

Im Fokus der vorliegenden Arbeit steht die Untersuchung und Beschreibung der physikalischen Schicht, um kombinierte Kommunikations- und Sensorikanwendungen im Millimeterfrequenzbereich zukünftig designen zu können. Dieses hochaktuelle Thema wird insbesondere anhand intelligenter Verkehrssysteme im Rahmen der Entwicklung der sechsten Generation des Mobilfunks motiviert und in einen evolutionären Kontext gestellt. Anschließend werden die Arbeitsschritte aufgelistet und die Struktur der vorliegenden Arbeit verdeutlicht.

1.1 Motivation

Intelligente Verkehrssysteme stehen seit jeher im Fokus unterschiedlichster Forschungsanstrengungen. Insbesondere erhöhte Sicherheit und Vermeidung von Unfällen werden gefordert und in den letzten Jahrzehnten stark gefördert. Dies brachte verschiedenste Sensorik-Anwendungen für Fahrerassistenzsysteme, unter anderem Lenk- und Spurführungsassistent, Spurwechselwarnung & Spurwechselsassistent, Abstandsregeltempomat (Adaptive Cruise Control, seit 1998 verbaut durch Mercedes Benz [1]) oder Notbremsassistent hervor. Die meisten Entwicklungen geschahen dabei in den späten 1990er und in den frühen 2000er Jahren, angeregt durch das europäische Projekt PROMETHEUS (PROgramMe for a European Traffic with Highest Efficiency and Unprecedented Safety), bei dem die Entwicklung der Systemfunktionalität sowie der Sensorik stark vorangetrieben wurde [2, 3]. Durch diese Innovationen konnten die Anzahl der Unfälle von 135 Todesopfern je 100.000 Fahrzeuge im Jahr 2000 auf etwa 64 Todesfälle je 100.000 Fahrzeuge im Jahr 2016 und damit um mehr als 50 % gesenkt werden (Stand 2018) [4]. Dennoch bedeutet dies 1.35 Millionen tödliche Unfälle und damit die 8 häufigste Todesursache für Menschen jeden Alters und häufigste Todesursache für Kinder und junge Erwachsene im Alter von 5 – 29 Jahren. Zwar sank die Zahl der tödlichen Unfälle durch die Corona-Einschränkungen (2020 um 8.6 % in den 34 IRTAD-Ländern) deutlich, doch kann mit dem Wegfall der Fahr- und Reisebeschränkungen eine Rückkehr auf das hohe Niveau erwartet werden [5]. Trotz des bemerkenswerten Rückgangs liegt die Zahl der Verkehrstoten im Jahr 2020 immer noch weit unter dem Wert, der erforderlich ist, um die Verringerung der Zahl der Verkehrstoten um 50 % bis zum Jahr 2030 zu erreichen. Dieser Wert wurde in der Resolution (A/RES/74/299; 2020) der Generalversammlung der Vereinten Nationen für die Straßenverkehrssicherheit als Zielmarke festgelegt.

Zum Erreichen des 50 % Ziels werden zusätzliche Sensoren am Fahrzeug angebracht, welche auf verschiedensten Technologien wie Radio Detection and Ranging (Radar), Light Detection and Ranging (Lidar), Kamera oder Ultraschall basieren. Zusätzlich wird seit 2010 mit der Vorstellung des IEEE 802.11p Kommunikationsstandards auch auf Kommunikation zwischen Fahrzeugen bzw.

die Kommunikation von Fahrzeugen mit verschiedensten Kommunikationspartnern, wie Sende- oder Empfangseinheiten am Straßenrand (engl.: *roadside units*), Fußgängern oder Fahrradfahrern, gesetzt [6]. Die Kommunikation bietet den Vorteil, Statusmeldungen und/oder Sensordaten unterschiedlicher Fahrzeuge auszutauschen, um so Informationen über das Umfeld weit über die Sichtweite der eigenen Sensorik hinaus zu erhalten. In der Folge muss nicht mehr ausschließlich reaktiv auf den zeitlich vergangenen Ist-Zustand, gemessen durch die Sensorik, gehandelt werden, sondern es können mittels Kommunikation Informationen über Handlungen, bspw. geplante Beschleunigung/Bremsvorgänge, bereits zuvor ausgetauscht und gegebenenfalls gewarnt werden. Dies erlaubt, Trajektorien im Voraus zu planen. Während Radar in bis zu einigen 100 m Entfernung Objekte detektieren, sowie deren Abstand messen und Geschwindigkeit bestimmen kann, decken heutige Kommunikationsstandards bis zu 5 km ab [7]. Gefährliche Wetterbedingungen/-wechsel sowie Gefahrenstellen (Unfälle in Kurven) können frühzeitig erkannt und zur Vermeidung von Unfällen an heranfahrende Fahrzeuge übermittelt werden.

