

# 1 Einleitung

Technologien und Verfahren der Radartechnik, die jahrzehntelang vorwiegend in Großanlagen zur Navigation und Überwachung im aeronautischen Umfeld eingesetzt wurden, finden zunehmend Einzug in kleine radarbasierte Sensoren für Anwendungen in der Industrie und im Verkehrs- und Transportwesen. Bekannte Pionierprodukte sind Füllstandsensoren für Lagertanks in der Petroindustrie, Sensoren zur Verkehrskontrolle und -überwachung und Umgebungssensoren für Kraftfahrzeuge (Kfz) zur Unterstützung des Fahrers. Alle diese Anwendungen erfordern kleine Sensoren mit hoher Messauflösung und -genauigkeit in einem im Vergleich zum aeronautischen Umfeld kleinen Sichtbereich. Sinnvolle Lösungen zum Erfüllen dieser Anforderungen ergeben sich bei Mikro- und Millimeterwellenfrequenzen oberhalb von 10 GHz, wobei der Trend zur Miniaturisierung zu immer höheren Frequenzen führt.

Die Thematik Kraftfahrzeugsensorik war in den letzten Jahren Anlass für zahlreiche Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu Millimeterwellen-Radarsensoren. Neben den Schwerpunktzielen Kostenreduktion und Integration, die sich hauptsächlich in der Entwicklung günstigerer Chiptechnologien bei hohen Frequenzen widerspiegeln, wurde auch das Thema Winkelabbildung zu einem wichtigen Forschungsgegenstand. Neue Anwendungen [1, 2] für Kraftfahrzeugsensoren wie z. B. Stauautomatik oder Hinderniserkennung in dichtem Stadtverkehr sind mit eindimensional messenden Radarsensoren oder einfachen Verfahren der Winkelabbildung nicht zu erfüllen. So reihen sich immer wieder neue Konzepte der Winkelabbildung in die vielfältige Forschungswelt der Kraftfahrzeugsensorik ein, und bereits erprobte Verfahren konkurrieren aufgrund des enormen Preisdrucks in der Automobilbranche um deren Umsetzung. Agile und mechanisch unempfindliche elektronischen Lösungen stehen weniger komplexen und besser erprobten mechanischen Konzepten gegenüber. Parallel dazu bemüht sich die Automobilindustrie um Standardisierung, damit schon bestehende Lösungen bezüglich ihrer Serientauglichkeit, Verlässlichkeit und Kosteneffizienz verbessert und in ihren Funktionalitäten gesteigert werden können.

In einer im Jahr 2002 für die DaimlerChrysler AG als Industriepartner durchgeführten Literaturstudie [3] zu automobilen Radarsensoren für kurze und mittlere Reichweiten wurde ein klarer Trend zu Sensornetzen aus einfachen Einzelsensoren festgestellt [4, 5]. Einzelne in der Studie zitierte, auf Sensornetzen basierende Konzepte wurden mittlerweile in Produkte für Serienfahrzeuge umgesetzt [6, 7].

In Serienfahrzeugen der Marke Mercedes-Benz werden Sensornetze beispielsweise für die Assistenzsysteme DISTRONIC PLUS und BAS PLUS (Bremsassistent) seit 2005 angewendet. Die verwendeten Einzelsensoren der Sensornetze zeichnen sich durch gute Abbildungsfähigkeit in Entfernung und/oder Radialgeschwindigkeit aus, bieten jedoch nur geringe Möglichkeiten zur Abbildung in Winkelrichtung. Ausreichend gute Abbildungsfähigkeit, die durch hohe Winkelauflösung und Winkelmessgenauigkeit beschrieben werden kann, wird bei solchen Sensornetzen nur in einem eingeschränkten Winkelbereich erreicht. Ein großer Sichtbereich kann deshalb nur durch eine geeignete Kombination und gemeinsame Auswertung mehrerer Sensoren erzielt werden.

Die bei einfachen automobilen Radarsensoren häufig eingesetzten Prinzipien zur Winkelabbildung sind Differenzkeulenverfahren und Multilateration [8]. Beide Verfahren können bei mehreren Zielobjekten in ähnlichen Entfernungen mehrdeutig werden. Bei Differenzkeulenverfahren gehen zudem die Toleranzen der Antennen und die Zieldynamik in die Winkelmessgenauigkeit ein. Multilaterationsverfahren liefern nur in kurzen Entfernungen gute Winkelauflösung. Systeme mit guter Abbildungsfähigkeit in Winkelrichtung verwenden entweder mechanisch schwenkende Antennen oder elektronisch gesteuerte Gruppenantennen (*Electronically Steerable Array*, ESA). Letztere galten jedoch bisher für Kleinsensoren als zu aufwendig und zu teuer.

