

Hochintegriertes Kamera-Radar-Modul als Grundbaustein für
autonomes Fahren

Abschlussbericht

Teilvorhaben:	Radarsensorik
Förderkennzeichen:	16ES0571K
Laufzeit des Vorhabens:	01.02.2017 – 31.01.2020
Zuwendungsempfänger:	Technische Universität Berlin – Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik – Institut für Telekommunikationssysteme Ernst-Reuter-Platz 7 10587 Berlin
Autor:	Bernd Schäufele bernd.schaeufele@tu-berlin.de

Contents

1	Kurze Darstellung	7
1.1	Aufgabenstellung.....	7
1.2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurden.....	7
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	9
1.3.1	Arbeitspaket 1: Spezifikation der Sensorplattform und Definition der Schnittstellen.....	9
1.3.2	Arbeitspaket 2: Entwicklung und Test (Sensormodul)	10
1.3.3	AP3: Software Entwicklung und Test (Sensormodul)	11
1.3.4	Arbeitspaket 4: Test und Qualifizierung des Sensormoduls	13
1.3.5	Arbeitspaket 5: Demonstration in urbaner Umgebung.....	13
1.3.6	Arbeitspaket 6: Demonstration in landwirtschaftlichem Testfahrzeug ...	15
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	17
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	20
2	Eingehende Darstellung.....	21
2.1	Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse	21
2.1.1	Use Cases für urbane Erprobung.....	21
2.1.1.1	Use Case 1.....	21
2.1.1.2	Use Case 2	22
2.1.1.3	Use Case 3	23
2.1.1.4	Use Case 4	24
2.1.1.5	Use Case 5	24

2.1.1.6	Use Case 6	24
2.1.2	Fahrzeugaufbau	24
2.1.3	Objekterkennung	27
2.1.3.1	Detektion von Objekten	27
2.1.3.2	Positionsbestimmung der Objekte	29
2.1.4	Versuchsdurchführung	31
2.1.4.1	Methodik	38
2.1.4.1.1	Vorgehensweise.....	38
2.1.4.1.2	Metriken.....	40
2.1.4.2	Ergebnisse	41
2.1.4.2.1	Use case 1 Detektion entgegenkommender Fahrzeuge	41
2.1.4.2.2	Use Case 2a Detektion kreuzender Verkehrsteilnehmer (quer)	42
2.1.4.2.3	Use Case 2b Detektion kreuzender Verkehrsteilnehmer (längs)...	44
2.1.4.2.4	Use Case 3 Detektion einer freien Fahrspur.....	46
2.1.4.2.5	Use case 4 Unterscheidung von Getränkedose und Mensch	48
2.1.4.2.6	Use Case 6 Mehrere Detektionen (Detektion überholender Fahrzeuge)	49
2.1.4.3	Zusammenfassung und Ausblick.....	51
2.2	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	53
2.3	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	54
2.4	Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	55
2.5	Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	56

2.5.1	SAFARI	56
2.5.2	Diginet-PS	56
2.6	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse	57
3	Literaturverzeichnis	58

Abbildung 1: Szenario im Stadtverkehr 1	22
Abbildung 2: Szenario im Stadtverkehr 2	23
Abbildung 3: Szenario Freiraum im Straßenbereich	23
Abbildung 4: Schematische Übersicht des KameRad-Versuchfahrzeugs	25
Abbildung 5: Für die Versuchsfahrten verwendetes Fahrzeug	26
Abbildung 6: Detektion von verschiedenen Klassen: Auto (rot), Fußgänger (grün), Zweirad (blau) und Verkehrszeichen (gelb)	29
Abbildung 7: Die durch die Matrixtransformationen bestimmten 3D-Positionen der erkannten Objekte: Auto (rot), Fußgänger (grün), Zweirad (blau) und Verkehrszeichen (gelb)	30
Abbildung 8: Visulisierung der LIDAR-Daten	30
Abbildung 9: Versuchsträger des DCAITI	31
Abbildung 10: Referenzsensoraufbau	32
Abbildung 11: Versuchsaufbau	33
Abbildung 12: Hardwareaufbau im Versuchsträger	34
Abbildung 13: Radarziel für Zeitsynchronisierung	36
Abbildung 14: Versuchsgelände	38
Abbildung 15: Versuchsaufbau Use Case 1	41
Abbildung 16: Illustration Use Case 1	41
Abbildung 17: Versuchsreihe Use Case 1	42
Abbildung 18: Versuchsaufbau Use Case 2a	43
Abbildung 19: Illustration Use Case 2a	43
Abbildung 20: Versuchsreihe Use Case 2a	44
Abbildung 21: Versuchsaufbau Use Case 2b	45
Abbildung 22: Versuchsaufbau Use Case 2b	45
Abbildung 23: Versuchsreihe Use Case 2b	46

Abbildung 24: Versuchsaufbau Use Case 3	47
Abbildung 25: Illustration Use Case 3.....	48
Abbildung 26: Versuchsaufbau Use Case 4: Getränkedose.....	49
Abbildung 27: Versuchsaufbau Use Case 4: Person.....	49
Abbildung 28: Versuchsreihe Use Case 6.....	51

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel von KameRad ist die Entwicklung einer redundanten Sensorplattform für autonome Fahrmanöver im urbanen und landschaftlichen Bereich. Die hierfür zu entwickelnde Hardware-Plattform soll den Einsatz von KI-Technologien ermöglichen. In der Hardware-Plattform findet bereits eine Vorverarbeitung der Daten statt, so dass ein dezentrales Sensornetzwerk aus mehreren Plattformen aufgebaut werden kann. Die entwickelte Plattform ermöglicht, smarte Sensormodule mit Kameraeinheit und Radar sowie mit einer leistungsfähigen Recheneinheit zu realisieren. Ein 79 GHz Radar-Sensor stellt zusammen mit einem integrierten Kamera-System die Basis des Sensormoduls dar. Für die hohe Rechenleistung bei gleichzeitig geringer Latenz muss das KameRad-Modul hochintegriert entwickelt werden. Daher kommt die eine 300mm-Interposer Fertigung zum Einsatz.

1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurden

KameRad wurde vom Daimler Center for Automotive IT Innovations (DCAITI) an der TU Berlin im Konsortium mit anderen Forschungseinrichtungen wie Fraunhofer FOKUS und Fraunhofer IZM sowie namhaften Industriepartnern, wie AVL, InnoSenT, John Deere, Silicon Radar und Jabil Optics durchgeführt. Das DCAITI führte dabei leitend die Testfahrten für urbane Umgebung durch.

Das DCAITI konnte für dieses Projekt auf Erfahrungen im Bereich von Testmethodologien für kooperative Fahrfunktionen aus bedeutenden vorhergehenden öffentlich geförderten Projekten zurückgreifen, wie simTD, eMerge, iKoPA, SAFARI und DIGINET-PS. Auch aus Projekten mit Industriepartnern bestehen umfangreiche Erfahrungen in diesem Bereich. Dadurch verfügt das DCAITI über moderne Systeme und Tools zur Auswertung und Bewertung von Daten für die Testdurchführung im Automobilbereich und für Feldtests. Diese wurden im Laufe von KameRad erweitert, um auch für automatisiertes Fahren zur Verfügung zu stehen. Im Besitz des DCAITI befanden sich bereits vor Projektbeginn ein Fahrzeug für die Durchführung von Testfahrten. Die für die Durchführung des Projekts benötigten Sach- und Personalmittel wurden über die bewilligten Fördermittel finanziert.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde im Rahmen der Bekanntmachung „ELEVATE“ aus dem Förderprogramm IKT2020 durchgeführt. Dabei werden die in der Bekanntmachung genannten Punkte der Umfelderkennung adressiert. Dafür wurden eine hochintegrierte, sichere und zuverlässige Sensorik und eine Sensordatenfusion entwickelt.

Die Projektleitung für KameRad wurde durch die InnoSenT GmbH übernommen.

1.3.1 Arbeitspaket 1: Spezifikation der Sensorplattform und Definition der Schnittstellen

Das Arbeitspaket 1 ist ein zentrales Arbeitspaket und bildet die Grundlage für alle weiteren Arbeitspakete. Eine der Hauptaufgaben lag darin, eine detaillierte technische Spezifikation für das Gesamtprojekt zu erstellen. Dazu wurde eine umfangreiche Anforderungsanalyse unternommen und darauf aufbauend eine Systemarchitektur definiert. Die Spezifikation enthält insbesondere auch die Schnittstellen zwischen den einzelnen Hardware- und Softwarekomponenten und dient damit auch der Abstimmung zwischen den Entwicklungen der einzelnen Projektpartner. Dabei wurden schon weitreichende Planungen von der Entwicklung der Hardwareproduktion bis zur Integration in die Versuchsträger getätigt. Zur Vorbereitung der Auswertung, die in Arbeitspaket 5 erfolgte, wurden Testszenarien definiert.

Das Arbeitspaket 1 unterteilte sich in drei Teilarbeitspakete

- AP 1.1: Ermittlung geeigneter Demonstrator-Szenarien

- Das DCAITI hat die Definition der urbanen Use Cases gemeinsam mit AVL beigesteuert
- AP 1.2: Definition der äußeren Schnittstellen
 - Das DCAITI hat die Schnittstellen zur Testumgebung beigetragen
- AP 1.3: Erarbeitung von Belastungsprofilen für die definierten Anwendungsszenarien
 - Das DCAITI hat die Erstellung der Belastungsprofile unterstützt
- AP1.4: Spezifikation der Testparameter und –verfahren
 - Das DCAITI war nicht an diesem AP beteiligt.

Das Arbeitspaket 1 wurde geleitet von InnoSenT sowie AVL geleitet und erstreckte sich über von Projektmonat 1 bis Projektmonat 6.

1.3.2 Arbeitspaket 2: Entwicklung und Test (Sensormodul)

Im Arbeitspaket 2 wurden die Hardwarekomponenten entwickelt, die für das Sensor-Modul benötigt werden. Dazu wurde eine Hardwarearchitektur definiert. Außerdem wurde eine Evaluationsplattform entwickelt, die es ermöglicht, die Hardware-Komponenten in urbanen und landwirtschaftlichen Use Cases zu evaluieren.

Das Arbeitspaket 2 unterteilte sich in neun Teilarbeitspakete:

- AP 2.1: Entwicklung Hardware-Architektur
- AP 2.2: Design und Herstellung Radarsensor-Evaluationsplattform
- AP 2.3: Design und Herstellung Kamera-Evaluationsplattform
- AP 2.4: Konzept zur miniaturisierten System-Integration
- AP2.5: Chip Entwicklung
- AP2.6: Antennen-Design und –Herstellung

- AP2.7: Elektrisches Design des Interposers und Systemboards
- AP2.8: Thermisches Design von Interposer und Systemboard
- AP2.9: Herstellung des Sensorsystems, Systemintegration der Submodule

Das DCAITI war an keinem dieser Teilarbeitspakete beteiligt.

Das Arbeitspaket 2 wurde geleitet von Jabil Optics und Fraunhofer IZM und erstreckte sich von Projektmonat 3 bis Projektmonat 27.

1.3.3 AP3: Software Entwicklung und Test (Sensormodul)

Parallel zu den Entwicklungen auf der Sensorebene, deckt das Arbeitspaket 3 von KameRad alle Aspekte der Softwareentwicklung für die Sensorplattform ab. Die Entwicklung der Softwareplattform ergab sich aus der Spezifikation, die in Arbeitspaket 1 definiert wurde. Dazu gehört unter anderem die Erfassung der Daten von den Hardware-Schnittstellen, d.h. von der Kameraeinheit und dem Radar. Diese Informationen werden so verarbeitet, dass ein automatisiertes Fahrzeug seine Steuerung auf die externen Einflüsse anpassen. Die entwickelte Software registriert und fusioniert die eingehenden Bild- und Radardaten. Bei der Registrierung werden die mit beiden Sensoreinheiten gleichen Objekte zueinander assoziiert. Anschließend wird daraus mit einem probabilistischen Filter eine eindeutige Objektidentifikation berechnet. Da die verschiedenen Sensoren redundante Informationen liefern, können Fehlverhalten in der Datenfusion so weit wie möglich kompensiert werden. Die Objektinformationen können für die Objekterkennung und Klassifizierung verwendet werden. Für die Evaluierung wurden im Softwaresystem entsprechende Schnittstellen implementiert, aus denen die Messergebnisse erfasst werden können. Für die Evaluierung wurden vom DCAITI im Laufe des Projekts geeignete Testtools entwickelt, die bei der urbanen Erprobung zum Einsatz gekommen sind.

Das Arbeitspaket 3 unterteilte sich in sechs Teilarbeitspakete:

- AP 3.1: Registrierung der Radar- und Kameradaten
 - Das DCAITI war nicht an diesem AP beteiligt.
- AP 3.2: Fusion der Daten
 - Das DCAITI unterstützte die Entwicklung der Datenfusion aus Kamera und Radar. Außerdem wurde eine Registrierung zwischen den KameRad-Objektinformationen und den Objektinformationen aus der Referenzsensorik entwickelt.
- AP3.3: Merkmalsextraktion
 - Das DCAITI war nicht an diesem AP beteiligt.
- AP 3.4: Objekterkennung / Klassifikation
 - Das DCAITI entwickelte eine Objekterkennung und -klassifikation für die Referenzsensorik. Außerdem wurde die Entwicklung der Objekterkennung und -klassifikation für das KameRad-Modul unterstützt.
- AP 3.5 Implementierung auf der Zielplattform
 - Das DCAITI war nicht an diesem AP beteiligt.
- AP 3.6 Tests der Fusion auf Robustheit, Anpassungen
 - In diesem Arbeitspaket hat das DCAITI regelmäßig Tests mit dem Sensormodul durchgeführt, um die Hardware-Entwicklung zu unterstützen und Erkenntnisse für die Software-Entwicklung zu erlangen.

