



Gemeinsamer Schlussbericht der Projektpartner

Forschungsvorhaben:	MobiCell – Mobile Applikation mit Cellular-V2X und Cloud-Service zur Ortung und zum Schutz von Radfahrern und anderen vulnerablen Verkehrsteilnehmern in Gefahrensituationen
Förderkennzeichen:	19F1120A, 19F1120B
Gefördert durch:	Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV)
Verbundkoordinator und Projektpartner:	Institut für Automation und Kommunikation e.V. (ifak) Adresse: Werner- Heisenberg-Straße 1, D-39106 Magdeburg Projektleiter: Dr.-Ing. Alexander Kaiser Förderkennzeichen: 19F1120A
Weiterer Projektpartner:	Fluxguide Ausstellungssysteme GmbH (Fluxguide) Adresse: Kandlgasse 15, A-1070 Wien Projektleiterin: Mag. Carina Doppler Förderkennzeichen: 19F1120B
Laufzeit des Vorhabens:	01.06.2023 – 31.05.2024
Autoren:	Dr.-Ing. Alexander Kaiser (ifak), M.Sc. Jonathan Mischke (ifak), Mag. Carina Doppler (Fluxguide), M.Sc. Sandra Schneider (Fluxguide)
Berichtsort und -datum:	Magdeburg/Wien, 18.11.2024

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzdarstellung	4
1.1	Aufgabenstellung	4
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
1.2.1	Ausgangssituation des Projektthemas.....	5
1.2.2	Voraussetzung der Projektpartner	6
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	7
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	8
1.4.1	V2X-Kommunikation	8
1.4.2	Sensorik	9
1.4.3	Vergleich und Abgrenzung zu ähnlichen FuE-Projekten.....	10
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	13
2	Eingehende Darstellungen	14
2.1	Erzielte Ergebnisse	14
2.1.1	AP 0 Projektmanagement	14
2.1.2	AP 1 Situations- und Anforderungsanalyse	14
2.1.2.1	Situationsanalyse.....	14
2.1.2.2	Anforderungsanalyse	18
2.1.2.3	Anwendungsfallbeschreibung.....	18
2.1.3	AP 2 Systementwurf.....	21
2.1.3.1	Spezifikation der Komponenten und Funktionen	22
2.1.3.2	Kollisionserkennung und Ausweichmanöverberechnung.....	23
2.1.4	AP 3 Realisierung Testsystem	34
2.1.4.1	Smartphone-App.....	34
2.1.4.2	V2X-Kommunikation	37
2.1.4.3	Cloud-Service	39
2.1.5	AP 4 Evaluation Testsystem (Proof of Concept).....	41
2.1.5.1	Planung und Vorbereitung.....	41
2.1.5.2	Durchführung und Auswertung.....	44
2.1.5.3	Schlussfolgerungen.....	52
2.2	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit	54
2.2.1	ifak	54
2.2.2	Fluxguide	54
2.3	Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	55

2.4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen.....55
Literatur.....60

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des als Machbarkeitsstudie angelegten Vorhabens MobiCell bestand darin, die V2X-Kommunikation mittels 5G-Mobilfunk über Smartphones von ungeschützten Verkehrsteilnehmern (VRU: Vulnerable Road Users), insbesondere Radfahrern und Fußgängern, in einem eigenständigen V2X-System prototypisch zu entwickeln, um schließlich die Machbarkeit und Einsatzfähigkeit in praktischen Versuchen zu überprüfen. Dieses neue V2X-System orientiert sich an dem Cellular-V2X-Standard und kann zukünftig in ein übergeordnetes V2X-System von Fahrzeugen und Infrastruktur integriert werden, um somit möglichst alle Verkehrsteilnehmer miteinander zu vernetzen.

Um das finale Ziel zu erreichen, wurde es in mehreren Etappen mit Teilzielen wie folgt geplant und verfolgt (vgl. mit **Abb. 1**):

1. Die Entwicklung des V2X-Testsystems, das einem Proof-of-Concept-Prototyp mit dem Technologiereifegrad 3 entspricht, umfasst

- a. als erstes Teilziel die Entwicklung einer **Smartphone-App (Frontend)**, und
- b. als zweites Teilziel die Entwicklung eines **Cloud-Service (Backend)**.

Durch beide Teilsysteme können zum einen die teilnehmenden VRUs miteinander vernetzt und zum anderen verschiedene V2X-datenbasierte Dienste bereitgestellt werden. Konkret sollten im Vorhaben dafür zwei relevante Anwendungsfälle betrachtet und implementiert werden:

- c. **Kollisionserkennung**: Als ein relevanter Anwendungsfall wird im System ein Algorithmus implementiert, der potenzielle Kollisionen zwischen Verkehrsteilnehmern erkennt und diese davor rechtzeitig durch jeweils geeignete Mittel eines Smartphones (z. B. Tonsignal, Sprachausgabe, Displayanzeige) warnt.
 - d. **Ausweichmanöverberechnung**: Infolge einer Kollisionserkennung wird ein koordiniertes Ausweichmanöver zwischen den betreffenden Verkehrsteilnehmern berechnet und ausgegeben (z. B. für zwei sich begegnende Radfahrer an einem Engpass, die jeweils rechts oder links aneinander vorbeifahren sollen).
 - e. **Sensordatenauswertung**: Die von einem Smartphone jeweils aufgezeichneten und an die Cloud übermittelten Sensordaten (u. a. GNSS-Empfänger, Beschleunigungssensor, Gyroskop, Magnetometer), vor allem in Zeiträumen mit Kollisionswarnungen, sollten gespeichert werden, um für spätere Auswertungszwecke zu unterschiedlichen Fragestellungen, wie z. B. typische Sensordatenmuster für Gefahrensituationen, zur Verfügung zu stehen.
2. Zur **Demonstration** und Überprüfung der Machbarkeit und der Einsatzfähigkeit des prototypisch entwickelten V2X-Testsystems sollten zum Projektende mögliche Gefahrensituationen mit projektinternen Testnutzern als Radfahrer und Fußgänger in realen Umgebungen des Stadtverkehrs simuliert werden.

MobiCell – V2X-Testsystem für ungeschützte Verkehrsteilnehmer

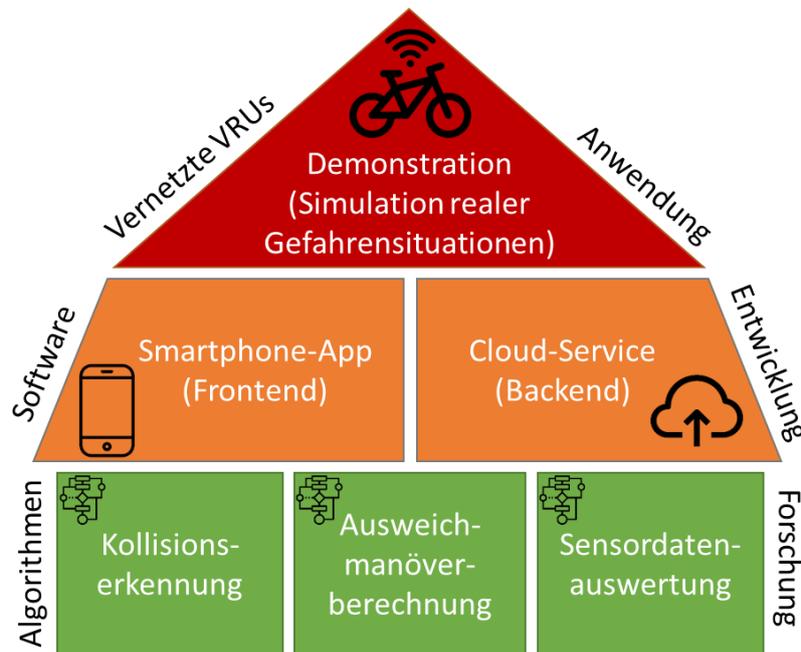


Abb. 1: Systematischer Aufbau der Teilziele im MobiCell-Vorhaben (von unten nach oben)

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

1.2.1 Ausgangssituation des Projektthemas

Das Risiko von körperlichen Schäden für ungeschützte Verkehrsteilnehmer bei Verkehrsunfällen ist überproportional hoch. Fuß- und Radverkehr verursachten 2020 nur etwa 6 % der Verkehrsleistung im Personenverkehr, machten zusammen aber (trotz des pandemiebedingten Gesamtrückgangs der Unfallzahlen) etwa ein Drittel der Getöteten bzw. Verletzten bei Unfällen im Straßenverkehr aus [1]. Da im weiteren Sinne auch Kfz-Nutzer wie Motorradfahrer u. Ä. (aufgrund der fehlenden Schutzhülle) zu den VRUs zählen, waren es sogar fast 50 % [1; 2]. Dabei waren die häufigsten Ursachen Verstöße bzw. Fehlverhalten der Fahrzeugführer bei Vorfahrtsregeln (12 %) sowie beim Einbiegen, Ein- oder Ausfahren oder Wenden (14 %), während schlechte Straßenverhältnisse eher selten zutrafen (3 %) [1].

In solchen Situationen wäre eine Funkkommunikation zwischen sich begegnenden Straßenverkehrsteilnehmern, z. B. an einer unübersichtlichen Einmündung wie in **Abb. 2** skizziert, grundsätzlich sehr sinnvoll, um die jeweiligen Positions- und Fahrtrichtungsdaten auszutauschen und somit die Erfassungslücken zu schließen, die die Fahrzeugführer selbst oder zunehmend unterstützt durch Sensorik im Fahrzeug (z. B. Ultraschall, Video) nicht ausreichend abdecken können.

In der Forschung und Entwicklung zur Kommunikation im Straßenverkehr werden hauptsächlich ITS-G5 (WLAN) und 5G-Mobilfunk verwendet. Der erhoffte Vorteil ist die schnelle und sichere Datenverbindung zwischen den Nutzern ohne externe Infrastruktur. Um die Funkstandards einzuhalten, ist hierbei allerdings in der Regel spezielle Hardware nötig, die zum einen mit relativ hohen Kosten verbunden ist und zum anderen momentan durch Lieferkettenprobleme schwierig zu beschaffen ist. Aufgrund dieser Hürden ist die Verbreitung

in der Praxis selbst nach vielen Jahren der Forschung und Entwicklung relativ gering. Des Weiteren werden vor allem Radfahrer und Fußgänger ausgegrenzt, weil sie keinen Zugriff auf das V2X-Netzwerk der Kraftfahrzeuge und Infrastruktur haben. Dadurch werden sie auch für mögliche Anwendungsfälle bisher kaum in Betracht gezogen. Assistenzsysteme, die aus Sicht der VRUs arbeiten und diese vor Gefahren warnen, sind aktuell maximal in räumlich begrenzten Umgebungen vorhanden und nur auf einzelne Gruppen ausgelegt. Ein kostengünstiges System, das allen (auch ökonomisch schwachen Verkehrsteilnehmern im Sinne der öffentlichen Daseinsvorsorge) zugänglich ist, fehlt momentan.

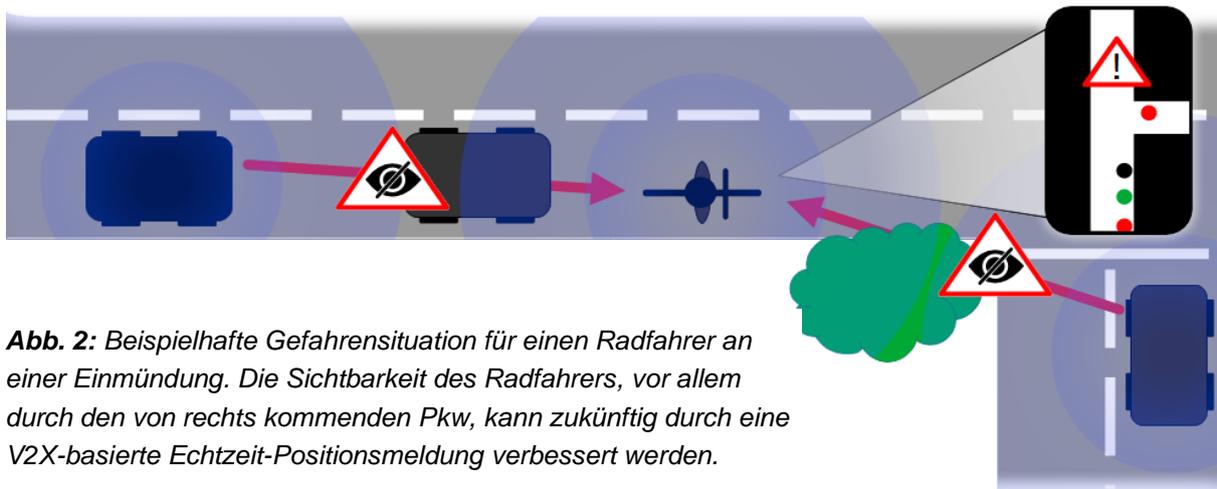


Abb. 2: Beispielhafte Gefahrensituation für einen Radfahrer an einer Einmündung. Die Sichtbarkeit des Radfahrers, vor allem durch den von rechts kommenden Pkw, kann zukünftig durch eine V2X-basierte Echtzeit-Positionsmeldung verbessert werden.

1.2.2 Voraussetzung der Projektpartner

Das MobiCell-Vorhaben wurde am ifak unter günstigen Voraussetzungen durchgeführt. Seit 2008 ist das ifak im Wissenschaftshafen in unmittelbarer Nachbarschaft zur Universität Magdeburg angesiedelt. Daraus resultieren sehr gute infrastrukturelle Voraussetzungen und Kontaktmöglichkeiten zu innovativen Unternehmen und universitären und außeruniversitären Einrichtungen des Wissenschaftsbereichs. Mit seinen mechanischen und elektronischen Werkstätten und seinem Labor-Technikum stehen dem ifak hervorragende personelle und materielle Ressourcen zur Verfügung. Die Nähe zur Universität und den zentralen Einrichtungen erwies sich insbesondere für ausführliche Recherchen von Literatur zum Stand der Wissenschaft und Technik als vorteilhaft.

Fluxguide verfügte über ideale Voraussetzungen für das Forschungsprojekt MobiCell durch seine Erfahrung in Smart City-Projekten, wie dem Start2Park. Dieses Projekt, gefördert vom mFUND des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur, konzentrierte sich auf die Entwicklung von datenbasierten Lösungen für das städtische Parkraummanagement. Dabei wurden Technologien zur Crowdsourcing-basierten Datenerhebung und -analyse eingesetzt, was die Fähigkeit von Fluxguide unterstreicht, komplexe Datensammlungen effizient zu handhaben. Mit Sitz in Wien und umfangreicher internationaler Erfahrung hat Fluxguide gezeigt, dass es die technischen und konzeptionellen Voraussetzungen für anspruchsvolle Projekte wie MobiCell optimal erfüllt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Vorbereitungen für das MobiCell-Projekt erfolgten etwa von Mitte 2022 und bis Anfang 2023, zuerst in Form einer Projektskizze und anschließend durch die Erstellung der entsprechenden Vorhabenbeschreibung, unter anderem mit der detaillierten Arbeits- und Zeitplanung. Demnach wurde das Vorhaben in fünf Arbeitspakete über eine Laufzeit von insgesamt 12 Monaten geplant und durchgeführt (siehe **Tab. 1**). Der zugehörige Zeitplan ist als Gantt-Diagramm in Abb. 3 dargestellt.

Tab. 1: Übersicht der Arbeitspakete des MobiCell-Vorhabens

Nr.	AP-Titel und geplante Inhaltsschwerpunkte	Leitung	Zeitraum
0	Projektmanagement <ul style="list-style-type: none"> • Projektadministration • Öffentlichkeitsarbeit • Wissenstransfer, Vernetzung, Wissenschaftskommunikation 	ifak	01.06.2023 – 31.05.2024
1	Situations- und Anforderungsanalyse <ul style="list-style-type: none"> • Situationsanalyse • Anforderungsanalyse • Anwendungsfallbeschreibung 	ifak	01.06.2023 – 31.08.2023
2	Systementwurf <ul style="list-style-type: none"> • Spezifikation der Komponenten und Funktionen • Kollisionserkennung und Ausweichmanöverberechnung 	ifak	01.08.2023 – 31.10.2023
3	Realisierung Testsystem <ul style="list-style-type: none"> • Smartphone-App • V2X-Kommunikation • Cloud-Service 	Fluxguide	01.09.2023 – 31.03.2024
4	Evaluation Testsystem (Proof of Concept) <ul style="list-style-type: none"> • Planung und Vorbereitung • Durchführung und Auswertung 	ifak	01.03.2024 – 31.05.2024

AP	Thema	Kalendermonat Projektmonat	2023							2024				
			6 1	7 2	8 3	9 4	10 5	11 6	12 7	1 8	2 9	3 10	4 11	5 12
0	Projektmanagement													
0.1	Projektmanagement													
0.2	Öffentlichkeitsarbeit													
0.3	Wissenstransfer, Vernetzung, Wissenschaftskommunikation													
1	Situations- und Anforderungsanalyse													
1.1	Situationsanalyse													
1.2	Anforderungsanalyse													
1.3	Anwendungsfallbeschreibung													
2	Systementwurf													
2.1	Spezifikation der Komponenten und Funktionen													
2.2	Kollisionserkennung und Ausweichmanöverberechnung													
3	Realisierung Testsystem													
3.1	Smartphone-App													
3.2	V2X-Kommunikation													
3.3	Cloud-Service													
4	Evaluation Testsystem (Proof of Concept)													
4.1	Planung und Vorbereitung													
4.2	Durchführung und Auswertung													
Zeitliche Meilensteine (M)					M1		M2					M3	M4+5	
Bezeichnung der Meilensteine: M1: Nutzer- und Systemanforderungen (Spezifikation), M2: Systemarchitektur, M3: Prototyp, M4: Proof of Concept, M5: Erste Daten in der Mobilithek														

Abb. 3: Arbeits- und Zeitplan des MobiCell-Vorhabens als Gantt-Diagramm

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

1.4.1 V2X-Kommunikation

V2X (Vehicle-to-everything) wird dafür verwendet, dass Verkehrsteilnehmer direkt untereinander und mit der Infrastruktur, wie z. B. Lichtsignalanlagen, kommunizieren können. Dadurch ergeben sich neue Möglichkeiten für das automatisierte Fahren und die intelligente Mobilität. So können beispielsweise mögliche Gefahren erkannt werden, bevor sie sich im Sichtfeld des Fahrzeugs befinden.

Aktuell werden weltweit hauptsächlich zwei Ansätze getestet. Der erste Ansatz, DSRC (Dedicated Short-Range Communication) für die USA bzw. ITS-G5 für Europa, basiert auf WLAN IEEE 802.11p (kurz: WLANp bzw. pWLAN). Der etwas neuere, zweite Ansatz wird mit Cellular-V2X (C-V2X) bezeichnet. Er basiert auf Mobilfunk (4G, 5G), was den Vorteil bietet, dass Teilnehmer direkt miteinander, aber auch über ein vorhandenes Mobilfunk-Netzwerk kommunizieren können, wie in **Abb. 4** beispielhaft dargestellt ist. Bei der direkten C-V2X-Kommunikation werden – analog zu ITS-G5 – die jeweils bidirektionalen Kommunikationsformen Vehicle-to-Vehicle (V2V) und Vehicle-to-Infrastructure (V2I) unterschieden. Darüber hinaus ist zum Beispiel mithilfe von Smartphones auch die Integration von VRUs wie Fußgängern (Vehicle-to-Pedestrian – V2P) möglich. Die netzbasierte C-V2X-Kommunikation wird mit Vehicle-to-Network (V2N) bezeichnet und ermöglicht alle der zuvor genannten Formen (V2V, V2I, V2P) und darüber hinaus die Integration von Cloud-Diensten.

Allerdings wird vor allem für den ersten Ansatz, ITS-G5, von allen Teilnehmern spezielle Hardware benötigt. Das verursacht Kosten und Aufwand und gerade in Zeiten von Lieferengpässen sind notwendige Bauteile sehr schwer zu beschaffen. Außerdem sind die

Komponenten aktuell noch relativ groß und nicht auf Energieeffizienz ausgelegt, wodurch es für Verkehrsteilnehmer wie Radfahrer und Fußgänger wenig praktikabel ist, an der V2X-Kommunikation teilzunehmen. Aufgrund der bisher geringen Verbreitung von V2X-Technik in Fahrzeugen sind die Anwendungsmöglichkeiten relativ eingeschränkt.

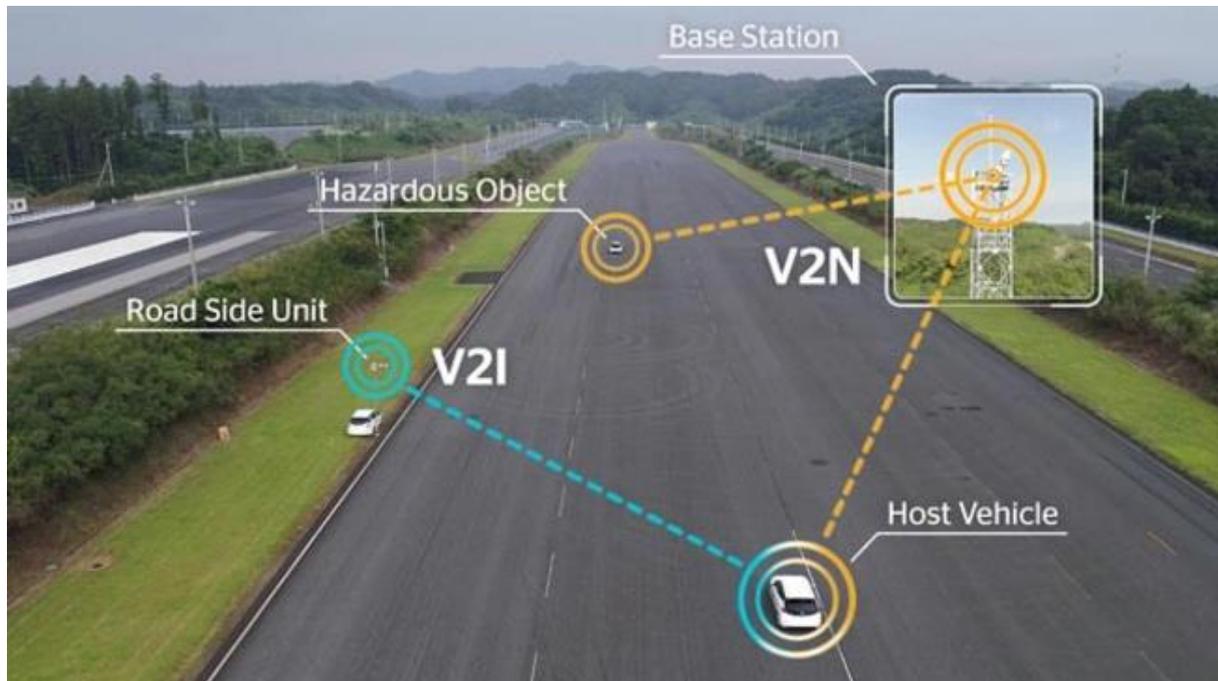


Abb. 4: Direkte versus netzbasierte Kommunikation per C-V2X zwischen Verkehrsteilnehmern und Infrastruktur (Quelle: Continental, verfügbar unter: <https://www.elektroniknet.de/automotive/wirtschaft/cellular-v2x-feldversuche-in-japan-erfolgreich-beendet.160914.html>, zuletzt gesichtet: 05.08.2024)

1.4.2 Sensorik

Die sensorbasierte Zustandserfassung von Fahrrädern bzw. Radfahrern erfolgt entweder mit eingebauten Speziälsensoren, wie z. B. beim an der Hochschule Karlsruhe entwickelten „SensorBike“ [3], oder mittels mobiler Geräte wie einem Smartphone, das in der Regel über diverse Sensoren, unter anderem einen GNSS-Empfänger, Beschleunigungssensor, Gyroskop, Magnetometer, Pulsmesser und eine Kamera, verfügt [4]. Mit diesen Sensoren können im Prinzip auch die Positions- und Bewegungsdaten eines Fahrrads bzw. der innerliche oder äußerliche Zustand des Fahrers erfasst werden.

In letzter Zeit werden immer mehr Smartphones mit Zweifrequenz-GNSS-Empfängern ausgestattet, wodurch die Genauigkeit der Lokalisierung deutlich verbessert wird. Auch wenn die Präzision noch nicht immer mit dedizierten GNSS-Empfängern mithalten kann, werden dadurch neue Möglichkeiten zur Nutzung von Smartphones geschaffen [5]. Zur Ortung können alternativ oder zusätzlich Mobilfunk- und WLAN-Daten eingesetzt werden, da dieses Verfahren deutlich weniger Zeit und Energie (Akkuladung) verbraucht als mit dem GNSS-Empfänger, wobei das eingesetzte Verfahren nach der erforderlichen Genauigkeit (bei GNSS grundsätzlich am höchsten) automatisch bestimmt wird [6].

Darüber hinaus verfügen Smartphones über eine ausreichende Rechenleistung zur Verarbeitung der Sensor- und V2X-Kommunikationsdaten sowie einen Touchscreen für Nutzerinteraktionen, sind jedoch aufgrund ihrer begrenzten Akkuladung und fehlender Lademöglichkeit während der Fahrt (außer z. B. bei E-Bikes mit Bordcomputer) nicht für längere Distanzen bzw. Fahrzeiten geeignet [7; 8].

1.4.3 Vergleich und Abgrenzung zu ähnlichen FuE-Projekten

Wie in der folgenden Tab. 2 gegenübergestellt, wurden vor Beginn des Vorhabens insgesamt neun aktuelle Projekte in den Themengebieten Verkehrskommunikation und Radfahrerschutz recherchiert und hinsichtlich der Gemeinsamkeiten und Unterschiede mit MobiCell verglichen (siehe rot markierte Spalte in Tab. 2).

