
Vernetzung von Fahrrädern – Direkte Kommunikation von Fahrrädern mit anderen Verkehrsteilnehmenden

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Fahrzeugtechnik Heft F 172

Vernetzung von Fahrrädern – Direkte Kommunikation von Fahrrädern mit anderen Verkehrsteilnehmenden

von

Maik Bargmann, Robert Pflug, Daniel Hermann
IAV GmbH, Berlin

Marek Junghans

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt,
Institut für Verkehrssystemtechnik, Berlin

Berichte der Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen
Fahrzeugtechnik Heft F 172

bast 
Bundesanstalt für
Straßen- und Verkehrswesen

Die Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen (BASt) veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der BASt, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG bezogen werden. Seit 2015 stehen sie zusätzlich als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung: <https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 82.0808
Vernetzung von Fahrrädern – Direkte Kommunikation von Fahrrädern
mit anderen Verkehrsteilnehmenden

Fachbetreuung:
Holger Drees

Referat:
Vernetzte Mobilität

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion:
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Gestaltungskonzept:
MedienMélange: Kommunikation

Druck, Verlag und Produktsicherheit:
Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 0 | E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9307 | ISBN 978-3-95606-900-0 | <https://doi.org/10.60850/bericht-f172>

Bergisch Gladbach, November 2025

Kurzfassung–Abstract

Vernetzung von Fahrrädern - Direkte Kommunikation von Fahrrädern mit anderen Verkehrsteilnehmenden

Kooperative Intelligente Verkehrssysteme (C-ITS) ermöglichen die Kommunikation zwischen Fahrrädern, anderen Verkehrsteilnehmern und Infrastrukturelementen. Das Projekt "Sichere, intelligente, vernetzte Fahrräder" (SivF) widmet sich der Analyse dieser Kommunikation in drei spezifischen und besonders latenzkritischen Verkehrssituationen. Diese Situationen bergen erhebliche Risiken für Radfahrende und erfordern eine schnelle und verlässliche Kommunikation sowie präzise Lokalisierung, um potentielle Kollisionen zu verhindern und die Sicherheit der Radfahrenden zu erhöhen.

Im Mittelpunkt der Untersuchung stehen die drei Kernbereiche: (1) Kommunikation, (2) Lokalisierung und (3) Energieversorgung von C-ITS-Geräten auf Fahrrädern. Die angewandte Methodik gliedert sich in drei Teile: (1) Stand der Wissenschaft der Verkehrssysteme, (2) theoretische Szenarienanalyse und (3) praktische Versuche mit einem Versuchsfahrrad und einem Pkw. Die praktische Umsetzung erfolgt mittels speziell ausgestattetem Forschungsfahrrad und einem Pkw, der mit einer C-ITS-Empfangseinheit ausgestattet ist.

Die Auswertung der Ende-zu-Ende-Latenz zeigt, dass die Latenz maßgeblich vom Systemverhalten abhängt, insbesondere von der Bereitstellung der Positions- und Zeitinformation an den C-ITS-Stack. Die theoretische Untersuchung und die praktischen Versuche haben gezeigt, dass die Nahbereichskommunikation über ITS-G5 in den ausgewählten Szenarien einen latenzarmen und hinsichtlich des Paketverlustes stabilen Kommunikationskanal darstellt. Die Positionsgenauigkeit des untersuchten C-ITS-Gerätes liegt unter Freifeldbedingungen bei etwa 2 Metern und unter Abschattungsbedingungen bei etwa 4,5 Metern, was zu einer Kompensationszeit bei warnenden Applikationen führt. Es hat sich gezeigt, dass die Kompensationszeit in einer ähnlichen Größenordnung liegt wie auch die Zeit, bis zu der die Trajektorien der Teilnehmer verlässlich präzisiert werden können. Dies verhindert eine Umsetzung von warnenden Applikationen aktuell, obwohl informierende Applikationen bereits mit den aktuellen Systemen umsetzbar sind. Die energetische Betrachtung zeigt, dass Fahrräder mit Energieversorgung per Akku genügend Energie zur Verfügung stellen, um C-ITS-Geräte versorgen zu können. Fahrräder ohne Akku benötigen hingegen speziell optimierte C-ITS-Einheiten mit geringem Energieverbrauch, um diese am Dynamo betreiben zu können.

Um die Sicherheit von Radfahrenden weiter zu erhöhen und für diesen Zweck eingesetzte C-ITS-Assistenzsysteme zu optimieren, wird eine Fortsetzung der Forschung im Bereich der Fahrradsicherheit und C-ITS empfohlen. Dies umfasst unter anderem die Optimierung des System- und Sendeverhaltens, die Priorisierung der GNSS-Nachrichtenübermittlung und die Integration weiterer Datenquellen wie IMUs und Sensoren.

Connected bicycles – Direct communication between bicycles and other road users

Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS) enable communication between bicycles, other road users, and infrastructure elements. The project "Safe, Intelligent, Connected Bicycles" (SivF) focuses on analyzing of communication between cyclists and motorists in three specific and particularly latency-critical traffic situations. These situations pose significant risks to cyclists and require fast and reliable communication as well as precise localization to prevent potential collisions and enhance cyclist safety.

The study focuses on three core areas: (1) communication, (2) localization, and (3) power supply of C-ITS devices on bicycles. The applied methodology is divided into three parts: (1) state of the art of ITS systems related to bicycles, (2) theoretical scenario analysis, and (3) practical experiments with a test bicycle and a car. The practical implementation involves a specially equipped research bicycle and a car with a C-ITS receiving unit.

The evaluation of end-to-end latency shows that latency is significantly influenced by system behavior, particularly the provision of position and time information to the C-ITS stack. The theoretical analysis and practical experiments have shown that proximity-based communication via ITS-G5 in the selected scenarios provides a low-latency and packet loss-stable communication channel. The positioning accuracy of the examined C-ITS device is about 2 meters under open sky conditions and about 4.5 meters under multipath conditions, leading to a compensation time in warning applications. It has been shown that the compensation time is of a similar magnitude to the time required to reliably predict the trajectories of the road users. This currently prevents the implementation of warning applications, whereas informative applications can already be implemented with the current systems. The results show that bicycles with a battery provide enough energy to power C-ITS devices. Bicycles without a battery, on the other hand, require specially optimized C-ITS units with low power consumption to be operated by the dynamo.

To further enhance cyclist safety and optimize C-ITS assistance systems used for this purpose, continued research in the field of bicycle safety and C-ITS is recommended. This includes optimizing system and transmission behavior, prioritizing GNSS message transmission, and integrating additional data sources such as IMUs and sensors.

Summary

Connected bicycles – Direct communication between bicycles and other road users

Cooperative Intelligent Transport Systems (C-ITS) enable the communication between bicycles and other road users or infrastructure elements. This allows the exchange of critical information, such as traffic situations, potential dangers, or optimal routes.

The project FE 82.0808/2022 "Safe, Intelligent, Connected Bicycles" focuses on this topic. The primary objective of this study is to analyze the communication characteristics and positioning accuracy in three specific and particularly latency-critical traffic situations:

1. Dooring,
2. Right-turning with crossing cyclists, and
3. Exiting the driveway

These situations pose significant risks to cyclists and require fast and reliable communication between road users and precise localization to prevent potential collisions and enhance cyclist safety. The study focuses on three core areas: (1) communication, (2) localization, and (3) power supply of C-ITS devices on bicycles.

2.1 Scenarios

As part of the scenario definition, the interaction scenarios of dooring, right-turning with crossing cyclists, and exiting the driveway are analyzed for their criticality. These scenarios are considered particularly critical, since they can lead to serious injuries for cyclists. The starting point is two road users on a collision course, with at least one being a cyclist.

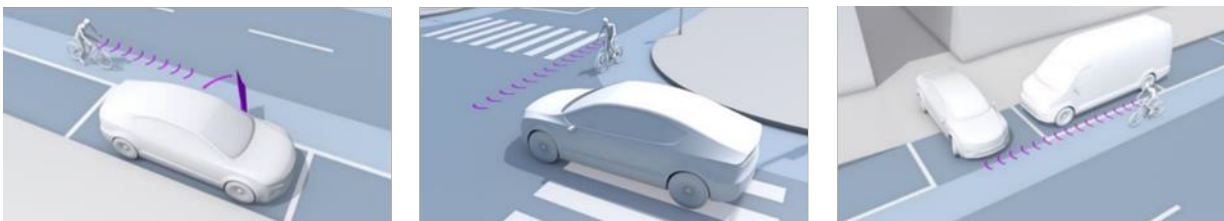


Figure 1 Analyzed interaction scenarios: dooring (left), turning right with crossing cyclists (middle), and exiting the driveway (right)

Dooring is understood as an interaction or accident situation between a moving cyclist and a stationary or parked vehicle, where the cyclist collides with the (usually suddenly) opened vehicle door.

Right-turning with crossing cyclists is understood as an interaction situation between a cyclist that crosses the path of a right-turning vehicle. In this study, it involves a cyclist moving against the direction of travel.

Exiting the driveway is an interaction situation between a cyclist on a bicycle or pedestrian facility who crosses the path of a vehicle exiting a driveway – sometimes even in reverse. This situation is often restricted by massive visual obstructions on both sides, such as plants, buildings, or parked vehicles.

2.2 Methodology

The applied methodology is divided into three parts: (1) state of the art in bicycle assistance systems as well as presentation and comparison of available communication technologies, (2) theoretical scenario analysis, and (3) practical tests with a research bicycle and a car. Initially, an overview of the current state of the art and technology in the field of transportation systems is given. The theoretical analysis formulates considerations based on the challenges associated with the introduction of C-ITS-based assistance systems.

The practical implementation is carried out using a research bicycle and a car equipped with C-ITS receiver units. For the validation of localization, a highly accurate positioning system is installed on the bicycle as a reference system. To generate reference values for communication, a comparison of sent and received messages in both communication directions is conducted: from the bicycle to the car and from the car to the bicycle.

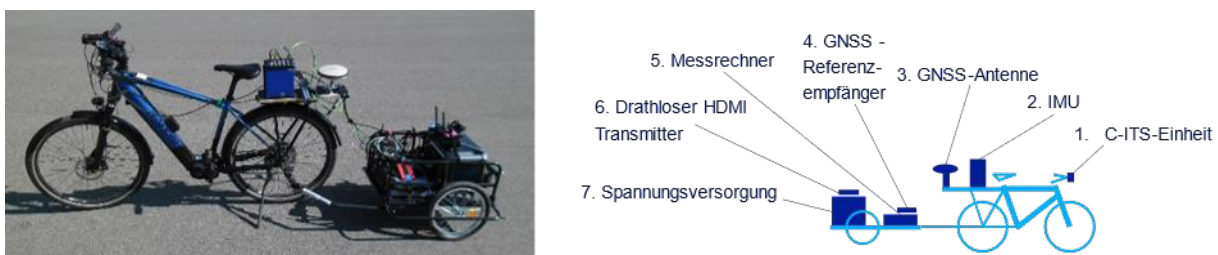


Figure 2 Research bicycle as a photograph and its schematic representation

The scenarios dooring and right-turning with crossing cyclists are analyzed under open sky conditions, and the exiting the driveway scenario under multipath conditions. The practical tests evaluate the functionality and efficiency of C-ITS communication under these conditions. Technical aspects such as end-to-end latency, packet error rates and their distribution, as well as positioning accuracy, play an important role. Since every traffic-relevant piece of information is subject to a certain degree of inaccuracy, the report formulates technical minimum requirements for positioning quality and the communication channel.

The practical results are then verified with the theoretical scenario analysis. The difference between information, warning, and intervention is also addressed. Recommendations for actions are derived from the collected insights. The goal is to create practical systems that allow a safer and more efficient interaction of different road users.

2.3 Results

2.3.1 Communication

The evaluation of the end-to-end latency of the ZooZ unit shows that latency is significantly influenced by system behavior, particularly the provision of position and time infor-

mation to the C-ITS stack, regardless of the communication technology. Short-range communication via ITS-G5 can provide information in most cases within 100 milliseconds, with system-specific additional latencies caused by GNSS receivers and CAM generation making up the larger part of the total latency time.

A dependency on the communication direction was found in packet loss, indicating a potential for system performance improvements. All messages from the bicycle were received by the car, while in contrast, the bicycle did not receive all messages from the car. Unexpected differences were found between the dooring and the right-turning scenarios. An analysis of the antenna characteristics could provide further insights. It is advantageous that communication is possible for information or warnings even when the communication partners are under non-line-of-sight conditions.

Regarding update delay, it was found that despite a large packet loss in line-of-sight trials, these did not occur in clusters. Predicting the motion parameters of the communication partner allows the application to be supplied with sufficiently accurate data. The permissible extent of communication downtime depends on the specific requirements of the application. In trials under non-line-of-sight conditions, it was found that consecutive packet loss occurred more frequently than in line-of-sight trials.

2.3.2 Localization

The positioning accuracies of ZooZ and ADMA devices were analyzed separately. The ADMA device showed highly precise results in the centimeter range for a stationary bicycle under optimal and multipath conditions and was therefore used as a reference system for the moving bicycle. As expected, the ZooZ device exhibited larger inaccuracies, especially under multipath conditions. A compensation time was determined from the localization inaccuracies, reflecting how much earlier a warning must be issued for compensation.

Theoretical considerations show that at cycling speeds of 7-25.5 km/h, a time requirement of 1.7-2.2 seconds is necessary for the identification, detection, and communication of a critical situation. In certain scenarios, this requirement increases to 2.7-3.2 seconds. For reliable collision warnings, positioning inaccuracies of 3-5 meters must be considered, which requires a compensation time of approximately 1.2 seconds. This increases the time requirement to 2.9-3.4 seconds or 3.9-4.4 seconds. Human reaction time and positioning inaccuracy have the greatest influence on the lead time in conflict detection. Reducing these times could be achieved by increasing situational awareness of the road users and more accurate positioning systems. Thus, the necessary times could be reduced to 1.4-1.9 seconds or 2.4-2.9 seconds.

In summary, it is determined that a time buffer of 3-4.5 seconds is necessary to ensure reliable collision warnings. This poses a significant challenge. Systematic influences on positioning accuracy could not be identified during the test drives.

2.3.3 Energy Considerations

The energy supply on the bicycle is crucial for the reliable operation of the C-ITS unit on the bicycle, as the protective effect is lost if the unit fails. Bicycles with dynamos typically provide 6V and 3W, which is sufficient for lighting and small auxiliary devices. Pedelecs, on the other hand, have powerful batteries and already offer connections for powering external devices.

The energy demand of C-ITS units varies depending on the hardware, message processing, and applications. Comparing power availability and power consumption shows that pedelecs can easily meet the energy demand of C-ITS units. Bicycles without batteries, however, require specially optimized C-ITS units with low energy consumption.

In summary, optimizing C-ITS units for low energy consumption is necessary. Specific solutions for bicycles without batteries are required to fully utilize the safety benefits of C-ITS.

2.4 Physical-Technical Minimum Requirements

The minimum requirements for cooperative bicycle assistance systems were derived based on the findings of the theoretical scenario analyses and the practically determined positional accuracy. These requirements are crucial for providing timely and reliable warnings of potentially dangerous situations. Position accuracy directly influences the spatial-temporal aspects of conflict detection and communication, with higher speeds leaving less time for these processes.

The braking acceleration was realistically set at -5.5 m/s^2 , and the test drives were carried out at 15 and 20 km/h. The resulting braking times and reaction times (700 milliseconds for expected situations and 1300 milliseconds for unexpected situations) were considered.

The minimum technical requirements include:

- Transmission latency: 100 milliseconds
- Processing latency: 150 milliseconds
- Total technical latency: 250 milliseconds
- Positioning inaccuracy: 1-2 m
- Compensation time: 200-500 milliseconds
- Total technical time required: 450-750 milliseconds

For a reliable collision warning, this must occur at least 2.1-2.6 s before a critical situation. However, the obtained position accuracy does not meet these requirements currently, which is why the systems can currently only be used to increase situational awareness. Improvements in reaction time and position accuracy are necessary in order to use the systems for collision warnings. Communication was stable in the relevant spatial areas, with only minor packet losses.

2.5 Conclusion

The report analyzes the potentials and challenges of C-ITS on bicycles and shows, how these technologies can contribute to road safety and efficiency improvement. Through detailed investigations and practical experiments with a specially equipped research bicycle, the effectiveness and efficiency of C-ITS communication under real conditions are examined. Communication via ITS-G5 does not pose a limiting factor. The results can also be transferred to other short-range communication technologies. For long-range communication via mobile networks, this is only partially possible. The reaction time of the cyclist and the GNSS-based positioning accuracy are more likely to prevent warning applications. Positioning accuracy is about 2 meters under open-sky conditions and about 4.5 meters under multipath conditions.

