# 1 Einleitung

Die Sicherheit im Straßenverkehr ist aufgrund von alltäglichen Problemlagen ein unstrittiges Ziel. Forschungsanstrengungen diverser wissenschaftlicher Disziplinen trugen in den vergangenen Jahrzehnten verstärkt dazu bei, Risiken zu minimieren, ohne allerdings das Potenzial vollends auszuschöpfen. Dass radartechnische Überlegungen bei der Erzielung weiterer Fortschritte gewinnbringend sein dürften, ist aufgrund einer differenzierten Geschichte nicht verwunderlich. Seit mehr als hundert Jahren entstanden hier im Kontext verschiedenster Anwendungsbereiche zahlreiche Innovationen. Mit Christian Hülsmeyers Schrift „Verfahren, um entfernte metallische Gegenstände mittels elektrischer Wellen einem Beobachter zu melden“, die am 30. April 1904 unter der Nummer 165 546 beim Kaiserlichen Patentamt erschienen ist, lässt sich hierfür in Deutschland ein markanter Startpunkt kennzeichnen. Hülsmeyers Forschungsidee sollte anlässlich des militärischen Interesses in den 1930er-Jahren an Bedeutung gewinnen. So stellt 1931 Rudolf Kühnhold die Ortungsmethode des Sonars vor. Die Gesellschaft für Elektroakustische und Mechanische Apparate (GEMA) präsentiert vier Jahre später das erste funktionsfähige Pulsradar, in dessen Folge sich eine Vielzahl von Radarsystemen für Schiffe und U-Boote entwickelte. Sogar kleinere Flugzeuge wurden in den 1940er-Jahren dementsprechend aufgerüstet. Mit dem Verbot kriegstechnologischer Forschung in Deutschland nach dem Zweiten Weltkrieg erlebte die Radartechnik in der Bundesrepublik durch zivile Anwendungen, wie der Überwachung des Luft- (Air Traffic Control, ATC) und Schiffverkehrs, eine Neuzeit.
Neben Überwachungsradaren für den Flug- und Schiffsverkehr oder für militärische Zwecke bilden heutzutage Automobilradare einen ganz neuen Markt. Seit einigen Jahren forschen Universitäten sowie Fahrzeughersteller mit Zulieferern an Radarsensoren im 24 GHz und 77 GHz Band für den Einsatz in Automobilen. Seit dem Jahr 2000 wird dadurch zum Beispiel ein Adaptives Geschwindigkeitsregelsystem Adaptive Cruise Control (ACC) auf der Basis von Radar im Fahrzeug erfolgreich eingesetzt [Men99]. Gegenwärtig werden 24 GHz Radarsensoren ebenfalls in der Totwinkelüberwachung genutzt [Sma12].
Aber nicht nur der Komfort und die Sicherheit der Fahrzeuginsassen sind von Interesse. Statistiken zeigen, dass besonders Fußgänger häufig mit Fahrzeugen kollidieren und



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

schwere Verletzungen davon tragen [Eur10b],[Sta11]. In Zukunft müssen daher auch Fußgänger besser geschützt werden. Die Fußgängererkennung ist im Automobilbereich ein neueres Thema. Unterstützt und angetrieben von neuen EU Verordnungen ist ein verbesserter Fußgängerschutz für neue Fahrzeuge Pflicht [Eur04]. Auch Crash-Tests des European New Car Assessment Programme (Euro NCAP) haben seit 2011 überarbeitete und neue Protokolle für den Fußgängerschutz [Eur12a].
Bisher werden Stereo-Kamerasysteme, thermophile Sensoren oder Laserscanner verwendet um Fußgänger zu detektieren, zu klassifizieren und in Unfallsituationen vorbeugende Maßnahmen zu treffen [MG06], [LMDJ04], [FDW02]. Kamerasysteme zeigen jedoch unter schlechten Wetterbedingungen eine geringe Leistungsfähigkeit. Laserscanner sind ebenfalls stark von der Wetterlage abhängig. Thermophile Sensoren haben eine geringe Reichweite für den Einsatz im Automobilbereich. Die Idee ist daher Radarsensoren für den Fußgängerschutz einzusetzen. Radarsensoren sind in vielen Fahrzeugen bereits vorhanden und eine Fußgängererkennung ist durch die Erweiterung der Signalverarbeitung möglich. Der Mehraufwand in der Signalverarbeitung ist im Gegensatz zu optischen Systemen gering.
In dieser Dissertation wird ein Lösungsvorschlag zur Fußgängerklassifikation im Automobilbereich durch Radarsensoren vorgestellt. Zielführend war bei der Erstellung der Gedanke, neben der genauen Beschreibung und Lösung der Herausforderungen, die Leistungsfähigkeit des entwickelten Systems zu bestimmen. Mit der Verwendung eines handelsüblichen Radarsensors, der bereits in der Automobilindustrie Anwendung findet, wurde gewährleistet, dass die Lösung in jedem Radarsensor implementiert werden kann. In dem letztendlich vorgestellten Lösungsvorschlag geht es darum, die vorhandene Signalverarbeitung anzupassen, zu erweitern und Vorschläge für die nächste Generation von Radarsensoren zu geben. Im Folgenden werden deshalb verschiedene Sendesignale vorgestellt, auf ihre Tauglichkeit für den Automobilbereich untersucht und geeignete Sendesignale für die Fußgängererkennung und Klassifikation ausgewählt. Eine erweiterte Signalverarbeitung wird dahin gehend entwickelt, jedes Ziel in Fahrtrichtung des eigenen Fahrzeugs zu detektieren, die Empfangssignale in sehr kurzer Messzeit zu analysieren und das Ziel zu klassifizieren. Dabei werden Fahrzeuge, Fußgänger und ortsfeste Objekte betrachtet. Die technische Herausforderung besteht nicht nur in der detaillierten und genauen Messung der beobachteten Ziele, sondern ebenfalls in der Berechnung geeigneter Merkmale, um eine Zielklassifikation durchzuführen.