Demnach wird in zwei Projekten (RadImFokus, Bike2CAV) auch eine V2X-Kommunikation mit MIV- und ÖPNV-Fahrzeugen eingesetzt, allerdings nicht per Mobilfunk und Smartphone, sondern mit spezieller Hardware für ITS-G5. So kann jedoch nicht die Interaktion zwischen verschiedenen VRUs bzw. Radfahrern mittels Smartphone (wie bei MobiCell) betrachtet werden. In vier Projekten wird ebenso die vorhandene Sensorik von Smartphones genutzt, während drei Projekte direkt am Fahrrad eingebaute Sensoren verwenden bzw. neu entwickeln (OpenBikeSensor, EcoSense, Bike2CAV). Die bei MobiCell im Vordergrund stehende Kollisionswarnung wird bisher nur beim Bike2CAV-Projekt entwickelt, allerdings hier mit dem Fokus auf Kollisionen zwischen Radfahrern und Kfz, während MobiCell diese auch zwischen Radfahrern und Fußgängern bzw. anderen Verkehrsteilnehmern berücksichtigen kann, da letztlich das jeweils mitgeführte Smartphone entscheidend ist.

Des Weiteren erwähnenswert sind die mFUND-Projekte GreenValue und V2X4ALL, da diese zwar auch die V2X-Kommunikation in den Mittelpunkt stellen, sich aber in der Untersuchungsmethode bzw. den Anwendungsfällen von MobiCell wie folgt unterscheiden:

Im Projekt GreenValue (Managementsystem für ein vernetztes, automatisiertes und emissionsreduziertes Verkehrssystem zur Verkehrslenkung auf Basis dynamischer Bepreisungsaspekte) wird eine Verkehrsflusssimulation zur theoretischen Untersuchung der Auswirkungen eines innovativen (marktwirtschaftlichen) Steuerungsansatzes verwendet. Dieser versucht, vernetzte Fahrzeuge anhand ihrer bekannten Positions- und Richtungsdaten in hochausgelasteten Verkehrsräumen in Echtzeit besser zu verteilen. Demnach bezieht sich der Anwendungsfall des Projekts vor allem auf Kraftfahrzeuge – und nicht auf Fahrräder und Fußgänger wie bei MobiCell. Außerdem wird bei MobiCell die Machbarkeit durch praktische Tests untersucht.

Im Projekt V2X4ALL (Kooperative Verkehrssysteme für alle Verkehrsteilnehmer) werden unterschiedliche V2X-Zugangstechnologien (WLANp, Cellular-V2X) verwendet und mit bestehenden Funktechnologien kombiniert, um eine zentrale Datenplattform aufzubauen und alle Nutzer verkehrsträgerübergreifend per App zu verbinden. Analog zu MobiCell stehen dabei die bei V2X bisher kaum berücksichtigten Fußgänger und Radfahrer im Fokus. Im Unterschied zu MobiCell werden jedoch keine konkreten Anwendungsfälle auf Basis von V2X- und Sensordaten wie eine Kollisionserkennung und Ausweichmanöverplanung betrachtet und zur Anwendung gebracht.

Tab. 2: Projektvergleich und -abgrenzung in tabellarischer Übersicht

Projekte (Akronym, Förderer, Laufzeit)	MobiCell (geplant 2023-24)	GefahrenstelleRad (mFUND, 2017-18) ¹	RadImFokus (Sachsen, 2018-21) ²	SimRa (Citizen-Science-Initiative d. TU Berlin) ³	OpenBikeSensor (OpenCitizen-Science-Projekt) ⁴	EcoSense (mFUND, 2019-20) ⁵	Bike2CAV (BMK Österreich, 2020-23) ⁶	FegIS+ (mFUND, 2019-22) ⁷	V2X4ALL (mFUND, 2023) ⁸	GreenValue ⁹ (mFUND, 2022-23) ¹⁰
Projektmerkmale										
Verkehrsteilnehmer								alle	alle	alle
Fußgänger	x									
Radfahrer	x	x	x	x	x	x	x			
MIV (Kfz)			x				x			
ÖPNV (Busse)			x							
Erkennungsziele									sonst.	sonst.
Gefahrenstellen (Ort)		x		x				x		
Gefahrensituationen			x	x						
Mögliche Kollisionen	x						x			
Überholvorgänge					x					
Fahrbahnzustand						x				
Fahrverhaltenseinflüsse						x				
Entwicklungsziele									sonst.	sonst.
Gefahrenwarnungen			x							
Kollisionswarnungen	x						x			
Ausweichmanöver	x									
Kartierung Gefahrenstellen		x		x				x		
Fahrradsensoren										
Seitenabstand					x					
Beschleunigung						x				
Erschütterung						x				
Umwelt und Wetter						x				
Eingangsdaten									nein	
Echtzeit-Sensordaten	x	x	x	x	x	x	x	x		(x)
Histor. Unfalldaten		x	x					x		
Histor. Umweltdaten		x								
LSA-Signalzeiten			x							(x)
Eingesetzte Sensorik									nein	
Smartphone-Sensoren	x	x	x	x				x		(x)
Fahrradsensoren (montiert)					x	x	x			
Datenauswertung									nein	
Echtzeit	x		x		x		x			(x)
Nachträglich		x		x		x		x		
Nutzer-Feedback erforderl.				x	x			x		
V2X-Kommunikation	ja	nein	ja	nein	nein	nein	ja	nein	ja	nein
ITS G5 / DRSC			x						x	
C-V2X / Mobilfunk	x								x	
VRU – VRU (Smartph.)	x								x	
Fahrrad – Kfz (CAVs)							x			

¹ <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/ Gefahrenstellen-fuer-radfahrer-in-navigationsanwendungen.html>

² <https://www.tu-chemnitz.de/hsw/psychologie/professuren/fgaap/verkehr/RadimFokus.php>, [9]

³ <https://www.digital-future.berlin/forschung/projekte/simra/>

⁴ <https://www.openbikesensor.org/>

⁵ <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/ecosense.html>

⁶ <https://www.bike2cav.at/>

⁷ <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/fegis-plus.html>, [10]

⁸ <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/v2x4all.html>

⁹ Die Kennzeichnung mit (x) bedeutet: Die Daten werden ausschließlich in einem Simulationsmodell erzeugt.

¹⁰ <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/greenvalue.html>

Im Forschungsbereich des automatisierten und vernetzten Fahrens (AVF) widmen sich weitere, vom BMDV geförderte Projekte dem Schutz von vulnerablen Verkehrsteilnehmern mithilfe von technischen Lösungen. Diese weisen im Vergleich zum MobiCell-Vorhaben die folgenden Gemeinsamkeiten und Unterschiede sowie potenzielle Synergien auf:

Im Projekt KI-MONO-EF¹¹ werden unterschiedliche, infrastrukturseitige Sensorsysteme (Radar, Lidar und Infrarot-Kamera) zur automatischen Erkennung von Personen mit Behinderungen exemplarisch an LSA-geregelten Fußgängerüberwegen und Haltestellen des ÖPNV untersucht. Das praktische Ziel ist eine entsprechende Verlängerung von Grünphasen für Fußgänger bzw. eine entsprechende Information an Fahrer von Bussen und Bahnen, falls Personen mit Behinderung erkannt werden. Perspektivisch können diese Informationen auch per V2X-Schnittstellen an automatisierte Fahrzeuge übermittelt werden, was jedoch nicht im Rahmen des Projekts realisiert wird. Ein wesentlicher Unterschied zu MobiCell besteht darin, dass keine personenseitigen, mobilen Sensoren wie in den Smartphones der Verkehrsteilnehmer eingesetzt werden. Somit fehlen insbesondere die exakten Positionsdaten (Geo-Koordinaten) der Personen, die durch mitgeführte Smartphones ermittelt werden können. Um beide Systeme perspektivisch zu integrieren und Synergieeffekte zu erreichen, könnten beispielsweise die Positions- und Bewegungsdaten vom MobiCell-System an die RSUs des KI-MONO-EF-Systems gesendet werden. Dadurch könnten sich entsprechend ausweisende Personen früher erkannt werden, wenn sie sich auf den LSA- bzw. Haltestellenbereich außerhalb der Sensorerfassung zubewegen.

In der 2021 durchgeführten Machbarkeitsstudie ARCADIA¹² wurde der Einsatz von Drohnen und Leichtflugzeugen zur kamerabasierten Erfassung von realen Verkehrs- und Unfallsituationen an ausgewählten Unfallschwerpunkten untersucht. Im Fokus standen dabei ebenso ungeschützte Verkehrsteilnehmer, mit besonderer Berücksichtigung der neuen Verkehrsmittel Pedelec, E-Bike und E-Scooter. Anhand der Videobilder wurden die relevanten Daten wie „Trajektorien, laterale und radiale Geschwindigkeiten oder Kurvenradien-Fahrverhalten“ der Verkehrsteilnehmer berechnet. Trotz der Beweglichkeit der Drohnen bzw. Leichtflugzeuge handelt es sich im Prinzip um eine infrastrukturseitige Sensorik, die zwar die Ermittlung sehr genauer Daten im Nachhinein ermöglicht, aber nicht unmittelbar mit den einzelnen VRUs per Smartphone vernetzt ist, sodass auch keine rechtzeitigen Warnmeldungen in ortsunabhängigen Gefahrensituationen zur Unfallvermeidung, wie beim MobiCell-System, erfolgen können. Da das ARCADIA-System unter anderem dem Testen von Assistenzsystemen dienen soll, könnte dieses perspektivisch auch zum gegenseitigen Testen und Validieren solcher Systeme (z. B. ARCADIA versus MobiCell) eingesetzt werden.

Beim größer skalierten Verbundvorhaben TEMPUS¹³ handelt es sich um ein Testfeld für automatisiertes und vernetztes Fahren im Norden von München. Im Unterschied zu den zuvor erwähnten Projekten, einschließlich MobiCell, werden hier fast alle denkbaren

¹¹ KI- und M2M-basierte Optimierung der Sicherheit und des Komforts für Menschen mit Mobilitätseinschränkungen im Nichtmotorisierten Individualverkehr in der Ortslage ERFURTS (<https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/kimono-ef.html>, <https://www.youtube.com/watch?v=UB1-OYHq9cl>)

¹² Airborne tRaffiC AcciDent Identification – PoC Analysis (<https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/arcadia.html>)

¹³ Testfeld München – Pilotversuch urbaner automatisierter Straßenverkehr (<https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/AVF-projekte/tempus.html>, <https://tempus-muenchen.de>)

Anwendungsfälle mit Fokus auf den Individualverkehr und den ÖPNV abgedeckt, wie z. B. ein infrastrukturseitiger, kamerabasierter Abbiegeassistent für Kfz zum Schutz von Radfahrern an Kreuzungen.¹⁴ Untersucht werden dabei auch mithilfe von Simulationen die „vielfältigen technischen und infrastrukturellen Voraussetzungen für die Einführung von AVF“ (automatisierte und vernetzte Fahrzeuge) sowie die verkehrlichen Wirkungen von AVFs auf VRUs, das heißt den Fahrrad- und Fußverkehr. Da im MobiCell-Vorhaben ebenso der Abbiegevorgang an Kreuzungen eine relevante Gefahrensituation für VRUs darstellt, die jedoch im Unterschied zu TEMPUS mit einem personenseitigen Assistenzsystem für Radfahrer und Fußgänger (zunächst ohne Einbeziehung von Kfz-Nutzern) betrachtet wird, wäre eine vergleichende Untersuchung der Wirksamkeit beider Systeme denkbar, die einzeln sowie in Kombination an derselben Kreuzung eingesetzt werden. Dazu könnte ein Kfz-Nutzer über ein im Cockpit befestigtes Smartphone an dem MobiCell-Assistenzsystem teilnehmen.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Vor und während der Projektlaufzeit war die externe Zusammenarbeit vor allem durch die regelmäßige Kommunikation per E-Mail und Telefon mit den fachlichen und administrativen Ansprechpartnern beim Projektträger VDI/VDE-IT sowie beim Bundesministerium für Digitales und Verkehr geprägt. Des Weiteren fanden Fachgespräche, insbesondere mit den Mitgliedern von anderen mFUND-Projektkonsortien, unter anderem bei der mFUND-Konferenz im Dezember 2023 in Berlin, statt.

Für das MobiCell-Projekt konnte das ifak die bestehenden Kontakte zur Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), zur Stadt Gießen und zur Yunex GmbH für einen regelmäßigen Fach- und Erfahrungsaustausch zum Thema „Technische Assistenzsysteme zur Erhöhung der Radverkehrssicherheit“ nutzen, da parallel zum MobiCell-Projekt durch das ifak ein ähnliches Forschungsprojekt im Auftrag der BASt durchgeführt wurde.¹⁵

Ferner konnte das ifak für die Entwicklung und Erprobung von Komponenten, Systemen und Applikationen auf gewachsene technische und organisatorische Infrastrukturen in der Landeshauptstadt Magdeburg zurückgreifen. So ist seit 2005 im Rahmen der Initiative „Angewandte Verkehrsforschung / Galileo Transport Sachsen-Anhalt“ ein weiträumiges landesweites Testfeld als „Digitales Anwendungszentrum“ entstanden, in dem neue Dienstleistungen und Produkte für Ortung, Navigation und Kommunikation in den Bereichen Verkehr (Straße und Schiene) und Logistik entwickelt und umgesetzt werden.

¹⁴ an der Kreuzung Allacher Str./Wintrichring in München (siehe: <https://tempus-muenchen.de/karte>)

¹⁵ FE-Nr. 77.0602/2022 „Detektion von Radfahrern im signalgeregelten Bereich von Knotenpunkten in Verbindung mit Absetzung einer Warnmeldung für Kraftfahrzeuge“ (siehe: <https://fops.de/fops-projekte/>)

2 Eingehende Darstellungen

2.1 Erzielte Ergebnisse

2.1.1 AP 0 Projektmanagement

Im Rahmen des AP 0 war das ifak in der Rolle des Projektkoordinators für die Planung, Steuerung und Kontrolle des Gesamtvorhabens verantwortlich. Das ifak stand dem Projektträger oder dem Zuwendungsgeber als erster Ansprechpartner zur Verfügung. Durch das Projektmanagement wurde eine dem Zeit- und Arbeitsplan entsprechende Projektbearbeitung und fristgerechte Erstellung von Zwischen- und Schlussberichten sichergestellt. Im Fall von Konflikten hätte das ifak als schlichtende Instanz agiert. Zudem war es als außeruniversitäre Forschungseinrichtung, die seit über 30 Jahren existiert, für die Einhaltung von wissenschaftlichen Standards, insbesondere bei der Erhebung und Auswertung von Daten sowie bei der Erstellung von Publikationen, verantwortlich.

Im Einzelnen untergliederte sich das AP 0 in folgende drei Unterarbeitspakete, die ausschließlich durch das ifak geleitet und bearbeitet wurden:

- AP 0.1 Projektmanagement
- AP 0.2 Öffentlichkeitsarbeit
- AP 0.3 Wissenstransfer, Vernetzung, Wissenschaftskommunikation

2.1.2 AP 1 Situations- und Anforderungsanalyse

Das Ziel von AP 1 bestand in einer Detailanalyse und -beschreibung der Projektzielstellung und Ausgangssituation sowie einer Spezifikation der Anforderungen an die zu entwickelnde Lösung. Hierzu wurden zunächst die Verfügbarkeit und technischen Bedingungen der Hauptkomponenten des Systems (u. a. bezüglich Sensorik, Schnittstellen und Akkus von Smartphones, V2X-Hardware, Webserver, Mobilfunk und Programmiersprachen) ermittelt. Außerdem wurde eine Recherche zu den Daten- und Stromversorgungsschnittstellen (Bordcomputer, Akku) von verschiedenen Fahrrädern bzw. Mikromobilen (E-Bike, E-Scooter) sowie Anbringungsmöglichkeiten für Smartphones am Lenker (Halterungen) durchgeführt. Ebenso wurden geeignete Auswertungsverfahren mit entsprechenden Software-Bibliotheken (in JavaScript und Python) für die Sensordaten recherchiert und ausgewählt. Schließlich wurden die vorrangigen Anwendungsfälle des neuen Assistenzsystems für Fußgänger und Radfahrer festgelegt und beschrieben.

Im Einzelnen untergliederte sich das AP 1 in folgende drei Unterarbeitspakete:

- AP 1.1 Situationsanalyse
- AP 1.2 Anforderungsanalyse
- AP 1.3 Anwendungsfallbeschreibung

2.1.2.1 Situationsanalyse

Sensoren von Smartphones

In aktuellen Smartphones sind in der Regel mindestens folgende Sensoren verbaut:

- 3-Achsen-Gyroskop
- 3-Achsen-Magnetometer
- 3-Achsen-Beschleunigungssensor
- GNSS-Empfänger (Ein- oder Zweifrequenzempfänger)
- WiFi-Transmitter
- Mobilfunktransmitter

In einigen Smartphone-Modellen werden auch UWB-Transmitter, Barometer, Infrarot und Näherungssensoren verbaut. Da das System allerdings modellunabhängig funktionieren soll, wird auf diese Sensoren verzichtet.

Das Gyroskop ist ein Drehratensensor, der die Drehgeschwindigkeit um die einzelnen Achsen des Smartphones messen kann.

Das Magnetometer kann niederfrequente Magnetfelder messen. Mithilfe des Erdmagnetfeldes kann somit die Orientierung des Smartphones auf der Erde bestimmt werden. Durch Störmagnetfelder (beispielsweise von in Halterungen verbaute Magneten) und ferromagnetische Bauteile in der Nähe des Sensors können die Sensordaten stark verfälscht werden.

Der Beschleunigungssensor (engl.: accelerometer) dient zur Messung der Beschleunigung des Smartphones. Anhand der Gravitation (Erdbeschleunigung) kann die Orientierung des Smartphones bestimmt werden.

Der GNSS-Empfänger ermöglicht die absolute Positionsbestimmung auf der Erde. Dabei ist die Qualität der Messergebnisse abhängig von der Sichtqualität zu den GNSS-Satelliten. Dualfrequenz-Empfänger nutzen zwei Frequenzbereiche für die GNSS-Signale, wodurch frequenzabhängige Störungen minimiert werden können.

WiFi- und Mobilfunktransmitter können auf verschiedene Weise genutzt werden, um eine Position zu bestimmen. Je mehr WiFi- und Mobilfunksender sich in einem Gebiet befinden, desto bessere Ergebnisse sind zu erwarten. Im einfachsten Verfahren wird die Position über die Signalstärke bestimmt. Da diese allerdings in bebauten Gebieten oft wenig Aussagekraft über die Distanz zwischen Sender und Empfänger hat, erreichen andere Verfahren wie Laufzeitmessungen bessere Ergebnisse.

Für die Sensoren werden von den verschiedenen Smartphone-Herstellern unterschiedliche Chips verwendet, wobei sich hauptsächlich bei den GNSS-Empfängern merkbare Unterschiede aufgrund der Verwendung von Zweifrequenzempfängern ergeben.

Einige der vorhandenen Sensoren können genutzt werden, um dieselbe Kenngröße zu messen. Jedoch sind die Messwerte mit unterschiedlichen Fehlern behaftet. Mithilfe eines Kalman-Filters können Messwerte unterschiedlicher Sensoren genutzt werden, um den Einfluss der Messfehler auf das Endergebnis zu minimieren. Zum Beispiel sind die Messwerte eines Beschleunigungssensors gut geeignet, um schnelle Bewegungsänderungen zu erkennen. Will man allerdings eine Position durch eine Doppelintegration der Messwerte

bestimmen, summieren sich die Messfehler mit der Zeit immer weiter auf, wodurch ein starker Drift entsteht. Die Messwerte des GNSS-Empfängers reagieren zwar relativ langsam auf Bewegungsänderungen, leiden aber unter keinem Drift. Durch einen passend eingestellten Kalman-Filter können die Stärken der Sensoren genutzt und die Schwächen minimiert werden.

Aktuelle Smartphone-Betriebssysteme bieten bereits Dienste an, die die verschiedenen Sensoren miteinander verknüpfen, um sowohl in bebauten als auch unbebauten Gebieten die tatsächliche Position bestmöglich zu bestimmen und für Applikationen bereitzustellen.

Die verschiedenen Sensoren haben unter anderem aufgrund des Energieverbrauchs unterschiedlich hohe Abtastraten. So liefern GNSS-Sensoren in der Regel seltener neue Messergebnisse als die Sensoren der Inertial Measurement Unit (IMU).

Energieversorgung von Smartphones

Akkus in Smartphones sind darauf ausgelegt, die Energieversorgung für mindestens einen Tag bei normaler Nutzung bereitzustellen. Dafür werden normalerweise Akkus mit einer Kapazität von 15-18 Wh verwendet. GNSS-Empfänger gelten aktuell noch als relativ leistungsintensiv im Verhältnis zu anderen Smartphone-Sensoren, allerdings gibt es heutzutage bereits einen Zweifrequenzempfänger mit einer Leistungsaufnahme von lediglich 6 Milliwatt, der bei einem durchschnittlichen Akku mehrere Tage betrieben werden kann.¹⁶

Ein größerer Faktor beim Energieverbrauch ergibt sich durch das Display. Da die Anwendung nahezu vollständig im Außenbereich verwendet wird, ist zumindest tagsüber eine hohe Bildschirmhelligkeit gefordert. Da heutzutage die meisten Smartphones mit OLED-Bildschirmen ausgestattet sind, ist es sinnvoll, die Applikation zumindest im Betrieb in einen „Dark Mode“ zu setzen, da dieser gerade bei hoher Bildschirmhelligkeit dank der Funktionsweise von OLED-Bildschirmen signifikante Energieeinsparungen ermöglicht.

Da das System in erster Linie nicht für Kraftfahrzeuge gedacht ist und selbst E-Bikes nur in seltenen Fällen eine ausreichende Stromversorgung für ein Smartphone anbieten, muss das System so energiesparend wie möglich laufen. Für längere Distanzen ist ggf. das Nutzen einer separaten Powerbank erforderlich. Diese sind heutzutage allerdings kostengünstig zu erwerben und selbst passende Smartphone- und Powerbank-Halterungen für Fahrradlenker sind bereits auf dem Markt verfügbar. Bei E-Scootern gibt es mehrere Modelle, die das Aufladen der Smartphones während der Fahrt unterstützen. Allerdings werden diese seltener für längere Strecken eingesetzt, weshalb eine Lademöglichkeit in den meisten Fällen nur relativ kurz genutzt werden kann.^{17 18}

Geeignete Modelle von Smartphones

Für die Auswahl eines passenden Test-Smartphones sind drei Komponenten entscheidend:

- Zweifrequenz-GNSS-Empfänger
- OLED-Bildschirm

¹⁶ <https://www.eenewseurope.com/en/7nm-gnss-receiver-for-wearables-cuts-power-by-5x/>

¹⁷ <https://powunity.com/am-ebike-handy-laden-so-bleibt-dein-smartphone-unterwegs-funktionstuechtig>

¹⁸ <https://borncity.com/escooter/archive/1124>

- 5G-Mobilfunkmodul

Die beiden letztgenannten Komponenten werden heutzutage in dem Großteil der neuverkauften Smartphones verbaut. Zweifrequenz-GNSS-Empfänger werden hauptsächlich in höherpreisigen Modellen verwendet, wobei davon auszugehen ist, dass diese mit der Zeit auch für günstigere Modelle zum Standard werden.

Ein geeigneter Kandidat für das zu entwickelnde System ist zum Beispiel das Samsung Galaxy S21+ oder das Google Pixel 7 Pro, welche jeweils über ein OLED-Display, ein 5G-Mobilfunkmodul und einen Zweifrequenz-GNSS-Empfänger verfügen.

Kommunikation zwischen Smartphones

Eine direkte Kommunikation zwischen mehreren Smartphones ohne Nutzerinteraktion ist aktuell nicht möglich. Zwar kann man Daten zwischen Smartphones über Bluetooth oder WLAN austauschen, allerdings nur in begrenzten Maßen und mit manueller Bestätigung. Daher ist eine netzbasierte Kommunikation über Mobilfunk notwendig, wodurch bei einer guten Netzabdeckung auch keine Reichweitenprobleme auftreten. Die Verwendung eines einfachen Kommunikationsprotokolls wie MQTT (Message Queueing Telemetry Transport) minimiert die übertragenen Datenmengen und sorgt für möglichst geringe Latenzen. Eine 5G-Mobile-Edge-Cloud wäre eine ideale Umgebung für das zu entwickelnde System, da hier Latenzen im einstelligen Millisekundenbereich möglich sind. Es kann jedoch – wie im MobiCell-Projekt aus Kostengründen geschehen – ein normaler Cloud-Dienst als Einstiegslösung genutzt werden.

Für die Anbindung an eine vorhandene V2X-Infrastruktur können Roadside Units (RSUs) an den Cloud-Dienst angebunden werden. Zum Beispiel kann die vom ifak selbst entwickelte RSU¹⁹ über Mobilfunk mit einem Cloud-Dienst kommunizieren und über einen zu entwickelnden Dienst die Daten über V2X an mögliche Empfänger senden.

Kommunikation zwischen Smartphone und Nutzer

Da das System mit geringem Nachrüstaufwand von Radfahrern anzuwenden sein soll, wird zunächst auf besondere Halterungsvorrichtungen für Smartphones an Fahrrädern verzichtet und lediglich eine handelsübliche Lenkradhalterung verwendet. Dadurch beschränken sich die direkt an einen Radfahrer übermittelbaren Informationen in erster Linie auf optische und akustische Signale, die ein Smartphone direkt aussenden kann. Das Display kann verwendet werden, um sehr detaillierte Informationen zu übermitteln, hat aber den Nachteil, dass ein Radfahrer währenddessen den Umgebungsverkehr nur eingeschränkt verfolgen kann. Akustische Signale lenken zwar weniger vom Verkehr ab, sind aber aufgrund von Umgebungsgeräuschen bezüglich der übertragbaren Informationsmenge stark eingeschränkt.