Nevertheless, informative applications about impending collisions, as provided by the ZooZ unit, can generate a safety gain. By information an unexpected situation can be transformed into an expected one, significantly reducing reaction time. Informative systems place lower demands on localization and are less complex to develop. Complex applications are more error-prone and harder to test. Therefore, it is recommended to start with simple C-ITS-based assistance systems and iteratively develop them further. The design of the localization system offers extensive leeway that influences practical implementation and planned interaction with the user. To further enhance cyclist safety and optimize C-ITS assistance systems used for this purpose, continued research in the field of bicycle safety and C-ITS is recommended. This includes research projects such as simulator studies on HMI concepts and acceptance of C-ITS systems in urban environments, especially the interaction with cyclists, or implementation requirements such as detailed investigations into the detection and treatment of false-positive and false-negative results. Additionally, it is recommended to improve the technologies and methods for localization.

From the insights gained during the trials, recommendations for action were also derived, such as optimizing system and transmission behavior, prioritizing GNSS message transmission, defining prediction horizons, and encoding and transmitting position uncertainty. These measures aim to maximize the relevance and timeliness of the transmitted information and reduce system latencies. Integration and fusion with additional data sources, such as the use of IMUs and other sensors, should improve positioning accuracy. Additionally, the use of correction signals in the GNSS receiver is recommended to increase system reliability.

Implementing the recommendations and research proposals suggested in the report is considered a crucial step to unlock the potential of safe, intelligent, and connected bicycles and make a sustainable contribution to designing safer and more efficient mobility.

Inhalt

Glossar	13
1 Einleitung	16
1.1 Ausgangssituation	17
1.1.1 Zielstellung	17
1.2 Methodik des Vorgehens	18
2 Lösungen und Projekte für kooperative Fahrrad-Assistenzsysteme	19
3 Kommunikationsabhängige Herausforderungen für die ADAS-Entwicklung zum Schutz von Fahrradfahrenden	22
3.1 Kriterien für die Bewertung der Kommunikation am und mit dem Fahrrad	22
3.1.1 Technische Kriterien	22
3.1.2 Wirtschaftliche Kriterien	23
3.1.3 Regulatorischer Nutzungsrahmen	24
3.2 Nahbereichskommunikation	24
3.2.1 Kommunikationsarchitektur	24
3.2.2 Frequenzen	26
3.2.3 Kommunikationstechnologien im Road-ITS-Bereich	27
3.2.4 Interferenzen mit anderen Systemen im ITS-Band	30
3.3 Langbereichskommunikation	32
3.3.1 Grundstruktur eines Assistenzsystems auf Basis der Langbereichskommunikation	32
3.3.2 Kabellose Zugangstechnologien	33
3.3.3 Hintergrundsysteme	33
3.3.4 Protokolle und Datenformate	37
3.4 Gegenüberstellung der Kommunikationstechnologien	37
3.4.1 Gegenüberstellung der Nahbereichskommunikationstechnologien	37
3.4.2 Gegenüberstellung von Nahbereichs- und Langbereichskommunikation	41
4 Kommunikationsunabhängige Herausforderungen für die ADAS-Entwicklung zum Schutz von Fahrradfahrenden	44

4.1	Position und Zeit	44
4.2	Dynamikdaten	46
4.3	Antennenposition und Sendecharakteristik	47
4.4	Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI)	47
4.5	Stromversorgung	47
5	Szenariendefinition	48
5.1	Physikalische Beschreibung	48
5.1.1	Zeitbedarfe	49
5.1.2	Ausweichzeit	50
5.1.3	Betrachtung der Unfallschwere	57
5.1.4	Dooring	58
5.1.5	Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342	60
5.1.6	Ausfahren aus einer Ausfahrt	65
5.2	Quantifizierung der relevanten Parameter	66
5.2.1	Geschwindigkeit und Beschleunigung	66
5.2.2	Reaktionszeit t_{reac}	67
5.2.3	Übertragungszeit t_{trans}	68
5.2.4	Prozessierzeit t_{proc}	68
5.2.5	Zusammenfassung der resultierenden Latenzen zu t_{lat}	69
5.2.6	Lokalisierungsungenauigkeiten	69
5.2.7	Geschwindigkeitsfehler	70
6	Aufbau, Konzeption und Durchführung der Versuche	71
6.1	Messkonzept	71
6.2	Versuchsaufbau	72
6.2.1	Fahrrad	72
6.2.2	Pkw	76
6.3	Versuchskonzeption	77
6.3.1	Übergreifende Informationen zur Versuchskonzeption	77
6.3.2	Versuchsaufbau Szenario 1: Dooring	78
6.3.3	Versuchsaufbau Szenario 2: Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342	79
6.3.4	Versuchsaufbau Szenario 3: Ausfahren aus einer Ausfahrt	81
6.4	Bewertung und Erkenntnisse der Versuchsdurchführung	83
7	Versuchsauswertung	84

7.1	Kommunikationskanal	84
7.1.1	Latenz und Sendeverhalten	84
7.1.2	Paketverlust	89
7.1.3	Update-Delay	93
7.2	Positionsgenauigkeit	96
7.2.1	Ruhelokalisierung	97
7.2.2	Lokalisierung in Bewegung	110
7.2.3	Fazit der Positionsgenauigkeitsauswertung	137
8	Weitergehende Betrachtungen	140
8.1	Ortungs-basierte Eigenschaften	140
8.1.1	Aufstartverhalten des GNSS-Empfängers	140
8.1.2	Nutzung einer IMU für VRUs	140
8.1.3	Nutzung von Korrekturdaten	141
8.1.4	Erhöhung der Ausgaberate des GNSS-Empfängers	142
8.2	Energetische Betrachtung am Fahrrad	142
8.2.1	Leistungsbilanz am Fahrrad	142
8.2.2	Energieaufnahme von C-ITS-Einheiten	143
8.2.3	Gegenüberstellung Leistungsverfügbarkeit zur Leistungsaufnahme	143
8.3	Human Factors und Warnstufen eines Assistenzsystems	144
9	Physikalisch-technische Mindestanforderungen	146
10	Handlungsvorschläge für die Entwicklung von kooperativen Fahrrad-Assistenzsystemen	149
11	Ausblick auf potentielle zukünftige Fördervorhaben	152
12	Fazit	154
	Literatur	156
	Bilder	166
	Tabellen	171

Glossar

Abkürzung	Langbezeichnung
3GPP	3rd Generation Partnership Project
5G	fünfte Generation Mobilfunk
ABS	Antiblockiersystem
AIM	Anwendungsplattform Intelligente Mobilität
AMQP	Advanced Message Queuing Protocol
C2C-CC	CAR 2 CAR Communication Consortium
CAM	Cooperative Awareness Message
CBTC	Communication-Based Train Control
C-ITS	Cooperative Intelligent Transport Systems
CP	Conflict Point
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
CSV	Comma-separated values
DATEX	Data exchange between traffic and travel information centres
dGNSS	Differential GNSS
DOP	Dilution of Precision
DSRC	Dedicated Short Range Communication
DTA	difference in time to arrival
ETSI	Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen
EU	Europäische Union
GDV	Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HDMI	High Definition Multimedia Interface
HMI	Human machine interface
HSM	Hardware-Sicherheitsmodule
HTTP/REST	Hypertext Transfer Protocol/Representational State Transfer
IDS	International Data Spaces
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IMU	inertial measurement unit
ITS-G5 Rel.2	ITS-G5 Release 2

ITS-S	ITS-Station
IVS	Intelligente Verkehrssysteme
Kfz	Kraftfahrzeug
KVM	Keyboard, Video, Mouse
LOS	Line of sight
MCS	Modulation and coding scheme
MEC	Mobil Edge Cloud/Computing
MIV	Motorisierter Individualverkehr
NLOS	Non line of sight
NMEA	National Marine Electronics Association
OBU/V-ITS-S	On Board Unit/ Vehicle-ITS-S
OCIT-C	Open Communication Interface for Road Traffic Control Systems Central
ODG	OCIT Developer Group
OFDM	Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OSM	OpenStreetMap
P-ITS-S	Personal-ITS-S
PKI	Public Key Infrastruktur
pPET	post-encroachment time
RB	Ressource Block
RMSE	Root Mean Squared Error
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RSU/R-ITS-S	Road Side Units/Roadside-ITS-S
RTK	Real Time Kinematic)
RTT	Round-Trip-Time
SA	Selective availability
SB-SPS	Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling
SCI	Sidelink Control Information
SCT	safety cushion time
SNR	Signal-to-noise ratio
TB	Transport Block
TLEX	Traffic Live Exchange-Plattform
TR	Technical Reports
TTF	Time to first Fix

UDAP	Urban Data Access Platform
URL	Uniform Resource Locator
URLLC	Ultra-reliable and low latency communication
V2X	Vehicle to X (Everything)
VAM	Vulnerable Road User Awareness Message
VRU	Vulnerable Road Users
WGS84	World Geodetic System 1984

1 Einleitung

In unserer heutigen, mobilitätszentrierten Gesellschaft spielen intelligente Transportsysteme (ITS) eine immer wichtigere Rolle. Besonders im Bereich der Fahrradmobilität bieten kooperative ITS (C-ITS – Cooperative Intelligent Transport Systems) elektronische Fahrerassistenzsysteme (englisch Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)) vielversprechende Möglichkeiten, um Verkehrssicherheit und Effizienz für Radfahrende zu erhöhen. Diese Systeme ermöglichen eine Kommunikation zwischen Fahrrädern untereinander sowie zwischen Fahrrädern und anderen Verkehrsteilnehmern oder Infrastrukturelementen. Dadurch können wichtige Informationen, beispielsweise über die Verkehrssituation, potenzielle Gefahren oder optimale Routenführungen, ausgetauscht werden.

Der vorliegende Schlussbericht zum Projekt FE 82.0808/2022 „Sichere, intelligente, vernetzte Fahrräder“ (SivF) widmet sich dieser Thematik. Ziel ist es, technische Mindestanforderungen zu definieren, die für die Implementierung von drei exemplarischen Anwendungsfällen sehr zeitkritischer Interaktionssituationen notwendig sind. Diese ausgewählten Anwendungsfälle umfassen das Dooring, das Rechtsabbiegen bei kreuzendem Radfahrenden gemäß GDV 342 und das Ausfahren aus einer Ausfahrt. Die zu erhebenden Mindestanforderungen sollen einen Sicherheitsgewinn durch den Einsatz von kooperativen ITS auf dem Fahrrad ermöglichen.

Der vorliegende Bericht ist wie folgt strukturiert: Das zweite Kapitel gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik kooperativer Assistenzsysteme für Fahrräder.

Kapitel 3 konzentriert sich auf die kommunikationstechnischen Herausforderungen bei der Entwicklung von ADAS für Fahrräder. Es werden relevante Kriterien zur Bewertung von Kommunikationstechnologien vorgestellt und mögliche Technologien für die Nah- und Langbereichskommunikation beschrieben. Anschließend erfolgt ein Vergleich der Nahbereichstechnologien und eine Diskussion der Unterschiede zur Langbereichskommunikation im Kontext kooperativer Assistenzsysteme.

In Kapitel 4 werden die kommunikationsunabhängigen Herausforderungen für die ADAS-Entwicklung am Fahrrad beleuchtet, mit einem Fokus auf Positions- und Zeitermittlung sowie die Integration eines Assistenzsystems am Fahrrad.

Kapitel 5 stellt eine grundlegende physikalische Beschreibung von Konfliktsituationen zwischen zwei Verkehrsteilnehmern auf und wendet diese auf die drei Anwendungsfälle an. Es folgt eine Identifikation und Quantifizierung relevanter Parameter für diese Fälle.

Kapitel 6 beschreibt Versuchsaufbau, -konzeption und -durchführung. In Kapitel 7 erfolgt die Darstellung der Auswertung der Versuche, wobei insbesondere Kommunikationskanal und Positionsgenauigkeit detailliert beschrieben werden.

Kapitel 8 widmet sich weiterführenden Betrachtungen, einschließlich der ortungsbasierten Eigenschaften und energetischen Überlegungen sowie Human-Factors-Fragestellungen.

Kapitel 9 definiert die physikalisch-technischen Mindestanforderungen an die Ortungsqualität und den Kommunikationskanal für eine sinnvolle Interaktion zwischen Fahrrädern und anderen Verkehrsteilnehmern.

Kapitel 10 präsentiert Handlungsvorschläge für die Entwicklung von C-ITS-Applikationen im Fahrradbereich. Der Bericht schließt mit einem Fazit in Kapitel 12 ab.

1.1 Ausgangssituation

Die zunehmende Vernetzung und Digitalisierung im Verkehrssektor hat in den letzten Jahren zu einem verstärkten Interesse an der Entwicklung und Implementierung von intelligenten Transportsystemen (ITS) geführt. Insbesondere die Sicherheit von Radfahrenden im städtischen Raum stand und steht im Fokus zahlreicher Forschungsprojekte und Industrieinitiativen. Die Verbesserung der Verkehrssicherheit durch den Einsatz von Kommunikationstechnologien am Fahrrad selbst hat dabei eine zentrale Bedeutung erlangt, da der stetig zunehmende Radverkehr auch mit einer ansteigenden Anzahl von oftmals schweren Unfällen einhergeht und die dringende Notwendigkeit besteht, Anzahl und Schwere von Verkehrsunfällen mit Radverkehrsbeteiligung zu reduzieren. Unterschiedliche Projekte haben gezeigt, dass die Übermittlung von Daten zur nachgelagerten Auswertung kritischer Situationen und zur Ermittlung von Unfallschwerpunkten beitragen kann. Einerseits gelingt das über die Möglichkeit, Radfahrende (und Kfz-Führende) funkbasiert vor kritischen Verkehrssituationen gezielt zu warnen. Andererseits tragen offline durchgeführte Verhaltensanalysen dazu bei, Verkehr besser zu verstehen, Verhaltensmuster der Interaktionspartner zu identifizieren und verkehrliche Infrastrukturen so zu designen, dass sie insbesondere für den Radverkehr sicher sind. Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass die Wirksamkeit von mehrstufigen Warnkonzepten – Information, Warnung, Assistenz/Intervention – und die Wahrnehmung von akustischen und haptischen Warnungen durch die Nutzer hervorgehoben positiv waren. Die direkte Vernetzung von Fahrrädern mit ihrer Umwelt und insbesondere mit dem motorisierten Individualverkehr (MIV) ist ein weiterer Schritt zur Erhöhung der Sicherheit im Straßenverkehr. Die Entwicklung von aktiven Sicherheitssystemen mittels C-ITS-Technologien wird aktuell von der Industrie aktiv vorangetrieben. Die praktische Umsetzung dieser Technologien in Prototypen und die Ankündigungen von Fahrradherstellern zur Integration von C-ITS im Pedelec-Sektor verdeutlichen das Potenzial und die Dringlichkeit der konsequent weitergeführten Forschung und unterstützender politischer Weichenstellung in diesem Bereich.

1.1.1 Zielstellung

Das primäre Ziel dieser Studie besteht darin, die Kommunikationsmerkmale und die Positionierungsgenauigkeit im Rahmen von drei spezifischen und als im höchsten Maße kritischen Verkehrssituationen zu analysieren: 1. Dooring, 2. Rechtsabbiegen bei kreuzendem Radfahrenden gemäß GDV 342, und 3. das Ausfahren einer Ausfahrt. Diese Situationen bergen erhebliche Risiken für Radfahrer und erfordern eine schnelle, zuverlässige Kommunikation zwischen den Verkehrsteilnehmern sowie deren präzise Lokalisierung, um Kollisionen zu verhindern und die Sicherheit der Radfahrenden zu erhöhen. Im Mittelpunkt der Untersuchung stehen demnach die drei Kernbereiche: Kommunikation, Lokalisierung und Energieversorgung der C-ITS-Einheiten auf Fahrrädern. Das Anliegen der Studie ist es, technische und praktische Grundanforderungen für den Kommunikationskanal und die Positionierung zu definieren, die notwendig sind, um einen Sicherheitszuwachs zu ermöglichen. Basierend auf den ermittelten Herausforderungen, die mit der Einführung von C-ITS-basierten Assistenzsystemen einhergehen, sollen Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Die Ergebnisse dieser Studie werden nicht nur wertvolle Einblicke in die technischen Herausforderungen und Möglichkeiten von C-ITS-Systemen für Fahrräder liefern, sondern auch konkrete Handlungsempfehlungen für die Weiterentwicklung und Implementierung

dieser Technologien in zukünftigen Forschungsprojekten und industriellen Anwendungen bieten.