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

# 2 Klassifikation von Radarsignalen

Nach Angaben der Europäischen Kommission starben 2009 etwa 34 500 Menschen auf den Straßen der Europäischen Union, während über 1,7 Millionen Menschen verletzt wurden. Die Höhe der volkswirtschaftlichen Unfallkosten lag 2009 bei rund 130 Milliarden Euro [Eur10a].
Im Zuge dessen hat sich die Europäische Kommission die Halbierung der Gesamtzahl Verkehrstoter in der Europäischen Union von 2010 bis zum Jahr 2020 zum Ziel gesetzt. Die Verbesserung des Fußgängerschutzes im Straßenverkehr ist dabei ein Kernanliegen, weshalb die Fahrzeughersteller verpflichtet wurden, ihre Forschungsaktivitäten im Kontext von EU-Projekten (zum Beispiel accident avoidance by active intervention for Intelligent Vehicles (interactIVe) oder Advanced Radar TRAcking and Classification for enhanced road safety (ARTRAC)) im Bereich der Kollisionsvermeidung und des Fußgängerschutzes deutlich zu intensivieren, was angesichts der statistischen Kennzahlen aus der europaweit bekannten Care-Datenbank [Eur10b] angemessen erscheint.

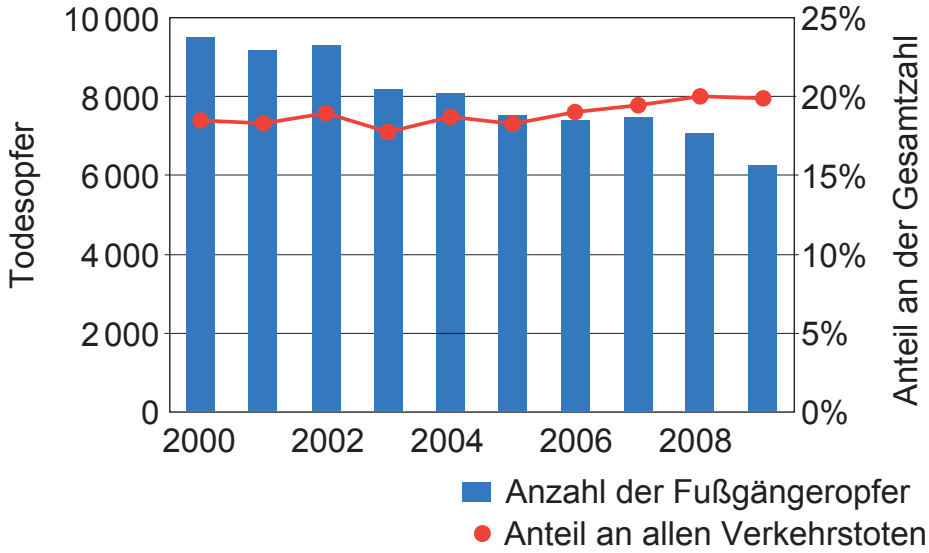


**Abbildung 2.1:** Todesopfer und Anteil der gesamten Anzahl Verkehrstoter.



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

In Abbildung 2.1 wird dargestellt, dass die absolute Anzahl der Todesfälle von Fußgängern in 2011 zwar deutlich gesunken ist, in relativem Bezug allerdings eine gewichtigere Rolle einnahm [Eur12b].
Wird genauer analysiert, in welchem Umfeld Fußgänger in Unfälle verwickelt sind, so zeigt sich, dass besonders der urbane Bereich stark betroffen ist. Laut Statistik waren im Jahr 2012 bei einem Unfall im städtischen Bereich der EU zu 36% Fußgänger involviert, Abbildung 2.2, [Eur12c].

