



Eugen Schubert (Autor)  
**Klassifikation leicht verwundbarer Verkehrsteilnehmer mit  
hochauflösendem Automobilradar**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/7873>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen, Germany  
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

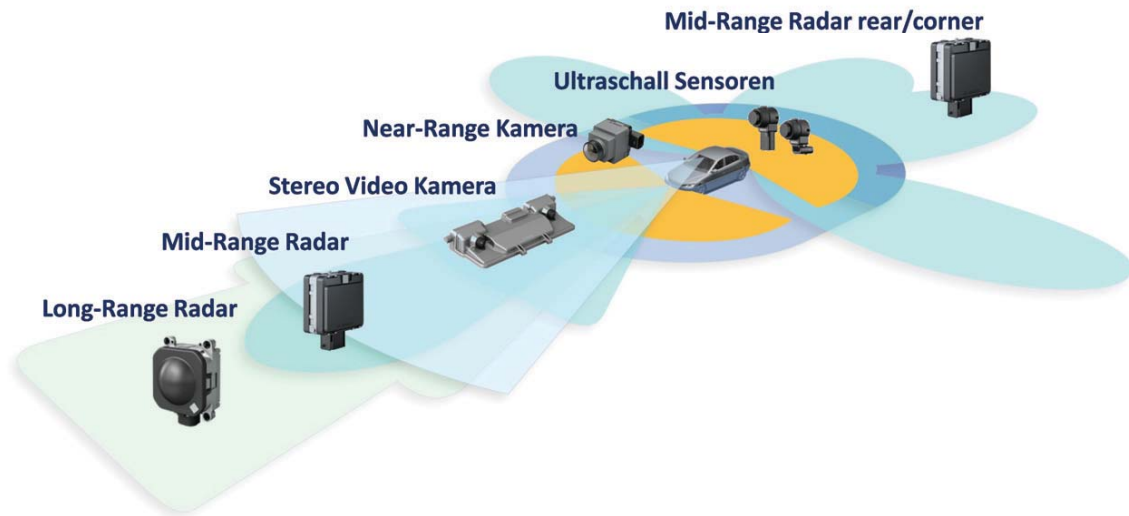
# 1 Einleitung

## 1.1 Einführung in radarbasierte Fahrerassistenzsysteme

Mit der Patentierung eines „Verfahrens um entfernte metallische Gegenstände mittels elektrischer Wellen einem Beobachter zu melden“ [1] läutete Erfinder Christian Hülsmeier bereits im Jahre 1904 die Geburtsstunde der Radartechnik ein. Auf Grund der geringen Reichweite der von ihm Telemobiloskop genannten Erfindung fand diese zunächst wenig Beachtung, erlebte jedoch im zweiten Weltkrieg ihre Renaissance und wird seitdem zur Flug- und Seeüberwachung eingesetzt. Auf Grund fortwährender technischer Verbesserungen und Weiterentwicklungen finden Radarsysteme heute vielseitig Anwendung, beispielsweise bei der Geschwindigkeitsüberwachung im Straßenverkehr, bei der Wetterbeobachtung [2], bei der Kartografie der Erde aus dem All [3], bei der Ermittlung von Füllständen in Tanks [4], in Alarmanlagen und Bewegungsmeldern, bei der Minensuche im Boden oder der Analyse der Beschaffenheit von Wänden. Wie eine von Google kürzlich vorgestellte Messtechnologie namens *Soli* [5] bereits eindrucksvoll demonstriert, könnten hochintegrierte Radarsensoren schon in naher Zukunft Benutzereingaben durch Erkennung von Gesten revolutionieren.

Auch im Automobilbereich hat sich die Radartechnik seit vielen Jahren etabliert. AEG-Telefunken/Bosch und Daimler-Benz begannen bereits im Jahre 1975 mit der Entwicklung eines 35 GHz Radars zur Vermeidung von Kollisionen [6]. Radarsysteme wurden erstmals in US-amerikanischen Überlandbussen eingesetzt [7] um einen Rückgang der Unfallzahlen zu bewirken. Für einen umfassenden Bericht der weiteren Entwicklung der automobilen Radarsensorik sei an dieser Stelle auf [8] und [9] verwiesen.

