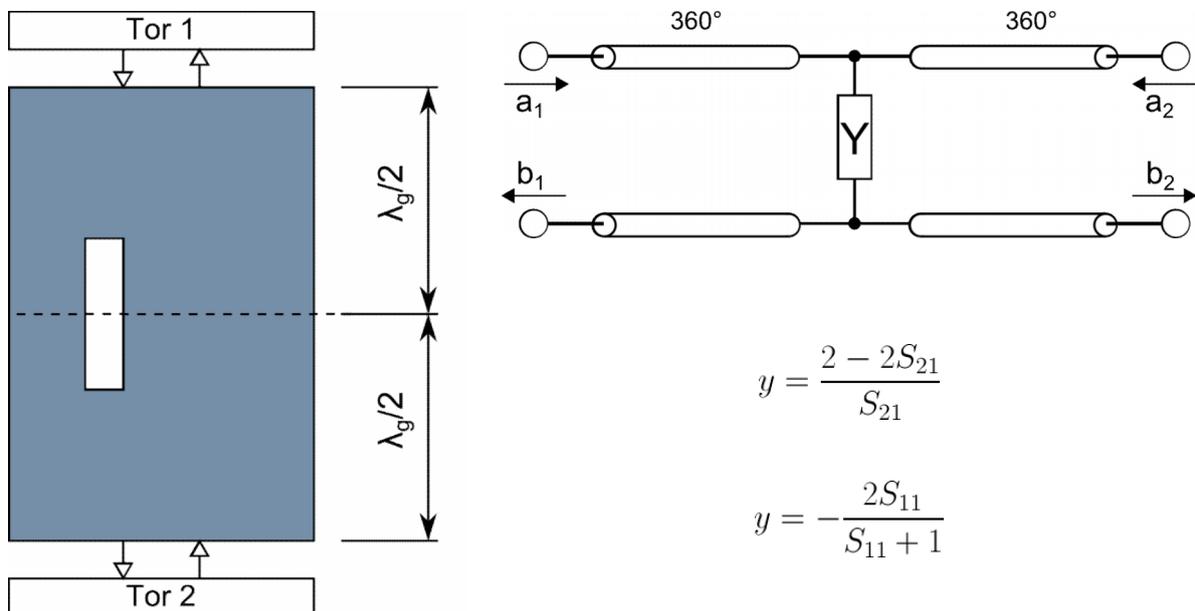


Abbildung 31: Zwei-Tor-Simulationsmodell und Ersatzschaltbild des Einzelschlitzes.

Eine andere Möglichkeit die Admittanz eines Einzelschlitzes zu bestimmen stellt das Zwei-Tor-Simulationsmodell (Abbildung 31) dar. Hierbei liegt der Schlitz in der Mitte eines kurzen Hohlleiterstücks, jeweils  $\lambda_g/2$  von beiden Toren entfernt. Entsprechend erhält man zwei Gleichungen zur Bestimmung der Admittanz. In der Praxis stellt sich eine Mittelung der Ergebnisse aus beiden Gleichungen als sinnvoll heraus. Wie aus der Theorie zu erwarten ist decken sich die Vollwellen-Ergebnisse des Ein-Tor- mit dem des Zwei-Tor-Modells, jedoch erfordert letzteres etwas mehr Simulationsaufwand in MWS.

Aus diesen Modellen lässt sich nun ein Datensatz für den Entwurf der Schlitzantenne berechnen. Dazu wird zunächst für jeden Versatz die entsprechende Resonanzlänge gesucht. Als Startwert kann dabei die Näherungsformel für die resonante Schlitzlänge  $l_r = \lambda_0 / \sqrt{2(\epsilon_r + 1)}$  verwendet

werden. Sobald der Imaginärteil der Ersatzadmittanz des Schlitzes null wird, ist die Resonanzbedingung erfüllt, dies entspricht somit der Ersatzkonduktanz. Diese Suche lässt sich in MWS mittels eines Optimierungsalgorithmus automatisieren. Außerdem kann jedem Schlitz eine Abstrahlleistung zugeordnet werden, welche sich über  $1 - |S_{11}|^2$  definiert. Somit erhält man die Kurven in Abbildung 32.

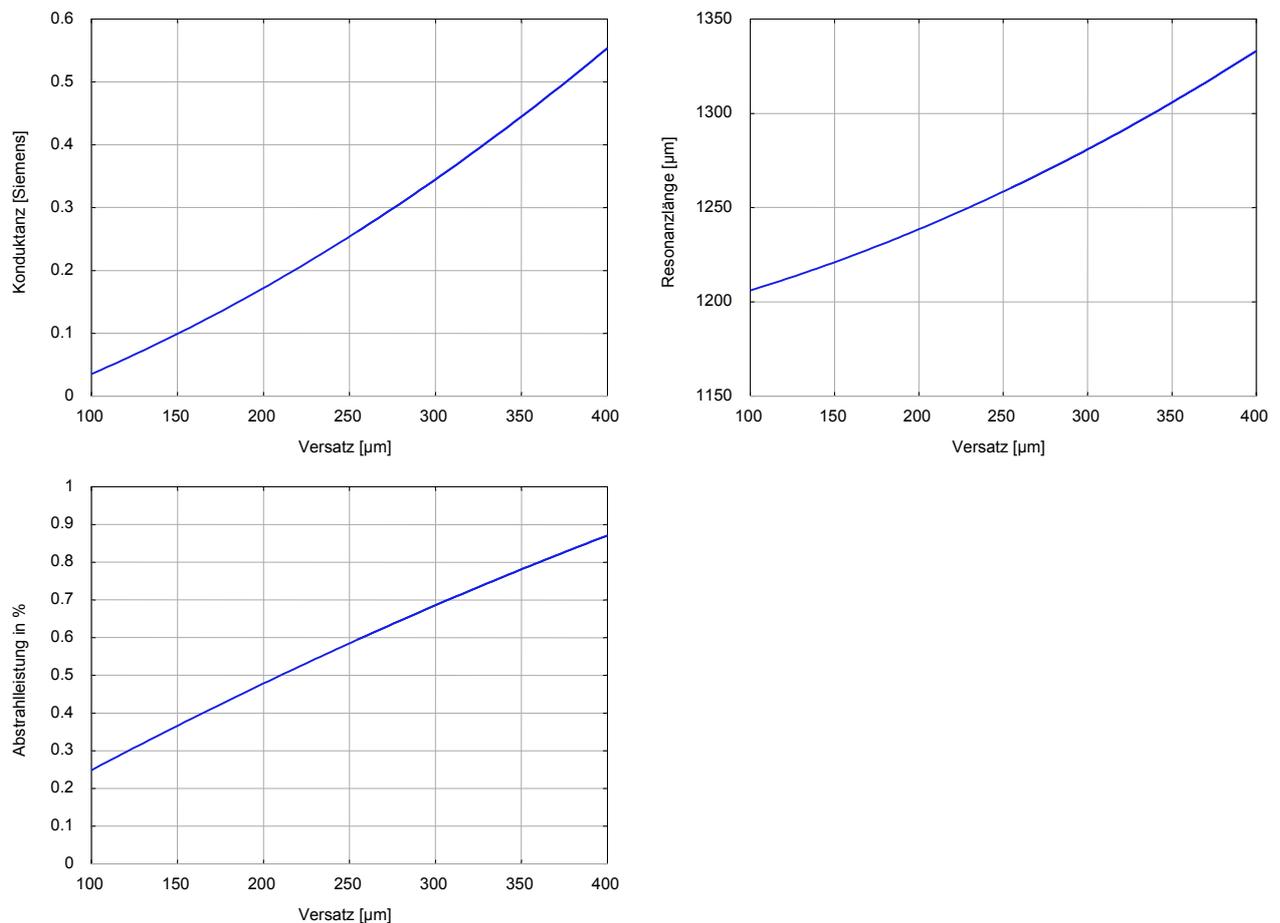


Abbildung 32: Simulierte Resonanzlänge, Konduktanz und Abstrahlleistung über Schlitzversatz.

Anschließend wird die Schlitzlänge für jede ermittelte Resonanz in einem Bereich von circa 95% bis 105% um die Resonanzlänge variiert und der Real- und Imaginärteil der Ersatzadmittanz bestimmt. Die gewonnen Diagramme werden nach Stegen als h-Kurven 0 bezeichnet und zeigen, wie zu erwarten, im Realteil ein Maximum und im Imaginärteil einen Nulldurchgang 0. Abbildung 33 zeigt diese Kurven beispielhaft für einen Versatz von 200  $\mu\text{m}$ . Anhand dieser Daten ist auch eine Abstimmung der Antenne möglich. So stellt man fest, dass zwei oder mehrere Schlitz eine gewisse Verkopplung aufweisen, welche sich vor allem in einer erhöhten Suszeptanz bemerkbar macht. Durch die Änderung der Schlitzlänge anhand der h-Kurven lässt sich diese Suszeptanz und somit die Verkopplung kompensieren. Entsprechend der h-Kurven wird jedoch auch der Konduktanz verkleinert, was sich wiederum auf die Anpassung der gesamten Antenne auswirkt.

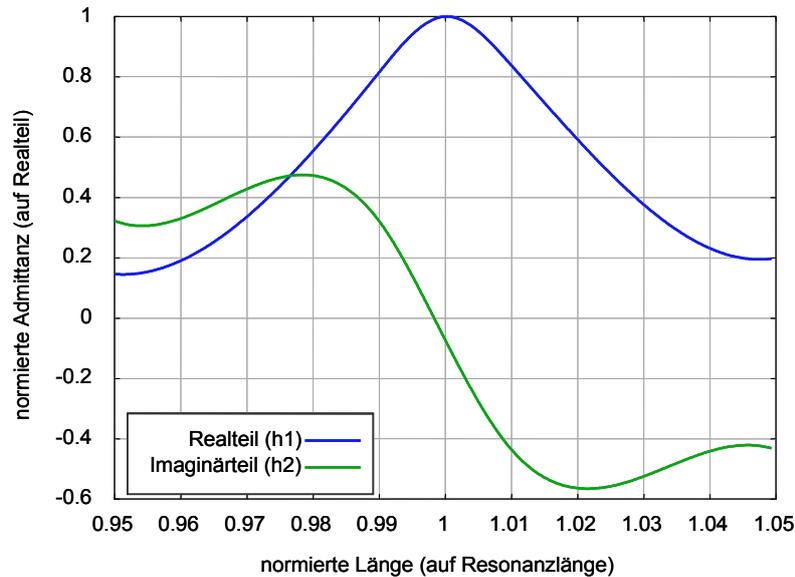


Abbildung 33:  $h$ -Kurven eines Schlitzes mit einem Versatz von  $200\ \mu\text{m}$ .

Zur präzisen Bestimmung der Verkopplung für den Antennenentwurf muß erst zwischen zwei zugrundeliegenden Mechanismen unterschieden werden: Zum einen die externe Verkopplung über die Abstrahlung und zum anderen die interne Verkopplung über höhere Moden. Die externe Verkopplung lässt sich mittels äquivalenter Dipole modellieren, wie in 0 gezeigt, wodurch das Ersatzschaltbild um eine Verkopplungsimpedanz erweitert wird. Dies ist jedoch in den untersuchten Fällen innerhalb einer SIW-Schlitzantenne zu vernachlässigen. Einen viel stärkeren Einfluß hingegen hat die interne Verkopplung über höhere Moden. Dies liegt vor allem an dem verringerten Breite-zu-Höhe-Verhältniss des substratintegrierten Hohlleiters, wie 0 zeigt. Um diese Verkopplung mittels einer Ersatzimpedanz genau abzubilden ist eine Vollwellensimulation der betrachteten Schlitzes nötig. Hierbei ist es ausreichend zwei benachbarte Schlitzes in einem gemeinsamen Modell zu simulieren, wie in Abbildung 34 gezeigt. Somit werden die bereits bekannten Admittanzen  $Y_{\text{Schlitz}1}$  und  $Y_{\text{Schlitz}2}$  mit der Verkopplungsadmittanz  $Y_{\text{Schlitz}12}$  parallel geschaltet. Es lässt sich somit die Verkopplung für jedes im Antennendesign auftretende, benachbarte Schlitzpaar simulativ bestimmen.

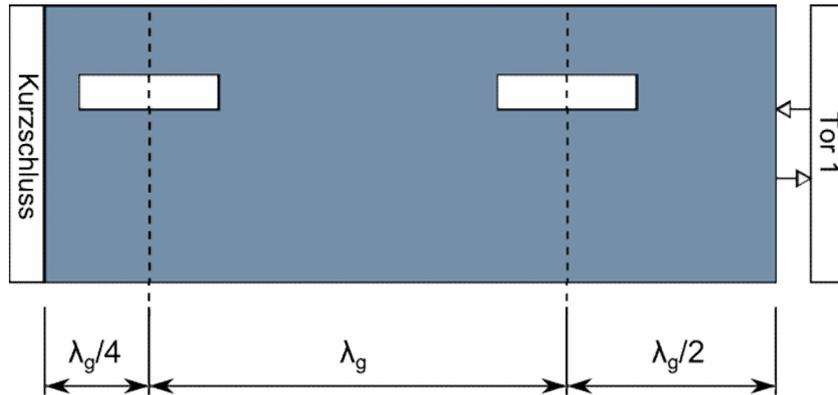


Abbildung 34: Simulationsmodell zur Bestimmung der Verkopplung zweier Schlitze.

Neben der Variation der Schlitzlänge kann auch die Schlitzbreite zur Abstimmung der Antenne verändert werden. Wie Abbildung 35 zeigt kann das Prinzip der h-Kurven auch auf die Änderung der Schlitzbreite angewandt werden. Dabei wird die Schlitzbreite in Abhängigkeit von der zuvor bestimmten Resonanzbreite variiert um eine ähnliche Art der Kompensation wie mittels der h-Kurven zu erreichen. Für die hier betrachtete integrierte Schlitzantenne scheint dies eine sinnvolle Möglichkeit zu sein, die Koppeleffekte stärker zu unterdrücken.

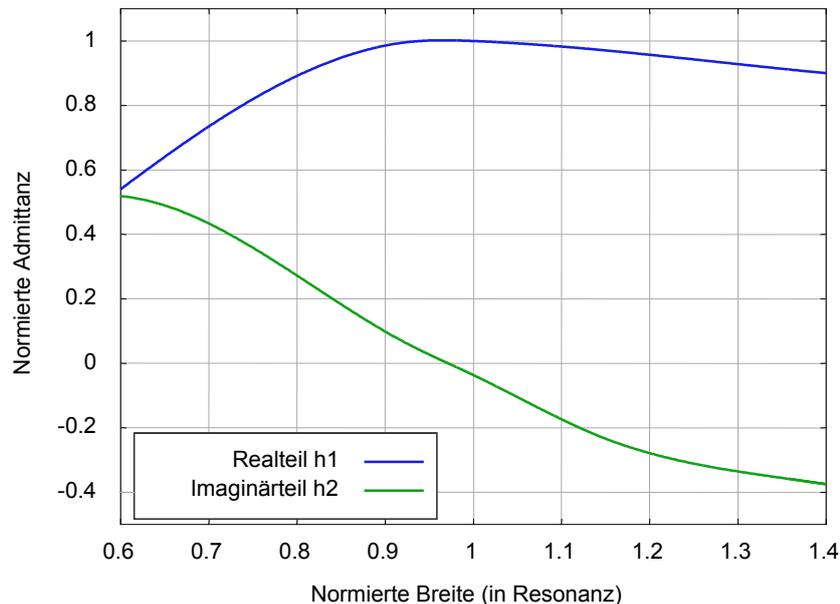


Abbildung 35: Änderung der Schlitzbreite in Abhängigkeit der Resonanzbreite (vgl. Stegen).

## Speisenetzwerk

Das endgültige Design der Schlitzantenne mit 15 Schlitzen erreicht eine schmale Keule von  $10^\circ$  in Elevation und eine hohe Direktivität von 14,4 dBi. Die betrachteten Schlitze weisen eine Taperung auf um eine hohe Nebenkeulenunterdrückung von 20 dB zu erhalten. Da laut Spezifikation ein Gewinn von mindestens 18 dB erreicht werden sollte, ohne dabei die Abstrahlung in der Elevation zu

verschmälern, wurden drei Schlitzreihen nebeneinander platziert, wie in Abbildung 36 dargestellt. Dieses Subarray zeigt einen erhöhten Gewinn, eine identische Keule in der Elevation und eine verschmälerte im Azimut. Ein passender dreifach-Teiler in SIW-Technik dient zur Speisung des 3×15 Subarrays. Dieser verteilt die Leistung ungleich und führt somit zu einer Amplitudenbelegung im Azimut. Des Weiteren erzeugt der Teiler eine Phasenabweichung bei der Aufteilung, welche jedoch durch eine Längsverschiebung des mittleren Elements kompensiert werden kann.

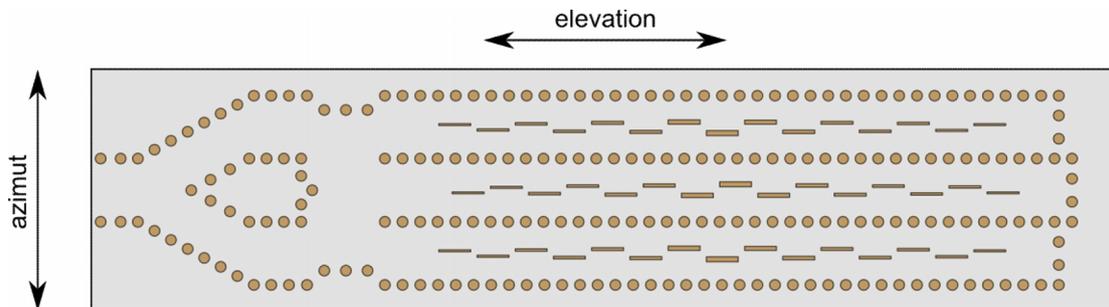


Abbildung 36: Zeichnung des 3x15 Subarrays aus substratintegrierten Hohlleiter-Schlitzantennen.

Wie bereits beschrieben implementiert der Sensor eine Digitale Strahlformung auf Basis eines 2×4 TX/RX-MIMO FMCW Konzepts, wodurch die Positionen der Subarrays durch den Signalverarbeitungsalgorithmus vorgegeben sind. Eine Leiterkarte mit dem DBF-Layout wurde zu Testzwecken hergestellt. Um Standard-WR12-Hohlleiterequipment zur Messung verwenden zu können, wurde ein Übergang von SIW zu WR12-Hohlleiter aus 0 auf das verwendete Substrat adaptiert und auf die Testleiterkarte eingefügt.

### Herstellung und Messungen

Abbildung 37 zeigt die hergestellte Antennenleiterkarte mit der 2×4 TX/RX Konfiguration von Subarrays inklusive dem dreifach-Teiler und den Messübergängen unter eine Aluminiumkappe. Das Substrat ist auf einem Aluminiumträger befestigt und wird Rücken an Rücken mit dem Sensor verschraubt.

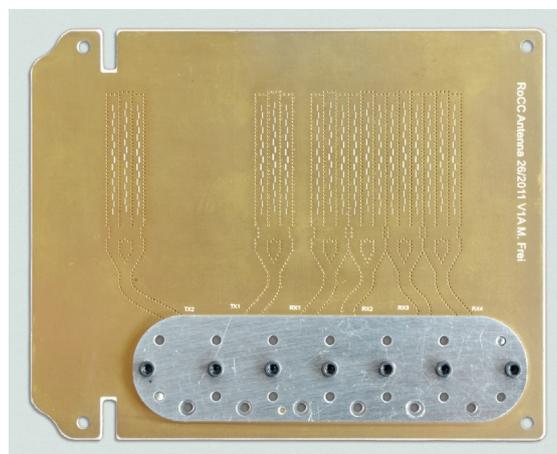


Abbildung 37: Foto der Testleiterkarte mit 2 TX- und 4 RX-Subarrays.

In Abbildung 38 ist der Vergleich von simulierter und gemessener Abstrahlcharakteristik eines einzelnen Subarrays in der Elevation (H-Ebene) und im Azimut (E-Ebene) aufgetragen. Das gemessene als auch das simulierte Nebenkeulenniveau liegt bei circa -20 dB für den Azimutwinkelbereich. Es wird eine 3 dB-Keulbreite von 34° erreicht. In der Elevation liegt die Nebenkeulenunterdrückung bei 18 dB in der Simulation und bei 20 dB in der Messung. Wie erwartet zeigt die Messung eine 3 dB-Keulbreite von 11°. Das gesamte Subarray hat einen absoluten Gewinn von 16 dB inklusive der Verluste durch die Messübergänge.