Kommunikation bietet über diesen wichtigen Aspekt der Sicherheit hinaus weitere potentielle Anwendungen. So werden ebenfalls Applikationen im Bereich Infotainment – beispielsweise die Bereitstellung hoch aufgelöster Filme während der Fahrt – diskutiert, jedoch liegt das Hauptaugenmerk auf Sicherheitsanwendungen [8–11]. Daneben gibt es Anwendungen im Rahmen der Effizienzsteigerung: Insbesondere Platooning, eine Kolonne von Fahrzeugen, gilt als vielversprechende Lösung, um möglichst effizient und gleichzeitig sicher zu fahren. Über Fahrzeugkommunikation können so beispielsweise Lastkraftwagen (Lkw) automatisiert gesteuert und Gefahren untereinander ausgetauscht werden. Gleichzeitig werden die Abstände zwischen den Fahrzeugen verringert und Windschatteneffekte ausgenutzt [12]. So kann erheblich Kraftstoff eingespart werden (nach Bonnet and Fritz [13] über 20 % für folgende Lkw und sogar etwa 5 % für den Platoon-Leader). Als zweite Anwendung steht neben dem angesprochenen Platooning im urbanen Raum und der damit verbundene Informationsaustausch zwischen Fahrzeugen im Vordergrund dieser Arbeit. Die Herausforderung besteht hierbei, die Fahrzeuge vor und beim Passieren der Kreuzung zu koordinieren und ihre Trajektorien zwischen den Fahrzeugen auszutauschen und zu planen [14]. Ziel ist wiederum, die Sicherheit zu erhöhen, indem (schwere) Unfälle vermieden werden, die sich besonders an kritischen Knotenpunkten wie vielbefahrenen Kreuzungen ereignen.

Hierbei ist das Zusammenspiel zwischen Kommunikation und Sensorik essentiell. Die vorliegende Arbeit konzentriert sich seitens der Sensorik auf Radar, während Lidar, Kamerasysteme und Ultraschall als Technologien nur Erwähnung finden. Prinzipiell wurden in der Vergangenheit Kommunikation und Sensorik getrennt voneinander entwickelt und optimiert. Der Fokus auf Radar begründet sich im adressierten Millimeterwellen (mmWellen)-Frequenzbereich, der zurzeit Radaranwendungen zugewiesen ist und für Kommunikation erschlossen werden soll. Radar bietet Vorteile aufgrund der hohen Robustheit gegenüber widrigen Wetterverhältnissen, was die Radartechnologie beispielsweise gegenüber optischen Systemen herausstellt. Jüngste Entwicklung zeigen zudem eindeutig in Richtung kombinierter Ansätze, im Nachfolgenden als 'Joint Communications & Radar Sensing' (JCRS)-Systeme bezeichnet. Auf die evolutionäre Entwicklung der Kommunikationsstandards und im Speziellen dieser kombinierten Systeme wird im folgenden Kapitel detailliert eingegangen. Überzeugend sind die Vielzahl an Vorteilen der JCRS-Systeme bezüglich Kosteneinsparungen und geringere Größe der Ausrüstung, gesteigerte Systemleistung und effizienterer Nutzung des Spektrums [15]. Besonders der letzte Aspekt wird im Zuge der Entwicklung der sechsten Generation (6G) der Mobilfunktechnologie stark diskutiert.

Um die an 6G geforderten Ansprüchen (beispielsweise an geforderten Datenraten, Latenzzeiten, Mobilität, Anzahl an Teilnehmern pro km²) erfüllen zu können, soll dem mmWellen-Frequenzbereich (3 GHz–300 GHz) und der Terrahertz-Bereich (300 GHz–1 THz) im Vergleich zur fünften Mobilfunkgeneration eine noch größere Rolle zukommen und deshalb weiter erschlossen werden [16, 17]. Begründet durch Überlegungen zu den kombinierten Systemen, sollen insbesondere Frequenzbereiche, die bis dato Radaranwendungen zugeordnet sind, für Kommunikation geöffnet werden [18, 19]. Vor allem soll das Spektrum deutlich effizienter genutzt werden, da erwartet wird, dass sich die Zahl der weltweit verbundenen Geräte bis 2025 auf 25 Milliarden erhöhen wird [20]. In Anbetracht dieser Entwicklung wird verstärkt nach Möglichkeiten zur Wiederverwendung von Frequenzen gesucht, beispielsweise der reservierten Radar Frequenzbänder. Diese gehören zu den besten Kandidaten für die gemeinsame Nutzung mit Kommunikationsanwendungen im Rahmen von zukünftigen 6G Systemen.

Die Definition der Anforderungen und die Standardisierung solcher 6G Systeme ist jedoch noch nicht abgeschlossen. Die Forschung daran startete Anfang der 2020 Jahre in unterschiedlichsten Konsortien seitens der Industrie sowie seitens der Akademia im Zuge einer Vielzahl von 6G-Projekten auf deutscher und europäischer Ebene. Einen Überblick hierzu findet sich im anschließenden Kapitel. Insbesondere die physikalische Schicht wird als eine Schlüsselkomponente gesehen: So gilt es einerseits den Funkkanal im angestrebten mmWellen und subTHz-Frequenzbereich hinreichend zu beschreiben, andererseits verschiedene Wellenformen sowie die Systemarchitektur im Allgemeinen bezüglich Basisband und den Hochfrequenzschaltungen zu diskutieren [16, 21, 22]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden diese offenen Punkte adressiert und dabei die verschiedenen Komponenten der physikalischen Schicht untersucht. Dies umfasst neben Kanaluntersuchungen im mmWellen-Bereich, die Evaluation unterschiedlicher Antennensysteme sowie die Untersuchung der JCRS-Anwendungen. Die erhaltenen Ergebnisse können im nächsten Schritt in Untersuchungen der höheren Schichten integriert werden, so dass zukünftige 6G Systeme voll umfänglich entworfen werden können.