Das Arbeitspaket 2 wurde geleitet von Fraunhofer FOKUS und erstreckte sich von Projektmonat 4 bis Projektmonat 24.

1.3.4 Arbeitspaket 4: Test und Qualifizierung des Sensormoduls

In diesem Arbeitspaket wurde die funktionale Korrektheit des Sensormoduls anhand der definierten Spezifikation verifiziert. Dazu wurden die Radar- und die Kameraeinheit verschiedenen elektrischen Tests unterzogen. Außerdem wurde das Sensormodul definierten von außen auf das System einwirkenden Belastungen unterzogen.

Das Arbeitspaket 4 unterteilte sich in zwei Teilarbeitspakete:

- AP 4.1: Elektrische Charakterisierung der Komponenten und Sub-Module
- AP 4.2: Funktionale Qualifikationstests nach Lastenheft-Spezifikation am Sensormodul

Das DCAITI war an keinem dieser Teilarbeitspakete beteiligt.

Das Arbeitspaket 4 wurde geleitet durch InnoSenT und AVL und erstreckte sich von Projektmonat 6 bis Projektmonat 30.

1.3.5 Arbeitspaket 5: Demonstration in urbaner Umgebung

In Arbeitspaket 5 wurden die Integration, Test und Validierung der Sensor-Plattform für urbane Use Cases durchgeführt und demonstriert. Dazu wurden die in KameRad entwickelten Software- und Hardware-Komponenten in Versuchsfahrzeugen verwendet, um bei Testfahrten die Objekterkennung validieren zu können. Durch die Integration des KameRad-Sensormoduls konnte eine Erprobung unter absoluten Realbedingungen durchgeführt werden. Dafür wurden geeignete Testtools verwendet, die von DCAITI im Laufe des Projekts in AP3 entwickelt worden waren.

Neben den Versuchen in Realfahrzeugen wurden auch Tests und Validierungen in Simulationsumgebungen und Laboraufbauten durchgeführt. Außerdem wurde der Sensor in verschiedenen Entwicklungsstufen getestet. Dadurch konnte der

Entwicklungsfortschritt gemessen und dokumentiert werden. Die Versuche mit echten Fahrzeugen wurden auf öffentlichem Straßengelände unter Berücksichtigung der StVO alle Sicherheitsvorschriften durchgeführt. Für diese Validierung kam als Referenzsensorik ein hochgenaues Perzeptionssystem mit LIDAR-Sensorik zum Einsatz.

Für die Validierung wurden die in Arbeitspaket 1 erstellten Use Cases und Testszenarien herangezogen. Durch das entwickelte Aufzeichnungs- und Auswertungs-Tools, konnten die Daten aus der Kamerad-Sensorplattform und die Daten der Referenzsensorik auch im Nachgang an die Versuchsfahrten analysiert und validiert werden. Die Integration in die Fahrzeuge erforderte die Anpassung des bereits am Versuchsfahrzeug verbauten Sensorsetups, um die für die Analyse notwendigen Testfahrten durchführen zu können. Mit den Versuchsfahrten konnte die Funktionsweise des Sensormoduls basierend auf der in AP1 definierten Spezifikation mit realen Daten aus dem Fahrzeug analysiert werden.

Das Arbeitspaket 5 unterteilte sich in 5 Teilarbeitspakete:

- AP 5.1: Integration des Sensormoduls in Testfahrzeug für urbane Umgebung
 - Das Sensormodul wurde in das Versuchsfahrzeug des DCAITI eingebaut. Dazu wurde das Sensormodul an die Perception Unit im Fahrzeug des DCAITI angeschlossen. Außerdem wurden die Daten aus dem KameRad-Sensormodul an die Schnittstellen der Validierungssoftware angebunden.
- AP 5.2: Replikation der Testfälle aus der XIL-Umgebung für den Einsatz am Testfahrzeug

- Basierend aus den Erfahrungen aus der Simulation und Labortestumgebung wurde die Use Cases an die reale Umgebung im Versuchsfahrzeug des DCAITI angepasst.
- AP 5.3: Testfahrten und Auswertung
 - Das DCAITI hat Testfahrten in urbaner Umgebung durchgeführt. Als Referenzsensorik kam ein LIDAR-Perzeptionsframework zum Einsatz, mit dem der in KameRad entwickelte Sensorprototyp ausgewertet wurde. Dafür wurden die in AP1 definierte Spezifikation und die Use Cases herangezogen. Dabei kamen die vom DCAITI entwickelten Testtools zum Einsatz
- AP 5.4: Vergleich Sensordaten mit Ground-Truth
 - In diesem Arbeitspaket hat das DCAITI die in AP5.3 erhobenen Testdaten analysiert und das KameRad-Sensormodul mit der Referenzsensorik verglichen. Dabei wurde die Genauigkeit der erhobenen Sensordaten analysiert
- AP5.5: Verfeinerung der in der Simulation verwendeten Sensormodelle durch Korrelation
 - Die Erkenntnisse aus der Validierung werden dem Konsortium durch das DCAITI zur Verfügung gestellt, um das Sensormodell anhand der Ergebnisse weiter zu verfeinern.

Das Arbeitspaket 5 wurde von AVL geleitet und erstreckte sich von Projektmonat 6 bis Projektmonat 36.

1.3.6 Arbeitspaket 6: Demonstration in landwirtschaftlichem Testfahrzeug

Analog zu AP5 werden Demonstrationen und Validierung in einem landwirtschaftlichen Testfahrzeug durchgeführt. Dabei wird die Eignung des

Sensormoduls für automatisierte Fahrten unter landwirtschaftlichen Gesichtspunkten analysiert. Mit landwirtschaftlichen Fahrzeugen wurden Testfahrten durchgeführt und ausgewertet.

Arbeitspaket 6 unterteilte sich in 8 Teilarbeitspakete:

- AP 6.1: Integration des Sensormoduls in das Testfahrzeug im Bereich Landwirtschaft
- AP 6.2: Test von Funktion und Performance sowie Optimierung
- AP 6.3: Durchführung von Versuchsfahrten und Aufzeichnung von Messwerten
- AP6.4: Übertragen der Messungen in ein Simulationsumfeld
- AP6.5: Implementierung von Algorithmen zur Verarbeitung der Sensorinformationen
- AP6.6: Entwicklung von Metriken zur Beurteilung der Ergebnisse
- AP6.7: Analyse der Ergebnisse im Vergleich zum Pflichtenheft und Ableitung von Optimierungsmaßnahmen (technische Funktionalität)
- AP6.8: Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse (marktwirtschaftlich)

Das DCAITI war an keinem dieser Teilarbeitspakete beteiligt.

Das Arbeitspaket 6 wurde geleitet von John Deere und erstreckte sich von Projektmonat 6 bis Projektmonat 36.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Aus der VHB:

Selbstfahrende Autos und Fahrer-Assistenz-Systeme erfordern eine Kombination verschiedener Sensoren (siehe z.B. [1][2]). Typische Sensoren sind optische Kameras, Radar- (Frequenz 24 GHz, 77 GHz, 79 GHz) bzw. Lidarsysteme und GPS-Empfänger. Die Sensorinformationen werden für die statische und dynamische Szenenanalyse, Fußgänger-, Verkehrszeichen- und Hinderniserkennung verwendet. Dabei spielen Kamera-Systeme für die Erfassung und Identifizierung von Objekten eine entscheidende Rolle. Kamera-Systeme haben im Vergleich zu Radar- oder Lidarsystemen, Schwächen bei Dunkelheit und schlechten Wetterverhältnissen. Die technologische Entwicklung von Kamera-Systemen sorgt dafür, dass die Kosten sinken und die Performance der Systeme steigt (siehe z.B. [3][4]). Diese Entwicklung ist durch neuartige aber auch rechenintensive Computer-Algorithmen möglich. Durch ihre hohe Rechenintensivität steigt auch gleichzeitig die Latenz bzw. die Reaktionszeit. Aus dem Grund sind Kamera-Systeme allein für die Umfelderkennung für das autonome Fahren ungeeignet.

Um diese Herausforderungen zu lösen, kann mit Hilfe eines Radar-Sensors der Abstand eines Objekts bestimmt und gleichzeitig mit Hilfe eines Kamera-Moduls eine Objekterkennung durchgeführt werden. Durch diese Sensorfusion sinkt der Aufwand bei den Auswertungsalgorithmen deutlich, bei gleichzeitiger Steigerung der Sicherheit der Algorithmen.

Radar-Sensoren werden heute schon im Automobilbereich für verschiedene Anwendungen im Nah- und Fernbereich des Fahrzeugs eingesetzt [5]. Beispiele sind Totwinkel-Überwachung, Heck-Pre-Crash-Systeme sowie Assistenten für Ausstieg, Spurwechsel und Ausparken. Im Gegensatz zu Bildsensoren im optischen Spektralbereich ermöglichen Radarsensoren einen hohen Erfassungsbereich, eine

hohe Sample-Rate und die Möglichkeit zur Messung von Entfernung und Geschwindigkeit auch bei Dunkelheit und starkem Niederschlag [6]. Um bei einem Radarsystem eine große Reichweite für Anwendungen im Fernbereich zu ermöglichen, ist ein kleiner Öffnungswinkel der abgestrahlten Leistung (hoher Antennengewinn) nötig. Für den Nahbereich ist dagegen eher ein großer Öffnungswinkel (geringer Antennengewinn) bei mittlerer bis geringer Reichweite nötig. Die Ortsauflösung eines Radars ist umso feiner, je größer die verwendete Bandbreite ist. Im ISM-Band 24GHz stehen lediglich maximal 250MHz zur Verfügung. Für automotive Radarsensoren wurde daher das Frequenzband 76GHz-77GHz (1GHz Bandbreite) und später 77-81GHz freigegeben. Das Projektvorhaben KameRad zielt auf den neuen Frequenzbereich um 79GHz, in dem 4GHz Bandbreite zur Verfügung stehen, was theoretisch eine Ortsauflösung von 3.8cm ermöglicht.

Ein weiterer Vorteil der höheren Frequenzen sind die kleineren Antennenabmessungen, sodass bei gleichem Bauraum für das Radarmodul mehrere Antennen zu einem Gruppenstrahler kombiniert werden können. Damit kann eine höhere Richtwirkung der abgestrahlten Leistung erzeugt und die Reichweite erhöht werden. Durch eine elektronische Anpassung der Ansteuerung oder einer mechanischen Ausrichtung der Antennenelemente eines Gruppenstrahlers kann die Abstrahlcharakteristik beeinflusst und zusätzliche Informationen gewonnen werden.

Die beste Ausnutzung der Sensorik erfolgt durch den Einsatz von Sensorfusion und die Nutzung von Vorwissen über die Verkehrsteilnehmer (Autos, öffentliche Verkehrsmittel, Fahrräder, Fußgänger) [2]. Bisherige Arbeiten im Bereich Bildfusion gibt es vor allem in der Medizin (z.B. für Bildregistrierung von CT und MRT [7]) und in der Fernerkundung (z.B. für Bildfusion von sichtbarem/multispektralem Licht und

Radar bei Satelliten- oder Luftaufnahmen [8], [9]). Die automatisierte multimodale Bildfusion, die für selbstfahrende Autos notwendig ist, hat außer der Schwierigkeit verschiedener Kameraperspektiven (Parallaxe) auch die Schwierigkeit, gemeinsame Merkmale in sehr unterschiedlichen Merkmalsräumen zu finden. Mehrere Heuristiken sind vorgeschlagen worden. Die neuesten Methoden brauchen weniger Vorwissen [9][10][11] und einige wurden gezielt für Automobil-Fahrassistenz entwickelt [12].

Anstelle von Radarsensorik kommt im Automobilbereich häufig auch LIDAR zum Einsatz. Der Vorteil ist eine deutlich höhere Winkelauflösung, als sie mit Radar möglich ist, weil hier mit hoch bündelnden Laserstrahlen gearbeitet wird. Die Nachteile dieser Systeme sind die Anfälligkeit gegenüber widrigen Witterungsbedingungen (siehe Kamera), die Notwendigkeit beweglicher Spiegel und der vergleichsweise hohe Preis. Für eine Sensorfusion mit optischer Kamera ist daher Radar die eindeutig bessere Lösung.

Im Automobil-Bereich ist ein Sensor auf dem Markt, der Radar- und Kamera in einem gemeinsamen Gehäuse kombiniert (siehe z.B. [13]). Dieses System ist ein Schritt in die Richtung der angestrebten Sensorfusion, hat aber als Nachteile die großen Abmessungen und eine sehr eingeschränkte Reichweite. Das Gerät ist gedacht als separates Add-on, welches an den Rückspiegel im Auto befestigt werden kann. Es übernimmt Sicherheits- bzw. Komfort-Features, welche heute schon in den meisten Oberklassefahrzeugen verfügbar sind. Um diesen Ansatz für das autonome Fahren zu erweitern, müssen die Integrationsdichte, der Abdeckungsbereich und die Rechenleistung erhöht werden [13].