Abb. 1.1 zeigt eine Auswahl heutiger Sensoren für Fahrerassistenz- und Fahr-sicherheitssysteme basierend auf der Erkennung des Fahrzeugumfeldes. Dabei spielen Radarsensoren seither eine essentielle Rolle. Sie überzeugen unter anderen durch ihre hohe Reichweite sowie der Möglichkeit des geschützten Einbaus unsichtbar hinter dem Stoßfänger, was insbesondere einen Vorteil für das Fahrzeugdesign darstellt. Zusätzlich arbeiten Radarsensoren robust bei Dunkelheit oder unter niederschlagsbedingten Umwelteinflüssen und damit verbundenen schlechten Sichtverhältnissen. Die Fähigkeit zur simultanen Messung der radialen Entfernung und Relativgeschwindigkeit sowohl statischer als auch dynamischer Objekte stellt ein weiteres vorteilhaftes Alleinstellungsmerkmal gegenüber anderen Sensortechnologien dar.



**Abb. 1.1:** Sensoren für Fahrerassistenz- und Fahrsicherheitssysteme

Radarsensoren ermöglichten bereits im Jahre 2000 die Einführung von *Adaptive Cruise Control* (ACC), einer automatischen Abstands- und Geschwindigkeitsregelung zur Erhöhung des Komforts und der Sicherheit während des Autofahrens. Der dafür entwickelte Long Range Radar (LRR) legte den Grundstein für die Verbreitung von radarbasierten Fahrerassistenz- und Fahrsicherheitsfunktionen. Die dafür von Bosch entwickelten Radarsensoren zeigt Abb. 1.2. Eine Übersicht der technischen Daten der aktuellen Generation 4 ist in [10] zu finden.



**Abb. 1.2:** Evolution der Bosch Radarsensoren vom Long-Range Radar der ersten Generation (2000) zum Mid-Range Radar der vierten Generation (2013)

Dabei wurde von Generation zu Generation die Leistungsfähigkeit stetig verbessert und die Abmessungen und Kosten reduziert. Die Masse der aktuellen Generation des Mid-Range Radar (MRR) beträgt mit 190 g weniger als ein Drittel der Masse des LRR der ersten Generation. Zudem konnte der Messbereich im Azimut heutiger MRR Sensoren bei Entfernungen unter 25 m im Vergleich zur ersten Generation um mehr als das Fünffache auf 90° gesteigert werden. Dies

## 1.2 VORAUSSCHAUENDE NOTBREMSSYSTEME FÜR DEN FUßGÄNGERSCHUTZ

---

ermöglicht eine für den Fahrer sehr komfortable Ausgestaltung von ACC insbesondere in Situationen mit spät und nah von der Nachbarspur auf die eigene Fahrspur wechselnden Fahrzeugen. Zudem wird ACC in der Generation 4 um die Funktion *Stop & Go* erweitert. Diese erlaubt das automatische Abbremsen des Fahrzeuges in den Stand und darauffolgend auch das automatische Anfahren nach kurzer Standzeit, z. B. in Stausituationen oder an Ampeln im Stadtverkehr.

Neben ACC erobern *vorausschauende Notbremsfunktionen* mehr und mehr den Markt. Durch die Bestimmung des Abstandes zwischen dem eigenen und einem vorausfahrenden oder einem im Fahrweg angehaltenen Fahrzeug und eines kontinuierlich durchgeführten Abgleichs mit dem geschwindigkeitsabhängigen Bremsweg, können mögliche Kollisionen im Vorfeld erkannt und durch Warnhinweise an den Fahrer oder durch automatisierte Bremsengriffe vermieden oder zumindest in ihrer Schwere verringert werden.

Eine weitere, an die Anforderungen der Überwachung des rückwärtigen Verkehrs angepasste Variante des MRR, das sogenannte MRR rear oder MRR corner, ermöglicht zudem die Überwachung schlecht einsehbarer Bereiche hinter dem Fahrzeug. Realisiert wird dies durch zwei sequenziell angesteuerte Sendeantennen mit verschiedenen Hauptstrahlrichtungen und einem dadurch erzielten Detektionsbereich von ca. 180°. Die darauf basierende Funktion *Lane Change Assist* warnt den Fahrer vor gefährlichen Spurwechseln mit Kollisionsrisiko. Zusätzlich eignet sich der MRR rear für die Umsetzung von *Querverkehrsassistenten* und damit zur Vermeidung von Kollisionen, wie sie beispielsweise bei Einfahrt in Kreuzungen oder Einmündungen sowie bei Rückwärtsfahrt an schlecht einsehbaren Ausfahrten oder beim Ausparken vorkommen können.

