

1 Einleitung

Die Grundlagen der Radartechnologie gehen zurück auf die Formulierung und den Nachweis der Existenz elektromagnetischer Wellen durch James Clark Maxwell (1865, *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field* [1]) und Heinrich Hertz (1888, *Über die Strahlen elektrischer Kraft* [2]). Bis zur ersten Anwendung in Form der Einführung der drahtlosen Telegrafie durch Guglielmo Marconi und Ferdinand Braun dauert es weniger als zehn Jahre [3]. Anwendungen zur Ortung auf Basis elektromagnetischer Wellen bleiben zunächst unbeachtet. Um die Jahrhundertwende beginnt Christian Hülsmeier an Arbeiten zur Detektion von Schiffen durch Radiowellen [4]. Im Jahr 1904 wird schließlich die in Abbildung 1.1 dargestellte Patentschrift zum Telemobiliskop erteilt.



Abb. 1.1: Christian Hülsmeier und die ihm im Jahr 1904 erteilte Patentschrift zum Telemobiliskop (nach [5])

Dem Patent folgen eine Reihe erfolgreicher Demonstrationen des Prinzips, so am 17. Mai 1904 von der Hohenzollernbrücke in Köln und wenige Wochen später im Hafen von Rotterdam. Hierbei werden bereits Schiffe in einer Entfernung von mehr als 3 km nachgewiesen [6]. Hülsmeier arbeitete indes weiter an einer Verbesserung des "Telemobiliskops", um der Detektion eine Entfernungsschätzung zuordnen zu können. Weiteres kommerzielles oder militärisches Interesse an dieser frühen Form des Radars bleibt jedoch aus und Hülsmeier wendet sich anderen Themengebieten zu [6].

Erst zu Beginn der dreißiger Jahre des 20. Jahrhunderts erkennt man in mehreren europäischen Ländern die Bedeutung des Radars, nicht zuletzt aufgrund des ihm zugeschriebenen militärischen Potenzials. In Deutschland wird die Entwicklung insbesondere seitens der GEMA (Gesellschaft für Elektroakustische und Mechanische Apparate) unter Rudolf Kühnhold, der Firma Telefunken unter Wilhelm Runge und seitens der Firma Lorenz in Berlin vorangetrieben [7]. Als erste dieser nun unter dem Begriff *Funkmesstechnik* subsumierten Geräte werden 1938 das Pulsradar 'Freya' (GEMA) bei einer Frequenz von 125 MHz und einer Impulsleistung von 8 kW und ein Jahr später die UHF-Radare Würzburg und Würzburg Riese (Detektionsbereich bis zu 70 km) vorgestellt [6]. Eine Darstellung dieser beiden Anlagen, wie sie für diese Zeit typisch sind, ist in Abbildung 1.2 gegeben. In die gleiche Zeit fallen die Entwicklung erster Bordradaranlagen für Flugzeuge sowie erste

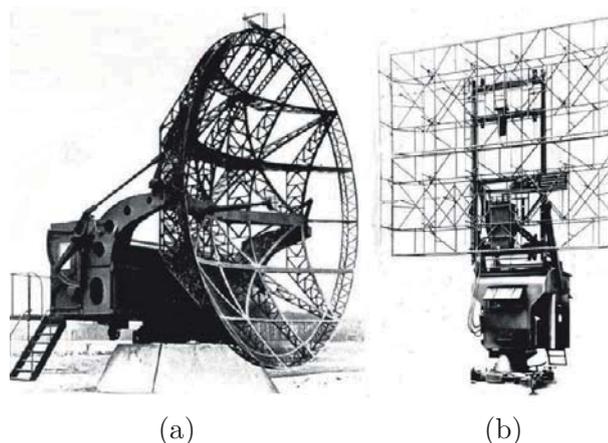


Abb. 1.2: Zwei Beispiele früher militärischer Radarsysteme aus deutscher Produktion vom Typ Würzburg Riese (a) und Freya (b) (nach [5])

Ansätze zu phasengesteuerten Antennen (z.B. Mammut 1, [6]). Insbesondere in England unter Sir Watson-Watt und in den Vereinigten Staaten von Amerika fanden zeitgleich ähnliche Entwicklungen statt [6]: Nach Ende des Zweiten Weltkriegs verlagert sich die Radarforschung auf die Schwerpunkte Bordradare für Flugzeuge, Phased-Array-Radare zur Luftraumüberwachung und SAR-Technologien zur atmosphärischen und außeratmosphärischen Erdbeobachtung. Diese Kernthemen bilden bis heute die wesentlichen Arbeitsgebiete der militärischen Radartechnik [8].