Aus dieser Aussage ergibt sich das Ziel der vorliegenden Arbeit. Es sollte untersucht werden, ob und wie ein elektronisch in Winkelrichtung abbildender Radarsensor als kompakte und kostengünstige Einheit für automobiler Anwendungen realisiert werden kann. Die Priorität des Entwurfs sollte auf sehr gute Abbildungseigenschaften in Winkelrichtung gelegt werden.

Aus Sicht des Industriepartners als potentiellm Anwender liegt der Schwerpunkt des Sensorentwurfs auf der präzisen Abbildung einer möglichst breiten und bis ca. 30 m vor dem Fahrzeug reichenden Zone. In diesem Sichtbereich sollen sowohl statische als auch bewegte Objekte eindeutig lokalisierbar sein. Gemäß der beispielsweise in [2] vorgenommenen Einteilung von Kfz-Radarsensoren in SRR (*Short Range Radar*), MRR (*Medium Range Radar*) und LRR (*Long Range Radar*) lassen sich die gesetzten Schwerpunkte unter der Kategorie MRR einordnen. Die möglichen Anwendungsfelder eines MRR-Sensors liegen in erweiterten Funktionen der Einparkhilfe, Erkennen von Hindernissen oder Personen vor dem Fahrzeug in dichtem Stadtverkehr und dem automatischen langsamen Weiterfahren in Stausituationen (Stauautomatik). Sie überschneiden sich bei kurzen Entfernungen mit den schon im Einsatz befindlichen Netzen aus SRRs für erweiterte Einparkfunktionen, so dass der Sensor deren Anzahl pro Fahrzeug reduzieren könnte. Falls der Entwurf auch für schnelle Bewegungen geeignet ist, ergeben sich weitere Anwendungsgebiete im Auslösen von Personenschutzmaßnahmen bei nicht mehr vermeidbaren Kollisionen (*Pre-Crash-Funktionalität*).

---

Die Arbeit wurde von vorn herein auf die experimentelle Verifikation des entworfenen Sensorkonzepts ausgelegt. Durch die Zusammenarbeit mit der Forschung und Vorentwicklung der DaimlerChrysler AG und eine günstige Konstellation aus verfügbaren Ressourcen und Erfahrungen konnte dieses Ziel mit der Realisierung von zwei Demonstrationssystemen schließlich auch verwirklicht werden. Allerdings führte die starke Ausrichtung auf das Demonstrationssystem auch zu einer pragmatischen Vorgehensweise, bei der nicht in jedes Thema Aufwand zur Modellierung und Simulation gesteckt werden konnte, und manche Teilaspekte ließen sich nur qualitativ abhandeln. Wo eine experimentelle oder heuristische Vorgehensweise schneller und effektiver schien, wurde diese einem analytischen oder simulativen Verfahren vorgezogen. Der theoretische Hintergrund der verwendeten Entwurfsverfahren kann nur in wenigen aus Sicht des Verfassers wesentlichen Aspekten wiedergegeben werden. Ansonsten erfolgen Verweise auf die verwendete Literatur. Veränderungen in den Zulassungsbestimmungen und der Strategie des Industriepartners führten zu mehrfachem Anpassen der Forschungsschwerpunkte. Zu Beginn der Arbeiten lagen diese in der Ausarbeitung einer kostengünstigen und kompakten Realisierung des Frontends; später in der möglichst breiten Ausarbeitung der gesamten Systemlösung.

Nach einer kurzen Einführung in verschiedene Verfahren zur elektronischen Radarabbildung in Kapitel 2 wird das Konzept des in dieser Arbeit erstellten Radarsensors eingeführt und diskutiert. Danach werden im Kapitel 4 Verfahren zum Systementwurf und zur Radarabbildung vorgestellt und deren Anwendung beschrieben. Die behandelten Abbildungsverfahren basieren auf der Fourier-Transformation, nichtlinearer Abbildung und autoregressiver Prädiktion. Als zentrales Werkzeug zum Systementwurf wird ein im Rahmen der Arbeit erstelltes und angewendetes Simulationsmodell dargestellt. In Kapitel 5 wird das realisierte Demonstrationssystem als Ganzes und in den wesentlichen Details beschrieben. In die Detailbeschreibungen sind auch die Schlüsselbaugruppen der Hardware des Frontend aufgenommen. Es folgen die Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen. Diese dienen sowohl zum Nachweis der ausgearbeiteten Prinzipien und Verfahren (Kapitel 6), als auch zu deren Demonstration in praktischen Anwendungen (Kapitel 7). Zusätzlich zur geplanten automobilen Anwendung werden hier auch Testergebnisse zu einer industriellen Anwendung im Bergbau vorgestellt. Den Abschluss der Arbeit bilden eine Zusammenfassung und ein Ausblick (Kapitel 8 und 9).