Grundsätzliche Formen der Mitteilung von Warnsignalen an einen Radfahrer von einem Gerät, das am Fahrradlenker befestigt oder am Körper getragen wird, sind optischer, akustischer oder haptischer Art. Nach einer vergleichenden Untersuchung von Mitteilungsformen in einem Forschungsprojekt, hat sich ein haptischer Vibrationsgeber an den Lenkergriffen als zuverlässigste Methode herausgestellt, da akustische Warntöne oder optische Anzeigen im Straßenverkehr in kognitiv herausfordernden Situationen schlechter wahrgenommen werden [11, S. 172]. Allerdings sind solche Vibrationsgriffe im Alltag kaum verbreitet. Dennoch sind

¹⁹ <https://www.ifak.eu/de/produkte/OBU>

Smartwatches und Fitnessarmbänder mittlerweile weit verbreitet und bieten die Möglichkeit, durch einen Vibrationsalarm haptische Signale an den Radfahrer zu übertragen.

2.1.2.2 Anforderungsanalyse

Die Anforderungen der Benutzer an die Smartphone-Applikation betreffen zunächst die Profilerstellung, welche einmalig zu Beginn und vor der aktiven Nutzung der Applikation erfolgen soll. Für die weiteren Benutzereingaben ist ein übersichtliches und minimalistisches Benutzeroberflächen-Design von großer Bedeutung. Die Eingabe von Informationen durch den Benutzer sollte mühelos erfolgen können. Hierbei empfiehlt sich die Verwendung von großformatigen und kontrastreichen Eingabeelementen, um eine einfache Interaktion zu gewährleisten. Zudem soll die Notwendigkeit proaktiver Eingaben auf ein Minimum reduziert werden. Für die Ausgabe von Informationen an den Benutzer sollten großflächige und gut sichtbare Elemente genutzt werden, um visuelles Feedback zu geben. Darüber hinaus sollen gut wahrnehmbare akustische Signale und haptisches Feedback (Vibration) eingesetzt werden, um eine umfassende Nutzererfahrung zu schaffen.

Für die Kommunikation zwischen der Smartphone-App und dem Backend-Server, der die Cloud-Dienste (z. B. Kollisionsalgorithmus) bereitstellt, haben sich die Entwickler auf ein MQTT-Netzwerkprotokoll mit TLS-Verschlüsselung verständigt. Die MQTT-Nachrichten werden dabei im JSON-Datenformat geschrieben und gelesen. Dadurch sollen eine effiziente Datenverarbeitung und geringe Latenzzeiten ermöglicht werden.

Das Kommunikationsintervall für das Auslesen und Versenden der Sensordaten soll abhängig von der aktuellen Gefahrensituation variabel bestimmt werden. Bei Gefahr soll das Intervall so niedrig wie technisch möglich (z. B. auf bis zu etwa 16 ms beim Beschleunigungssensor) gesenkt werden, damit Latenz- und Reaktionszeiten insgesamt nicht zu hoch sind und eine Warnmeldung noch rechtzeitig ausgelöst werden kann. Andernfalls kann das Intervall unter Berücksichtigung der aktuellen Fahrsituation (ggf. mit Kartendaten gekoppelt) auf mehrere Sekunden erhöht werden, wenn z. B. allein auf einem geraden, übersichtlichen Radweg ohne Kreuzungen und Einmündungen gefahren wird.

Die Menge an redundanten Sensordaten, die durch die Smartphone-App erfasst und übertragen werden können, ist zu minimieren, wobei immer die Position, die Geschwindigkeit und der Kurs eines Verkehrsteilnehmers für die Cloud-Dienste erforderlich sind. Dadurch werden auch die allgemeinen Nutzeranforderungen bezüglich eines möglichst geringen Daten- und Energieverbrauchs der Smartphone-App unterstützt.

2.1.2.3 Anwendungsfallbeschreibung

Die möglichen Anwendungsfälle des Assistenzsystems sind aufgrund der allgemeinen Verfügbarkeit von personengebundenen Smartphones sehr zahlreich und unterschiedlich, weshalb im Rahmen des MobiCell-Projekts eine Beschränkung auf eine überschaubare Anzahl von allgemeinen Anwendungsfällen, die für den Fuß- und Radverkehr in Deutschland nach Ansicht der Projektbeteiligten typisch sind, erforderlich war. Dazu wurde zunächst eine Übersicht von relevanten Formen des Fuß- und Radverkehrs mithilfe eines sogenannten

morphologischen Kastens²⁰ erstellt, in dem ausgewählte Merkmale und entsprechende Merkmalsausprägungen zeilenweise aufgelistet sind (siehe Tab. 3). Die dargestellte Auswahl von relevanten Merkmalen und Ausprägungen erfolgte auf Grundlage eines Katalogs der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), wo die entsprechenden, nach Sachgebieten geordneten Begriffe definiert sind (wie unterhalb der Tabelle wiedergegeben). Schließlich lassen sich die einzelnen Ausprägungen in vertikaler Richtung (d. h. zeilenübergreifend) kombinieren, sofern die jeweilige Kombination tatsächlich existiert und sinnvoll ist, um konkrete Anwendungsfälle zu generieren. Dabei sind ggf. auch mehrere Ausprägungen eines Merkmals zu kombinieren, um beispielsweise die konfliktbehafteten Begegnungsfälle zwischen mindestens zwei gleichen oder unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern zu beschreiben (z. B. zwischen Radfahrer und Radfahrer, Radfahrer und Fußgänger oder Radfahrer und Kraftfahrzeug).

Tab. 3: Morphologischer Kasten zur Erzeugung von Anwendungsfällen im Fuß- und Radverkehr

Merkmalsausprägungen (in alphabetischer Reihenfolge)					
Verkehrsteilnehmer	Fußgänger		Kraftfahrzeug (MIV)		Radfahrer
Straßenart	Fußgängerzone	Gehweg		Radweg	Stadtstraße
Knotenpunktform	Einmündung	Fußgängerüberweg	Gabelung	Kreisverkehr	Kreuzung
Fahrsituation	Einfädeln	Halten	Kolonnenverkehr	Kreuzungsvorgang	Überholung

Zugehörige Definitionen laut [12], in alphabetischer Reihenfolge:

- *Einfädeln*: Tangentiales Einfahren in einen Fahrzeugstrom
- *Einmündung*: Knotenpunkt, bei dem eine Straße an eine durchgehende Straße angeschlossen ist
- *Fußgängerüberweg*: Auf einer Fahrbahn mit einem Zebrastreifen nach Straßenverkehrsordnung gekennzeichnete Querungsstelle für den Fußgängerverkehr, die außer gegenüber Schienenfahrzeugen ein Vorrecht begründet
- *Fußgängerzone (Fußgängerbereich)*: Dem Fußgängerverkehr vorbehaltenes Straßennetz, in dem ausnahmsweise öffentlicher Personennahverkehr, Anliegerverkehr, Lieferverkehr oder Radverkehr zugelassen werden können
- *Gabelung*: Knotenpunkt, bei dem eine Straße sich in zwei Straßen verzweigt, zwischen denen kein Abbiegeverkehr möglich ist

²⁰ <https://refa.de/service/refa-lexikon/morphologischer-kasten>

- *Gehweg*: Für den Fußgängerverkehr bestimmter Weg, auf dem Fahrzeugverkehr grundsätzlich verboten ist
- *Halten*: Fahrtunterbrechung, die nicht durch die Verkehrslage oder eine Verkehrsregel veranlasst ist
- *Knotenpunkt*: Bauliche Anlage, die der Verknüpfung von Verkehrswegen dient
- *Knotenpunkt, plangleich*: Knotenpunkt, bei dem der Verkehr nur in einer Ebene abgewickelt wird
- *Kolonnenverkehr*: Verkehrsstrom, in dem eine freie Geschwindigkeitswahl nicht möglich ist
- *Kreisverkehr*: Plangleicher Knotenpunkt mit Verbindung der Knotenpunktarme über eine ringförmige Fahrbahn, die entgegen dem Uhrzeigersinn durchfahren wird
- *Kreuzung*: Vierarmiger plangleicher Knotenpunkt
- *Kreuzungsvorgang*: Verkehrsvorgang, bei dem Verkehrsströme verschiedener Fahrtrichtungen einander in einer Ebene durchsetzen
- *MIV (Motorisierter Individualverkehr)*: Personenverkehr mit nicht allgemein zugänglichen motorisierten Verkehrsmitteln
- *Überholung*: Vertauschung der Reihenfolge zweier sich in gleicher Richtung auf einer Fahrbahn bewegender Fahrzeuge
- *Radweg*: Straßenbegleitender oder selbständig geführter Weg für den Radverkehr
- *Straße*: Verkehrsweg für den nicht schienengebundenen Landverkehr
- *Stadtstraße*: Straße innerhalb der geschlossenen Ortschaft
- *Verkehrstrom*: Auf einem Verkehrsweg in der gleichen Richtung sich bewegende Verkehrselemente.

Mithilfe des morphologischen Kastens wurden von den Projektbeteiligten, die alle das Fahrrad als Hauptverkehrsmittel fast täglich nutzen, drei interessante Anwendungsfälle für Radfahrer diskutiert, die einerseits in der Fahrpraxis häufig vorkommen und gefährlich sein können, und andererseits durch den Einsatz des MobiCell-Assistenzsystems voraussichtlich sicherer ablaufen würden (siehe Tab. 4).

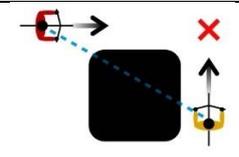
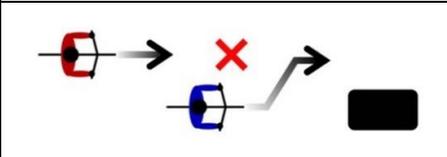
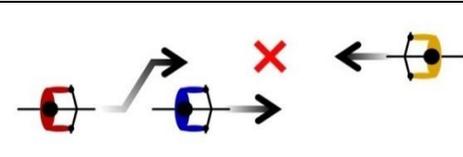
Der erste Anwendungsfall beschreibt einen Kreuzungsvorgang von zwei Radfahrern, die sich aufgrund eines Sichthindernisses (z. B. Hecke, Gebäude oder Lkw) erst kurz vor dem Erreichen der Konfliktfläche gegenseitig sehen können (siehe Tab. 4, linke Spalte). Hier ist es für beide Radfahrer gleich schwer, eine mögliche Kollision vorherzusehen. Für einen sensordatenbasierten Algorithmus zur Kollisionsprognose ist dies jedoch eine relativ einfache Aufgabe, da z. B. plötzliche Richtungsänderungen unwahrscheinlich sind.

Im zweiten Anwendungsfall weicht ein Radfahrer einem Hindernis (z. B. parkendes Fahrzeug am Straßenrand) aus und fädelt sich dazu auf dem linken Fahrstreifen ein, wo im selben Augenblick ein schnellerer Radfahrer von hinten kommt (siehe Tab. 4, mittlere Spalte). Dabei besteht ein mögliches Kollisionsrisiko, falls dieser übersehen oder zu spät wahrgenommen wird. Im Vergleich zum Anwendungsfall 1 ist die Kollisionsprognose schwieriger, da der Zeitpunkt und die Art der Reaktion aufgrund des vorausliegenden Hindernisses (z. B. nach rechts oder links ausweichen, oder anhalten) anhand der Sensordaten nicht im Voraus

bestimmt werden können und ein möglicher Kollisionspunkt erst nach dem Ausweichen berechenbar ist.

Im dritten Anwendungsfall überholt ein Radfahrer einen langsameren und weicht dazu auf die Gegenfahrbahn aus, wo im selben Augenblick ein dritter Radfahrer entgegenkommt (siehe Tab. 4, rechte Spalte). Falls dieser vor dem Überholen übersehen oder dessen Geschwindigkeit unterschätzt wurde, kann es zu einer gefährlichen Annäherung oder Kollision kommen. Die möglichen Kollisionspunkte sind jedoch deutlich schwieriger als bei den zuvor beschriebenen Anwendungsfällen vorherzusagen, da drei statt zwei Radfahrer beteiligt sind und ebenso der Zeitpunkt und die Art der Reaktion anhand der Sensordaten nicht im Voraus berechenbar sind.

Tab. 4: Ausgewählte Anwendungsfälle als Grundlage für Entwicklung und Test des Assistenzsystems

Anwendungsfall 1	Anwendungsfall 2	Anwendungsfall 3
 <ul style="list-style-type: none"> • 2 Radfahrer • Kreuzungsvorgang • mit Sichthindernis • alle Straßenarten • Einmündung, Kreuzung oder Gabelung 	 <ul style="list-style-type: none"> • 2 Radfahrer • Einfädeln • ohne Sichthindernis • Fußgängerzone, Radweg oder Stadtstraße • kein Knotenpunkt 	 <ul style="list-style-type: none"> • 3 Radfahrer • Überholung • ohne Sichthindernis • Fußgängerzone oder Radweg • kein Knotenpunkt

In allen Anwendungsfällen wird angenommen, dass ein Smartphone jeweils fest am Lenker eines Fahrrads, z. B. mit einer meist kostengünstigen Lenkerhalterung, befestigt wird, um die Messgenauigkeit der Sensoren, insbesondere GNSS-Empfänger und Magnetometer, zu erhöhen und die direkte Mitteilung von optischen oder akustischen Warnmeldungen an den Radfahrer zu ermöglichen.

2.1.3 AP 2 Systementwurf

Das Ziel von AP 2 bestand zum einen in der Erarbeitung einer Systemarchitektur, um die erforderlichen Komponenten des Assistenzsystems und deren Funktionen und Beziehungen eindeutig und widerspruchsfrei zu bestimmen. Dadurch wurde eine effiziente Entwicklungsarbeit zur Realisierung der einzelnen Komponenten durch unterschiedliche Projektmitarbeiter in AP 3 ermöglicht. Zum anderen wurden die theoretischen Grundlagen für den zu entwickelnden Kollisionsalgorithmus durch ein mathematisches Modell geschaffen.

Im Einzelnen untergliederte sich das AP 2 in folgende zwei Unterarbeitspakete:

- AP 2.1 Spezifikation der Komponenten und Funktionen

- AP 2.2 Kollisionserkennung und Ausweichmanöverberechnung

2.1.3.1 Spezifikation der Komponenten und Funktionen

Das Assistenzsystem besteht in der Grundvariante aus einem Webserver, der als Backend die Cloud-Dienste bereitstellt, sowie den verschiedenen Smartphones der Nutzer, die jeweils als Frontend für die Ausführung der MobiCell-App im Straßenverkehr dienen. Backend und Frontend sind per Internet bzw. Mobilfunk miteinander verbunden. Diese Systemarchitektur ist in der Abb. 5 anhand von zwei beispielhaften Verkehrssituationen, das heißt der Begegnung von Radfahrer und Fußgänger (Ort 1) sowie zwei Radfahrern (Ort 2), schematisch dargestellt und wurde im Rahmen des MobiCell-Projekts als prototypisches Testsystem realisiert.

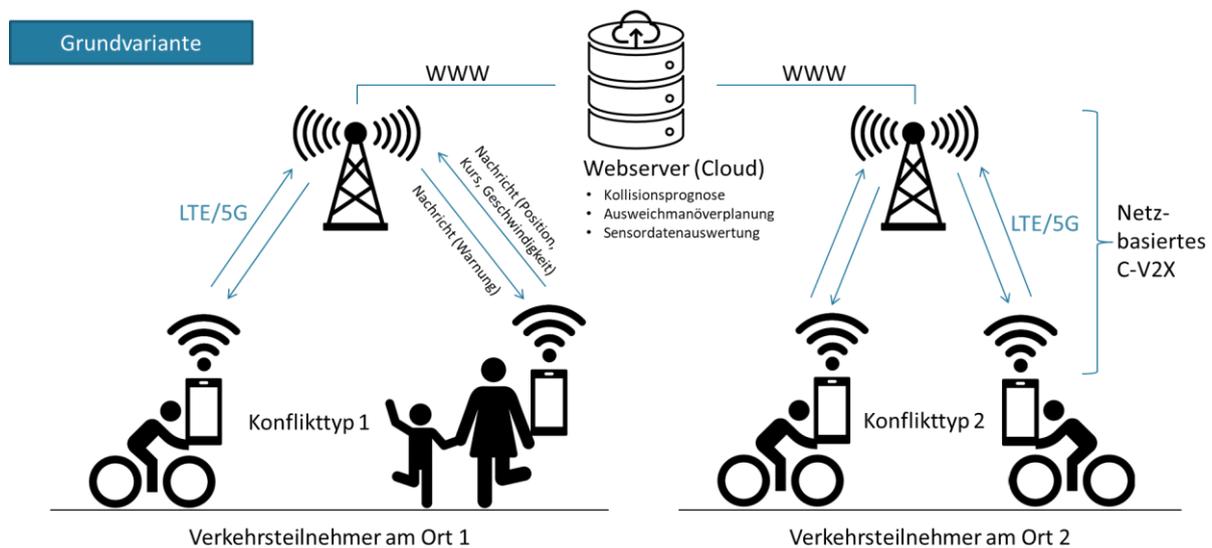


Abb. 5: Systemarchitektur der realisierten Grundvariante (nur für Radfahrer und Fußgänger)

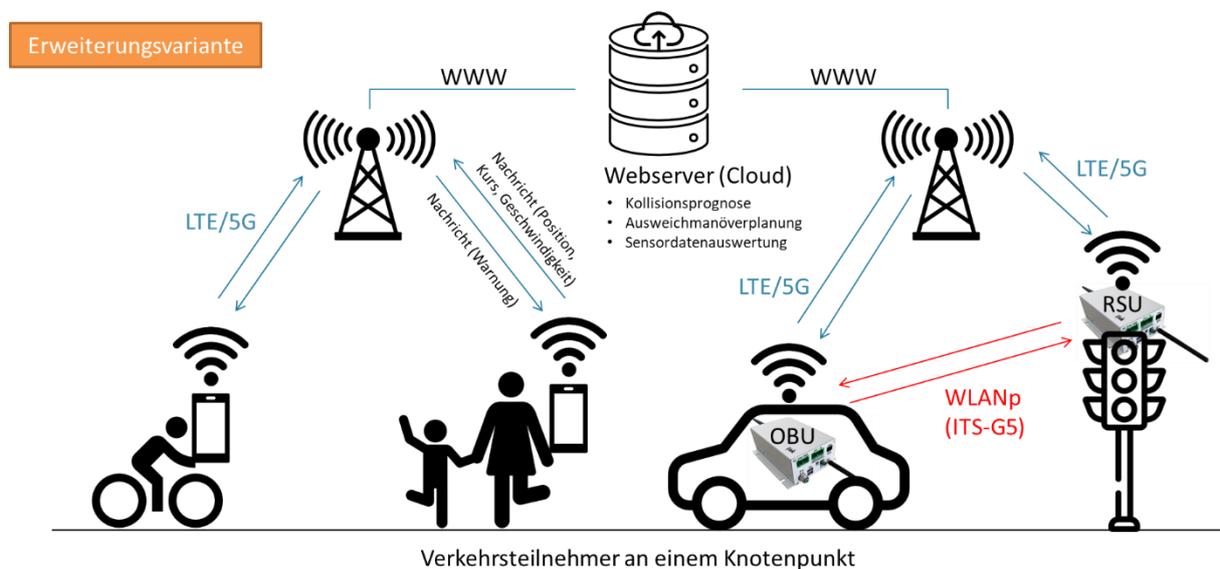


Abb. 6: Systemarchitektur der geplanten Erweiterungsvariante (mit Fahrzeugen und Infrastruktur)

Ein mögliche Systemerweiterung, die nicht umgesetzt wurde, sieht die Integration von Kraftfahrzeugen mithilfe von On-Board Units vor, die entweder direkt oder indirekt über Roadside Units mit dem Mobilfunknetz verbunden sind (siehe Abb. 6). Dadurch können auch mögliche Konfliktsituationen zwischen ungeschützten Verkehrsteilnehmern und Kraftfahrzeugen vom Backend erfasst werden.

2.1.3.2 Kollisionserkennung und Ausweichmanöverberechnung

Es wurde ein neuer Algorithmus zur Kollisionsprognose mit gleichzeitiger Bestimmung eines koordinierten Ausweichmanövers (Kurzbezeichnung: Kollisionsalgorithmus) für zunächst nur radfahrerspezifische Anwendungsfälle entwickelt. Dementsprechend wird dabei angenommen, dass sich zwei Radfahrer oder ein Radfahrer und ein Fußgänger auf einer Ebene (zweidimensional) begegnen und unabhängig von einem Wegenetz in alle Richtungen – unter Berücksichtigung ihrer jeweiligen physikalischen Eigenschaften (u. a. minimaler Kurvenradius, maximale Beschleunigung) – bewegen können.

Als Grundlage dafür wurde ein mathematisches Modell formuliert, das zu jedem Zeitpunkt, zu dem neue Sensordaten (Position, Kurs, Geschwindigkeit) vorliegen, die Berechnung einer möglichen Kollision und eines Ausweichmanövers in folgenden sieben Schritten ermöglicht:

1. Grobauswahl von nahen Objekten nach Entfernung
2. Feinauswahl von nahen Objekten nach Winkelbeziehung
3. Bestimmung des Vorschraubereiches (Suchtrapez) eines Objekts
4. Bestimmung des Reaktionsbereiches eines Objekts
5. Bestimmung des Bremsbereiches eines Objekts
6. Bestimmung des Ausweichbereiches eines Objekts
7. Bestimmung von Kollisionsrisiko und Ausweichmanöver zwischen zwei Objekten

Die sieben Schritte werden im Folgenden mithilfe von Gleichungen und Diagrammen erläutert.

Schritt 1: Grobauswahl von nahen Objekten nach Entfernung

Gegeben sind:

- Variablen: Momentan-Position, maximale Geschwindigkeit für jeweils alle Objekte
- Parameter: Suchzeit, maximaler Suchradius

Gesucht sind:

- Suchradius für jeweils alle Objekte (Gl. 2.1)
- euklidische Distanz für jeweils alle Objektpaare (Gl. 2.2)
- Auswahl von Objektpaaren (Gl. 2.2)

Die Suchradien für alle Objekte werden jeweils wie folgt berechnet:

$$r_i = \min(v_{i,max} \cdot t_s, r_{max}) \quad \text{Gl. 2.1}$$

$$r_i \dots\dots\dots \text{Suchradius von Objekt } i \quad \text{[m]}$$

$$v_{i,max} \dots\dots \text{Maximale Geschwindigkeit von Objekt } i \quad \text{[m/s]}$$

t_s Suchzeit (z. B. $t_s = 6$) [s]

r_{max} Maximaler Suchradius (z. B. $r_{max} = 50$) [m]

Aus der Gesamtheit werden alle Objektpaare ij ausgewählt, deren Suchradien sich jeweils wie im unten skizzierten Fall 2 (Abb. 8) überlappen. Die übrigen Objektpaare ij – wie im Fall 1 (Abb. 7) skizziert – werden nicht weiter betrachtet, da sie zu weit voneinander entfernt sind.

$$r_i + r_j > d_{ij} \quad \forall (i, j \mid i \neq j) \quad \text{Gl. 2.2}$$

r_i Suchradius von Objekt i [m]

r_j Suchradius von Objekt j [m]

d_{ij} Euklidische Distanz von Objekt i zu Objekt j [m]

Fall 1: $r_i + r_j \leq d_{ij}$ (Objekte sind sich fern)

Fall 2: $r_i + r_j > d_{ij}$ (Objekte sind sich nah)

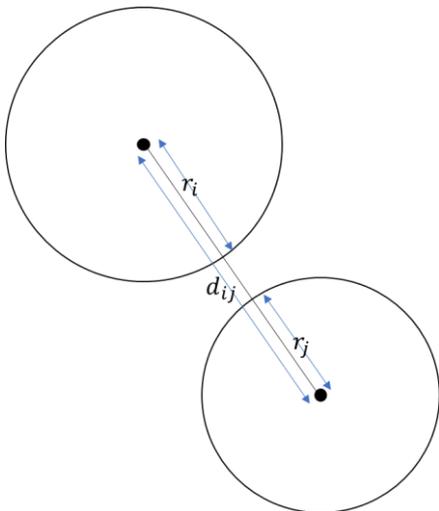


Abb. 7: Fall 1 der Objektentfernung

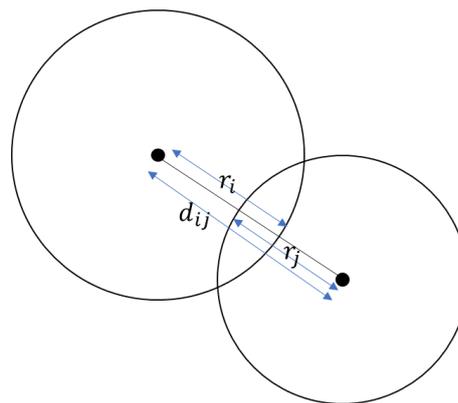


Abb. 8: Fall 2 der Objektentfernung

Schritt 2: Feinauswahl von nahen Objekten nach Winkelbeziehung

Gegeben sind:

- Ausgewählte Objektpaare (aus Schritt 1), jeweils mit Position und Kurs eines Objekts
- Parameter: Suchwinkel nach links bzw. rechts vom Kurs eines Objekts

Gesucht sind:

- Peilung zum jeweils anderen Objekt
- Auswahl von Objektpaaren

Für alle in Schritt 1 ausgewählten Objektpaare ij wird die jeweilige Winkelbeziehung der Objekte zueinander durch Berechnung des Peilungswinkels – wie in Abb. 9 skizziert – mit

folgenden Gleichungen bestimmt. Bei der Nummerierung der Objekte (mit Index i bzw. j) ist deren Reihenfolge entlang der x -Achse (Longitude) zu beachten, sodass z. B. gilt: $x_{i=1} \leq x_{j=2}$.

$$\theta_{12} = \begin{cases} 180^\circ - \gamma_1 - \varphi, & \text{falls } \gamma_1 + \varphi \leq 180^\circ \\ 540^\circ - \gamma_1 - \varphi, & \text{sonst} \end{cases} \quad \text{Gl. 2.3}$$

$$\theta_{21} = \begin{cases} 360^\circ - \gamma_2 - \varphi, & \text{falls } \gamma_2 + \varphi \leq 360^\circ \\ 720^\circ - \gamma_2 - \varphi, & \text{sonst} \end{cases}$$

$$\text{mit: } \varphi = \sin^{-1} \frac{dx}{d_{12}}$$

θ_{12} Peilung von Objekt 1 zu Objekt 2 [Grad]

θ_{21} Peilung von Objekt 2 zu Objekt 1 [Grad]

γ_1 Kurs von Objekt 1 [Grad]

γ_2 Kurs von Objekt 2 [Grad]

dx Horizontaler Abstand von Objekt 1 zu Objekt 2 ($dx \geq 0$) [m]

d_{12} Euklidische Distanz von Objekt 1 zu Objekt 2 ($d_{21} = d_{12}$) [m]

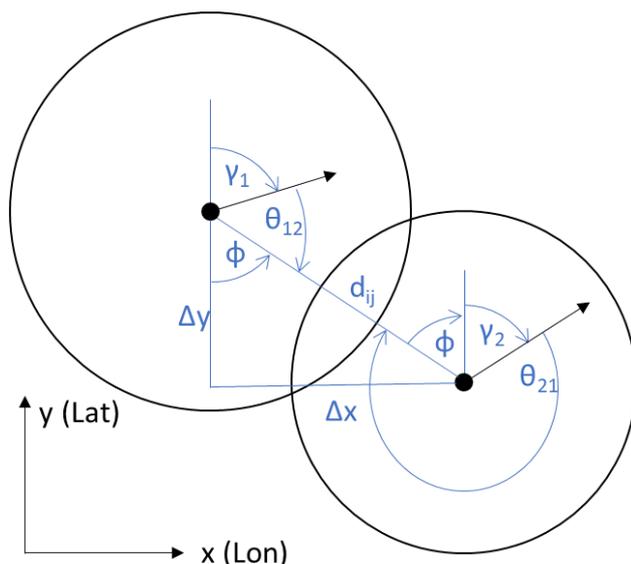


Abb. 9: Winkelbeziehung von zwei Objekten mit überlappenden Suchradien

Aus der Gesamtheit werden alle Objektpaare ij ausgewählt, bei denen sich von jeweils einem Objekt aus betrachtet das andere Objekt in einem Suchwinkelbereich θ_s von 90 Grad nach links bzw. rechts vom aktuellen Kurs befindet (siehe Abb. 9). Diese Fälle werden durch den logischen Ausdruck in Gl. 2.4 formal beschrieben. Dabei muss mindestens eine der vier, durch das logische Oder (\vee) verknüpften Bedingungen erfüllt sein, damit der Ausdruck insgesamt wahr ist. (Die Umklammerungen dienen nur der übersichtlichen Trennung der beiden Objekte.)

$$(\theta_{12} > 360^\circ - \theta_s \vee \theta_{12} < \theta_s) \vee (\theta_{21} > 360^\circ - \theta_s \vee \theta_{21} < \theta_s) \quad \text{Gl. 2.4}$$

θ_s Suchwinkel ($\theta_s = 90$) [Grad]

Schritt 3: Bestimmung des Vorschaubereiches (Suchtrapez) eines Objekts

Gegeben sind:

- Ausgewähltes Objekt (aus Schritt 2), jeweils mit Position, Kurs und Geschwindigkeit
- Parameter:
 - halbe Positionsabweichung (Radius)
 - halbe Kursabweichung (Winkel)
 - Vorschauzeit

Gesucht sind:

- Koordinaten der Trapezpunkte A_1 , A_2 , B_1 , B_2

Zur Bestimmung des Suchtrapezes eines Objekts sind die gesuchten Größen auf Basis der nachfolgenden Zeichnung (Abb. 10) und entsprechenden Gleichungen zu berechnen.