Um alle diese Herausforderungen gerecht zu werden wird ein High End – Kamera – System mit einem 79 GHz (76-81GHz) Radar-System kombiniert. Mit Hilfe dieses Systems wird ein Detektionsbereich bis zu 150m ermöglicht. Um die Datenlaufzeit

zu minieren und gleichzeitig ein robustes Packaging System zu ermöglichen, wird die 2.5D/3D-Integrationstechnik angewendet. Sie zeichnet sich durch ihren hohen Integrationsgrad aus. Die 2.5D/3D-Aufbau-Technologie wurde schon seit mehreren Jahren untersucht und gehört heute zum Stand der Technik im Bereich Kommunikation und Datenverarbeitung. Erste Kameramodule wurden mit dieser Technologie schon realisiert, wobei dort nur die Vorteile der Integration Anwendung gefunden haben (siehe z.B. [14]). Innerhalb dieses Projektes wird deswegen zum ersten Mal diese Technologie für die Kombination von High – End Kamera-System und Radar-System eingesetzt. Um das Potenzial dieser Technologie vollständig auszuschöpfen, müssen die Datensignale der Kamera- und Radar-Module durch weitere Daten ergänzt werden. Aus dem Grund wird das System mit einer Datenschnittstelle für weitere Sensormodule und gleichzeitig mit einer Schnittstelle für Car-to-X Kommunikation ausgestattet. Um die hohen Datenströme analysieren und verarbeiten zu können, wird eine hohe Integrationsdichte benötigt, damit Leitungsverluste über lange Interconnects minimiert werden können. Die Herausforderung im Bereich der Signal- und Powerintegrität ist groß, weil solche Systeme mit vielen ICs (DSP, Radar-Transceiver, System-ASIC usw.), hohe Anforderung an die Signalqualität und an die Spannungsversorgung haben. Alle diese Anforderungen werden innerhalb des Projekts analysiert und gelöst. Anschließend wird die Leistungsfähigkeit des Moduls in verschiedenen Umgebungen (urban und Landwirtschaft) getestet.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

- Vorgesehene Vorstellung der Projektergebnisse beim ELEVATE-Workshop
 - Durchführung ursprünglich geplant für 02./03.04. 2020 in Renningen
 - Durchführung voraussichtlich online

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und erzielte Ergebnisse

2.1.1 Use Cases für urbane Erprobung

Das DCAITI hat mit verschiedenen Projektpartnern mögliche Szenarien erarbeitet, evaluiert und ausgewählt. Es wurde darauf geachtet, dass die ausgewählten Szenarien sich insbesondere für Tests und Demonstrationen im Rahmen des Forschungsprojekts eignen. Daneben wurde mit dem Aufbau des Versuchsfahrzeugs zur Durchführung der Testfahrten begonnen.

2.1.1.1 Use Case 1

Das erste Szenario im Stadtverkehr beschreibt ebenfalls eine Kreuzungssituation. Hier biegt das Ego-Fahrzeug nach links ab, während ein entgegenkommendes Fahrzeug geradeaus fährt. Hier gilt es insbesondere, die Vorzüge der Kombination aus Radar- und Kamera-Sensor zu testen. Während der Radersensor sehr gut die Relativgeschwindigkeit der sich aufeinander zu bewegenden Fahrzeuge erkennen kann, ist der Kamerasensor dazu geeignet, mögliche Fahrtrichtungsanzeigen des entgegenkommenden Fahrzeugs zu erkennen (Blinker). Daraus kann eine Handlungsempfehlung abgeleitet werden. Der Use Case 1 ist in Abbildung 1 dargestellt.

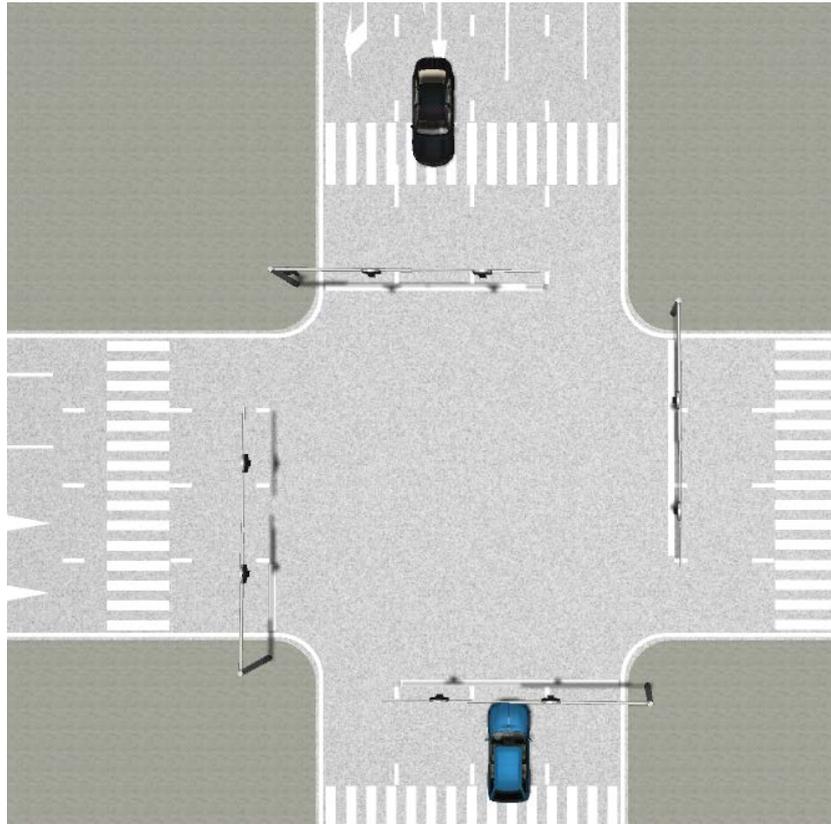


Abbildung 1: Szenario im Stadtverkehr 1

2.1.1.2 Use Case 2

Der Use Case 2 definiert ein innerstädtisches Kreuzungsszenario mit einem Radfahrer. Das Ego-Fahrzeug biegt dabei rechts ab. Parallel zum Ego-Fahrzeug überfährt ein Fahrrad, die Kreuzung, dem vom Ego-Fahrzeug Vorrang gegeben werden muss. Dieses Fahrrad ist bis kurz vor der Kreuzung verdeckt, so dass nur ein kurzer Zeitraum zur Detektion bleibt. Der Use Case 2 ist in Abbildung 2 dargestellt.

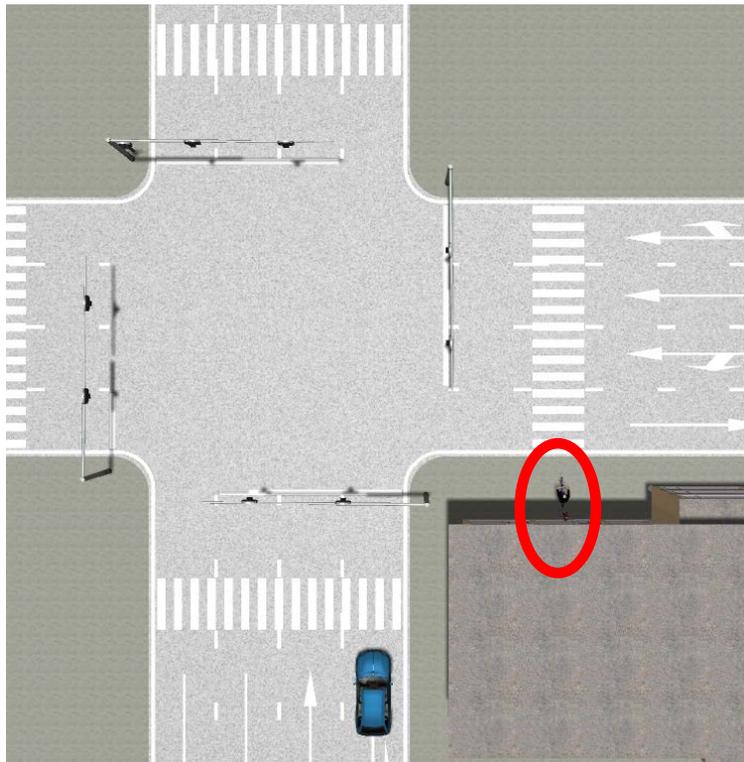


Abbildung 2: Szenario im Stadtverkehr 2

2.1.1.3 Use Case 3

Im dritten Anwendungsfall wird die Erkennung von Freiraum im Straßenbereich getestet. Dabei fährt das Versuchsfahrzeug auf einer mehrstreifigen Straße mit parkenden Autos am rechten Straßenrand. Der Sensor soll dabei die freie Fahrbahnfläche korrekt erkennen. Der Use Case 3 ist in Abbildung 3 dargestellt.

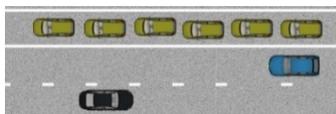


Abbildung 3: Szenario Freiraum im Straßenbereich

2.1.1.4 Use Case 4

Um die besondere Charakteristik des KameRad-Sensors aus Kombination von Radar und Kamera zu testen, wird ein Versuch mit einer Getränkedose sowie einer Versuchsperson durchgeführt. Vor dem stehenden Versuchsfahrzeug werden eine Getränkedose sowie im doppelten Abstand eine Person platziert. Da die Getränkedose und die Person potentiell ein ähnliches Radarecho liefern, soll hier die Kamera eine Unterscheidung der beiden Objekte herbeiführen. Das Ergebnis soll sich mit den Referenzmessungen mit einem LIDAR-Sensor decken.

2.1.1.5 Use Case 5

Die Genauigkeit der Sensoren soll getestet werden, in dem zwei KameRad-Sensoren eine Wand detektieren. Diese sollen beide den gleichen Abstand liefern, der mit dem LIDAR-System verifiziert wird.

2.1.1.6 Use Case 6

Zusätzlich zu dem nach vorne schauenden Sensor wird seitlich am Fahrzeug ein KameRad-Sensor angebracht. Mit diesem soll ein Fahrradfahrer, der sich neben dem Fahrzeug befindet detektiert werden.

2.1.2 Fahrzeugaufbau

Nach der Entwicklung der Use Cases wurde mit dem Aufbau des Versuchsfahrzeugs in AP5 begonnen. Eine schematische Übersicht des Versuchsfahrzeugs kann in Abbildung 4 gesehen werden. Es wurde hierfür ein E-Klasse-Modell der Marke Mercedes zu verwenden.

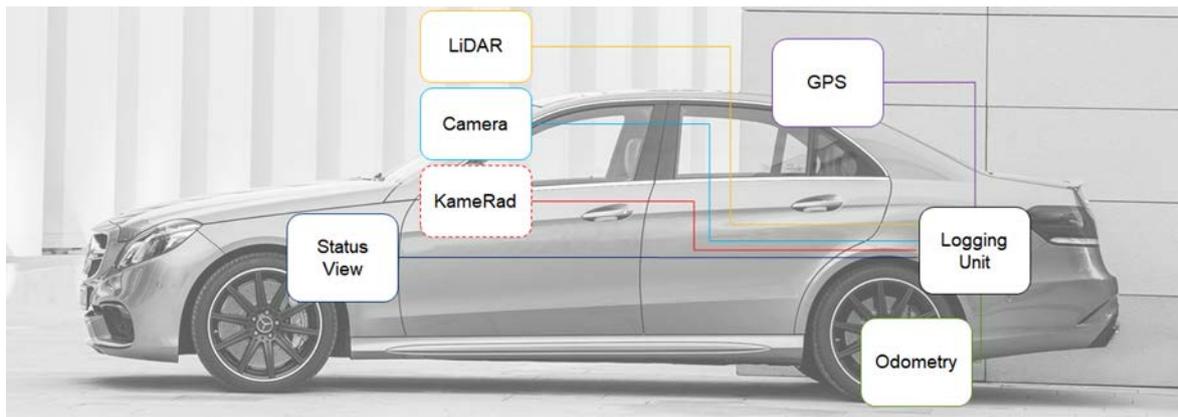


Abbildung 4: Schematische Übersicht des KameRad-Versuchsfahrzeugs

Das Fahrzeug enthält neben dem KameRad-Sensor noch weitere Sensorik sowie Hardware, die zur Ermittlung einer genauen Position sowie genauer Detektion von Objekten benutzt werden.

Für diese Zwecke verwendete das DCAITI einen LIDAR-Sensor sowie mehrere Kameras, die am Fahrzeug angebracht sind. Die Daten von diesen Sensoren werden fusioniert mit dem GPS-Signal sowie mit den Odometrie-Daten, die das Fahrzeug bereitstellt. Abbildung 5 zeigt die Konfiguration des Fahrzeugs für die Versuchsfahrten.

Dem LIDAR-Sensor kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu. Dieser Sensor dient als Ground Truth bei für die Durchführung der Versuche. Hierfür konnte auf ein Detektionsframework aufgebaut, das zuverlässig Objekte und Freiflächen erkennt.