## 2 Elektronisch abbildende Kleinradare

Ausgehend von einer kurzen Definition und Bewertung der Winkelabbildung mit mechanischer Strahlschwenkung sollen nachfolgend verschiedene Verfahren zur elektronischen Abbildung vorgestellt, prinzipiell erklärt und qualitativ bewertet werden. Dieser Abschnitt soll helfen, das in dieser Arbeit entworfene und ausgearbeitete Konzept, welches in Kapitel 3 eingeführt wird, bezüglich des geplanten Anwendungsschwerpunkts in den Stand der Technik einzuordnen. Weiterhin dient der Abschnitt zur Einführung einiger grundlegender mathematischer Gleichungen und Begriffe, die im Zusammenhang mit elektronischer Abbildung häufig verwendet werden. Alle Verfahren sollen für den Sonderfall zweidimensionaler Radarabbildung mit den beiden Koordinaten Entfernung und Winkel betrachtet werden.

### 2.1 Mechanische Strahlschwenkung

Das ursprüngliche und immer noch sehr verbreitete Verfahren zur Bestimmung der Winkelkoordinaten eines Radarziels ist die mechanische Strahlschwenkung. Die Hauptstrahlrichtung einer Antenne wird durch die mechanische Bewegung kontrolliert über der Zeit verändert, so dass die zu einem bestimmten Zeitpunkt gemessenen Radarantworten eindeutig einem Winkelkoordinatenpaar zugeordnet werden können. Im Fall der zweidimensionalen Abbildung wird die Hauptstrahlrichtung nur in einer Ebene verändert und entsprechend nur eine Winkelkoordinate ausgewertet. Die zur Strahlschwenkung notwendige mechanische Bewegung betrifft je nach Ausführung den ganzen Sensor, die komplette Antennenstruktur, Teile der Antennenstruktur oder zusätzlich angebrachte Spiegelsysteme.

Die prinzipiellen Nachteile mechanischer Strahlschwenkung sind die mit der Größe der bewegten Strukturen zunehmende Trägheit, der verschleißbedingte Wartungsaufwand, der Stromverbrauch der zur Bewegung notwendigen Antriebe, aerodynamische Probleme bei schnellen Bewegungen und die Empfindlichkeit beweglicher Strukturen auf mechanischen Stress wie Vibrationen, Stöße und Erschütterungen. Fortschritte in der kostengünstigen Realisierung präziser Mikromechanik und ein intelligentes Konzept [9] haben trotzdem dazu geführt, dass in einem der neuesten Produkte für Kraftfahrzeugsensoren größerer Reichweite (LRR) auch weiterhin mechanische Strahlschwenkung eingesetzt wird [10].

Bei gleich guter Winkelabbildungsfähigkeit und vergleichbaren Kosten werden sich die genannten Nachteile mechanischer Systeme jedoch künftig zu Gunsten elektronischer Verfahren auswirken. In Kfz-Nahbereichssensoren bei Frequenzen um 24 GHz sind schon jetzt nur elektronische Verfahren bekannt [6, 7].

## 2.2 Verfahren zur elektronischen Winkelabbildung

### 2.2.1 Differenzkeulenverfahren

Beim Differenzkeulenverfahren wird der Sichtbereich mit zwei oder mehreren Antennen mit unterschiedlicher Hauptstrahlrichtung oder unterschiedlichen Strahlungskeulen erfasst. Ein Zielobjekt führt so zu Empfangssignalen an mehreren Antennentoren, deren Amplituden und Phasen sich entsprechend der Lage des Zielobjekts unterscheiden. Mit als bekannt vorausgesetzten Strahlungsdiagrammen kann aus den gemessenen Signalunterschieden die Richtung des Zielobjekts ermittelt werden.

Die bekannteste und älteste Ausführung eines Differenzkeulenverfahrens ist das so genannte Monopulsverfahren<sup>1</sup>, dessen Prinzip in Abbildung 2.1 dargestellt ist. Zwei Empfangsantennen mit gleichen Strahlungsdiagrammen sind so angeordnet, dass ihre Strahlungskeulen gegenüber der Hauptblickrichtung des Sensors leicht fehlausgerichtet sind. Für ein Zielobjekt in der durch den Ablagewinkel

---

<sup>1</sup>Der Begriff Monopuls hat seinen Ursprung in der Tatsache, dass die Winkelinformation bereits durch eine Messung, d. h. aus einem Puls eines Pulsradars, gewonnen werden kann.