1.2 Methodik des Vorgehens

Die Methodik dieser Studie basiert auf einer detaillierten Untersuchung des Standes von Wissenschaft und Technik im Bereich der Fahrradkommunikation und -lokalisierung. Sie enthält die Evaluierung verschiedener Kommunikationstechnologien, Positionierungsmethoden und den Einsatz von Mensch-Maschine-Schnittstellen (HMI) zur Interaktion zwischen der C-ITS-Einheit und dem Radfahrenden. Ziel ist es, ein umfassendes Verständnis der Dynamik und Effektivität von C-ITS-Kommunikationssystemen in spezifischen Verkehrsszenarien zu erlangen.

Die Studie integriert sowohl theoretische Überlegungen als auch mit einem explizit für diesen Zwecke ausgerüsteten Forschungsfahrrad durchgeführte Experimente, um die Funktionalität und Effizienz der C-ITS-Kommunikation unter realen Bedingungen zu evaluieren. Dieses Forschungsfahrrad wird für die Kommunikation mit Fahrzeugen und Infrastrukturelementen konfiguriert. Neben der C-ITS-Einheit ist das Forschungsfahrrad mit einem hochpräzisen Ortungssystem ausgestattet, das als Referenz (Ground-Truth) für die Bewertung der Lokalisierungsgenauigkeit dient. Die C-ITS-Einheit liefert die Ist-Daten, die anhand der Ground-Truth-Daten auf ihre Genauigkeit hin überprüft werden.

Um die Leistung der Kommunikationstechnologie zu bewerten, werden alle von der C-ITS-Einheit auf dem Fahrrad empfangenen und gesendeten Nachrichten erfasst. Ein mit einer C-ITS-Einheit ausgestatteter Pkw dient als Kommunikationspartner für das Fahrrad in den Testszenarien, wobei ebenfalls alle gesendeten und empfangenen Nachrichten aufgezeichnet werden. Durch den Vergleich der C-ITS-Nachrichten können wichtige Erkenntnisse über das Sendeverhalten, die Latenz, den Paketverlust und dessen Verteilung gewonnen werden. Die Versuchsfahrten werden in verschiedenen Umgebungen durchgeführt, um ein breites Spektrum unterschiedlicher äußerer Bedingungen zu haben, die den ausgewählten Verkehrssituationen entsprechen. Dies ermöglicht es, die Auswirkungen von Kommunikationslatenz und Positionierungsgenauigkeit auf die Sicherheit der Radfahrenden zu bewerten.

Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Darstellung der Energieverfügbarkeit auf dem Fahrrad und der Energieeffizienz der C-ITS-Einheiten. Es soll ermittelt werden, ob die Systeme auch an konventionellen Fahrrädern ohne zusätzliche Stromversorgung betrieben werden können. Dabei gilt es sicherzustellen, dass die Systeme auch bei längeren Fahrten ohne häufiges Aufladen funktionieren.

2 Lösungen und Projekte für kooperative Fahrrad-Assistenzsysteme

In diesem Kapitel wird eine Übersicht über bestehende Projekte sowie Industrieaktivitäten in dem Kontext von vernetzten Fahrrädern gegeben und jeweils auf ihre Kernmerkmale näher eingegangen.

Eine Vielzahl von Projekten hatte die Verbesserung der (Verkehrs-)Sicherheit von Fahrradfahrern zum Ziel. Der Einsatz von Kommunikationstechnologien am Fahrrad selbst ist dabei in den letzten Jahrzehnten näher in den Fokus gerückt. Dabei ist es angeraten, den Zweck der Kommunikation zu klassifizieren, um die Projekte gruppieren zu können. In der ersten Gruppe ist die Kommunikation ausschließlich zur Übermittlung von Daten für eine nachgelagerte Auswertung zu sehen. Die ausgewerteten Daten tragen im Nachgang der Aufzeichnung unter anderem zur Verbesserung des Verständnisses kritischer Situationen bei oder zur Ermittlung von Unfallschwerpunkten. In dieser Gruppe sind Projekte wie ECOSense (ECOSense 2020), FeGiS (BMDV 2017b), FeGiS+ (BMDV 2019) oder GefahrenstelleRAD (BMDV 2017a) zu sehen. Einen ähnlichen Fokus haben Projekte aus dem Bereich des Bicycles and Intelligent Transport Systems Directory (BITS) (bitsdirectory 2023). Die zweite Gruppe nutzt die Kommunikation am Fahrrad für die Echtzeitübermittlung von Informationen, die zur Vermeidung bzw. zur Verringerung von kritischen Situationen dienen sollen. Auf diese Gruppe wird sich im Folgenden aufgrund der inhaltlichen Nähe zu dieser Studie fokussiert.

In dem Projekt RADimFokus war die konkrete Warnung zur Vermeidung von Kollisionen im Fokus der Forschenden. Mittels einer Simulationsstudie wurde ein mehrstufiges Warnkonzept sowie unterschiedliche Warnverfahren analysiert. Das Warnkonzept sah vor, zu unterschiedlichen Zeitpunkten der „safety cushion time“ (SCT) zu warnen. Diese berücksichtigt die Zeit bis zur Kollision, die Reaktionszeit und die Zeit für die Durchführung des Bremsmanövers. Die Warnung selbst erfolgte mehrstufig, d. h. akustisch (mittels Lautsprecher), optisch (über eine Smartphone-Anzeige) und haptisch über den Fahrradlenker. Die Nutzer haben dabei das mehrstufige Warnkonzept positiv wahrgenommen und würden eine akustische oder haptische einer optischen Warnung bevorzugen. (Kreißig u. a. 2022). Zu den gleichen Ergebnissen kommt eine Analyse von Bosch: Für die Fahrradfahrenden stellte dort die akustische und die haptische Warnung den größten Mehrwert dar, wobei die akustische Warnung in Umgebungen, die haptisch herausfordernd waren, besser wahrgenommen wurde (5GAA 2023a). Positive Erfahrungen hinsichtlich des haptischen und akustischen Warnmediums wurden in dem Projekt MARS (Manz u. a. 2023) gesammelt. Dort wurde der Fahrradfahrende über ein haptisches Feedback am Fahrradlenker vor kritischen Situationen gewarnt, was die Radfahrenden als positiv empfanden. Die Warnung selbst wurde dabei in realen orchestrierten Versuchen in einem Realverkehrslabor anhand verschiedener Szenarien getestet. Dazu wurde von den Forschenden ein eigenes Forschungsfahrrad aufgebaut. Es stand mit Mobilfunk über eine eigene Serverarchitektur mit dem Fahrzeug in Kontakt, um Nachrichten auszutauschen. Die Kollisionsermittlung

erfolgte auf Infrastrukturseite. Wurde ein Kollisionsrisiko ermittelt, so wurde es dem Radfahrenden per Mobilfunk gesendet. Bei der direkten Kommunikation (mittels ITS-G5) wurde eine Ende-zu-Ende-Latenz von 568 Millisekunden im Mittel gemessen. Während bei der infrastrukturbasierten Kollisionsermittlung (DLR Forschungskreuzung) eine Ende-zu-Ende-Latenz (über Mobilfunk, Videoverarbeitung eingeschlossen) von 683 Millisekunden aufgetreten ist. Subjektiv wurde die Warnung von den Probanden überwiegend als „rechtzeitig“ eingestuft. Während der durchgeführten Testfahrten war mehrfach ein Verlust eines ausreichend guten GNSS-Signals für die Positionsermittlung aufgefallen. Eine Prädiktion des Aufenthaltsortes des Fahrradfahrers mittels der Annahme einer konstant gefahrenen Geschwindigkeit hat sich als nicht zufriedenstellend herausgestellt.

Ein ähnliches Forschungsfahrrad wurde durch die Forschenden in (Jenkins u. a. 2017) aufgebaut. Es verfügte über ein DSRC-WAVE¹-Kommunikationsmodul sowie eine optische, akustische und haptische Warneinrichtung am Fahrradlenker. Kern des Aufbaus war das Framework auf dem Fahrrad, mit dem eine Integration von Assistenzsystemen zur Untersuchung erleichtert werden sollte. Die Firma Boréal Bikes bietet mit Holoscene X ein mit zahlreicher Eigen- und Umfeldsensorik sowie Kommunikationstechnik und HMI ausgestattetes Fahrrad an, das zur Erprobung und Entwicklung von Assistenzsystemen verwendet werden kann. Konkret ist es mit einer hochgenauen dGPS-Ortung, Sensoren zur Umfelderkennung, Kommunikationstechnik und Mensch-Maschine-Schnittstellen ausgestattet. (Boreal Bikes 2023). Es ist bekannt, dass sich der Nutzerkreis dieses Fahrrads erhöht. So setzen Salzburg Research, DLR, TU Delft, TU München bereits ein Holoscene X für Forschungszwecke ein.

Neben den Anwendungszwecken der aktiven Sicherheit gibt es in der Gruppe der in Echtzeit kommunizierenden Dienste Applikationen, die den Komfort erhöhen sollen. Beispielsweise sind hier die Anwendungen „Traffic Pilot“ (GEVAS software GmbH 2023) und YuBike (Yunex Traffic 2023a) (vormals als SiBike-App bekannt) zu nennen, die sich bereits im produktiven Betrieb befinden. Beide Anwendungen sind über den Playstore (Android) bzw. Appstore (Apple) für das Smartphone als Anwendung erhältlich. In der App TrafficPilot wird in ausgewählten Städten den Radfahrenden die Restlaufzeit der Lichtsignalanlagen sowie eine Geschwindigkeitsempfehlung für eine Grüne Welle bereitgestellt. Die App YuBike bezieht die Positionsdaten des Radfahrenden und nutzt diese in ausgewählten Städten, um diese an der Lichtsignalanlage über das zentrale Verkehrsmanagement anzumelden und die Schaltung so zu beeinflussen, dass der Radfahrer eine Grüne Welle erhält. Eine ähnliche App ist unter dem Namen „Schwung“ in den Niederlanden zu finden. (Schwung 2024). Bei den Applikationen ist festzuhalten, dass sie die Definition von Echtzeit in die benötigte Reaktionszeit der Applikation mit einbezieht. Die Anforderungen hinsichtlich der Echtzeit von Komfortsystemen und Systemen für die aktive Sicherheit können voneinander abweichen. Somit wäre eine weitere Untergruppierung bei Echtzeitsystemen möglich.

In der näheren Vergangenheit ist die direkte Vernetzung von Fahrrädern mit ihrer Umwelt, insbesondere mit dem motorisierten Individualverkehr (MIV) von unterschiedlichen Stakeholdern in Pressemitteilungen bzw. konkreten Ankündigungen oder prototypischen Projekten Gegenstand der Diskussion. In den USA ist ein Konsortium aus Automobilherstellern, Fahrradindustrie, V2X-Technologie und Telekommunikation gegründet worden, welches die Einführung von aktiven Sicherheitssystemen mittels C-V2X für Fahrräder

¹ DSRC WAVE ist die amerikanische Parametrierung von IEEE 802.11p

beschleunigen will (Winograd 2023). Teil des Konsortiums sind Autotalks und Commsignia, die bereits jeweils ITS-S für Fahrräder anbieten (Autotalks 2022; Commsignia 2023). Beide Hersteller arbeiten bei der Entwicklung der Geräte zusammen. Zurzeit können beide Geräte noch nicht über eine standardisierte Schnittstelle an ein Pedelec oder einen E-Scooter angebunden werden. Die Warnungen erfolgen optisch und akustisch. Ein weiteres Konsortialmitglied ist spoke, welches ebenfalls eine eigene Hardwareplattform besitzt (spoke 2023). Im Gegensatz zu Commsignia und Autotalks bietet spoke ausschließlich eine C-V2X-Variante an, während die Mitbewerber C-V2X als auch ITS-G5 anbieten. Neben den Pedelec-Herstellern aus der „Coalition for Cyclist Safety“ gibt es Ankündigungen von Canyon zur Integration von V2X im Pedelec (Canyon 2023). Praktische Versuche und prototypische Umsetzungen durch Volkswagen, Autotalks, Commsignia und Bosch sind im Rahmen des SECUR-Projektes erfolgt (E-Bike News 2023). Diese Ankündigungen und Aktivitäten zeigen, dass die direkte Vernetzung von Fahrrädern und dem motorisierten Verkehr bereits außerhalb der akademischen Forschung geschieht.

Weitere relevante Erkenntnisse für diese Studie können aus artverwandten Forschungsarbeiten gezogen werden. So stellt zum Beispiel das Connected Motorcycle Consortium (CMC) Informationen im Kontext C-ITS für Motorräder bereit. Unter anderem steht ein Report zur Verfügung, in dem die Position der Nahbereichskommunikationsantenne und die Qualität der GNSS-Lokalisation untersucht wird (Connected Motorcycle Consortium 2020).

3 Kommunikationsabhängige Herausforderungen für die ADAS-Entwicklung zum Schutz von Fahrradfahrenden

In diesem Kapitel werden die kommunikationsabhängigen Herausforderungen für ADAS-Entwicklungen erläutert, die für die Entwicklung einer Schutzfunktion vor Zusammenstößen mit Fahrradfahrenden entscheidend sind. Dazu werden in Kapitel 3.1 zunächst Kriterien aufgestellt, mit denen unterschiedliche Kommunikationstechnologien bewertet werden können. Danach werden Technologien, Architekturen und Protokolle der Nahbereichskommunikation in Kapitel 3.2 und anschließend für die Langbereichskommunikation in Kapitel 3.3 vorgestellt. Nachfolgend werden Technologien der Nahbereichskommunikation untereinander sowie Technologien der Nahbereichs- mit der Langbereichskommunikation in Kapitel 3.4 gegenübergestellt.

3.1 Kriterien für die Bewertung der Kommunikation am und mit dem Fahrrad

Nachfolgend werden die verschiedenen Kriterien für die Kommunikation am und mit dem Fahrrad vorgestellt. Anhand dieser Kriterien erfolgt später die Bewertung der betrachteten Technologien. Die Auswahl der verfügbaren Kriterien wird überwiegend anhand der in (Dr. Protzmann u. a. 2018) dargestellten Kriterien getroffen.

3.1.1 Technische Kriterien

Kommunikationstechnologien lassen sich anhand technischer Kriterien miteinander vergleichen. Diese werden in den folgenden Kapiteln näher vorgestellt.

Bandbreite & Datenrate

Entscheidend für die Kommunikation zwischen Sender und Empfänger ist die Übertragung der vollständigen Informationen über einen gewissen Zeitraum. Diese Informationsmenge über der Zeit wird als Datenrate bezeichnet. Aus einer bekannten Datenrate lässt sich wiederum auf notwendige Bandbreiten schließen. Die Bandbreite selbst hängt dabei allerdings von den Modulationsverfahren ab, wie die einzelnen Informationen über den physikalischen Übertragungskanal übertragen werden, und dem physikalisch zur Verfügung stehenden Frequenzspektrum.

Latenz (Ende-zu-Ende)

Neben der Datenrate ist die Aktualität der Informationen für eine Sicherheitsanwendung von hoher Bedeutung. Die Aktualität setzt sich dabei aus Latenzen innerhalb des Senders zusammen, die beispielsweise das Alter der erfassten Informationen betreffen, sowie aus einer Latenz der Datenübertragung. Da die Art der Datenerfassung von der Kommunikation unabhängig ist, kann für alle Technologien eine ähnliche Latenz innerhalb des Senders angenommen werden. Die Übertragungslatenz wird dann zum entscheidenden Faktor. Wichtig dabei ist, die komplette Betrachtung der Übertragungslatenz von Ende-zu-Ende zu bewerten. Konkret umfasst sie die Dauer, um Informationen in eine Nachricht zu verpacken, abzusichern, zu übertragen, beim Empfänger zu prüfen und zu entpacken. Viele Publikationen stellen ausschließlich die Latenz auf dem physikalischen Kanal dar. Diese allein ist kein ausreichendes Kriterium, da diese meist geringer ist als andere systembedingte Latenzen.

Reichweite & Zuverlässigkeit

Reichweite und Zuverlässigkeit sind immer im Kontext zueinander zu betrachten, da sie maßgeblich für eine fehlerfreie Datenübertragung über eine bestimmte Distanz sind. Da die Empfangsleistung mit der Entfernung quadratisch abnimmt, ist irgendwann ein Punkt erreicht, an dem das Nutzdatensignal durch Störungen so stark überlagert wird, dass der Empfänger die Informationen nicht mehr korrekt dekodieren kann.

Koexistenz

Die Koexistenz beschreibt die Fähigkeit der Technologie, mit anderen Technologien in einem (benachbarten) Frequenzband zu operieren, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.

Einbindung von VRU

Hier gilt es zu bewerten, wie gut sich mit den Technologien verletzte Verkehrsteilnehmer (VRU) allgemein adressieren lassen, insbesondere Fahrradfahrer.