### 1.2 Vorausschauende Notbremssysteme für den Fußgängerschutz

Um die Zahl im Straßenverkehr verletzter und getöteter Personen zu reduzieren, rückten schlecht geschützte bzw. leicht verwundbare Verkehrsteilnehmer (engl.:vulnerable road user, VRU), wie Fußgänger und Fahrradfahrer, in den letzten Jahren verstärkt in den Fokus vorausschauender Notbremssysteme. Die Aufgabe *vorausschauender Fußgängerschutzfunktionen* ist Zusammenstöße zu vermeiden oder zumindest Unfallfolgen zu verringern.

Seit 2011 wird das Unfallgeschehen diesbezüglich detailliert u.a. im Rahmen der Förderprojekte *Assessment methodologies for forward looking Integrated Pedestrian and further extension to Cyclist Safety Systems (AsPeCSS)* [11], *Cyclist-AEB Testing System Development (CATS)* und *Proactive Safety for Pedestrian and Cyclists (PROSPECT)* analysiert, um daraus repräsentative Testszenarien abzuleiten, mit welchen der Beitrag vorausschauender Fahrerassistenz- und Fahrsicherheitsysteme zur Minderung der Unfallschwere und zur Unfallvermeidung objektiv bewertet werden kann. Insbesondere die im Rahmen von *AsPeCSS* erarbeiteten

## 1 EINLEITUNG

Erkenntnisse trugen maßgeblich bei der Gestaltung der seit 2016 gültigen Testprotokolle für vorausschauende Fußgängerschutzsysteme [12] der Verbraucherchutzorganisation *European New Car Assessment Programme (EuroNCAP)* bei. Abb. 1.3 zeigt die in *AsPeCSS* ermittelten Testszenarien mit zugehörigen Parametern. Für eine detaillierte Beschreibung der Ableitung dieser, als repräsentativ für das Unfallgeschehen erachteten Testszenarien, sei auf [13] verwiesen. Bei allen fünf Vorschlägen für Testszenarien tritt ein Fußgänger-Dummy lateral vor ein fahrendes Fahrzeug. Um die Tests repräsentativ für die in der Unfallstatistik signifikant vertretenen Unfallszenarien zu gestalten, werden die Parameter Fahrzeuggeschwindigkeit, Fußgängergeschwindigkeit, der initiale Anprallort an das Fahrzeug und die Laufrichtung variiert.

Testszenario					
	1: langsamer Erwachsener	2: laufender Erwachsener	3: gehender Erwachsener	4: gehender Erwachsener	5: gehendes Kind
Geschwindigkeit Fußgänger $v_{ped}$	3 km/h	8 km/h	5 km/h	5 km/h	5 km/h
Geschwindigkeit Fahrzeug $v_{veh}$	20-60 km/h	20-60 km/h	10-50 km/h	10-50 km/h	20-60 km/h
Anprallpunkt des Dummy	mittig, 50 % von links	mittig, 50 % von links	nicht mittig, 25 % von rechts	nicht mittig, 75 % von rechts	mittig, 50 % von rechts

**Abb. 1.3:** Im Projekt *AsPeCSS* ermittelte Testszenarien zur Bewertung von Fußgängerschutzsystemen. Diese gelten als repräsentativ für Unfallszenarien mit dem höchsten Potential zur Reduzierung verletzter und getöteter Fußgänger [13]