Neben diesen Anwendungen haben sich in den vergangenen Jahrzehnten eine Vielzahl von zivilen Applikationen für Radarsensorik etabliert. Abgesehen von der Navigation und Ortung in der zivilen Luft- und Seefahrt sind dies insbesondere die zivile Erdfernerkundung, industrielle Mess- und Positionierungsaufgaben und Anwendungen in der Automobiltechnik, die dieser Arbeit zugrunde liegen [9].

1.1 Radarsensorik im Automobil

Als zum 1. Januar 1976 die Gurtpflicht in der damaligen Bundesrepublik Deutschland eingeführt wird, ist dies keineswegs in der gesamten Bevölkerung populär. Ohne Zweifel stellt dies jedoch den ersten großen Schritt in Bezug auf passive Sicherheit im Personenkraftverkehr dar. Während die Einführung des Airbags (1974, General Motors) ebenfalls noch zu den passiven Sicherheitssystemen gezählt wird, welche die Folgen eines Unfalls abmildern, folgen bald aktive Sicherheitssysteme. Diese greifen aktiv in die Fahrdynamik ein mit der Zielsetzung, Unfälle zu vermeiden. Bekannte Vertreter dieser Systeme sind beispielsweise das Antiblockiersystem ABS (1978, Bosch [10]) oder das elektronische Stabilitätsprogramm ESP (1995, Bosch). All diese Systeme tragen dazu bei, dass die Sicherheit im Straßenverkehr nachhaltig gesteigert werden kann und die Zahl der Verkehrstoten von 19.193 im Jahr 1970 auf 7.503 im Jahr 2000 abnimmt [11]. Berücksichtigt man im Vergleich dazu die Summe der erfassten Verkehrsunfälle von 1,3 Millionen im Jahr 1970 und 2,4 Millionen im Jahr 2000, lässt dies auf eine deutlich gestiegene Sicherheit für die Fahrzeuginsassen schließen. Ab der Jahrtausendwende wird durch die Verbreitung von Fahrerassistenzsystemen eine neue Gruppe von Sicherheitssystemen verfügbar. Diesen Systemen gemein ist der Anspruch, den Fahrer in kritischen



Situationen zu entlasten und somit Gefährdungspotenziale zu reduzieren. Im Weißbuch Verkehr der Europäischen Kommission [12] wird die Reduktion der Verkehrstoten bis 2050 um 100% angestrebt. Während bei den bisher genannten Systemen die Parameter des Fahrzeugs selbst wie Radstellung oder Lenkwinkel als Kenngrößen herangezogen werden, setzen neuartige Assistenzsysteme insbesondere auf die Erfassung des Fahrzeugumfelds mittels hochentwickelter Sensorik [13].

Als eines der ersten dieser neuartigen Assistenzsysteme findet der Abstandsregelautomat (englisch: Adaptive Cruise Control, ACC) Verbreitung. Wenig später folgen Systeme wie Spurwechsel-, Notbrems- und Stop-and-Go-Assistenzsysteme. Allen diesen Systemen gemein ist der Bedarf an verlässlichen Sensordaten, die das räumliche Umfeld des Fahrzeugs möglichst genau abbilden. Einen Überblick über die derzeit in einem Oberklasse-PKW eingesetzten Sensoren und deren Erfassungsbereich gibt Abbildung 1.3.