Interoperabilität

Interoperabilität beschreibt die Eigenschaft einer Technologie, aktiv mit anderen Technologien Informationen auszutauschen. Dabei sind zwei Aspekte zu berücksichtigen: Einerseits bestimmt sie, wie gut Technologien miteinander verknüpft werden können und andererseits, wie zukunftsfähig die Technologie ist. Neuartige Ansätze, bei denen bereits im Markt befindliche Geräte nicht weiter genutzt werden können und durch neue Geräte ersetzt werden müssen, können durchaus nicht interoperabel sein.

Energiebedarf

Der Energiebedarf beschreibt die Energiemenge, die eine Technologie benötigt, damit sie für ihren Zweck eingesetzt werden kann. Der Energiebedarf einer Kommunikationslösung ist bei VRUs allgemein ein kritischer Faktor, da sie, anders als motorisierte Verkehrsteilnehmer, üblicherweise keine zusätzliche Energiequelle mit sich führen.

3.1.2 Wirtschaftliche Kriterien

Neben technischen sind auch wirtschaftliche Kriterien für ein erfolgreiches Deployment und eine längerfristige Nutzung zu betrachten.

Marktreife

Unter Marktreife wird betrachtet, ob eine fertige Serienlösung aktuell oder zeitnah für einen Kunden verfügbar ist und nach den jeweiligen gültigen Standards betrieben werden kann.

Marktdurchdringung

Die Marktdurchdringung betrachtet, ob es bereits Anwendungen und Systeme mit dieser Technologie im Markt gibt und wie weit diese verbreitet sind.

Zukunftsreife

Unter Zukunftsreife wird bewertet, ob und wie eine Technologie auch in absehbarer Zukunft noch genutzt werden kann. Sprich, ob die im Markt befindliche Technologie mit neuen Technologien die in den Markt kommen kompatibel ist. Dieser Punkt hat eine wesentliche Schnittmenge zum technischen Kriterium „Interoperabilität“.

3.1.3 Regulatorischer Nutzungsrahmen

In dieser Kategorie wird auf den regulatorischen Nutzungsrahmen innerhalb der EU eingegangen.

Kompatibilität mit Urban Rail ITS

Gemäß der ECC-Entscheidung (EU 2022a) stehen die ITS-Frequenzen im 5,9-GHz-Band nicht ausschließlich Anwendungen im Straßenverkehr zur Verfügung. Ein Teil des Spektrums ist für Urban-Rail-ITS-Anwendungen blockiert. Technologien, die im 5,9-GHz-Band „Cooperative Intelligent Transport Systems“ (C-ITS) Anwendungen betreiben sollen, müssen sicherstellen, dass Sie Urban-Rail-ITS-Systeme, wie z. B. „Communication-Based Train Control“ (CBTC), nicht stören.

3.2 Nahbereichskommunikation

In diesem Kapitel wird auf die Prinzipien und Technologien der direkten Nahbereichskommunikation im Kontext C-ITS eingegangen. In Kapitel 3.2.1 wird die grundlegende Kommunikationsarchitektur von C-ITS, wie sie in Europa durch die ETSI spezifiziert ist, vorgestellt. Das Frequenzspektrum, welches in Europa für C-ITS vorgesehen ist, wird anschließend in Kapitel 3.2.2 diskutiert. Das Kapitel 3.2.3 stellt die aktuellen und zukünftigen Kommunikationstechnologien im Bereich der Nahbereichskommunikation vor. Mit dem Kapitel 3.2.4 wird abschließend die Koexistenz der Kommunikationstechnologien innerhalb von Road ITS und Urban Rail ITS beschrieben.

3.2.1 Kommunikationsarchitektur

Der Informationsaustausch in der Nahbereichskommunikation erfolgt direkt zwischen den beteiligten Kommunikationspartnern. Diese sind mit geeigneten Kommunikationseinheiten auszurüsten, die die jeweilige Kommunikationstechnologien unterstützen. Für den europäischen Raum wird durch die ETSI ein Regelwerk aus Standards und Protokollen aufgebaut, welches den Informationsaustausch im ITS-Bereich regelt (ETSI 2010) und von den Sende-/Empfangeinheiten einzuhalten ist. Die Einheiten für den Informationsaustausch sind in den ETSI-Standards ITS-Station (ITS-S) benannt. Mobile Verkehrsteilnehmer besitzen eine -Personal-ITS- (P-ITS-S) oder spezieller im Fahrzeug eine Vehicle-ITS-S (V-ITS-S),

während ortsfeste Einheiten als Roadside-ITS (R-ITS-S) bezeichnet werden (ETSI 2010). Ebenfalls verbreitet und synonym zu verwenden sind die Bezeichnungen On-Board-Unit (OBU) für mobile Einheiten und Road-Side-Unit (RSU) für ortsfeste Einheiten, welche aus dem nordamerikanischen Raum stammen (Uzcategui u. a. 2009).

Zur Ermöglichung einer herstellerunabhängigen Entwicklung von solchen Systemen ist eine Referenzarchitektur definiert, welche Datenformate und Verhaltensweisen, die für eine Kommunikation nötig sind, definiert. In Bild 1 ist die Referenzarchitektur für ITS-S dargestellt. Die Referenzarchitektur orientiert sich an dem OSI-Modell (ITU 1994), fasst jedoch einige seiner Ebenen zusammen. Der Datenaustausch zwischen den Ebenen erfolgt über abstrakte Schnittstellen. Auf der Ebene Applications erfolgt die Informationsverarbeitung, beispielsweise eine Anwendung, um den Nutzer auf Basis von empfangenen Nachrichten zu informieren oder vor einer bestimmten Situation zu warnen. Die Ebene Facilities stellt den Anwendungen Dienste bereit oder beinhaltet autonome Dienste, die keine Eingaben einer Anwendung erfordern. In dieser Ebene werden unter anderem auch weitere Informationen (z. B. Stationsidentifikationsnummer, Position der Station, Zeitpunkt) verwaltet. Diese Informationen werden zu standardisierten Nachrichten zusammengefügt. Für die Kommunikation zwischen Verkehrsteilnehmern stehen beispielsweise sogenannte CAMs und zukünftig auch VAMs zur Verfügung, welche allgemeine Statusinformationen über Verkehrsteilnehmer enthalten (CAMs) oder spezifische Informationen über verletzte Verkehrsteilnehmer (VAMs). Nach der Erzeugung dieser Nachrichten werden sie in der Ebene Network & Transport um weitere kommunikationsspezifische Steuerungsdaten erweitert. Diese Steuerungsdaten können unter anderem zur geografischen Verbreitung der Nachricht in einem definierten Zielgebiet verwendet werden. Zur Sicherstellung von Integrität und Authentizität der Nachrichten erfolgt in der Ebene Network & Transport eine Signierung der Nachrichten gemäß der durch die ETSI definierte Verfahren speziell für den Anwendungsbereich C-ITS. Zudem sind Informationen angehängt, die zur Berechtigungsidentifikation des Senders dienen. Die Umsetzung der Signierung übernimmt die Security-Einheit. Da alle Informationen für jeden Teilnehmer im Funkkanal relevant sind und lesbar sein sollen, erfolgt keine Verschlüsselung. Die Signalmodulation für den Übertragungskanal sowie den Zugriff auf den Kanal verantwortet die Ebene „Access“. Die Ebene „Management“ setzt den übergreifenden Informationsfluss um.

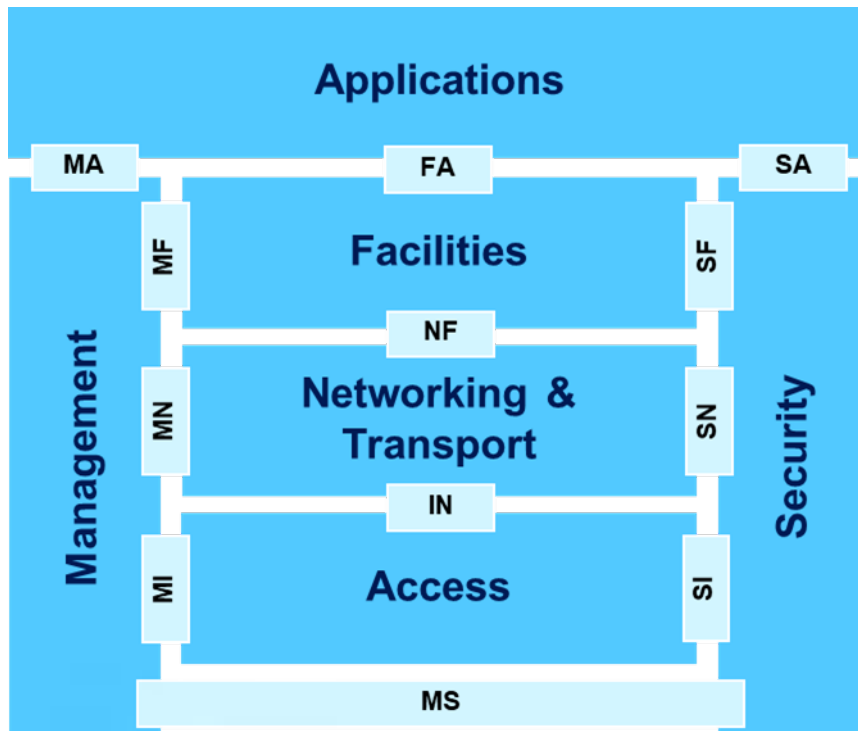


Bild 1. ITS-Referenzarchitektur für ITS-S (eigene Darstellung nach (ETSI 2010))

3.2.2 Frequenzen

Für die Nutzung und Regulierung der Frequenzen im C-ITS-Bereich ist im europäischen Raum die Europäische Union (EU) verantwortlich. Ein Durchführungsbeschluss der Kommission verpflichtet die Mitgliedsstaaten, die darin genannten Frequenzen für ITS-Anwendungen zur Verfügung zu stellen. Der Frequenzbereich von 5 875 bis 5 935 MHz ist in sechs Blöcke zu je 10 MHz aufgeteilt und dediziert für sicherheitskritische Anwendungen reserviert. In Bild 1 ist die Kanaluordnung der ITS-Kanäle aufgeführt. Wie bereits in Kapitel 3.1.3 dargestellt, ist dieses Spektrum nicht dediziert für ITS-Lösungen im Straßenverkehr vorgesehen, sondern auch für Urban-Rail-ITS-Applikationen nutzbar. Road ITS und Urban Rail ITS unterliegen keiner gemeinsamen Standardisierung. Zur Vermeidung von Interferenzen zwischen den untereinander nicht harmonisierten Lösungen sind Prioritäten hinsichtlich der Frequenznutzung vorgesehen. Der Block 5 925-5 935 MHz ist beispielsweise gänzlich für Urban Rail ITS reserviert. In dem Bereich 5 875-5 915 MHz haben Road ITS und im Bereich 5 915-5 925 MHz Urban Rail ITS Vorrang. Im letztgenannten Frequenzbereich gilt für Road ITS die Einschränkung, dass dort nur Infrastruktur-zu-Fahrzeug Kommunikation (I2V) erlaubt ist (EU 2022a). Zusätzlich stehen noch Frequenzen im Bereich von 5 855-5 875 MHz für eine Nutzung bei nicht sicherheitskritischen Applikationen zur Verfügung (EU 2022b). Der Aufgabenbereich von Road ITS und Urban Rail ITS ist anhand der Verknüpfung der Schienensysteme mit dem Straßenverkehr vorgesehen. Der Begriff Urban-Rail-ITS-Systeme bezieht sich auf Systeme, die im städtischen und vorstädtischen Bereich getrennt von Straßen- und Fußgängerverkehr im Einsatz sind. Im Übergangsbereich zur Straße (z. B. Straßenbahnen) sollen Anwendungen aus dem Road-ITS-Bereich verwendet werden.

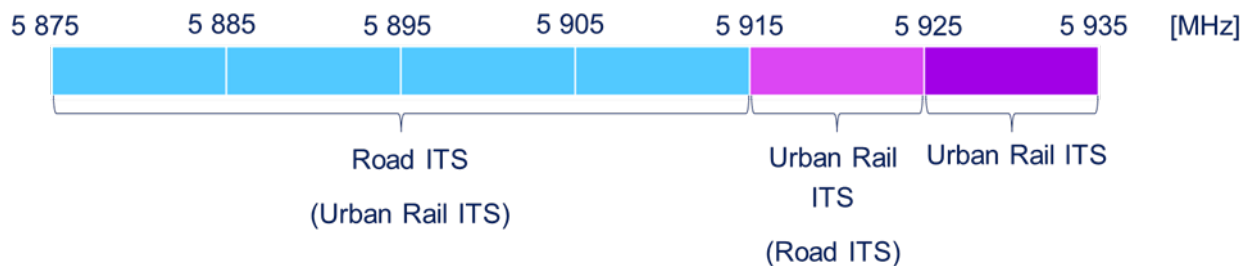


Bild 2. Frequenz- und Kanalzuteilung in Europa (eigene Darstellung)

3.2.3 Kommunikationstechnologien im Road-ITS-Bereich

In diesem Kapitel erfolgt eine Darstellung der Kommunikationstechnologien aus dem Road-ITS-Bereich. Zuerst werden die Technologien aus der IEEE-Familie mit IEEE 802.11p und IEEE 802.11bd vorgestellt. Danach wird auf die Technologien aus dem Bereich der 3GPP für die direkte Kommunikation eingegangen.

IEEE 802.11

IEEE 802.11p

Die in Europa bereits verwendete Access-Layer-Technologie ETSI ITS-G5 nutzt den Standard IEEE 802.11p für die direkte Kommunikation der Teilnehmer untereinander (ETSI 2020a). IEEE 802.11p ist dabei ein für den Verkehrsbereich optimierter WiFi-Funkstandard (ISO 2012). Dieser wurde 2010 fertiggestellt und ist seit 2016 Teil der 802.11-Standards. Mittels 802.11p ist es möglich, direkt, d. h. ohne W-LAN-Router, Informationen auszutauschen. Dies wird als Ad-hoc-Modus bezeichnet. Für die Signalübertragung setzt das Funk-system IEEE 802.11p Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) ein. Für die Nutzung im ETSI-ITS-G5 Access-Layer ist weiterhin eine Erweiterung des Standards über die Logical Link Control (LLC) (ISO 1998) vorgesehen.

Vergleichbar zum handelsüblichen W-LAN selbst wird auch bei ITS-G5 Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) als Kanalzugriffsverfahren eingesetzt. CSMA/CA arbeitet nach dem Listen-before-talk-Prinzip. Das bedeutet, dass der Kanal zunächst abgehört wird und nur gesendet wird, wenn dieser frei ist. Bei einem belegten Kanal wird nach einer zufälligen begrenzten Wartezeit ein erneuter Versuch unternommen. Die Daten eines Nutzers werden als ein zusammenhängender Block auf dem Kanal ausgesendet. Abhängig von der Modulation, dem Fehlerkorrekturverfahren und der Länge der V2X-Nachricht selbst, ist die zeitliche Belegung unterschiedlich lang. Das Senden der Nachricht als ein Block auf dem Kanal führt dazu, dass dieser nur durch einen Nutzer zur gleichen Zeit in räumlicher Nähe den Kanal belegen kann. Bei ausreichend großer räumlicher Separation ist eine Doppelbelegung möglich. Im Grenzbereich kann dies für einen Empfänger zu Störungen führen, sollten sich zwei Sender gegenseitig nicht „hören“, aber beide im Empfangsbereich eines dritten Beteiligten (Empfänger) liegen. Dabei kommt es zu einer Signalüberlagerung der beiden Sender am Empfänger. Dieser kann dann die beiden Nachrichten nicht dekodieren, so dass das zu dem sogenannten Hidden-Node-Problem führt. Abgesehen davon ist ITS-G5 mit den genutzten Parametern ein infrastrukturunabhängiges und robustes Datenübertragungsverfahren. (Dr. Protzmann u. a. 2018). Eine Überlastung des Kanals wird mit Verfahren in den Ebenen Management und Network & Transport geregelt. Mittels des ETSI-ITS-G5-Standards wird zudem die Nutzung des 5,9 GHz-Bandes und

einer Kanalbreite von 10 MHz mit entsprechenden Parametern festgelegt (ETSI 2020a). In Bild 3 wird der Ressourcenzugriff bei ITS-G5 schematisch dargestellt. Die Nutzer senden ihre Daten in nicht synchronisierten Abschnitten als Blöcke unterschiedlicher Länge. Durch das CSMA/CA-Prinzip schließen die Blöcke auch nicht unmittelbar aneinander an.