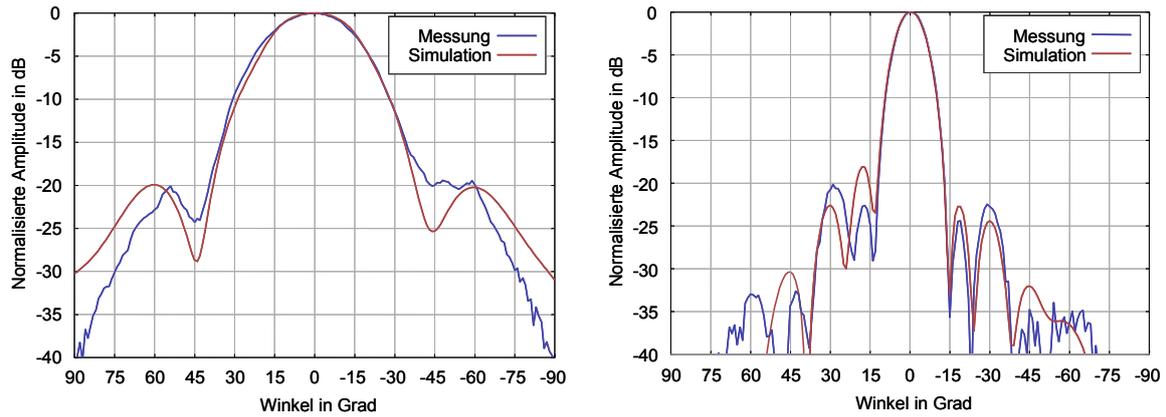


Abbildung 38: Vergleich von gemessener und simulierter Abstrahlcharakteristik in der Elevation (links) und im Azimut (rechts) eines einzelnen Subarrays.

## II.1.3 APIV: Systemintegration

Ziele des Arbeitspaketes:

- Evaluierung von Aufbau und Verbindungstechnologien
- Erstellung der SW-Module
- Aufbau der Demonstrationssensoren
- Musterbau, Integration und Inbetriebnahme

### II.1.3.1 Aufbau und Verbindungstechnologie

#### Untersuchung von Leiterplattenmaterialien

Ein bedeutender Kostenfaktor in Radarsensoren ist das benötigte HF-Substrat. Im Rahmen von RoCC wurden diverse HF-Substrate geprüft. Der Übergang von 24 auf 79GHz setzt die Fähigkeit voraus, kleinere Strukturen mit geringerer Fehlertoleranz produzieren zu können. Technologien mit deren Hilfe die notwendigen Strukturen generiert werden können, wie z.B. LTCC, treffen voraussichtlich nicht den anvisierten Kostenrahmen von RoCC, der ja die Einführung auf breiter Basis ermöglichen sollte. Wir haben uns daher entschieden auf standardisierte preisgünstige HF-Materialien zurückzugreifen, wie z.B. Rogers3003, deren Verwendbarkeit für den neuen Frequenzbereich von 79GHz allerdings noch besser untersucht werden musste.

Diverse Eigenschaften des Platinenmaterials wurden über die Streuparameter aus Freiraummessungen ermittelt. (Messaufbau siehe Abb. 39)

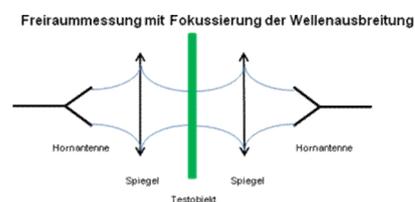
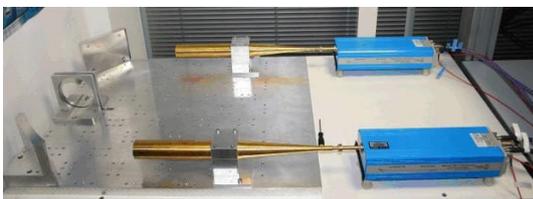


Abbildung 39: Bild und Schema des Aufbaus zur Freiraummessung.

Elementare Eigenschaften des Platinenmaterials sind beispielsweise die Permittivität und die Dämpfung ( $\tan\delta$ ). Problematisch ist der starke Anstieg der Dämpfung mit der Frequenz. In Abb. 40 werden exemplarisch Messungen von Rogers 3003 gezeigt.

- Weichsubstrat Rogers Ro3003
- Prüfkörperdicke 1.5 mm

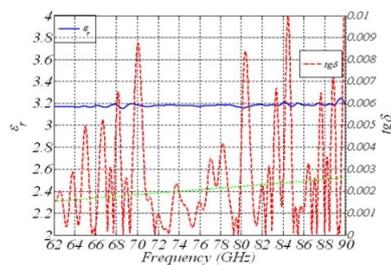


Abbildung 40: Messungen der Permittivität und der Dämpfung ( $\tan\delta$ ) von Rogers3003.

Eine weitere Methode zur Ermittlung der HF-Eigenschaften und der auftretenden Toleranzen bei der von uns gewählten Platinentechnologie war die Nutzung von Teststrukturen zur Charakterisierung. Insbesondere die Einfügedämpfung wurde mit einem solchen Testaufbau gemessen.

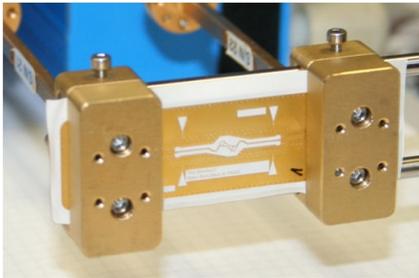


Abbildung 41: Testsheet mit Back-to-Back Balun.

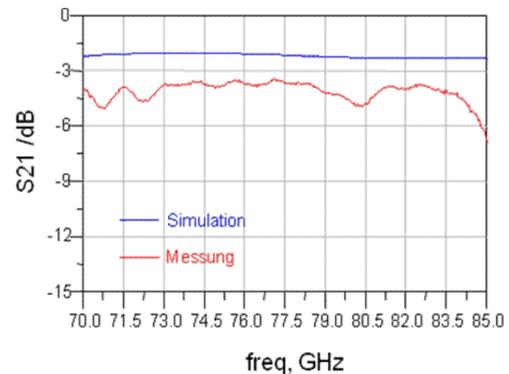


Abbildung 42: Untersuchung einer Microstrip-Teststruktur auf einem Rogers3003-Substrat: Simulation und Messung.

Die Verluste und Dämpfungen mit Rogers3003 liegen in einem akzeptablen Bereich.

## Chipaufbau- und Verbindungstechnologie

Die Systemverluste im Höchstfrequenzbereich bei 79 GHz werden maßgeblich von der Aufbau- und Verbindungstechnologie bestimmt. Kritisch sind hier vor allem die Verbindungen von den SiGe-Bausteinen zu den Schaltungsträgern, die bei den vorliegenden Frequenzen häufig in Form von Bonddrähten ausgeführt werden. Während ähnliche Projekte wie KRAFAS oder KOKON versuchen, die Bondübergänge durch Einbettung in die Schaltungsträger möglichst kurz und damit verlustarm zu gestalten, wird hier ein alternativer Weg beschritten. Eine neue Bauteiltechnologie von Infineon, das sogenannte eWLB-Package [Yoo09], bietet die Möglichkeit die SiGe-Bausteine als Flip-Chips, eingebettet in eine Kunststoffgussmasse über ein Ball-Grid-Array mit dem Schaltungsträger zu verbinden. Dies ist mit Hilfe herkömmlicher Löttechnologien zu realisieren und bietet damit eine kostengünstige und einfache Alternative für die Produktion, einem erklärten Ziel des RoCC-Projektes. Die wichtigsten Eigenschaften der Verbindungstechnologie, die mechanische Stabilität, die Fähigkeit Wärme abzuleiten und die elektrische Verbindung, insbesondere die HF-Eigenschaften, hängen damit elementar von der Qualität der Lötballs ab und der Möglichkeit diese mit geringen Toleranzen zu reproduzieren.

eWLB: embedded Wafer Level Ball Grid Array

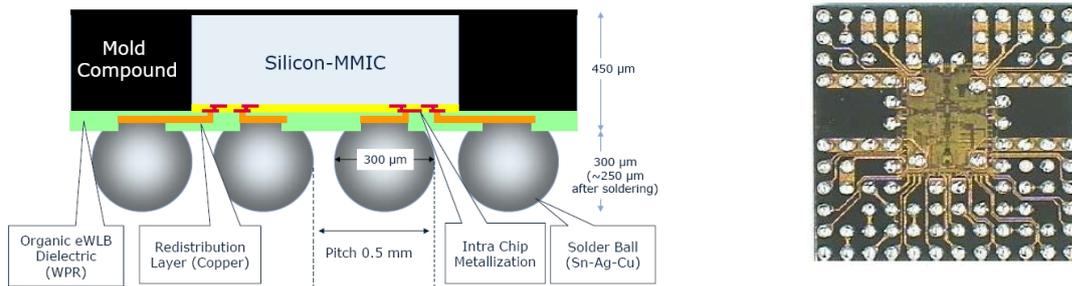


Abbildung 43: Schemabild des eWLB-Gehäuses (links) und Kontaktierungsebene mit den Lötballs der HF-SiGe-Chips (rechts) (Bildquelle Infineon).

Eine wichtige Funktion der Bonddrähte, das Rastermaß der Anschlüsse auf dem Chip an das Rastermaß der Leiterbahnen auf dem Schaltungsträger anzupassen, wird von dem Redistribution-Layer übernommen, einer Verbindungsebene innerhalb des Bauteils, die mit einer ungleich höheren Präzision und damit weit geringeren Toleranzen als die Bondverbindungen gefertigt werden kann.

Um einen effizienten Kontakt zu schaffen, muss aber auch die andere Seite der Verbindung, die Leiterplatte, vergleichbaren Qualitätskriterien genügen. Zu diesem Zweck wurden Testleiterplatten gefertigt, mit deren Hilfe die Produktionseigenschaften der Verbindungsstellen getestet wurden. Es war insbesondere zu prüfen, wie stark sich die auftretenden Fehler auf die HF-Eigenschaften der Übergänge auswirken und mit welchen Verlusten gerechnet werden muss. Zu diesem Zweck wurden Fehler untersucht, mit denen typischerweise auf einem Rogers3003-Substrat zu rechnen ist. Aus unserer Sicht ist das Substrat für eine kostendeckende und zuverlässige Produktion geeignet.

### Das Thermische Konzept

Fortschritte der SiGe-Technologie, insbesondere die Reduzierung der Betriebsspannung verminderten das Problem der Wärmegeneration, konnten es aber bisher nicht komplett lösen. Ein spezielles Problem ist die nahezu punktförmige Lokalisierung der Wärmeentstehung.

Wir rechnen damit, dass ein von uns verwendetes SiGe-TX-Modul mindestens 1,5 Watt erzeugen wird. Hinzu kommen ca. 0,8 Watt vom Rest des HF-Boards und 3,9 Watt von der ECU. Eine Untersuchung der thermischen Übergänge identifizierte maßgeblich 3 thermische Widerstände, das HF-Package mit der Platine, den Übergang zum Gehäuse und den Übergang vom Gehäuse an die Umgebungsluft (s. Bild). Zwei dieser Widerstände, die Platine und das Gehäuse liegen in der Verantwortung der Systemtechnik und werden von uns bearbeitet. Eine aktive Kühlung wäre hinreichend effizient, steht aber meistens nicht zur Verfügung. Eine Wärmeabfuhr über Konvektion wird wahrscheinlich nicht ausreichen oder ist eventuell durch die gegebene Verbausituation, z.B. einem eingeschäumten Verbau, gar nicht möglich. Hier sind konstruktive Alternativen

auszuarbeiten. Einen Ausweg könnte womöglich die Abfuhr der Verlustleistung über einen massiven mechanischen Kontakt zur Karosserie bieten.

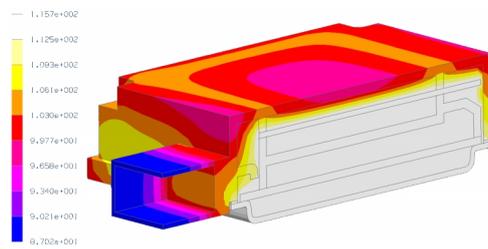


Abbildung 44: Temperaturverteilung auf Grundlage einer FEM-Simulation.

Die thermischen Verhältnisse in den Sensoren wurden mit FEM-Simulationen untersucht und mit experimentellen Daten verglichen. Zur Vertiefung des Verständnisses und zum Studium der Wärmeverteilung wurde ein einfaches analytisches Modell in Form eines Wärmeersatzschaltbildes erstellt.

Das folgende Schema in Abbildung 45 identifiziert qualitativ die Wärmestaus an Stelle der höheren thermischen Widerstände. Diese sind das Chipgehäuse mit dem Übergang auf die Leiterplatte, der Wärmetransport zum Gehäuse durch die Leiterplatte und die Wärmeabgabe vom Gehäuse an die Umwelt. Während das Chipgehäuse durch unseren Projektpartner Infineon optimiert wird, arbeiten wir an den übrigen beiden Themen, Leiterplatte und Gehäuse, in Abbildung 45 rot gekennzeichnet. Beim inneren Aufbau der Sensoren können wir eigenverantwortlich alle Freiheitsgrade verfolgen. Zur Abführung der Wärme aus dem Sensor sind wir auf die Kooperation des Fahrzeugherstellers angewiesen, der die Einbaurandbedingungen vorgibt und damit die Art des Wärmetransports. Exemplarisch wurde für den ungünstigen Fall des Standbetriebes die Kühlung durch passive Konvektion untersucht. Dazu wurden die Ergebnisse der Simulationen mit den experimentellen Werten und dem analytischen Modell verglichen.

Überraschenderweise stimmten die experimentellen Werte gut mit dem einfachen analytischen Modell überein. Die Resultate empfehlen neben dem inneren Aufbau des Sensors auch die Wärmeabfuhr aus dem Gehäuse an die Umwelt weiter zu optimieren, insbesondere da die Situation durch die fortschreitende Miniaturisierung noch weiter verschärft wird.

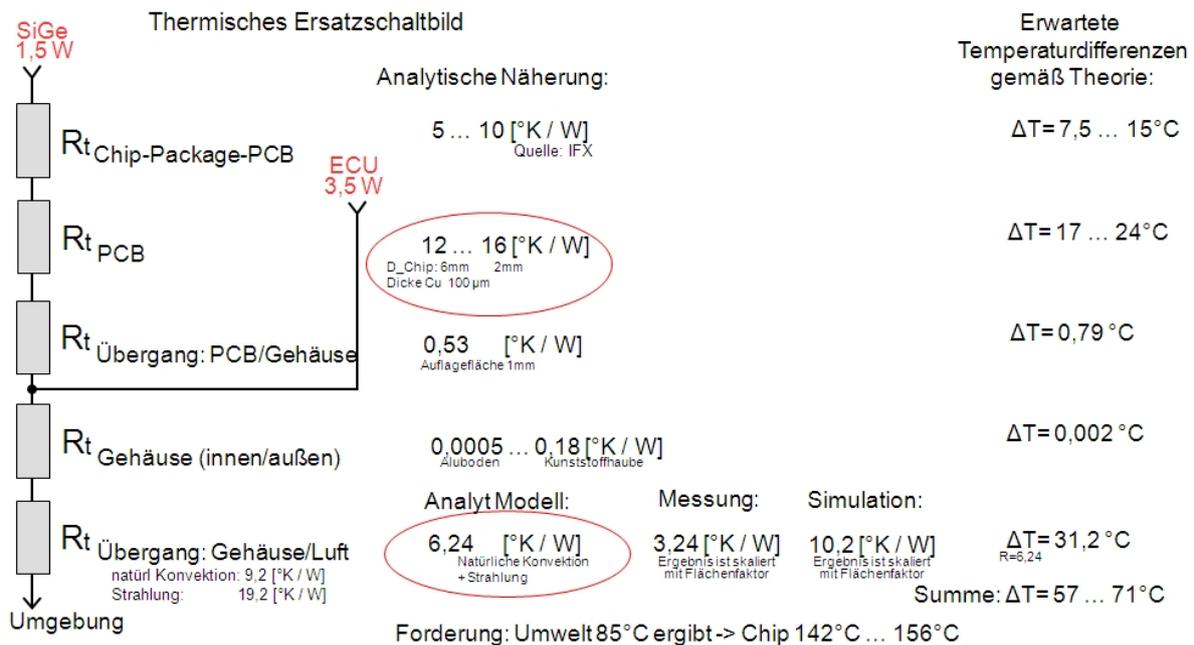


Abbildung 45: Wärmeersatzschaltbild eines Sensors mit Vergleich zwischen Modell, Simulation und Messung.

### II.1.3.2 Software

Um den Sensor in Betrieb zu nehmen, musste eine Reihe von SW-Modulen neu geschaffen oder angepasst werden. Insbesondere die folgenden Themen wurden bearbeitet:

:

- Rahmensoftware zur Ablaufsteuerung und Kommunikation
- Radar-HW-Steuerung
- Digitale Strahlformung
- Rohdatenverarbeitung
- Objekterkennung
- Tracking
- Situationsanalyse
- Messtechnik zur Demonstration der Sensorfunktion

Die SW-Module wurden in den Sensor integriert und im Labor in Betrieb genommen. Eine Überprüfung der Funktion, insbesondere der Rohdatenverarbeitung, fand auf Testständen oder speziell aufgebauten Szenarien statt. Dort wurden die Module weiter optimiert und parametrisiert. Das Messtechnik-Paket wurde nicht im Sensor integriert sondern auf einem angeschlossenen Messrechner.

Eine besondere Rolle bei der Verarbeitung der Zieldaten spielt der Tracker. Er verfolgt die zeitliche Veränderung der Ziele und interpretiert sie auf Basis ihrer Historie. Ein Tracker kann durch die Anwendung eines Kalman-Filters nicht nur die Verlässlichkeit einer Zielerfassung durch den Sensor wesentlich steigern sondern auch die Genauigkeit der Objektdaten, wie z.B. die Geschwindigkeit. Um die Einstellung des Trackers realitätsnah zu optimieren, war es notwendig den Sensor im Fahrzeug zu integrieren. In einer realitätsnahen Umgebung zeigt der Tracker schon bei der



### II.1.3.3 Aufbau der Demonstrationssensoren

Die Ziele des Aufbaukonzeptes waren:

- Vermeidung interner Störungen
- Effiziente Wärmeableitung
- Kompakter Aufbau
- Geringe Dämpfung durch das Radom

Zur Realisierung des Sensors wurde ein Sandwichaufbau gewählt mit lückenlos aneinander liegenden Lagen aus NF-, HF-, Antennenplatine und dazwischen liegenden Aluträgern. Die Aluträger dienen zur mechanischen Stabilisierung und dem Abtransport der Verlustleistung in Form von Wärme. Sie sind so angeordnet, dass eine Trennung und Aufteilung in Einzelmodule jederzeit möglich ist. Eingepackt ist das Sandwich durch ein Gehäuse, das über mindestens 3 Aufhängungen am Fahrzeug justierbar ist. Das Gehäuse besteht aus einem Aluminiumboden zur Wärmeableitung und einer Radomabdeckung aus PBT.

Die NF-Platine wurde in Standard-SMD-Technik beidseitig bestückt aufgebaut. Die Bestückung wurde hausintern durchgeführt. Die ECU ist über einen Board-to-Board-Stecker mit dem HF-Modul verbunden. Die Schnittstelle nach außen ist eine CAN-Verbindung und eine LVDS-Verbindung. Die Verlustleistung wurde mit ca. 3,9 W gemessen. Die NF-Platine übernimmt auch die Stromversorgung, d.h. die Aufbereitung der Spannungen für den kompletten Sensor. Das Ziel war für die Ersterprobung des Systemkonzepts genügend Rechenleistung zur Verfügung zu stellen, um alle optionalen Verfahren testen zu können. Dazu gehörte auch die Winkelbestimmung für die Objekte durch Auswertung der relativen Phasen aller 4 Antennenkanäle mit dem Verfahren der digitalen Strahlformung. Auch dieses Softwaremodul wurde auf der ECU implementiert.

Die Bestückung der HF-Platine wurde ebenfalls hausintern durchgeführt, insbesondere der Aufbau der zentralen Komponenten, der SiGe-Bausteine, die vom Projektpartner Infineon gefertigt wurden.

Die Antennenplatine wurde vom Unterauftragnehmer, dem Institut für Mikrowellentechnik der Universität Ulm, entworfen.