1.2 Entwicklung der Fahrzeugkommunikation zu 6G JCRS-Systemen

Die evolutionäre Entwicklung der Fahrzeugkommunikationsstandards sowie der JCRS-Systeme ist in Abb. 1.1 dargestellt. Bereits 1999 erfuhr die Fahrzeugkommunikation einen großen Schub, als die amerikanische Mobilfunkregulierungsbehörde (Federal Communications Commission, FCC) einen Frequenzbereich von 75 MHz von 5,850–5,925 GHz für intelligente Transportsysteme zuwies. Dies führte zu einer intensiven Erarbeitung möglicher Umsetzungen und der damit verbundenen Erforschung des physikalischen Kanals sowie der höheren Schichten. Die Ergebnisse mündeten schließlich 2010 in der Vorstellung des IEEE Standards 802.11p, der die physikalische Schicht sowie den Media Access Control Layer definiert. Aufbauend auf diesem Standard wurden weltweit weitere Normen entwickelt, wie beispielsweise Dedicated Short-Range-Communication (DSRC) in der USA oder ETSI (Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen) ITS-G5 in Europa. Später wurde IEEE 802.11p in IEEE 802.11-2012 aufgenommen und schließlich durch IEEE 802.11-2016 ersetzt. Die Weiterentwicklung der Standards ist somit als ein fortschreitender Prozess zu sehen: So erschienen durch die ETSI weitere Standards bspw. 2020 der ETSI EN 302 663 oder 2022 der ETSI TS 102 871-1. Seit Anfang 2019 wird zudem mit IEEE 802.11bd ein Nachfolgestandard entwickelt. Auf Grund kontroverser Einflussnahmen durch Politik und

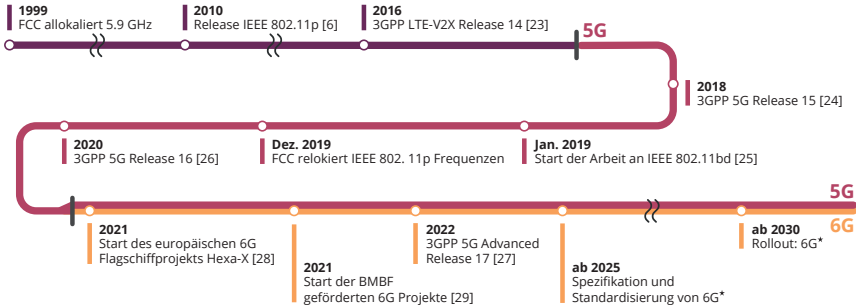


Abbildung 1.1: Evolutionäre Entwicklung der Fahrzeugkommunikationsstandards sowie der JCRS-Systeme, in Anlehnung an [30]. '*' gibt Prognosen an, welche beispielsweise durch das europäische Hexa-X Projekt vorausgesagt werden [28].

Fahrzeughersteller sowie den jahrelangen Freistand der zugewiesenen Frequenzen kündigte die FCC im gleichen Jahr an, die 1999 allokierten Frequenzen neu zu verteilen. So wurde aus dem 75 MHz Band, 45 MHz dem unlicenzierten Betrieb in Gebäuden zugunsten des IEEE 802.11ax Standards und gleichzeitig die oberen 30 MHz der Fahrzeugkommunikation, jedoch auf zellulärer Basis, zugewiesen. Da die FCC als Leitbild für andere Länder/Kontinente gilt, wie auch bei der Frequenzzuweisung 1999, wurden zelluläre Systeme massiv gestärkt und gleichzeitig IEEE 802.11p entsprechend geschwächt.