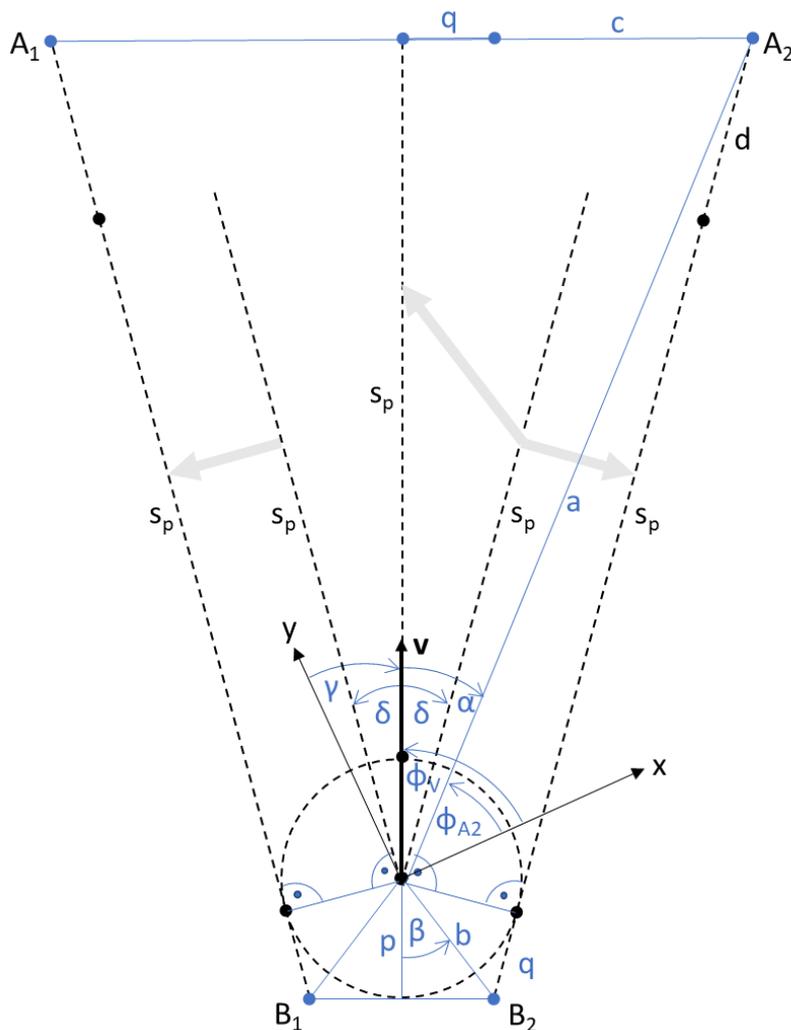


Abb. 10: Suchtrapez eines Objekts

$$s_p = v \cdot t_p$$

Gl. 2.5

s_p Vorschauentfernung (engl.: preview distance)

[m]

v Geschwindigkeit (Betrag des Richtungsvektors im Bild oben) [m/s]

t_p Vorschauzeit (engl.: preview time) [s]

$$\beta = 45^\circ - \delta/2 \quad \text{Gl. 2.6}$$

$$b = \frac{p}{\cos \beta} \quad \text{Gl. 2.7}$$

$$q = p \cdot \tan \beta \quad \text{Gl. 2.8}$$

$$c = (2 \cdot p + s_p) \cdot \tan \delta \quad \text{Gl. 2.9}$$

$$d = \frac{c}{\sin \delta} - q - s_p \quad \text{Gl. 2.10}$$

$$a = \sqrt{(s_p + p)^2 + (q + c)^2} \quad \text{Gl. 2.11}$$

$$\alpha = \text{atan} \frac{q + c}{s_p + p} \quad \text{Gl. 2.12}$$

p Positionsabweichung ($p \geq p_{min}$) [m]

δ Kursabweichung ($\delta \geq \delta_{min}$) [Grad]

Bezugswinkel der Trapezpunkte zur x-Achse:

$$\varphi_{A1} = 90^\circ - \gamma + \alpha \quad \text{Gl. 2.13}$$

$$\varphi_{A2} = 90^\circ - \gamma - \alpha \quad \text{Gl. 2.14}$$

$$\varphi_{B1} = 225^\circ - \gamma + \delta/2 \quad \text{Gl. 2.15}$$

$$\varphi_{B2} = 315^\circ - \gamma - \delta/2 \quad \text{Gl. 2.16}$$

Koordinaten der Trapezpunkte:

$$A_1 = \begin{pmatrix} x_{A1} \\ y_{A1} \end{pmatrix} = a \cdot \begin{pmatrix} \cos \varphi_{A1} \\ \sin \varphi_{A1} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 2.17}$$

$$A_2 = \begin{pmatrix} x_{A2} \\ y_{A2} \end{pmatrix} = a \cdot \begin{pmatrix} \cos \varphi_{A2} \\ \sin \varphi_{A2} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 2.18}$$

$$B_1 = \begin{pmatrix} x_{B1} \\ y_{B1} \end{pmatrix} = b \cdot \begin{pmatrix} \cos \varphi_{B1} \\ \sin \varphi_{B1} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 2.19}$$

$$B_2 = \begin{pmatrix} x_{B2} \\ y_{B2} \end{pmatrix} = b \cdot \begin{pmatrix} \cos \varphi_{B2} \\ \sin \varphi_{B2} \end{pmatrix} \quad \text{Gl. 2.20}$$

Schritt 4: Bestimmung des Reaktionsbereiches eines Objekts

Der innerhalb des Suchtrapezes befindliche Reaktionsweg ergibt sich aus der momentanen Geschwindigkeit und einer als konstant angenommenen Reaktionszeit wie folgt:

$$s_r = v \cdot t_r \quad \text{Gl. 2.21}$$

$$s_r \dots\dots\dots \text{Reaktionsweg} \quad \text{[m]}$$

$$v \dots\dots\dots \text{Geschwindigkeit (Betrag des Richtungsvektors im Bild oben)} \quad \text{[m/s]}$$

$$t_r \dots\dots\dots \text{Reaktionszeit} \quad \text{[s]}$$

Daraus ergibt sich ein minimales Trapez, das der Kantenlänge bis zum Beginn der äußeren Ausweichkurven (Abb. 11) entspricht und mit folgender Gl. 2.22 berechnet wird.

$$s_{r1} = \max(v \cdot t_r \cdot \cos \delta - p \cdot \sin \delta - p; 0) \quad \text{Gl. 2.22}$$

Die Kantenlänge des maximalen Trapezes (siehe Abb. 11) entspricht dem Reaktionsweg:

$$s_{r2} = s_r \quad \text{Gl. 2.23}$$

Schritt 5: Bestimmung des Bremsbereiches eines Objekts

Der Bremsweg wird mit Gl. 2.24 berechnet:

$$s_b = \frac{v^2}{2 \cdot a_b} \quad \text{Gl. 2.24}$$

$$s_b \dots\dots\dots \text{Bremsweg} \quad \text{[m]}$$

$$v \dots\dots\dots \text{Geschwindigkeit (Betrag des Richtungsvektors im Bild oben)} \quad \text{[m/s]}$$

$$a_b \dots\dots\dots \text{Bremsverzögerung } (a_b > 0, a_b \text{ const}) \quad \text{[m/s}^2\text{]}$$

Analog zum Reaktionsbereich wird ein minimales Trapez (Gl. 2.25) und ein maximales Trapez (Gl. 2.26) berechnet, das jeweils das kleinere Trapez des Reaktionsbereiches enthält.

$$s_{b1} = (s_r + s_b) \cdot \cos \delta - p \cdot \sin \delta - p \quad \text{Gl. 2.25}$$

$$s_{b2} = s_r + s_b \quad \text{Gl. 2.26}$$

Schritt 6: Bestimmung des Ausweichbereiches eines Objekts

Der Ausweichbereich eines Objekts wird durch alle möglichen Ausweichkurven nach links und rechts vom aktuellen Standort gebildet. Dabei erfolgt eine Kurvenfahrt nach Ablauf der Reaktionszeit mit einem minimalen, geschwindigkeitsabhängigen Kurvenradius (bei konstanter Geschwindigkeit während der Kurvenfahrt). Aufgrund der innerhalb einer Kreisfläche (mit Radius p) schwankenden Objektposition, beginnen die einzelnen

Ausweichkurven versetzt auf einer Kreisbahn (ebenso mit Radius p). Die Überlagerung der versetzten, äußeren Ausweichkurven ergibt eine Kurvenschar, die durch einen Kreis mit dem Radius $p + r_{C0}$ begrenzt wird (siehe Abb. 11). Die Berechnung der relevanten Ausweichkurven, das heißt der roten bzw. grünen Kurve in Abb. 11, wird im Folgenden beschrieben.

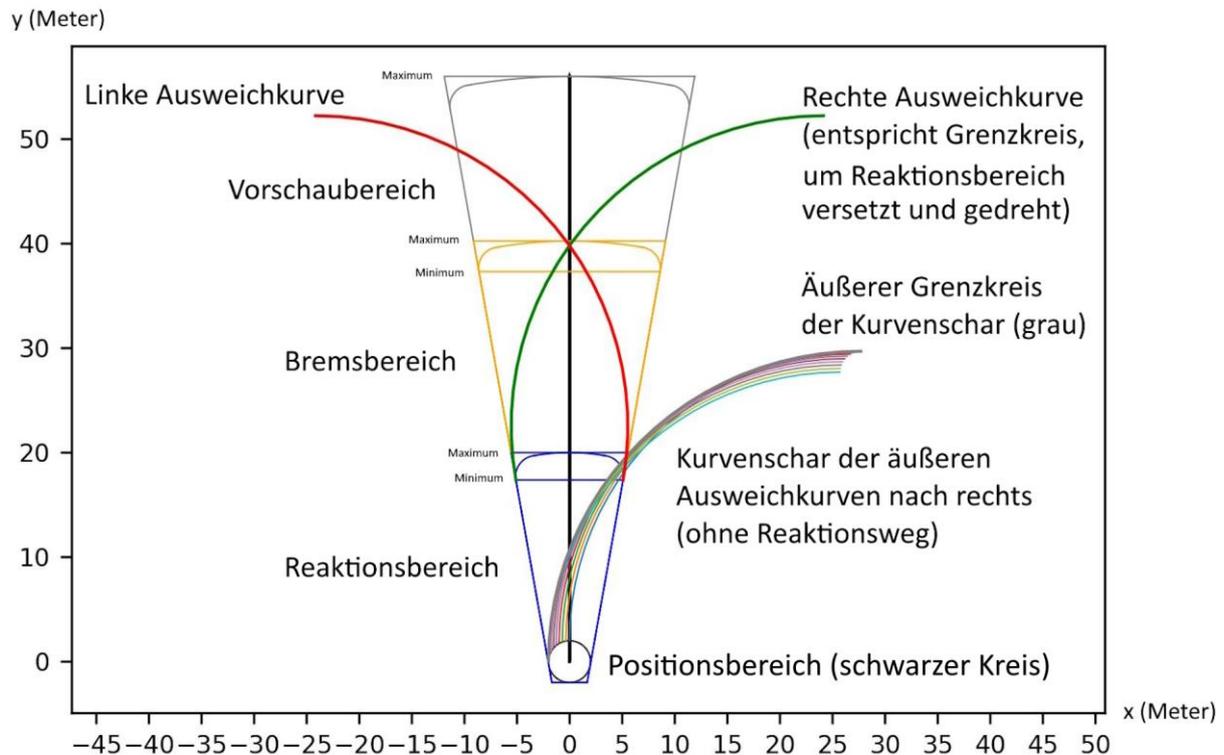


Abb. 11: Größen des Kollisions- und Ausweichalgorithmus, dargestellt in der Bewegungsebene

Geschwindigkeitsabhängiger Kurvenradius (empirische Funktion, geschätzt nach [13, S. 9]):

$$r_{C0} = \max(4 ; 3,8 \cdot v - 6,5) \quad \text{Gl. 2.27}$$

Mittelpunkt der linken Ausweichkurve (Kreisbahn mit Radius r_{CS}):

$$x_{CS} = (-r_{CS} + p) \cdot \cos \varphi_L + v \cdot t_r \cdot \cos(\varphi_L + 90^\circ) \quad \text{Gl. 2.28}$$

$$y_{CS} = (-r_{CS} + p) \cdot \sin \varphi_L + v \cdot t_r \cdot \sin(\varphi_L + 90^\circ) \quad \text{Gl. 2.29}$$

mit: $\varphi_L = -\delta - \gamma$ und $r_{CS} = p + r_{C0}$

Mittelpunkt der rechten Ausweichkurve (Kreisbahn mit Radius r_{CS}):

$$x_{CS} = (r_{CS} - p) \cdot \cos \varphi_R + v \cdot t_r \cdot \cos(\varphi_R + 90^\circ) \quad \text{Gl. 2.30}$$

$$y_{CS} = (r_{CS} - p) \cdot \sin \varphi_R + v \cdot t_r \cdot \sin(\varphi_R + 90^\circ) \quad \text{Gl. 2.31}$$

mit: $\varphi_R = \delta - \gamma$ und $r_{CS} = p + r_{C0}$

Schritt 7: Bestimmung von Kollisionsrisiko und Ausweichmanöver

Anhand der definierten Bereiche eines Objekts werden das Kollisionsrisiko und mögliche Ausweichmanöver, wie z. B. nach links oder rechts lenken, durch entsprechende Bereichskollisionen, das heißt Schnittmengen von Flächen bzw. Punkten und Flächen, der sich jeweils annähernden Objekte bestimmt.

Die Berechnung der Schnittmengen von Flächen bzw. Punkten und Flächen kann mithilfe von bestehenden Berechnungsverfahren erfolgen, die z. B. in der freien Softwarebibliothek TURF²¹ verfügbar sind und in ein JavaScript- oder Python-Programm implementiert werden können. Daher wird im Folgenden auf eine formale Beschreibung (mit Gleichungen etc.) verzichtet und stattdessen auf die in einem Python-Skript verwendeten Funktionen aus Turfpy²² verwiesen.

Relevante Bereichskollisionen von zwei Objekten

Die für den Kollisions- und Ausweichalgorithmus relevanten Schnittmengen zweier Objekte unterscheiden sich danach, ob sich ein Objekt im Stillstand oder in Bewegung befindet. Beim Stillstand eines Objekts ($v = 0$) existieren lediglich der Positionsbereich (Kreisfläche P1), in dem sich die tatsächliche Fläche des Objektes (Rechteckfläche P0) und die Position des GNSS-Empfängers (Punkt) befinden. Zur besseren Verständlichkeit wird im Folgenden angenommen, dass die Position des GNSS-Empfängers stets der Mittelpunkt des Kreises P1 ist. Dieser soll sich stets am vorderen linken Eckpunkt der Rechteckfläche P0 befinden.

Im Bewegungszustand existieren außerdem der Vorschaubereich V und die darin enthaltenen Brems- und Reaktionsbereiche (B bzw. R) sowie die Ausweichbereiche nach links und rechts (Li bzw. Re). Somit verfügt jedes Objekt über insgesamt sieben unterschiedliche Flächen.

Theoretisch ergeben sich bis zu 49 unterschiedliche Kollisionsbereiche von zwei Objekten. Die Anzahl der relevanten Schnittmengen ist allerdings deutlich geringer, da die für den Algorithmus konstruierten Flächen V, B, Re, Li, R und P1 des einen Objektes nur die aktuelle bzw. prognostizierte Position des anderen Objektes schneiden müssen, um eine mögliche Kollision und entsprechende Reaktion zu berechnen. Die aktuelle Position eines ruhenden Objektes ($v = 0$) befindet sich innerhalb der Kreisfläche P1. Die prognostizierte Position eines bewegten Objektes ($v > 0$) liegt im vorderen Bereich der Trapezfläche V (siehe auch Abb. 11). Wenn sich zum Beispiel zwei Objekte (i und j) frontal aufeinander zu bewegen, berühren sich die beiden Trapeze V_i und V_j erstmalig dann, wenn der Abstand mit der Summe der beiden Vorschautfernungen (Gl. 2.5) identisch ist. Der gleiche Abstand ergibt sich, wenn das eine Objekt ruht und sich das andere Objekt mit einer höheren Geschwindigkeit, das heißt der Relativgeschwindigkeit ($v_i + v_j$) von zwei frontal aufeinander zu steuernden Objekten, bewegt.

Aus diesen Überlegungen folgt, dass jeweils sechs Flächen des einen Objektes (V, B, Li, Re, R, P1) mit zwei Flächen des anderen Objektes (V, P1) zu berechnen sind. Da auch der umgekehrte Fall, das heißt aus Sicht des jeweils anderen Objektes, zu betrachten ist, ergeben sich insgesamt 20 Kollisionsbereiche ($2 \times 2 \times 6 - 4$), die in der folgenden Matrix (Tab. 5) durch

²¹ <https://turfjs.org/docs/>

²² <https://turfpy.readthedocs.io/en/latest/index.html#>

entsprechende Eintragungen des Risikolevels und der Reaktionsmöglichkeiten markiert sind. Schließlich wird auch eine tatsächliche Kollision von zwei Objekten durch die Schnittmenge der realen Objektflächen P0 und P0 festgestellt (21. Schnittmenge: siehe Tab. 5, rechts unten).

Tab. 5: Matrix der Kollisionsbereiche zweier Objekte – mit Angabe des entsprechenden Risikolevels und ggf. verfügbarer Reaktionsmöglichkeiten in relevanten Kollisionsbereichen

Obj1 \ Obj2	V	B $B \subseteq V$	Li	Re	R $R \subseteq B$	P1	P0 $P0 \subseteq P1$
V	1 L B R	2 L B R	2 L B R	2 L B R	3 L B R	1 L B R	
B $B \subseteq V$	2 L B R					2 L B R	
Li	2 L B R					2 L B R	
Re	2 L B R					2 L B R	
R $R \subseteq B$	3 L B R					3 L B R	
P1	1 L B R	2 L B R	2 L B R	2 L B R	3 L B R	4 (mögliche Kollision)	
P0 $P0 \subseteq P1$							4 (tatsächl. Kollision)

Abkürzungen und Erläuterungen zur Matrix (Tab. 5):

Objektbereiche	Risikolevel	Reaktionsmöglichkeiten
V Vorschaubereich (falls $v > 0$)	0 keine Kollisionsgefahr	L Nach links ausweichen bzw. links halten (bei konstanter Geschwindigkeit)
B Bremsbereich (falls $v > 0$)	1 Kollision ist wahrscheinlich	B Bremsen bzw. verlangsamen (bei konstanter Fahrtrichtung)
Li Linkskurvenbereich (falls $v > 0$)	2 Kollision ist durch mindestens zwei, zeitnah einzuleitende Reaktionsmöglichkeiten vermeidbar	R Nach rechts ausweichen bzw. rechts halten (bei konstanter Geschwindigkeit)
Re Rechtskurvenbereich (falls $v > 0$)	3 Kollision ist sehr wahrscheinlich, wenn Reaktion nicht sofort erfolgt	X Reaktionsmöglichkeit nicht mehr empfohlen, da hierdurch eine Kollision nicht auszuschließen ist
R Reaktionsbereich (falls $v > 0$)	4 Kollision ist sehr wahrscheinlich (P1) bzw. sicher (P0) eingetreten	
P1 Positionsbereich (Kreis)		
P0 Ist-Objektfläche (Rechteck)		

Im Python-Skript werden die Schnittmengen zwischen zwei beliebigen Flächen (hier Trapez, Kreis, Rechteck) jeweils mit der Funktion `intersect`²³ ermittelt. Dafür sind die einzelnen Flächen zunächst in entsprechende Polygone zu konvertieren. Außerdem akzeptiert die Funktion nur Geokoordinaten als Eingabeparameter, sodass die kartesischen Koordinaten (x,y) der Polygonpunkte in entsprechende Geokoordinaten (Longitude, Latitude) umzurechnen sind. Anhand des folgenden Python-Codes (Listing 1) wird das Prinzip des Verfahrens erläutert.

Listing 1: Ermittlung der Schnittmenge der P0-Flächen von zwei Objekten

```
from turfpy.transformation import circle, intersect
from geopy import Point, Feature

# Funktion zur Konvertierung in ein Geojson Feature mit Geokoordinaten
def calcPolygonFeature(obj_pts, f1, f2, featureType='polygon'):
    if featureType == 'circle':
        x = obj_pts[0,0]/f1
        y = obj_pts[0,1]/f1
        r = obj_pts[1,0]/f1*f2
        center = Feature(geometry=Point((x,y)))
        return circle(center, radius=r, steps=36)
    elif featureType == 'polygon':
        coordinates = []
        for i in range(len(obj_pts)):
            x = obj_pts[i,0]/f1
            y = obj_pts[i,1]/f1
            coordinates.append([x,y])
        return Feature(geometry={'coordinates': [coordinates], 'type': 'Polygon'})

# Konstanten
f1 = max(plane_size)
f2 = 111.19508023353292
# f1 entspricht der maximalen Ausdehnung der Ebene (hier 640 Pixel)
# f2 entspricht Abstand zwischen zwei ganzen Breitengraden (in km)

# Berechnung der P0-Flächen von Objekt i=0 und Objekt i=1
for i in obj:
    # Array mit Eckpunkten des Rechtecks P0 in kartesischen Koordinaten
    obj[i].rect0 = obj[i].getActualArea()
    # Konvertierung von P0 in ein Geojson Feature mit Geokoordinaten
    obj[i].pos0 = calcPolygonFeature(obj[i].rect0, f1, f2, 'polygon')

# Berechnung der Schnittmenge der P0-Flächen von Objekt 0 und Objekt 1
int_P0 = intersect([obj[0].pos0, obj[1].pos0])

# Prüfung ob eine Schnittmenge vorhanden ist
if int_P0 != None:
    ...
```

Fallunterscheidung zur Bestimmung von Risikolevel und Reaktionsmöglichkeiten

Um die noch verbleibenden bzw. die beste Reaktionsmöglichkeit für jedes Objekt zu jedem Zeitpunkt einer Konfliktsituation zu bestimmen, erfolgt zu jedem Zeitpunkt eine sukzessive Berechnung der einzelnen Schnittmengen zum Zweck einer Fallunterscheidung gemäß der Matrix (Tab. 5). Dabei wird außerdem der aktuelle Bewegungszustand eines Objekts (ruhend oder bewegt) anhand seiner Geschwindigkeit berücksichtigt. Abhängig vom vorliegenden Fall werden schließlich das Risikolevel und die noch verbleibenden Reaktionsmöglichkeiten eines Objekts analog zur Matrix (Tab. 5) bestimmt. Der prinzipielle Ablauf des Verfahrens wird durch

²³ <https://turfpy.readthedocs.io/en/latest/transformations/intersect.html>

folgenden Python-Code (Listing 2) erläutert. Darin sind jedoch einige Spezialfälle, wie das Überholen eines langsameren Objektes auf der linken Seite, aus Platzgründen nicht enthalten.