Das folgende Bild zeigt die Abfolge sämtlicher Lagen des Sensors:

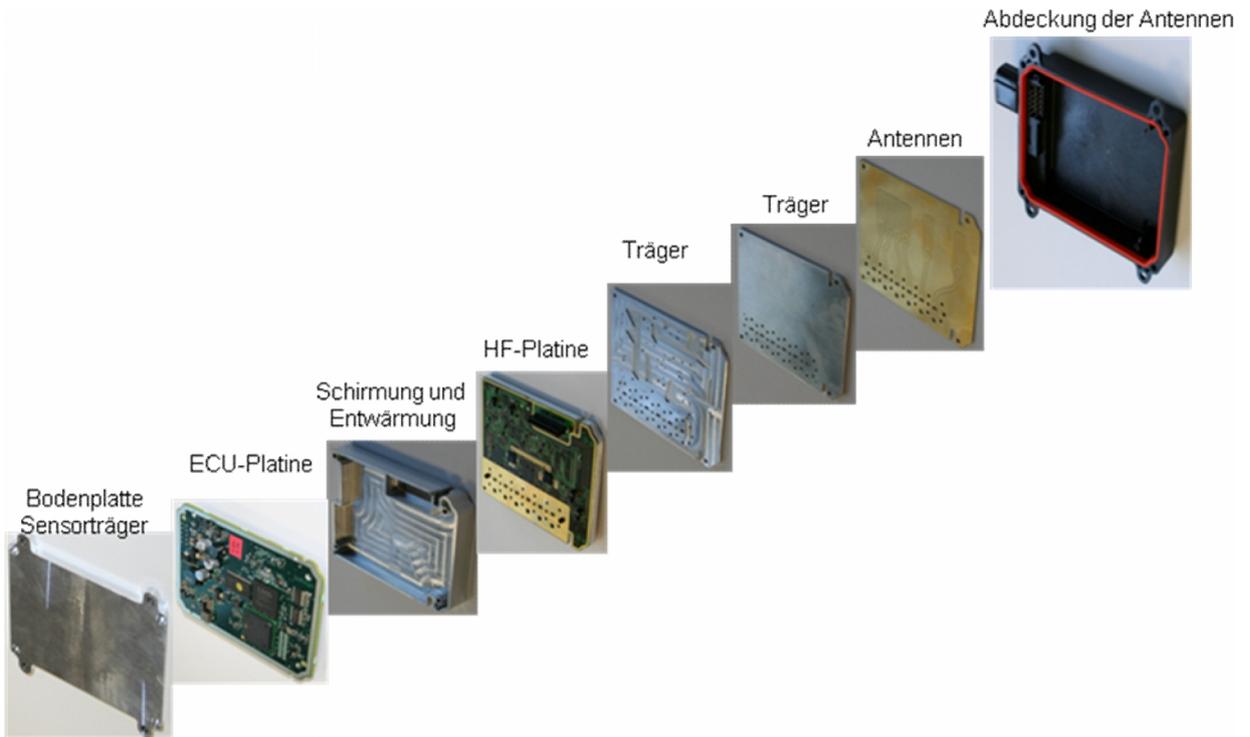


Abbildung 48: Lagenaufbau eines RoCC-Sensors.

Nach Zusammenfügen aller Lagen erhält man einen sehr kompakten Sensor mit den Maßen 110 x 83 x 32 mm:

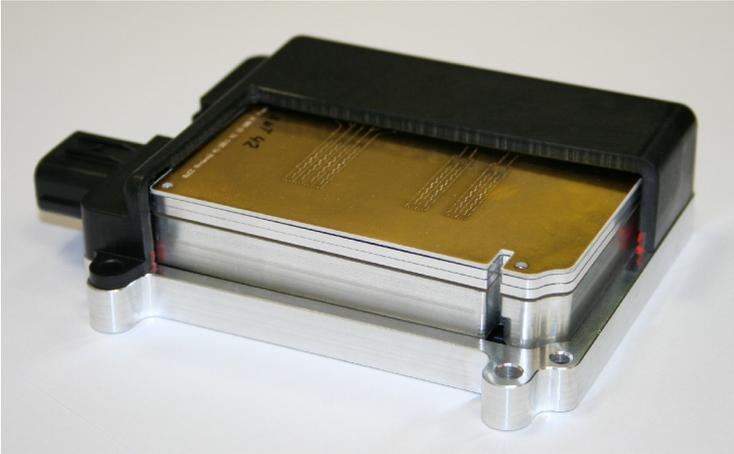


Abbildung 49: Zusammengebauter aufgeschnittener RoCC-Sensor.

## II.1.4 APV: Bewertung

Ziele des Arbeitspaketes

- Bewertung von Verfahren zur Steigerung der Zuverlässigkeit
- Bewertung der Technologie anhand eines Demonstrators
  - Nachweis der Funktion im Labor
  - Vermessung der Sensoreigenschaften auf Prüfständen
  - Beurteilung der Funktion im Versuchsträger

### Verfahren zur Steigerung der Zuverlässigkeit

#### Unterdrückung von Störern im Nahbereich

Durch die Integration der Sensoren ins Fahrzeug und den meist gewünschten verdeckten Einbau kann es zu Reflexionen am eigenen Fahrzeug, insbesondere dem Stoßfänger, kommen. Diese Reflexionen führen oft zu extrem starken Signalen, die den Betrieb des Sensors beeinträchtigen können. Es muss daher Sorge getragen werden, dass die Dynamik der Empfangspfade ausreicht, dass der Sensor nicht durch Reflexionen im eigenen Fahrzeug oder durch sehr nahe und starke Ziele geblendet und dadurch außer Funktion gesetzt wird. Dies kann verhindert werden durch Maßnahmen auf HW- sowie SW-Ebene, um Signale, die aus einem Bereich unmittelbar vor dem Sensor stammen, hinreichend zu dämpfen. Ein solches Verfahren wurde in den Sensor integriert. Das folgende Bild zeigt die Auswirkung exemplarisch in Form einer im Nahbereich gedämpften Signalkurve:

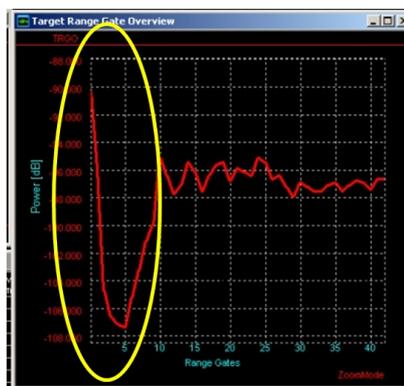


Abbildung 50: Beispielsignal, das im Nahbereich(gelb) zur Unterdrückung von Störern gedämpft ist.

### Maßnahmen zur Unterdrückung von Interferenzen mit anderen Fahrzeugen

#### Interferenzen mit anderen Fahrzeugen

Eines der erklärten Projektziele von RoCC ist es, eine hohe Ausstattungsrate in allen Fahrzeugklassen zu erreichen, um die dadurch gewonnene Sicherheit allen Fahrzeuglenkern zukommen zu lassen. Dies impliziert allerdings zwangsläufig, dass sich ständig Fahrzeuge begegnen, die mit einem oder sogar mehreren Sensoren ausgestattet

sind. Um in solchen Situationen die versprochene Sicherheit nicht zu verlieren, dürfen sich die Sensoren nicht gegenseitig stören. Störungen können sich in Form von Geisterzielen bemerkbar machen, ähnlich wie Spiegelungen in optischen Systemen oder gar durch einen kompletten Systemausfall. Insbesondere Systemausfälle sollten in jedem Fall vermieden werden, da sich Störungssituationen teilweise über sehr lange Zeiträume hinziehen können. Als Beispiel sei die Folgefahrt eines mit einem Frontsensor z.B. mit einem ACC ausgestatteten Fahrzeugs hinter einem mit einem Hecksensor ausgerüsteten Fahrzeug genannt.

Seit einigen Jahren existieren Strategien zur Vermeidung von Interferenzen. Maßnahmen sind z.B. das Ausweichen in der Trägerfrequenz, soweit es die aktuelle Frequenzregulierung zulässt oder die statistische, PN-codierte Verteilung verschiedener Parameter in der Rampengenerierung.

Kommt es dennoch zu einer Interferenz, sofern kein Algorithmus zur Unterdrückung von Interferenzen vorhanden ist, wird es der Signalverarbeitung in der Regel nicht mehr möglich sein, schwache Radarziele zu erkennen, u.U. werden sogar überhaupt keine Ziele mehr erkannt. Um dies zu vermeiden wurde auf der Grundlage von Systembetrachtungen ein sehr effizienter Algorithmus ausgearbeitet zur Erkennung von Interferenzen. Auf der Basis von Simulationen wurden typische Charakteristika von Interferenzen identifiziert.

Es wurde ein adaptives Verfahren ausgearbeitet auf der Basis einer zeitabhängigen Filterung mit dem Störungen effektiv reduziert werden können. Das vorgeschlagene Verfahren wurde mit Hilfe von Simulationen mit bekannten Standardverfahren verglichen.

Ein Standardverfahren ist beispielsweise das Herausschneiden betroffener Signalsequenzen, das sogenannte „Clipping“. Dabei gehen allerdings alle im betroffenen Intervall vorhandenen Informationen verloren.

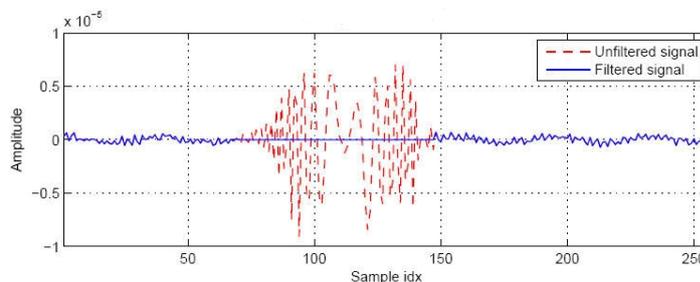


Abbildung 51: Darstellung des Clipping bei einem gestörten Signal.

Demgegenüber reduziert das Filterverfahren nur Störer und Amplitude, Restinformationen des Signals bleiben erhalten.

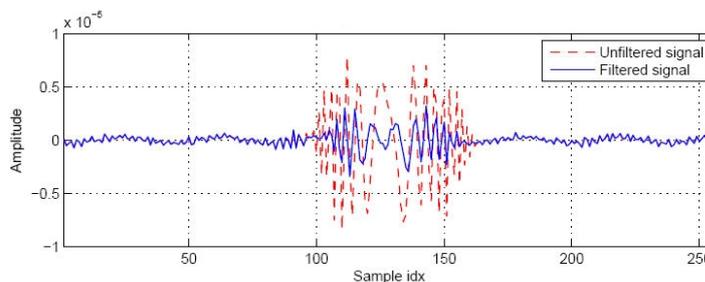


Abbildung 52: Darstellung der Filterung eines gestörten Signals.

Für den Vergleich der Verfahren zur Interferenzunterdrückung wurde folgendes Szenario gewählt. Jeweils ein starkes Radarziel befindet sich in der Nähe und in größerer Distanz. Dazwischen befindet sich ein schwächeres Ziel. Die Relativgeschwindigkeiten der Ziele wurden statistisch zufällig gewählt. Nach der Signalverarbeitung der simulierten Daten erhält man im ungestörten Fall folgendes Bild:

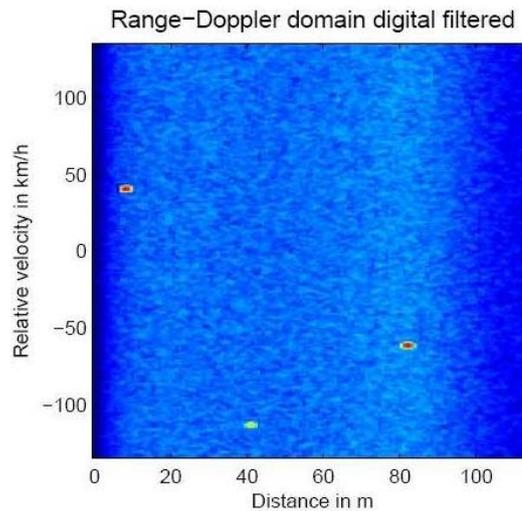


Abbildung 53: Untersuchungsszenario, 3 Ziele, in einer Entfernung-Geschwindigkeitsdarstellung.

Nach der Signalverarbeitung lassen sich alle drei Ziele wie erwartet einwandfrei identifizieren. Diese Situation ändert sich komplett, wenn ein Störer ins Spiel kommt. Dargestellt wird im Folgenden dasselbe Szenario mit einem FMCW-Störer:

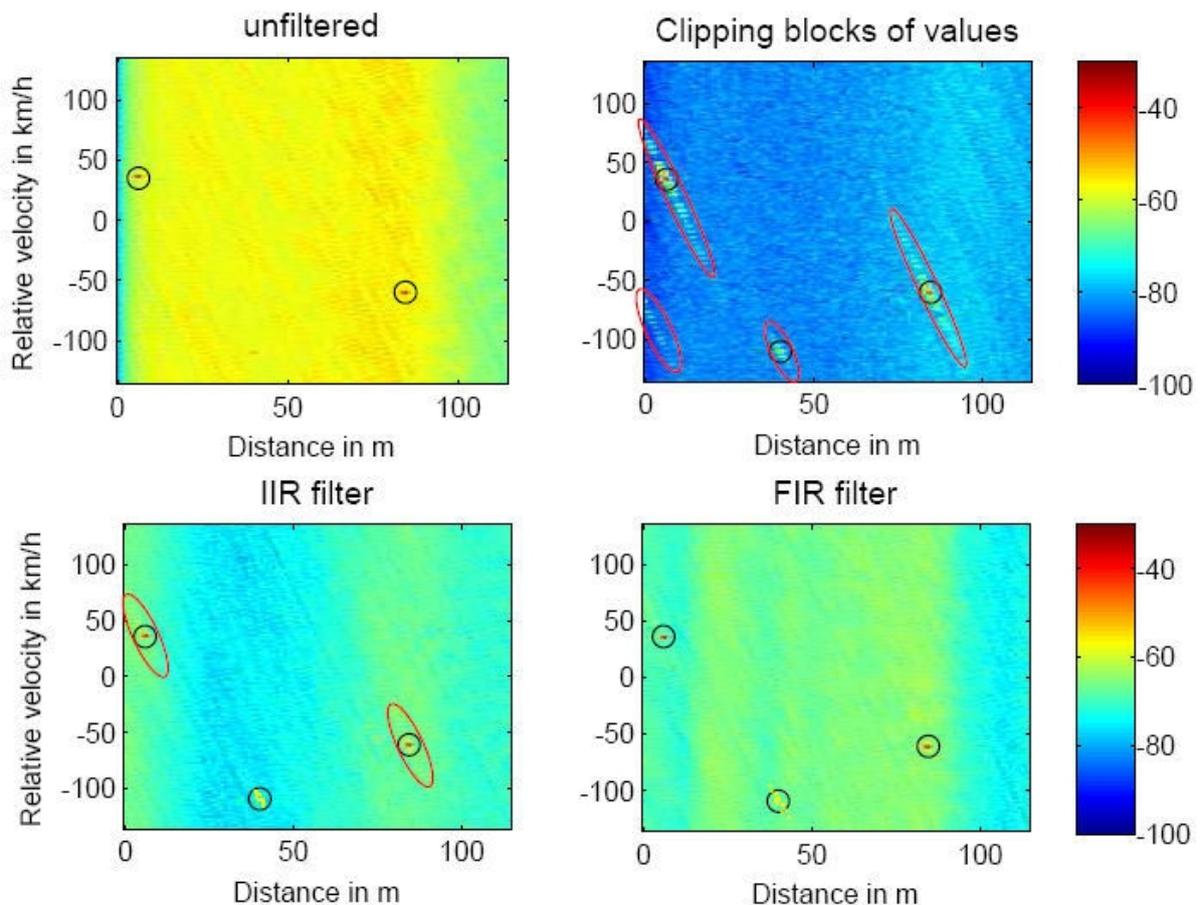


Abbildung 54: Untersuchungsszenario; 3 Ziele, in der Entfernung-Geschwindigkeitsdarstellung nach Anwendung des Filter-Algorithmus zur Unterdrückung von Interferenzen.

Wird der Störer nicht erkannt oder fehlt ein Algorithmus zur Unterdrückung von Interferenzen (links oben), so verliert man das schwache Objekt. Mit dem oben beschriebenen Standardverfahren, die Störung aus dem Signal herauszuschneiden, wird das schwache Objekt zwar wieder sichtbar, dafür wird aber gleichzeitig auch ein Geisterobjekt generiert (rechts oben). Demgegenüber eröffnen die Verfahren, die mit einer zeitabhängigen Filterung arbeiten (unten), eine gute Chance, die schwachen Ziele wieder sichtbar zu machen ohne dabei Geisterziele zu generieren.

### II.1.4.1 Sensorbewertung im Labor

#### Funktionsüberprüfung

Der erste Schritt nach der Inbetriebnahme war die Überprüfung der relevanten Systemparameter in der Übertragungskette. Um eine Charakterisierung noch auf HW-Niveau ohne Inbetriebnahme von SW zu erlauben, wurden spezielle Adapterplatinen entworfen und aufgebaut, auf denen alle wichtigen Schnittstellen über Laboranschlüsse erreichbar waren. Grundvoraussetzung war eine Vorrichtung mit der die SiGe-HF-Bausteine über die integrierte SPI-Schnittstelle in Betrieb genommen werden konnten.

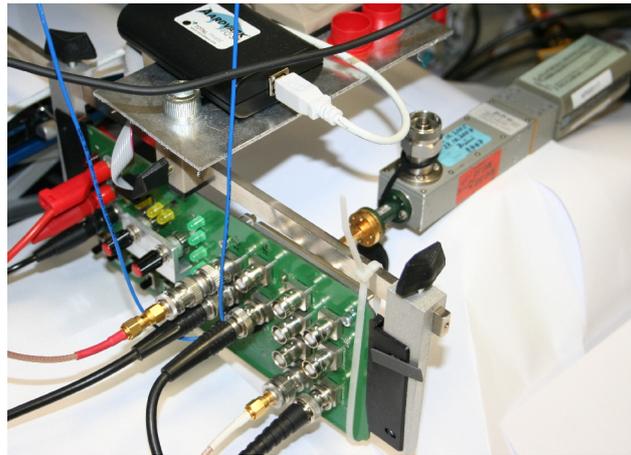


Abbildung 55: Testaufbau mit Adapterplatinen.

Mit dem vorliegenden Testaufbau wurden über einen Mischer und angeschlossenen Netzwerkanalysator die abgestrahlte Leistung gemessen, das Frequenzspektrum, die Modulationskennlinie und der Rauschpegel. Die Wärmeentwicklung der SiGe-Komponenten wurde über eine Temperatursonde abgeschätzt. Damit wurde die Funktion des HF-Moduls innerhalb gewisser Parametergrenzen sichergestellt.

#### II.1.4.2 Sensorbewertung auf Testständen

Der zugleich größte und am häufigsten verwendete Teststand zur Vermessung der Sensoren ist die sogenannte Antennenmesskammer. Dies ist ein abgeschirmter und reflexionsarmer, absorbierender Raum zur Vermeidung von Vielfachreflexionen und Unterdrückung von Störstrahlung. An einem Ende befindet sich eine Vorrichtung auf der die Sensoren befestigt werden und mit deren Hilfe eine vollautomatische und hochgenaue Winkelausrichtung vorgenommen werden kann. Am anderen Ende ist eine Empfangsvorrichtung (Hornantenne) angebracht zur Durchführung von sogenannten Einwegmessungen. Dabei werden die Radarwellen vom Sensor abgestrahlt, der Hornantenne empfangen und von einem geeichten Messgerät, einem Netzwerkanalysator ausgewertet. Einwegmessungen dienen der Charakterisierung der Sendemodule. Zur Durchführung von Zweiwegmessungen, bei denen die Radarstrahlung vom Sensor abgestrahlt und auch wieder empfangen wird, befindet sich ein Reflektor in der Kammer. Dieser ist an einer Schiene aufgehängt, über die er vollautomatisiert jede gewünschte

Entfernung anfahren kann. Damit lässt sich die Empfindlichkeit des kompletten Sensors, d.h. des Sende- und Empfangspfades abhängig vom Winkel in Azimut und Elevation und der Entfernung automatisiert über ein Messprogramm erfassen.