Stattdessen setzt sich der zelluläre Ansatz Long-Term Evolution-Vehicle-to-everything (LTE-V2X oder C-V2X) durch, der parallel zu IEEE 802.11p entwickelt wurde und auch im selben Frequenzbereich betrieben wird. Vorgestellt wurde dieser Ansatz durch das Third Generation Partnership Project (3GPP) 2017 im Release 14 und beinhaltet ebenfalls eine Möglichkeit zur Kommunikation über eine Kurzstrecke auch außerhalb der Mobilfunkabdeckung. Hinzukam die Definition der LTE-V2X-Zugangsschicht (engl.: *access layer*) im Jahr 2020 im ETSI EN 303 613 Standard. Gleichzeitig wurde die Fahrzeugkommunikation durch die 3GPP im Release 15 (2018) im 5G New Radio (5G NR) aufgenommen und im Release 16 (2020) erweitert [24, 26, 31, 32]. So wurde u.a. in Release 16 ein Seitenkanal (engl.: *sidelink*, SL) erstmals auf Basis von NR spezifiziert und in Release 17 [27] weiter verbessert. Darüber hinaus werden Themen, wie die relative Positionierung mittels dieses SL durch den Austausch von Informationen über den Abstand zwischen Fahrzeugen, längst von der Industrie gefordert. Eben diese Kombination adressieren zukünftige JCRS-Systeme, was die Bedeutung der vorliegenden Arbeit herausstellt. Erwartet wird, dass diese kombinierten Systeme bereits in Release 18 mitaufgenommen werden. Diesen Zeitplan gibt auch die 5G Automotive Association (5GAA) in ihrem Whitepaper [33] vor. Laut 5GAA wird mit dem 3GPP Release 16 und den folgenden Releases durch die gemeinsame Nutzung von Sensoren sowie der kooperativen Wahrnehmung bei gleichzeitig steigenden Ansprüchen an Leistungskennzahlen wie Latenz und Zuverlässigkeit kombinierte Systeme immer fortgeschrittener gestaltet. Nach einer erwarteten weltweiten Einführung von V2X zur Steigerung der Verkehrseffizienz und der grundlegenden Sicherheit, erwartet die 5GAA ab 2024 fortgeschrittene Sicherheitsanwendungen sowie den vermehrten Einsatz von Technologien immer weiter hin zu automatisierten Fahren auf Basis von C-V2X. Zusätzliche Funktionen für das vernetzte automatisierte Fahren sind voraussichtlich ab 2026 zu erwarten.

Diese Bestrebungen werden im Zuge der Entwicklung der sechsten Generation weitergeführt und durch die Zusammenführung von Kommunikation- und Radar-Sensorik in ein gemeinsames System ausgebaut. Gerade JCRS wird hierbei eine besonders hohe Aufmerksamkeit zuteil [34–36], da zukünftige Applikationen Sensorik als Dienst verlangen [37]. Cui et al. (2021) benennen die Vorteile von JCRS, allgemeiner auch als Integrated Sensing and Communication (ISAC) oder Joint Communication & Sensing (JC&S) Systeme bekannt, wie folgt:

1. Vorteile der Integration:

- Erhöhung der spektralen Effizienz
- Erhöhung der Energieeffizienz
- Erhöhung der Hardwareeffizienz

2. Vorteile der Koordination von Kommunikation und Sensorik

- Unterstützung der Sensorik durch Kommunikation
- Unterstützung der Kommunikation durch Sensorik

Neben der spektralen und Hardwareseitigen Effizienzsteigerung ist insbesondere auch die Steigerung der Energieeffizienz herauszustellen. Dies ist in der heutigen Zeit in Hinblick auf Nachhaltigkeit ein starkes Argument für JCRS-Anwendungen. Darüber hinaus können sowohl die Kommunikation als auch die Radarsensorik stark von einander profitieren; sie ähneln sich in den erschlossenen mmWellen/THz-Frequenzbereichen seitens der Systemarchitektur, verwendeten Hardware und Signalverarbeitung sowieso immer stärker. Die Koordination ist für beide Technologien von Vorteil: Kommunikationsstandards wie WLAN können als Basis für weitere Sensorik dienen oder bestehende Sensorik verbessern. Andererseits kann auf zellulärer Infrastruktur, wie Basisstationen, passive oder aktive Sensorik integriert werden und die gewonnenen Informationen über die Umgebung an einzelne Verkehrsteilnehmer je nach Bedarf übertragen werden. Gleichzeitig bieten die gewonnenen Sensordaten die Möglichkeit, beispielsweise die Nachführung der Fokussierung der Antenne auf die Kommunikationspartner hinsichtlich Genauigkeit bzw. Schnelligkeit zu optimieren. Zudem eröffnet die Sensorik das Potential einer Netzwerkanalyse, die durch eine frühzeitige Erkennung von potentiellen Störern diesen entgegenwirken kann und so einen erheblichen Schritt zu robusten, drahtlosen Netzen bedeuten kann. Zusätzlich kann eine effiziente Ressourcenverteilung in Netzwerken durch entsprechenden Erfassung des Funkspektrums (engl.: *spectrum sensing*) gewährleistet werden.

Ökonomisch lohnt sich ein Blick auf die geschätzten Marktentwicklungen: Die Größe des globalen Automobil-Radar-Marktes lag im Jahr 2021 bei 5 Mrd. USD, wobei mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate (engl.: *compound annual growth rate*, CAGR) von 22 % im Prognosezeitraum 2022 bis 2030 ein Anstieg auf 25 Mrd. USD erwartet wird [38]. Der weltweite Markt für Kraftfahrzeug-Telematik wurde hingegen im Jahr 2020 auf 64,2 Mrd. USD geschätzt und wird bis 2030 voraussichtlich 441,5 Mrd. USD erreichen, was einer CAGR von 21,3 % zwischen 2021 und 2030 [39] entspricht. Die Zusammenführung dieser beiden wichtigen Märkte stellt ein weiteres großes Potential für die nächste Generation des Mobilfunks dar. Wird Sensorik als Dienstleistung angeboten und in bestehende Kommunikationssysteme integriert, kann mit einem noch höheren Marktpotential gerechnet werden. Die Ziele und Vorteile der JCRS-Systeme sind damit klar motiviert, jedoch bedarf es bis zur finalen Umsetzung die Lösung einer Vielzahl an Herausforderungen.