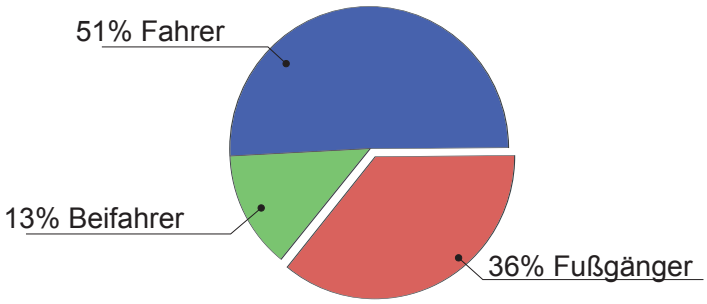


**Abbildung 2.2:** Verteilung der Verkehrstoten nach Teilnehmer.

Die hier vorliegende Arbeit soll daher im Hinblick auf die Sicherheit im urbanen Straßenverkehr und insbesondere bezüglich des hohen Anteils von in Unfällen involvierten Fußgänger einen problemlösungsorientierten Beitrag liefern. Das Auseinandersetzen mit intelligenten Sensoren in Fahrzeugen ist hierfür eine wichtige Voraussetzung, da diese die Entwicklung von aktiven Schutzsystemen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit ermöglichen. Konkret ist dies mit der Erforschung mehrerer analytischer Dimensionen verbunden: Für ein aktives Schutzsystem sind aus der Perspektive des Fahrzeugs die Position und die Geschwindigkeit des externen und zu messenden Objekts wichtig. Weiterhin ist von großem Interesse, worum es sich bei dem gemessenen Objekt handelt, denn frühzeitige Fahrerassistenzfunktionen, wie Ausweichmanöver oder das Starten der Bremsassistenz, sind hiervon abhängig. Ein Bremsmanöver muss dem beobachteten Objekt angepasst sein. Vorausfahrende Fahrzeuge stellen ein anderes Risiko dar als ein auf dem Gehweg laufender Fußgänger. Für diesen Anwendungsfall im Fahrzeug wird heutzutage im Bereich von Kamerasystemen, thermophilen Sensoren und Laserscannern geforscht und entwickelt. Dabei hat jede Sensorik Vor- und Nachteile für die betrachtete Anwendung. Kameras erbringen vergleichsweise viele Informationen und können Fußgänger von anderen Objekten unterscheiden, ermöglichen allerdings nur bei Stereo-Systemen eine Entfernungsmessung. Eine Geschwindigkeitsmessung ist nicht möglich. Auch Dunkelheit, Nebel oder