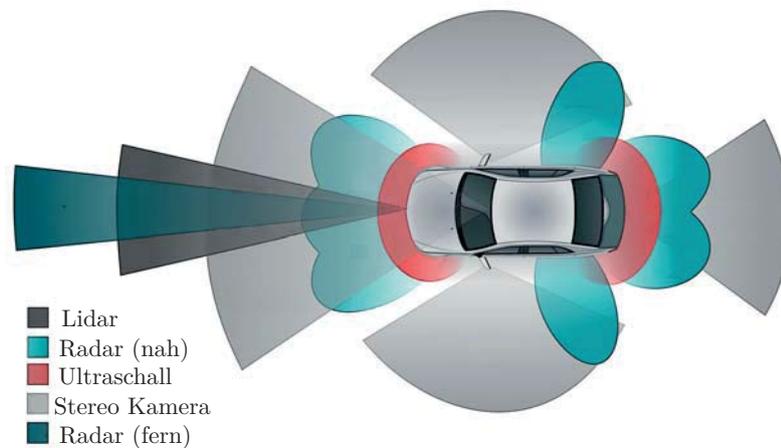


Abb. 1.3: Arten und Lage der Sensorik zur Erkennung des Fahrzeugumfelds am Beispiel eines PKW

Für die Überwachung des unmittelbaren Fahrzeugumfeldes stellen Ultraschallsensoren gegenwärtig den Stand der Technik dar. Für weiter entfernte Bereiche kommt neben optischen Systemen, wie Stereo- und Nachtsichtkameras oder Laser-Radar (englisch: engl. Light Detection and Ranging, LIDAR), Radarsensorik eine Rolle als Schlüsseltechnologie zu. Im Gegensatz zu optischen Systemen werden Radarsensoren deutlich weniger durch Umwelteinflüsse wie Staub, Dunkelheit und Niederschläge beeinflusst [13]. Erste Untersuchungen zum Einsatz von Radarsensorik im Kraftfahrzeugumfeld finden bereits in den siebziger Jahren des 20. Jahrhunderts statt, beispielsweise durch Volkswagen und AEG Telefunken [14]. Aufgrund der damals aufwändigen und kostenintensiven Technologie können sich diese jedoch nicht etablieren. Durch die Verfügbarkeit neuartiger und leistungsfähiger Heterostruktur-Halbleitertechnologien wie der Silizium-Germanium-Technologie (SiGe), die zur Entwicklung hochintegrierter monolithischer Hochfrequenzschaltkreisen (MMICs) führt, wird die Einführung von Automobilradarsensorik im Massenmarkt ermöglicht (Fa. Bosch, LRR3, 2006 [15]). Gegenwärtig werden Radarsensoren für verschiedene Entfernungsbereiche eingesetzt, auf deren Basis eine Unterscheidung in die Sensortypen Short-Range-Radar (SRR), Medium-Range-Radar (MRR) und Long-Range-Radar (LRR) vorgenommen wird. Typische charakteristische Systemparameter für solche Systeme sind in Tabelle 1.1 wiedergegeben.

Als Frequenzbereich findet neben Nahbereichssystemen bei 24 GHz derzeit nahezu ausschließlich das E-Band bei 77 GHz Anwendung [17]. Während zu Beginn der Entwicklung hierzu Systeme aus

Tabelle 1.1: Kategorisierung von Automobilradarsensoren nach Entfernungsbereich [16]

	LRR	MRR	SRR
Maximale EIRP Sendeleistung	5 dBm	-9 dBm/MHz	-9dBm/MHz
Frequenzband	76 GHz-77 GHz	76 GHz-81 GHz	76 GHz-81 GHz
Entfernungsbereich	10 m-250 m	1 m-80 m	0.25 m-30 m
Entfernungsauflösung	0.5 m-1 m	0.5 m-1 m	0.1 m-0.25 m
Geschwindigkeitsauflösung	0.6 m/s	0.6 m/s	0.6 m/s
Winkelgenauigkeit	0.2°	0.5°	1°
Erfassbarer Winkelbereich	20°	60°	80°
Winkeltrennfähigkeit	6°	-	-

Komponenten realisiert werden, basieren moderne und sich aktuell in der Entwicklung befindende Systeme auf der SiGe-Halbleitertechnologie, die deutlich erhöhte Integrationsgrade ermöglicht [17]. Die hierdurch verfügbaren hochintegrierten preisgünstigen Sensorlösungen haben dazu beigetragen, dass diese Systeme mittlerweile in allen Fahrzeugklassen verfügbar sind.