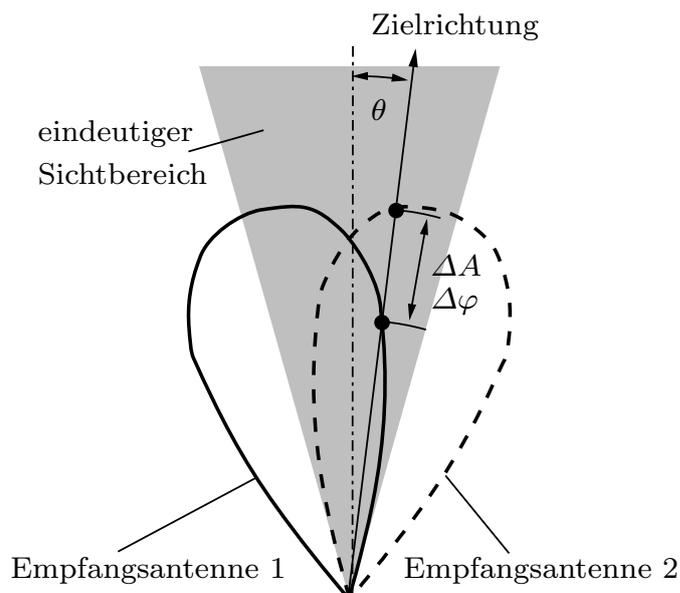


Abb. 2.1: Prinzipzeichnung zum Amplituden-Monopulsverfahren.

$\theta$  beschriebenen Richtung, ergibt sich aus der Anordnung ein Amplitudenunterschied  $\Delta A$ . Bei bekannter Form der Strahlungskeulen der beiden Antennen kann aus  $\Delta A$  die Winkelablage  $\theta$  bestimmt werden, die jedoch bezüglich des Vorzeichens zweideutig ist. Zu einer eindeutigen Winkelbestimmung führt eine zusätzliche Phasenauswertung ( $\Delta\varphi$ ) der Empfangssignale.

Die Vorteile von Differenzkeulenverfahren liegen in der einfachen und direkten Winkelauswertung; nachteilig ist, dass für die Winkelmessung ein Teil der möglichen Zieldynamik (*Target Dynamic, TD*) verwendet werden muss und der eindeutige Sichtbereich auf den Überlappungsbereich der Strahlungskeulen beschränkt ist. Außerdem versagt das Verfahren bei zwei oder mehr nicht durch weitere Eigenschaften, wie Entfernung oder Geschwindigkeit, trennbaren Zielobjekten im gleichen Antennenüberlappungsbereich. Zur Abdeckung eines größeren Sichtwinkelbereichs werden zunehmend komplexere Antennenstrukturen mit mehreren Strahlungskeulen notwendig. In [11, 12] wurde beispielsweise ein 8-Kanal-Frontend [13] mit einer Mehrkeulenantenne zu einem experimentellen Radarsensor mit größerem Winkelbereich ergänzt. Die Fortschritte in der Realisierung solcher Antennenstrukturen [14, 15] bei Millimeterwellenfrequenzen haben dazu geführt, dass Differenzkeulenverfahren in Kfz-Sensoren sehr häufig eingesetzt werden.

### 2.2.2 Multilateration

Unter dem Begriff Multilateration werden Verfahren zusammengefasst, in denen eine zweite oder dritte Dimension der Radarinformation durch Auswertung von an verschiedenen Orten durchgeführten mono- oder bistatischen Entfernungsmessungen gewonnen wird. Im Idealfall werden für ein zweidimensionales Radarbild zwei Sensoren und zwei unabhängige Entfernungsmessungen benötigt. Mehrdeutigkeiten bei mehreren Zielen können durch weitere voneinander unabhängige Messwege oder Sensoren aufgelöst werden.

Die Qualität der Winkelabbildung hängt von der Entfernungsauflösung und dem maximal möglichen Sensorabstand ab. Da sich die aus mono- und bistatischen Messungen erhaltenen Standlinien mit zunehmender Zielentfernung unter immer flacheren Winkeln schneiden, nehmen die Winkelauflösung und -genauigkeit rasch mit der Zielentfernung ab. Multilaterationsverfahren eignen sich deshalb nur für Entfernungen in der Größenordnung von wenigen Sensorabständen. In der Kfz-Sensorik sind sie für Nahbereichsanwendungen mit Zielentfernungen unter 15 m sinnvoll einsetzbar.

Ein großer Vorteil von Multilaterationsverfahren ist die Weitwinkelfähigkeit, die nur durch die gemeinsame Überdeckung aller zur Auswertung herangezogener Einzelsensoren begrenzt wird. Bei Verwendung kleiner Antennen mit breiten Strahlungsdiagrammen kann nahezu der komplette Winkelbereich einer Halb-