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Regen erschweren die Detektion und Klassifikation von Objekten im Straßenverkehr. Werden Kamerasysteme verwendet, so erreicht ein System-Ansatz mit einer Stereo-Kamera zur Fußgänger-Detektion eine Reichweite von bis zu 25 m. Der komplette Algorithmus benötigt dafür etwa 100 ms Rechenzeit auf einer Graphics Processing Unit (GPU) (PROTECTOR [WHW09]). Thermophile Sensoren können genutzt werden, um einen Fußgänger vor dem eigenen Fahrzeug zu detektieren [SL05]. Allerdings liefern diese keine direkten Entfernungsinformationen oder Geschwindigkeitsmessungen. Auch die maximale Reichweite ist nicht sehr hoch. Die Sensoren werden daher in Fusion mit anderen Sensoren verwendet. Laserscanner sind ebenfalls in Sicherheitsanwendungen für Fahrzeuge relevant. Eine Entfernungsmessung ist mit einer maximalen Reichweite von etwa hundert Metern möglich. Die Geschwindigkeit kann nicht direkt gemessen werden. Stattdessen werden Tracking-Algorithmen genutzt. Fußgänger können bis zu 30 m vor dem Fahrzeug detektiert werden. Diese Klassifizierung basiert auf der Geschwindigkeit des Objekts und der sichtbaren Pendelbewegung der Beine in den Laserscanner-Daten. Der Algorithmus erkennt einen Fußgänger etwa 300 ms vor einem Crash [Für05]. Die Nachteile von Laserscannern liegen in der Wetterabhängigkeit und in der Abschattung von Objekten.
In diesem Kontext spielen Radarsensoren im 24 GHz und 77 GHz Frequenzbereich eine wichtige Rolle. Sie erlauben die sehr genaue Messung von Entfernung $R$, radialer Geschwindigkeit $v_\mathrm{r}$ und Azimutwinkel $\alpha$ bei jedem Wetter in sehr kurzer Messzeit. Auch Abschattung von Objekten ist nicht sehr problematisch. Zusätzlich sprechen die gute Verfügbarkeit und der niedrige Preis für sie, da Radarsensoren bereits in sehr großer Stückzahl für verschiedene Applikationen im Fahrzeug verwendet werden. Die technische Herausforderung liegt in der Entwicklung eines Radarsensors, der Radarziele detektiert und klassifiziert. Das ist das grundlegende Thema der vorliegenden Dissertation.

## 2.1 Radar zur Fußgängererkennung

In einer alltäglichen Verkehrssituation und besonders im städtischen Bereich muss der Fahrer viele Eindrücke gleichzeitig innerhalb kürzester Zeit verarbeiten, Abbildung 2.3. Neben vorausfahrenden und entgegenkommenden Fahrzeugen muss der Fahrer auf Fußgänger, Radfahrer, Ampeln, Schilder und vieles mehr achten. Im Notfall ist eine Reaktionszeit von sehr kurzer Dauer entscheidend. Häufig sind Fahrer in Notsituationen überfordert, oder die menschliche Reaktionszeit reicht gar nicht erst aus, um den Unfall zu vermeiden. An dieser Stelle ist eine intelligente Sensorik interessant,



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

die den Fahrer vor Kollisionen warnt oder diese durch den Eingriff in das Lenk- und Bremsverhalten verhindert.