Listing 2: Fallunterscheidung zur Bestimmung von Risikolevel und Reaktionsmöglichkeiten

```
import numpy as np

if int_P0 != None:
    for i in obj:
        obj[i].risklevel = 4
        collisionActual = True
elif int_P1 != None:
    for i in obj:
        obj[i].risklevel = 4
        collisionActual == False
else: # risklevel < 4
    for i in obj:
        j = abs(i-1)
        if obj[i].v > 0: # Falls sich das Objekt i bewegt,...
            if obj[j].v > 0: # Falls sich anderes Objekt j bewegt,...
                pos_j = obj[j].trap0 # dann Vorschaubereich von Objekt j
            else:
                pos_j = obj[j].pos1 # sonst Positionsbereich von Objekt j
            intV = intersect([obj[i].trap0, pos_j])
            if intV != None:
                obj[i].risklevel = 1
                # reaction: break
                intB = intersect([obj[i].trap1, pos_j])
                if intB != None:
                    if np.sum(react[i,:]) > 1: # mind. 2 Reaktionen möglich
                        react[i,1] = 0 # Bremsen wird ausgeschlossen (=0)
                        obj[i].risklevel = 2
                    else:
                        obj[i].risklevel = 3
                # reaction: turn left
                intLi = intersect([obj[i].curvl, pos_j])
                if intLi != None:
                    if np.sum(react[i,:]) > 1: # mind. 2 Reaktionen möglich
                        react[i,0] = 0 # nach links ausgeschlossen (=0)
                        obj[i].risklevel = 2
                    else:
                        obj[i].risklevel = 3
                # reaction: turn right
                intRe = intersect([obj[i].curvr, pos_j])
                if intRe != None:
                    if np.sum(react[i,:]) > 1: # mind. 2 Reaktionen möglich
                        react[i,2] = 0 # nach rechts ausgeschlossen (=0)
                        obj[i].risklevel = 2
                    else:
                        obj[i].risklevel = 3
                # all reactions too late
                intR = intersect([obj[i].trap2, pos_j])
                if intR != None:
                    obj[i].risklevel = 3
                # save remaining reactions
                if np.sum(react[i,:]) == 2: # noch 2 Reaktionen möglich
                    react2[i,:] = np.argmax(react[i,:]>0).reshape(1,2)
                elif np.sum(react[i,:]) == 1: # nur noch 1 Reaktion möglich
                    react1[i] = np.argmax(react[i,:])
            else: # reset
                react = np.ones([2,3], dtype=np.uint8)
                react1 = np.ones(2)*-1
                react2 = np.ones([2,2])*-1
                obj[i].risklevel = 0
        else:
            obj[i].risklevel = 0
```

2.1.4 AP 3 Realisierung Testsystem

Das Ziel von AP 3 bestand in der prototypischen Entwicklung und Implementierung aller erforderlichen Komponenten und Schnittstellen des VRU-Assistenzsystems. Entsprechend den Komponenten untergliederte sich das AP 3 in folgende drei Unterarbeitspakete:

- AP 3.1 Smartphone-App
- AP 3.2 V2X-Kommunikation
- AP 3.3 Cloud-Service

2.1.4.1 Smartphone-App

Zunächst wurden die unterschiedlichen Funktionen der prototypischen Smartphone-App auf Basis der Anforderungsanalyse spezifiziert. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf die verbauten Sensoren der Testgeräte (u. a. ein Google Pixel 7 Pro) gelegt, um sicherzustellen, dass sie optimal in die Funktionalität der Applikation integriert werden können. Des Weiteren wurde das Kommunikationsintervall endgültig festgelegt, um eine effiziente Übertragung der Sensordaten zu ermöglichen und gleichzeitig den Energieverbrauch zu minimieren. Diese Schritte trugen dazu bei, die Grundlage für die Entwicklung eines funktionsfähigen Prototyps zu schaffen, der den Anforderungen gemäß der Spezifikation entspricht.

UX-Design der Smartphone App

Ein Teil des Arbeitspakets umfasste die Entwicklung der spezifischen UX (User Experience) und UI (User Interface) des Prototyps, einschließlich der Gestaltung der Benutzererfahrung und Benutzeroberfläche der Pilot-Applikation.

In der ersten Version der UX der Smartphone-App (siehe Abb. 12) lag der Schwerpunkt darauf, die Anforderungen an die Anwendung zu sammeln und eine erste Darstellung zu finden, um die geeignete Hierarchie der Elemente zu bestimmen. Dieser Prozess basierte auf den Anforderungen im Projekt, den Erkenntnissen aus anderen Projekten sowie Recherchen zu Outdoor-Apps und den daraus abgeleiteten Best Practices und Annahmen, die im speziellen Anwendungsfall auf ihre visuelle Sinnhaftigkeit getestet wurden.

Eine der Herausforderungen bestand darin, das Gefahrenlevel leicht erkennbar darzustellen. In dieser ersten Version wurden nach Rot verlaufende Farbbalken an den Seiten des Screens als mögliche Lösung vorgeschlagen. Ein weiterer Aspekt war die Festlegung des angemessenen Platzes für Bedienelemente im Verhältnis zur Karte. Dabei galt es, eine ausgewogene Balance zwischen Nützlichkeit und Ästhetik zu finden, um die Benutzerfreundlichkeit zu maximieren. Zudem war es wichtig, einen Signalstatus leicht erkennbar zu machen, ohne den Screen anfangs mit zu vielen Details zu überladen. Diese Herausforderung erforderte eine sorgfältige Gestaltung, um die wichtigen Informationen hervorzuheben, ohne die Benutzererfahrung zu beeinträchtigen.

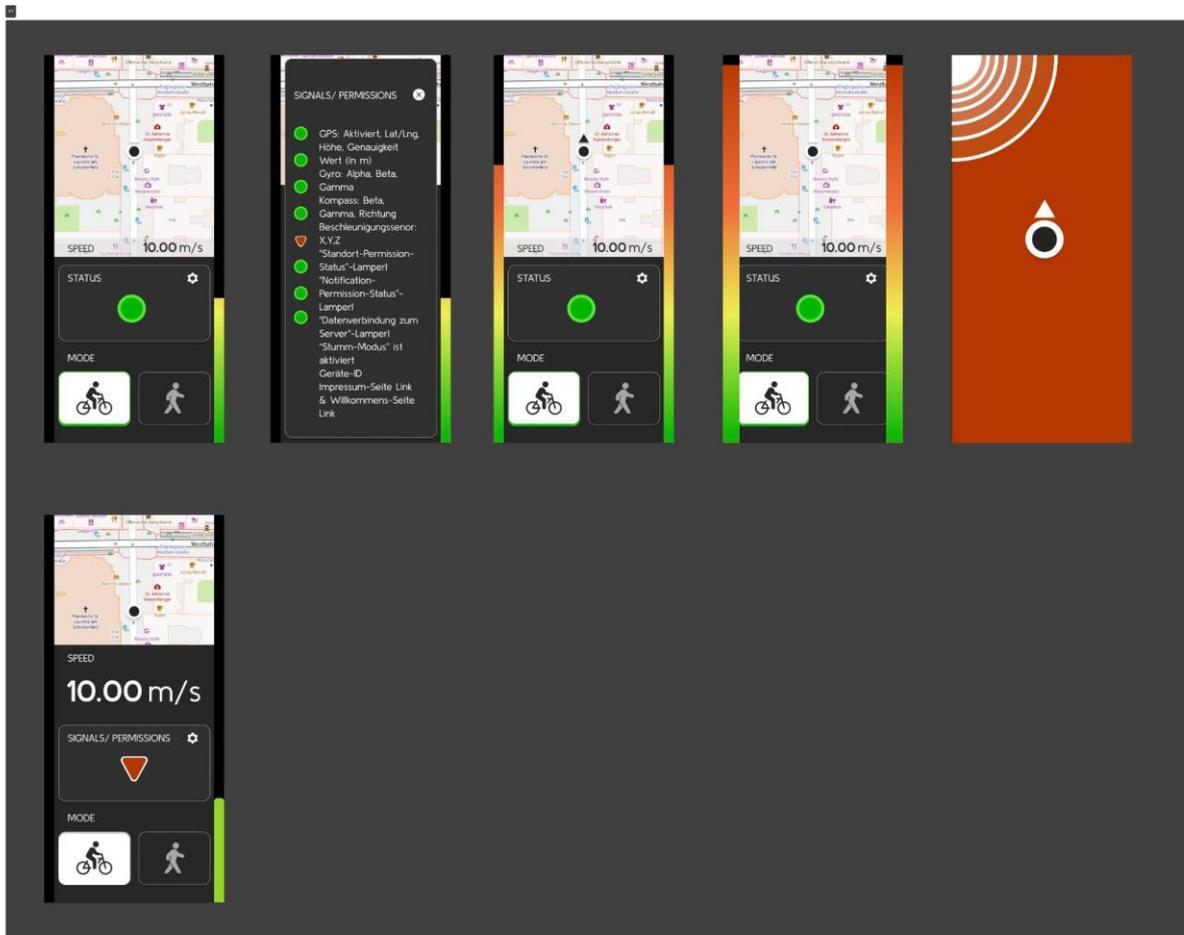


Abb. 12: Version 1 der User Experience der Smartphone-App

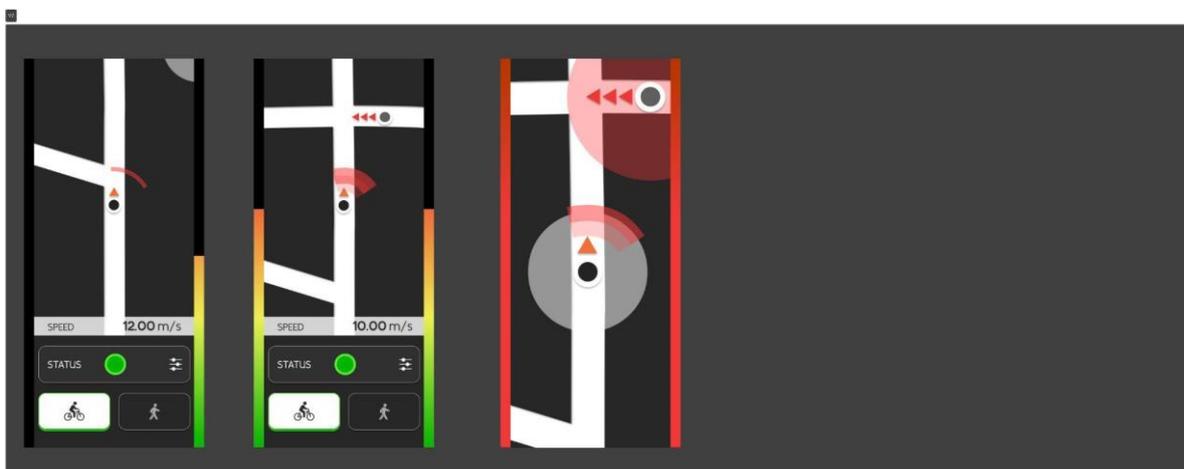


Abb. 13: Version 2 der User Experience der Smartphone-App

In Version 2 (siehe Abb. 13) flossen insbesondere folgende Erkenntnisse aus der Darstellung in Version 1 mit ein: Die Kartenansicht musste deutlich reduzierter sein und einen ähnlich hohen Kontrast aufweisen wie der Rest der Applikation, um im Tageslicht schnell erfassbar zu sein, basierend auf den Best Practices von Outdoor-Apps. Es wurde erkannt, dass visuelle Indikatoren im Bezug auf Geschwindigkeit und Verortung von Gefahrenquellen besser

erkennbar sein müssen. Dementsprechend wurde beschlossen, der Kartendarstellung mehr Platz einzuräumen, um eine effektivere Visualisierung zu ermöglichen.

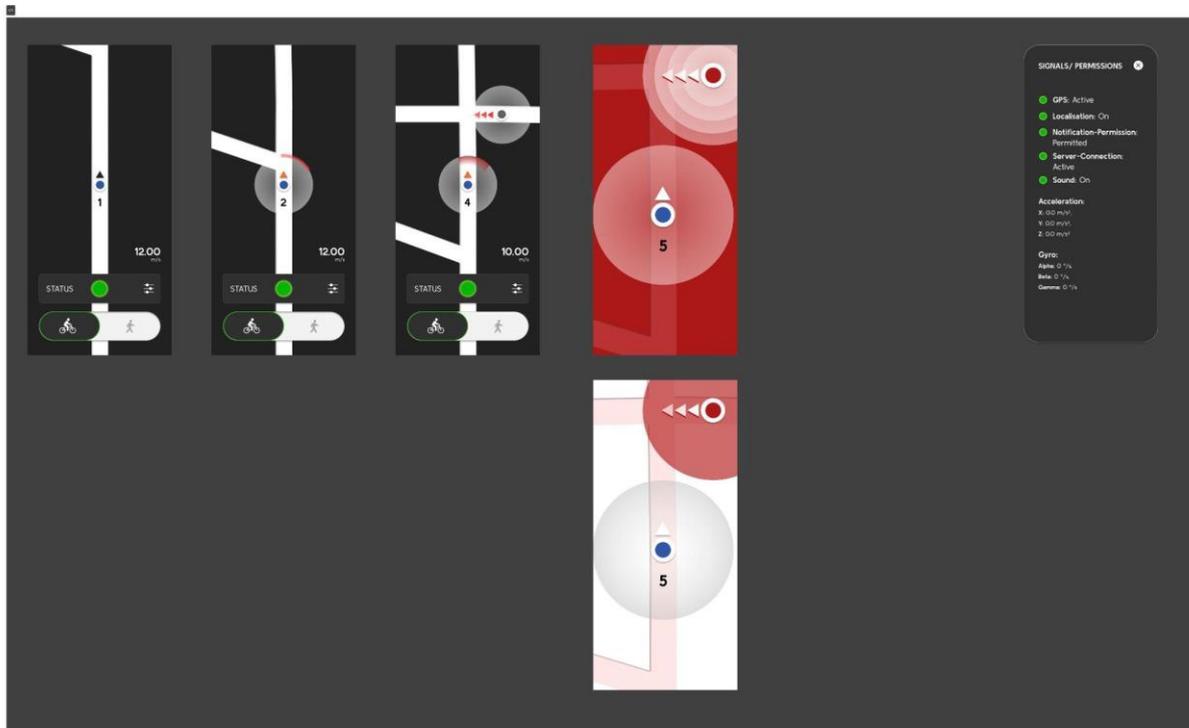


Abb. 14: Version 3 (finaler Entwurf) der User Experience der Smartphone-App

In Version 3 (siehe Abb. 14) wurden die Erkenntnisse aus der ersten Version weiter spezifiziert: Die Balken zur Gefahrenvisualisierung wurden entfernt, um den anderen Elementen mehr Raum und Aufmerksamkeit zu geben. Dies geschah vor dem Hintergrund, dass es sich um eine Applikation handelt, die im Grunde nur aus den Augenwinkeln wahrgenommen werden soll, wodurch jegliche Elemente entfernt wurden, die potenziell zu Ablenkung führen könnten. Die Kartenansicht erhielt noch mehr visuellen Raum, um eine bessere Erfassbarkeit zu gewährleisten. Des Weiteren wurde die Button-Darstellung der Modi "Gehen" und "Fahrrad" durch einen Toggler ersetzt, um Übergänge besser visualisieren zu können und die visuelle Komplexität des Elements zu reduzieren.

Im Rahmen dieses Arbeitspakets wurde auch ein sogenannter *Clickable Prototype* der Smartphone-App erstellt. Der Prototyp wurde mithilfe der Designplattform Figma entwickelt und umfasst verschiedene Funktionen und Interaktionen, die in der Anwendung implementiert werden sollen (siehe auch Abb. 15). Der Prototyp ermöglicht es den Teammitgliedern und Stakeholdern, die Benutzeroberfläche der App zu erkunden, Interaktionen mit verschiedenen Elementen durchzuführen und das Benutzererlebnis zu simulieren. Durch die Erstellung und Präsentation dieses Prototyps konnten potenzielle Feedbacks gesammelt, Design-Entscheidungen validiert und Iterationen vorgenommen werden, um die Benutzerfreundlichkeit und Effektivität der App zu verbessern.

Der *Clickable Prototype* kann über folgenden Link mit einem Webbrowser getestet werden:

<https://www.figma.com/proto/7DyLpGdke6qRn66FXJzaXt/MOBICELL?page-id=0%3A1&type=design&node-id=87-370&viewport=240%2C-328%2C0.13&t=qjPfJ8tew0NWXFij-1&scaling=scale-down&starting-point-node-id=87%3A370&show-proto-sidebar=1&mode=design>



Abb. 15: Visualisierung eines beispielhaften Programmablaufs (Flow) der Smartphone-App anhand eines Screenshots des Clickable Prototype

2.1.4.2 V2X-Kommunikation

Gemäß der Systemarchitektur (in Abb. 5) wurde in diesem Arbeitspaket die Kommunikation zwischen verschiedenen Smartphones (Clients) und einem sogenannten WebSocket-Server, der vom Projektpartner ifak im eigenen Haus durchgehend betrieben wird, durch entsprechende Programmierarbeiten eingerichtet. Im betriebsbereiten Zustand verbinden sich die ebenso auf einem Webserver implementierten Cloud-Dienste (u. a. Kollisionsalgorithmus) automatisch mit dem WebSocket-Server per MQTT, sodass die Daten der Smartphones permanent empfangen und verarbeitet sowie in den gegebenen Fällen Warnnachrichten an die Smartphones zurückgesendet werden können. Bei Bedarf können die Smartphone-Daten in einer Datenbank (DB) gespeichert werden, um z. B. den Ablauf einer Konfliktsituation anhand der Positions- und Geschwindigkeitsdaten im Nachgang auf einer Straßenkarte zu visualisieren. (Dieser zusätzliche Cloud-Dienst wird im nächsten Abschnitt 2.1.4.3 vorgestellt.)

Das Senden („Publish“) und Empfangen („Subscribe“) von MQTT-Nachrichten zwischen MQTT-Clients (Smartphone, Cloud-Dienst) und MQTT-Broker (WebSocket-Server) wird in der

folgenden Abb. 16 skizziert. Dabei wird jede Nachricht entsprechend ihres Inhalts einem vordefinierten Thema („Topic“) zugewiesen, wie z. B. „mobicell/sensordata“ für eine Nachricht, die die Sensordaten von einem Smartphone sendet. Jeder Client innerhalb des Netzwerks (z. B. der Cloud-Dienst Kollisionsalgorithmus) kann ausgewählte Topics abonnieren und erhält somit nur die für ihn relevanten Nachrichten (z. B. mit den Sensordaten).

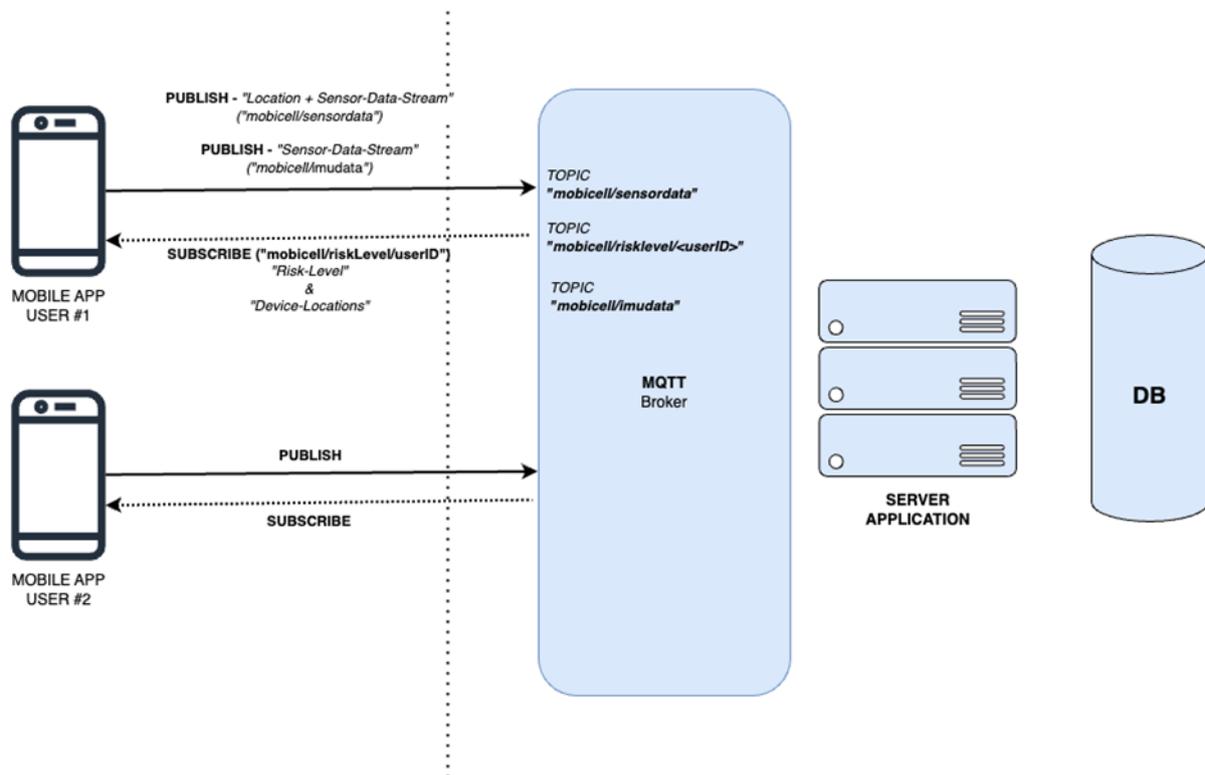


Abb. 16: Realisierung der V2X-Kommunikation zwischen Smartphones und Cloud-Diensten durch einen WebSocket-Server und das MQTT-Netzwerkprotokoll (schematische Darstellung)

Für ein funktionsfähiges VRU-Assistenzsystem sind im Prinzip nur zwei Topics erforderlich, da Nachrichten dafür in nur zwei Richtungen, d. h. von einem Smartphone zum Cloud-Dienst und umgekehrt, gesendet werden müssen. Diese sind folgende Topics:

- **mobicell/sensordata:** Nachricht von Nutzer mit globalen Positions- und Sensordaten
- **mobicell/risklevel/[userID]:** Nachricht an Nutzer mit einer bestimmten userID (z. B. „Picasso.1“ oder „Plath.2“) mit Informationen zu anderen Verkehrsteilnehmern in der Nähe inkl. Kollisionswarnungslevel

Der vollständige Inhalt („payload“) einer MQTT-Nachricht, der im JSON-Format geschrieben ist sowie als Text-Datei (*.json) gespeichert und mit einem geeigneten Webbrowser (z. B. Firefox) strukturiert dargestellt werden kann, wird für beide Topics in der folgenden Abb. 17 bzw. Abb. 18 beispielhaft dargestellt.²⁴

²⁴ Eine Auswahl von unter realen Bedingungen generierten MQTT-Nachrichten sowie eine Erläuterung zu den einzelnen Parametern, die auch in den Abbildungen genannt werden, ist auf folgender MobiCell-Projektseite in der Mobilithek zu finden: <https://mobilithek.info/offers/752205395700633600>

```

event: "locationChange"
speed: 1.66
heading: 66.48
altitude: 523.9
▼ geoposition:
  latitude: 47.7769217
  longitude: 9.5738314
  accuracy: 6.1
  heading: 66.48
  speed: 1.66
▼ activity:
  type: "walking"
  confidence: 100
▼ gyroscope:
  x: -0.2426007660272118
  y: -0.23387411976724015
  z: 0.26005405854715513
▼ acceleration:
  x: 0.9
  y: 2.2
  z: 10.200000000000001
▼ magnetometer:
  magneticHeading: 0
  trueHeading: 0
▼ uuId:
  userId: "Picasso.1"
  timestamp: 1714397157764
  inittimestamp: 1713861983323

```

Abb. 17: Beispielhafter Inhalt einer MQTT-Nachricht mit dem Topic `mobicell/sensordata`

```

timestamp: 1714397167514
userId: "Picasso.1"
▼ nearbyUsers:
  ▼ 0:
    userId: "Plath.2"
    ▼ geoposition:
      latitude: 47.7769618
      longitude: 9.5740748
      accuracy: 3.2
      heading: 352.72
      speed: 1.32
    heading: 352.72
    speed: 1.32
    ▼ activity:
      type: "walking"
      confidence: 100
      riskLevel: 4
      reaction: "Break"
    ▼ geoposition:
      latitude: 47.7769903
      longitude: 9.5740655
      accuracy: 6
      heading: 66.82
      speed: 1.67

```

Abb. 18: Beispielhafter Inhalt einer MQTT-Nachricht mit dem Topic `mobicell/risklevel/Picasso.1`

2.1.4.3 Cloud-Service

Kollisionsalgorithmus

Vor der finalen Implementierung des wichtigsten Cloud-Dienstes, des Kollisionsalgorithmus, auf einem Server, wurde dieser zunächst in einem Simulationsmodell getestet, das in einem Python-Programm implementiert wurde und auf einem PC ausführbar ist. Mithilfe des Simulationsmodells konnten die Korrektheit des mathematischen Modells (Abschnitt 2.1.3.2) überprüft und eventuell vorhandene Fehler im Kollisionsalgorithmus korrigiert werden.

Bei der Ausführung des Programms werden zwei Objekte (Verkehrsteilnehmer) auf einer Ebene mit den Abmessungen 640 x 480 Pixel²⁵ abgebildet (siehe Abb. 19). Die Objekte werden durch kinematische Parameter zur Änderung der Geschwindigkeit (Beschleunigung) und der Fahrtrichtung (Winkelgeschwindigkeit) bewegt und können dabei mittels Tastatur und Maus vom Nutzer gesteuert werden. Die Parameterwerte und die Objektgrundfläche (Länge, Breite) entsprechen standardmäßig einem Radfahrer (2 x 1 Meter), können aber beliebig angepasst werden, sodass sich auch Kraftfahrzeuge (z. B. Pkw wie in Abb. 19 dargestellt) simulieren lassen.