Ein aktuelles Sensormodell der Firma Bosch (LRR-3 Fernbereichsradarsensor der dritten Generation) ist in Abbildung 1.4 in Detailansicht dargestellt.



Abb. 1.4: Detaildarstellung eines aktuellen kommerziellen Radarsensors (Fa. Bosch, nach [18])

In dieser Sensorimplementierung ist die gesamte Radarfunktionalität integriert. Alle Hochfrequenzkomponenten einschließlich der Antennen werden hierbei auf einem kompakten Millimeterwellen-PCB integriert.

In der aktuellen Entwicklung liegt ein Fokus auf Systemen, die direkt in die Fahrdynamik eingreifen und somit Unfälle abmildern bzw. gänzlich verhindern sollen. Ferner wird derzeit intensiv an Systemen zum teil- und vollautonomen Fahren und zur Unterstützung des Fahrers in urbanen Umgebungen gearbeitet [19].



Für die Sensorik und die Radarsensorik im Besonderen entstehen somit neue Herausforderungen. Diese liegen vorrangig in der Auflösung von komplexen Mehrzielszenarien, der Trennung von Orts-, Geschwindigkeits- und Winkelinformationen sowie der Verarbeitung von Szenarien mit Mehrwegeausbreitung.

Ein Beispiel für diese Anforderungen stellt ein klassisches Gassenfahrtszenario dar, das vor allem auf Autobahnen auftritt. Es ist in Abbildung 1.5 dargestellt.

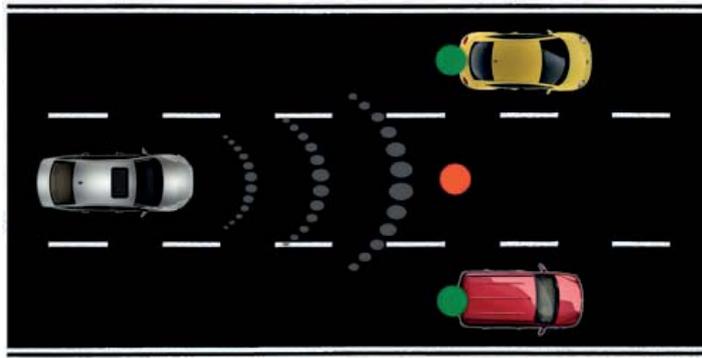


Abb. 1.5: Gassenfahrtszenario auf einer mehrspurigen Schnellstraße. Grün markiert die validen Zieldetektionen, orange die Fehldetektion bei unzureichender Winkeltrennfähigkeit

Hierbei nähert sich auf einer dreispurigen Schnellstraße ein Fahrzeug (silberfarben dargestellt) mit hoher Geschwindigkeit, die rechte und die linke Spur sind in einer Entfernung R durch andere Fahrzeuge besetzt (in Abbildung 1.5 gelb und rot dargestellt). Zur korrekten Auflösung des Szenarios (grün dargestellt) ist eine ausreichend hohe Winkelauflösung des Sensorsystems erforderlich. Gelingt dies nicht, so führt dies zu einer Fehldetektion auf der mittleren Fahrbahn (orange dargestellt). In Zusammenhang mit sicherheitsrelevanten Funktionen und dem damit verbundenen direkten Eingriff in die Fahrzeugdynamik durch das Sensorsystem kann ein Szenario, wie in diesem Beispiel dargestellt, bei falscher Umfelderkennung durch den Radarsensor zu erheblichen Unfällen führen. Zur Verarbeitung solcher Szenarien wurden in den vergangenen Jahren verschiedenste Ansätze untersucht und vorgestellt. Einen Ansatzpunkt bietet die Signalverarbeitung und hier genauer der Einsatz hochauflösender Parameterschätzverfahren wie MUSIC [20] oder Derivate des Maximum-Likelihood-Schätzers. Einen anderen Ansatzpunkt verfolgen neuartige Systemkonzepte wie MIMO-Radar, bei dem eine Übertragung von aus der Mobilkommunikation bekannten Prinzipien auf die Radarsystemarchitektur erfolgt (z.B. [21], [22]). Eine Einführung in die Grundlagen dieser Prinzipien ist im zweiten Kapitel gegeben, während eine Erweiterung auf Systeme mit linsenbasierter Strahlformung im vierten Kapitel vorgestellt wird.