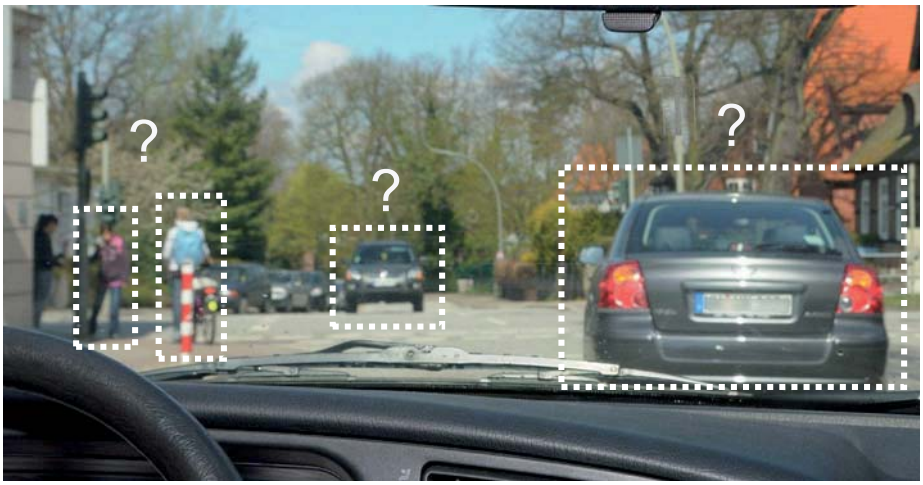


**Abbildung 2.3:** Alltägliche urbane Verkehrssituation.

Um eine zuverlässige Fußgängererkennung während der Fahrt im Fahrzeug durchzuführen, wird eine leistungsfähige und robuste Sensorik benötigt. Die bisher vorgestellten Sensoren, wie Stereo-Kameras oder Laserscanner, werden in verschiedensten Anwendungen verwendet. Eine Fußgängererkennung ist zwar möglich, aber nicht alle gewünschten Objektparameter sind messbar. Radarsensoren mit hoher Entfernungs- und Geschwindigkeitsauflösung haben hier ein großes Potenzial. Mit einer intelligenten Signalverarbeitung innerhalb des Radarsensors kann aus den Empfangssignalen neben allen gewünschten Objektparametern auch die Objektklasse bestimmt werden. Aufgrund der eingeschränkten menschlichen Fähigkeiten, Entfernung und Geschwindigkeit zu schätzen, leisten Radarsensoren hier durch das breite Leistungsspektrum und die schnelle Messzeit bei geringer Rechenkomplexität eine sehr gute Hilfe.
Aus diesen Gründen werden in dieser Arbeit verschiedene Radar-Sendesignale auf die Tauglichkeit für den Straßenverkehr und die Fußgängererkennung evaluiert. Anhand von erarbeiteten Modellen für Fahrzeuge, Fußgänger und stationäre Objekte werden Merkmale aus den Radarempfangssignalen berechnet, die eine Klassifikation ermöglichen. Die gesamte Signalverarbeitung ist online funktionsfähig und kann somit in jeden Radarsensor implementiert werden. Die zusätzliche Komplexität zur eigentlichen Signalverarbeitung ist sehr gering. Dazu wird besonderer Wert auf eine schnelle und zuverlässige Klassifikation gelegt. Die Klassifikation funktioniert für bewegte Fußgänger in allen Situationen, sodass diese sowohl im städtischen als auch ländlichen



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Umfeld erkannt werden. So ist neben den Objektparametern, die ein Radar misst, eine zusätzliche Information über die Objektklasse berechenbar. Der Vorteil eines solchen Systems ist eine robuste, schnelle Messung verschiedener Objekte und Klassen im Straßenverkehr, die unter allen Witterungsbedingungen funktioniert. Auf eine Fusion mit anderen Sensoren, wie Kameras, ist bewusst verzichtet worden. Vielmehr sollen die Stärken der Radarsensoren im Vordergrund stehen. Die Implementierung kann über ein Softwareupdate des Radarsensors erfolgen und erfordert keine weiteren Kosten, wie es zum Beispiel zusätzliche Hardware darstellen würde. Funktionalitäten wie ACC oder Totwinkelüberwachung bleiben erhalten.

## 2.2 Anforderungen

Ein Radarsensor für den Automobilbereich muss viele Anforderungen gleichzeitig erfüllen. Neben Robustheit, geringen Kosten und flexiblen Installationsmöglichkeiten für die Automobilindustrie, ist die eindeutige Bestimmung von Entfernung $R$, radialer Geschwindigkeit $v_\mathrm{r}$ und Azmiutwinkel $\alpha$ eines Objektes auch in Mehrzielsituationen überaus wichtig, Tabelle 2.1.

| | |
|---|---|
| Entfernung | $R$ |
| Radiale Geschwindigkeit | $v_\mathrm{r}$ |
| Azimutwinkel | $\alpha$ |

**Tabelle 2.1:** Messparameter eines Radarsensors.

Je nach Auswahl einer Sendesignalform lassen sich verschiedene Eigenschaften erreichen, beispielsweise die gleichzeitige Messung von Entfernung und Geschwindigkeit in einer sehr kurzen Messdauer, die aufgrund der schnellen und dynamischen Entwicklungen im Straßenverkehr wünschenswert erscheint. Allerdings hat nicht jede beliebige Signalform eine kurze Messdauer. Die Messdauer kann auf den ersten Blick gering sein, sich jedoch in Mehrzielsituationen schnell vergrößern, um eine eindeutige Zuordnung der Ziele zu finden. Wenn es durch geeignete Wahl des Sendesignals gelingt, die Entfernung und radiale Geschwindigkeit auch in Mehrzielsituationen und kurzer Messdauer zu messen, ist das ein großer Fortschritt für die Zielklassifikation. Zusätzlich ist die Genauigkeit der gemessenen Zielparameter wichtig. Nur durch eine genaue Messung von Entfernung, Geschwindigkeit und Azmiutwinkel kann im