Mit dem Python-Programm können während eines Simulationslaufs reale MQTT-Nachrichten (Topic: `mobicell/risklevel/[userID]`) an den MQTT-Broker gesendet werden, falls der Kollisionsalgorithmus ein Kollisionsrisiko feststellt. Wenn die Nachrichten jeweils an einen

²⁵ Maßstab: 1 Pixel entspricht 1 Meter

bestimmten Nutzer (z. B. „Picasso.1“ bzw. „Plath.2“) gesendet werden, der mit der Smartphone-App gleichzeitig online ist, dann können die entsprechenden Warnmeldungen und Reaktionsempfehlungen auf zwei parallel angeordneten Smartphones (wie in Abb. 20) beobachtet werden. Dabei ergibt sich eine wahrnehmbare Zeitverzögerung (Latenz) zwischen dem Ereignis im Simulationsmodell (PC) und demselben Ereignis in der App (Smartphone), die vor allem die Übertragungszeit einer Nachricht über Internet und Mobilfunk widerspiegelt.

Ein weiterer Vorteil des Simulationsmodells besteht darin, dass mit diesem mathematisch exakte Positions- und Geschwindigkeitsdaten erzeugt werden. Dadurch kann der Kollisionsalgorithmus unter Laborbedingungen, das heißt ohne das unter Realbedingungen unvermeidliche Rauschen der GNSS- und anderer Sensordaten, getestet werden (wie z. B. im Rahmen von AP 4 zur Evaluation des Testsystems).

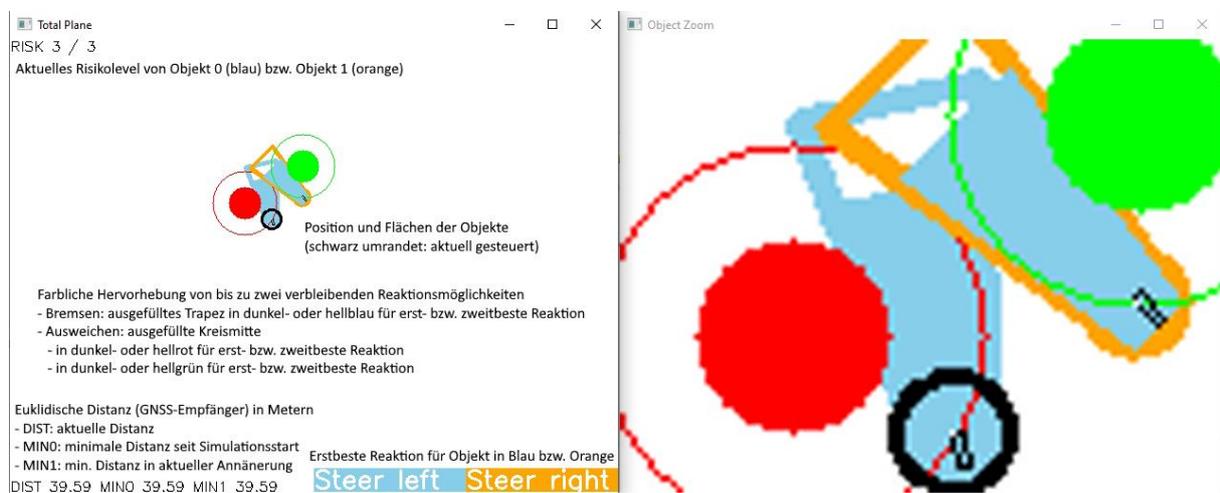


Abb. 19: Screenshot des Simulationstools zum Testen des Kollisionsalgorithmus

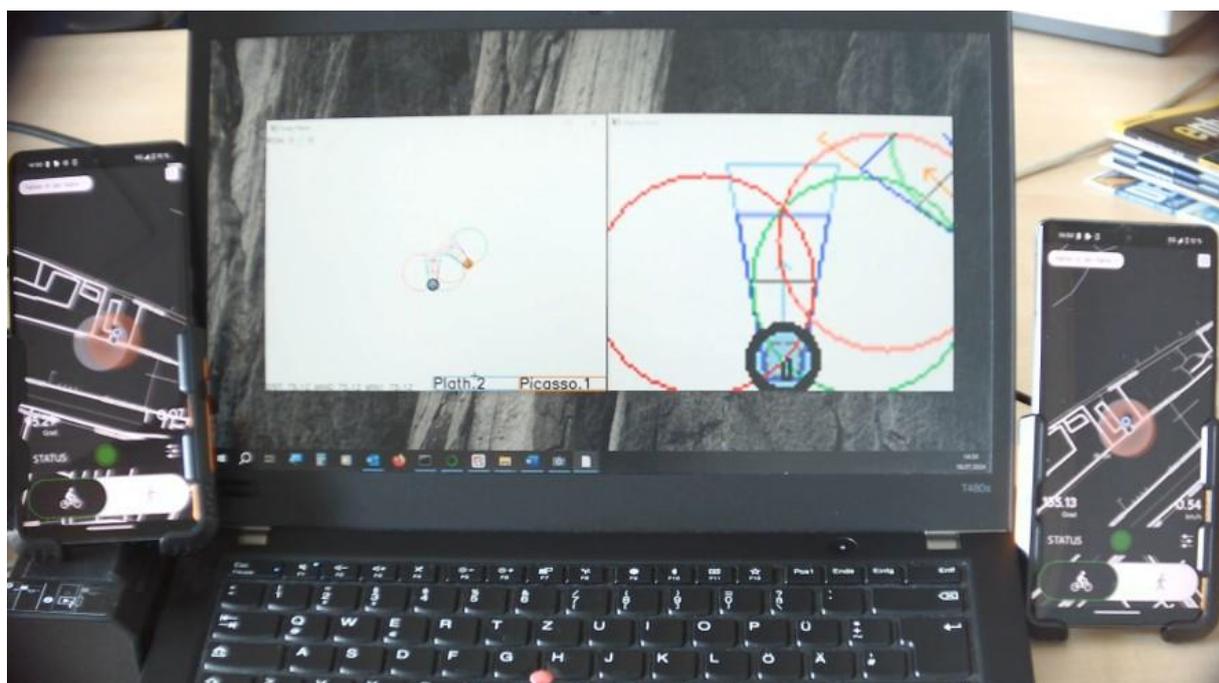


Abb. 20: Gleichzeitiger Einsatz von Simulationsmodell und Smartphone-App für Testzwecke

Weboberfläche für das Echtzeit-Tracking von App-Nutzern

Im Rahmen des Arbeitspakets wurde auch eine Weboberfläche als React-Anwendung entwickelt, mit der die Smartphones und ihr Bewegungsverlauf live verfolgt werden können, sofern die MobiCell-App aktiviert wurde oder zumindest im Hintergrund läuft. Dabei lassen sich zwar mehr als zwei Smartphones verfolgen, aber die Risikolevel werden nur von bis zu zwei Nutzern farblich dargestellt (siehe oben rechts in Abb. 21). Die Parameter im Fenster unten rechts sind für die Kalibrierung des Kollisionsalgorithmus vorgesehen. Darunter befinden sich zwei Buttons für optionale Anzeigen, wie z. B. den Geschwindigkeitsverlauf (unten links).

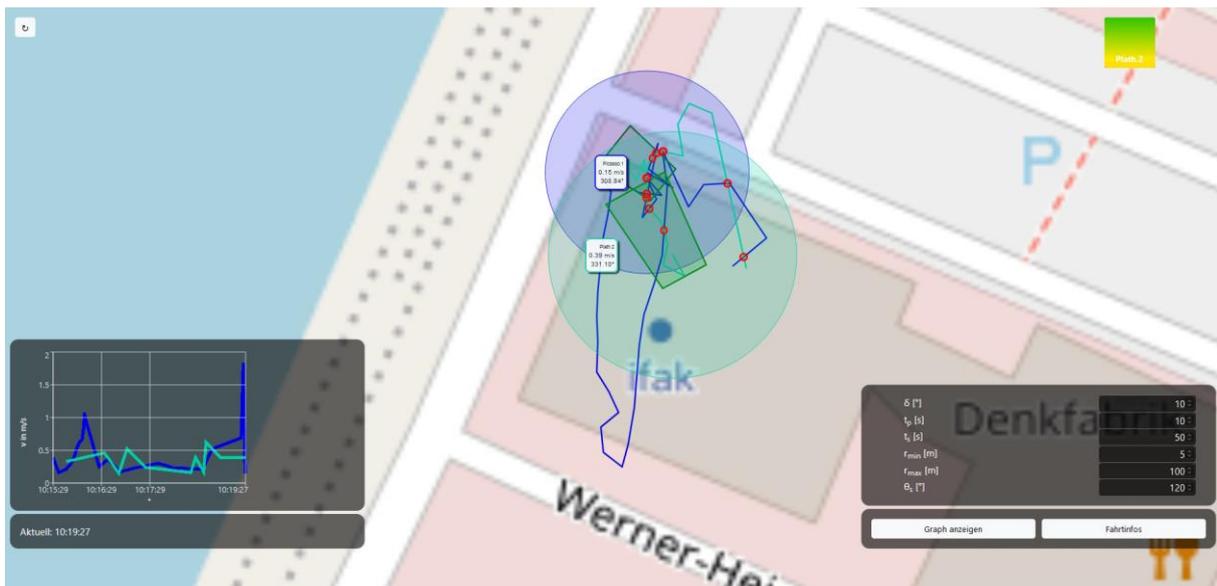


Abb. 21: Weboberfläche zum Echtzeit-Tracking von App-Nutzern

2.1.5 AP 4 Evaluation Testsystem (Proof of Concept)

Das Ziel von AP 4 bestand in der Überprüfung der Funktionsfähigkeit des entwickelten Prototyps durch Tests unter Realbedingungen (im Folgenden mit Funktionstests bezeichnet). Als Voraussetzung dafür sollte ein Evaluierungskonzept mit praktischen Prüfungsaufgaben und Bewertungskriterien erstellt werden. Anschließend sollten die Funktionstests durch projektinterne Testnutzer durchgeführt werden. Die dabei erhobenen Daten waren schließlich auszuwerten und eine Auswahl von beispielhaften Sensor- und Kommunikationsdaten (d. h. entsprechende MQTT-Nachrichten) in der Mobilithek zu veröffentlichen.

Im Einzelnen untergliederte sich das AP 4 in folgende zwei Unterarbeitspakete:

- AP 4.1 Planung und Vorbereitung
- AP 4.2 Durchführung und Auswertung

2.1.5.1 Planung und Vorbereitung

Die Planung der praktischen Prüfungsaufgaben orientierte sich an den bereits beschriebenen Anwendungsfällen (Abschnitt 2.1.2.3). Diese konnten durch eine Variation und Kombination

von Kollisionswinkel und Geschwindigkeiten der beiden Objekte differenziert werden. Bei einem ersten Praxisversuch mit zwei Fahrrädern stellte sich jedoch heraus, dass die Winkel und Geschwindigkeiten nur in größeren Abständen verändert werden sollten, da die genaue Einhaltung dieser selbst auf freiem Gelände und ohne störenden Umgebungsverkehr sehr aufwändig ist. Außerdem muss jedes Szenario wiederholt in der exakt gleichen Weise durchgeführt werden, da die jeweils gemessenen Positions- und Geschwindigkeitsdaten, die letztlich maßgebend sind, stets schwanken und demzufolge gemittelt werden müssen.

Daher wurde entschieden, dass aus Zeitgründen nicht alle 20 Szenarien, die sich aus den für sinnvoll erachteten Variations- und Kombinationsmöglichkeiten ergeben und in den folgenden Tabellen (Tab. 6 und Tab. 7) definiert sind, in der Praxis durchgeführt werden sollten. Die fehlenden bzw. nur unzureichend häufig durchgeführten Szenarien sollten stattdessen mithilfe des Simulationsmodells (Abschnitt 2.1.4.3) geprüft werden. Somit wurden – wie in Abb. 22 symbolisch dargestellt – zwei Vorgehensweisen zur Evaluation des Testsystems angewendet.

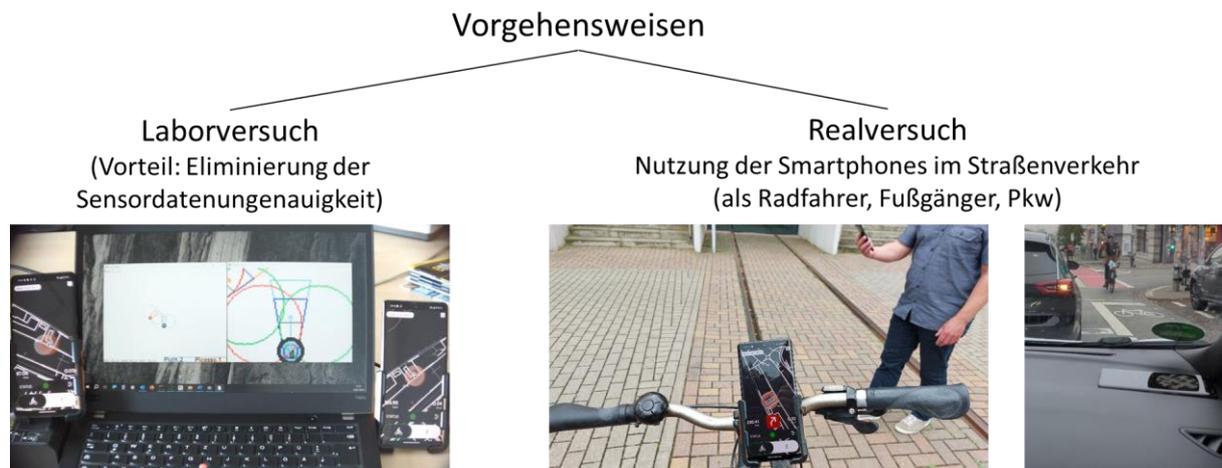


Abb. 22: Prinzipielle Unterscheidung der Vorgehensweisen zur Evaluation des Testsystems

Tab. 6: Szenarien der möglichen Begegnungen von zwei Radfahrern (Objekt 1, Objekt 2)

Geschwindigkeit Kollisionswinkel	Gleiche Geschwindigkeit	Objekt 1 schneller als Objekt 2 ($v_1 > v_2 > 0$)	Objekt 1 bewegt und Objekt 2 in Ruhe ($v_1 > v_2 = 0$)
0°	Szenario 1: Frontale Annäherung	---	Szenario 9: Objekt 1 wird von Objekt 2 gesehen
45°	Szenario 2: Seitliche Annäherung von vorn rechts	---	---
90°	Szenario 3: Rechtwinkelige Annäherung von rechts	---	---
135°	Szenario 4: Seitliche Annäherung von hinten rechts	---	---

180°	---	Szenario 5: Überholen eines langsameren Objekts	Szenario 10: Objekt 1 wird von Objekt 2 <u>nicht</u> gesehen
225°	Szenario 6: Seitliche Annäherung von hinten links	---	---
270°	Szenario 7: Rechtwinkelige Annäherung von links	---	---
315°	Szenario 8: Seitliche Annäherung von vorn links	---	---

Tab. 7: Szenarien der möglichen Begegnung von Radfahrer (Objekt 1) und Fußgänger (Objekt 2)

Geschwindigkeit Kollisionswinkel	Gleiche Geschwindigkeit	Objekt 1 viel schneller als Objekt 2 ($v_1 \gg v_2 > 0$)	Objekt 1 bewegt und Objekt 2 in Ruhe ($v_1 > v_2 = 0$)
0°	---	Szenario 11: Frontale Annäherung	Szenario 19: Objekt 2 wird von Objekt 1 gesehen
45°	---	Szenario 12: Seitliche Annäherung von vorn rechts	---
90°	---	Szenario 13: Rechtwinkelige Annäherung von rechts	---
135°	---	Szenario 14: Seitliche Annäherung von hinten rechts	---
180°	---	Szenario 15: Überholen eines langsameren Objekts	Szenario 20: Objekt 2 wird von Objekt 1 <u>nicht</u> gesehen
225°	---	Szenario 16: Seitliche Annäherung von hinten links	---
270°	---	Szenario 17: Rechtwinkelige Annäherung von links	---
315°	---	Szenario 18: Seitliche Annäherung von vorn links	---

2.1.5.2 Durchführung und Auswertung

Laborversuche zur Plausibilitätsprüfung der Reaktionsempfehlungen

Um die Plausibilität der vom Algorithmus berechneten Reaktionsempfehlungen zu überprüfen, wurden alle Szenarien (1-20) simuliert, bei denen die beiden Objekte jeweils aus unterschiedlichen Positionen starten und sich mit konstanter Geschwindigkeit auf einen Kollisionspunkt zubewegen. Nach entsprechender Annäherung wird eine erst- und zweitbeste Reaktionsempfehlung für jedes Objekt berechnet und angezeigt, die in Tab. 8 und Tab. 9 wiedergegeben und bzgl. der Plausibilität farblich bewertet werden (siehe Legende darunter).

Tab. 8: Reaktionsempfehlungen für Objekte 1 und 2 (jeweils Radfahrer) bei Szenarien 1-10

Szenario	Erstbeste Reaktionsempfehlung		Zweitbeste Reaktionsempfehlung	
	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 1	Objekt 2
1	L B R	L B R	L B R	L B R
2	L B R	L B R	L B R	L B R
3	L B R	L B R	L B R	L B R
4	L B R	L B R	L B R	L B R
5	L B R	L B R	L B R	L B R
6	L B R	L B R	L B R	L B R
7	L B R	L B R	L B R	L B R
8	L B R	L B R	L B R	L B R
9	L B R	L B R	L B R	L B R
10	L B R	L B R	L B R	L B R

Tab. 9: Reaktionsempfehlungen für Objekte 1 (Radfahrer) und 2 (Fußgänger) bei Szenarien 11-20

Szenario	Erstbeste Reaktionsempfehlung		Zweitbeste Reaktionsempfehlung	
	Objekt 1	Objekt 2	Objekt 1	Objekt 2
11	L B R •	L B R •	L B R •	L B R •
12	L B R	L B R	L B R	L B R •
13	L B R •	L B R •	L B R •	L B R
14	L B R •	L B R •	L B R •	L B R
15	L B R •	L B R •	L B R •	L B R •
16	L B R	L B R	L B R •	L B R
17	L B R	L B R •	L B R •	L B R
18	L B R	L B R •	L B R	L B R •
19	L B R •	L B R •	L B R •	L B R •
20	L B R •	L B R •	L B R •	L B R •

Erläuterung zur farblichen Bewertung einer Reaktionsempfehlung L, B, R (siehe auch Tab. 5):

L B R Reaktionsempfehlung (grün) ist plausibel.

L B R Reaktionsempfehlung (rot) ist nicht plausibel. Andere Reaktion (gelb) ist besser.

L B R Keine der Reaktionsmöglichkeiten wird empfohlen (plausibel).

- Reaktionsempfehlung in zweiter Tabelle (Tab. 9) ist identisch mit erster (Tab. 8).

Beim Vergleich der erst- und zweitbesten Reaktionsempfehlungen von ähnlichen Szenarien, die bis auf die Veränderung von Objekt 2 identisch sind, wie zum Beispiel von Szenario 1 und 11, zeigt sich, dass die Reaktionsempfehlungen in nur 4 von 10 Szenario-Paaren identisch sind (1-11, 5-15, 9-19 und 10-20). Somit ist der Einfluss der Geschwindigkeit, die einen Radfahrer vom Fußgänger im Simulationsmodell um den Faktor 6 unterscheidet, maßgebend für die Reaktionsempfehlung. Bei unabhängiger Betrachtung der Reaktionsempfehlungen je Objekt und Szenario sind diese in jeweils 14 von 20 Fällen bei Objekt 1 bzw. Objekt 2 identisch. Insgesamt betrachtet sind die Reaktionsempfehlungen somit in 28 von 40 Fällen identisch.

Hinsichtlich der Plausibilität der Reaktionsempfehlungen sind insgesamt 4 Fälle nicht plausibel, die jeweils die erstbeste Empfehlung für Objekt 2 betreffen (siehe Szenarien 2, 8, 16 und 18). Darunter befindet sich ein Szenario-Paar (8-18), das darauf hinweist, dass der Kollisionswinkel von 315 Grad zwischen den Objekten (Radfahrer oder Fußgänger) vom Kollisionsalgorithmus bisher nicht zur einer plausiblen Reaktionsempfehlung verarbeitet wird. Wie in folgender Abb. 23 zu erkennen ist, sollte das Objekt 2 (orange, von oben kommend) am besten nach rechts ausweichen, und dadurch wie Objekt 1 dem Rechtsfahrgebot folgen. Beide Objekte können aber auch langsamer fahren bzw. abbremesen, um die Konfliktzone sicher zu passieren (entsprechend der berechneten zweitbesten Reaktionsempfehlung). Die gleiche Situation zwischen Radfahrer und Fußgänger ist in Abb. 24 dargestellt. Auch hier wäre die bessere Reaktion des Fußgängers (von oben kommend), stehen zu bleiben oder nach rechts auszuweichen, anstatt nach links zu gehen und somit weiter in die Konfliktzone, die sich durch den nach rechts ausweichenden Radfahrer in diese Richtung verschiebt.

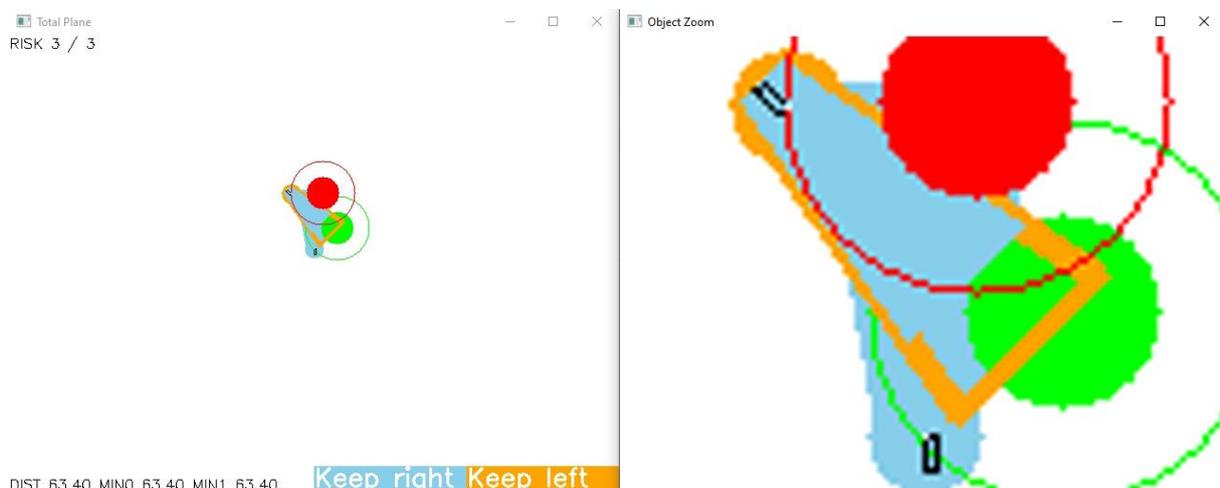


Abb. 23: Szenario 8 - Seitliche Annäherung eines zweiten Radfahrers von vorn links aus 315 Grad (Screenshot des Simulationsmodell)

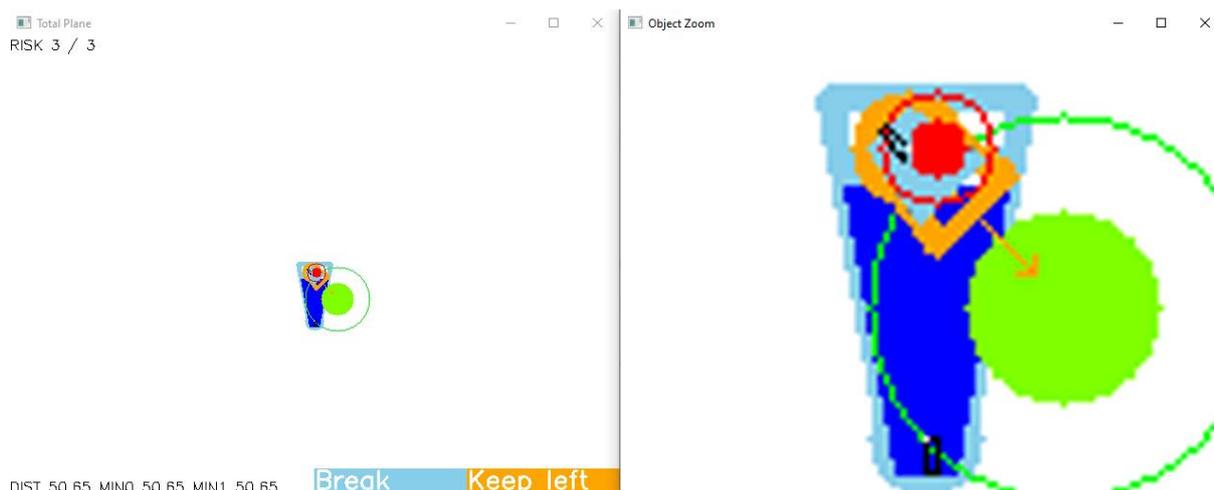


Abb. 24: Szenario 18 - Seitliche Annäherung eines Fußgängers von vorn links aus 315 Grad (Screenshot des Simulationsmodell)

Das Weiteren handelt es sich um Kollisionswinkel von 45 und 225 Grad (Szenario 2 bzw. 16), bei dem die Reaktionsempfehlung für Objekt 2 jeweils nicht plausibel ist. Somit liegen bei den vier betreffenden Szenarien ausschließlich flache oder spitze Winkel vor, bei denen die Reaktionsberechnung bisher nicht fehlerfrei funktioniert und einer Nachbesserung bedarf.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Kollisionsprognose des in Abschnitt 2.1.3.2 vorgestellten Algorithmus im Simulationsmodell fehlerfrei funktioniert. Jedoch sind die berechneten Reaktionsmöglichkeiten (nach links oder rechts ausweichen, oder bremsen) in bestimmten Situationen nicht korrekt und sollten durch eine Optimierung des Algorithmus korrigiert werden. Da die Berechnungsschritte des Algorithmus vergleichsweise kurz sind und alle Aufgaben, das heißt die Kollisionsprognose und Reaktionsempfehlung, in einer Iteration gelöst werden, ist er für eine Echtzeit-Anwendung mit vielen, gleichzeitigen Nutzern geeignet.