1.3 Herausforderungen und offene Fragestellungen

Die Herausforderungen und offenen Fragestellungen sind vielschichtig und die Entwicklung von JCRS-Systemen und der sechsten Mobilfunkgeneration steht noch am Anfang. Jedoch gilt JCRS bereits jetzt als eine der Schlüsseltechnologien für 6G. Die Informationstechnische Gesellschaft im Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE ITG) veröffentlichte 2021 eigens ein Positionspapier zu dem Thema „Joint Communications & Sensing“, welches das Konzept der kombinierten Systeme und deren enormes Zukunftspotential herausstellt und dabei deutlich weit über das Anwendungsfeld des autonomen Fahrens oder der V2V-basierten Systeme hinaus denkt [40]. So wird JCRS mittlerweile in einer Vielzahl von Projekten in der Akademie sowie in der Industrie erforscht: unter anderem in China [41, 42], Japan [43, 44], Korea [45], Indien [46]. Gleichzeitig gibt es starke Anstrengungen im nordamerikanischen Raum [47]. Auch in Europa forscht eine Vielzahl an nationalen als auch europäischen Programmen an der nächsten Mobilfunkgeneration: In Finnland und Spanien findet sich jeweils ein nationales Programm [48] und [49], sowie das europäische Flaggschiffprojekt Hexa-X [28] und dessen am 1.1.2023 gestarteten Nachfolgeprogramms Hexa-X-II [50] (beide unter finnischer Leitung). Zudem arbeiten Organisationen, wie die 5G Infrastructure Association (5G IA) sowie die mittlerweile gegründete 6G Smart Networks and Services Industry Association (6G IA) an Forschung und Entwicklung von 5G und 6G Systemen, aus der im Juni 2021 ein White Paper der europäischen Sichtweise auf 6G [51] veröffentlicht wurde. Hervorzuheben sind zudem die deutschen 6G Forschungsprojekte (u.a. vier 6G Forschungshubs und die Koordinationsplattform 6G Plattform), welche in den Jahren 2021 und 2022 gestartet und durch eine erhebliche Anzahl von Projekten unter Industrieleitung ergänzt sind. Beispielhaft sind hier 6G-ANNA ([52]) als Leuchtturmprojekt unter der Leitung von Nokia Solutions and Networks GmbH & Co. KG, sowie die Teilprojekte 6G-Campus ([53]), 6G-CampuSens ([54]) und 6G-ICAS4Mobility ([55]) unter Leitung von NXP Semiconductors Germany GmbH, Infineon Technologies AG, Robert Bosch GmbH zu nennen. Besonders in den letztgenannten Projekten wird ein erheblicher Fokus auf JCRS-Systeme gelegt. Es ist hier anzumerken, dass der gegebene Überblick der Projekte keinen Anspruch auf Vollständigkeit hat, da aktuell viele neue Projekte starten und neu aufgelegt werden.

Übergreifend werden folgende Innovationen von 6G Systemen erwartet, verwiesen sei auf Tabelle 1 in der Zusammenstellung von Uusitalo et al. in [28]: Nachhaltigkeit, zusammengefasst unter der Begrifflichkeit „Entwicklung von grüner Technologie“ (Verringerung des Energiebedarfs sowie des Ressourcenbedarfs allgemein); Vertrauenswürdigkeit, welche ebenso weit gefächert ist und von Resilienz bis Datenschutz und Datensicherheit reicht; Verteilung des Spektrums (Koexistenzmanagement, flexible Frequenzregulierung der lokal verfügbaren Frequenzen); Souveränität der Daten und damit der Schutz der Privatsphäre; Vernetzung (Globale Abdeckung zum Abbau der digitalen Kluft armer und reicher Länder). Gleichzeitig wird Künstlicher Intelligenz ein hoher Stellenwert zugeordnet, gilt sie doch als Lösungsansatz für verschiedenste Fragestellungen sowohl in der Signalverarbeitung als auch zunehmend im Bereich der Hardwareentwicklung. Eine graphische Darstellung liefert Abb. 1.2, in der exemplarisch die Schlagworte im Kontext der sechsten Mobilfunkgeneration für die drei White Paper [42, 47, 51] aus den unterschiedlichen Regionen (China, USA, Europa) visualisiert sind. Diese stehen im Einklang mit den oben genannten Innovationen.