1.2 Zielsetzung und Aufbau dieser Arbeit

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes *RADAMES* (Radarsensorik mit konfigurierbarer Strahlformung) in Zusammenarbeit mit der Robert Bosch GmbH Stuttgart. Das Ziel der Untersuchungen ist die Evaluation einer Systemarchitektur und neuartigen Signalverarbeitungsverfahren zur Ver-



besserung der Radarsensorik im Kraftfahrzeugumfeld im Hinblick auf die Orts-, Geschwindigkeits- und Winkeltrennfähigkeit. Für die Beurteilung Letztgenannter liegt ein besonderer Schwerpunkt auf MIMO-Verfahren. Hierbei werden durch Illumination des Szenarios mit orthogonalen Wellenformen mehrere teils synthetische Radarkanäle generiert. Dies führt zu einer verbesserten Winkelauflösung des Sensors, wie sie in urbanen Mehrzielszenarien im Straßenverkehr zwingend benötigt wird. Die Untersuchung dieser Algorithmen erfolgt durch theoretische Modellierung, Simulation sowie auf Basis einer realen hierfür entwickelten konfigurierbaren Sensorplattform. Zur Charakterisierung werden unter anderem quantitative Merkmale aus der deskriptiven Statistik herangezogen.

Die Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Nach einer Einführung im ersten Kapitel wird im zweiten Kapitel auf die Architektur und Strahlformung integrierter Millimeterwellen-Radare eingegangen. Der digitalen Signalverarbeitung kommt bei modernen Radarsystemen eine hohe Bedeutung zu. Die wesentlichen Grundprinzipien der Signalverarbeitung, eingesetzter Wellenformen und Schätzverfahren für die räumlichen und kinematischen Eigenschaften der Ziele, werden daher in Kapitel 3 dargestellt. Das darauffolgende vierte Kapitel führt das neue Prinzip des linsenbasierten MIMO- Radars ein. Basierend auf diesem Prinzip wird eine Sensorarchitektur entworfen und auf Hardwareebene umgesetzt. Ferner wird die entwickelte Messumgebung in Form eines flexiblen Zielsimulatorsystems, das die Simulation bewegter Radarziele in variablen Abständen ermöglicht, vorgestellt. Im fünften Kapitel erfolgt die messtechnische Charakterisierung und vergleichende Interpretation der erzielten Ergebnisse, insbesondere auf Basis des Vergleichs zwischen der MIMO- und MISO- Verarbeitung in Bezug auf die wichtigen Systemkenngrößen. Eine Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse im sechsten Kapitel schließt die Arbeit ab.

2 Grundlagen integrierter Millimeterwellenradare

Integrierte Millimeterwellen-Radare bilden eine wesentliche Grundlage für moderne Fahrerassistenzsysteme. Das folgende Kapitel zeigt den gegenwärtigen Stand der Technik und gibt einen Überblick über die relevanten System- und Strahlformungskonzepte, die derzeit im Bereich der Automobilradarsensorik Anwendung finden.

Unter dem Begriff "Radar" werden Verfahren zur Lokalisierung von Objekten auf Basis von Radiowellen zusammengefasst. Im engeren Sinne, bei der Betrachtung von Primärradar-Systemen, versteht man unter einem Radar ein aktives, auf keine Kooperation angewiesenes Ortungssystem zur Entdeckung, Lokalisierung, Erfassung und Klassifizierung von Objekten, den sogenannten Zielen [23]. Abbildung 2.1 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines Radarsystems.