Realversuche zum Nachweis der Funktionsfähigkeit im Straßenverkehr

Ein erster Realversuch wurde Ende Oktober 2023 im Straßenverkehr durchgeführt, wobei zwei Smartphones (Google Pixel 7 Pro) auf einem Fahrrad und in einem Pkw mitgeführt wurden.²⁶ Da die MobiCell-App zum damaligen Zeitpunkt noch nicht verfügbar war, aber ein vollfunktionsfähiger Vorläufer in Form einer Webbrowser-Applikation (siehe auch Abb. 27, rechts), konnten die Daten von GNSS-Empfänger, Beschleunigungssensor und Magnetometer mithilfe dieser ausgelesen und an einen Webserver gesendet werden. Ziel des Versuches war es, die Genauigkeit der Sensordaten, insbesondere von Position und Geschwindigkeit, durch wiederholte Testfahrten auf demselben Streckenabschnitt, einer Hauptverkehrsstraße mit dichter Randbebauung (zwei- bis fünfgeschossige Gebäude), zu ermitteln und daraus ggf. weitere Anforderungen für die Entwicklung des Kollisionsalgorithmus und der MobiCell-App abzuleiten. Die ausgewerteten Sensordaten werden in den folgenden

²⁶ Die Testfahrten fanden am 24. und 25.10.2023 am Knotenpunkt Frankfurter Str. / Friedrichstr. in Gießen statt, als parallele Untersuchungen im Rahmen eines anderen Forschungsprojekts durch das ifak durchgeführt wurden.

Diagrammen bezüglich der Bewegungspfade (Abb. 25) und Geschwindigkeitsprofile (Abb. 26) von 10 Pkw- und 19 Fahrradfahrten veranschaulicht.

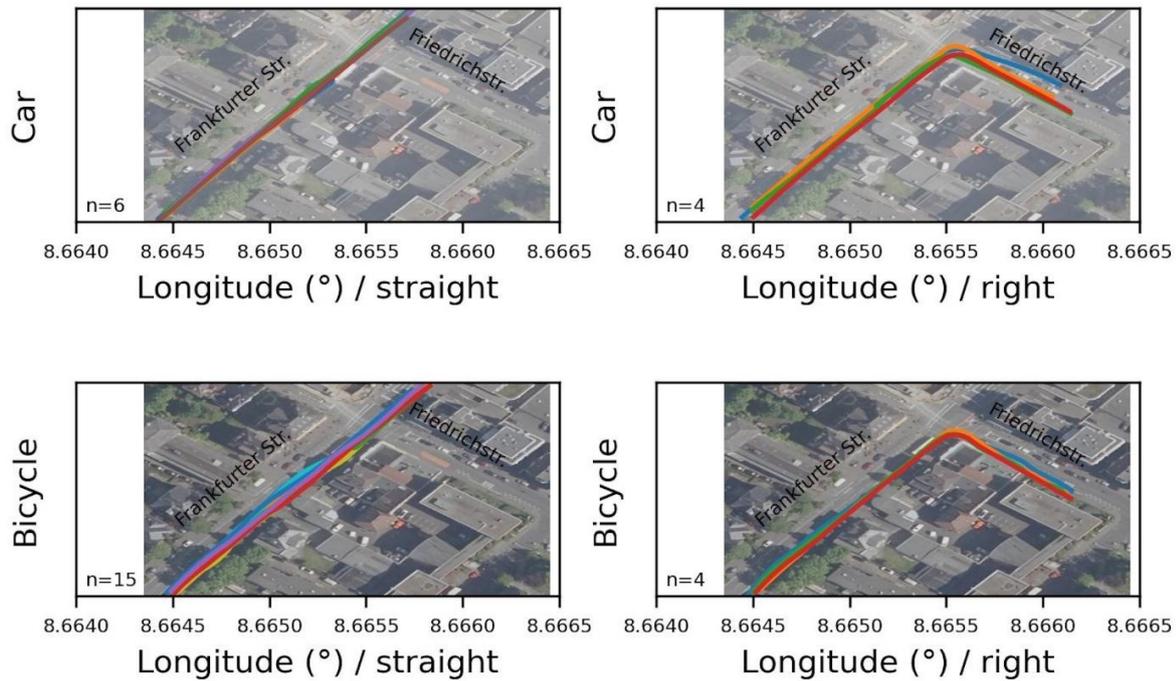


Abb. 25: Bewegungspfade (in Geokoordinaten) von Pkw und Radfahrern im Knotenpunktbereich, die anschließend geradeaus fahren (links oben bzw. unten) oder rechts abbiegen (rechts oben bzw. unten) (Quelle Luftbild: Hessisches Landesamt für Bodenmanagement und Geoinformation, DOP20 476/5602, 2022)

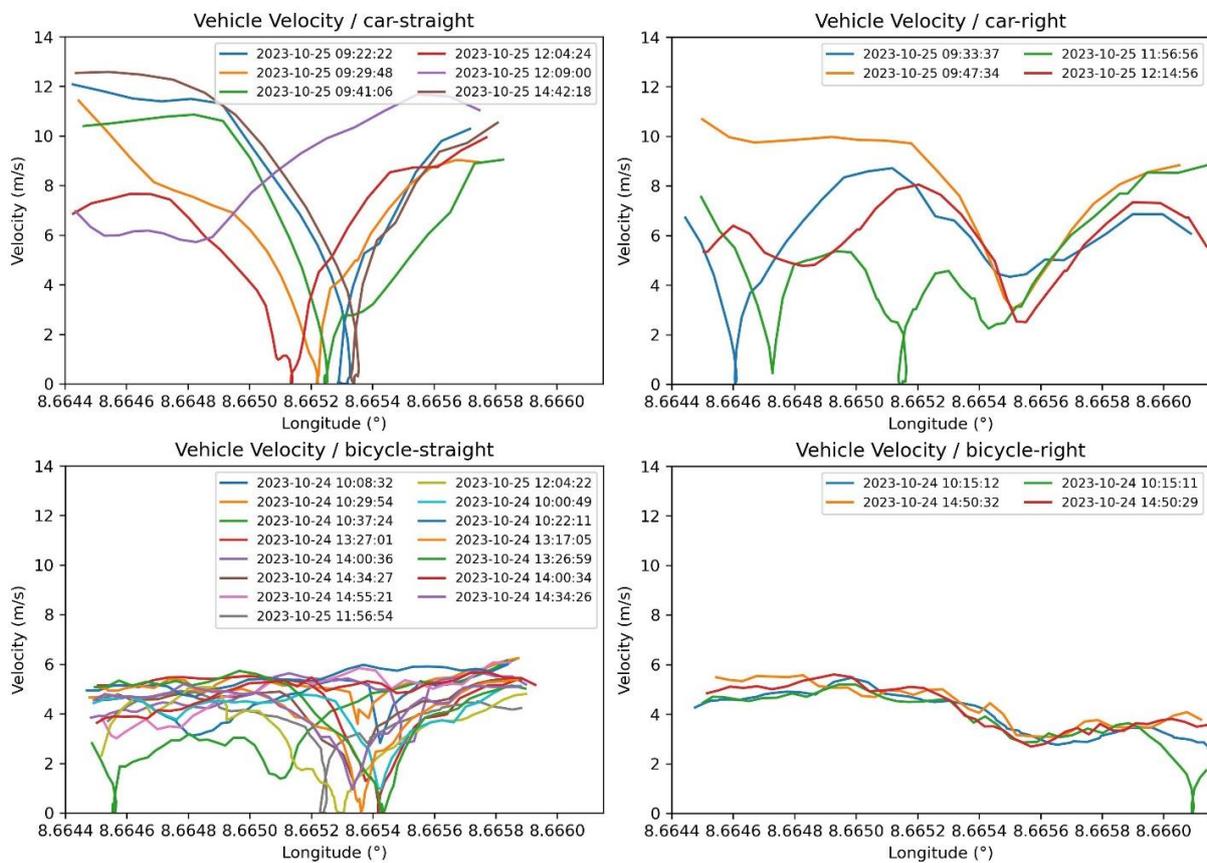


Abb. 26: Geschwindigkeitsprofile von Pkw und Radfahrern im Knotenpunktbereich (analog zu Abb. 25)

Wie anhand der Bewegungspfade in Abb. 25 zu erkennen ist, führten die Testfahrten auf der Frankfurter Straße, jeweils von Südwesten kommend, entlang zur Kreuzung Friedrichstraße und von dort entweder geradeaus oder nach rechts weiter. Auffällig ist das stärkere Rauschen der Positionsdaten bei den Fahrradfahrten (beide Diagramme unten), während die Bewegungspfade der Pkw-Fahrten (beide Diagramme oben), vor allem geradeaus, nahezu geradlinig und übereinander verlaufen. Dies ist vermutlich auf die höhere Geschwindigkeit des Pkw zurückzuführen, weil dadurch der GNSS-Empfänger in der Regel genauere Positionsdaten als bei geringeren Geschwindigkeiten oder im Stillstand ermittelt.

Bei Betrachtung der entsprechenden Geschwindigkeitsprofile (Abb. 26) sind die Unterschiede zwischen Pkw (oben) und Fahrrad (unten) deutlich zu erkennen. Aufgrund der LSA-Steuerung des Knotenpunkts treten bei fast allen Pkw-Fahrten entsprechende Stillstandphasen im selben Bereich auf (analog auch bei den Fahrradfahrten). Außerdem ist zu erkennen, wie die Geschwindigkeit beim Geradeausfahren (beide Diagramme links), vor allem mit dem Pkw bei Grünphasen, im Durchschnitt höher ist als beim Rechtsabbiegen.

Demzufolge sind die gemessenen Positions- und Geschwindigkeitsdaten insgesamt plausibel. Die Genauigkeit der Positionsdaten schwankt jedoch um mehrere Meter, da die Fahrradfahrten in der Realität ausnahmslos auf einem etwa 1,85 Meter breiten Radfahrstreifen verliefen, während die gemessenen Positionsdaten auch auf dem benachbarten Fußweg oder Kfz-Fahrstreifen liegen (siehe Abb. 25 unten links).

Um die Ortungsgenauigkeit der Smartphones einschätzen zu können, wurde ein Experiment durchgeführt, bei dem die zwei baugleichen Smartphones in einem Abstand von rund 2 Metern auf einem Balkon unter sonst freiem Himmel positioniert wurden (siehe Abb. 27, oben links). Dabei wurden die Sensordaten mit der bereits erwähnten Webbrowser-App über 30 Minuten erfasst (siehe Abb. 27, rechts). Der aus den Positionsdaten berechnete Abstand wird im Diagramm unten links (blaue Kurve) dargestellt. Danach schwankte dieser in zyklischer Form um bis zu 10 Meter, was in etwa mit der GNSS-Genauigkeitsangabe (accuracy) korreliert.

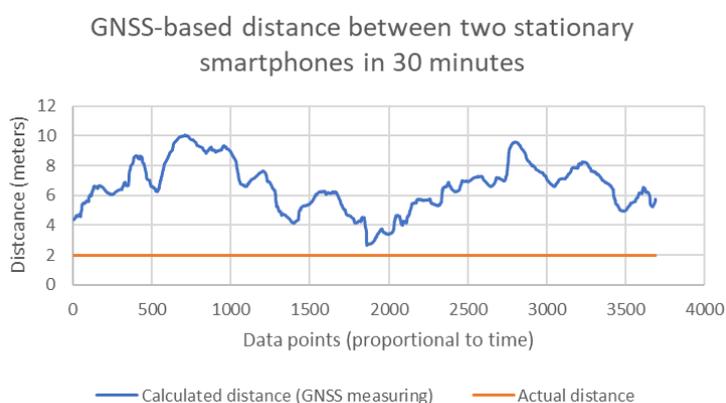


Abb. 27: Experiment zur Untersuchung der GNSS-Ortungsgenauigkeit mit zwei Smartphones

Aufgrund des identischen Messverfahrens mit den zwei baugleichen Smartphones und der daraus resultierenden Möglichkeit, dass sich die einzelnen, GNSS-bedingten Abweichungen (Fehler) teilweise kompensieren, wurde die tatsächliche Ungenauigkeit der Ortungsdaten, die nur gegenüber einem ortsfesten Referenzpunkt feststellbar ist, bei diesem Experiment vermutlich unterschätzt. Unter Abzug des tatsächlichen Abstands (2 Meter) beträgt der maximale Fehler sogar nur 8 Meter, und ist somit deutlich kleiner als die vom GNSS gelieferte Genauigkeitsangabe (accuracy), die z.B. 14 Meter betragen kann (wobei jedoch in diesem Fall in einem Gebäude in Fensternähe gemessen wurde, wie in Abb. 27 rechts zu erkennen ist).

Die Ortungsgenauigkeit wurde daher auch bei einem späteren, zweiten Realversuch untersucht. Dieser wurde mit dem vollständig entwickelten System am 09.04.2024 auf dem Burjanplatz in Wien, in der Nähe des Sitzes des Projektpartners Fluxguide, durch drei Personen (zwei Radfahrer, 1 Beobachter) durchgeführt (siehe Abb. 28, links). In der unmittelbaren Umgebung befanden sich ein paar höhere Bäume und mehrgeschossige Gebäude am Rand des Platzes, die die freie Sicht der GNSS-Empfänger zum Himmel, der an diesem Tag leicht bewölkt war, jedoch kaum beeinträchtigten.

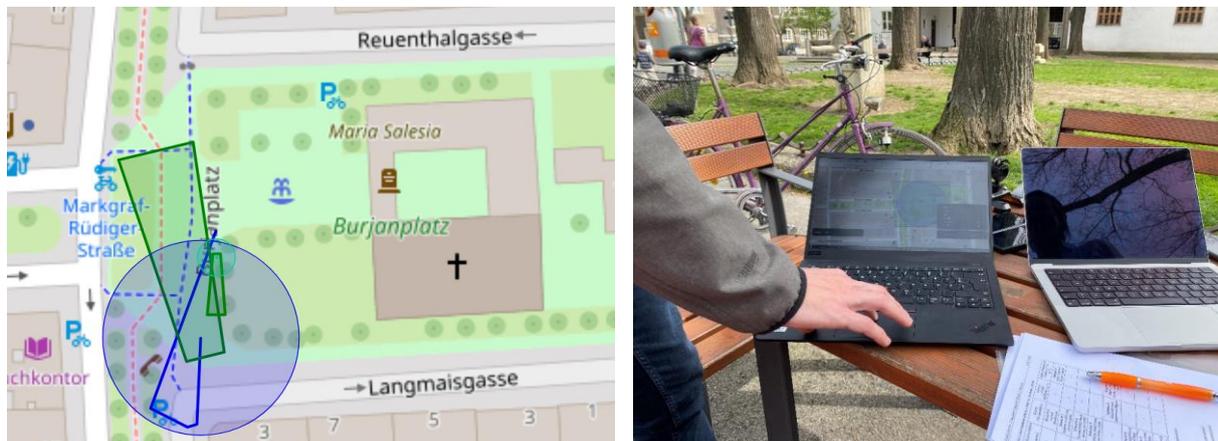


Abb. 28: Durchführung des zweiten Realversuches am 09.04.2024 in Wien

Durch das Tracking der Radfahrerpositionen und den Vergleich mit den tatsächlichen Standorten auf einer Karte durch den Beobachter während der Versuchsdurchführung (siehe Abb. 28, rechts), konnte durch diesen festgestellt werden, dass die GNSS-Ortungsgenauigkeit bei verschiedenen Umgebungsbedingungen immer deutlich über einem Meter bis teilweise über 10 Metern liegt. Demzufolge befanden sich die beiden Radfahrer bei relativ großem Abstand schon in einer gemeinsamen Konfliktzone, die durch den Kollisionsalgorithmus berechnet wurde, obwohl tatsächlich noch keinerlei Gefahr bestand.

Außerdem stellte sich während der ersten Testfahrten noch ein Programmierfehler (Bug) in der Smartphone-App heraus, durch den manchmal veraltete Positionswerte gesendet wurden, sodass der Kollisionsalgorithmus fehlerhafte Berechnungen durchführte. Für die weiteren Testfahrten wurde der Bug noch vor Ort behoben und der Radius des Positionsbereiches, der der GNSS-Ortungsgenauigkeit entspricht (siehe auch Abb. 10), durch den Faktor 5 geteilt. Dadurch ergab sich ein schmaleres Suchtrapez, das zu weniger, und nach subjektiver Wahrnehmung zu angemesseneren Warnmeldungen führte.

Nach den finalen Anpassungs- und Korrekturmaßnahmen am entwickelten System, wurde der dritte, letzte Realversuch am 29.04.2024 auf einem Parkplatz durchgeführt, der sich am Rand einer Kleinstadt mit freistehenden Wohngebäuden befand. Der Himmel war an diesem Tag leicht bewölkt und die freie Sicht der GNSS-Empfänger wurde durch einzelne, kleine Bäume auf dem Parkplatz kaum beeinträchtigt.

Es wurden 17 Annäherungssituationen zwischen einem Radfahrer und einem Fußgänger durchgeführt, die sich in unterschiedlichen Kollisionswinkeln, entsprechend den Szenarien in Tab. 7, auf einen potenziellen Kollisionspunkt zubewegten. Während das eine Smartphone wieder am Lenker eines Fahrrads befestigt war, wurde das andere durch den Fußgänger in einer Hand gehalten, sodass das Timing der Annäherung vor allem durch den Fußgänger genauer und sicherer gesteuert werden konnte, als wie mit zwei Radfahrern beim zweiten Realversuch in Wien. In der folgenden Abb. 29 ist der jeweils gemessene Bewegungsverlauf der Objekte, jeweils zum Zeitpunkt nach der Annäherung, für vier ausgewählte Situationen in der Kartenansicht dargestellt.

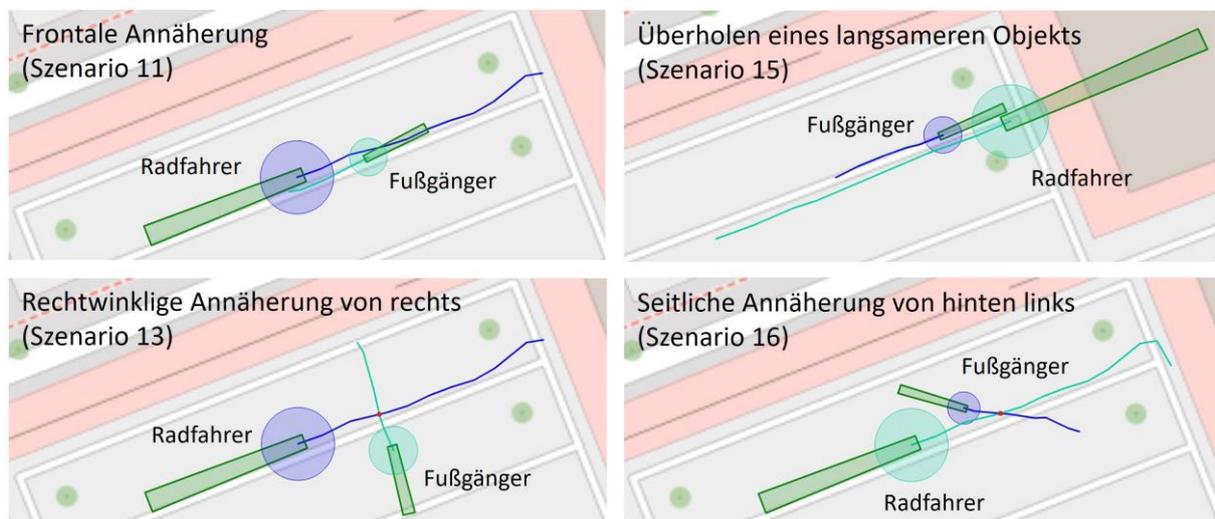


Abb. 29: Bewegungsverlauf von Radfahrer (Objekt 1) und Fußgänger (Objekt 2) in vier unterschiedlichen Annäherungssituationen auf einem Parkplatz

Um den detaillierten Ablauf einer Annäherungssituation und das dabei entstandene Kollisionsrisiko analysieren zu können, wurden sogenannte Kritikalitätsmaße wie die *Distance-To-Conflictpoint* (DCp) und die *Time-To-Conflictpoint* (TTCp) anhand der Messdaten zu beiden Objekten und jeder Situation berechnet. Diese werden in der Verkehrssicherheitsforschung vor allem zur Analyse und Bewertung von Konfliktsituationen und Beinahe-Unfällen zwischen Straßenverkehrsteilnehmern genutzt.²⁷ Die allgemeinen Definitionen lauten [11, S. 71-73]:

- **Distance-To-Conflictpoint (DCp):** räumliche Entfernung eines Verkehrsteilnehmers zum Konfliktpunkt gemäß der prädierten Trajektorie (Bewegungspfad)

²⁷ Die theoretischen Grundlagen dazu werden beispielsweise von Lareshyn et al. [14] ausführlich beschrieben.

- Time-To-Conflictpoint (TTCp): zeitliche Entfernung eines Verkehrsteilnehmers zum Konfliktpunkt mit konstant angenommener Geschwindigkeit v , d. h. $TTCp = DCp / v$

Da durch den Kollisionsalgorithmus des MobiCell-Systems (aufgrund der Anwendung von Schnittflächen) jedoch keine bestimmten Kollisionspunkte in Echtzeit prognostiziert werden, mussten die Definitionen insofern angepasst werden, als eine reine Ex-Post-Betrachtung einer Situation anhand der gemessenen Positionsdaten stattfand. Da heißt, ein potenzieller Konfliktpunkt wurde erst im Nachhinein anhand des Schnittpunkts der Trajektorien berechnet. Falls kein Schnittpunkt vorlag (z. B. beim Überholen oder Vorbeifahren), wurde jeweils der Punkt auf einer Trajektorie angenommen, bei dem die beiden Objekten den geringsten Abstand zueinander aufwiesen. Anhand der DCp wurde dann die TTCp durch Division der jeweils gemessenen Momentan-Geschwindigkeit v berechnet (entsprechend der oben genannten Gleichung). Die Ex-Post-Berechnung von DCp und TTCp ist aus methodischer Sicht insofern zulässig, als das Risikolevel des Kollisionsalgorithmus im MobiCell-System nicht von diesen abhängt, sondern von den in Echtzeit berechneten Schnittflächen der Suchtrapeze.

Die entsprechenden Ergebnisse werden in der folgenden Abb. 30 am Beispiel der rechtwinkligen Annäherungssituation (Szenario 13, analog Abb. 29, unten links) in vier Diagrammen dargestellt: In den beiden oberen Diagrammen sind die DCp und die Geschwindigkeit v abgetragen, das heißt links jeweils für den Radfahrer (Objekt 1) und rechts jeweils für den Fußgänger (Objekt 2). Analog dazu ist in den beiden unteren Diagrammen die TTCp und das Risikolevel abgetragen.

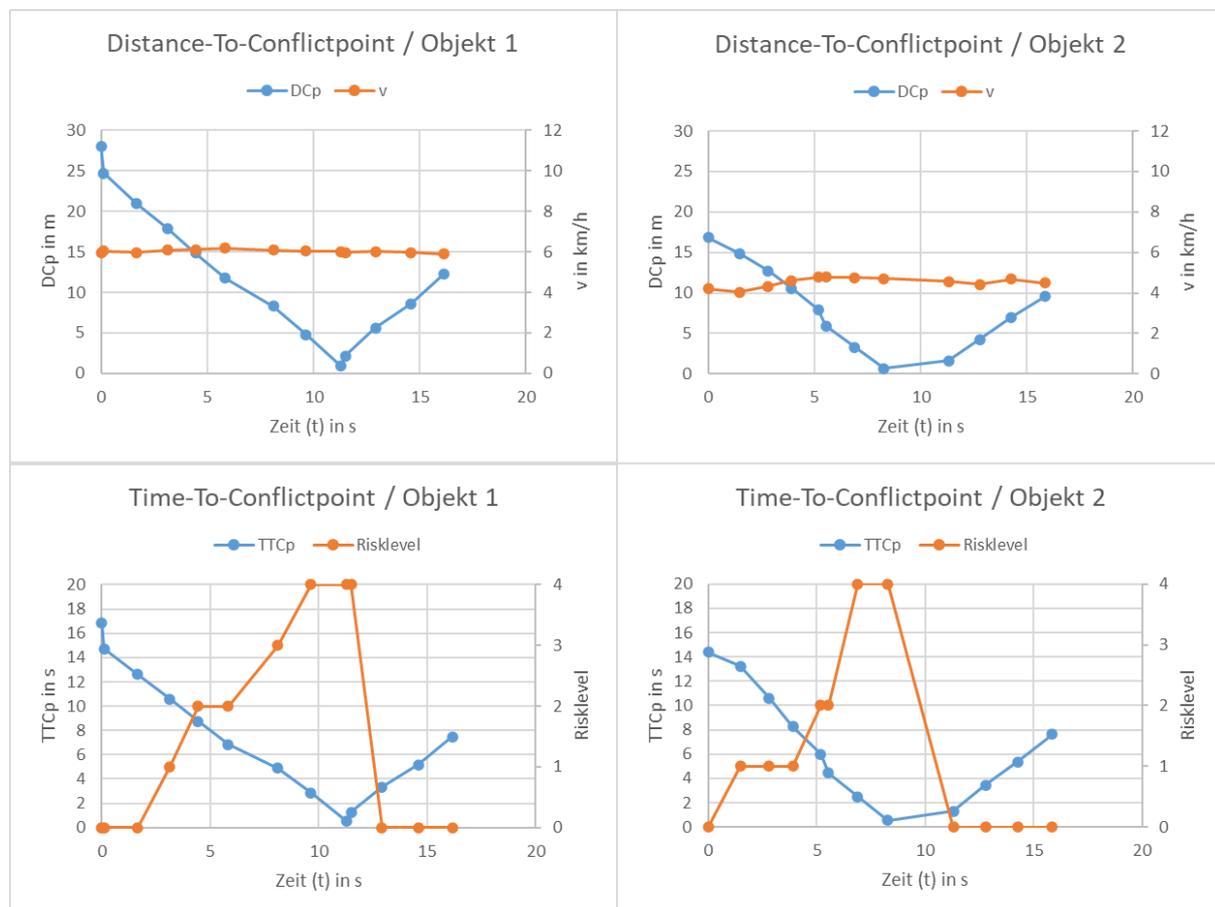


Abb. 30: Zeitlicher Verlauf einer Annäherungssituation (Szenario 13) anhand von Kritikalitätsmaßen

In den unteren Diagrammen wird die jeweilige Risikostufe (risklevel) für den Radfahrer (Objekt 1) bzw. Fußgänger (Objekt 2) angezeigt, die sich zwischen Stufe 0 und 4 bewegt. Sie wurde vom Kollisionsalgorithmus in Echtzeit bestimmt und an die Smartphones gesendet. Ab Stufe 2 werden vom Kollisionsalgorithmus auch Reaktionsempfehlungen bestimmt (gemäß Tab. 5), die in die Diagramme jedoch nicht eingetragen wurden, da diese aufgrund eines technischen Fehlers während der Versuchsdurchführung leider nicht gespeichert wurden.