Unter der stark vereinfachten Annahme linearer Fortbewegung von Fahrzeug und Fußgänger gestaltet sich die Auslegung aktiver vorausschauender Notbremsysteme äußerst einfach. Durch Prädiktion der Fußgängerbewegung kann der Kollisionspunkt und die Zeit, die ein Fußgänger bis zum Erreichen dieses Punktes benötigen wird, berechnet werden. Diese Zeit wird *Time To Collision (TTC)* genannt und sinkt, ausgehend von einem initialen Wert, mit zunehmender Laufzeit eines Unfallszenarios, bis sie zum Zeitpunkt der Kollision den Wert null erreicht. Zusätzlich zur *TTC* lässt sich die Zeit bestimmen, die ein Fahrzeug benötigt, um aus der aktuellen Geschwindigkeit in den Stillstand zu bremsen. Ist diese kleiner oder gleich der *TTC* ist eine Kollision unvermeidbar und eine Vollbremsung wird ausgelöst, sodass das Fahrzeug im besten Falle noch vor dem Fußgänger zum Stillstand kommt. Mit dieser trivialen Gestaltung lassen sich Kollisionen mit nahezu beliebiger initialer Fahrzeuggeschwindigkeit vermeiden.

## 1.2 VORAUSSCHAUENDE NOTBREMSSYSTEME FÜR DEN FUßGÄNGERSCHUTZ

---

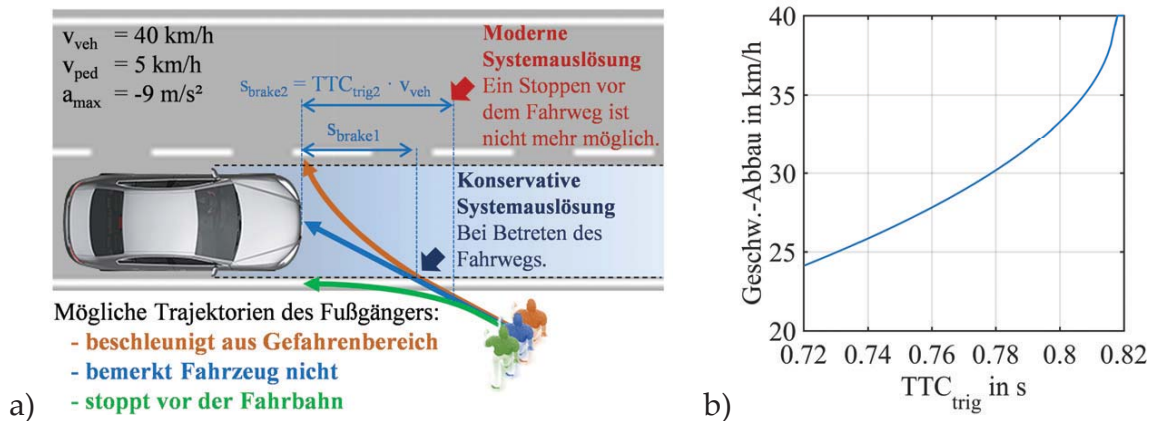
In realen Situationen des Alltags kann jedoch angenommen werden, dass Fußgänger nur in Ausnahmefällen mit konstanter Geschwindigkeit auf eine Straße vor fahrende Fahrzeuge laufen. Sie stoppen meist am Straßenrand, um zu überprüfen wann sie möglichst gefahrfrei überqueren können, oder sie laufen, mit der Absicht neben dem Fahrbahnrand stehen zu bleiben, an eine Fußgängerampel. Dabei weisen sie sehr hohe Bewegungsdynamiken auf, was die Prädiktion ihres Aufenthaltsortes und damit auch die Ermittlung des Eingriffszeitpunktes eines vorausschauenden Fußgängerschutzsystems sehr erschwert. Angaben in der Literatur zur Maximalbeschleunigung streuen von  $3 \text{ m/s}^2$  bis  $10 \text{ m/s}^2$  [14, 15, 16]. Daher ist davon auszugehen, dass eine Systemauslegung wie zuvor beschrieben, unter realen Bedingungen zu einer sehr hohen Zahl von Falschauslösungen führen würde und damit nicht nur das Vertrauen des Fahrers in das System mindern, sondern auch zusätzliche Auffahrunfälle provozieren könnte. Um dies zu vermeiden, wird daher für gewöhnlich eine obere Schwelle für die Auslösung eines Eingriffes basierend auf der TTC definiert. Erst ab der Unterschreitung dieser Schwelle kann ein Systemeingriff in einem potentiellen Unfallszenario frühestens gerechtfertigt werden. Theoretische Simulationen und experimentelle Untersuchungen [17, 18, 19] zeigen, dass Systeme mit realistischen Eingriffszeitpunkten Unfälle bei Initialgeschwindigkeiten von über  $40 \text{ km/h}$  selbst mit modernen Bremssystemen nicht mehr vermeiden, sondern die Unfallschwere durch Reduktion der Aufprallgeschwindigkeit lediglich mindern können.