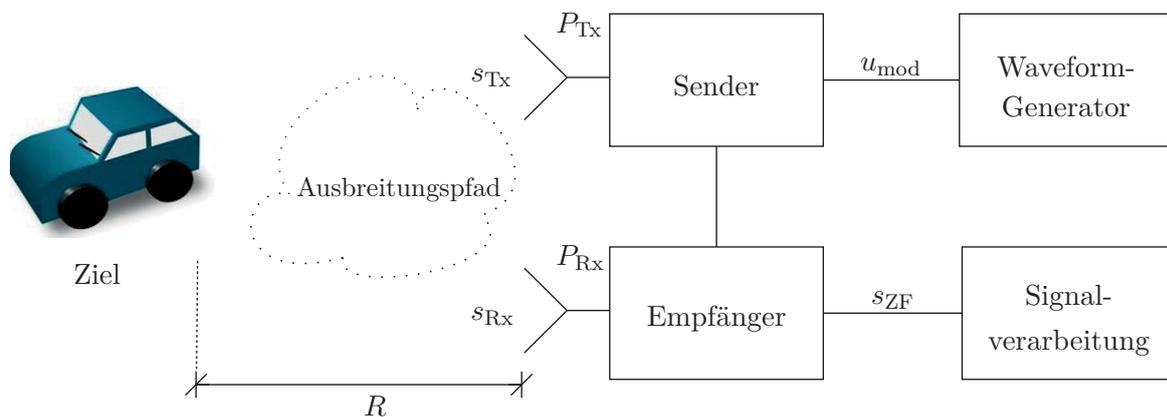


Abb. 2.1: Grundlegender schematischer Aufbau eines Radarsystems

Hierbei wird ein Sendesignal s_{Tx} mittels einer Sendeantenne über einen Ausbreitungspfad bzw. Übertragungskanal mit der Länge R ausgesendet. Die in diesem Übertragungskanal enthaltenen Objekte, an denen das ausgesendete Signal zurückgestreut wird, stellen die durch das System zu bestimmenden Parameter dar. Das an einem Objekt zurückgestreute Signal s_{Rx} , das in Abhängigkeit zum Radarrückstreuquerschnitt (englisch: radar cross section, RCS) des Objekts steht, wird über die Empfangsantenne aufgenommen und der weiteren Signalverarbeitung zugeführt. Dabei ist zu beachten, dass Sender und Empfänger zueinander kohärent sein müssen. Je nach Einsatzzweck kann das Sendesignal mit verschiedenen Modulationen u_{mod} versehen werden. In der Praxis reicht dies von einfachen CW-Signalen, über Puls- und Frequenzmodulationen (FMCW) bis hin zu hochkomplexen komprimierten Rauschsignalen [24]. Für den Einsatz im Automobilradar werden derzeit vor allem frequenzmodulierte Dauerstrichradare verwendet [16]. Vereinzelt finden auch Ultra-Wideband-Radarsysteme mit Puls-Modulationen Anwendung [25].



2.1 Radargleichung für Punktziele

Zur Beschreibung eines Radarsystems bzw. der am Objekt zurückgestreuten und empfangenen Leistung P_{Rx} kann die Radargleichung herangezogen werden [26].

$$P_{\text{Rx}} = \frac{P_{\text{Tx}} G_{\text{Tx}}}{4\pi R^2} \sigma \frac{G_{\text{Rx}} \lambda^2}{4\pi R^2}. \quad (2.1.1)$$

Wobei P_{Tx} die Sendeleistung des Radars, λ die Wellenlänge der Nutzfrequenz, R die Entfernung des Objekts, G_{Tx} und G_{Rx} den Gewinn der Sende- bzw. Empfangsantenne (vgl. Abschnitt 2.3.1) repräsentieren. Außerdem ist der Radarrückstreuquerschnitt von der räumlichen Lage des Objekts und des Einfallswinkels der elektromagnetischen Welle abhängig. Zusammengefasst bedeutet das, dass die Leistung des empfangenen zurückgestreuten Signals für Punktziele in einem biquadratischen Verhältnis steht. Hierbei spielen die Eigenschaften des Objekts, wie z.B. seine geometrische Struktur, eine wichtige Rolle, sie werden im Radarrückstreuquerschnitt (RCS) σ zusammengefasst.