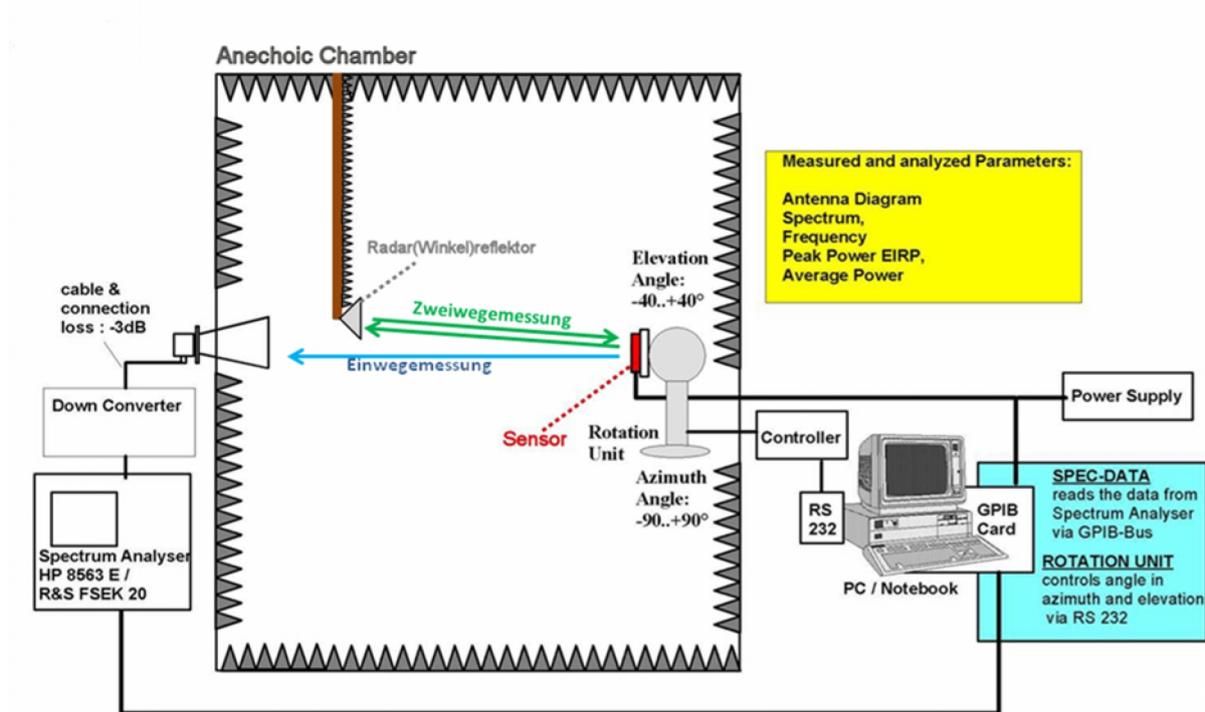


Abbildung 56: Antennenmesskammer.

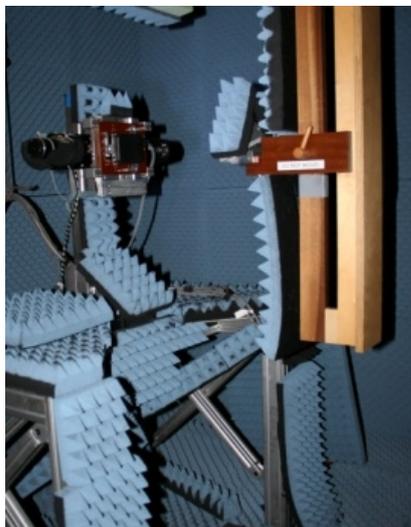


Abbildung 57 Sensordrehstand und Reflektoraufhängung in der Messkammer.



Abbildung 58: Steuerungseinheit der Antennenmesskammer.

## Entfernungsmessungen

In der beschriebenen Messkammer wurden mithilfe eines Reflektors Testmessungen der Entfernung durchgeführt. Dazu wurde jeweils die angefahrte Entfernung mit der vom Sensor gemessenen Entfernung verglichen. Die folgenden Bilder zeigen exemplarisch das Resultat zweier Messreihen.

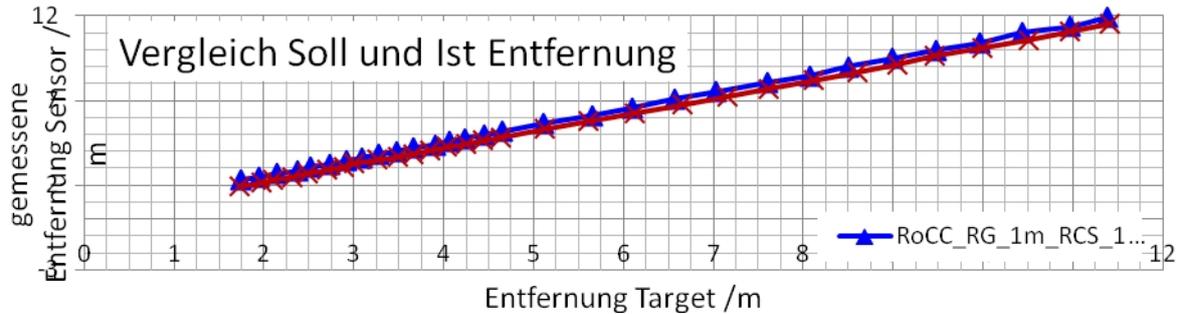


Abbildung 59: Vergleich der gemessenen mit der eingestellten Entfernung.

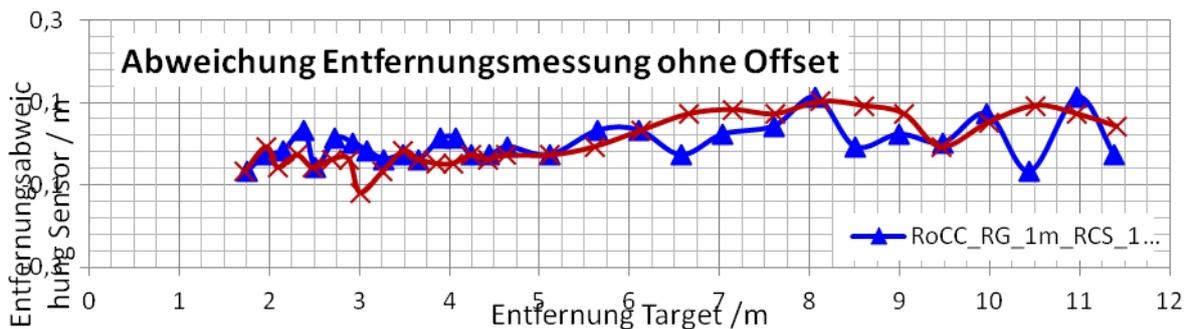


Abbildung 60: Abweichungen der gemessenen von der eingestellten Entfernung.

Der Vergleich mehrerer Messreihen weist keine erkennbaren systematischen Fehler auf und zeigt nur geringe statistische Abweichungen innerhalb von +/- 0,1m.

## Winkelmessungen

Der vollautomatisierte Drehstand, d.h. die bewegliche Sensoraufhängung in der Messkammer, wurde eigens für die Winkelmessungen geschaffen. Bei feststehendem Reflektor können damit durch kontrollierte Drehung mit hochgenauer Einstellung des Winkels die entsprechenden Sensordaten aufgenommen werden. Es wurden wieder exemplarisch mehrere Messreihen übereinandergelegt, um eine Vorstellung von den systematischen und statistischen Fehlern zu liefern. Um einen Gesamteindruck zu vermitteln, wurden zuerst die Messdaten mit den eingestellten Werten verglichen. Da sich hier zumindest innerhalb des Messbereiches von etwa +/- 35° kaum Abweichungen erkennen lassen, zeigt die zweite Darstellung die Abweichungen in detaillierter Form.

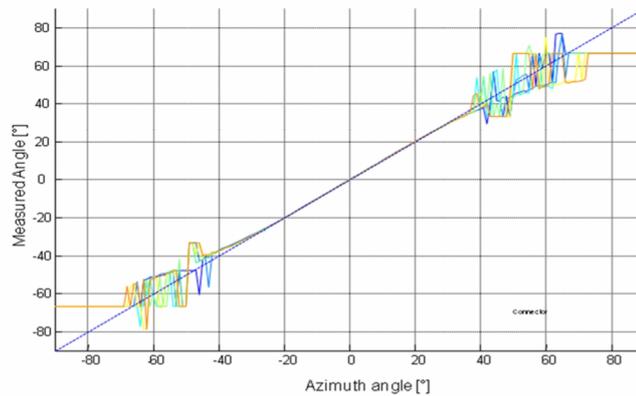


Abbildung 61 Vergleich der Winkelmesswerte mit den eingestellten Werten.

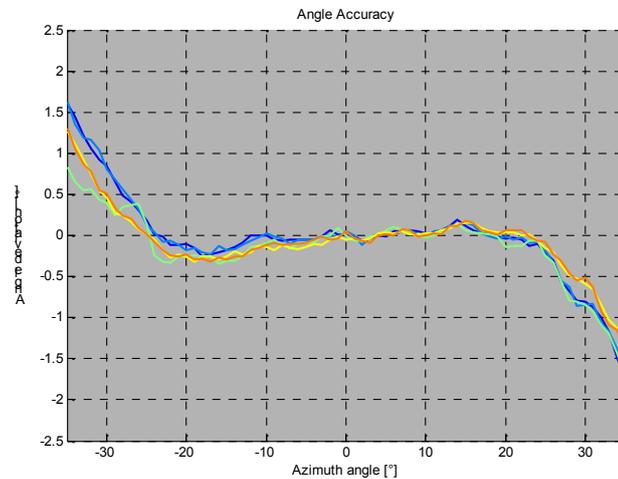


Abbildung 62: Abweichungen der Winkelmesswerte von den Sollwerten.

Der Gesamtfehler der Winkelmessung, d.h. die Summe aus systematischen und statistischen Fehlern, liegt in einem Bereich von  $\pm 25^\circ$  ohne Korrektur, d.h. ohne Kalibration, noch innerhalb eines Bandes von  $\pm 0,3^\circ$  und entspricht damit den Anforderungen.

## Reichweite

Ein entscheidendes Merkmal eines Sensors ist seine Reichweite. Diese wurde winkelabhängig ebenfalls mit dem Sensordrehstand in der Antennenmesskammer aufgenommen. Verwendet wurde dazu ein geeichter Reflektor mit  $10\text{dBm}^2$  RCS, der etwa einem PKW entspricht. Durch eine geeichte Messung des jeweiligen Signals konnte die zugehörige Reichweite abgeleitet werden. Die beiden folgenden Bilder zeigen die Messresultate. Einkalkuliert wurden eine voraussichtliche Dämpfung im Stoßfänger von 3dB und ein für eine Zieldetektion notwendiger Signal-Rauschabstand von 13dB. Die Messreihen entsprechen verschiedenen Sensoren, zwei besseren und zwei etwas schlechteren Exemplaren und zeigen damit die Streuung im Prototypenaufbau.

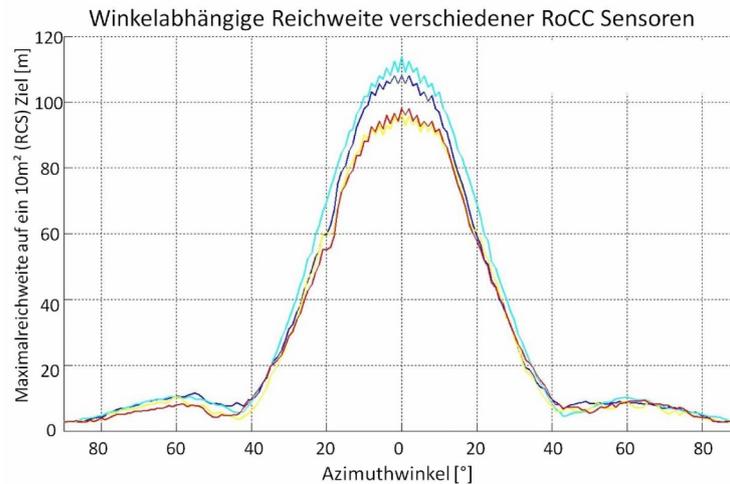


Abbildung 63: Reichweite des Sensors abhängig vom Azimut-Winkel kalkuliert aus Messdaten aus der Antennenmesskammer.

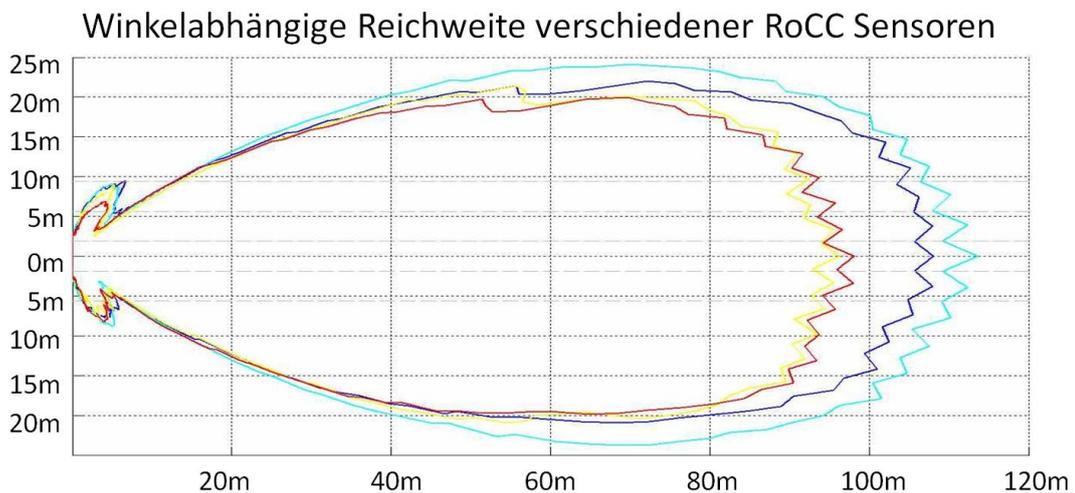


Abbildung 64: Darstellung der winkelabhängigen Reichweite verschiedener RoCC-Sensoren in kartesischen Koordinaten.

Die Detektion eines Pkw in Längsrichtung sollte bis auf eine Entfernung von 90 m möglich sein. Die maximale Reichweite des Sensors ist softwarebedingt auf 110 m limitiert. Im Nahbereich werden Ziele in einem Azimutwinkelbereich von bis zu +/-35° detektiert.

### Geschwindigkeitsmessungen

Zur kontrollierten Einstellung von Geschwindigkeiten wurde eine Schienenbahn aufgebaut, auf der ein Schlitten von einem computergesteuerten Riemenantrieb geregelt in Fahrt versetzt wird. Die Messbahn ist knapp 30m lang. Bedingt durch die maximal mögliche Beschleunigung und Verzögerung lassen sich Geschwindigkeiten bis zu 36 km/h erreichen. Je höher die Wunschgeschwindigkeit eingestellt wird desto kürzer ist die zur Verfügung stehende Messzeit. Die Maximalgeschwindigkeit kommt dadurch zustande, dass unter Abzug der Beschleunigungsphase und der notwendigen Abbremsphase, für die Phase der

eingeregelter Bewegung mit der vorgegebenen Geschwindigkeit nur noch eine extrem kurze Zeit zur Verfügung steht. Auf dem Schlitten wurde ein Reflektor befestigt, dessen Bewegung von einem Sensor am Ende der Schiene gemessen wurde. Die Messtechnik-Software (MTS) auf einem angeschlossenen PC sorgte für die Aufzeichnung und Darstellung der Messdaten.

Die folgenden Bilder (in Abb. 65) zeigen einige ausgewählte Fenster der MTS, die Aufnahme einer Referenzkamera (links), die vom Sensor detektierten Ziele in Vogelperspektive (Mitte) und den sogenannten Rangegateoverview (rechts). Beim Rangegateoverview werden die erfassten Signalamplituden der jeweiligen Entfernung aus der sie stammen zugeordnet. Bei der dargestellten Messung erkennt man den Reflektor bei Rangegate 6, d.h. in einer Entfernung von etwa 6 m, gekennzeichnet durch einen hohen Peak im Rangegateoverview. Mithilfe dieser Messtechnik wurden zahlreiche Messfahrten mit dem Schlitten bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten aufgezeichnet.

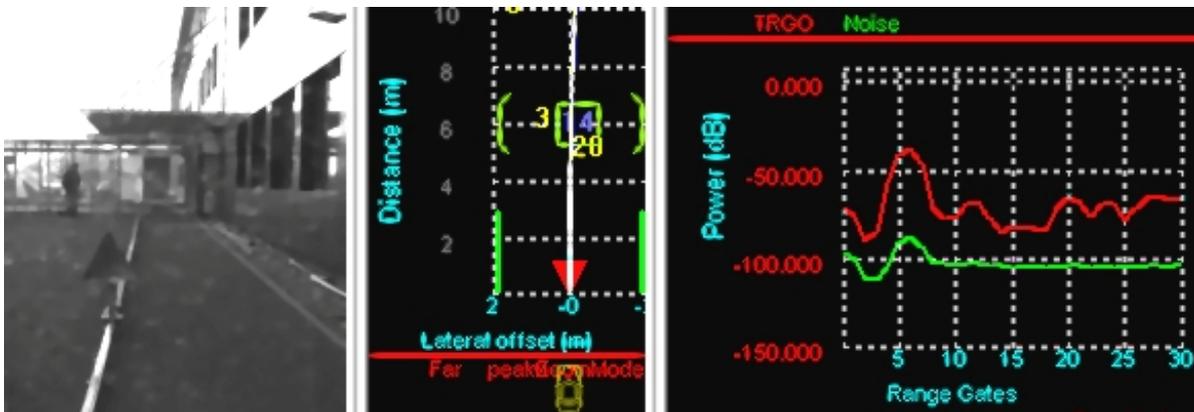


Abbildung 65: Aufnahmen der Messtechnik auf der Schienenmessbahn.

Die Auswertung der Aufzeichnungen ergab eine Reihe von Messpunkten, die in einem Ist/Soll Vergleich in dem folgenden Diagramm gezeigt wird. Es wurden Datenpunkte bis zur maximal möglichen Annäherungsgeschwindigkeit aufgenommen. Die Darstellung zeigt die erwartete gute Übereinstimmung. Eine erkennbare Abweichung zeigt sich erst in der entsprechenden Differenzdarstellung mit hinreichender Genauigkeit.

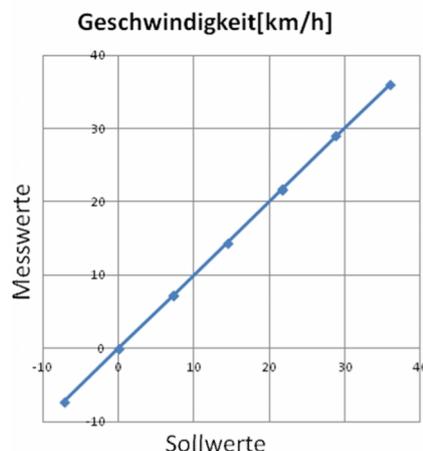


Abbildung 66: Darstellung der gemessenen Geschwindigkeit über der eingestellten Sollgeschwindigkeit.

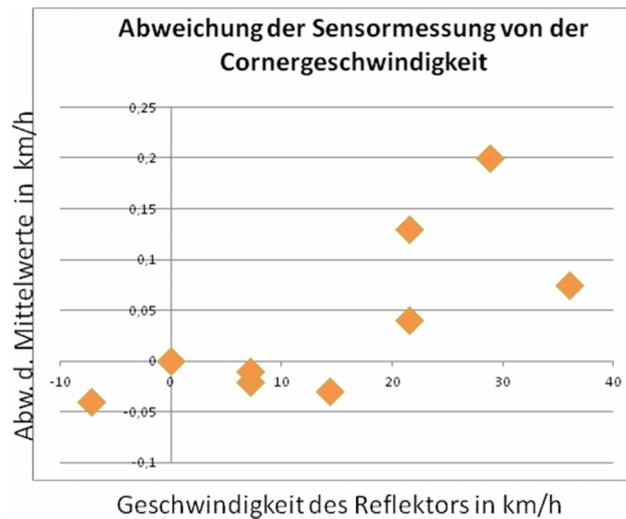


Abbildung 67: Abweichung der Mittelwerte der Messungen.

Die typischen statistischen Fehler der Messwerte betragen etwa 0,1 km/h. Aufgrund von Umbaumaßnahmen standen leider keine Referenzmessungen zur Verfügung. Die dargestellten Messfehler setzen sich also aus den Messfehlern des Sensors und den Fehlern der Messbahn zusammen. Die Messfehler des Sensors sind dementsprechend kleiner. Die systematische Zunahme der Abweichung bei hohen Geschwindigkeiten dürfte auf die Messbahn zurückzuführen sein, der bei hohen Geschwindigkeiten nur eine entsprechend kürzere Zeit zur Einregelung bleibt. Dies gilt ebenso für die Zunahme der Standardabweichung mit der Geschwindigkeit.