Abbildung 5: Für die Versuchsfahrten verwendetes Fahrzeug

Zur zentralen Verarbeitung wurde im Fahrzeug ein Car PC (Application Unit, AU) verbaut. Zusätzlich enthält das Fahrzeug eine Logging-Unit mit der die Daten aufgezeichnet werden, so dass sie ausgewertet werden können, sowie ein Display für die Status View, die jederzeit anzeigt, ob die Hardware- und Software-Komponenten korrekt funktionieren.

Für die Verbindung der Komponenten wurde ein fahrzeuginternes Netzwerk (Ethernet) aufgebaut. Die Sensoren Kamera, LIDAR und KameRad werden über dieses Netzwerk an den Car PC angebunden, ebenso die Logging Unit und die Status View. Die Daten für die Odometrie werden über einen CAN Proxy vom CAN Bus ausgelesen. Der GPS-Empfänger wird direkt per USB an den Car PC angeschlossen.

2.1.3 Objekterkennung

Im Rahmen von KameRad wurde vom DCAITI eine Software zur Objekterkennung und Objektdetektion entwickelt, welche zur Validierung des KameRad-Sensors verwendet wurde. Die Validierungssoftware ist dabei auf die im ersten Projektjahr definierten Validierungsszenarien abgestimmt.

Die zur Validierung entwickelte Objekterkennung basiert auf einem Deep Learning Verfahren. Damit können verschiedene Verkehrsteilnehmer, wie Fahrzeuge, Fahrräder und Fußgänger sowie andere Objekte erkannt werden. Dieses Verfahren wird mit einer speziellen Form des maschinellen Lernens, Convolutional Neural Networks, implementiert. Diese neuronalen Netzwerke eignen sich besonders zur Objekterkennung.

Bei der Objekterkennung unterscheidet man prinzipiell zwischen Objektklassifikation, Objektlokalisierung und Objektdetektion. Diese Verfahren unterscheiden sich nach dem Detaillierungsgrad und der Objektanzahl.

- Objektklassifikation: Einem Datensatz (z.B. LIDAR-Scan oder Bild) werden vordefinierte Kategorien (Labels) zugeordnet
- Objektlokalisierung: Das im Datensatz vorhandene Objekt wird zusätzlich im Datensatz markiert, d.h. die Position wird festgestellt
- Objektdetektion: Für alle erkannten Objekte wird die Position festgestellt

Deep Learning besteht im Wesentlichen aus drei Arbeitsschritten, Aufarbeitung der Daten, Trainieren des neuronalen Netzes und schließlich die Erkennung/Evaluation

2.1.3.1 Detektion von Objekten

Die Detektion von Fahrzeugen und anderen Objekten erfolgt in mehreren Stufen und ist dabei auf mehrere Rechner verteilt, welche unterschiedliche Performance

auf Central Processing Unit (CPU) und Graphic Processing Unit (GPU) zur Verfügung stellen. Dabei wird zunächst auf der Sensor Processing Unit (SPU), einem Rechner mit hoher GPU-Leistung und mittlerer CPU-Leistung, eine Vorverarbeitung vorgenommen. Auf der SPU werden Kamerabilder verarbeitet und mit einem sehr effizienten CNN ausgewertet, um eine erste Detektion von Objekten zu erreichen. Pro Verarbeitungsschritt werden hier lediglich 20ms benötigt. Hier wird lediglich zwischen 4 verschiedenen Objektklassen unterschieden: Autos, Fußgänger, Zweirad und Verkehrszeichen. Abbildung 6 zeigt eine Szenerie mit verschiedenen erkannten Objektklassen.

Auf der Perception Unit (PU), einem Rechner mit sehr hoher CPU- und GPU-Leistung erfolgt die weitergehende Detektion, bei der mit Hilfe von dedizierten DL-Netzen weitere, detailliertere Klassen und Objektinformationen bestimmt werden. Die Implementierung des Modells erfolgt im TensorFlow-Framework¹, einem Framework, das verschiedene Verfahren für maschinelles Lernen zur Verfügung stellt. Die PU, die zum Training verwendet wird, ist ein Rechner mit Grafikprozessoren von NVIDIA². Als Ergebnis des Lernprozesses erhält man einen Satz von Gewichten, die für die Verbindungen zwischen den Neuronen des CNN verwendet werden. Durch die Suche beim Lernprozess werden die am besten geeigneten Gewichte bestimmt. Das Ziel des Trainings ist die Fehlerminimierung durch Anpassung von Parametermatrizen.

¹ <https://www.tensorflow.org/>

² www.nvidia.com/de-de/

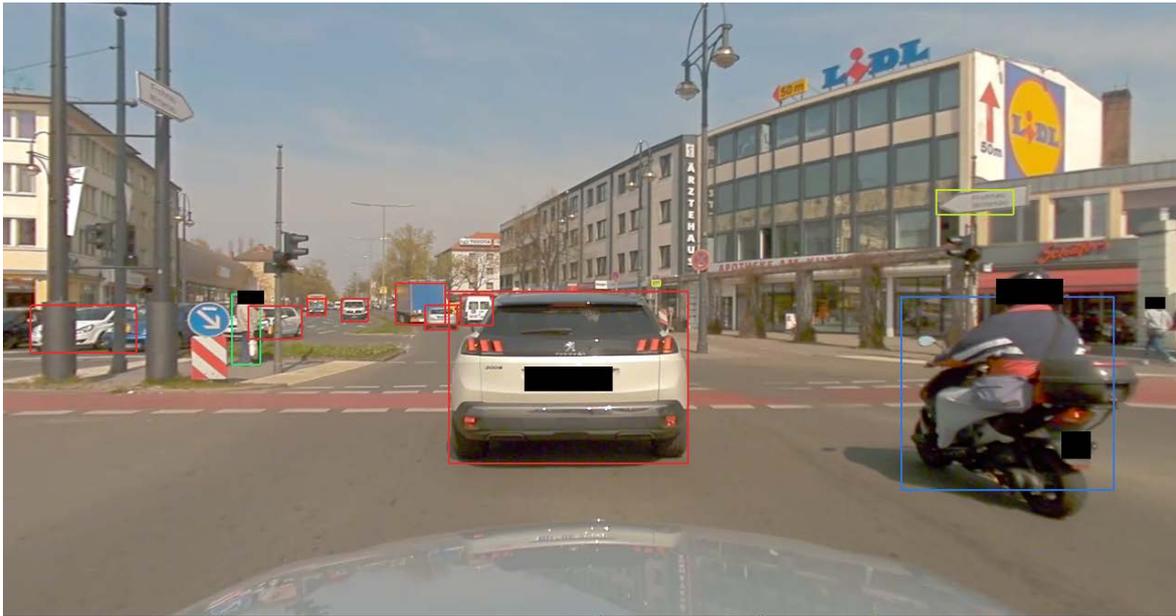


Abbildung 6: Detektion von verschiedenen Klassen: Auto (rot), Fußgänger (grün), Zweirad (blau) und Verkehrszeichen (gelb)

2.1.3.2 Positionsbestimmung der Objekte

Als nächster Schritt muss die relative Position der erkannten Objekte bestimmt werden, d.h. die Position in einem Koordinatensystem mit dem Ego-Fahrzeug als Mittelpunkt. Dazu werden die 3D-Punkte des LIDAR-Sensors in die 2D-Boxen des Kamerabildes projiziert. Dafür wurde eine Transformationsmatrix erstellt, die intrinsische Kameramatrix. Diese Matrix definiert die Transformation von realen Koordinaten im Kamerakoordinatensystem zum Bildkoordinatensystem (in Pixel). Daneben existiert noch eine weitere Transformationsmatrix, die extrinsische Matrix. Diese definiert die Abbildung des LIDAR-Koordinatensystems zum Kamerakoordinatensystem (beides in m). Für einen neuen Sensoraufbau müssen diese Matrizen jeweils neu kalibriert werden, sind dann jedoch stabil, wenn der Aufbau nicht mehr verändert wird. Durch eine affine Transformation mit der extrinsischen Matrix und eine homogene Projektion mit der intrinsischen Matrix kann man den erkannten Objekten im Kamerabild die entsprechenden Punkte im

3D-LIDAR-Scan zuordnen. Das Ergebnis einer Transformation kann in Abbildung 7 gesehen werden, ein Ausschnitt aus den LIDAR-Daten in Abbildung 8.

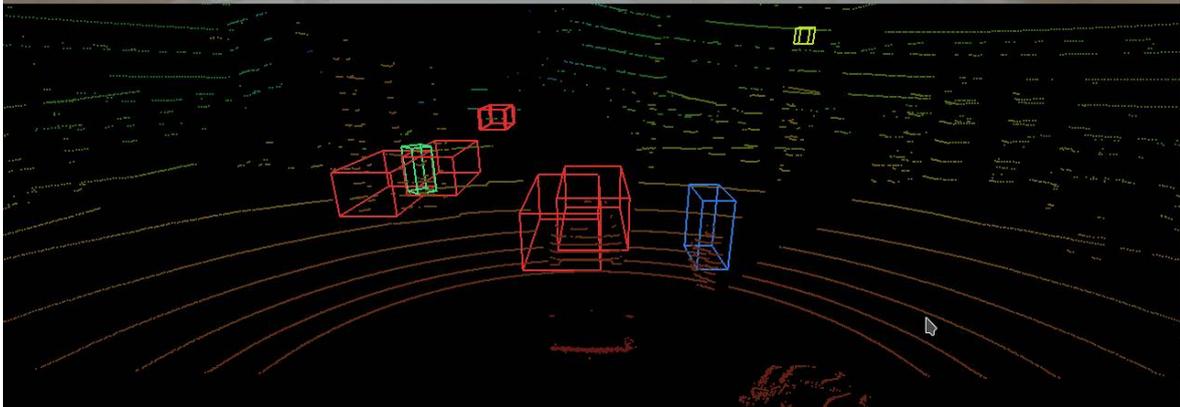


Abbildung 7: Die durch die Matrixtransformationen bestimmten 3D-Positionen der erkannten Objekte: Auto (rot), Fußgänger (grün), Zweirad (blau) und Verkehrszeichen (gelb)

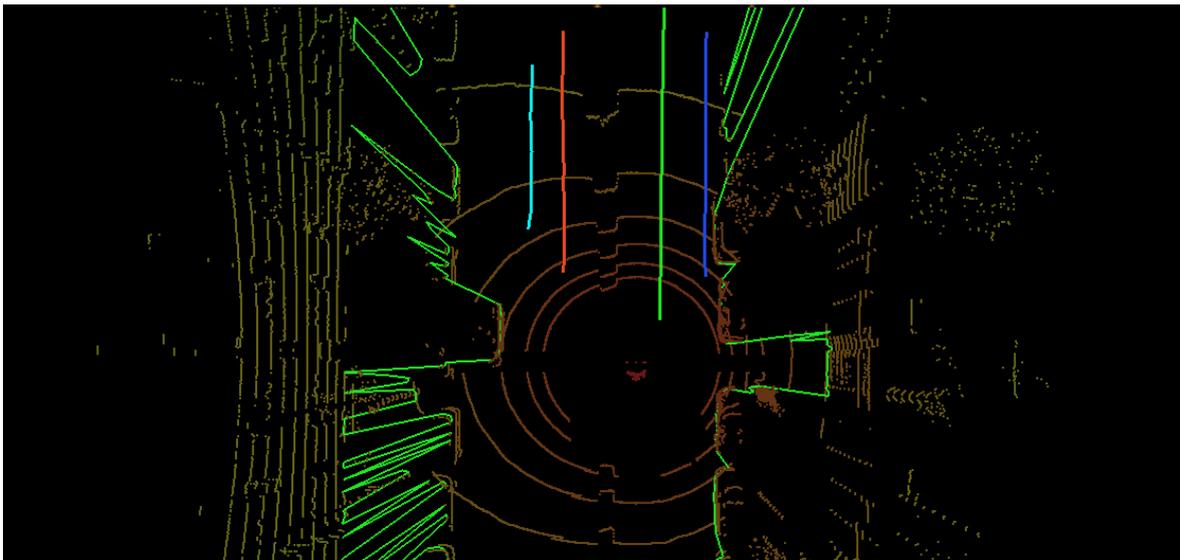


Abbildung 8: Visualisierung der LIDAR-Daten

2.1.4 Versuchsdurchführung

In AP5.1 wurde das KameRad-Sensormodul in den Versuchsträger des DCAITI integriert. Zu den Tests stand eine Mercedes E-Klasse Limousine mit Hybridantrieb des DCAITI zur Verfügung. Diese unterscheidet sich von Serienfahrzeugen durch einen Umbau für automatisiertes Fahren durch die Firma Paravan. Der Umbau enthält u.a. die Möglichkeit, das Fahrzeug durch einen Stellmotor an der Lenkstange sowie mechanische bediente Pedale automatisch quer und längs zu führen. Der Versuchsträger mit montiertem KameRad-Sensormodul ist in Abbildung 9 dargestellt.