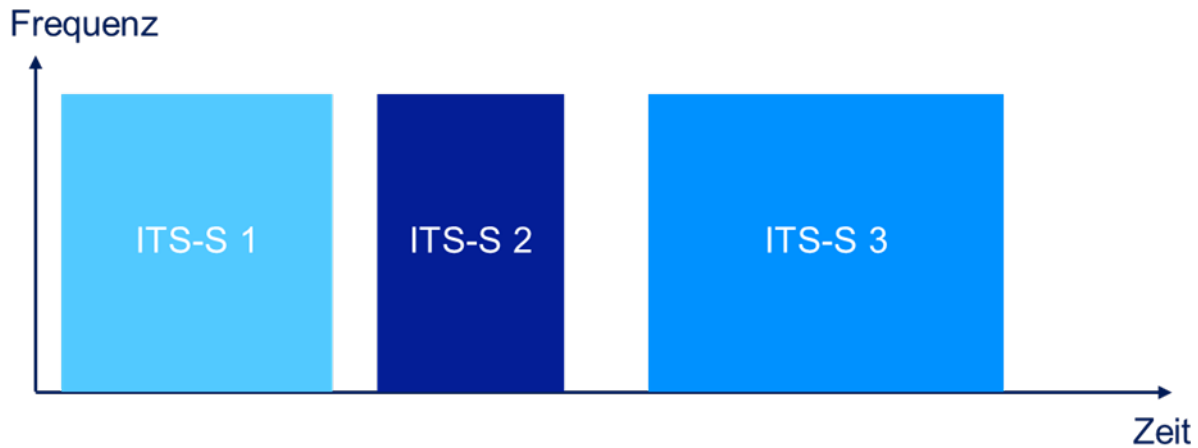


Bild 3. Schematische Darstellung des Ressourcenzugriffs unter ITS-G5

IEEE 802.11bd

Innerhalb der 802.11-Standardfamilie ist ein weiterer Standard erschienen, welcher vergleichbar zu 802.11p einen Ad-Hoc-Modus besitzt. Aufgrund der Abwärtskompatibilität von IEEE 802.11, verfügt IEEE 802.11bd über einen Legacy Mode, mit dem es ihm ermöglicht wird, Nachrichten auszusenden, die von 802.11p-Stationen dekodiert werden können bzw. es 802.11bd-Stationen ermöglicht, 802.11p-Nachrichten zu empfangen und zu dekodieren. Somit ergibt sich eine vollumfängliche Kompatibilität zu 802.11p. Der Legacy Mode wird durch die Erkennung von aktiven 802.11p-Stationen im Umkreis der 802.11bd-Station aktiviert. Der Standard ist eine kontinuierliche Weiterentwicklung der 802.11-Standards in der Verkehrsnetzwerk. Vorteil der voll umfänglichen Kompatibilität ist, dass ausgerollte 802.11bd-Stationen direkt mit den bestehenden Systemen unter 802.11p interagieren können und keine erneute signifikante Ausstattungsrate zu erreichen ist, bevor ein Mehrwert für die Nutzer entsteht und Bestandsstationen weiterhin in die kooperative Kommunikation eingebunden sind. Innerhalb der ETSI wird 802.11bd in dem ITS-G5 Release 2 eingeführt. Neben dem Legacy Mode bringt der Standard neue Funktionen, wie z. B. die Nutzung des 60-GHz-Bandes, mit. Partiiell führen die neuen Funktionen auch im Legacy Mode zu einer Verbesserung der Signalübertragung. Ein Beispiel dafür ist die kanallastabhängige Wiederholung von Nachrichten. (CAR 2 CAR Communication Consortium 2023a). Sämtliche Features von 802.11bd sind in dem „Legacy-Mode“ nicht verfügbar. In der Übergangsphase, in der die Kommunikation maßgeblich von 802.11p Stationen bestimmt wird, ist somit zunächst kein größerer Funktionshub durch die Technologie zu erwarten.

3GPP PC 5 Interface

LTE-V2X

Innerhalb der 3GPP-Standardisierung ist seit dem Release 14 eine auf Mobilfunk basierende alternative Access Layer Technologie verfügbar, die unter dem Namen LTE-V2X bekannt ist. LTE-V2X benutzt ein Modulierungs- und Kanalzugriffsverfahren, welches ähnlich zu dem ist, dessen LTE sich bedient. Daraus leitet sich auch der Name der Technologie ab. Für den Direktfunk zwischen Kommunikationspartnern untereinander ist im LTE-Standard das PC 5 Interface vorgesehen, für das zwei unterschiedliche Betriebsarten zur Verfügung stehen. Im Modus 3 erfolgt die Steuerung des Kanalzugriffs über eine zentrale Instanz, mit der jede Station durchgehend in Verbindung stehen muss. Modus 4 ermöglicht es den Stationen, den Kanalzugriff ohne die zentrale Instanz zu organisieren. Dazu überwacht jede Station den Kanal eine gewisse Zeit und versucht dann freie Ressourcen für sich zu allokkieren. Ein großer Unterschied zwischen ITS-G5 und LTE-V2X ist die Aufteilung des Kanals. ITS-G5, wie in Bild 3 zu sehen, teilt den Kanal ausschließlich in Zeitschlitze pro Station auf. Sämtliche Frequenzressourcen stehen in dem einem Nutzer zugeordneten Zeitschlitz vollständig zur Verfügung. Bei LTE-V2X erfolgt weiterhin eine Aufteilung der zur Verfügung stehenden Frequenzen in Subkanäle (siehe Bild 4). Die Zeit- und Frequenzressourcen sind in kleinere Blöcke zerlegt. Das führt zu einer Matrix, in der die kleinste Einheit einem Resource Block (RB) (Zelle der Matrix) entspricht. Die Unterteilung der Zeitachse wird als Sub-Frame bezeichnet. Jede ITS-S erhält in Abhängigkeit ihres Kommunikationsbedarfs eine schwankende Anzahl an RBs. Jeder RB selbst besteht aus einem Daten- (TB) und einem Kontrollteil (SCI). Der Kontrollteil enthält Informationen zu den Modulations- und Fehlerkorrekturverfahren, die im Datenteil verwendet werden. Die Zuteilung im Modus 3 erfolgt über eine zentrale Instanz, während im Modus 4 das Verfahren Sensing-Based Semi-Persistent Scheduling (SB-SPS) eingesetzt wird. Bei SB-SPS erfolgt die Phase Sensing im Selektionsfenster. Dieses ist bei LTE-V2X auf 100 Millisekunden festgelegt. Durch die Aufteilung ist es möglich, dass mehrere Teilnehmer zeitgleich den Kanal nutzen. Jedoch können Stationen aufgrund des Halb-Duplex-Verfahrens nicht zeitgleich senden und empfangen, weshalb zeitgleich gesendete Nachrichten nicht empfangen werden können. Um diesen Nachteil zu umgehen, sendet jede Station die Nachricht mehrfach in einen Wiederholungsmuster. (Mannoni u. a. 2019). Die Nutzung bzw. Parametrierung der Technologie in der EU wird in (ETSI 2020b) geregelt.

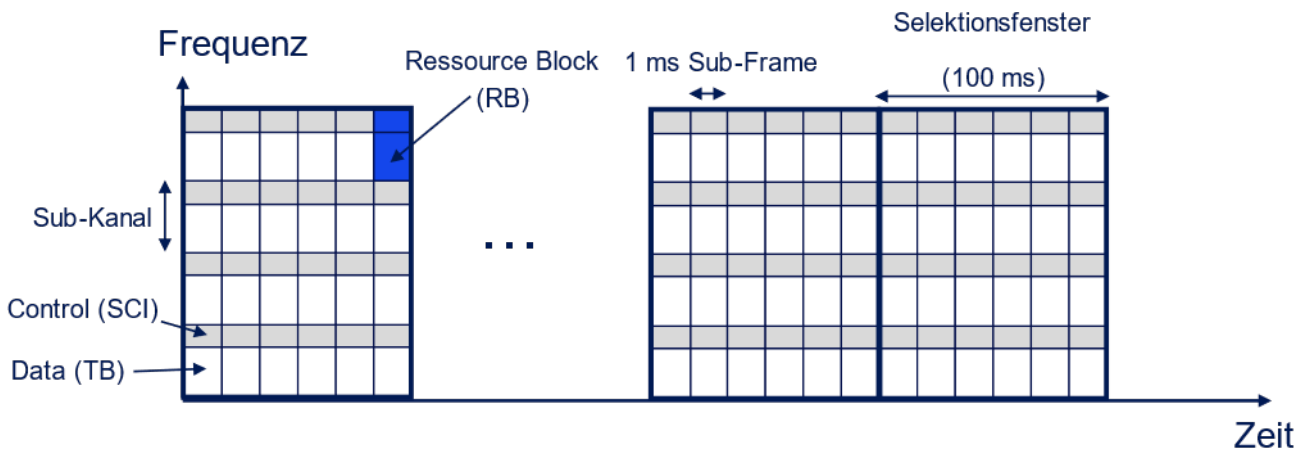


Bild 4. Schematische Darstellung des Ressourcenzugriffs bei LTE-V2X (eigene Darstellung nach (Mannoni u. a. 2019))

5G-NR V2X

Neben LTE-V2X ist seitens der 3GPP die Access-Layer-Technologie 5G-NR V2X vorangetrieben worden. Das letzte Update ist in Release 17 erfolgt, nachdem es bereits mit dem Release 16 vorgestellt wurde. Grundsätzlich gibt es große Gemeinsamkeiten zu LTE-V2X. Es wird das PC5-Interface mit zwei unterschiedlichen Modi unterschieden. Im Modus 1 wird der Kanalzugriff, somit auch die Ressourcenzuteilung, über eine zentrale Instanz geregelt. Modus 2 verwendet für die Vergabe der Ressourcen SB-SPS dezentral zwischen den Kommunikationspartnern. Die für LTE-V2X dargestellten Funktionsweisen sind auch auf 5G-NR V2X übertragbar, wobei die Parameter des Standards und das Verfahren der Vorwärtsfehlerkorrektur abweichen. Insgesamt ermöglicht die Technologie eine deutlich höhere Flexibilität als LTE-V2X und eine gesteigerte Leistungsfähigkeit. Die Abweichungen zu LTE-V2X führen jedoch dazu, dass beide Technologien nicht untereinander koexistieren können. Somit ist bei der Nutzung beider Technologien eine Trennung in Frequenzbereiche oder Zeitschlitze vorzusehen. (Garcia u. a. 2021a; Naik u. a. 2019)

3.2.4 Interferenzen mit anderen Systemen im ITS-Band

Die Frequenzen im ITS-Band stehen nicht ausschließlich Systemen für Road-ITS zur Verfügung. Zudem gibt es, wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, unterschiedliche Nahbereichsfunktechnologien für eine Systemrealisierung von Road-ITS-Anwendungen. Eine mehrfache Nutzung von Frequenzressourcen führt jedoch Interferenzen, die zu schwerwiegenden Funktionsbeeinträchtigungen bis hin zum Ausfall der gesamten Kommunikation führen können. Strategien zur Vermeidung von Interferenzen sind beispielsweise die Trennung der genutzten Bänder auf unterschiedliche Frequenzbereiche, die geografisch räumliche oder zeitliche Trennung für Anwendungen und Technologien. Bei der Frequenztrennung steht der Technologie ein eigenes Frequenzband zur Verfügung. Die geografische Trennung weist den Nutzern anhand von Sendeleistungen und Empfängerempfindlichkeiten einen örtlichen Bereich der exklusiven Nutzung zu. Mittels der zeitlichen Trennung ermitteln die Technologien und Nutzer Zeitfenster, in denen Ihnen die Ressource zur Verfügung steht. Die Quellen von Interferenzen sind zur Beurteilung zunächst einmal zu differenzieren. Bei intratechnologischen Interferenzen entstehen diese beispielsweise durch das Kanalzugriffsverfahren. Intertechnologische Interferenzen resultieren durch die Doppelnutzung von unterschiedlichen Technologien zur gleichen Zeit in den gleichen Frequenz- und

Raubereichen. Aufgrund von technischen Grenzen in der Signalverarbeitung entstehen zudem Störungen durch Signale von anderen Diensten aus Nachbarkanälen.

Zunächst wird ein Überblick über die aktuelle Regulierung der EU für die Verwendung von Technologien im Road-ITS Bereich gegeben, mit anschließender Ausführung über die intertechnologische Eignung der aktuellen Technologie Kandidaten. Anschließend wird ein Blick auf die aktuelle Diskussion bezüglich Interferenzen mit Urban-Rail-ITS geworfen.

Road ITS

Innerhalb der EU ist geregelt, dass das ITS-Band einerseits technologisch neutral ist, andererseits jedoch gewisse Regeln einzuhalten sind, damit eine Koexistenz von Technologien innerhalb des Road-ITS-Spektrums möglich ist (EU 2022a), (Durepaire 2021). Beispielsweise sind folgende Regeln zu finden:

- Eine Technologie darf andere Lösungen im selben Frequenzband nicht stören.
- Beide Technologien müssen einen fairen Kanalzugriff ermöglichen.
- Das Spektrum ist effizient auszunutzen.
- Bestehende Systeme dürfen nicht gestört werden.

In Bild 5 ist die Kompatibilität der Technologien untereinander veranschaulicht. Kompatibilität ist grün und Inkompatibilität rot gekennzeichnet. Im Falle von Inkompatibilität sind Lösungen zu suchen, wie eine gemeinsame Nutzung der Frequenzressourcen ohne gegenseitige Störungen zu ermöglichen ist. Innerhalb der Standardfamilie IEEE 802.11 ist eine Kompatibilität durch einen Legacy Mode und die Nutzung einer für beide Technologien verständlichen Anfangspräambel gegeben. Im Legacy Mode senden IEEE 802.11bd-fähige Einheiten bei der Anwesenheit eines IEEE 802.11p-Geräts die Nachrichten im IEEE 802.11p-Standard aus. Sollten die IEEE 802.11bd nicht in den Legacy Mode zurückfallen können, ist durch die für beide Technologien verständliche Anfangspräambel, welche die Länge des Pakets enthält, klar, wie lange der Kanal zeitlich geblockt ist. Aufgrund des Legacy Modes und der gemeinschaftlichen Anfangspräambel sind zwischen ITS-G5 und ITS-G5 Rel. 2 keine besonderen Maßnahmen zur gemeinsamen Ressourcennutzung zu etablieren. Zwischen den IEEE 802.11- und den 3GPP-Standards ist dies nicht möglich. Für die Technologien ITS-G5 und LTE-V2X lässt die ETSI zurzeit Lösungen mittels Technical Report (TR) erarbeiten. Im Rahmen von ETSI TR 103 766 wird nach Koexistenzmaßnahmen für die Nutzung im gleichen Band gesucht, während im ETSI TR 103 667 eine Separation der Technologien im ITS-Band Bestand der Untersuchung ist (CAR 2 CAR Communication Consortium 2021, 2022). Für die Technologiekombinationen ITS-G5/5G NR V2X bzw. ITS-G5 Rel. 2 /5G NR-V2X gibt es derzeit noch keine TRs, die Lösungen erarbeiten. Aufgrund der ähnlichen Ressourcennutzung von 5G NR-V2X und LTE-V2X ist unter der Einhaltung von Randbedingungen eine Übertragung der Interferenzvermeidungsmethoden aus ETSI TR 103 766 möglich (CAR 2 CAR Communication Consortium 2022). Innerhalb der 3GPP-Standards LTE-V2X und 5G NR-V2X selbst ist keine Koexistenz gegeben. Um das zu realisieren, sieht die Wissenschaft und die entwickelnden Gremien unterschiedliche Verfahren vor (Garcia u. a. 2021b), welche jedoch bisher nicht in den Standard eingebracht worden sind und eine Änderung des Standards nötig wäre, um diese nutzen zu können.

	ITS-G5	ITS-G5 Rel.2	LTE-V2X	5G-NR V2X
ITS-G5				
ITS-G5 Rel. 2	Legacy Mode			
LTE-V2X				
5G-NR V2X				

Bild 5. Kompatibilität der Technologien (grün: ja, rot: nein)

Urban-Rail-ITS

Für eine Untersuchung der Koexistenz zwischen Urban-Rail-ITS und Road-ITS gibt es innerhalb der ETSI zwei TRs (ETSI 2016, 2019b). Die aktuelle Frequenzzuteilung ist durch einen CEPT-Report, wie in Kapitel 3.2.2 dargestellt, geregelt (CEPT 2019). Daraus geht zunächst eine Separation der Frequenzen für die Bereiche Urban-Rail-ITS und Road-ITS hervor. Im nächsten Schritt ist geplant, mittels des ETSI TR 103 580 Verfahren zu finden, wie Road-ITS-Systeme in den geteilten Bändern eingesetzt werden können.