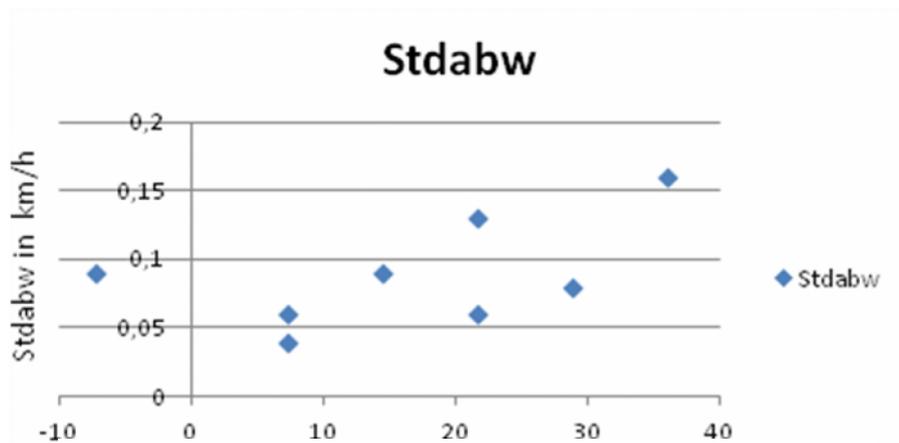


Abbildung 68: Standardabweichung der Einzelmessungen abhängig von der Geschwindigkeit.

Die Messbahn lässt leider nur einen limitierten Messbereich für die Geschwindigkeit zu, zeigt aber eine außerordentlich hohe Qualität der Geschwindigkeitsmessung.

## Digitale Strahlformung und Winkeltrennung

Die Digitale Strahlformung berechnet 16 teilweise überlappende Empfangskeulen (s. II.1.2.). Der Sensor wurde in der Antennenmesskammer (s.o.) gegenüber einem Corner-Reflektor auf einem Drehtisch befestigt, der den gesamten Winkelbereich in  $1^\circ$  Schritten mechanisch abfährt. Dabei werden die 16, aus der Digitalen Strahlformung gebildeten Signale aufgezeichnet. Die folgende Abbildung 69 zeigt die winkelabhängige Empfindlichkeit, quasi das Antennendiagramm für den mittleren digitalen Strahl, d.h. das Ergebnis des mittleren Samplingwertes in Abhängigkeit der Stellung des Drehtisches.

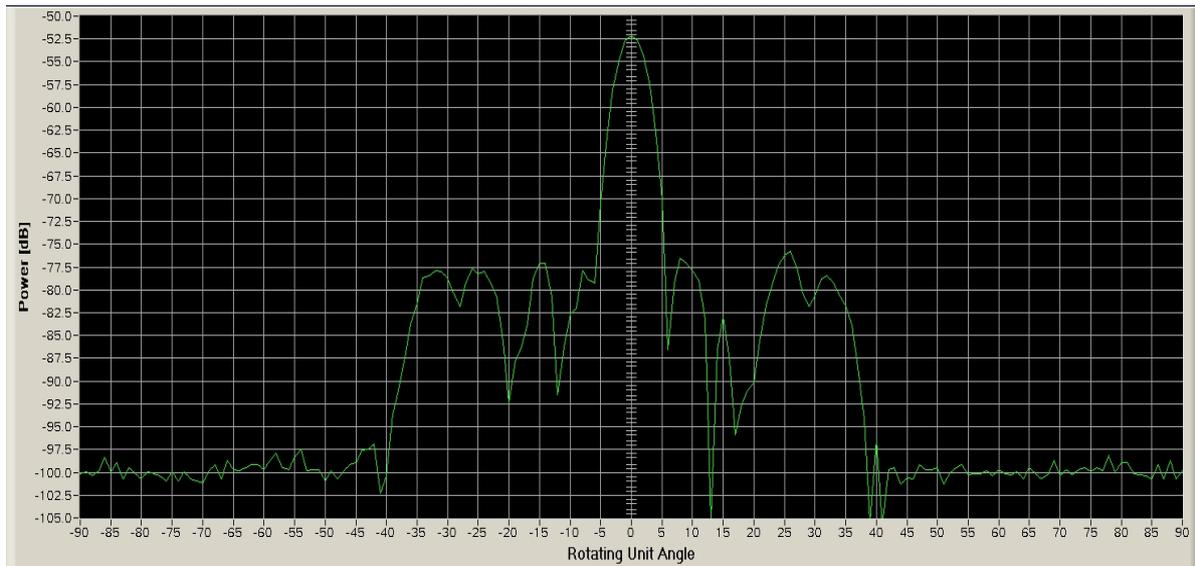


Abbildung 69 Antennendiagramm für den mittleren digitalen Strahl nach Auswertung der digitalen Strahlformung.

Aus dieser Darstellung lässt sich direkt die Winkeltrennfähigkeit für benachbarte Objekte ablesen. Die 3dB-Breite, die charakteristisch für die Unterscheidung von 2 Zielen ist, ist etwas größer als 4 Grad. Damit sollten 2 Ziele, die sich um  $8^\circ$  in der Winkelposition unterscheiden, getrennt werden können. Interessant wird der Vergleich mit der praktischen Messung der Zieltrennung (s. S. 64).

Die gesamte Abdeckung des Beobachtungsbereiches durch die 16 berechneten Strahlen der digitalen Strahlformung zeigt Abbildung 70. Der Beobachtungsbereich wird durch das Antennendiagramm der Einzelantenne bestimmt, die aus der Einhüllenden der digitalen Strahlen erkennbar ist. Für die Genauigkeit der Winkelmessung und vor allem für die Zieltrennung sind die einzelnen digitalen Strahlen maßgeblich, die sich aus der Gruppenauswertung des Antennenarrays ergeben. Bei Abzählung der berechneten digitalen Strahlen in der Hauptkeule der Einzelantenne, die dem Sichtbereich entspricht, erkennt man eine Anzahl die größer ist als 16, was eine Folge der Mehrdeutigkeiten ist, die sich aus der Antennenkonfiguration ergeben (wie unter II.1.2. beschrieben). Der Messbereich ist größer als der Eindeutigkeitsbereich.

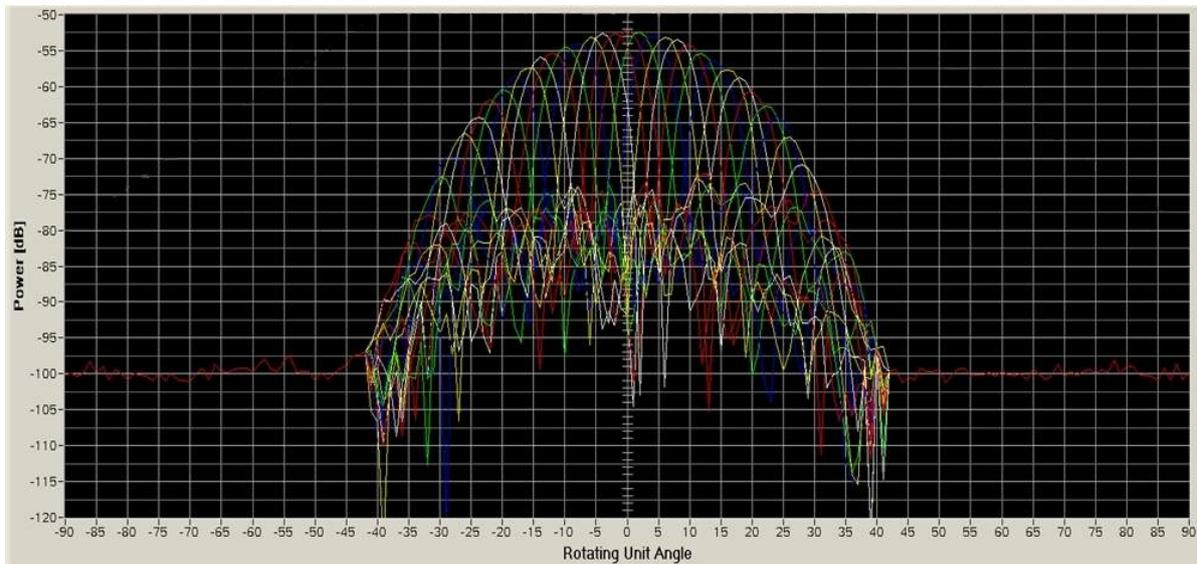


Abbildung 70: Darstellung der Messung aller digitalen Strahlen, die vom Strahlformer berechnet werden.

Die Abbildung zeigt die Effizienz und Flexibilität, die durch das Verfahren der digitalen Strahlformung mit einer Gruppenanordnung von Antennen erreicht werden kann.

## Zieltrennung

Die Zieltrennung ist eine der markantesten Eigenschaften eines Umfeldsensors. Um Erfahrung mit dem neuen Verfahren der digitalen Strahlformung zu sammeln, wurde ein einfaches Szenario mit zwei eng benachbarten Reflektoren aufgebaut. Über die Datenauswertung wurde sichergestellt, dass die beiden Reflektoren im selben Rangegate positioniert waren. Dann wurden sie langsam einander angenähert. Sie wurden in einer Position geparkt, an der sie gerade noch sicher als getrennte Objekte erkannt wurden, bevor sie anfangen statistisch zu verschmelzen.

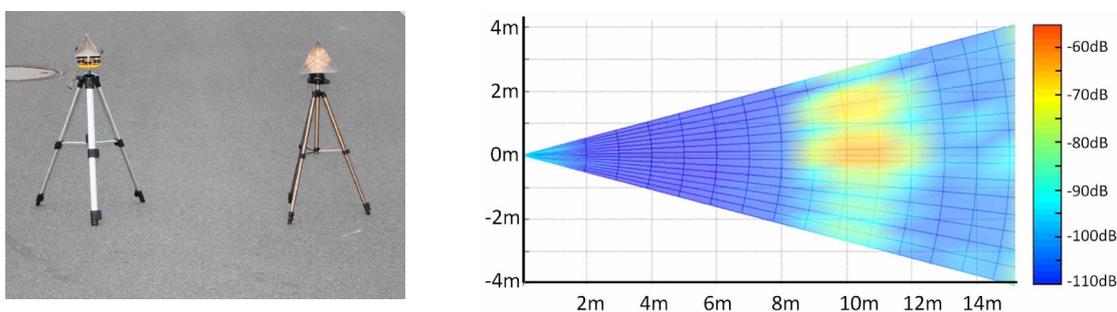


Abbildung 71: Aufbau und Messergebnis zur Zieltrennung; (links) 2 Cornerreflektoren unter einem Winkelabstand von  $7^\circ$ , (rechts) farbcodierte Darstellung der Amplitudenverteilung aus der Vogelperspektive.

Die Auswertung der Entfernung und des Abstandes zwischen den Cornern ergibt einen Wert für die Zieltrennung von  $7^\circ$ . Dies entspricht dem Resultat des Alleenszenariums (s.u. Kap. II.1.4.3.). Auch die farbig codierte Darstellung der Signalamplituden in Vogelperspektive bestätigt die Unterscheidbarkeit der beiden Reflektoren in Form gut getrennter Maxima.

## Test der Rahmenbedingungen durch den Einbau im Fahrzeug

Für langreichweitige ACC Sensoren war es bisher in manchen Fällen möglich, serienmäßig eine Einbauposition im Fahrzeug zu finden, an der der Sensor nicht abgedeckt wurde. In den meisten Fahrzeugen, insbesondere für SRR-Sensoren, ist ein verdeckter Verbau zwingend erforderlich. Der typische Einbauraum ist hinter bzw. im Stoßfänger. Die Wechselwirkung der Mikrowellen mit dem Stoßfänger ist bei 79GHz etwas größer als bei 24GHz. Es muss also abgesichert werden, dass auch bei 79GHz und dem neugestalteten Antennenarray noch eine zuverlässige Winkelbildung durchgeführt werden kann.

Zu diesem Zweck wurde ein eigener Teststand aufgebaut. Der Sensor wurde an verschiedenen Positionen hinter einem Stoßfänger befestigt. Ein Cornerreflektor wird über einen langen Schwenkarm im Winkel verfahren und nimmt dabei definierte Winkelpositionen ein. Diese Winkelinformation wird mit der Winkelmessung des Sensors verglichen.

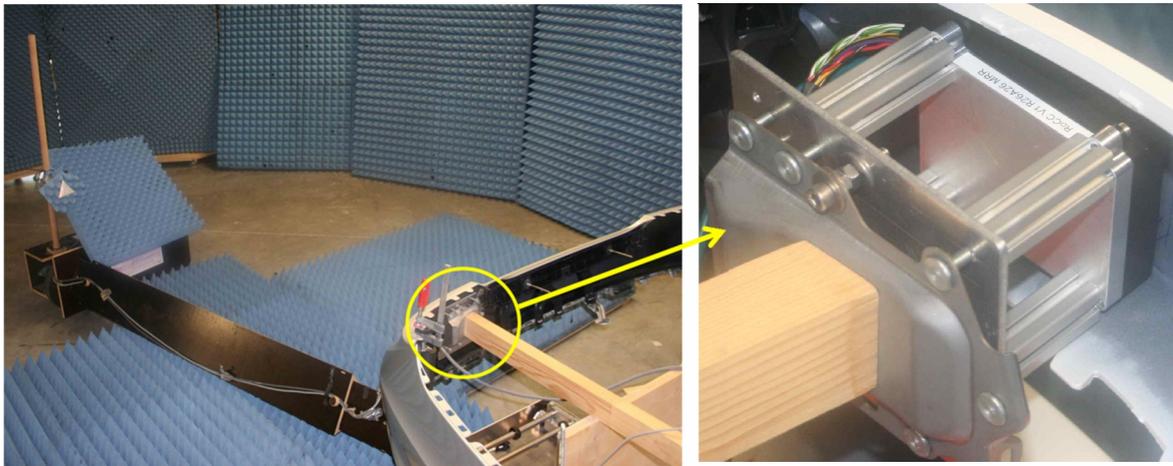


Abbildung 72: Teststand zur Verbausituation hinter dem Stoßfänger(links) und Befestigung des Sensors(rechts).

Mit dem beschriebenen Testaufbau wurden verschiedene Einbaupositionen an diversen Stoßfängern mit unterschiedlichen Lackierungen untersucht. Als Referenz wurde der Sensor zuerst ohne Stoßfänger vermessen. Anschließend wurde eine Messung mit dem jeweiligen Stoßfänger durchgeführt. Nach einer einfachen Offsetkalibration mithilfe der ersten Messung ohne Stoßfänger, wird eine weitere Messung mit dem Stoßfänger vorgenommen. Die Ergebnisse der drei Messreihen werden in der folgenden Abbildung 73 miteinander verglichen. Neben der Winkelmessung (links) wurde auch die räumliche Empfindlichkeitsverteilung aller digital berechneten Strahlen vermessen. In Abbildung 73 (rechts) wurden exemplarisch die Ergebnisse der drei beschriebenen Messreihen für den mittleren digitalen Strahl gegenübergestellt.

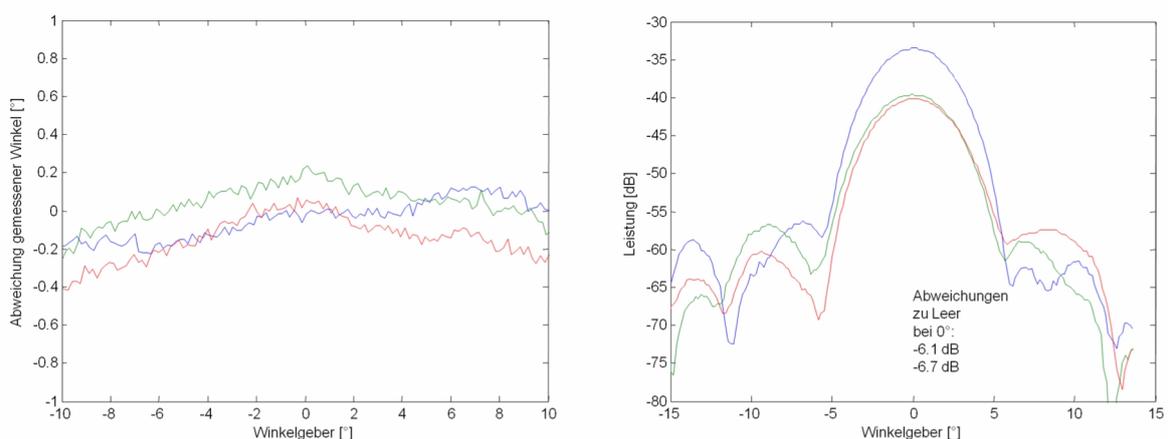


Abbildung 73: (links) Ergebnisse der Winkelmessung ohne Stoßfänger (blau) mit Stoßfänger (grün) und neu kalibriert mit Stoßfänger (rot); (rechts) berechnete mittlere Strahlkeule nach der Digitalen Strahlformung (entsprechend Abb. 69).

Die Ergebnisse zeigen einen vom Lackmaterial abhängigen kleinen systematischen Einfluss auf die Winkelmessung, der je nach Kalibrationsaufwand auch noch beherrschbar ist. Schwieriger ist die Situation bei mechanischen Strukturen, die einen größeren Einfluss zeigen können. Das Problem der Abdeckung durch den Stoßfänger ist also nicht vernachlässigbar, es lässt sich allerdings beherrschen bei Berücksichtigung gewisser Kriterien für den Einbauraum. Gleiches gilt für die verwendeten Lacksorten. In der Darstellung rechts lässt sich aus dem Vergleich der Strahldiagramme die Dämpfung durch den Stoßfänger direkt ablesen. Bei Einhaltung gewisser Randbedingungen sollten sich die meisten Lackmaterialien verwenden lassen.

### II.1.4.3 Sensorbewertung im Versuchsträger

In Ergänzung der ursprünglichen Planung wurde entschieden auch bei Continental einen Versuchsträger aufzubauen. Nur so konnten die folgenden Themen bearbeitet werden:

- Parametrierung der SW, insbesondere des Trackers und der Situationsanalyse im realitätsnahen Betrieb im Fahrzeug
- Nachweis der Sensorfunktion in einer verbauten Position
- Bewertung der Funktion in typischen Verkehrsszenarien



*Abbildung 74:RoCC Versuchsträger.*

Der Versuchsträger, eine Daimler W211 – Plattform wurde mit folgenden Komponenten ausgerüstet:

- RoCC – Sensor
- Messtechnik-Rechner mit MTS (Messtechniksoftware)
- Referenzkamera
- HMI bestehend aus Bildschirm und Tastatur
- Fahrzeuginfrastruktur (Bussystem, Stromversorgung, Interfaces, transportables Speichermedium)

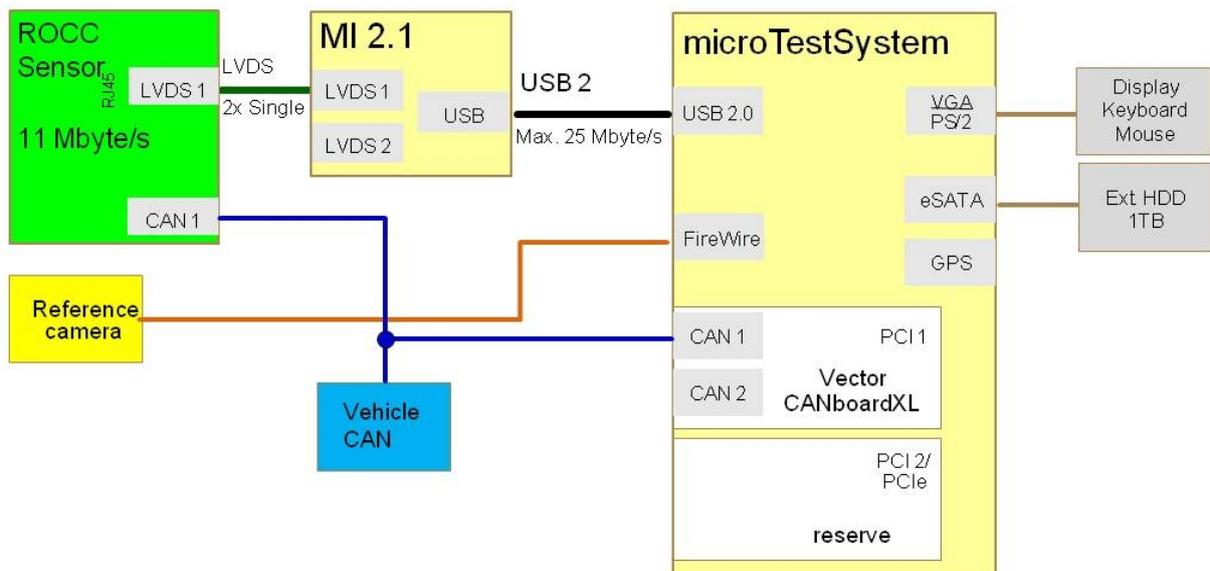


Abbildung 75: Blockschaltbild der Ausrüstung des Versuchsträgers.