Eine konservative Auslegung des Systemeingriffes für ein Beispielszenario wird in Abb. 1.4a vorgestellt. Der blau gefärbte Fußgänger läuft mit  $5 \text{ km/h}$  lateral zur Fahrtrichtung vor ein mit  $40 \text{ km/h}$  fahrendes Fahrzeug. Zum Zeitpunkt des Betretens des Fahrweges befinden sich sowohl Fußgänger als auch Fahrzeug noch ca.  $0,72 \text{ s}$  vor dem Erreichen des Kollisionspunktes. Unter Annahme eines vereinfachten Bremsmodells nach [10] mit einer effektiven Totzeit für den Aufbau des Bremsdruckes von  $0,2 \text{ s}$  und einer Vollverzögerung von  $9 \text{ m/s}^2$  kann die Aufprallgeschwindigkeit im Beispiel lediglich um  $24 \text{ km/h}$  reduziert werden. Des Weiteren weist der theoretisch mögliche Geschwindigkeitsabbau eine äußerst starke Abhängigkeit vom Eingriffszeitpunkt  $TTC_{\text{trig}}$  auf, wie der Verlauf von Abb. 1.4b zeigt. Würde der Bremseneingriff  $0,1 \text{ s}$  früher bzw.  $0,82 \text{ s}$  vor der Kollision erfolgen, so könnte diese vollständig vermieden werden.

Ein erweitertes Konzept für die Auslegung des Eingriffszeitpunktes wird in [20, 21] vorgestellt. Dabei wird der Eingriffszeitpunkt in potentiellen Unfallszenarien anhand eines Kritikalitätsmaßes bestimmt, welches auf einem durch Probandenmessungen ermittelten Bewegungsmodell basiert. Das Modell liefert komfortabel durchführbare und maximal mögliche Beschleunigungen für das Anhalten und Losgehen von Fußgängern. Anhand dieser und der mittels Sensorik gemessenen Position, Laufrichtung und Geschwindigkeit des Fußgängers können bereits vor Betreten der Fahrbahn Systemeingriffe gerechtfertigt werden, beispielsweise wenn ein Fußgänger nicht mehr komfortabel vor dem Fahrweg des

## 1 EINLEITUNG

Fahrzeuges zum Stillstand kommen oder nach Betreten des Fahrweges nicht mehr komfortabel aus dem Gefahrenbereich heraus beschleunigen kann. Eine solche moderne Systemauslegung ermöglicht frühzeitigere Systemeingriffe als bei konventioneller Auslegung und verfügt dadurch über ein höheres Unfallvermeidungspotential, da der zur Verfügung stehende Bremsweg proportional zum Zeitpunkt der Eingriffsentscheidung ist, wie Abb. 1.4a verdeutlicht. Gleichzeitig reduziert die modellgestützte Bestimmung des Eingriffszeitpunktes das Auftreten ungerechtfertigter Bremsenriffe und vermeidet dadurch bedingte Folgen, wie zusätzliche Auffahrunfälle.



**Abb. 1.4:** a) Drei mögliche Verhaltensweisen des Fußgängers sowie b) die starke Abhängigkeit des möglichen Geschwindigkeitsabbaus vom Eingriffszeitpunkt  $TTC_{trig}$  eines Notbremsystems