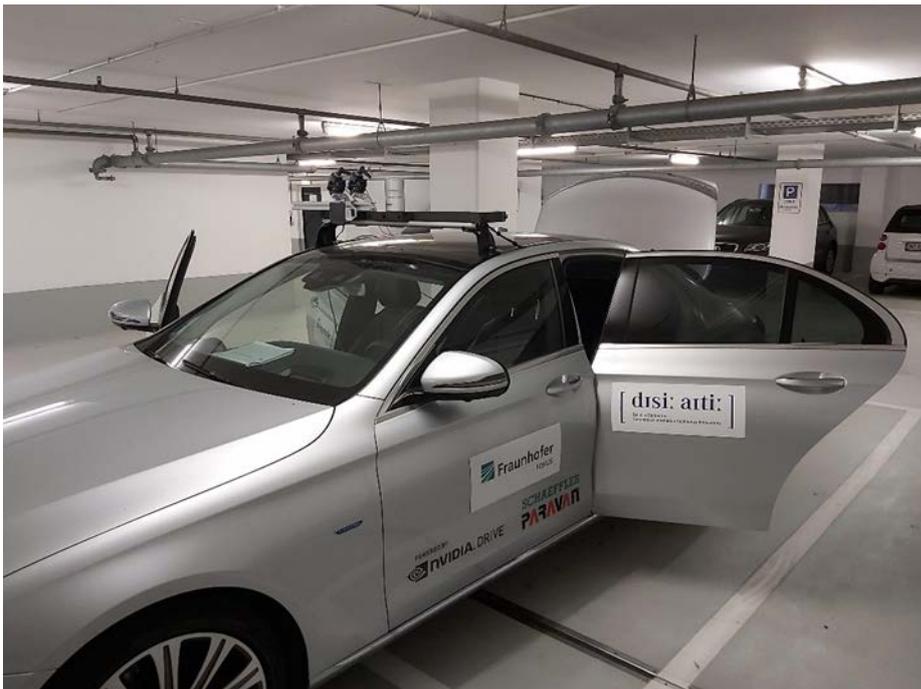


Abbildung 9: Versuchsträger des DCAITI

Für den Versuchsträger wurde durch das DCAITI ein mobiles Sensor-Rig entwickelt, das einerseits für eine Referenzsensorik einen festen Aufbau vorsieht, der regelmäßiges neues Kalibrieren nicht notwendig macht. Andererseits können an das Sensor-Rig flexibel weitere Sensoren zu Evaluierung angebracht werden. Das

Sensor-Rig basiert auf einem handelsüblichen Dachgepäckträger, der auf dem Fahrzeug montiert werden kann. Auf diesem Gepäckträger fest verankert ist ein spezielles Gehäuse, das für die Referenzsensorik speziell konstruiert wurde. Ein schematischer Aufbau der Referenzsensorik wird in Abbildung 10 dargestellt. Das Sensor-Rig enthält fest montiert sieben Kameras, davon drei nach vorne und je zwei zu jeder Seite, diese sind in Öffnungen des Sensor-Rigs eingelassen. Zusätzlich gibt es drei fixe Halterungen für LIDAR-Sensoren auf dem Sensor-Rig.

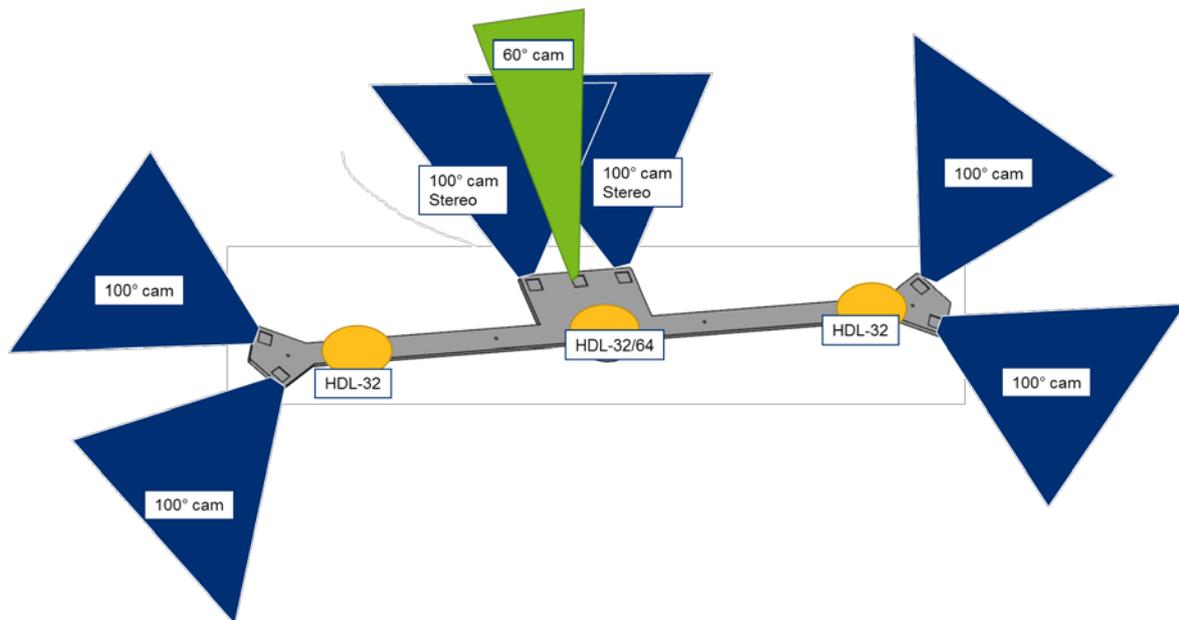


Abbildung 10: Referenzsensoraufbau

Für die Versuchsdurchführung wurde die Frontkamera der Referenzsensorik sowie ein Velodyne HDL32 LIDAR-Scanner verwendet, der mittig auf dem Sensor-Rig platziert wurde. Das KameRad-Modul, das zur Untersuchung verwendet wurde, wurde dazu seitlich rechts neben den Kameras und dem LIDAR-Sensor montiert. Für die Versuchsdurchführung musste die Translation der beiden Sensorsysteme (KameRad und Referenzsensorik) zueinander kalibriert werden. Durch die Montage am vorderen Ende des Fahrzeugdachs in einer Höhe von ca. 10 cm über dem Dach konnten störende Reflektionen der Fahrzeugkarosserie im Radar vermieden

werden. Der Versuchsaufbau mit montiertem KameRad-Sensor sowie der verwendeten Referenzsensorik ist in Abbildung 11 dargestellt.



Abbildung 11: Versuchsaufbau

Die Auswertung der Daten erfolgte durch neuronale Netze nach den eigentlichen Versuchsfahrten. Während der Versuchsfahrten wurden von allen Sensoren, d.h. KameRad mit Radar und Kamera-Modul, sowie Referenzsensorik mit LIDAR- und Kamera-Modul, Rohdaten aufgezeichnet. Für die Aufzeichnung sowie für die nachträgliche Auswertung der Daten wurde eine Drive PX2 von Nvidia verwendet. Die Drive PX2 enthält zwei Tegra X2 Grafikprozessoren sowie ein Software Framework, das bereits einige vortrainierte neuronale Netze enthält. Für die Aufzeichnung der Kamerastreams sowie der LIDAR-Frames wurde eine im Fahrzeug fest verbaute Drive PX2 verwendet. Daher war keine nachträgliche Zeitsynchronisierung zwischen diesen Datenquellen notwendig, sondern es konnten die

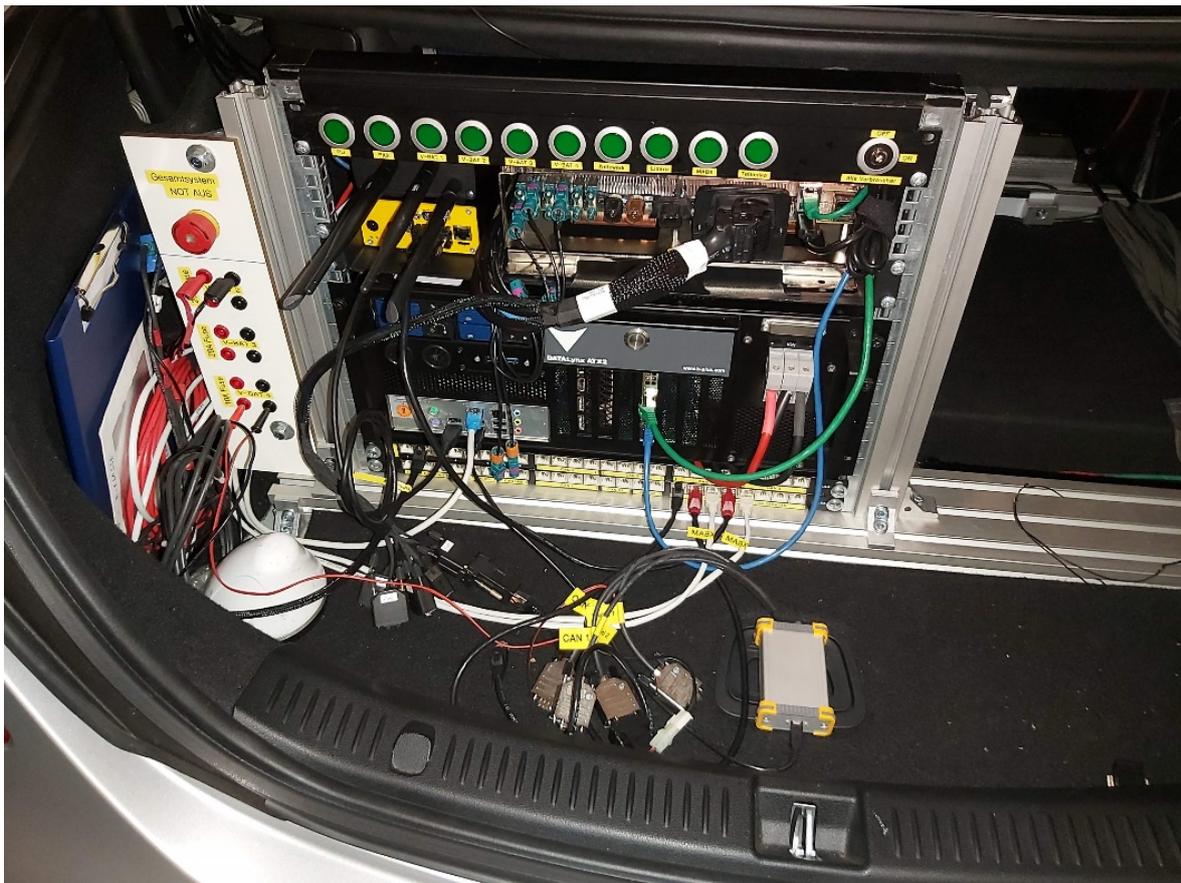


Abbildung 12: Hardwareaufbau im Versuchsträger

bei der Aufzeichnung verwendeten Zeitstempel verwendet werden. Die Rohdaten des Radarmoduls im KameRad-Sensor wurde über ein Entwicklernotebook vorgenommen.

Der Aufbau der Hardware im Kofferraum des Versuchsträgers kann in Abbildung 12 gesehen werden. Neben der Drive PX2 enthält der Aufbau u.a. einen weiteren PC mit einer leistungsstarken Grafikkarte.

Die eigentliche Auswertung erfolgte nach den Versuchsfahrten in einer Laborumgebung. Für die Auswertung der Referenzsensorik wurde der Kamerastream mit den LIDAR-Frames fusioniert um Objektpositionen und Objektklassen zu bestimmen. Für die Auswertung der Kamerabilder wurde mit

einem neuronalen Netz auf der Drive PX2 eine Objektdetektion durchgeführt, welche die Positionen der Objekte im Kamerabild sowie die Objektklasse bestimmt. Aus den LIDAR-Daten werden anschließend mit einem weiteren neuronalen Netz die Bounding Box von Objekten bestimmt. Da die Sensoren zueinander kalibriert sind, können die Bounding Boxes auf die Kamerabilder projiziert werden und somit eine Zuordnung der in beiden Daten detektierten Objekte vorgenommen werden. Dieses Netzwerk wird auf dem zusätzlichen PC ausgeführt. Die Auswertung erfolgte in einer Laborumgebung, in der ein Aufbau zur Verfügung stand, der identisch zu dem im Versuchsträger ist.

Die Detektion der Objekte im KameRad-Modul erfolgte ebenfalls mit neuronalen Netzen auf einer PX2. Eine ausführliche Beschreibung des dazu verwendeten Systems findet sich in anderen in KameRad erstellten Dokumenten. Für die zeitliche Synchronisierung zwischen den Radardaten sowie den restlichen Daten wurde ein von Fraunhofer FOKUS entwickeltes spezielles Radarziel verwendet, das aus einer reflektierenden Röhre besteht. Dieses kann sowohl in den Bilddaten als auch in den Radardaten gut identifiziert werden. Durch Bewegung dieser Röhre kann ein gemeinsamer Zeitpunkt in beiden Quellen festgestellt werden und als Referenzzeitpunkt bestimmt werden. Alle anderen Radarframes und Kamerabilder beziehen sich dann relativ auf diesen Referenzzeitpunkt. Die Vorrichtung zur Zeitsynchronisierung wird in Abbildung 13 von einem Mitarbeiter des Fraunhofer FOKUS vorgestellt.



Abbildung 13: Radarziel für Zeitsynchronisierung

Für die Versuchsdurchführung ist ein geeigneter Ort notwendig. Im Gegensatz zur Beschreibung Use Case-Dokument wurden die Versuche mit einem stehenden Fahrzeug durchgeführt anstatt mit einem Fahrzeug bei ca. 60 km/h. Hierfür gibt es mehrere Gründe. Einerseits ist in Städten i.d.R. die Geschwindigkeit auf 50 km/h gesetzlich beschränkt, weshalb hier schon eine Einschränkung gemacht werden muss. Darüber hinaus ist es auch mit dieser Geschwindigkeit nicht möglich unter sicheren Bedingungen bestimmte Verkehrssituationen wie für die Use Cases gefordert im freien Stadtverkehr nachzustellen. Auch die Synchronisierung des Radar-Moduls mit Hilfe der reflektierenden Röhre ist im freien Verkehr nicht ohne Gefährdung möglich.