Aus dem genannten Anforderungsprofil ergeben sich die vielschichtigen Herausforderungen in unterschiedlichsten Themenbereichen im analogen sowie digitalen Systementwurf und der Algorithmik, um beispielhaft drei Themenfelder herauszugreifen. Zusätzlich zu den Fragestel-



Abbildung 1.2: Wortwolke der drei White Paper aus China [42], der USA [47] und Europa [51].

lungen der physikalischen Schicht ergibt sich ein erheblicher Forschungsbedarf in den höheren Schichten, wie beispielsweise rund um den Themenblock der Netzwerktechnik, wie den Entwurf von Netzwerken von Netzwerken, also sub-Netzwerken oder Campusnetze, um auch hier nur ein paar Stellvertreter zu nennen. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt jedoch ausschließlich auf der untersten, der physikalischen Schicht und umfasst neben der Kommunikationstechnik ebenso die Radartechnik. Gleichzeitig wird der mmWellen-Funkkanal adressiert, die Antennentechnologie thematisiert und darauf basierend die Qualität des Radars als auch der Kommunikation unter Diskussion der geteilten Wellenform des zukünftigen JCRS-Systems evaluiert. Der Systementwurf fokussiert sich dabei auf kombinierte Kommunikations- und Radarsysteme für den Automobilbereich.

Entsprechend ergeben sich unter anderem folgende Probleme: Die gemeinsame Nutzung des Spektrums sowie der gemeinsame Entwurf einer gemeinsamen Wellenform führt zu Interferenzen, die von beiden Systemen verursacht werden, die die Performanz beider Technologien erheblich beeinträchtigen können [56]. Somit ist ein Interferenzmanagement und eine Leistungszuweisung für JCRS-Systeme unabdingbar. Damit ist zu gewährleisten, dass bspw. Fußgänger und Fahrradfahrer selbst in kritischen Szenarien im dichten städtischen Umfeld hochpräzise detektiert und somit potentiell gefährliche Unfälle vermieden werden können. Daneben ist das Design der Hardware bzw. die Integration beider Technologien in eine Hardwareplattform eine der großen Herausforderungen [22]. Die Auswirkungen von Nichtidealitäten (z.B.: Nichtlinearitäten, Phasenrauschen) hat verschiedene Auswirkungen auf die Qualität von Radar und Kommunikation. Die Berücksichtigung derartiger Effekte gilt als eine der elementaren Forschungsgebiete in der aktuellen Literatur [28, 40, 57]. Über all diese verschiedenen Designkriterien hinweg soll dennoch die Prämisse gelten, dass die Leistungsfähigkeit der Kommunikation sowie der Radarsensorik nicht gravierend eingeschränkt werden, was in gewisser Weise einen Kompromiss notwendig macht.

Zudem gilt es, Ressourcenverwaltung, d.h. die gemeinsame Nutzung des Spektrums, Entwurf einer gemeinsamen Wellenform, die Untersuchung der zu verwendenden gemeinsamen Antennenkonfiguration zu untersuchen. Daneben muss das Verständnis des Funkkanals und die

Untersuchung der Hardware-Komponenten bei diesen hohen Frequenzen erweitert bzw. aufgebaut werden. Ein Überblick darüber wird in den Projektzielen des europäisch initiierten Hexa-X Projekts (2020) zusammengefasst [28].

Diese offenen, vielschichtigen Fragestellungen werden im Laufe der Arbeit adressiert, so dass mitunter am Ende der vorliegenden Arbeit ein JCRS-Systementwurf auf Basis von phasenmodulierter Dauerstrichsysteme (engl.: *phase modulated continuous wave*, PMCW) zur Verfügung steht, welche die gesamte physikalische Schicht abbildet. Eine detaillierte Analyse der Problemstellung des Funkkanals, des Antennendesigns sowie der Radar- und Kommunikationsmodellierung findet sich in den einzelnen Kapiteln. Hier erfolgt ebenso eine Analyse des Stands der Technik, sowie abschließend eine Diskussion der erreichten Ziele und des Stellenwertes der vorliegenden Arbeit sowie die resultierenden Erkenntnisse, die aus der vorliegenden Arbeit gewonnen werden können.

1.4 Zielsetzung, Beiträge und Aufbau der Arbeit

Die Vorteile von intelligenten Fahrzeugen, welche mit Fahrzeugkommunikation oder gar mit JCRS-Systemen ausgestattet sind, sind mannigfaltig und vielversprechend. Jedoch sind eine erhebliche Anzahl an Fragen und Herausforderungen noch zu klären, weshalb intensiv an JCRS-Lösungen geforscht wird. Das Forschungsfeld reicht dabei über alle Schichten des International Organization for Standardization / Open System Interconnection (ISO/OSI)-Schichtenmodells, wobei insbesondere die physikalische Schicht bzgl. Funkkanalverhalten, Systemarchitektur oder Ressourcenverwaltung im Fokus steht. Hier knüpft die vorliegende Arbeit an und liefert damit einen deutlichen Wissensgewinn für zukünftige JCRS-Systeme. Es wird eine vollständige Systembetrachtung der physikalischen Schicht erarbeitet, welche unumgänglich für die Entwicklung zukünftiger Applikationen ist.