### 1.3 Motivation, Abgrenzung und Ziel der Arbeit

Skizziert man in Ergänzung der in Abschnitt 1.2 vorgestellten Vision für die Weiterentwicklung der Auslösestrategien von vorausschauenden Notbremsystemen ein optimales vorausschauendes Fußgängerschutzsystem, so sollte dieses alle Fahrsituationen des Alltages, in denen es zu Fußgängerunfällen kommen könnte, fortwährend auf optimales Verhalten des Fahrers prüfen und notfalls durch Systemeingriffe korrigieren. Optimales Verhalten bedeutet in diesem Zusammenhang, etwas philosophisch betrachtet, nicht nur die Gesamtheit der Fehler, die heute zu Unfällen führen, sondern zusätzlich auch heute unbekannte Unfallszenarien im Voraus zu erkennen und zu vermeiden. Insbesondere der letzte Punkt erfordert eine genaue Beobachtung, aber auch Modellierung, beispielsweise der physikalischen Bewegungsmöglichkeiten oder des Verhaltens potentieller Unfallgegner. Da sich die korrespondierenden Bewegungs- und Verhaltensmodelle der einzelnen in dieser Arbeit betrachteten Verkehrsteilnehmer Fußgänger, Fahrradfahrer oder Personenkraftwagen unterscheiden, aber zunehmend Bestandteil der Kritikalitätsanalyse und Eingriffsent-

### 1.3 MOTIVATION, ABGRENZUNG UND ZIEL DER ARBEIT

---

scheidung vorausschauender Notbremssysteme sein werden und die Systeme in absehbarer Zukunft um verschiedene zu schützende Verkehrsteilnehmer erweitert werden, wird eine robuste Zuordnung zu Objektklassen erforderlich sein.

Die Information über die Zugehörigkeit zu einer Objektklasse eines kollisionskritischen Objektes ermöglicht ferner die Gestaltung einer individuell an die jeweilige Gefahrensituation angepassten Vermeidungsstrategie. Warnungen und Fahreingriffe können dadurch mit Hinblick auf das Unfallvermeidungspotential, die Reduktion der Fehleingriffe und die damit verbundene Steigerung der Akzeptanz des Systems beim Fahrer oder auf die Verhaltensweisen und die Bewegungsmöglichkeiten jeweiliger Objekte ausgestaltet werden.

Neben der Steigerung des Unfallverhütungspotenzials und der Fahrerakzeptanz von vorausschauenden Notbremsfunktionen bietet eine robuste Klassifikation von Verkehrsteilnehmern ebenfalls signifikante Vorteile für das hochautomatisierte Fahren bei Präsenz von Fußgängern. Rechtlich gesehen ist durch die Betriebsgefahr, welche von einem Kraftfahrzeug ausgeht, bei Zusammentreffen mit schwächeren Verkehrsteilnehmern in der Regel stets die Haftung oder zumindest die Mithaftung des Fahrzeugführers gegeben. So ist beispielsweise der Fahrzeugführer bei unvermitteltem Betreten der Straße durch einen Fußgänger trotz eigenen Vorrechts zur Rücksicht verpflichtet und muss bei einem erkennbaren Fehlverhalten des Fußgängers sogar Abwehrmaßnahmen ergreifen [22]. Aus diesem Grund kann davon ausgegangen werden, dass automatisiert fahrende Fahrzeuge ebenfalls besonders rücksichtsvoll mit Fußgängern umgehen müssen. Zudem wird der Klassifikation von Fußgängern beim automatisierten Fahren durch Kreisverkehre oder bei Abbiegevorgängen heute bereits eine große Bedeutung zugemessen [23].

Motiviert durch den soeben vorgebrachten Bedarf nach der Kenntnis des Typs detektierter Objekte und der in Abschnitt 1.1 aufgezählten Vorteile automobiler Radarsensorik werden in dieser Arbeit die Entwicklung und die Bewertung eines radarbasierten Klassifikationsverfahrens vorgestellt, welches die Unterscheidung bzw. Klassifikation von Fußgängern, Fahrradfahrern und Personenkraftwagen ermöglicht.

Zunächst sollen jedoch die Anforderungen an ein solches Verfahren und die Rahmenbedingungen für dessen Einsatz näher erläutert werden. In der Literatur der vergangenen Jahrzehnte wurden fortwährend Verfahren zur radarbasierten Klassifikation von Fußgängern vorgestellt. Das für vorausschauende Notbremssysteme relevanteste, der in Abschnitt 5.1 nochmals detaillierter diskutierten Verfahren, ist das Verfahren zur Fußgängerklassifikation von Heuel [24] unter Verwendung eines 24 GHz Automobilradars. Jedoch werden dabei mit der Betrachtung der Klassen *lateral bewegtes Fahrzeug*, *longitudinal bewegtes Fahrzeug*, *Fußgänger* und *stationäre Umgebung* einerseits nur zwei dynamische Objektklassen



unterschieden und andererseits die Klassenzugehörigkeit mit dem Bewegungszustand gekoppelt betrachtet. In Abgrenzung und als Erweiterung zu Heuel wird in der hier vorliegenden Arbeit die Entwicklung eines generelleren Klassifikationsansatzes verfolgt, welcher die Klassifikation der Objekttypen ermöglicht, ohne dass eine gekoppelte Betrachtung mit deren Bewegungszuständen erforderlich ist.