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Fahrzeug sicher entschieden werden, was im Falle einer nahenden Kollision zu tun ist. Hierbei spielt die Auflösung eine entscheidende Rolle. Diese bestimmt, welcher Mindestabstand zwischen Objekten vorhanden sein muss, um diese als verschiedene Objekte zu erkennen. Zusätzlich bestimmt die Auflösung die Sichtbarkeit von Merkmalen, da Fußgänger sich stark in den kinematischen Eigenschaften von Fahrzeugen und stationären Objekten unterscheiden, wie in den folgenden Kapiteln gezeigt wird. Weiterhin ist die Fläche wichtig, die von der Antenne eines Radarsensors abgedeckt werden kann. Der Sensor sollte den wichtigen Bereich vor dem Fahrzeug bis zu 150 m Entfernung sowie rechts und links liegende Bürgersteige abdecken. Fußgänger sollen bis zu 50 m vor dem Fahrzeug detektiert und klassifiziert werden. Diese Fläche ist durch die Eindeutigkeit der Messwerte gegeben. Neben einem großen Entfernungseindeutigkeitsbereich muss die gemessene Geschwindigkeit einen großen eindeutigen Bereich haben. Da durch den Doppler-Effekt nur die relative radiale Geschwindigkeit bestimmt werden kann, muss der eindeutige Bereich größer sein als die eigene gefahrene absolute Geschwindigkeit. Fußgänger, die sich mit einer Geschwindigkeit von 1,5 m/s bewegen, können sonst nicht eindeutig gemessen werden.
Die Parameter, die von einem Sensor gemessen werden müssen, um diesen zur Fußgängerdetektion und Klassifikation nutzen zu können, sind in Tabelle 2.2 zusammengefasst. Aus diesen Kriterien lassen sich die Systemparameter herleiten.

| | | |
|---|---|---|
| **Entfernungsmessung** | Eindeutigkeit<br>Auflösung<br>Genauigkeit | $R_{\max}$<br>$\Delta R$<br>$\widehat{R}$ |
| **Geschwindigkeitsmessung** | Eindeutigkeit<br>Auflösung<br>Genauigkeit | $v_{\mathrm{r,max}}$<br>$\Delta v_{\mathrm{r}}$<br>$\widehat{v}_{\mathrm{r}}$ |
| **Winkelmessung** | Eindeutigkeit<br>Auflösung<br>Genauigkeit | $\alpha_{\max}$<br>$\Delta\alpha$<br>$\widehat{\alpha}$ |

**Tabelle 2.2:** Anforderungen an einen Radarsensor zur Fußgängerklassifikation.

Wird ein Objekt im Bereich vor dem Fahrzeug detektiert und eindeutig gemessen, so muss die Signalanalyse und Merkmalextraktion innerhalb weniger Messzyklen abgeschlossen sein. Wünschenswert ist nur ein einziger Messzyklus, der gebraucht wird, um Merkmale für eine Klassifikation zu berechnen. Darauf aufbauend muss der Klassifikationsalgorithmus die zugehörige Klasse mit geringer Komplexität und großer Robustheit bestimmen können.



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Werden mehrere Messzyklen benötigt, um einem gemessenen Objekt eine Klasse mit hoher Sicherheit zuzuordnen, so müssen die Messungen durch ein Tracking in Zusammenhang gebracht werden. Tracking-Algorithmen sind üblicherweise für Punktziele ausgelegt. Diese Annahme ist für stationäre Objekte oder weit entfernte Fahrzeuge erfüllt. Bei nahen Fahrzeugen oder Fußgängern liegt ein geometrisch beziehungsweise kinematisch ausgedehntes Objekt mit mehreren Detektionen vor, die zuverlässig verfolgt werden müssen. Erst dann ist eine Merkmalberechnung und Klassifikation möglich.
Abbildung 2.4 zeigt einen 24 GHz Radarsensor, der bereits im Automobilbereich für ACC-Anwendungen und Totwinkelüberwachung genutzt wird. Dieser Sensor ermöglicht eine zeitgleiche Entfernungs-, Geschwindigkeits- und Azimutwinkel- messung in Mehrzielsituationen und könnte daher ebenfalls für die Fußgängerdetektion und Klassifikation brauchbar sein. Dazu ist eine weitere Analyse notwendig, auf die in den folgenden Kapiteln eingegangen wird.

**Abbildung 2.4:** 24 GHz Radar Sensor für Automobilanwendungen.

Um die betrachtete Aufgabe bearbeiten zu können, werden Sendesignalformen vorgestellt und auf Ihre Leistungsfähigkeit hin untersucht. Dazu werden das physikalische Prinzip, die Grundlagen der Radartechnik sowie Genauigkeiten und Auflösungen ausgewählter Sendesignale, erläutert. Geeignete Sendesignalformen werden genutzt, um eine genaue Analyse bezüglich Fahrzeugen, Fußgängern und stationären Objekten durchzuführen. Zusätzlich zur Radarmesstechnik wird eine Klassifikation durchgeführt. Dazu werden verschiedene Merkmale aus den Echosignalen berechnet, die sich auf eine Zielausdehnung in Entfernung und Geschwindigkeit beziehen. Die Klassifikation von Echosignalen ist eine erweiterte Aufgabe für den Radarsensor.



Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.