3.3 Langbereichskommunikation

Nah- und Langbereichskommunikation lassen sich zwar hinsichtlich ihres Aufbaus, eingesetzter Technologien und Übertragungsprotokollen untereinander vergleichen, aber dieser Vergleich wird aufgrund folgender Aspekte nicht empfohlen. In dem Bereich der Langbereichskommunikation für C-ITS-Anwendungen existieren keine bzw. weniger deutlich ausgeprägte, standardisierte Lösungen hinsichtlich der Architekturen, Protokolle und Datenformaten. Somit existiert eine Vielzahl von Lösungsoptionen, die in ihren Eigenschaften deutlich voneinander abweichen.

In Kapitel 3.3.1 wird die Grundstruktur, die grundsätzlich bei einem kooperativen Assistenzsystem auf Basis der Langbereichskommunikation Anwendung findet, und in Kapitel 3.3.2 werden die kabellosen Zugangstechnologien erläutert. Anschließend wird in Kapitel 3.3.3 ein Ausblick auf Ausgestaltungsoptionen der Hintergrundsysteme gegeben. Abschließend wird in Kapitel 3.3.4 ein kurzer Blick auf die eingesetzten Protokolle geworfen.

3.3.1 Grundstruktur eines Assistenzsystems auf Basis der Langbereichskommunikation

Besonders im Hinblick auf die Systemarchitektur lässt die Langbereichskommunikation deutlich mehr Gestaltungsspielraum gegenüber der Nahbereichskommunikation zu. In der Nahbereichskommunikation sind in der Regel nur zwei Entitäten beteiligt. Diese übernehmen sämtliche Aufgaben wie Informationsermittlung, -verarbeitung, -verteilung, -auswertung und -reaktion selbst. Die geografische Verbreitung wird dabei durch die Funktechnologie weitestgehend selbst gesteuert. Bei der Langbereichskommunikation erfolgen diese Aufgaben durch eine beliebige Anzahl von Entitäten, welche selbst zu unterschiedlichen Anteilen lokal als auch im Rechenzentrum platziert werden können. Bild 6 veranschaulicht die variable Entitätengrenze beim Vergleich zwischen Nah- und

Langbereichskommunikation. Ein wesentlicher Unterschied ist, dass in der Langbereichskommunikation die zu übermittelnde Nachricht zweimal über einen kabellosen Kanal übertragen wird, während das bei der Nahbereichskommunikation nicht der Fall ist. Zwischen diesen zwei Übertragungen wird diese Nachricht ggf. verändert und ausgewertet. Zusätzlich kann sie in einer Vielzahl von Servern/Cloudsystemen bearbeitet werden. Da die Langbereichskommunikation keine Informationsverteilung über die geografische Verbreitung über die Kommunikationstechnologie direkt ermöglicht, ist diese Entität als Mindestbestandteil des Hintergrundsystems anzusehen. Informationsverarbeitung, -auswertung sowie partiell -darstellung können sowohl im Hintergrundsystem als auch lokal erfolgen.

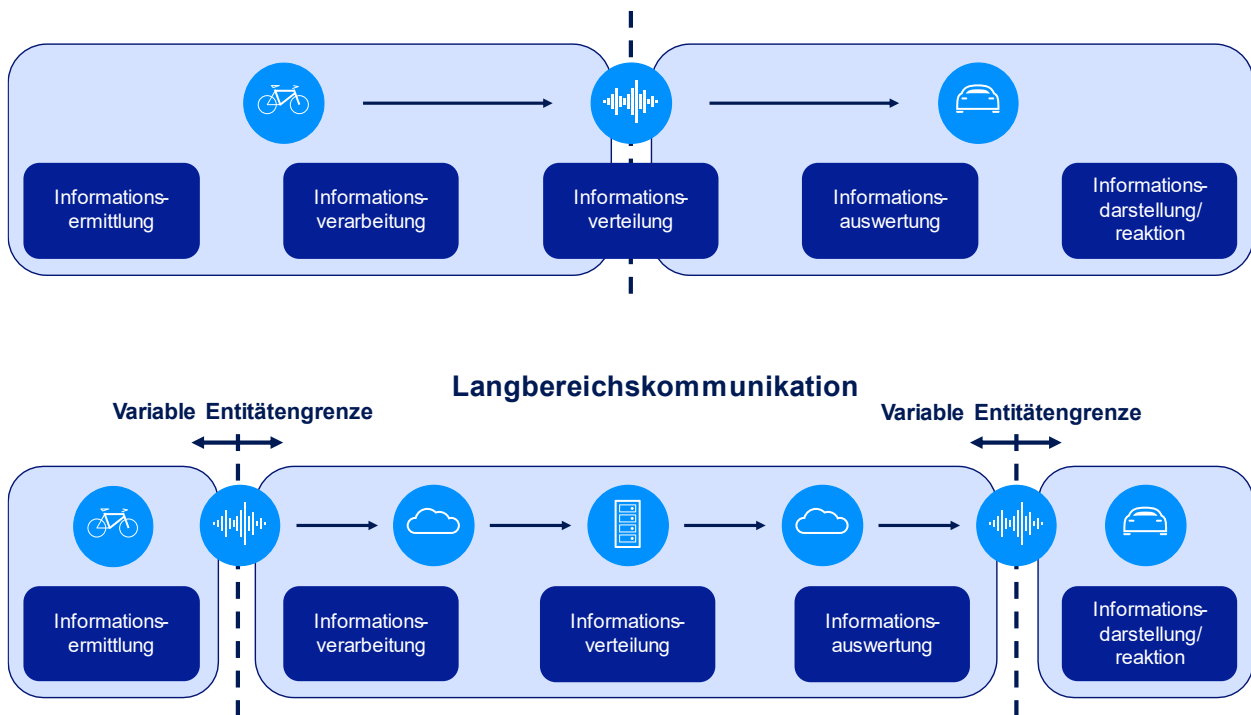


Bild 6. Vergleich der Architekturoptionen zwischen der Nahbereichs- und der Langbereichskommunikation

3.3.2 Kabellose Zugangstechnologien

In der Langbereichskommunikation in Verbindung mit mobilen Teilnehmern im Kommunikationsnetzwerk gibt es in Deutschland aktuell nur die Option, über ein Mobilfunksystem der 3GPP-Standardisierung (d. h. 4G oder 5G) zu kommunizieren. Systeme wie WiMAX finden in Deutschland keine Verwendung mehr (Luber und Donner 2018). Die satellitenbasierte mobile Kommunikation ist zum jetzigen Zeitpunkt noch Gegenstand der Forschung, in ersten prototypischen Versuchen erlebbar und spielt somit für den hier untersuchten Anwendungsfall noch keine Rolle (Chen u. a. 2020; Neuhetzki, Thorsten 2022).

Im Gegensatz zum Nahbereichsfunk stehen die Frequenzressourcen im Langbereichsfunk einzelnen Mobilfunkbetreibern exklusiv zur Verfügung. Die Vergabe der Frequenzen übernimmt die Bundesnetzagentur (BNetzA). Der Mobilfunkbetreiber nutzt die ihm zugeteilten Frequenzen, um mittels seiner Mobilfunkinfrastruktur Zugangspunkte für Mobilegeräte zur Verfügung zu stellen, in welche diese sich einwählen können. Die gesamte Ressourcenvergabe wird durch die Infrastruktur des Mobilfunkproviders geregelt. Das Verfahren zum Datenaustausch bei den Systemen der vierten und fünften Mobilfunkgeneration Mobilfunk (d. h. 4G und 5G) ist vergleichbar mit dem in Bild 4 dargestellten Vorgehen. Die

übertragenen Informationen werden zunächst innerhalb des Kernnetzes des Mobilfunkproviders weitergegeben und bei Bedarf als Daten für die mobile Internetkommunikation dem öffentlichen Internet übergeben. (Sauter 2018)

Während es zwischen den zweiten, dritten und vierten Mobilfunkgenerationen (also 2G, 3G und 4G) signifikante Unterschiede bei der physikalischen Modulation und Kodierung der zu übertragenden Informationen gab, sind die Unterschiede zwischen 4G und 5G geringer. Ziel der fünften Mobilfunkgeneration 5G ist es, eine Leistungssteigerung durch mehr Flexibilität im Netz zu erzielen, die dazu dient, zielgerichteter auf die Bedürfnisse der Nutzer einzugehen. Ein Überblick über die Neuerungen ist unter anderem in (Shafi u. a. 2017) gegeben. Mit der flexiblen Ausgestaltung des Netzes für einzelne Anforderungen ergibt sich eine Optimierungsherausforderung. Nicht alle Anforderungen können gleichzeitig erreicht werden, sodass sich eine Spezialisierung auf bestimmte Teilparameter für die Realisierung von Anforderungen nachteilig auf andere Anforderungen auswirken kann. Die 3GPP definiert dazu drei Szenariokategorien, die für ihren Anwendungsbereich optimiert sind und die Anforderungen der Nutzer widerspiegeln sollen. Bei der ersten Kategorie Enhanced mobile Broadband (eMBB) stehen hohe Datenraten vielen Nutzern zur Verfügung. In der zweiten Kategorie Massive machine type communication (mMTC) ist eine Unterstützung für Geräte, die nicht zeitkritische Informationen von kosteneffizienten und mit einer langen Akkulebensdauer ausgestatteten Geräten übertragen. Die dritte Kategorie umfasst Szenarien der Ultra-reliable and low latency communication (URLLC) für Dienste, die eine hohe Zuverlässigkeit bei gleichzeitig geringer Latenz benötigen.

3.3.3 Hintergrundsysteme

Die geografische Verbreitung der Informationen wird im Nahbereichsfunk überwiegend durch die Empfangsreichweite der Sendestation bestimmt. Eine Weitergabe von Nachrichten in einem begrenzten Umfang über andere Stationen (Geohopping) ist möglich. Die Information ist in der Regel aber nur im näheren Umfeld relevant und für alle Empfänger der gleichen Technologie frei dekodierbar. Diese Verfahren der geografischen Verbreitung von Nachrichten fehlen bei der Langbereichskommunikation. Zudem sind die Kommunikationspartner untereinander nicht bekannt, sodass ein Senden der Information an alle relevanten Empfänger nicht möglich ist und technisch ggf. nur mit großem Ressourcenaufwand möglich wäre. Daher erfordert die Langbereichskommunikation mindestens eine Instanz, die Informationen von den Lieferanten entgegennimmt, diese räumlich gruppiert und anschließend allen anderen Nutzern, die im geografischen Relevanzbereich sind, zustellt. Darüber hinaus können weitere Entitäten beteiligt sein, z. B. zur Nachrichtenkonvertierung in unterschiedliche Formate oder die Vor- und Nachverarbeitung der Information. Bei der Nahbereichskommunikation liegen diese Aufgaben bei den Kommunikationspartnern selbst. Informationen, die über eine längere Zeit gültig sind, können auch von den Hintergrundsystemen vorgehalten werden im Rahmen ihrer zeitlichen Gültigkeit. Bei proprietären Hintergrundsystemen liegen die benannten Aufgaben häufig in einer Hand. Damit sich unterschiedliche Datenlieferanten mit unterschiedlichen Dateninteressenten ohne großen wiederkehrenden Aufwand in den Informationsaustausch begeben können, gibt es seitens der EU Bestrebungen, beide Parteien über sogenannte nationale Zugangspunkte zusammenzubringen (EU 2010). Auf beide Lösungsoptionen sowie den Sonderfall, bei dem die Hintergrundsysteme direkt im Kernnetz des Mobilfunkbetreibers platziert werden, wird im Folgenden eingegangen.

Proprietäre Lösungen

Proprietäre Lösungen zeichnen sich dadurch aus, dass diese sich nicht an einer kooperativen Kommunikation, die herstellerübergreifend ist, beteiligen. Der Bereitsteller der Lösung bemüht sich in der Regel, die Informationen, die er benötigt, bei den Informationslieferanten selbst einzufordern und diese in sein eigenes Hintergrundsystem zu übertragen. Dort erfolgen ggf. die Weiterverarbeitung und Aufbereitung der Informationen sowie die Verbreitung an die Interessenten. Für den Austausch können standardisierte Datenformate und Protokolle zum Einsatz kommen, gänzlich eigene Entwicklungen oder Mischformen. Ein Beispiel für ein proprietäres Assistenzsystem für den Einsatz am Fahrrad ist der traffic pilot von GEVAS (GEVAS software GmbH 2023). Diese App stellt den Radfahrenden die Restlaufzeiten der Lichtsignalanlage in ausgewählten Städten zur Verfügung. Die Daten, die die App benötigt, liefern Städte, die mit GEVAS zusammenarbeiten, direkt aus. Eine Datenaustauschplattform oder ein nationaler Zugangspunkt sind nicht erforderlich. Zudem sind die Formate und Protokolle für die Übertragung nicht öffentlich bekannt.

Die Anzahl der Entitäten, die die Informationen auf ihrem Weg zum Interessenten passieren, ist in der Regel nicht bekannt. Je nach Auslegung der Entitäten und des Datenaufkommens kann es zu einer mehr oder weniger großen Ende-zu-Ende-Latenz kommen.

Öffentliche Lösungen

Öffentliche Lösungen zum Datenaustausch für intelligente Verkehrssysteme (IVS) stellen die nationalen Zugangspunkte dar. Zur Harmonisierung der Aktivitäten in der EU wurde die National Access Point Coordination Organisation for Europe (NAPCORE) gegründet (o. A. 2023c). Auf dieser Seite sind Informationen zu den nationalen Lösungen der jeweiligen Mitgliedsländer zu finden. Einen zentralen europäischen nationalen Zugangspunkt gibt es nicht. Vielmehr wird angestrebt, die Datenformate der einzelnen Zugangspunkte so weit zu vereinheitlichen, dass ein Austausch zwischen den Plattformen ermöglicht wird. Für Deutschland liegt die Verantwortung für Organisation und Betrieb des nationalen Zugangspunktes bei der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Sie stellt die Mobilithek (o. A. 2023b), welche den MDM (o. A. 2023a) ablöst, zur Verfügung. Dies ermöglicht eine Anbindung an andere Datenräume, die auch dieser Konvention folgen. Mittels der technischen Systembeschreibung der Mobilithek (BMDV 2022) wird eine Informationsbasis zu dem System bereitgestellt. Bild 7 zeigt die Bestandteile der Mobilithek in einer schematischen Darstellung sowie ihre Interaktionen untereinander. Informationslieferanten sind aus Sicht der Mobilithek die Datengeber, Interessenten der Informationen die Datennehmer. Datengeber und -nehmer müssen sich vor der ersten Verwendung authentifizieren. Diese Aufgabe wird durch die Security-Komponente sichergestellt. Die Datengeber hinterlegen ihr Informationsangebot in dem Metadatenverzeichnis. Dort können die Datennehmer die Metadaten zu den Informationen einsehen. Die Informationen selbst werden über die Brokering-Komponente verarbeitet. Die Datengeber und Datennehmer bauen nach erfolgreicher Registrierung eine Verbindung zu dem Broker auf und können Daten liefern und abrufen. Sowohl Datengeber als auch für die -nehmer steht die Art des Datenaustausches als Pull- oder Push-Nachricht frei.

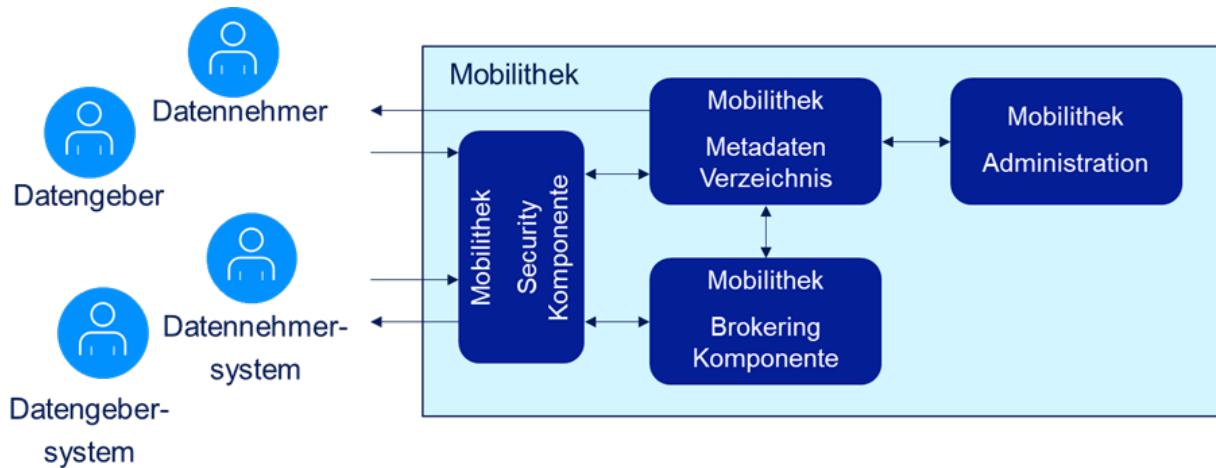


Bild 7. Komponenten der Mobilithek (eigene Darstellung nach (BMDV 2023))

Neben dem Austausch der Daten über den Broker ist auch eine Publikation der Daten durch den Datengeber direkt möglich. In diesem Falle stellt er eine URL bereit, unter der die Daten abzurufen sind. Als Datenformat für den Austausch sind DATEX II (v2 und v3) und weitere vorgesehen. Darüber hinaus können beliebige andere Formate verwendet werden, welche dann über HTTP/REST übermittelt werden. Eine geografische Verteilung der Daten erfolgt nicht durch die Mobilithek, sondern die Datenehmer müssen diesen Schritt über eine Weiterverarbeitung der Daten in einem eigenen Hintergrundsystem realisieren.