2.1.1 Radarrückstreuquerschnitt

Der Radarrückstreuquerschnitt (RCS) gibt das Verhältnis der vom Objekt zurückgestreuten Leistung P_{Reflex} zur einfallenden Leistungsdichte S_Z [23] an.

$$\sigma = 4\pi \frac{P_{\text{Reflex}}}{S_Z} \quad (2.1.2)$$

Der Radarrückstreuquerschnitt wird hierbei absolut in m^2 oder auf 1m^2 normiert in dB angegeben. Tabelle 3.1 zeigt eine Übersicht einiger gängiger Zielarten und korrespondierender RCS nach [26].

Tabelle 2.1: Übersicht über typische Rückstreuquerschnitte exemplarischer Zielarten bei Mikrowellenfrequenzen

Objekt	RCS absolut in m^2	RCS in dB
Vogel	0.01	-20
Person	1	0
PKW	100	20
LKW	200	23

Die stark unterschiedlichen Werte für im Straßenverkehr relevante Zielklassen stellen erhöhte Anforderungen an den Dynamikbereich und die Rauscheigenschaften des Systems. Bei der dargestellten grundlegenden Radargleichung wird von idealen Ausbreitungs- und Systemrandbedingungen ausgegangen. Gegebenenfalls zusätzlich auftretende Verluste, z.B. Anpassungsverluste oder komplexere Ausbreitungsmodelle, auch im Falle von Mehrwegeausbreitung, müssen separat in Verlustterme aufgenommen und berücksichtigt werden. Auf eine detaillierte Darstellung der Verlustmechanismen soll an dieser Stelle verzichtet und auf weiterführende Literatur (z.B. [23], [26]) verwiesen werden.



2.1.2 Radargleichung für verteilte Objekte

Insbesondere bei Zielen im Nahbereich, die nicht als punktförmig mit vernachlässigbarer räumlicher Ausdehnung angenommen werden können, liefert die klassische Radargleichung vom experimentellen Befund abweichende Ergebnisse. Die Ursache hierfür liegt in der entfernungsabhängig illuminierten Fläche des Ziels, die in einem entfernungsabhängigen Radarrückstreuquerschnitt resultiert. Abbildung 2.2 illustriert dies an einem vereinfachten Beispiel.

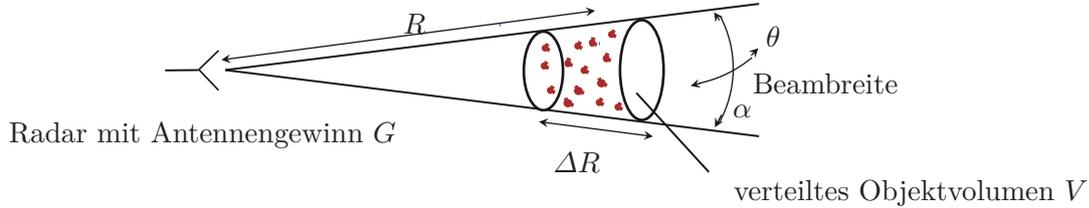


Abb. 2.2: Verteiltes Zielvolumen bei räumlich ausgedehnten Zielen

Die Einflüsse der Entfernungsabhängigkeit auf den Radarrückstreuquerschnitt seien im Folgenden aufgezeigt: Gegeben sei ein Radar mit dem Antennengewinn G , der daraus resultierenden Beambreite mit den -3 dB Öffnungswinkeln in den Azimut- und Elevationswinkeln θ und α sowie ein verteiltes Objekt in der Entfernung R . Das verteilte Objekt nimmt hierbei ein definiertes Volumen mit der räumlichen Tiefe ΔR ein. Unter Annahme eines symmetrischen gaußschem Beams ergibt sich dieses Volumen aus:

$$V = \frac{\pi\theta\alpha R^2 \Delta R}{8 \ln(2)} \quad (2.1.3)$$

Der Rückstreuquerschnitt dieses Volumens kann nach [27] als die Summe der einzelnen rückstreuenden Elemente innerhalb des Volumens V betrachtet werden:

$$\sigma = V \sum_i \sigma_i = V\mathcal{Y} \quad (2.1.4)$$

Hierbei wird \mathcal{Y} als die Radarreflexivität bezeichnet.