Zudem wird im Gegensatz zu [24] auf die Verwendung der mittleren Fortbewegungsgeschwindigkeit als Klassifizierungsmerkmal verzichtet, um eine eindeutige Klassifikation auch in Situationen mit langsam bewegten Fahrzeugen zu ermöglichen. Auf eine Verwendung der objektspezifischen Anzahl von Radardetektionen als Merkmal wird ebenfalls verzichtet, da diese sehr stark vom Betrachtungswinkel, unter dem das jeweilige Objekt vom Radarsensor beleuchtet wird, abhängen können und dadurch die Robustheit der Klassifikation gefährden könnten. Weiterhin nutzt Heuel für die Schätzung der Objektausdehnungen in radialer Entfernung und in Relativgeschwindigkeit ein Verfahren, welches auf der Auswertung der Breite der Maxima im jeweiligen Spektrum der Radarsignale basiert [24]. Da diese Schätzung durch Einflüsse der verwendeten Fensterfunktion oder dem erreichten Signal zu Rauschverhältnis mit Fehlern behaftet sein kann, soll in der vorliegenden Arbeit ein alternativer Ansatz dazu verfolgt werden.

Ziel des in dieser Arbeit entwickelten Verfahrens ist die Unterscheidung der Objektklassen anhand objektspezifischer Charakteristiken in den einzelnen Messgrößen. Dies erfordert eine Steigerung der Auflösungen bis auf mindestens die Hälfte der geringsten Objektausdehnungen in den Messgrößen radialer Entfernung, Relativgeschwindigkeit und Azimut. Diese Objektausdehnungen und ggf. weitere objektspezifische Charakteristiken in typischen Fußgängerunfallszenarien zu bestimmen, erfordert eine detaillierte Analyse des menschlichen Ganges und der dadurch eingebrachten Effekte in die Empfangssignale eines Radarsensors. Für diese Analysen soll eine Simulationsumgebung entwickelt und durchgeführte Simulationen mittels Messungen validiert werden.

Eine weitere Anforderung an das Klassifikationsverfahren stellt die zur Verfügung stehende Zeit von Erstdetektion bis zum Erhalt des Klassifikationsergebnisses dar. Wie bereits in Abschnitt 1.2 an einem Beispiel dargestellt, hängt das Potenzial zur Minderung und Vermeidung von Unfällen sehr stark von der Wahl des Eingriffszeitpunktes ab. Im erschwerten Falle eines aus einer Sichtverdeckung heraus auf die Straße tretenden Fußgängers hängt das Vermeidungspotential des Systems dagegen weniger von einem bestmöglich bestimmten Eingriffszeitpunkt, sondern direkt von der Totzeit des Gesamtsystems für Detektion, Klassifikation und Maßnahmenenergreifung ab. Um auch unter diesen erschwerten Bedingungen einen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit für ungeschützte Verkehrsteilnehmer gewährleisten zu können, sollten die Totzeit des Gesamtsystems und damit auch die Klassifikationszeit minimal gehalten werden. Deshalb wird bei dem im Rahmen dieser Arbeit zu entwickelnden

Klassifikationsverfahren auf eine zeitliche Filterung oder die Bestimmung von Merkmalen basierend auf aufeinanderfolgenden Messzyklen bewusst verzichtet werden. Sowohl die Extraktion von Klassifikationsmerkmalen, als auch das Klassifikationsverfahren selbst, wird mit Daten einzelner Messzyklen auskommen müssen um die zeitkritischen Anforderungen erfüllen zu können.