Andere partiell öffentliche Lösungen sind unter dem Begriff „Urban Data Access Plattform“ (UDAP) zu finden. Diese Lösungen stellen Mobilitätsdaten über Datenplattformen den Nutzer bereit. In Europa gibt es keine Nationale betriebene UDAP. Vielmehr beauftragen die Staaten einen Anbieter ihnen eine solche Lösung bereit zu stellen. Für die Niederlande hat die Firma Monotch den Auftrag eine solche Plattform bereit zu stellen (its International 2021). Die Konkrete Implementierung erfolgt über die sogenannte TLEX-Plattform welche C-ITS Nachrichten von Anbietern entgegen nimmt und an Interessenten weiterleitet. In den Niederlanden sind 1200 Lichtsignalanlagen an die Plattform angebunden (Ghislaine van Berkomp-Smits 2023). Über die Plattform erfolgt zudem eine Anmeldung von Fahrzeugen, wie Busse oder Einsatzfahrzeuge, bei dem jeweiligen Betreiber der Lichtsignalanlage, um eine Priorisierung zu ermöglichen.

Sonderfall: MEC

Zur Reduzierung von Latenzen, die durch das Routing von Informationen im Internet sowie durch die physikalische Distanz der beteiligten Komponenten entstehen, erfolgt die Platzierung von Cloudrechenzentren immer näher an den Kanten (engl. Edge) des Netzwerks. Eine Möglichkeit zur Platzierung wird durch die Mobilfunkservice-Provider geschaffen, welche Rechenkapazitäten direkt in ihren Kernnetzen (Backbone) zur Verfügung stellen. Diese Rechenumgebung wird als Multi-Access Edge Computing (MEC) bezeichnet. Mittels MEC erfolgt eine Reduzierung der Ende-zu-Ende-Latenz durch die Verringerung der Anzahl der Weitergaben (Hops), die eine Information im Internet erfährt, als auch durch die hohe Systemperformance der Kernnetze der Mobilfunkprovider selbst. Diese Rechenzentren sind sowohl aus dem Mobilfunknetz als auch aus dem öffentlichen Internet erreichbar. Für die Anbindung aus dem öffentlichen Internet heraus sind die üblichen Einschränkungen, wie z. B. Latenzen, weiterhin anzunehmen. (Mao u. a. 2017) Bei dem Vergleich von Ende-

zu-Ende-Latenzen zwischen Datenzentren im Internet (Corneo u. a. 2021) zu denen moderner Mobilfunksysteme fällt auf, dass die Latenzen der Mobilfunksysteme nur einen kleinen Teil der Gesamtlatenz ausmachen. Seitens der ETSI gibt es Bestrebungen für die Nutzung von MEC, standardisierte Strukturen und festgelegte Protokolle zum Datenaustausch zwischen den Strukturen zu schaffen (ETSI 2023b).

3.3.4 Protokolle und Datenformate

In der Langbereichskommunikation gibt es keine festgelegten Protokolle und Datenformate für die Umsetzung von C-ITS-Diensten. EU-weite Standards sind oder eine von der Industrie akzeptierte Lösung ist nicht vorhanden. Seitens einzelner Akteure bzw. im Rahmen der nationalen Zugangspunkte gibt es Lösungen, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird. Es kommen in der Regel Protokolle zum Einsatz, die im ISO/OSI-Referenzmodell (ITU 1994) einzuordnen sind und die klassischen Protokolle der Internetkommunikation nutzen. So setzt beispielsweise die C-Roads-Plattform einen AMQP-Broker für eine IP-basierte Verteilung von C-ITS-Nachrichten ein. Auf den darunterliegenden Schichten wird TCP und IPv4 verwendet. Mittels des Basic Interface (BI) wird der Informationsaustausch zwischen den C-ITS-Stations (C-ITS-S) geregelt. Zunächst erfolgt eine Authentifizierung der einzelnen Akteure. Im Anschluss erfolgt eine Bekanntmachung von Datenangebot und -bedarf. Diese Bekanntmachung enthält über ein Metadatenformat Informationen zu den Datenangeboten und deren Lokalisierung, die einzelnen Aktoren das Filtern ermöglicht. Der eigentliche Nutzdatenaustausch erfolgt über ein JSON-Schema, welches neben den Nutzdaten wiederum selbst definierte Metadaten enthält. Die C-ITS-Nachrichten werden als hexadezimaler Payload vom Application Layer (siehe Bild 1) bis zum Geo-Networking samt Signatur übertragen. Die C-ITS-Trust-Domain bleibt bei diesem Vorgehen erhalten (C-Roads 2023). Innerhalb der Mobiltheke werden als Datenformate Datex II, OCIT-C oder eigene Formate verwendet (BMDV 2023). Mittels OCIT-C V2.0 ist es partiell möglich, C-ITS-Nachrichten in einer ODG-eigenen XML-Repräsentation zu übertragen (ODG und Partner, 2018). Da ausschließlich eine ODG-spezifische Repräsentation der Nachricht ohne Metainformationen außerhalb der C-ITS-Trust-Domain übertragen wird, ist deren Nutzung für C-ITS-Zwecke im zeitkritischen und vertrauensvollen Kontext nicht möglich. Für diesen Anwendungszweck ist die Mobiltheke zudem auch nicht vorgesehen.

3.4 Gegenüberstellung der Kommunikationstechnologien

3.4.1 Gegenüberstellung der Nahbereichskommunikationstechnologien

Es werden die Technologien ITS-G5 und LTE-V2X anhand der in Kapitel 3.1 vorgestellten Kriterien miteinander gegenübergestellt. Auf einen Vergleich von ITSG5 Rel.2 (IEEE 802.11 bd) mit 5G NR V2X wird bewusst verzichtet, da weder praktische Ergebnisse und Erfahrungen verfügbar sind, noch lassen die Standards einen großen Spielraum bei der Parametrierung zu. Außerdem fehlt innerhalb der EU ein analog zu ITS-G5 und LTE-V2X festgelegter Parametersatz, um so einen Vergleich belastbar zu machen.

T: Bandbreite und Datenrate

Die in der Nahbereichskommunikation zur Verfügung stehenden Bandbreiten und Datenraten werden durch drei wesentliche Stellgrößen bestimmt: 1. Kanalbandbreite (in der EU weit auf 10MHz festgelegt (siehe Kapitel 3.2.2)), 2. Modulationsart und 3. Kodierung. Sowohl für ITS-G5 als auch für LTE-V2X stehen verschiedene Kombinationen von

Modulationen und Kodierungen, sogenannte Modulation and Coding Scheme (MCS), zur Verfügung. LTE-V2X kennt gegenüber ITS-G5 eine größere Auswahl an MCS und kann diese dynamisch während der Übertragung anpassen (ETSI 2020a, 2020b). Aufgrund der verringerten Empfangsreichweite bei einer hohen Modulation und geringen Kodierungsrate sowie der Eigenschaft, dass bei der verbindungslosen Kommunikation kein bzw. nur ein eingeschränktes Wissen über die Position der Kommunikationspartner besteht, wird bei der Nutzung von LTE-V2X empfohlen, eine feste MCS-Einstellung zu wählen. Die Datenrate des empfohlenen MCS liegt dabei ähnlich der von ITS-G5. (Burbano-Abril u. a. 2021) LTE-V2X und ITS-G5 sind vom Gesichtspunkt der Datenrate unter der Berücksichtigung der derzeit gewählten Parameter in der EU als nahezu gleichwertig anzusehen.

T: Latenz (Ende-zu-Ende)

Die Bestimmung der Ende-zu-Ende-Latenz (E2E-Latenz), ist von unterschiedlichen Faktoren abhängig. Beispielsweise fließt der MCS in Verbindung mit der Länge der Nachricht in die Betrachtung ein; berücksichtigt wird außerdem, ob die Nachricht periodisch versendet wird und ob ihre Größe schwankt. Besonders für LTE-V2X ist dies von Bedeutung, da die Ressourcen vor der Verwendung allokiert werden müssen. In (De Ponte Müller u. a. 2021) und (Maglogiannis u. a. 2021) wird die Latenz beider Technologien anhand der ETSI-CAMs in realen Umgebungen mittels Messungen verglichen. In beiden Untersuchungen zeigen vergleichbare Ergebnisse, dass die Latenz von ITS-G5 konstant unterhalb von 10 Millisekunden liegt, während sie bei LTE-V2X im Mittel über 25 Millisekunden beträgt und ihre Varianz größer ist. ITS-G5 ist LTE-V2X hinsichtlich der technologischen E2E-Latenz überlegen.

T: Reichweite und Zuverlässigkeit

Hinsichtlich Reichweite und Zuverlässigkeit zeigt LTE-V2X im Rahmen von Simulationsstudien häufig bessere Ergebnisse als ITS-G5 (Anwar u. a. 2019; Roux u. a. 2019), obwohl Studien mit anderen Simulationssetups zu einem gegensätzlichen Ergebnis kommen (Shimizu u. a. 2019). Im Rahmen einer Untersuchung mit realen Verteilungen der Nachrichtengeneration (gemäß der CAM Generation Rules und einem realen Verhalten des Nutzers) wurde festgestellt, dass bei hohen Kanalauslastungen ITS-G5 robuster arbeitet als LTE-V2X (Molina-Masegosa u. a. 2020). Im Hinblick auf die Zuverlässigkeit sind zudem zwei weitere Besonderheiten bei LTE-V2X zu berücksichtigen, die aus dem Kanalzugriffsverfahren resultieren. Wie in Kapitel 3.2.3 zu LTE-V2X dargestellt wurde, arbeitet das Verfahren mit einem Raster aus Zeit- und Frequenzressourcen. Dies ermöglicht den Half-Duplex-Betrieb, d. h. der Sender kann den Kanal belegen, während eine andere Station zur gleichen Zeit andere Frequenzressourcen belegt. Aufgrund dessen, dass eine Station zur gleichen Zeit entweder sendet oder empfängt, müssen die Nachrichten zu unterschiedlichen Zeitpunkten mehrfach gesendet werden und so evtl. auftretende Störungen zu mindern. (Gonzalez-Martín u. a. 2019) Dies ist besonders bei hohen Kanalauslastungen kritisch zu sehen. Die zweite Besonderheit liegt in der hohen Anforderung an zeitlicher Synchronität bei LTE-V2X durch den Half-Duplex-Betrieb. Kommt es zu einer Verschiebung in der Synchronität zwischen den ITS-S lassen sich die zeitlichen Raster der Ressourcen, wie in Bild 4 gezeigt wurde, nicht einhalten. Dann kommt es zu fehlerhaften Übertragungen (Filippi u. a. 2017). ITS-G5 ist hinsichtlich der Synchronität robuster, da die Informationen als ein geschlossenes Paket auf dem Kanal gesendet werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass LTE-V2X hinsichtlich Reichweite und Zuverlässigkeit geringfügig besser als ITS-G5 ist. Jedoch wird dieser Vorteil durch die Nachteile

des mehrfachen Sendens und der hohen Anforderung an die Synchronität wieder relativiert. Ein klarer Vorteil ist somit keiner Technologie zuzusprechen.

T: Einbindung von VRUs

Zum jetzigen Zeitpunkt stehen weder ITS-G5 noch LTE-V2X in Smartphones direkt zur Verfügung, um VRUs in C-ITS einzubeziehen. Somit ist für eine aktive Kommunikation zwischen VRUs und vernetzten Fahrzeugen bzw. einer vernetzten Infrastruktur ein zusätzliches Gerät oder die Kommunikation über das Mobilfunknetz erforderlich. Konkrete Ankündigungen, den Nahbereichsfunk nach ITS-G5, LTE-V2X und deren Nachfolger in Smartphones zu etablieren, gibt es derzeit nicht. Im Rahmen der LTE-V2X-PC5-Standardisierung wird regelmäßig auf die Nähe des Standards zum klassischen Mobilfunk (uU Interface) hingewiesen, womit die Integration in einem Chip erleichtert werden soll (Ziegłowski und Kinkel 2020). Aufgrund der Nähe von IEEE 802.11p zu klassischen Protokollen der IEEE 802.11-Familie, ist eine Adaption des WiFi-Chips nicht ausgeschlossen; sie wurde sogar prototypisch umgesetzt (Bloessl u. a. 2017). Da bisher keine konkrete Umsetzung am Markt verfügbar ist, ist davon auszugehen, dass andere Gründe als die reine Integration des Access-Layers in Smartphones den Markteintritt verhindern. Mögliche Gründe könnten beispielsweise in den Randbedingungen, die von einem Gerät im ITS-Bereich gefordert werden (z. B. Integration eines „Hardware Security Moduls“ (HSM), Anforderungen an die Datenqualität, insbesondere die verfügbare Positionsqualität in Kapitel 4.1, Anforderungen an das Einhalten einer Spektrumsmaske, Einfluss auf die Akkulaufzeit des Smartphones) zu finden sein.

LTE-V2X ist daher ein minimaler Vorteil gegenüber ITS-G5 aufgrund der besseren Integration in dem Consumerchip-Bereich einzuräumen.

T: Interoperabilität

Anhand Bild 5 kann festgestellt werden, dass 3GPP-Kommunikationstechnologien ausschließlich zu sich selbst kompatibel sind. Seitens der EU wird von neuen Technologien im ITS-Band verlangt, dass diese Bestandslösungen nicht einschränken oder stören. Konkret bedeutet das, dass die im Serieneinsatz befindliche ITS-G5-Technologie nicht durch eine Ausrüstung von ITS-S mit LTE-V2X gestört werden darf. Ohne Anpassungen an dem Standard ist dies aber nicht möglich. Eine Trennung der Technologien im Frequenzbereich des ITS-Bands, was z. B. durch 3GPP-nahe Lobbygruppen angestrebt wird (5GAA 2021), wird jedoch durch Organisationen wie das C2C-CC (CAR 2 CAR Communication Consortium 2017) und der aktuellen Regulierung durch die CEPT abgelehnt (Durepaire 2021). Einer zeitnahen Einführung von Technologien, die unter der 3GPP-Standardisierung stehen, wirkt dies entgegen, was als Nachteil für diese Technologiegruppe angesehen werden kann.

T: Energiebedarf

Hinsichtlich des Energiebedarfs konnten keine belastbaren Publikationen im Bereich von ITS-S oder den jeweiligen Unterschieden zwischen ITS-G5 und LTE-V2X identifiziert werden. Bei Messungen des Energiebedarfs spielen eine Vielzahl von Einflussgrößen eine Rolle, z. B. Temperatur, Netzwerklast der drahtlosen Schnittstellen, generelle Systemauslastung. Standardisierte Verfahren zur Messung des Energiebedarfs für ITS-S gibt es nicht. Der Energiebedarf hatte bisher keinen großen Einfluss bei der Betrachtung von ITS-S. In motorisierten Fahrzeugen steht ITS-S eine zuverlässige Spannungsquelle zur Verfügung. Zudem ist der Energiebedarf des Gerätes im Hinblick auf die Gesamtbilanz in der Regel hinreichend klein, dass eine genaue Betrachtung nicht nötig ist. Es ist anzunehmen, dass

auch innerhalb ITS-S die Unterschiede in der Leistungsaufnahme von unterschiedlichen Access-Layers-Technologien eine untergeordnete Rolle in der Gesamtbilanz spielt.

W: Marktreife

Sowohl für ITS-G5 als auch für LTE-V2X stehen ITS-S und Chips für eine Markteinführung zur Verfügung. Beide Standards wurden in der Praxis getestet. Durch die längere Verfügbarkeit von ITS-G5 ist die Testtiefe gegenüber LTE-V2X deutlich höher. Für ITS-G5 existieren Profile, die bereits zwischen verschiedenen Herstellern und Betreibern getestet wurden. Diese Profile stellen unter anderem sicher, dass die Parametrierung interoperabel ist. LTE-V2X ist an dieser Stelle noch nicht so reif wie ITS-G5. Zudem bestehen für den Einsatz von LTE-V2X in der EU noch offene regulatorische Fragen. (Audegond 2022)
ITS-G5 ist LTE-V2X überlegen.