Für eine korrekte Objektdetektion mit dem KameRad-Sensor in einem fahrenden Versuchsträger ist außerdem ein Algorithmus notwendig, der die verschiedenen Bewegungen des Fahrzeugs (z.B. Nicken) ausgleicht. Ein solcher Algorithmus war nicht Teil des KameRad-Projekts. Zur bestmöglichen Nachstellung der Use Cases wurden die Sensoren in einem stehenden Fahrzeug betrieben. Die in den Use Cases erläuterten zu detektierenden Objekte (Fußgänger und Fahrzeuge) sind jedoch für die Versuchsdurchführung aktiv, so dass bewegte Objekte erkannt werden konnten.

Für den Aufbau der Use Cases wurde ein Gelände benötigt, welches gleichzeitig groß genug ist, aber auch wenig Verkehr aufweist. Außerdem musste darauf geachtet werden, dass möglichst wenig störende Elemente vorhanden sind, die die Auswertung der Radardaten verfälschen können. Zusätzlich musste es möglich sein, die Use Cases unter Beachtung der StVO durchzuführen. Ein geeigneter Bereich wurde im Parkplatz des Stade Napoleon in Berlin gefunden. Das Gelände befindet sich an den Koordinaten 52.550754, 13.312532 und wird durch den roten Punkt in Abbildung 14 dargestellt.

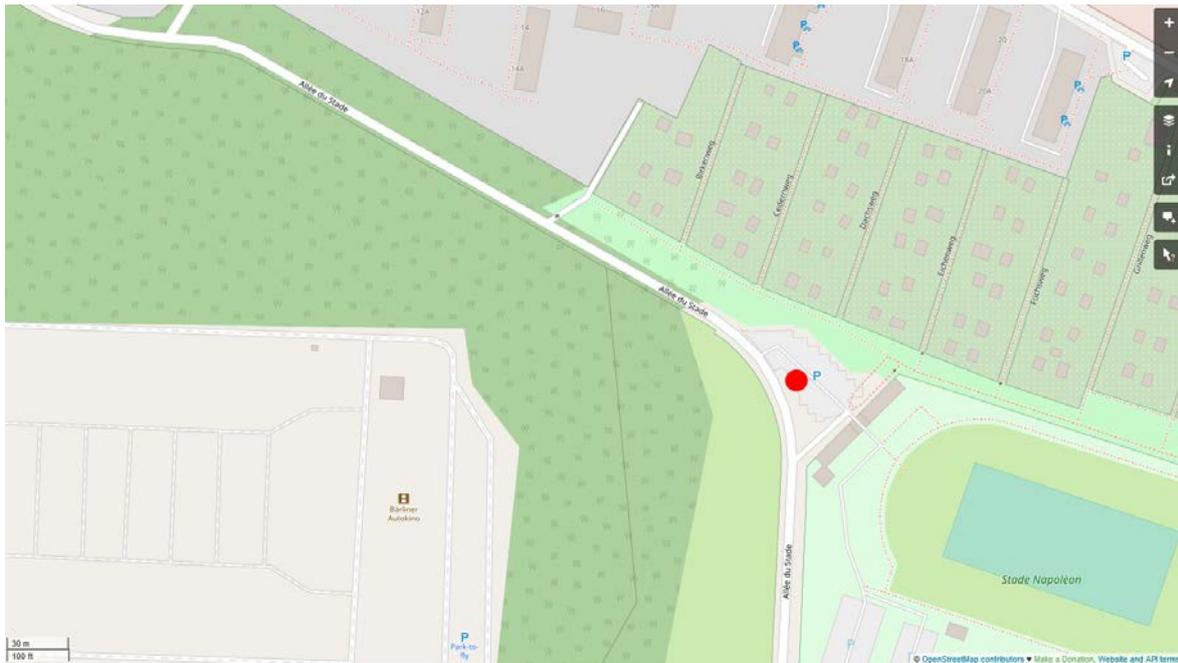


Abbildung 14: Versuchsgelände

2.1.4.1 Methodik

2.1.4.1.1 Vorgehensweise

Bei der Auswertung der erhobenen Daten gibt es zwei Schwierigkeiten, die zeitliche und die räumliche Zuordnung. Die zeitliche Synchronisierung wurde bereits in Kapitel 2 beschrieben. Die Kamerabilder sowie die LIDAR-Frames wurden zusammen mit der Drive PX2 im Fahrzeug aufgezeichnet und mit Zeitstempeln versehen. Damit können diese Daten zeitlich zueinander zugeordnet werden. Für die Zuordnung der Radardaten wurde das stark reflektierende Radarziel des Fraunhofer FOKUS verwendet. Mit einer Bewegung dieser Vorrichtung werden einzelne Datensätze in den Radardaten sowie in den Kamerabildern gekennzeichnet und können bei der Auswertung manuell zugeordnet werden. Außerdem ist eine örtliche Zuordnung der Daten notwendig. Kameras, Radarmodul und LIDAR-Modul wurden exakt zueinander vermessen und können somit kalibriert werden. Damit werden alle Daten im gleichen Koordinatensystem aufgezeichnet,

welches seinen Ursprung im KameRad-Sensor hat. Da die Algorithmen zur Objektdetektion eine gewisse Ungenauigkeit aufweisen, ist nicht in allen Fällen die Position der erkannten Objekte exakt gleich. Daher ist eine Zuordnung der einzelnen erkannten Objekte notwendig, was in der Fachliteratur als Registration bekannt ist. Für die Registration wird ein in der Objektdetektion übliches Verfahren. Dabei werden mittels Gating mit einem Radius von einem Meter um die im KameRad-Sensor erkannten Objekte alle Objekte in der Referenzsensorik selektiert, die potentiell für die Zuordnung in Frage kommen. Anschließend wird über die euklidische Distanz das nächste von der Referenzsensorik gefundene Objekt verwendet.

In der Beschreibung der Use Cases wurden insgesamt sechs Use Cases identifiziert, wovon eines in zwei Teil-Use Cases aufgeschlüsselt ist. Die erarbeiteten Use Cases sind:

1. Use Case 1 Detektion entgegenkommender Fahrzeuge
2. Use Case 2 Detektion kreuzender Verkehrsteilnehmer
 - a. Use case 2a Detektion kreuzender Verkehrsteilnehmer (quer)
 - b. Use case 2b Detektion kreuzender Verkehrsteilnehmer (längs)
3. Use Case 3 Detektion einer freien Fahrspur
4. Use Case 4 Unterscheidung von Getränkedose und Mensch
5. Use Case 5 Untersuchungen zur gegenseitigen Beeinflussung der Radarsensoren
6. Use Case 6 Mehrere Detektionen (Detektion überholender Fahrzeuge)

Use Case 5 ist außerhalb des Themenbereichs dieses Dokuments, da den an der Untersuchung beteiligten Projektpartnern DCAITI und Fraunhofer FOKUS nur ein KameRad-Modul zur Verfügung stand. Beim Use Case 6 geht es im Wesentlichen

darum, wie gut Objekte neben dem Versuchsträger erkannt werden können, d.h. mit einem seitlich angebrachten KameRad-Sensor. Dieser Anwendungsfall unterscheidet sich nur unwesentlich von der Untersuchung von vor dem Fahrzeug querenden Objekten. Da der durch die veränderte Montage und Kalibrierung außerdem eine zusätzliche Fehlerquelle entsteht, wurden für Use Case 6 vor dem Versuchsträger querende Fahrzeuge untersucht, im Gegensatz zu Use Case 2a, bei dem querende Fußgänger untersucht worden sind.

2.1.4.1.2 Metriken

Für die Use Cases 1, 2a, 2b, und 5 wurden verschiedene quantitative Metriken ausgewählt, mit denen die Genauigkeit der Objekterkennung mit dem KameRad-Modul bewertet wird. Für diese Use Cases wurde die mittlere Abweichung zur Referenzsensorik, der Median sowie die Standardabweichung berechnet.

Außerdem wird jeweils in einem Diagramm visualisiert, wie der Verlauf der Detektionen über die Zeit von der Referenzsensorik abweicht.

Für den Use Case 3 wurde eine qualitative Auswertung vorgenommen. Für das KameRad-Modul steht kein Algorithmus zur Free Space-Erkennung zur Verfügung, da die Entwicklung eines solchen Algorithmus nicht Teil des KameRad-Projekts war. Allerdings lässt sich leicht daraus schließen, dass ein geeigneter Algorithmus einen Bereich als Free Space erkennt, wenn keine Objekte darin erkannt werden. Die Sensordaten wurden daraufhin untersucht.

Use Case 4 wurde ebenfalls nur qualitativ bewertet, da bei diesem Use Case untersucht werden soll, ob Getränkedosen als Mensch identifiziert werden. Dafür ist im Fall auch kein Vergleich zur LIDAR-Sensorik notwendig. Die LIDAR-Referenzsensorik könnte quantitative Vergleiche liefern, wenn der KameRad-Sensor

teilweise Dosen als Menschen erkennen würde. Mehr zu dieser Untersuchung findet sich im Nachfolgenden Abschnitt.

2.1.4.2 Ergebnisse

2.1.4.2.1 Use case 1 Detektion entgegenkommender Fahrzeuge

Bei diesem Use Case sind der Versuchsträger und das zu erkennende Objekt frontal zueinander ausgerichtet. Dazu fuhr das zu detektierende Fahrzeug auf der Straße Allee du Stade auf den Versuchsträger zu. Der Use Case wird in Abbildung 15 und Abbildung 16 gezeigt.



Abbildung 15: Versuchsaufbau Use Case 1



Abbildung 16: Illustration Use Case 1

Ergebnisse:

Mittlere Abweichung: 0.119m

Median: 0.058m

Standardabweichung: 0.188m

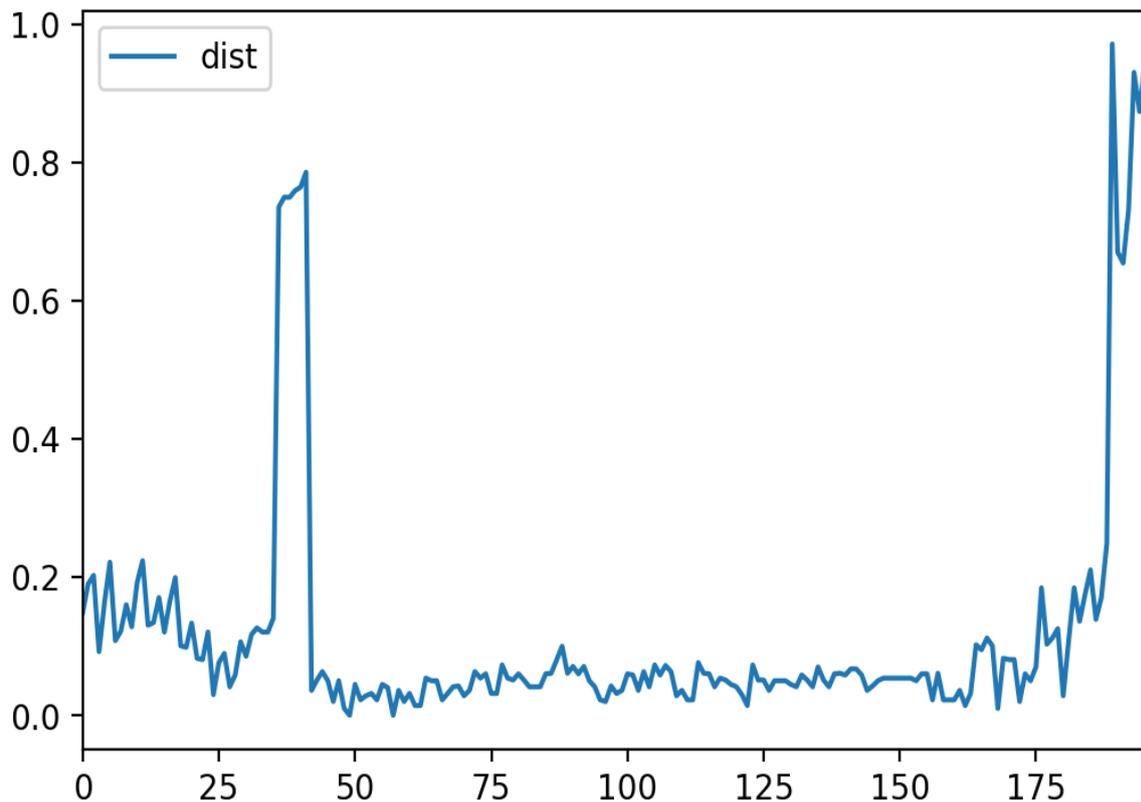


Abbildung 17: Versuchsreihe Use Case 1

2.1.4.2.2 Use Case 2a Detektion kreuzender Verkehrsteilnehmer (quer)

Beim Use Case 2 gilt die Untersuchung der Erkennung von Fußgängern. Im ersten Fall (Use Case 2a) sind dabei vor dem Fahrzeug querende Fußgänger zu detektieren. Eine Darstellung des Use Cases kann in Abbildung 18 und Abbildung 19 gesehen werden.