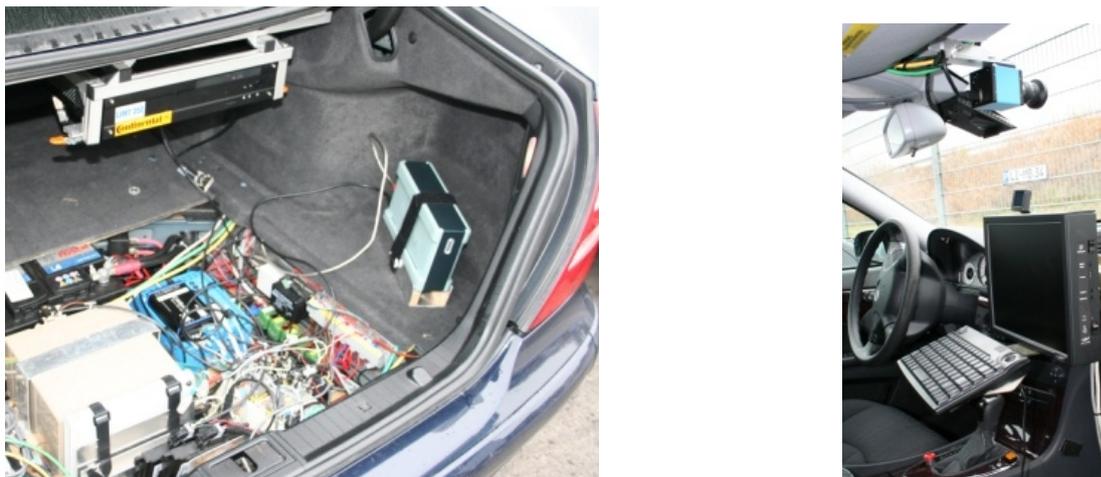


Abbildung 76: Fahrzeugausrüstung: Messrechner, Fzg.-Infrastruktur, Speichermedium (links) und Referenzkamera, HMI (rechts).

Mithilfe der Referenzkamera konnten die Szenarien für die spätere Auswertung als Film dokumentiert werden. Um den hohen Datenstrom der Rohdaten zu transportieren, wurde ein LVDS-BUS benutzt. Dieser wurde durch ein Messtechnikinterface (MI) auf einen PC-üblichen USB2-BUS umgesetzt, der vom Testrechner verarbeitet wurde. Zur Speicherung und dem Transport der relativ großen Datenmengen wurde eine externe Festplatte an dem Messrechner eingesetzt. Zum Betrieb der Komponenten wurde der Versuchsträger mit einer Infrastruktur ausgestattet, die im Wesentlichen aus den BUS-Systemen mit Verkabelung, den notwendigen Schnittstellen zum Anschluss und einer zusätzlichen Stromversorgung zur Ausfallsicherung bestand. Der Sensor wurde mittig an der Fahrzeugfront hinter dem Kühlergrill montiert.



Abbildung 77: Sensorintegration vor dem Kühler.

Die Ausrüstung diente in erster Linie dazu sämtliche Rohdaten des Sensors in Echtzeit aufzuzeichnen, um sie später offline detailliert auswerten zu können und sie für die Weiterentwicklung der SW zu dokumentieren. Gleichzeitig bot die MTS die Möglichkeit, die durchfahrenen Szenarien auch online sofort auszuwerten, um sie noch während des Auftretens in ihrer Relevanz zu beurteilen und entsprechend reagieren zu können.

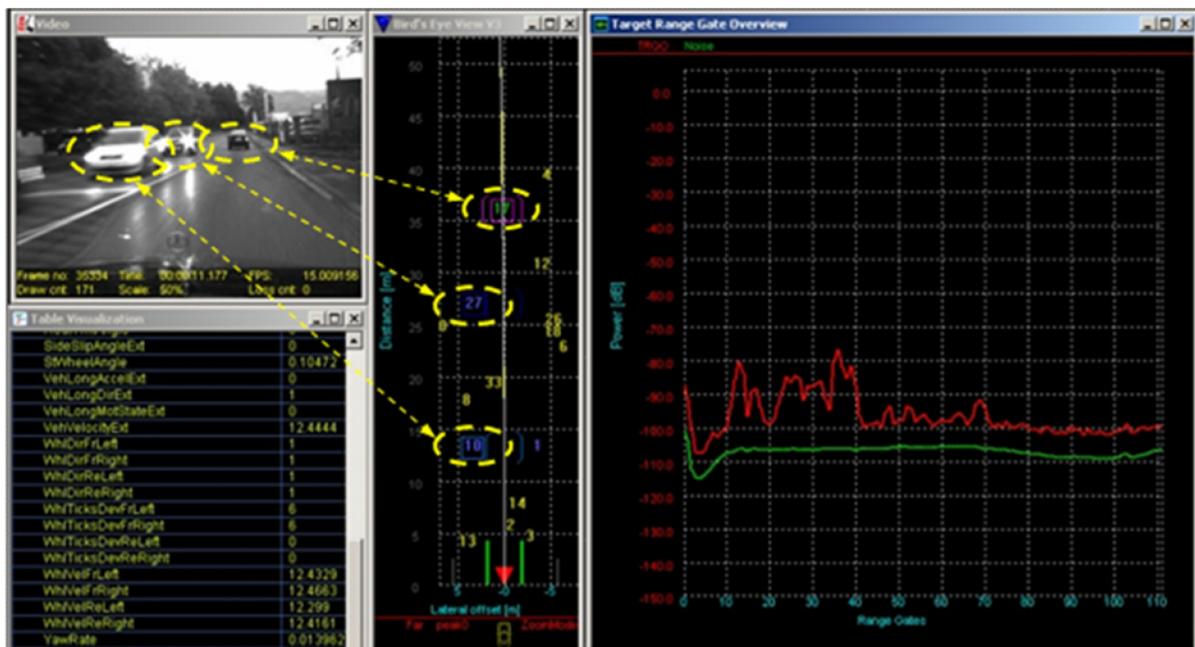


Abbildung 78: Beispielaufnahme aus einem aufgenommenen Szenario mit einigen exemplarischen Messfenstern.

Abbildung 78 zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Auswertungen, ein Bild der Signalamplituden, die vom Sensor erkannten Objekte in Vogelperspektive, insbesondere das relevante Objekt, Zahlenwerte ausgewählter Rohdaten und das Bild der Referenzkamera. Damit bot das MTS alle Möglichkeiten zu beurteilen, ob die Rohdatenverarbeitung und die Situationsanalyse wunschgemäß arbeiteten und die Szene entsprechend den Anforderungen richtig erfasst wurde. Um die MTS für das RoCC Projekt verfügbar zu machen, musste das im Hause vorhandene SW-Paket an die Rohdaten des RoCC-Sensors adaptiert werden. Insbesondere die Module zur digitalen Strahlformung und der entsprechenden Datenpräsentation mussten neu geschaffen werden.

Ein besonders eindrucksvolles Beispiel für die Präsentation der Fähigkeiten eines Sensors ist die Durchfahrt durch eine schmale Allee in Lindau. Diese lässt sich leicht interpretieren und zeigt einige wichtige Eigenschaften des Sensors:

- Die gleichzeitige und verlässliche Verarbeitung einer Vielzahl von Zielen
- Bestimmung der Befahrbarkeit von Gassendurchfahrten
- Die Fähigkeit zur Zieltrennung
- Die Empfindlichkeit (die Radarrückstreuung der Bäume ist nicht besonders groß)

Man erkennt schon in den Signalamplituden jede einzelne Baumreihe. Die Digitale Strahlformung ist in der Lage die Bäume in jeder Entfernung soweit sichtbar zu trennen und jeden einzelnen richtig darzustellen. Berücksichtigt man die Entfernung der letzten Baumreihe, so kommt man auf eine Zieltrennung von etwa  $7^\circ$ . Dieser Wert entspricht zufällig genau dem Wert, der im Messaufbau (s.o. Kap. II.1.4.2.) ermittelt wurde.

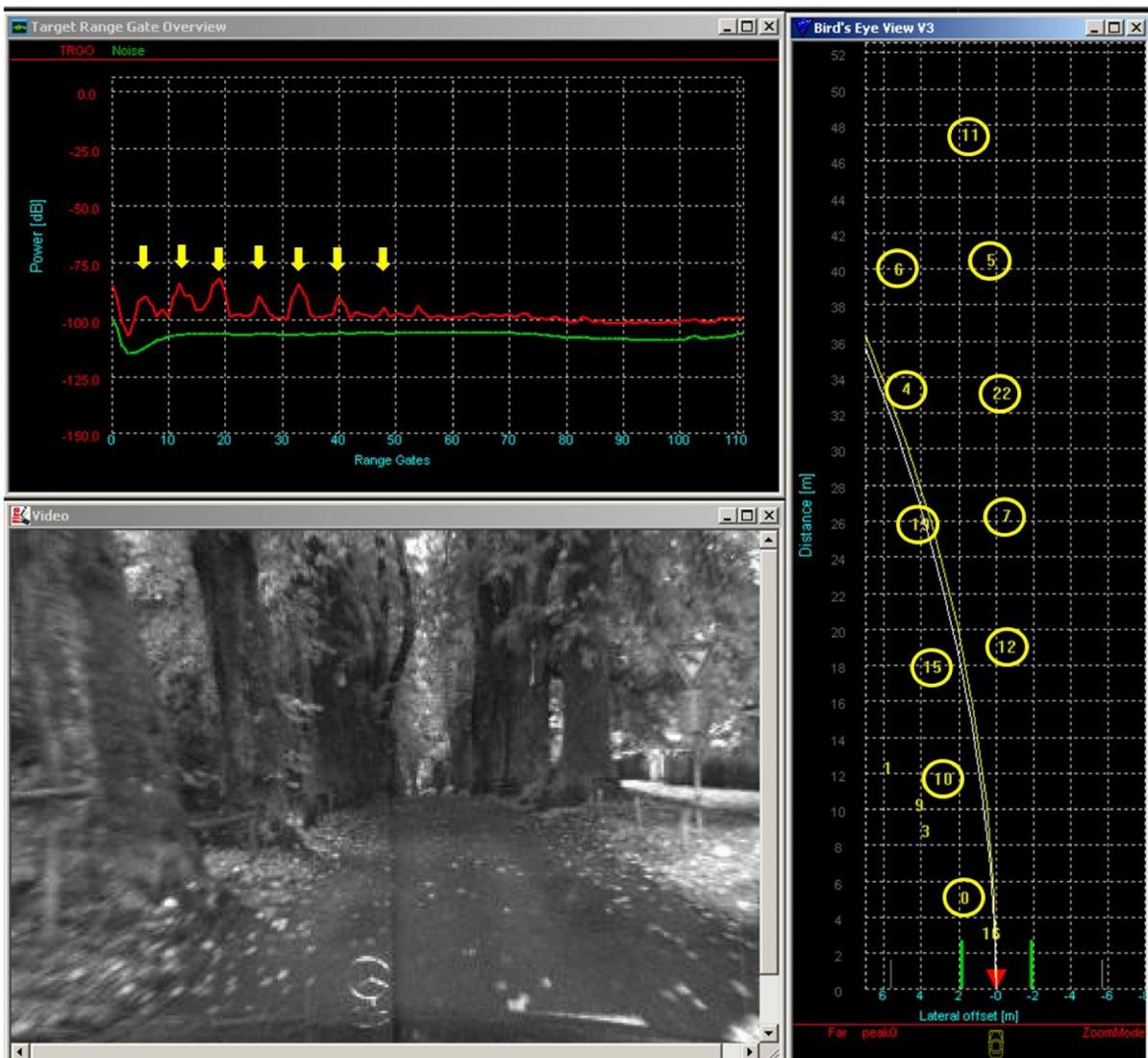


Abbildung 79: MTS-Aufnahme einer schmalen Allee mit ungefähr einer Fahrspurbreite.

## Geschwindigkeitsmessungen im Fahrzeug

Um die im Messbereich eingeschränkten Geschwindigkeitsmessungen auf der Schienenbahn zu ergänzen, wurden mit dem Versuchsträger Messungen in natürlicher Umgebung auf der Straße ausgeführt. Als Referenz zur Ermittlung der tatsächlichen Geschwindigkeit wurde ein „ADMA“-System (Automotive Dynamic Motion Analyser) der Firma GeneSys im Fahrzeug installiert. Dieses Gerät berechnet die Geschwindigkeit des Fahrzeugs aus den Daten eines differentiellen GPS-Systems und von integrierten Trägheits- und Drehratensensoren. Die Genauigkeit der ermittelten Geschwindigkeit wurde als statistische Abweichung durch einen Kalman-Filter vom ADMA-System selbst ermittelt. Sie war in der Regel besser als 0,02m/s.

In der Vorbeifahrt sollten alle vom Sensor erfassten stationären Ziele relativ zum Fahrzeug einen Geschwindigkeitsvektor entgegen der Fahrtrichtung aufweisen, der der Eigengeschwindigkeit entspricht. Aus der Zielliste wurden also die stationären Ziele ausgewählt und die Relativgeschwindigkeiten statistisch ausgewertet. Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Dargestellt wird die Differenz zwischen der ADMA-Messung und der Sensormessung. Daneben gezeigt werden die statistischen Streuungen der Sensormessungen.

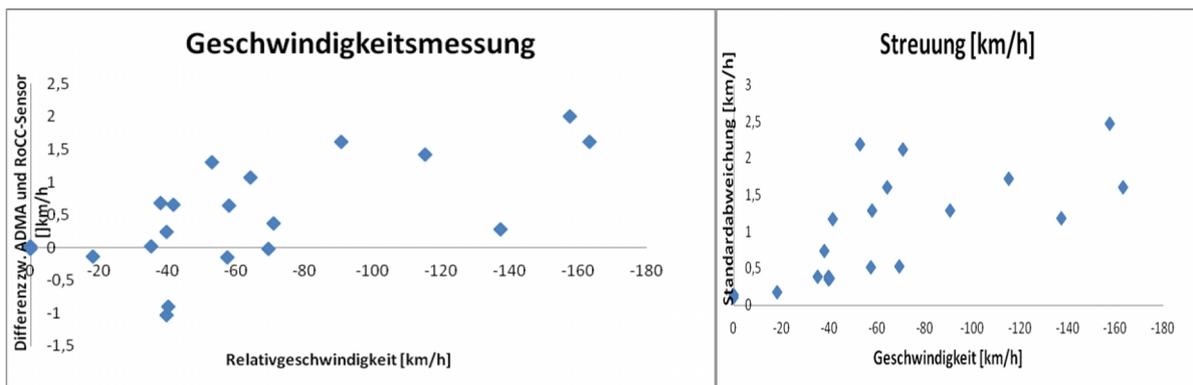


Abbildung 80: Messung der Relativgeschwindigkeit von stationären Objekten

Im niedrigen Geschwindigkeitsbereich erhält man eine sehr gute Übereinstimmung, die ungefähr den Resultaten der Messungen auf der Schienenbahn entspricht. Bei höheren Geschwindigkeiten werden die Abweichung und die Streuung etwas größer. Dabei ist zu beachten, dass in realen Umgebungen keine Punkt(Corner)ziele existieren und sich die Reflektionspunkte verschieben können. Gelegentlich wurden auch Eigenbewegungen der Ziele beobachtet, z.B. durch die Einwirkung von Wind auf das Laubwerk der Seitenbegrünung. Die sogenannten stationären Ziele in realen Umgebungen sind also nicht immer wirklich stationär.

## Zusammenfassung

- Es wurde ein skalierbarer Modulbaukasten auf Basis hochintegrierter SiGe-Bausteine für das Frequenzband bei 79GHz geschaffen.
- Auf dieser Grundlage wurde ein UWB-Nahbereichssensor aufgebaut mit einer Bandbreite, die in der gegenwärtigen Ausführung zwischen 200MHz und 1 GHz parametrierbar ist.
- Das verwendete Radarverfahren ist die Pulskompression (schnelle Rampen).
- Zur Winkelauflösung wurde ein elektronisch scannendes Verfahren auf Grundlage der digitalen Strahlformung verwendet.
- Die Antennen sind als SIW-Schlitzarray ausgeführt.
- Die Reichweite auf PKW (10m<sup>2</sup>) beträgt ca. 90m.
- Die Rangegatelänge ist in der gegenwärtigen Ausführungsform zwischen 0,2m und 1m parametrierbar, bei einer Gesamtzahl von 112 Rangegates.
- Der Beobachtungsbereich beträgt ca. +/- 35°. Dabei werden noch Ziele getrennt, die sich um einen Azimutwinkel von 7° unterscheiden.
- Die Messfehler bewegen sich in einem Abstandsbereich von +/-0,1m, in einem Geschwindigkeitsbereich von +/-0,05m/s und einem Winkelbereich von +/-0,3°.
- Die Demonstrationssensoren wurden in einem kompakten, robusten Aufbau realisiert.
- Bei der Integration der SiGe-Bausteine wurde die eWLB-Gehäusetechnik erfolgreich erprobt.

### Projektziele:

- Der Aufbau der geplanten Demonstrationssensoren wurde nach Verlängerung abgeschlossen.
- Die Erprobung im Labor lieferte gute Resultate.
  - Die Integration in ein Erprobungsfahrzeug bestätigte die Tauglichkeit der Sensoren für einen Einsatz in typischen Anwendungen der Fahrerassistenz.

### Ausblick:

Es wurde eine Technologiebasis für zukünftige Sensor-Plattformen aus den folgenden Modulen geschaffen:

- ▶ SiGe-Bausteine
- ▶ HW-Module
- ▶ Integrationstechnologie
- ▶ SW-Module
- ▶ Antennen

Diese Module lassen sich einfach skalieren und an viele Applikationen anpassen, z.B. durch eine Modifikation oder Vervielfältigung der Antennen, oder eine Kaskadierung der SiGe-Bausteine. Die SW-Module lassen sich entsprechend parametrieren. Die flexible Kombination der Module gestattet einen Einsatz in unterschiedlichen Sensorgattungen, als LRR, MRR, oder SRR-Sensoren in den verschiedensten Ausführungsformen.

## II.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Continental AG ist einer der weltweit führenden Hersteller von aktiven Fahrerassistenzsystemen. Die Radarsensorik ist dabei ein wesentlicher Bestandteil des Technologie-Portfolios. Die SiGe-Technologie bietet Integrationsmöglichkeiten zur Miniaturisierung und Kosteneinsparpotentiale als Schlüsselemente für eine zukünftige großvolumige Verbreitung der Radarsensoren speziell in aktiven Sicherheitssystemen. Sie ist die einzige derzeit verfügbare Technologie mit der sich kostengünstige, wettbewerbsfähige automobiler Radarsensoren bei 79GHz aufbauen lassen. Ihr Markteinsatz im Frequenzbereich zwischen 76 und 81 GHz ist für zukünftige Produkte fest eingeplant. Sie kommt für SRR-Sensoren ebenso in Frage wie für MRR oder LRR-Sensoren.

Da der Markt für diese Produkte sich derzeit in einem rasanten Wachstum befindet, sehen wir eine große Chance diese Kenntnisse auch zu verwerten. Die Marktprognose lässt sich einer Studie der Marktforschungsgesellschaft Strategy Analytics [Mak12] entnehmen, sowohl für SRR/MRR-Sensoren als auch für LRR-Sensoren.

Die als Resultat der Projektarbeit aufgebauten Sensoren erfüllen eine wertvolle Funktion bei Vorführungen zur Demonstration der Technologie bei Kunden und für eigene Evaluierungskampagnen. Sie helfen potentielle Risikofaktoren der neuen Technologie besser einzuschätzen und zu kalkulieren.