Des Weiteren stehen die mittels radarbasierten Messverfahren maximal erzielbaren Auflösungen in den Messdimensionen radialer Relativgeschwindigkeit, radialer Entfernung (z. B. bei einer begrenzten maximalen Rampensteilheit einer linearen FMCW Modulation) und des Winkels (z. B. bei Einsatz von Time Division Multiplex-Multiple Input Multiple Output (TDM-MIMO) Verfahren) in Abhängigkeit zu der in einem Messzyklus zur Verfügung stehenden Messzykluszeit. Aus diesem Grund sollen in der vorliegenden Arbeit zusätzlich alternative Signalverarbeitungsverfahren untersucht und deren Auflösungen mit der durch konventionelle Signalverarbeitung erreichbaren Auflösung verglichen werden.

## 1.4 Struktur der Arbeit

Beginnend mit dem Funktionsprinzip von Radarsystemen in Automobilanwendungen werden in Kapitel 2 die nötigen Grundlagen der Funktionsweise von Radarsensoren, der in dieser Arbeit implementierten Algorithmen zur Radarsignalverarbeitung und der im Rahmen dieser Arbeit spezifizierte und prototypisch umgesetzte hochauflösende Sensordemonstrator vorgestellt. Insbesondere die Signalverarbeitungskette wird anschaulich anhand der schrittweisen Betrachtung der Verarbeitung einer Beispielmessung vorgestellt.

Im darauffolgenden Kapitel 3 werden Anforderungen an hochauflösende Radarsensorik für die Klassifikation von Verkehrsteilnehmern abgeleitet, spezifiziert und evaluiert. Dabei wird ausgehend von durchgeführten Messungen des Radarrückstreuquerschnittes und einer Analyse des menschlichen Ganges ein Multi-Reflexpunkt-Fußgängermodell und eine Simulationsumgebung entwickelt und implementiert, mit deren Hilfe nahezu beliebige Fußgängerunfallszenarien simuliert werden können. Anhand der durch Simulation ermittelten Auflösungsanforderungen werden daraufhin Modulationsparameter abgeleitet und in Folge dessen durch die Auswertung von Messungen validiert. Ebenfalls werden erste objektspezifische Charakteristiken der Objektklassen Fußgänger, Fahrradfahrer und Personenkraftwagen aus den Auswertungen der Messdaten abgeleitet.

Aufbauend auf dem in Kapitel 3 entwickelten Simulationsmodell werden in Kapitel 4 Möglichkeiten zur Steigerung der Auflösung im Vergleich zur üblicherweise in der Radarsignalverarbeitung angewendeten Spektralauswertung, basierend auf Fast Fourier Transformation (FFT) untersucht. Die erreichte Steigerung der Auflösung wird dabei durch Auswertung von Simulationen und Anwendung auf Messungen untersucht und evaluiert.



## 1 EINLEITUNG

---

Im Anschluss widmet sich Kapitel 5 dem Kernthema der vorliegenden Arbeit. Beginnend mit einer Gegenüberstellung geeigneter Klassifikationsverfahren wird ein vielversprechendes Verfahren für die Implementierung ausgewählt. Das daraufhin untersuchte Klassifikationsverfahren basiert auf Extraktion objekt-spezifischer Merkmale aus Detektionswolken, welche durch Auswertung einzelner wenige Millisekunden andauernder Messzyklen gebildet werden und aus einer Vielzahl von detektierten und von einem Objekt stammenden Streuzentren bestehen können. Nach Identifikation und quantitativer Bewertung dieser Merkmale werden zwei auf Support Vector Machine basierende Implementierungen hinsichtlich der Klassifikations- und Fehlklassifikationsrate evaluiert und optimiert. Zusätzlich wird ein Verfahren vorgestellt, welches aus den Messdaten der als Fußgänger klassifizierten Objekte die Schrittfrequenz als weiteres Merkmal extrahieren kann, um die Erkennung von gehenden Fußgängern zu optimieren.

Zum Abschluss werden in Kapitel 6 die erarbeiteten Kernaussagen der Arbeit zusammengefasst und die Arbeit mit einem Ausblick auf mögliche weiterführende Aktivitäten im Themengebiet der vorausschauenden Fußgängerschutzfunktionen basierend auf hochauflösendem Automobilradar abgerundet.