Ergebnisse:

Mittlere Abweichung: 0.341m

Median: 0.244m

Standardabweichung: 0.241m



Abbildung 18: Versuchsaufbau Use Case 2a



Abbildung 19: Illustration Use Case 2a

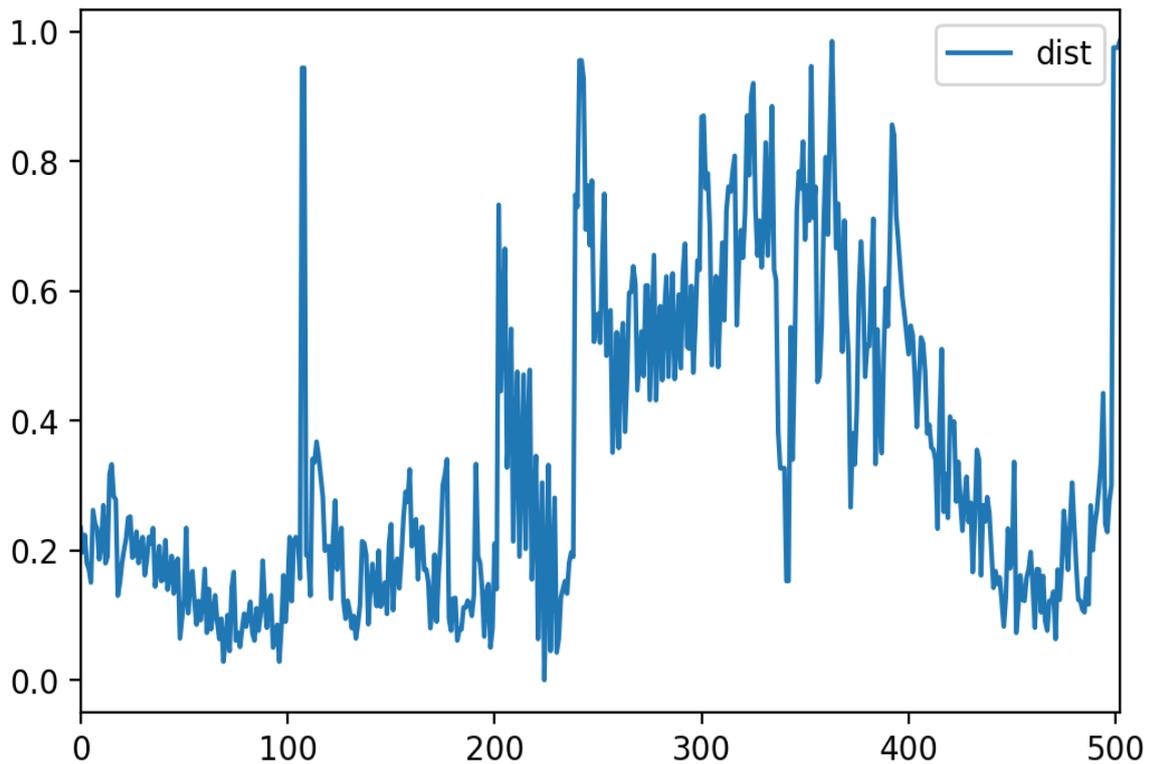


Abbildung 20: Versuchsreihe Use Case 2a

2.1.4.2.3 Use Case 2b Detektion kreuzender Verkehrsteilnehmer (längs)

Der Use Case 2b betrachtet längs zum Fahrzeug vorbeigehende Fußgänger. Dieser Use Case dient dazu, zu untersuchen, wie gut das KameRad-Modul am Rand des Aufnahmebereichs Objekte detektieren kann. Abbildung 21 und Abbildung 22 stellen diesen Use Case dar.

Ergebnisse:

Mittlere Abweichung: 0.547m

Median: 0.519m

Standardabweichung: 0.219m



Abbildung 21: Versuchsaufbau Use Case 2b

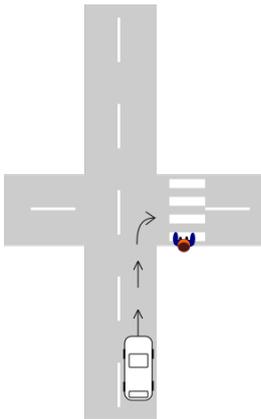


Abbildung 22: Versuchsaufbau Use Case 2b

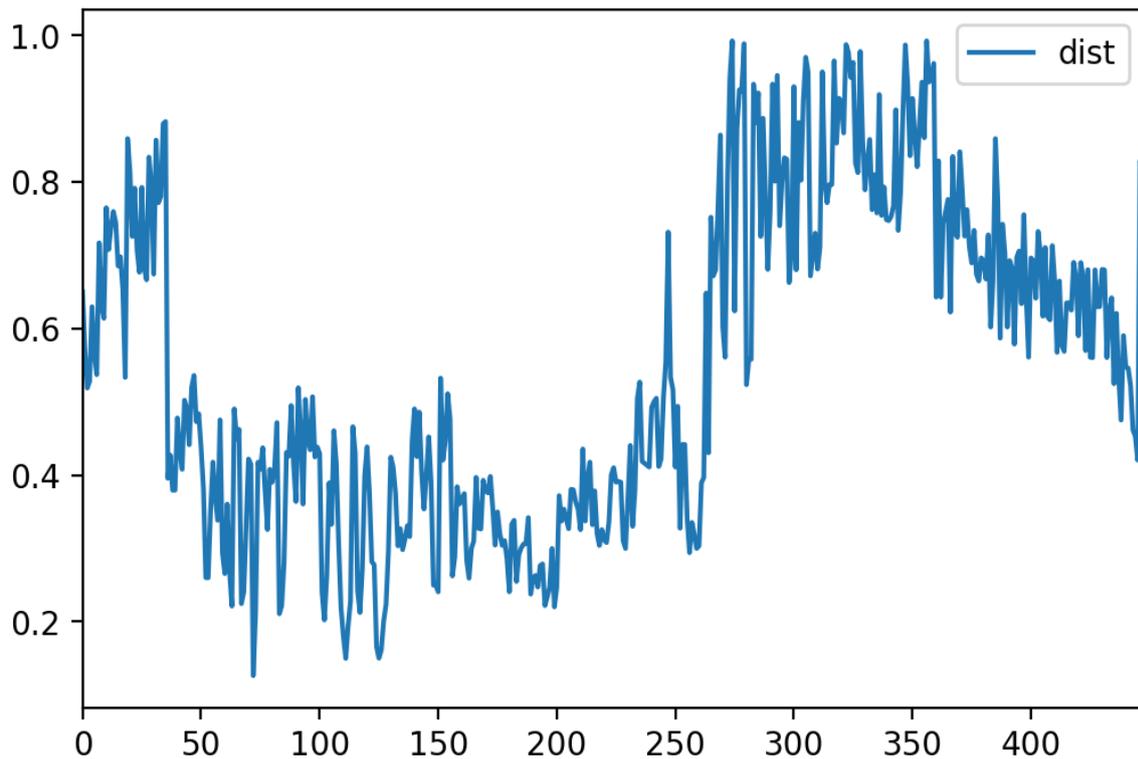


Abbildung 23: Versuchsreihe Use Case 2b

2.1.4.2.4 Use Case 3 Detektion einer freien Fahrspur

Dieser Use Case dient dazu, zu erkennen, wie gut mit dem KameRad-Sensor detektiert werden kann, ob eine freie Fahrbahnfläche groß genug ist, um sie sicher durchfahren zu können, der so genannte Free Space. Dieser Use Case ist in Abbildung 18 dargestellt. Im Rahmen von KameRad wurde zwar eine Objekterkennung entwickelt, jedoch kein Verfahren zur Berechnung von Free Space. Da übliche Algorithmen aber Flächen als Free Space betrachten, in denen keine Objekte vorhanden sind, genügt eine Untersuchung, ob keine Objekte innerhalb der Free Space-Fläche erkannt werden. Daher wurde keine zusätzliche quantitative Untersuchung für diesen Use Case vorgenommen.

Als Free Space wurde eine Lücke zwischen zwei parkenden Autos gewählt, wie sie in Abbildung 24 zu sehen ist. Während der Untersuchung, bei der mehrere Minuten Daten aufgezeichnet wurden, wurde kein einziges falsches Objekt in der Free Space-Fläche detektiert. Vielmehr wurden die beiden die Free Space-Fläche begrenzenden Fahrzeuge korrekt dauerhaft erkannt.



Abbildung 24: Versuchsaufbau Use Case 3

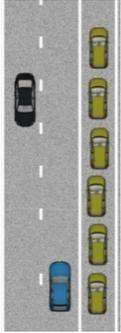


Abbildung 25: Illustration Use Case 3

2.1.4.2.5 Use case 4 Unterscheidung von Getränkedose und Mensch

In Studien zu Radarsensoren wurde festgestellt, dass Getränkedosen zum Teil von Radar als Personen erkannt werden. Der Use Case 4 soll untersuchen, ob mit dem KameRad-Modul solche Fehldetektionen auftreten. Dieser Use Case ist ebenfalls nicht quantitativ zu untersuchen, ebenso entfällt ein Vergleich mit der Referenzsensorik. Die Dose wurde korrekt nicht als Person erkannt über die gesamte Versuchsreihe hinweg. Die als Person zum Vergleich an derselben Stelle wurde hingegen korrekt erkannt. Die beiden Vergleichsszenarien sind in Abbildung 26 und Abbildung 27 zu sehen.



Abbildung 26: Versuchsaufbau Use Case 4: Getränkedose



Abbildung 27: Versuchsaufbau Use Case 4: Person

2.1.4.2.6 Use Case 6 Mehrere Detektionen (Detektion überholender Fahrzeuge)

Use Case 5 beschreibt den Vergleich mehrerer Sensoren beschreibt. Da Fraunhofer FOKUS lediglich über einen Sensor verfügt, der für die Versuche von DCAITI verwendet wurde, ist dieser Use Case außerhalb des Bereichs der urbanen

Evaluation. Andere Projektpartner haben jedoch Studien zum Vergleich von Sensoren durchgeführt.

Daher ist der abschließende Use Case der Use Case 6, bei dem laut Beschreibung im Use Case-Dokument ein zusätzlicher KameRad-Sensor seitlich am Fahrzeug angebracht werden soll, um überholende Fahrzeuge zu detektieren.

Eine neue Montage und Kalibrierung der Sensoren hätte eine zusätzliche Fehlerquelle bedeutet. Ein seitlich am Fahrzeug längs vorbeifahrendes Objekt entspricht für den Sensor einem vor dem Auto quer vorbeifahrenden Objekt. Daher wurde für diesen Use Case das Szenario eines quer vor dem Versuchsträger vorbeifahrenden Fahrzeugs untersucht wurde. Der Aufbau für dieses Szenario ist wie bei Use Case 2a, jedoch mit einem Fahrzeug anstatt einer Person.

Ergebnisse:

Mittlere Abweichung: 0.322m

Median: 0.273m

Standardabweichung: 0.154m

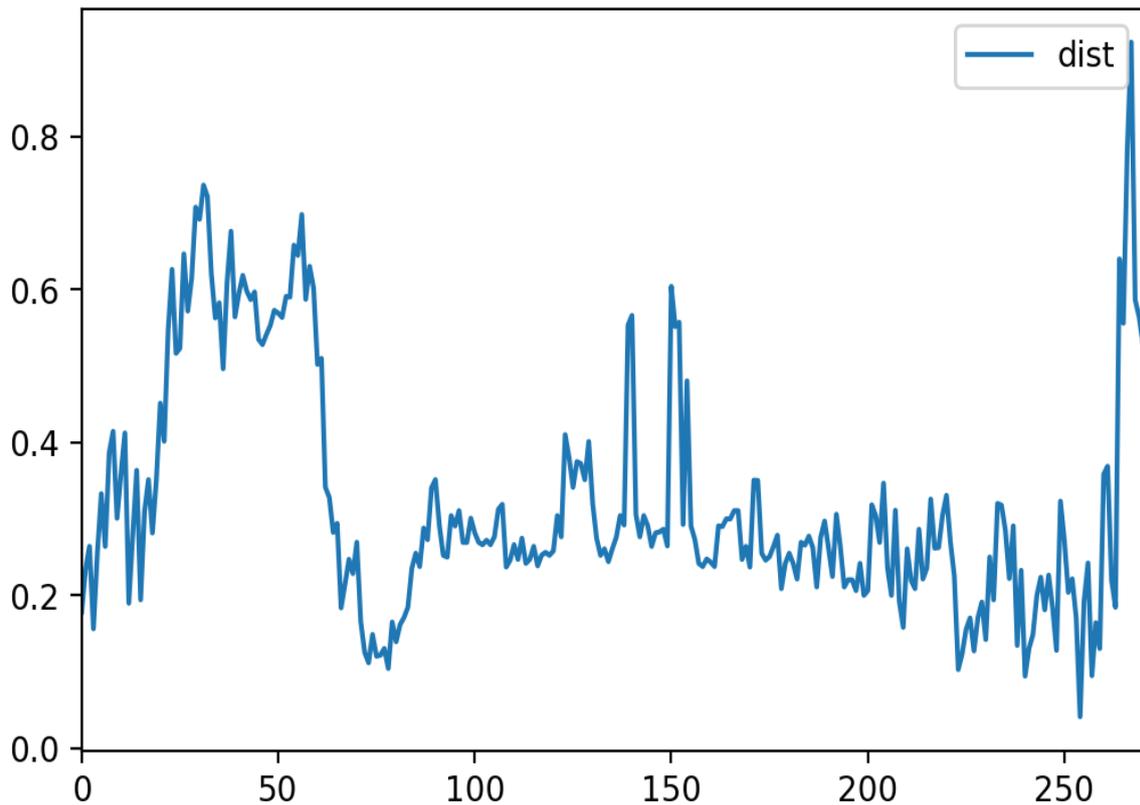


Abbildung 28: Versuchsreihe Use Case 6

2.1.4.3 Zusammenfassung und Ausblick

Bei den Untersuchungen wurden die Use Cases 1, 2a, 2b, 3, 4, und 6 untersucht. Davon wurden die Use Cases 1, 2a, 2b und 6 quantitativ untersucht und die Use Cases 3 und 4 jeweils qualitativ. Die Untersuchungen ergaben eine maximale mittlere Abweichung von ca. 0,5m bei der Versuchsreihe mit einer längs am Fahrzeug vorbeigehenden Person (Use Case 2b). Das stellt auch den schwierigsten Use Case dar, da die Person nur am Rand des Sensorbereichs auftaucht und auch Personen im Gegensatz zu metallischen Fahrzeugen schwieriger durch den Radar zu detektieren sind. Der zu erwartende Sachverhalt, dass Fahrzeuge besser zu detektieren sind als Personen ist in den Versuchsergebnissen ebenfalls zu erkennen. Eine Übersicht über alle Messergebnisse ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Übersicht der Versuchsergebnisse