Basierend auf der Radargleichung für Punktziele lässt sich nun eine Radargleichung für verteilte Objekte definieren [27]:

$$P_{\text{RX}} = \frac{G^2 \lambda^2 P_{\text{TX}} V \mathcal{Y}}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2.1.5)$$

Durch Substitution von Gleichung 2.1.3 in Gleichung 2.1.5 ergibt sich [27]:

$$P_{\text{RX}} = \frac{G^2 \lambda^2 P_{\text{TX}} \theta \alpha \Delta R}{(512 \ln(2)) \pi^2 R^2} \mathcal{Y} \quad (2.1.6)$$

Bei Betrachtung der Gleichung 2.1.6 ist erkennbar, dass die biquadratische Entfernungs-Leistungsbeziehung bei der Annahme verteilter Objekte keine Gültigkeit besitzt und auf ein quadratisches Verhältnis reduziert wird. Allgemein besteht dieses Verhalten, wenn die gesamte Beambreite des

Radarsystems durch das Ziel ausgefüllt ist. Bei den typischen Zielen im Bereich des Automobilradars treten jedoch Mischformen auf, insbesondere zwischen Punkt-, Flächen- und Volumenzielen, die es erforderlich machen, passende Korrekturmodelle zu entwickeln.

2.2 Radararchitekturen

Für die praktische Realisierung von Radarsensoren haben sich verschiedene Ansätze herausgebildet. Die beiden zugrundeliegenden Prinzipien stellen das bi- und das monostatische Radar dar, die zunächst in diesem Abschnitt erläutert und anschließend zu multistatischen und MIMO-Radaren erweitert werden. Zugleich erfolgt an diesen exemplarischen Systemen die Erläuterung der hardwareseitigen Realisierung von Radarsensoren am Beispiel modulierter Dauerstrichradare. Durch die Integration mehrerer einzelner Radarkanäle in ein Radarsystem lässt sich ein multistatisches Radar realisieren. Durch Einsatz orthogonaler Wellenformen zur Illumination des Ziels können MIMO-Radarsysteme realisiert werden, auf die mit dem zugehörigen Signalmodell abschließend eingegangen wird.

2.2.1 Bistatisches Radar

Unter einem bistatischen Radar versteht man eine Radaranordnung, bei der für Sende- und Empfangskanal zwei unterschiedliche räumliche Positionen (z.B. in Form von Antennen) genutzt werden [28]. Diese Positionen können theoretisch in beliebigen Abständen zueinander liegen. In den Automobilradaranwendungen wird jedoch vorrangig die unmittelbar benachbarte Anordnung der Sende- und der Empfangsantenne innerhalb eines Radarsystems als bistatisches System bezeichnet. Die Verwendung getrennter Sende- und Empfangskanäle bringt einige Vorteile bei der Systemauslegung mit sich. So wird der Verzicht auf aufwändige Koppler oder Zirkulatoren ermöglicht. Zugleich führt dies zu einer hohen Isolation zwischen Sende- und Empfangspfad und damit zu einem hohen Dynamikbereich und einer hohen Empfindlichkeit des Radars.

Der prinzipielle Schaltungsaufbau eines solchen Systems, in einer Ausführung als moduliertes Dauerstrichradar, ist aus Abbildung 2.3 ersichtlich.

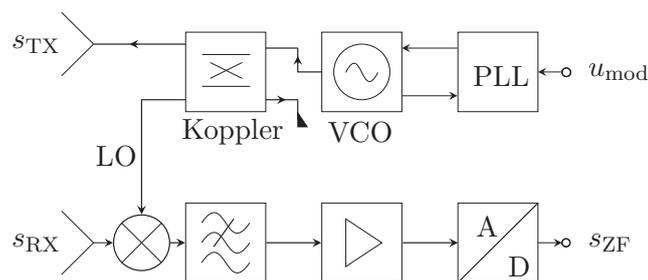


Abb. 2.3: Blockschaltbild eines bistatischen Radarsystems

Über einen durch eine Phasenregelschleife (engl.: phased locked loop, PLL) stabilisierten spannungsgesteuerten Oszillator wird das Sendesignal mit der gewünschten Modulation erzeugt und