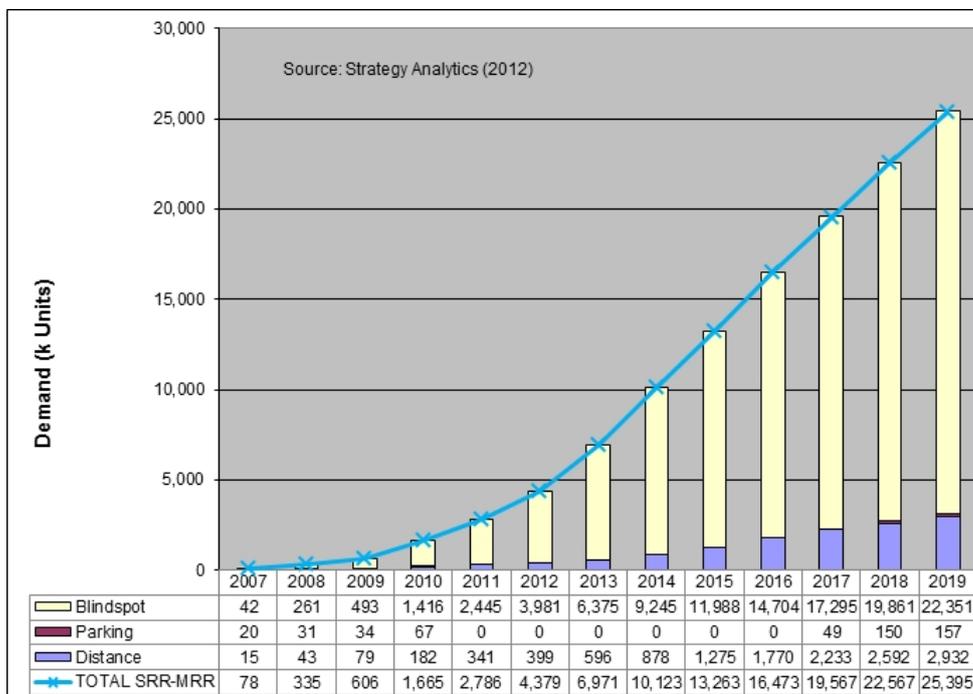


Abbildung 81: Marktentwicklung für SRR/MRR-Sensoren.

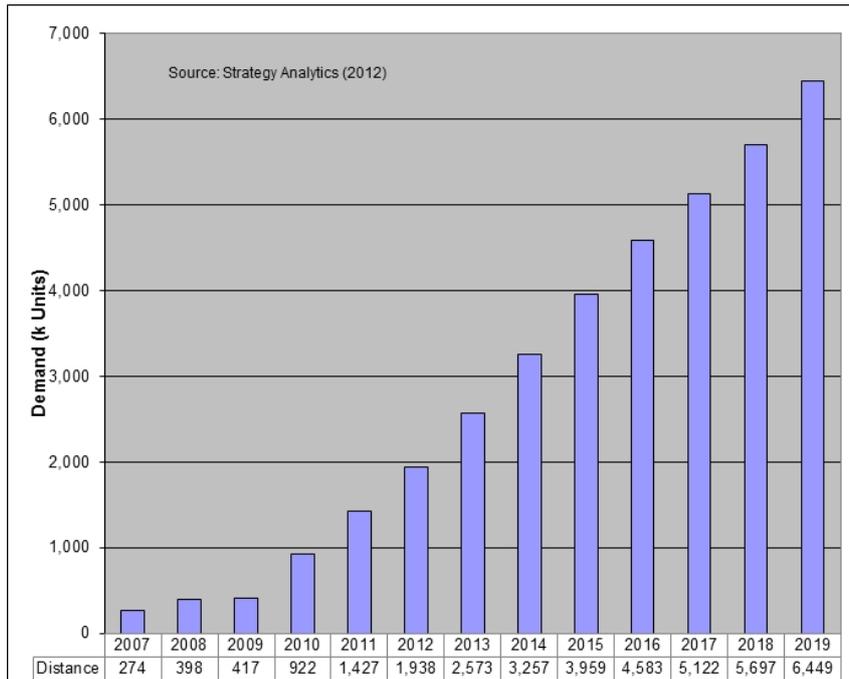


Abbildung 82: Marktentwicklung für LRR-Sensoren.

Die Arbeiten zur Systemtechnik, zur Aufbautechnik und Integration, zu den Antennen, den SW-Modulen sowie die praktische Evaluierung haben uns wesentliche Erkenntnisse gebracht, die in zukünftige Produktentwicklungen einfließen werden. Die Module zur digitalen Strahlformung beispielsweise entsprechen dem aktuellen Entwicklungstrend des Wettbewerbs und sind aus modernen Radarsensoren kaum mehr wegzudenken.

Entwickelt sich die Kostenstruktur und die Verbreitung der Sensoren wie geplant, werden nicht nur die Hersteller sondern auch die Endkunden und die Gesellschaft profitieren. Den Nutzern steht eine Vielzahl neuer Funktionen zur Verfügung, um die individuelle Mobilität nicht nur wesentlich komfortabler sondern vor allem auch sicherer zu machen, einer Vision die von der Continental AG verfolgt wird.

Die Radarsensoren sind beispielsweise essentieller Bestandteil von ContiGuard, einem System, das unter Zusammenführung aller Informationen das Risiko einer Fahrsituation abschätzen und gegebenenfalls geeignete Maßnahmen einleiten soll, zur Verhinderung eines Unfalls oder mindestens der Abschwächung seiner Folgen. Der Nutzen eines solchen Systems lässt sich aus den Verkehrsstatistiken ableiten. Gemäß einer Abschätzung der BASt verursachen Verkehrsunfälle in Deutschland jedes Jahr einen volkswirtschaftlichen Schaden von ca. 30 Milliarden Euro und fordern ungefähr 4000 Todesopfer. Etwa die Hälfte des Schadens entfällt auf Sachschäden, die andere Hälfte auf Personenschäden. Die Bedeutung derartiger Sicherheitssysteme wird durch Studien mit der Kernaussage unterstrichen, dass damit die Zahl bestimmter Unfalltypen um bis zu 70% gesenkt werden kann [All06], [Bau07]. Diese Erkenntnis setzt sich gegenwärtig nicht nur bei den Kunden sondern auch in der Politik durch und führt zu dem prognostizierten Marktwachstum.

## II.3 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Auf Systemebene sind bei den Wettbewerbern ähnliche Entwicklungen zu beobachten. Die Digitale Strahlformung hat den Vorteil hoher Flexibilität und mechanischer Robustheit. Auch der notwendige Bauraum für die Antennen ist relativ gering. Der Nachteil eines hohen Rechenaufwandes wird kompensiert durch die Elektronikentwicklung der letzten Jahre (entsprechend dem Mooreschen Gesetz), die die erforderliche Rechenleistung inzwischen kostengünstig zur Verfügung stellt. Weitere Bestrebungen Kosten und Bauraum einzusparen konzentrieren sich auf die Aufbautechnologie.

Während der Projektlaufzeit des Vorhabens wurden zwei Förderprojekte abgeschlossen, mit dem Ziel, der Anwendung eines kostengünstigen 79 GHz automobilen Radars einen Schritt näher zu kommen. Im Gegensatz zu „RoCC“, dessen Ziel die Entwicklung der SiGe-Technologie und der Systemarchitektur war, gab es in den Projekten „KRAFAS“ und „RADARAUGE“ eine andere Ausrichtung. Der Schwerpunkt im Projekt „KRAFAS“ [Sch06] lag in der Erarbeitung kostengünstiger Aufbautechnologien zur Systemintegration mit besonderer Blickrichtung auf das CID-Verfahren. Im Fokus des Projektes „RADARAUGE“ [Schm06], [Kör06] war die Steigerung der Winkelauflösung. Zu diesem Zweck wurden elektronisch schwenkbare Antennen zusammen mit entsprechenden Verfahren zur Signalverarbeitung aufgebaut.

Es gibt Ansätze den Höchsthfrequenzbereich auch mit Standard CMOS-Komponenten zu erreichen. Erste Schaltungen existieren bei 60 GHz. Bei 80GHz ist die Technologie derzeit noch im Forschungsstadium. Es bleibt abzuwarten, ob damit ein Kostenvorteil erzielt werden kann.

Eine essentielle Eigenschaft des Sensoraufbaus ist die Wärmeentwicklung. Ein Weg um diese zu reduzieren ist, die Grenzfrequenz der Technologie zu erweitern. Im EU-Projekt dotfive versuchten 15 europäische Partnerunternehmen zeitparallel zu RoCC eine Grenzfrequenz von 0,5 Terrahertz zu erreichen.

Ende 2010 starteten 9 größtenteils europäische Partnerunternehmen unter dem Rahmenprogramm FP7 das 3-jährige Vorhaben SUCCESS. Es zielt auf die Entwicklung von Designmethoden und Testverfahren für eine kostengünstige Systemintegration im Höchsthfrequenzbereich. Angewendet werden die Verfahren System-in-Package (SiP) und System-on-Chip (SoC). Es ist beabsichtigt sie anhand eines 122GHz Aufbaus zu demonstrieren.

Zeitgleich zu KOKON und RoCC wurden auch in Frankreich, veranlasst durch die Frequenzregulierung, die nationalen Fördervorhaben „RADAR ACC“ (2007 – 2010) und „ARPOD“ (2009 – 2012) durchgeführt. Ziel war ebenfalls 76-81GHz UWB Sensoren auf SiGe Basis marktfähig zu machen und unter Beteiligung französischer OEMs die Applikationstauglichkeit zu demonstrieren. In Radar-ACC konzentrierte man sich auf einen leistungsfähigen Sensor für vorausschauende Anwendungen sowohl im LRR wie im SRR-Bereich. Demgegenüber verfolgte Arpod den Ansatz die Technologiekosten durch ein Multisensorkonzept entscheidend zu senken. Zur Verwendung sollten möglichst einfache kostengünstige Sensoren kommen, deren gemeinsame Auswertung auf Systemebene zu einer hinreichenden Performancesteigerung führen sollte, um Anwendungen an der

Fahrzeugseite und am Heck zu realisieren und damit einen intelligenten „Sicherheitsgurt“ um das Fahrzeug herum zu legen.

## **II.4 Veröffentlichungen der Ergebnisse**

Die Ergebnisse, die die Continental, A.D.C. GmbH im Rahmen des Fördervorhabens erzielte, wurden der Öffentlichkeit bei folgenden Gelegenheiten vorgestellt:

- Im Rahmen von Presseerklärungen
- Direkte Information der Kunden über neue Technologien
- Ein öffentliches Statusseminar im Rahmen der German Microwave Conference, der GeMiC 2010
- Das öffentliche Abschlusssseminar bei Infineon am 09.11.2011 und 10.11.2011 mit begleitender Ausstellung
- Über einschlägige Doktorarbeiten (Hr. Michael Frei, Universität Ulm)
- Den vorliegenden Abschlussbericht
- Eine noch geplante Veröffentlichung:

Joachim Massen, Michael Frei, Wolfgang Menzel, Ulrich Möller; „A 79 GHz SiGe Short Range Radar Sensor for Automotive Applications“, IJMWT, Dez. 2012, Special Edition: RoCC

# Anhang

## Literatur

- [All06] Studie des Allianz Zentrums für Technik im Rahmen des BMBF Projektes „Safe Truck“
- [And10] Andries Johannes Nicolaas Maritz. Investigation and design of a slotted waveguide antenna with low 3d sidelobes. *Stellenbosch University*, 2010.
- [And11] Andres, M.; Feil, P.; Menzel, W.; Bloecher, H.-L.; Dickmann, J.: Analysis of automobile scattering center locations by SAR measurements, Radar Conference (RADAR), 2011 IEEE , May 2011, vol., no., pp.109-112, 23-27.
- [Ans] Ansoft. Passive microwave component design and optimization.
- [Bau] Bauer Frank, persönliche Mitteilungen
- [Bau07] Anne Bauer, Bundesanstalt für Straßenwesen, „Erkenntnisse aus Unfalldatenanalysen“ Forum Fahrerassistenzsysteme, Aschaffenburg 2007
- [Bau11] Bauer Frank; Menzel Wolfgang; “A 79 GHz Microstrip Grid Array Antenna Using a Laminated Waveguide Feed in LTCC”, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 2011
- [Bis05] Bishop, R: Intelligent Vehicle Technology and Trends, Artech House, Inc. 2005, ISBN 1-58053-911-4, 28 – 33.
- [Blo09] Bloecher, H.-L.; Sailer, A.; Rollmann, G.; Dickmann, J.: 79 GHz UWB automotive short range radar – Spectrum allocation and technology trends, *Adv. Radio Sci.*, 7, 61-65, 2009.
- [Cas02] Y. Cassivi, L. Perregrini, P. Arcioni, M. Bressan, K. Wu, and G. Conciauro. Dispersion characteristics of substrate integrated rectangular waveguide. *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, 12(9):333-335, 2002.
- [Con81] Conti, R.; Toth, J.; Dowling, T.; Weiss, J.; "The wire grid microstrip antenna," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* , vol.29, no.1, pp. 157- 166, Jan 1981
- [CST] CST MICROWAVE STUDIO®, Version 2010, July 2010, CST AG, Darmstadt, Germany, [www.cst.com](http://www.cst.com).
- [EC11] European Commission: Commission Implementing Decision 2011/485/EU of 29 July 2011 amending Decision 2005/50/EC on the harmonisation of the 24 GHz range radio spectrum band for the time-limited use by automotive short-range radar equipment in the Community (notified under document C(2011) 5444), *Official Journal of the European Union L 198/71*, 30 July 2011.
- [Eil78] R. Elliott and L. Kurtz. The design of small slot arrays. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 26(2):214-219, 1978.
- [Eil86] R. Elliott and W. O'Loughlin. The design of slot arrays including internal mutual coupling. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 34(9):1149 - 1154, sep 1986.

- [Feg08] Feger, R.; Schuster, S.; Scheiblhofer, S.; Stelzer, A.: Sparse Antenna Array Design and combined Range and Angle Estimation for FMCW Radar Sensors, in Proc. IEEE Radar Conf. 2008, Rome, Italy, . RADAR '08. , pp.494-499, May 2008.
- [Feg09] Feger, R.; Wagner, C.; Schuster, S.; Scheiblhofer, S.; Jäger, H.; Stelzer, A.: A 77-GHz FMCW MIMO Radar Based on an SiGe Single-Chip Transceiver, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.57 no.5 pp.1020-1035, May 2009.
- [Fei10] P. Feil and F. Bauer. Two right-angle microstrip to waveguide transitions suitable for metal backed substrates. In *Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA), 2010 International Conference on*, pages 450 -453, sept. 2010
- [Fre11] Frei, M.; Bauer, F.; Menzel, W.; Stelzer, A.; Maurer, L.; , "A 79 GHz differentially fed grid array antenna," *Microwave Conference (EuMC), 2011 41st European* , vol., no., pp.1320-1323, 10-13 Oct. 2011
- [Gat02] R.V. Gatti, R. Sorrentino, and M. Dionigi. Equivalent circuit of radiating longitudinal slots in dielectric filled rectangular waveguides obtained with FDTD method. In *Microwave Symposium Digest, 2002 IEEE MTT-S International*, volume 2, pages 871-874, 2002.
- [Has12] Hasch, J.; Topak, E.; Schnabel, R.; Zwick, T.; Weigel, R.; Waldschmidt, C.: , Millimeter-Wave Technology for Automotive Radar Sensors in the 77 GHz Frequency Band, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol.60 no.3 pp. 845-860, March 2012.
- [Hir00] Hirokawa, J.; Ando, M.; , "76 GHz post-wall waveguide fed parallel plate slot array with 45 degree linear polarization," *Microwave Symposium Digest. 2000 IEEE MTT-S International* , vol.3, no., pp.1973-1976 vol.3, 2000
- [INV05] Ergebnisbericht des BMBF Förderprojektes „INVENT“, 2005
- [Jan10] Stephan Janouch, Fahrerassistenzsysteme als Wettbewerbsvorteil, Elektronik automotive, 7. Okt. 2010,  
[http://www.elektroniknet.de/automotive/news/article/29876/0/Fahrerassistenzsysteme\\_als\\_Wettbewerbsvorteil/](http://www.elektroniknet.de/automotive/news/article/29876/0/Fahrerassistenzsysteme_als_Wettbewerbsvorteil/)
- [Kam54] I. Kaminow and R. J. Stegen, "Waveguide Slot Array Design," Hughes Aircraft Co. Tech. Mem. 348, Culver City, CA, 1954.
- [Kee95] Kees, N.; Schmidhammer, E.; Detlefsen, J.: Improvement of angular resolution of a millimeterwave imaging system by transmitter location multiplexing, IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, vol. 2, 1995, pp. 969-972.
- [Kör06] R.Körber, V.Ziegler, H.L.Blöcher, R.Schneider, D.Schwanke, S.Hoyler, „Entwurf eines bildgebenden Millimeterwellen-Radars mit phasengesteuerter Antenne“, VDE Kongress Aachen, Oktober 2006.
- [Kra64] Kraus, J.; "A backward angle-fire array antenna," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* , vol.12, no.1, pp. 48- 50, Jan 1964

- [Lan06] Lanne, M.; Lundgren, A.; and Viberg, M.: Calibrating an array with scan dependent errors using a sparse grid. ; *Signals, Systems and Computers, 2006. ACSSC '06, Fortieth Asilomar Conference*, Oct. 29 2006-Nov. 1 2006: 2242-2246, 2006.
- [Lan07] Lanne, M.; Viberg, M.; and Lundgren, A.: Adaptive beamforming using calibration vectors with unknown gain and phase. *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 9-15 June 2007: 4208-4211, 2007.
- [Lud02] Albrecht Ludloff: Handbuch „Praxiswissen Radar und Radarsignalverarbeitung“, Vieweg Verlag, 2002, 3. Auflage, **ISBN**: 352826568X
- [Lük09] Lücke, S.; Wintermantel, M.; Raste, T.; Rieth, P.: Ein neuartiges Fernbereichsradar und dessen Anwendung zur Lenkunterstützung in Ausweichsituationen, Automatisierungs-, Assistenzsysteme und eingebettete Systeme für Transportmittel AAET, Braunschweig, 2009.
- [Mak12] Mak, K.: ADAS Demand Outlook: Affordability and Reliability Key to Future Growth, Strategy Analytics Report 2010, 77 – 97, updated April 2012.
- [Mas08] Massen, J.; Kühnke, L.; Frank, R.; Gruson, F.; Abschlussbericht des BMBF-Projektes KOKON, Teilvorhaben Continental, “Kfz-Höchstfrequenzelektronik”, Förderkennzeichen 01M3161C, online verfügbar unter: <http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb08/578633248.pdf>, zuletzt besucht am 17.07.2012.
- [Men10] Menzel, W.: Millimeter-wave radar for civil applications, in Proc. European Radar Conference (EuRAD), Oct. 2010, pp.89-92.
- [Nak94] Nakano, H.; Oshima, I.; Mimaki, H.; Yamauchi, J.; Hirose, K.; "Numerical analysis of a grid array antenna," Singapore ICCS '94. Conference Proceedings. , vol.2, no., pp.700-704 vol.2, 14-18 Nov 1994
- [Nak95] Nakano, H.; Oshima, I.; Mimaki, H.; Hirose, K.; Yamauchi, J.; "Center-fed grid array antennas," *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1995. AP-S. Digest , vol.4, no., pp.2010-2013 vol.4, 18-23 Jun 1995
- [Nak97] Nakano, H.; Kawano, T.; "Grid array antennas," *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 1997. IEEE., 1997 Digest , vol.1, no., pp.236-239 vol.1, 13-18 Jul 1997
- [Nak01] Nakano, H.; Kawano, T.; Mimaki, H.; Yamauchi, J.; "Analysis of a printed grid array antenna by a fast MoM calculation technique," *Antennas and Propagation*, 2001. Eleventh International Conference on (IEE Conf. Publ. No. 480) , vol.1, no., pp.302-305 vol.1, 2001
- [Nak06] Nakano, H.; Osada, H.; Yamauchi, J.; "Strip-type Grid Array Antenna with a Two-Layer Rear-Space Structure," *Antennas, Propagation & EM Theory*, 2006. ISAPE '06. 7th International Symposium on , vol., no., pp.1-4, 26-29 Oct. 2006
- [Nak07] Nakano, H.; Osada, H.; Mimaki, H.; Iitsaka, Y.; Yamauchi, J.; "A Modified Grid Array Antenna Radiating a Circularly Polarized Wave," *Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, 2007 International Symposium on , vol., no., pp.527-530, 16-17 Aug. 2007

- [Poz92] Pozar, D.M.; , "Microstrip antennas," *Proceedings of the IEEE* , vol.80, no.1, pp.79-91, Jan 1992
- [Ras11] Rasshofer, R. H.; Fitzek, F.: Neue Radarsensoren für Sicherheit und Komfort im Automobil der Zukunft, *Elektronik Automotive*, 2011-01-17, online available: [http://www.elektroniknet.de/automotive/technik-know-how/sicherheits elektronik/article/66015/5/Neue\\_Radarsensoren\\_fuer\\_Sicherheit\\_und\\_Komfort\\_im\\_Automobil\\_der\\_Zukunft/](http://www.elektroniknet.de/automotive/technik-know-how/sicherheits elektronik/article/66015/5/Neue_Radarsensoren_fuer_Sicherheit_und_Komfort_im_Automobil_der_Zukunft/), last time visited 2012-05-18.
- [Ren91] S.R. Rengarajan and D.D. Nardi. On internal higher order mode coupling in slot arrays. *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 39(5):694 -698, may 1991.
- [Sch06] M.Schneider, „KRAFAS – Innovationen in der Mikrosystemtechnik und der Hochfrequenz-Mikroelektronik für kostenoptimierte Radarsensoren im Automotive-Bereich“, VDE Kongress Aachen, Oktober 2006
- [Sch07] R.Schneider, H-L.Blöcher, K.M.Strohm, M.Kirn, „Automotive High Frequency Electronics, KOKON, Overview and Results“ European Microwave Week, Munich 2007, EuRAD
- [Schm86] R. Schmidt, „Multiple emitter location and signal parameter estimation“, *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, 34:276-280, 1986
- [Schm06] U.Schmid, H.Seidel, R.Körber, V.Ziegler, A.Würtz, D.Schwanke, S.Hoyler, H-L.Blöcher, „RADARAUGE - Phasengesteuertes Radar modul bei 79GHz auf keramischen und organischen Substraten“ VDE Kongress Aachen, Oktober 2006
- [Sop] Sophocles J. Orfanidis, *Electromagnetic Waves and Antennas*, ECE Department, Rutgers University
- [Sun08] Sun, M.; Zhang, Y.P.; "Design and integration of 60-GHz grid array antenna in chip package," *Microwave Conference, 2008. APMC 2008. Asia-Pacific* , vol., no., pp.1-4, 16-20 Dec. 2008
- [Win07] Wintermantel, M.; Rasshofer, R.H.: Radarsystem mit nur einem Sensor zur Umfelderkennung eines Kraftfahrzeugs, German Pat. No. DE 10 2007 061 814.
- [Win09] H. Winner, S. Hakuli, G. Wolf, „Handbuch Fahrerassistenzsysteme“, Vieweg +Teubner, 2009, ISBN 978-3-8348-0287-3, S. 24 – 52, 123 – 169.
- [Win10] Wintermantel, M.: Radar Systems with Improved Angle Formation, int. Pat. No. WO 2010/000252, 2010, 11 - 15.
- [Yan04] Li Yan, Wei Hong, Guang Hua, Jixin Chen, Ke Wu, and Tie Jun Cui. Simulation and experiment on SIW slot array antennas. *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, 14(9):446-448, 2004.
- [Yoo09] Yoon, S. W.; Bahr, A.; Baraton, X.; Marimuthu, P.C.; Carson, F.: 3D eWLB (embedded wafer level BGA) Technology for 3D-Packaging/3D-SiP (Systems-in-Package) Applications, in *Proc. Electron. Packag. Technol. Conf.*, Dec. 2009, pp. 915–919.

## Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Unterstützung von Assistenzsystemen für verschiedene Klassen von Verkehrsunfällen.</i>	5
<i>Abbildung 2: Struktur des Verbundvorhabens.</i>	6
<i>Abbildung 3: Ablauf des Teilprojektes bei Continental.</i>	8
<i>Abbildung 4: KOKON-Sensor.</i>	8
<i>Abbildung 5: V-Modell der Projektstruktur und der Arbeitspakete.</i>	10
<i>Abbildung 6: Typische Applikationen im näheren Fahrzeugumfeld.</i>	12
<i>Abbildung 7: Markttrends bei Fahrerassistenzsystemen.</i>	12
<i>Abbildung 8: Frequenzmodulation im RoCC Sensor.</i>	15
<i>Abbildung 9: Zweidimensionales, komplexwertiges Spektrum nach der zweiten DFT.</i>	16
<i>Abbildung 10: Prinzip der Digitalen Strahlformung.</i>	18
<i>Abbildung 11: Spektrum des Strahlformers ohne und mit Kalibration (eine Quelle bei 0°).</i>	19
<i>Abbildung 12: Winkelfehler nach der Kalibration abh. von der Gain Streuung (oben, links), dem maximalen Phasenfehler (oben, rechts) und dem Positionsfehler der Antennen (unten).</i>	20
<i>Abbildung 13: Schemaskizze des Fehlermodells des Sensorarrays.</i>	21
<i>Abbildung 14: Winkelfehler abhängig von den Fehlern der Einflussparameter.</i>	22
<i>Abbildung 15: Ablaufschema der Autokalibration.</i>	22
<i>Abbildung 16: Fehler nach der Kalibration abhängig von Fehlern vor der Kalibration.</i>	23
<i>Abbildung 17: Fehler nach Kalibration beim Auftreten von Überkopplungen.</i>	23
<i>Abbildung 18: SW-Module und übergebene Datenlisten</i>	25
<i>Abbildung 19: Blockschaltbild der ECU / NF-Platine.</i>	25
<i>Abbildung 20: Blockschaltbild des HF-Moduls.</i>	27
<i>Abbildung 21: Positionen der realen und synthetischen Antennen.</i>	29
<i>Abbildung 22: Patchantenne mit Via-Käfig und SIW-Speisung.</i>	30
<i>Abbildung 23: Momentanstromverteilung der Einzelzelle einer Gridantenne.</i>	31
<i>Abbildung 24: Schlitzkopplung von SIW auf Grid; links Draufsicht; rechts Lagenaufbau.</i>	32
<i>Abbildung 25: Schlitzkopplung von SIW auf zweizeiliges Gitter.</i>	33
<i>Abbildung 26: Vergleich von Messung und Simulation der Abstrahlcharakteristiken in Azimut (links) und Elevation (rechts).</i>	33
<i>Abbildung 27: Verschiedene Schlitztypen in einem substratintegrierten Hohlleiter.</i>	34
<i>Abbildung 28: Ausbreitungskonstante über effektiver Hohlleiterbreite eines SIW bei 79 GHz.</i>	35
<i>Abbildung 29: Normierte Abstrahlleistung eines Schlitzes mit 200 µm Versatz über Hohlleiterhöhe.</i>	36
<i>Abbildung 30: Ein-Tor-Simulationsmodell und Ersatzschaltbild des Einzelschlitzes.</i>	37
<i>Abbildung 31: Zwei-Tor-Simulationsmodell und Ersatzschaltbild des Einzelschlitzes.</i>	37
<i>Abbildung 32: Simulierte Resonanzlänge, Konduktanz und Abstrahlleistung über Schlitzversatz.</i>	38
<i>Abbildung 33: h-Kurven eines Schlitzes mit einem Versatz von 200 µm.</i>	39
<i>Abbildung 34: Simulationsmodell zur Bestimmung der Verkopplung zweier Schlitzes.</i>	40
<i>Abbildung 35: Änderung der Schlitzbreite in Abhängigkeit der Resonanzbreite (vgl. Stegen).</i>	40
<i>Abbildung 36: Zeichnung des 3x15 Subarrays aus substratintegrierten Hohlleiter-Schlitzantennen.</i>	41
<i>Abbildung 37: Foto der Testleiterkarte mit 2 TX- und 4 RX-Subarrays.</i>	41
<i>Abbildung 38: Vergleich von gemessener und simulierter Abstrahlcharakteristik in der Elevation (links) und im Azimut (rechts) eines einzelnen Subarrays.</i>	42
<i>Abbildung 39: Bild und Schema des Aufbaus zur Freiraummessung.</i>	43

<i>Abbildung 40: Messungen der Permittivität und der Dämpfung (<math>\tan\delta</math>) von Rogers3003.</i>	43
<i>Abbildung 41: Testsheet mit Back-to- Back Balun.</i>	44
<i>Abbildung 42: Untersuchung einer Microstrip- Teststruktur auf einem Rogers3003-Substrat: Simulation und Messung.</i>	44
<i>Abbildung 43: Schemabild des eWLB-Gehäuses (links) und Kontaktierungsebene mit den Lötballs der HF-SiGe-Chips(rechts)(Bildquelle Infineon).</i>	45
<i>Abbildung 44: Temperaturverteilung auf Grundlage einer FEM-Simulation.</i>	46
<i>Abbildung 45: Wärmeersatzschaltbild eines Sensors mit Vergleich zwischen Modell, Simulation und Messung.</i>	47
<i>Abbildung 46 Objektidentifikation durch den Tracker.</i>	48
<i>Abbildung 47 Integration der SW-Module und Signalfluss.</i>	48
<i>Abbildung 48: Lagenaufbau eines RoCC-Sensors.</i>	50
<i>Abbildung 49: Zusammengebauter aufgeschnittener RoCC-Sensor.</i>	50
<i>Abbildung 50: Beispielsignal, das im Nahbereich(gelb) zur Unterdrückung von Störern gedämpft ist.</i>	51
<i>Abbildung 51: Darstellung des Clipping bei einem gestörten Signal.</i>	52
<i>Abbildung 52: Darstellung der Filterung eines gestörten Signals.</i>	52
<i>Abbildung 53: Untersuchungsszenario, 3 Ziele, in einer Entfernungs-Geschwindigkeitsdarstellung.</i>	53
<i>Abbildung 54: Untersuchungsszenario; 3 Ziele, in der Entfernungs-Geschwindigkeitsdarstellung nach Anwendung des Filter-Algorithmus zur Unterdrückung von Interferenzen.</i>	54
<i>Abbildung 55: Testaufbau mit Adapterplatinen.</i>	55
<i>Abbildung 56: Antennenmesskammer.</i>	56
<i>Abbildung 57 Sensordrehstand und Reflektoraufhängung in der Messkammer.</i>	56
<i>Abbildung 58: Steuerungseinheit der Antennenmesskammer.</i>	56
<i>Abbildung 59: Vergleich der gemessenen mit der eingestellten Entfernung.</i>	57
<i>Abbildung 60: Abweichungen der gemessenen von der eingestellten Entfernung.</i>	57
<i>Abbildung 61 Vergleich der Winkelmesswerte mit den eingestellten Werten.</i>	58
<i>Abbildung 62: Abweichungen der Winkelmesswerte von den Sollwerten.</i>	58
<i>Abbildung 63: Reichweite des Sensors abhängig vom Azimut-Winkel kalkuliert aus Messdaten aus der Antennenmesskammer.</i>	59
<i>Abbildung 64: Darstellung der winkelabhängigen Reichweite verschiedener RoCC-Sensoren in kartesischen Koordinaten.</i>	59
<i>Abbildung 65: Aufnahmen der Messtechnik auf der Schienenmessbahn.</i>	60
<i>Abbildung 66: Darstellung der gemessenen Geschwindigkeit über der eingestellten Sollgeschwindigkeit.</i>	60
<i>Abbildung 67: Abweichung der Mittelwerte der Messungen.</i>	61
<i>Abbildung 68: Standardabweichung der Einzelmessungen abhängig von der Geschwindigkeit.</i>	61
<i>Abbildung 69 Antennendiagramm für den mittleren digitalen Strahl nach Auswertung der digitalen Strahlformung.</i>	62
<i>Abbildung 70: Darstellung der Messung aller digitalen Strahlen, die vom Strahlformer berechnet werden.</i>	63
<i>Abbildung 71: Aufbau und Messergebnis zur Zieltrennung; (links) 2 Cornerreflektoren unter einem Winkelabstand von 7°, (rechts) farbcodierte Darstellung der Amplitudenverteilung aus der Vogelperspektive.</i>	64
<i>Abbildung 72: Teststand zur Verbausituation hinter dem Stoßfänger(links) und Befestigung des Sensors(rechts).</i>	65

<i>Abbildung 73: (links) Ergebnisse der Winkelmessung ohne Stoßfänger(blau) mit Stoßfänger (grün) und neu kalibriert mit Stoßfänger(rot); (rechts) berechnete mittlere Strahlkeule nach der Digitalen Strahlformung (entsprechend Abb. 69).</i>	65
<i>Abbildung 74: RoCC Versuchsträger.</i>	66
<i>Abbildung 75: Blockschaltbild der Ausrüstung des Versuchsträgers.</i>	67
<i>Abbildung 76: Fahrzeugausrüstung: Messrechner, Fzg.-Infrastruktur, Speichermedium (links) und Referenzkamera, HMI (rechts).</i>	67
<i>Abbildung 77: Sensorintegration vor dem Kühler.</i>	68
<i>Abbildung 78: Beispielaufnahme aus einem aufgenommenen Szenario mit einigen exemplarischen Messfenstern.</i>	68
<i>Abbildung 79: MTS-Aufnahme einer schmalen Allee mit ungefähr einer Fahrspurbreite.</i>	69
<i>Abbildung 80: Messung der Relativgeschwindigkeit von stationären Objekten</i>	70
<i>Abbildung 81: Marktentwicklung für SRR/MRR-Sensoren.</i>	72
<i>Abbildung 82: Marktentwicklung für LRR-Sensoren.</i>	73

## Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Kooperationsthemen von Continental innerhalb des Konsortiums</i>	10
<i>Tabelle 2: Wunschspezifikation der Automobilhersteller</i>	14
<i>Tabelle 3: kritische Parameter der Sensorspezifikation</i>	14
<i>Tabelle 4: Leistungsbilanz für einen RoCC Sensor.</i>	27
<i>Tabelle 5: Typische Radarquerschnitte</i>	28

## Abkürzungsverzeichnis

A.D.C.	Automotive Distance Control Systems GmbH
ARS	Continental Produktbezeichnung für Radarprodukte
AUTOSAR	<b>AUT</b> omotive <b>O</b> pen <b>S</b> ystem <b>AR</b> chitecture
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnologie
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
CMS	Collision Mitigation System
DBF	Digital Beamforming / Digitale Strahlformung
DFT	Digitale Fouriertransformation
DIE	(engl. Würfel, Plättchen) ungehäuster Halbleiter-Chip (Plur. Dice)
ECU	Electronic Control Unit
eWLB	embedded Wafer Level Ball Grid Array
FAS	Fahrerassistenzsystem
FFT	Fast Fourier Transformation
FMCW	Frequency Modulated Continuous Wave

Frontend	HF-Modul zur Generierung, der Abstrahlung, dem Empfang und der Wandlung der Radarfrequenzen in ein ZF-Band
FSRA	Full Speed Range ACC
GaAs	Galliumarsenid
GHz	Gigahertz
HF	Hochfrequenz
KOKON	BMBF Fördervorhaben, „Kfz-Höchstfrequenztechnik“, Fkz:01M3161C
LCA	Lane Change Assist
LO	Local Oscillator
LRR	Long Range Radar
LSF	Low Speed Following (Stauassistent)
MRR	Mid Range Radar
MTS	Mess-, Test- und Simulations-System
MUSIC	<b>M</b> ultiple <b>S</b> ignal <b>C</b> lassification
NBR	Nahbereichsradar
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
PBT	Polybutylenterephthalat
RADAR	Radio Detection and Ranging
RF	Radio Frequency, gleichbedeutend mit HF
RMSE	Root Mean Square Error
RX	Receiver
SARA	Strategic Automotive Radar Frequency Allocation Group Homepage: <a href="http://www.sara-group.org">www.sara-group.org</a>
SiGe	Silizium-Germanium
SLL	Side Lobe Level / Nebenkeulenniveau
SPI	Serial Peripheral Interface / Prozessorschnittstelle
SRR	Short Range Radar
tbd.	To be defined, noch festzulegen
TX	Transmitter
VCO	Voltage Controlled Oscillator
VIA	Vertical Interconnect Access, Durchkontaktierung auf Leiterplatten
ZF	Zwischenfrequenz

## Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN -----	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel  RoCC – Radar-on-Chip for Cars 79 GHz SiGe Nahbereichsradarsensorik	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Dr. Massen, Joachim Möller, Ulrich	5. Abschlussdatum des Vorhabens 29.02.2012
	6. Veröffentlichungsdatum -----
	7. Form der Publikation Projektbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  A.D.C. Automotive Distance Control Systems GmbH Peter-Dornier-Str. 10 88131 Lindau /B	9. Ber. Nr. Durchführende Institution -----
	10. Förderkennzeichen 13N9824
	11. Seitenzahl 83
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 55
	14. Tabellen 5
	15. Abbildungen 82
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung Das Gebiet der Radarsensoren für den nahen und mittleren Entfernungsbereich für Komfort- und Sicherheitssysteme im Fahrzeug ist ein schnell wachsender Markt. Die Frequenzregulierung stellt ein neues Frequenzband von 76 bis 81 GHz zur Verfügung, das von UWB Sensoren in der EU ab 2018 genutzt werden muss. Im RoCC ( <u>R</u> adar- <u>o</u> n- <u>C</u> hip for <u>C</u> ars) Projekt wurde eine neue Technologie entwickelt, auf der Grundlage von SiGe Bauteilen, mit der Vision die Sensoren für alle Fahrzeugplattformen erschwinglich zu machen. Ziel des Projektes war das Potential der SiGe-Technologie zu nutzen, durch eine weitere Integration der einzelnen Komponenten die Kosten zu reduzieren. Ein großer Aufwand wurde investiert, die Zuverlässigkeit und den Funktionsbereich der neuen Sensoren weiter zu steigern, um den aktuellen Anforderungen des Marktes gerecht zu werden. Wir bauten wettbewerbsfähige, robuste und kompakte 79 GHz UWB Demonstrationssensoren auf für Anwendungen im nahen und mittleren Entfernungsbereich. Das Institut für Mikrowellentechnik der Universität Ulm unterstützte uns mit dem Design eines substrat-integrierten Wellenleiter-(SIW) Schlitzantennenarrays. Wir nutzten ein gegenüber Störungen unempfindliches Pulskompressionsprinzip und hochintegrierte mehrkanalige SiGe-Bausteine in Kombination mit dem Verfahren der Digitalen Strahlformung. Ein kosteneffizienter Produktionsprozess wird ermöglicht durch die Anwendung der innovativen eWLB-Gehäusetechnologie von Infineon. Die Sensoren wurden erfolgreich im Labor getestet und mit einer geschwindigkeitsbeschränkten ACC-Funktion in einem Versuchsfahrzeug. Die maximale Reichweite auf Pkws beträgt mindestens 90m. Der RoCC Sensor ist gut geeignet, die typischen Sicherheitsfunktionen in der nahen Umgebung eines Fahrzeugs zu unterstützen.	
19. Schlagwörter Nahbereich, Radar, Sensor, Fahrerassistenzsystem, ADAS, 79GHz, UWB, SiGe, DBF	
20. Verlag -----	21. Preis -----

## Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN -----	2. type of document (e.g. report, publication) Final Report
3. title  RoCC – Radar-on-Chip for Cars 79 GHz SiGe Short Range Radar Sensors	
4. author(s) (family name, first name(s))  Dr. Massen, Joachim Möller, Ulrich	5. end of project 29.02.2012
	6. publication date -----
	7. form of publication Project Report
8. performing organization(s) (name, address)  A.D.C. Automotive Distance Control Systems GmbH Peter-Dornier-Str. 10 88131 Lindau /B	9. originator's report no. -----
	10. reference no. 13N9824
	11. no. of pages 83
12. sponsoring agency (name, address)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 55
	14. no. of tables 5
	15. no. of figures 82
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract <p>The field of short and mid-range radar sensors for automotive comfort and safety systems is a fast-growing market. The frequency regulation provides a new 76 to 81 GHz frequency band, which will be mandatory in the EU for UWB sensors from 2018. In the "RoCC" (Radar-on-Chip for Cars) project funded by the German Ministry of Education and Research (BMBF), a new technology was developed based on SiGe components with the objective to make the sensors affordable for all car platforms. The aim of the project was to exploit the cost-reduction potential of the SiGe technology by a further integration of the individual components. Great efforts have been undertaken to further improve the reliability and the functional range of the new sensors to meet the current requirements of the market.</p> <p>We built up competitive, robust and compact 79 GHz UWB demonstration sensors for short and mid-range applications. The Institute of Microwave Techniques of the University of Ulm supported us in designing a substrate integrated slotted waveguide antenna array. We used an interference resistant pulse-compression method, and highly integrated multi-channel SiGe components in combination with a digital beamforming method. A cost-effective production process is enabled by applying the innovative eWLB-package technology of Infineon. The sensors were tested successfully in the laboratory and, with a speed limited ACC function, in an experimental vehicle. The maximum detection range of passenger cars is at least 90 m. The RoCC sensor is well suited to support the typical safety functions in the near range surrounding a vehicle.</p>	
19. keywords Short-range radar, sensor, driver assistance system, ADAS, 79GHz, UWB, SiGe, DBF	
20. publisher -----	21. price -----