	Use Case 1 Fahrzeug frontal	Use Case 2a Person quer	Use Case 2b Person längs	Use Case 6 Fahrzeug quer
Mittlere Abweichung	0.119m	0.341m	0.547m	0.322m
Median	0.058m	0.244m	0.519m	0.273m
Standardabweichung	0.188m	0.241m	0.219m	0.154m

Weitergehende Untersuchungsgegenstände für zukünftige Forschungsprojekte können Versuche auf einem abgeschlossenen Gelände bei höheren Geschwindigkeiten sein. Außerdem könnten verschiedene Positionierungen des Sensors am Fahrzeug miteinander verglichen werden, z.B. auf dem Dach oder unter der Stoßstange. In weiteren Versuchen könnten die Detektionen zur Steuerung von automatisierten Fahrzeugen auf ihre Eignung während der Fahrt untersucht werden.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Position	Bewilligte Mittel	Ausgaben
Gemäß Gesamtfinanzierungsplan		
0812 Personalmittel	107.752,00 EUR	120.876,89 EUR
0846 Dienstreisen	4.718,28 EUR	1.536,44 EUR
<i>(Sonstige</i>	<i>10.537,72 EUR)</i>	<i>n. V.</i>
<hr/>		
	123.007,00 EUR	<u>122.413,33 EUR</u>

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Projekt KameRad geleistete Arbeit sowie die dafür aufgewendeten Budgetmittel waren notwendig und angemessen. Die im Projektantrag gestellten Ziele wurden mit den aufgewendeten Mitteln erreicht. Darüber hinaus konnten kostenneutral weitere Aktivitäten vorgenommen werden, wie eine Kooperation mit Fraunhofer FOKUS um das Kamera-Sensormodul vorab unter Laborbedingungen zu testen. Diese Versuche dienten zur Vorbereitung der Testfahrten mit einem realen Versuchsfahrzeug.

2.4 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die in KameRad erzielten Ergebnisse werden in der Automobilindustrie sowie in der Forschung in zukünftigen Hardware- und Software-Entwicklungen für automatisierte Fahrfunktionen eingesetzt werden können.

- Integriertes Kamera- und Radarsensormodul
- Fusionssoftware zur Fusion von Kamera- und Radar-Daten
- Fusionssoftware zur Fusion von Kamera- und LIDAR-Daten
- Aufzeichnungs- und Replaytool für Sensordaten
- Software zur Validierung und Bewertung von Sensordaten
- Auswertung- und Validierungstools für weitere Forschungsprototypen und Serienproduktion
- Erweiterbares universal einsetzbares Sensor-Rig
- Einsatz der Projektergebnisse in Lehre und Forschung an der TU Berlin (u.a. Seminar „Autonome Fahrzeuge“)

2.5 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

2.5.1 SAFARI

Parallel zu KameRad wurde das Projekt SAFARI durchgeführt (<https://www.testfeld-berlin.de/>). In SAFARI wurde ein System entwickelt, welches sicheres automatisiertes und vernetztes Fahren ermöglicht. Ein Schwerpunkt des SAFARI-Projekts war die automatisierte Aktualisierung von hochgenauen Kartendaten. Dazu wurde ein Perzeptionssystem entwickelt, das mit LIDAR- und Kamera-Daten arbeitet. Ein zuverlässiges Wahrnehmungssystem wurde entwickelt. An SAFARI waren ebenfalls namhafte Industriepartner wie IAV, Hella Aglaia oder Deutsche Telekom sowie renommierte Wissenschaftseinrichtungen wie die TU Berlin, die FU Berlin und Fraunhofer FOKUS beteiligt.

2.5.2 Diginet-PS

Während der Laufzeit von KameRad wurde in Berlin im Rahmen des Projekts Diginet-PS (<https://diginet-ps.de/>) ein Testfeld für automatisiertes und vernetztes Fahren auf der Protokollstrecke der Straße des 17. Juni aufgebaut. Bereits beim Aufbau dieser Teststrecke wurden verschiedene Algorithmen zur Detektion von Objekten und zur Planung von automatisierten Fahrmanövern erprobt. Bei den verschiedenen Partnern im Projekt Diginet-PS kamen unterschiedliche Perzeptionssysteme wie LIDAR und Kamera zum Einsatz. An Diginet-PS waren bedeutende Industriepartner wie T-Systems, Cisco und TÜV Nord sowie bekannte Wissenschaftseinrichtungen wie die TU Berlin und Fraunhofer FOKUS beteiligt. Das Projekt wurde von der Berliner Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin unterstützt.

2.6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

- 1) Tschoban, Christian, et al. "Development of a Glass Technology Based 79 GHz MIMO Radar Front-End Module for Autonomous Driving." 2019 IEEE 21st Electronics Packaging Technology Conference (EPTC). IEEE, 2019.
- 2) Präsentation der Projektergebnisse beim Elevate-Cluster Online-Meeting

3 Literaturverzeichnis

- [1] C. Olaverri, “Road environment perception lab of Toyota CRDL [ITS research lab],” *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. 2015, doi: 10.1109/MITS.2015.2408142.
- [2] H. Cho, Y. W. Seo, B. V. K. V. Kumar, and R. R. Rajkumar, “A multi-sensor fusion system for moving object detection and tracking in urban driving environments,” in *Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2014, doi: 10.1109/ICRA.2014.6907100.
- [3] “fishcamp,” [Online]. Available: http://www.fishcamp.com/pdf/mt9m001_1300_mono.pdf. [Zugriff am 19 Mai 2020]. .
- [4] “Freescale,” [Online]. Available: www.freescale.com/files/sensors/doc/data_sheet/MCM20027.pdf. [Zugriff am 19 Mai 2020]. .
- [5] J. Hasch, E. Topak, R. Schnabel, T. Zwick, R. Weigel, and C. Waldschmidt, “Millimeter-wave technology for automotive radar sensors in the 77 GHz frequency band,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 2012, doi: 10.1109/TMTT.2011.2178427.
- [6] H. Winner, S. Hakuli, and G. Wolf, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 2009.
- [7] A. Sotiras, C. Davatzikos, and N. Paragios, “Deformable medical image registration: A survey,” *IEEE Trans. Med. Imaging*, 2013, doi: 10.1109/TMI.2013.2265603.
- [8] S. Suri and P. Reinartz, “Mutual-information-based registration of TerraSAR-X and ikonos imagery in Urban areas,” *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2010, doi: 10.1109/TGRS.2009.2034842.
- [9] C. Yue and W. Jiang, “Automatic SAR and optical images registration method based on improved SIFT,” in *Image and Signal Processing for Remote Sensing XX*, 2014, doi: 10.1117/12.2175937.
- [10] H. Kim, C. D. Correa, and N. Max, “Automatic registration of LiDAR and optical imagery using depth map stereo,” in *2014 IEEE International Conference on Computational Photography, ICCP 2014*, 2014, doi: 10.1109/ICCPHOT.2014.6831821.
- [11] B. O. Abayowa, A. Yilmaz, and R. C. Hardie, “Automatic registration of optical aerial imagery to a LiDAR point cloud for generation of city models,” *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 2015, doi: 10.1016/j.isprs.2015.05.006.
- [12] S. A. Rodríguez Flórez, V. Frémont, P. Bonnifait, and V. Cherfaoui, “Multi-modal

object detection and localization for high integrity driving assistance,” *Mach. Vis. Appl.*, 2014, doi: 10.1007/s00138-011-0386-0.

- [13] “Delphi,” [Online]. Available: <http://delphi.com/manufacturers/auto/safety/active/racam>. [Zugriff am 19. Oktober 2015]. .
- [14] M. Wilke *et al.*, “Prospects and limits in wafer-level-packaging of image sensors,” in *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*, 2011, doi: 10.1109/ECTC.2011.5898775.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Schlussbericht KameRad für das Daimler Center for Automotive IT Innovations (DCAITI) an der TU Berlin	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Bernd Schäufele	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.01.2020
	6. Veröffentlichungsdatum 20.05.2020
	7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Daimler Center for Automotive Information Technology Innovations (DCAITI) Technische Universität Berlin – Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik – Institut für Telekommunikationssysteme Ernst-Reuter-Platz 7 10587 Berlin	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 16ES0571K
	11. Seitenzahl 59
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben
	14. Tabellen
	15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)	
18. Kurzfassung In KameRad wurde eine redundante Sensorplattform für autonome Fahrmanöver im urbanen und landschaftlichen Bereich entwickelt. Die entwickelte Hardware-Plattform ermöglicht den Einsatz von KI-Technologien. In der Hardware-Plattform findet bereits eine Vorverarbeitung der Daten statt, so dass ein dezentrales Sensornetzwerk aus mehreren Plattformen aufgebaut werden kann. Die Plattform ermöglicht, smarte Sensormodule mit Kameraeinheit und Radar sowie mit einer leistungsfähigen Recheneinheit zu realisieren. Ein 79 GHz Radar-Sensor stellt zusammen mit einem integrierten Kamera-System die Basis des Sensormoduls dar. Für die hohe Rechenleistung bei gleichzeitig geringer Latenz wurde das hochintegrierte KameRad-Modul entwickelt. Das DCAITI hat in diesem Vorhaben maßgeblich an der Entwicklung der urbanen Use Cases mitgewirkt. Während der Entwicklung der Hardware-Plattform wurde durch das DCAITI ein Perzeptionsframework implementiert, das mit LIDAR- und Kamera-Daten eine Referenzsensorik für das KameRad-Modul bietet. Zur Auswertung wurde ein leistungsfähiges Framework für die Aufzeichnung, das Abspielen und die Auswertung von Sensor-Daten erstellt. Dieses Framework kam bei der Erprobung der urbanen Use Cases zum Einsatz. Bei der Erprobung wurden in verschiedenen Szenarien die Daten des KameRad-Moduls sowie der Referenzsensorik aufgezeichnet. Mit dem Auswertungsframework konnte das DCAITI anschließend die erhobenen Daten auswerten.	
19. Schlagwörter	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title Final report KameRad for the Daimler Center for Automotive IT Innovations (DCAITI) at the TU Berlin	
4. author(s) (family name, first name(s)) Bernd Schäufele	5. end of project 31.01.2020
	6. publication date 20.05.2020
	7. form of publication
8. performing organization(s) (name, address) Daimler Center for Automotive Information Technology Innovations (DCAITI) Technische Universität Berlin – Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik – Institut für Telekommunikationssysteme Ernst-Reuter-Platz 7 10587 Berlin	9. originator's report no.
	10. reference no. 16ES0571K
	11. no. of pages 59
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references
	14. no. of tables
	15. no. of figures
16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)	
18. abstract In KameRad, a redundant sensor platform for autonomous driving maneuvers in urban and agricultural environments was developed. The developed hardware platform enables the use of AI technologies. Pre-processing of the data is performed already on the hardware board, so that a decentralized sensor network can be set up with several platforms. The platform allows realizing smart sensor modules with a camera unit and a radar sensor and with a powerful computing unit. A 79 GHz radar sensor together with an integrated camera system is the basis of the sensor module. The highly integrated KameRad module was developed for high computing power and low latency. DCAITI played a major role in the development of urban use cases in this project. In parallel to the development of the hardware platform, DCAITI implemented a perception framework that provides a reference sensor for the KameRad module with LIDAR and camera data. A powerful framework for recording, playing and evaluating sensor data was built for the evaluation. This framework was used in the testing of urban use cases. During the test, the data of the KameRad module and the reference sensors were recorded in various scenarios. DCAITI was then able to evaluate the collected data with the help of the evaluation framework.	
19. keywords	
20. publisher	21. price