Die nachfolgenden Kapitel beinhalten jeweils eine Analyse des jeweiligen Stands der Technik inklusive separater Motivation der angestellten Untersuchungen sowie eine entsprechende Beschreibung der Grundlagen und eine abschließende Diskussion der Ergebnisse. Die Kapitel sind strukturell gleich aufgebaut. Dies erlaubt eine individuelle Betrachtung des einzelnen Beitrages zum Stand der Technik. Jedes Kapitel basiert zudem auf international vorgestellten Veröffentlichungen: 9 international begutachtete (*peer review*) Eigenbeiträgen sowie einer Vielzahl von weiteren Veröffentlichungen mit Beteiligung des Autors.

Zunächst wird im Kapitel 2 der physikalische Kanal im E- und W-Frequenzband bei 60 und 77 GHz für typische Verkehrsszenarien untersucht und validiert. Dessen Beschreibung/Modellierung im mmWellen-Frequenzbereich ist in der Literatur nur unzureichend zu finden, obwohl der Funkkanal eine herausgestellte Rolle für die Definition zukünftiger JCRS-Designkriterien einnimmt. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den mmWellen-Funkkanal und dessen Eigenschaften im Automotive Kontext zu verstehen und den Einfluss zusätzlicher Streuer, die hohe Dynamik des Ausbreitungskanals sowie Möglichkeiten, wie die Kommunikation unter einem Fahrzeug hindurch, zu thematisieren. Das Vorgehen sowie die gewonnenen Erkenntnisse sind teils in folgenden international begutachteten Publikationen veröffentlicht:

- **M. Lübke**, J. Fuchs, A. Dubey, H. Hamoud, F. Dressler, R. Weigel und F. Lurz, „Validation and Analysis of the Propagation Channel at 60 GHz for Vehicular Communication“, in IEEE 94th Vehicular Technology Conference, Virtual Conference, September 2021, S. 1–7.

- **M. Lübke**, S. Dimce, M. Schettler, F. Lurz, R. Weigel und F. Dressler, „Comparing mmWave Channel Simulators in Vehicular Environments“, in IEEE 93rd Vehicular Technology Conference, Virtual Conference, April 2021, S. 1–6.
- **M. Lübke**, H. Hamoud, J. Fuchs, A. Dubey, R. Weigel und F. Lurz, „Channel Characterization at 77 GHz for Vehicular Communication“, in IEEE Vehicular Networking Conference, Virtual Conference, December 2020, S. 1–4.

Im Rahmen der Kanalanalyse werden zudem weitere Einflüsse spezifiziert, was unter anderem die Analyse unterschiedlicher Antennenkonfigurationen (Charakteristika, Montagepositionen) und deren Auswirkungen auf die Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation beinhaltet. Dies umfasst neben der Untersuchung in ländlicher Umgebung ebenso die Kommunikation innerhalb eines Platoons (Intra-Platoon Kommunikation) sowie zwischen Platoons (Inter-Platoon Kommunikation) in der Stadt. In diesem Zusammenhang wird beispielsweise auch die Interferenzreduktion aufgegriffen und im Kontext der jeweilig gewählten Antennenkonfiguration diskutiert. Diese Funkkanalevaluationen werden dabei hauptsächlich in Kapitel 3 mit einem speziellen Fokus auf verschiedene Antennenpositionen sowie -charakteristika betrachtet. Ziel ist es, mögliche JCRS-Gesamtlösungen auf ihre Realisierbarkeit bzw. die Grenzen der Systeme hinsichtlich der Qualität der Kommunikation als auch der Sensorik zu untersuchen. Die Beiträge dieses Kapitels zum Stand der Technik sind unter anderem veröffentlicht in:

- **M. Lübke**, J. Fuchs, A. Dubey, M. Frank, N. Franchi und F. Lurz, „Antenna Setup for Future Joint Radar-Communications - Characteristics and Mounting Positions“, *Advances in Radio Science*, Bd. 20, S. 55–65, March 2023.
- **M. Lübke**, J. Fuchs, A. Dubey, M. Frank, R. Weigel und F. Lurz, „Evaluation of Different Antenna Positions for Joint Radar-Communication at 77 GHz“, in Kleinheubach Conference, Miltenberg, Germany, September 2021, S. 1–4.
- **M. Lübke**, J. Fuchs, A. Dubey, H. Hamoud, F. Dressler, R. Weigel und F. Lurz, „Validation and Analysis of the Propagation Channel at 60 GHz for Vehicular Communication“, in IEEE 94th Vehicular Technology Conference, Virtual Conference, September 2021, S. 1–7.
- **M. Lübke**, H. Hamoud, J. Fuchs, A. Dubey, R. Weigel und F. Lurz, „Channel Characterization at 77 GHz for Vehicular Communication“, in IEEE Vehicular Networking Conference, Virtual Conference, December 2020, S. 1–4.