Der Verlauf der Kurven während der Annäherungssituation ist nachvollziehbar und entspricht dem erwarteten Verhalten des Kollisionsalgorithmus. Vor und nach dem Erreichen des potenziellen Konfliktpunktes fallen bzw. steigen die DCp und die TTCp in etwa linear, da die Geschwindigkeit der beiden Objekte nahezu konstant und auf einem relativ niedrigem Niveau bleibt.²⁸ Ein geringes Kollisionsrisiko (Stufe 1) wurde für den Radfahrer bereits rund 18 Meter bzw. 11 Sekunden vor dem potenziellen Konfliktpunkt ermittelt und angezeigt, sodass dieser seine Aufmerksamkeit auf den Fußgänger richten konnte. Aus der Perspektive des Fußgängers wurde die Risikostufe 1 etwa 15 Meter bzw. 13 Sekunden vor dem potenziellen Konfliktpunkt berechnet und angezeigt. Risikostufe 2, mit der gleichzeitigen Anzeige einer Reaktionsempfehlung, erschien für den Radfahrer 15 Meter bzw. 9 Sekunden und für den Fußgänger 8 Meter bzw. 6 Sekunden vor dem potenziellen Konfliktpunkt. Für beide Objekte wurde die höchste Risikostufe 4 jeweils etwa 2-3 Sekunden vor dem Erreichen des potenziellen Konfliktpunktes ausgegeben. Nach dem Überschreiten des Konfliktpunktes fiel die Risikostufe jeweils von 4 auf 0, wobei die Entwarnung für den Radfahrer etwas länger (rund 4 Sekunden) als für den Fußgänger (rund 2 Sekunden) dauerte.

2.1.5.3 Schlussfolgerungen

Nach den Ergebnissen der Labor- und Realversuche ist das prototypisch entwickelte VRU-Assistenzsystem grundsätzlich dazu geeignet, die Annäherung von mehreren ungeschützten Verkehrsteilnehmern in Echtzeit zu erkennen und diese per Smartphone darauf hinzuweisen, dass eine mögliche Konfliktsituation mit einem Kollisionsrisiko besteht. Allerdings hängt die Genauigkeit und Zuverlässigkeit einer Kollisionsprognose und die darauf basierende Berechnung von Reaktionsempfehlungen sehr stark von der Ortungsgenauigkeit des GNSS-Empfängers ab. Obwohl ein neues Smartphone (Google Pixel 7 Pro) mit einem integrierten Zweifrequenz-GNSS-Empfänger nach dem aktuellen Stand der Technik für die Entwicklungs- und Testzwecke eingesetzt wurde, traten dennoch Abweichungen von 1 bis 10 Metern zwischen der tatsächlichen und gemessenen Position in den meisten Fällen auf – und dies insbesondere bei Testfahrten in bebauten Stadtgebieten, wo das System wegen des hohen Anteils von ungeschützten Verkehrsteilnehmern vorzugsweise zum Einsatz kommen soll.

Es ist daher erforderlich, die Positionsbestimmung durch bewährte Korrekturverfahren, wie z. B. den Abgleich mit hochgenauen Straßenkarten, das heißt durch sogenanntes Map Matching, systemseitig zu verbessern, da auf Smartphones wegen der allgemeinen Verfügbarkeit und Kostenvorteile für die Nutzer nicht verzichtet werden sollte. Andererseits lassen sich beim Map Matching die Begegnungen auf größeren Verkehrsflächen (z. B. Alleen,

²⁸ Zur Sicherheit der Personen und besseren Kontrollierbarkeit der Situation fuhr der Radfahrer stets relativ langsam (ca. 6 km/h) auf den nur geringfügig langsameren Fußgänger (4-5 km/h) zu.

Plätze, Fußgängerzonen), wo die Verkehrsteilnehmer in der Regel keinem bestimmten Pfad folgen, sondern sich in der Fläche frei bewegen können, nicht mehr im System abbilden. Um jedoch zu bestimmen, ob sich ein Radfahrer z. B. auf dem Radweg, Fußweg oder Kfz-Fahrbahnstreifen einer breiten Straße befindet, können zusätzliche Sensordaten wie Geschwindigkeit und vertikale Beschleunigung, die Aufschluss über die Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche (z. B. holprig oder glatt, wellig oder flach) geben können, in das Map Matching einbezogen werden.

Mit der aktuellen Version des Systems, bei der die Ortungsgenauigkeit in der Regel unzureichend ist, treten vor allem beim schnelleren Hintereinanderfahren von mehreren Radfahrern zu häufig falsch-positive Warnmeldungen auf, wenn die gemessenen Positionen der einzelnen Radfahrer entlang des Weges hin und her springen und zudem der Kurs durch minimale Lenkerbewegungen schwankt. Dagegen kann die Nutzung der aktuellen Systemversion bei seitlichen oder frontalen Annäherungen von zwei ungeschützten Verkehrsteilnehmern, vor allem bei eingeschränkter Sicht durch Hindernisse, Starkregen, Nebel etc. oder auf gering frequentierten Wegen, wo eher nicht mit anderen Personen gerechnet und dementsprechend schneller gefahren wird, einen Sicherheitsgewinn bieten, da in der Nähe befindliche Systemnutzer auf dem Smartphone-Display wie bei einem Radar frühzeitig angezeigt werden (z. B. Rennrad- oder Mountainbike-Fahrer in Wäldern oder Parks).

Hinsichtlich der Anwendung von Risikostufen, die auch in vergleichbaren Assistenzsystemen zum Einsatz kommen, ist kritisch zu hinterfragen, ob diese für jeden Nutzer tatsächlich aussagekräftig und nützlich sind, da die Risikowahrnehmung in der Regel subjektiv ist und die objektive Gefahr von weiteren Faktoren wie dem Fahrerkönnen und dem Zustand der Bremsen, Reifen, Fahrbahnoberfläche etc. abhängt. Daher wurde beim Kollisionsalgorithmus des MobiCell-Systems ein flächenorientierter Modellierungsansatz für die Risikoerkennung und -einstufung gewählt, der zum einen die gegebene Schwankung der Sensordaten (Position, Kurs, Geschwindigkeit) berücksichtigt und zum anderen mit möglichst wenigen und unterscheidbaren Risikostufen auskommt, sodass die Auswahl von Kritikalitätsmaßen und die Festlegung von Schwellenwerten nicht notwendig war. Allerdings konnte der praktische Nutzen dieses Ansatzes bei den Realversuchen nur schwer überprüft werden, da letztlich auch die Korrektheit der Warnmeldungen von ungenauen Sensordaten negativ beeinflusst wurde.

Das System kann prinzipiell nur gut funktionieren, wenn möglichst viele Verkehrsteilnehmer die MobiCell-App aktiv nutzen. Es ist jedoch fraglich, ob eine solche App mit nur einer speziellen Funktion von der breiten Bevölkerung auf dem persönlichen Smartphone installiert und regelmäßig genutzt wird. Alternativ wäre eine direkte Integration in Google Maps und Apple Maps sicherlich eine Möglichkeit, die aber von Google und Apple auch gewollt und durchgeführt werden muss. Dann wäre es wahrscheinlich auch möglich, auf Hardwareebene Entwicklungen durchzuführen, z. B. um eine direkte Kommunikation zwischen den Smartphones zu ermöglichen, die im Hintergrund nach einmaliger Nutzerbestätigung immer läuft, sobald sich ein Nutzer im Freien als Radfahrer oder Fußgänger bewegt.

2.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit

2.2.1 ifak

Als außeruniversitäre Forschungseinrichtung wird das ifak die erzielten Projektergebnisse für wissenschaftliche Publikationen in Fachzeitschriften und auf Fachtagungen sowie als Vorarbeiten zur Akquisition von zukünftigen FuE-Projekten nutzen. Aufgrund der relativ kurzen Projektlaufzeit und entsprechend verdichteten FuE-Aktivitäten, die zur Entwicklung eines funktionierenden Prototypens bis zum Projektende notwendig waren, mussten die in der Regel zeitaufwändigen Publikationsaktivitäten währenddessen zurückgestellt werden. Dafür wurde jedoch mit dem vorliegenden Schlussbericht eine sehr ausführliche Beschreibung der Methoden und Ergebnisse geschaffen, die in die in naher Zukunft geplanten Publikationen wie Fachzeitschriftenartikel (z. B. in *Internationales Verkehrswesen* oder *Straßenverkehrstechnik*) mit unterschiedlichen Themenschwerpunkten einfließen werden.

Des Weiteren konnten über einzelne Teilnehmer der Abschlussveranstaltung zum MobiCell-Projekt am 23.07.2024, zwei aktuell geplante FuE-Projekte von anderen Konsortien in Erfahrung gebracht werden, die sich mit einem ähnlichen Thema beschäftigen. Nach ersten Gesprächen mit Vertretern dieser Konsortien bieten sich dabei Kooperationsmöglichkeiten für die MobiCell-Projektpartner, die aussichtsreich sind und weiter verfolgt werden sollen.

Mit der Bereitstellung eines Testdatensatzes²⁹ in der Mobilithek konnte das ifak sein bestehendes Datenangebot weiter ausbauen, das mittlerweile 13 unterschiedliche Themen umfasst, u. a. Echtzeit-Belegungsdaten von Parkplätzen und Standortdaten von Roadside Units. Die im Rahmen von MobiCell bereitgestellten Sensor- und Kommunikationsdaten von zwei Radfahrern in einer realen Annäherungssituation können z. B. zum Testen und Optimieren von neuen Varianten eines Kollisionsalgorithmus durch Dritte genutzt werden.

Das ifak konnte damit insgesamt eine wissenschaftliche und datenbezogene Verwertung der Projektergebnisse erreichen, die entsprechend dem Verwertungsplan und wie oben beschrieben auch nach dem Projektende weiter verfolgt werden soll.

2.2.2 Fluxguide

Das Engagement von Fluxguide in Forschungs- und Entwicklungsprojekten wie MobiCell, das sich mit innovativen Mobilitätslösungen und Smart City-Anwendungen befasst, stellt einen erheblichen Mehrwert für das Unternehmen dar. Diese Projekte bieten nicht nur die Möglichkeit, neueste Technologien zu erforschen und zu entwickeln, sondern auch potenzielle neue Geschäftsfelder zu erschließen und die eigene Position als führender Anbieter in diesem Bereich zu festigen.

- **Innovationsführerschaft und Technologieentwicklung:** Durch Projekte wie MobiCell, das die Sicherheit von Radfahrern und anderen Verkehrsteilnehmern durch innovative V2X-Kommunikationstechnologien erforscht, kann Fluxguide seine Kompetenz in der Entwicklung von zukunftsweisenden Mobilitätslösungen unter

²⁹ Testdaten des VRU-Assistenzsystems MobiCell (prototypisches Testsystem)
<https://mobilithek.info/offers/752205395700633600>

Beweis stellen. Die Integration von Smartphone-basierter Sensorik und Cloud-Diensten zur Kollisionserkennung und -vermeidung ermöglicht es Fluxguide, führende Technologien in der digitalen Vernetzung und im Smart City-Sektor weiterzuentwickeln.

- **Markterschließung und Kundenbindung:** Die Entwicklung von Systemen zur Verbesserung der städtischen Mobilität, wie sie in MobiCell angestrebt wird, eröffnet neue Märkte und Kundenkreise. Städte und Kommunen, die nach Lösungen für eine sicherere und effizientere Verkehrsgestaltung suchen, könnten potenzielle Abnehmer der von Fluxguide entwickelten Technologien sein. Darüber hinaus stärkt die Beteiligung an solchen Projekten die Beziehungen zu bestehenden Kunden durch das Angebot erweiterter Dienstleistungen.
- **Forschungskooperationen und Netzwerkbildung:** Projekte wie MobiCell ermöglichen es Fluxguide, Partnerschaften mit Forschungseinrichtungen, anderen Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen zu knüpfen oder zu vertiefen. Diese Netzwerke sind wertvoll für den Austausch von Know-how, den Zugang zu Fördermitteln und die gemeinsame Entwicklung neuer Lösungen.
- **Nachhaltigkeit und gesellschaftlicher Beitrag:** Durch die Teilnahme an Projekten, die die Sicherheit im Verkehr erhöhen und zu einer nachhaltigeren Mobilität beitragen, kann Fluxguide sein Engagement für gesellschaftlich relevante Themen demonstrieren. Dies stärkt nicht nur das Unternehmensimage, sondern trägt auch dazu bei, die städtische Lebensqualität zu verbessern und die Umweltauswirkungen des Verkehrs zu verringern.

Insgesamt bietet die Beteiligung am Vorhaben für Fluxguide erhebliche Vorteile in Bezug auf Technologieentwicklung, Markterschließung, Forschungskooperationen und gesellschaftlichen Beitrag. Das Projekt ist daher ein integraler Bestandteil der Strategie von Fluxguide, um als innovativer Leader im Bereich der digitalen Lösungen für Smart Cities und Mobilität weiter zu wachsen.

2.3 Bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Im Vergleich zum aktuellen Stand der Forschung und Technik, der in der Vorhabenbeschreibung (in der letzten Fassung vom 03.05.2023) ausführlich beschrieben wurde, sind während der Durchführung des MobiCell-Projekts keine wesentlichen Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen bekannt geworden.

2.4 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

- Pressemitteilung „Ortung und Schutz von vulnerablen Verkehrsteilnehmern durch vernetzte Smartphones – Machbarkeitsuntersuchung MobiCell gestartet“ vom 14.07.2023 (abrufbar unter: <https://nextcloud.ifak.eu/s/nrxEfqyBZZqak5s>)
- Projektwebseite <https://mobicell.ifak.eu/>
- Öffentliche Auftaktveranstaltung am 05.09.2023 in Magdeburg (hybrid)
- Öffentliche Abschlussveranstaltung am 23.07.2024 (virtuell)

- Erwähnung des Projekts im Online-Artikel „Autos sollen Radfahrer vor sich warnen“ auf dem IT-Nachrichten-Portal GOLEM.DE, von Michael Linden, am 10.05.2024 (abrufbar unter: <https://www.golem.de/news/c-v2x-autos-sollen-radfahrer-vor-sich-warnen-2405-184991.html>)
- Ein geplanter Vortrag auf der mFUND-Konferenz am 08.10.2024 in Berlin (angefragt bei Begleitforschung mPACT am 21.08.2024) konnte von der Programmplanung leider nicht mehr berücksichtigt werden.

Diverse Beiträge in Sozialen Netzwerken durch Fluxguide (siehe auch Abb. 31 bis Abb. 33):

- Blogbeitrag Auftaktveranstaltung 2023: <https://www.fluxguide.com/mobicell-kick-off/>
- Newsletter F&E Smart City Testing Juni 2024
- Blogbeitrag Testing 2024: <https://www.fluxguide.com/mobicell-prototyp-testing/>
- Facebook Auftaktveranstaltung 2023 und Abschlussveranstaltung 2024:
 - <https://www.facebook.com/photo?fbid=932435138896918&set=a.480612310745872>
 - <https://www.facebook.com/fluxguide/posts/pfbid0JJ53xo63A6aZhNAekDkngQcJqPxyZ5Av1cmgbaMC6cmr1iQbhMQ3i3h317thQQ8el>
- Instagram Auftaktveranstaltung 2023 und Abschlussveranstaltung 2024:
 - <https://www.instagram.com/p/C9MU8lfK1Y7/>
 - <https://www.instagram.com/p/CwC9T0UqQ7h/>
 - <https://www.instagram.com/p/CwC9T0UqQ7h/>

fluxguide



Topics of this issue

Mobility data visualization
Not on collision course with MobiCell
AR for your ears – Flex.Audio
Upcoming call for proposals
Job offering: AR/ MR Developer

Not on collision course with MobiCell

In this feasibility study project with [ifak Magdeburg](#), we are developing a prototype app that uses V2X (vehicle-to-everything) communication and connected smartphones to protect vulnerable road users by issuing collision warnings.

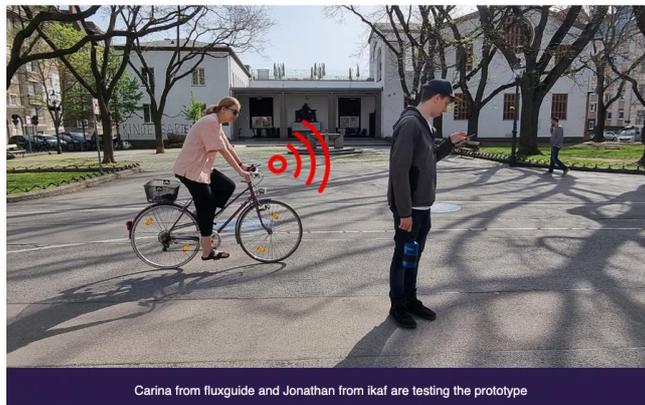
Here is how it works: the app collects various sensor data from vulnerable road users. This data is processed by an algorithm developed by ifak. If there is a risk of a collision, the app issues a collision warning at different levels and a recommendation to take evasive action.

Together with our project partner, we recently tested and documented various collision scenarios on foot and by bike on the streets of Vienna. We are currently evaluating the results and further optimizing the system before presenting the final results in July. [Read more on the latest testing.](#)

Meanwhile, we are delighted that the renowned online IT magazine Golem has also become aware of the MobiCell project and recently [wrote](#) about it.

For upcoming updates check our [website](#)

MobiCell is funded by the Federal Ministry of Digital and Transport as part of the [mFUND innovation initiative](#).



Carina from fluxguide and Jonathan from ifak are testing the prototype

Abb. 31: Blogbeitrag zur Durchführung der Realversuche (Testing) in 2024

MobiCell Kick-Off

Ortung und Schutz von vulnerablen Verkehrsteilnehmer*innen durch vernetzte Smartphones

Bei unserer Auftaktveranstaltung in der Denkfabrik im Wissenschaftshafen Magdeburg haben wir gemeinsam mit unserem Projektpartner ifak (Institut für Automation und Kommunikation Magdeburg) die Ziele und das Vorgehen des Projekts MobiCell präsentiert.

Über das Forschungsprojekt

Es wird die Machbarkeit einer V2X-Kommunikation zwischen verschiedenen Radfahrer*innen und Fußgänger*innen mithilfe eines zu entwickelnden Testsystems, bestehend aus Smartphone-App, Mobilfunk (Cellular-V2X) und Clouddiensten, untersucht.

Das System soll eine orts- und zeitunabhängige Erkennung von Gefahrensituationen, zum Beispiel möglichen Kollisionen, durch Echtzeit-Sensordaten von Smartphones ermöglichen und Ausweichmanöver koordinieren. Durch Nutzung des ohnehin vorhandenen Smartphones wird der Einstieg für alle Bürger*innen erleichtert.

Das Projekt MobiCell wird im Rahmen der Innovationsinitiative mFUND durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr gefördert.



Foto: Alexander Kaiser (Wissenschaftlicher Mitarbeiter Verkehr & Assistenz, ifak), Carina Doppler (Projektmanagerin, fluxguide), Kasra Seirafi (Founder, fluxguide), Hartmut Zadek (Geschäftsführer Verkehr & Assistenz, ifak)

Fluxguide
Gepostet von Magdalena Flux
7. September 2023

Ortung und Schutz von vulnerablen Verkehrsteilnehmer*innen durch vernetzte Smartphones. Bei unserer Auftaktveranstaltung in der Denkfabrik im Wissenschaftshafen Magdeburg haben wir gemeinsam mit unserem Projektpartner **Institut für Automation und Kommunikation e.V. Magdeburg** die Ziele und das Vorgehen des Projekts MobiCell präsentiert.
Mehr zum Projekt: <https://tinyurl.com/mtc2fbf6>





Insights und Anzeigen ansehen Beitrag bewerben

5

Gefällt mir Kommentieren Senden Teilen

Als Fluxguide kommentieren

Fluxguide
Gepostet von Eva Beckerovska
9. Juli

Wie lassen sich vulnerable Verkehrsteilnehmer*innen im Straßenverkehr mittels V2X- und Cloudtechnologie besser vor möglichen Kollisionen schützen? Dieser Frage widmete sich MobiCell, unser gemeinsam mit dem ifak Magdeburg durchgeführtes Forschungsprojekt. Zur virtuellen Präsentation der Ergebnisse möchten wir euch nun herzlich einladen.

MobiCell, Abschlusstreffen (virtuell) 23. Juli, 09:30 – 11:00 Uhr
Anmeldung bis 22. Juli unter: <https://pretix.eu/pamir.ifak/mobitel...> Mehr anzeigen



Virtuell Jetzt anmelden

MobiCell

Abschlusstreffen

↓
Dienstag, 23.07.2024, 09:30 – 11:00 Uhr

Insights und Anzeigen ansehen Beitrag bewerben

Abb. 33: Blogbeiträge auf Facebook

Literatur

- [1] Kraftfahrt-Bundesamt (Hg.) (2021): Verkehr in Zahlen 2021/2022. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung. Online verfügbar unter https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-2021-2022-pdf.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 06.06.2024.
- [2] European Commission (Hg.) (2021): EU transport in figures – Statistical pocketbook 2021. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/14d7e768-1b50-11ec-b4fe-01aa75ed71a1>, zuletzt geprüft am 06.06.2024.
- [3] Eckart, Jochen; Merk, Jule (2020): Die sensorbasierte Vermessung des Radverkehrs. In: INFORMATIK 2020, 28.09.-02.10.2020. Gesellschaft für Informatik. Bonn, S. 1137–1149. Online verfügbar unter <https://dl.gi.de/items/ae055de8-1658-419f-82f9-5aa2579e40a2>, zuletzt geprüft am 06.06.2024.
- [4] Bochkor, Elena: Multisensibel - Sensoren in modernen Smartphones im Überblick. In: *windows.developer* (5.2020). Online verfügbar unter <https://entwickler.de/mobile/multisensibel-001>, zuletzt geprüft am 06.06.2024.
- [5] Retscher, Guenther; Weigert, Till (2022): Assessment of a dual-frequency multi-GNSS smartphone for surveying applications. In: *Applied Geomatics* 14 (4), S. 765–784. DOI: 10.1007/s12518-022-00467-7.
- [6] Bochkor, Elena: An Ort und Stelle. Geolocation - Ortung mit WLAN, Mobilfunknetz und GPS. In: *windows.developer* (6.2020). Online verfügbar unter <https://entwickler.de/mobile/an-ort-und-stelle>, zuletzt geprüft am 06.06.2024.
- [7] Robert Bosch GmbH, Bosch eBike Systems: Kann ich mein Smartphone am eBike aufladen? Online verfügbar unter <https://www.bosch-ebike.com/de/help-center/kann-ich-mein-smartphone-am-ebike-aufladen-183413>, zuletzt geprüft am 20.12.2022.
- [8] Ponte Müller, F.; Munoz Diaz, E.; Sand, S.; Böker, C.; Merk, L.: Towards Vision Zero - V2X Communication for Active Vulnerable Road User Protection. In: *Internationales Verkehrswesen* 74 (4), S. 69–73.
- [9] Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., Institut für Verkehrs- und Infrastruktursysteme (Fraunhofer IVI) et al.: RadImFokus. Abschließender Sachbericht, Teil 1 (öffentlicher Teil).
- [10] Ehlers, J. et al. (2022): Früherkennung von Gefahrenstellen im Straßenverkehr durch Smart Data – FeGiS+. In: *Straßenverkehrstechnik* 66 (3), S. 182–189.
- [11] Manz et al. (2020): Fahrzeugtechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Radverkehrssicherheit (MARS). FE 82.0698/2017. Schlussbericht. Technische Universität Kaiserslautern; DLR, Institut für Verkehrssystemtechnik. Online verfügbar unter https://bauing.rptu.de/fileadmin/imove/dateien/gruene-reihe/MARS_Abschlussbericht_GrueneReihe.pdf, zuletzt geprüft am 07.09.2023.
- [12] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (2012): Begriffsbestimmungen. Teil: Verkehrsplanung, Straßenentwurf und Straßenbetrieb.

Köln. Online verfügbar unter <https://www.fgsv-verlag.de/pub/media/pdf/220.v.pdf>, zuletzt geprüft am 07.08.2024.

- [13] Buczyński, Aleksander (2022): Geometric design parameters for cycling infrastructure. European Cyclists' Federation. Online verfügbar unter <https://bicycleinfrastructuremanuals.com/manuals7/ECF-Geometric-Design-Parameters-for-Cycling-Infrastructure-2022.pdf>.
- [14] Lareshyn, Aliaksei; Svensson, Åse; Hydén, Christer (2010): Evaluation of traffic safety, based on micro-level behavioural data: Theoretical framework and first implementation. In: *Accident Analysis & Prevention* 42 (6), S. 1637–1646. DOI: 10.1016/j.aap.2010.03.021.