Die Beurteilung der Antennenkonfigurationen erfolgt, nach der Analyse des Kommunikationskanals in Kapitel 4, deswegen im nächsten Schritt hinsichtlich des Einflusses auf die Radarsensorik/-signalverarbeitung. Hierfür werden die Einflüsse der gewählten Antennencharakteristika und -positionen auf die Radarsensorik ausgehend von der traditionellen Wellenform des frequenzmodulierten Dauerstrichradars bestimmt. Die zugrundeliegende Prozessierung des Radars wird eingeführt, anhand von Messungen validiert und anschließend dieselben Szenarien wie für die Analyse des Kommunikationskanals unter anderem hinsichtlich (falsch positiv) detektierten Zielen evaluiert. Kapitel 4 stützt sich dabei unter anderem auf folgende wissenschaftliche Beiträge:

- **M. Lübke**, J. Fuchs, A. Dubey, M. Frank, N. Franchi und F. Lurz, „Antenna Setup for Future Joint Radar-Communications - Characteristics and Mounting Positions“, *Advances in Radio Science*, Bd. 20, S. 55–65, March 2023.

- **M. Lübke**, J. Fuchs, A. Dubey, M. Frank, R. Weigel und F. Lurz, „Evaluation of Different Antenna Positions for Joint Radar-Communication at 77 GHz“, in Kleinheubach Conference, Miltenberg, Germany, September 2021, S. 1–4.
- A. Dubey, A. Santra, J. Fuchs, **M. Lübke**, R. Weigel und F. Lurz, „A Bayesian Framework for Integrated Deep Metric Learning and Tracking of Vulnerable Road Users Using Automotive Radars“, IEEE Access, Bd. 9, S. 68 758–68 777, May 2021.

Die zu wählende, optimale Wellenform steht aktuell in der Forschungsgemeinschaft noch stark zur Diskussion. In Kapitel 5 werden daher unterschiedliche Wellenformen gegenübergestellt und sich final für ein PMCW-basiertes System entschieden. In diesem Zusammenhang wird ein Kommunikationsmodell vorgestellt, welches auf PMCW bzw. einem Direct Sequence Spread Spectrum Verfahren basiert. Dieses Modell wird um die Radarsensorik erweitert, um so ein kombiniertes System auf Basis der gleichen Wellenform und des gleichen Hardwaretransceivers zu entwerfen. Auch hier wird die gesamte physikalische Übertragungsschicht integriert (u.a. inklusive Kanalmodellierung, Modulationen, des hochfrequenten (HF) Hardwaredesigns, Synchronisation, Rake-Receiver-Architektur). Dies beinhaltet im Besonderen das Abbilden von nicht idealen HF-Hardwarekomponenten und deren Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Kommunikation und der Radarsensorik. Somit eignet sich das vorgestellte Modell im speziellen Maße dafür, Kommunikationsdesigns zu evaluieren sowie Kenngrößen für JCIRS-Anwendungen zu bestimmen. Die Inhalte dieses Kapitels sind Teil der folgenden Publikationen:

- **M. Lübke**, Y. Su und N. Franchi, „Evaluating RF Hardware Characteristics for Automotive JCIRS Systems Based on PMCW-CDMA at 77 GHz“, IEEE Access, Bd. 11, S. 28 565–28 584, March 2023.
- **M. Lübke**, Y. Su, A. J. Cherian, J. Fuchs, A. Dubey, R. Weigel und N. Franchi, „Full Physical Layer Simulation Tool to Design Future 77 GHz JCIRS-Applications“, IEEE Access, Bd. 10, S. 47 437–47 460, April 2022.
- **M. Lübke**, J. Fuchs, V. Shatov, A. Dubey, R. Weigel und F. Lurz, „Combining Radar and Communication at 77 GHz Using a CDMA Technique“, in IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility, Virtual Conference, November 2020, S. 1–4.
- **M. Lübke**, J. Fuchs, V. Shatov, A. Dubey, R. Weigel und F. Lurz, „Simulation Environment of a Communication System Using CDMA at 77 GHz“, in International Wireless Communications and Mobile Computing, Virtual Conference, June 2020, S. 1946–1951.

Abschließend erfolgt in Kapitel 6 eine Diskussion und ein Ausblick auf zukünftige Trends und Applikationen sowie eine umfängliche Zusammenfassung der vorgestellten Ergebnisse. Mit dieser Arbeit steht eine detaillierte Analyse des mmWellen-Funkkanals inklusive der typischen Einflüsse auf die Impulsantworten in diesem Frequenzbereich zur Verfügung. Die Auswertung erfolgt insbesondere durch die gleichzeitige Betrachtung der Sensorik und der Kommunikation. Zudem stehen mit der im Zuge der vorliegenden Arbeit entwickelten V2V-Kommunikationsarchitektur sowie der JCIRS-Modellierung Simulationstools zur Verfügung, welche unter anderem die Evaluierung der Einflüsse verschiedener Hardware-Nichtidealitäten auf die Kommunikationsqualität und der Radarsensorik ermöglichen. So werden Auswirkungen von Hardwarebeeinträchtigungen wie S-Parameter, Phasenrauschen der Mischer, Nichtlinearitäten und Rauschen der Verstärker