W: Marktdurchdringung

In Europa gibt es außer im Rahmen von Forschungsprojekten keinen LTE-V2X-Rollout. Konkrete Ankündigungen seitens der Industrie für einen Rollout in Europa konnten nicht identifiziert werden. Dagegen befindet sich ITS-G5 bei Volkswagen bereits in Serienanwendung. Die Modelle Golf 8, ID.3, ID.4, ID.5, ID.7, ID.BUZZ sind standardmäßig mit der Technologie ausgestattet. Im Volkswagen VW T7 ist es als Sonderausstattung verfügbar. (Fritz 2023) Die neuen VW-Modelle Tiguan und Passat sind ebenfalls mit V2X als Standard ausgestattet (Schönfeld u. a. 2023). Seitens der Infrastruktur rüsten die Autobahn GmbH und die ASFINAG Sperranhänger als auch Einheiten an der Strecke aus. Innerhalb von deutschen Städten sind in Hamburg und Kassel mehrere Road Side Units (RSUs) vorhanden, die über den Testfeldeinsatz hinausgehen. Eine Übersicht über die Anzahl der Anlagen in beiden Städten ist über den TENCtec Interactive Map Viewer² mit dem ITS-Layer zu sehen. Da eine Registrierung der C-ITS-S auf dem Viewer durch den Betreiber der Station erfolgt und die Karte nicht jedem Betreiber bekannt ist, besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit. Hamburg und Kassel sowie weitere Städte setzen zukünftig ihre Priorisierung vom öffentlichen Nahverkehr mittels ITS-G5 um. Ankündigungen, LTE-V2X zu nutzen, konnten nicht identifiziert werden. ITS-G5 ist somit LTE-V2X in der EU überlegen.

W: Zukunftsreife

Die Zukunftsreife einer Technologie ergibt sich aus zwei wesentlichen Aspekten:

1. Zukunftsweg der Technologie
2. Nutzer, die die Technologie heute und zukünftig einsetzen

Die Zukunftswege der Technologien wurden im Kapitel 3.2.3 beschrieben. ITS-G5 hat mit dem ITS-G5 Rel.2 mit der Nutzung von IEEE 802.11bd einen vollständig interoperablen Nachfolger. Stationen, die zukünftig mit IEEE 802.11bd ausgerollt werden, können weiterhin mit allen ITS-G5-Stationen über den Legacy-Mode kommunizieren. Die Standards aus der Gruppe der 3GPP-Familie sind untereinander weder kompatibel noch interoperabel. LTE-V2X und 5G-NR-V2X können nicht miteinander kommunizieren und können nicht im gleichen Frequenzband eingesetzt werden. Gerade im Bereich der Infrastruktur ist eine Abwärtskompatibilität vorteilhaft. Die C-Roads-Pilotprojekte zeigen, dass die Ausrüstung von Lichtsignalanlagen für eine Stadt eine längerfristige Aufgabe ist. Es ist nicht zu

² <https://ec.europa.eu/transport/infrastructure/tentec/tentec-portal/map/maps.html>, letzter Abruf: 28.08.2024

erwarten, dass ein schneller Wechsel der C-ITS-S erfolgt, sobald eine neue Technologie in den Markt kommt.

Seitens einer technologischen Nutzung wurde innerhalb der EU ein neutraler Weg gewählt. Aktuell gibt es ausschließlich eine Ausstattung mit ITS-G5. Ankündigungen, LTE-V2X auszurollen, konnten nicht identifiziert werden. 5G-NR-V2X wird seitens einiger OEM jedoch als Technologie für zukünftige Anwendungen in Betracht gezogen (5GAA 2023b). In den USA gibt es eine regulatorische Entscheidung hin zu Technologien der 3GPP-Famiele für die Nahbereichskommunikation (FCC 2023). In China wird ebenfalls auf C-V2X in der Nahbereichskommunikation gesetzt (5GAA 2022).

Vom Gesichtspunkt der Interoperabilität zukünftiger Lösungen ausgesehen, ist die IEEE 802.11-Familie der 3GPP-Famile überlegen. Hinsichtlich der weltweiten Tendenzen einer Ausstattung von Fahrzeugen und Infrastrukturen ist die Situation genau umgekehrt. Aus diesem Grund kann keine Aussage zur Zukunftsreife gegeben werden.

P: Kompatibilität mit Urban-Rail-ITS

Die EU gibt ein Regelwerk vor, welches ITS-S verbindlich einzuhalten haben. Dieses ist im ETSI-Standard EN 302 571 (ETSI 2017) definiert, der entsprechende technische Maßnahmen vorschreibt, um Störungen auf ein Minimum zu reduzieren. Allerdings sind diese technischen Maßnahmen praktisch ausschließlich bei einer Nutzung von ITS-G5 anwendbar. Eine Lösung für LTE-V2X-basierte Systeme existiert noch nicht. Dies steht einer Nutzung von LTE-V2X in der EU entgegen.

3.4.2 Gegenüberstellung von Nahbereichs- und Langbereichskommunikation

Eine objektive Gegenüberstellung von Nahbereichs- und Langbereichskommunikation ist, wie in Kapitel 3.3.1 dargestellt, aufgrund der unterschiedlichen Architekturen und Vielzahl von Lösungsmöglichkeiten im backendbasierten Bereich schwierig. Für die Vergleichbarkeit müsste eine Reihe von Annahmen gemacht werden, welche nur spezifische Lösungen betrachten. Daher wird in dieser Studie auf eine Betrachtung vergleichbar zu Kapitel 3.4.1 verzichtet und stattdessen die Unterschiede beider Technologien und ihre Vor- und Nachteile diskutiert. Es wird ausschließlich die mobilfunkbasierte Kommunikation betrachtet.

Grundsätzlich stehen dem Nutzer in der Langbereichskommunikation mehr **Bandbreite und Datenrate** zur Verfügung als in der Nahbereichskommunikation. Jedoch sind die Bandbreiten und Datenraten nicht für den konkreten Anwendungsbereich der C-ITS-Systeme reserviert und müssen zwischen allen Nutzern aufgeteilt werden. Moderne 5G-Netze haben zwar grundsätzlich die Möglichkeit, Spektren für dedizierte Bereiche zu reservieren, aber es ist derzeit nicht absehbar, welche Kosten entstehen und wie das operativ erfolgen kann.

Die **Latenz** wird größer sein als bei der Nahbereichskommunikation und hängt stark von der konkreten Umsetzung ab. Vor allem die Anzahl und Performance der Entitäten im Internet wird den Großteil der Gesamtlatenz bestimmen. In dem Artikel (Corneo u. a. 2021) wird untersucht, mit welcher Round-Trip-Time (RTT) große Cloudanbieter aus unterschiedlichen Teilen der Welt erreichbar sind; in Europa und den USA sind das in der Regel weniger als 50 Millisekunden. Die Schwankung ist jedoch deutlich größer als bei der Nahbereichskommunikation, und es sind nur wenige Entitäten beteiligt. Eine Latenzreduktion ist weiterhin mittels Edge Cloud zwar möglich, inwieweit aber eine Einbindung einer Edge Cloud direkt in die Infrastruktur oder das Fahrzeug realisierbar ist, ist aus Sicht der IT-Sicherheit kritisch zu sehen. Gerade im Bereich kritischer Infrastrukturen, zu der die

Verkehrsinfrastruktur zählt, stellt die Edge Cloud einen weiteren Zugangspunkt zum System dar, der entweder über die zentrale Firewall des Betreibers geroutet wird und dann seine latenzverringende Wirkung verliert oder diese umgeht und somit eine potenziell unsichere Schnittstelle zur IT-Infrastruktur schafft.

Bei der **Reichweite** ist die Langbereichs- der Nahbereichskommunikation durch das Hintergrundnetz zum Routen von Informationen überlegen. In Anwendungsfällen, in denen ein großer zeitlicher Vorlauf benötigt wird, z. B. das Freiräumen von Kreuzungen, stößt der Nahbereichsfunk an seine Grenzen. Mittels Hopping zwischen den Stationen kann dieser erweitert werden, jedoch ist dafür stets ein Hopping-Partner nötig. Für zeitkritische Anwendungen im C-ITS Kontext ist zu hinterfragen, ob eine höhere Reichweite als im 5,9-GHz-Band mit der Nahbereichskommunikation realistisch erreichbar ist, benötigt wird. Die **Zuverlässigkeit** wird im Wesentlichen durch die Verwendung der Protokolle und der Netzabdeckung bestimmt. Verbindungsorientierte Protokolle, wie z. B. TCP, stellen eine Übertragung sicher, solange der grundlegende Kommunikationskanal verfügbar ist. Jedoch ergibt sich ein negativer Einfluss auf die Latenz bei dieser Art von Protokollen.

Hinsichtlich der **Einbindung von VRUs** hat die Langbereichskommunikation bezogen auf die Funktechnologie den Vorteil, dass viele VRUs bereits Smartphones nutzen und heute schon Teil des Kommunikationssystems sind.

Hinsichtlich der **Interoperabilität** für die mobilfunkbasierte Langbereichskommunikation ist keine Betrachtung nötig, da diese mit dedizierten Frequenzbereichen arbeitet, die jeweils einem Anbieter exklusiv zur Verfügung stehen. Bei der Nutzung von Edge Clouds, welche anbieterübergreifend unterstützen sollen, ist das Routing der Informationen eine offene Frage. Sobald ein Routing über das Internet erfolgt, ist mit einer zusätzlichen Latenz zu rechnen. Zudem ist es wichtig, dass die Edge Clouds unterschiedlicher Anbieter auch auf der Informationsebene standardisierte Nachrichten verwenden, damit sie interoperabel sind.

Bei der Betrachtung des **Energiebedarfs** kann davon ausgegangen werden, dass zwischen einem externen ITS-S-Gerät der Nahbereichskommunikation und einem dedizierten, mobilfunkbasierten Zusatzgerät oder Smartphone keine erheblichen Unterschiede auftreten, wenn die gleiche Funktionsweise der Applikation (gleiche Updatefrequenz der Nachrichten und internen Berechnungen) betrachtet wird. Für Anwendungen, die eine andere Funktionsweise haben, wie z. B. eine Backendanwendung, die die gesamte Komplexität der Berechnungen übernimmt und ausschließlich die Kommunikationspartner beim Auftreten eines relevanten Ereignisses informiert, kann der Energiebedarf deutlich reduziert werden.

Marktreife und **Marktdurchdringung** sind von zwei Seiten aus zu betrachten. Einerseits handelt es sich um die technologische Marktreife, welche bei mobilfunkbasierten Systemen gegeben ist und durch die große Anzahl an Nutzern seitens der Chiphersteller/Infrastrukturanbieter und Mobilfunkprovider kontinuierlich vorangetrieben wird. Andererseits handelt es sich um ein Ökosystem mit definierten Schnittstellen, Protokollen und Vertrauensräumen, welche weitestgehend fehlen. C-Roads Hybrid (C-Roads 2023) könnte ein mögliches Ökosystem sein, welches jedoch derzeit keine Anwender hat, und da es nur innerhalb der C-Roads-Plattform getragen wird, als projektspezifische Lösung zu sehen ist. Solche proprietären Ökosysteme erzielen nur dann einen Vorteil, wenn diese von allen Nutzern verwendet werden und ein De-facto-Standard entsteht. Ein De-facto-Standard ist bei sicherheitskritischen Systemen problematisch, da dieser sich über einen längeren Zeitraum etablieren muss und keine verlässliche Entwicklungsgrundlage darstellt. Neben der

C-Roads-Hybrid-Lösung wird die TLEX-Plattform von Monotch in den Niederlanden, Dänemark, Schweden, Norwegen und Finnland eingesetzt (Monotch 2021). In den skandinavischen Ländern erfolgt der Einsatz über das Nordic-Way-3-Projekt. In den Niederlanden erfolgt der Betrieb über einen staatlichen Auftrag für die Umsetzung der UDAP. Über die Plattform erfolgt ein Datenaustausch mit C-ITS-Nachrichten. In den Niederlanden sind, wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben wurde, bereits 1200 Lichtsignalanlagen angebunden. Im Gegensatz zur C-Roads-Hybrid-Lösung ist zu erwähnen, dass die TLEX-Plattform kommerziell betrieben wird und keine öffentliche sowie frei zugängliche Plattform/ein offenes Netzwerk darstellt.

Die **Kompatibilität mit Urban-Rail-ITS** ist – ähnlich wie die Interoperabilität für die Langbereichskommunikation – aufgrund der getrennten Frequenzspektren unproblematisch. Ein weiteres Entscheidungskriterium betrifft die **Datenschutzaspekte**. Bei der Nahbereichskommunikation ist dies in der Regel unkritisch, da die Informationen nur den Kommunikationsteilnehmern lokal vor Ort zur Verfügung stehen. Bei der Langbereichskommunikation liegen die Daten in einem Backend-System vor und werden von diesem verteilt, sodass grundsätzlich die Gefahr eines massenhaften Abgriffs und einer vollständigen Rekonstruktion von Trajektorien besteht; entsprechende Datenschutzmaßnahmen sind daher durch den Betreiber der Plattform vorzusehen. Ereignisbasierte Informationen, z. B. DENM-Nachrichten, sind deutlich unkritischer zu sehen als Individualinformationen, wie z. B. über CAMs.

4 Kommunikationsunabhängige Herausforderungen für die ADAS-Entwicklung zum Schutz von Fahrradfahrenden

Neben den dargestellten technologiebedingten Herausforderungen gibt es zusätzliche, Kommunikationstechnologie unabhängige Herausforderungen, um Fahrräder und andere Verkehrsteilnehmer mit besonderem Schutzbedarf in die C-ITS-Domäne zu integrieren. Diese Punkte werden im Folgenden erläutert.

4.1 Position und Zeit

Positionsangaben in C-ITS-Nachrichten benötigen immer einen Referenzpunkt in einem global gültigen Bezugsrahmen. Möglichst genaue Angaben zu Positionen sind notwendig, um die in den Nachrichten beschriebenen Objekte in räumlichen Bezug zueinander zu setzen. Als konkreten Rahmen hat sich C2C-CC auf G1150 (als Realisierung des WGS84 Koordinatensystems) als minimale Anforderung festgelegt, da in ETSI nur das Format, aber nicht der zu nutzende Rahmen definiert ist. (CAR 2 CAR Communication Consortium 2023b; ETSI 2023a)

Alternativ lassen sich Objekte auch durch relative Abstände zu einem präzisen, bekannten Referenzpunkt beschreiben, allerdings sind diese Punkte bisher nicht verfügbar. Die Fahrzeuge bestimmen derzeit ihre absoluten Positionen fortlaufend selbst; dieser Prozess ist jedoch fehlerbehaftet. Die Größe des Fehlers wird über eine Konfidenzellipse beschrieben. Je größer die Ellipse ist, desto größer ist der Raum, in dem sich die tatsächliche Position des Fahrzeugs befindet und desto unsicherer ist die Positionsschätzung. Die Ortung mittels präziser Referenzpunkte stellt hohe Ansprüche an die Verortung der Referenzpunkte und die Abstandsermittlung zu diesen. Für die Bestimmung der relativen Abstände zu einem Referenzpunkt sind in der Regel weitere Sensoren notwendig, die an einem Fahrrad vorhanden sein und betrieben werden müssten. Im städtischen Raum sind auch Road Side Units an Lichtsignalanlagen oder (Wechsel-)Verkehrszeichen als Referenzpunkte denkbar. Allerdings sind diese noch nicht flächendeckend verfügbar. Aus diesen Gründen wird für Fahrräder eine absolute Ortung über ein GNSS-Verfahren in Frage kommen, analog wie für alle anderen C-ITS-Teilnehmer auch.

GNSS basiert auf einer Anzahl von zeitlich synchronisierten Satelliten im Orbit. Diese senden fortlaufend Signale, die es den Empfängern auf der Erde ermöglichen, die Position des Satelliten auf seiner Bahn zu ermitteln. Aus den bekannten Positionen zu mehreren Satelliten und den ermittelten Laufzeiten der Signale lässt sich dann eine absolute Position auf

der Erde errechnen. Dieses Verfahren funktioniert nur, wenn die Satelliten alle hochgenau zeitsynchron sind. Als Nebeneffekt liefert diese Art der Positionsberechnung aber auch eine hochgenaue Zeitinformation für die Empfänger, die sogenannte GPS-Zeit. Um mit GNSS drei unbekannte Koordinaten im Raum (Länge, Breite und Höhe) sowie eine präzise Zeit zu ermitteln, werden vier Satelliten benötigt. Moderne GNSS-Empfänger können dabei die Informationen verschiedener GNSS nutzen, wie z.B. Navstar GPS, GLONASS oder Galileo, sodass zumeist eine größere Auswahl an möglichen Satelliten zur Verfügung steht. (Kaplan und Hegarty 2017)

Die Güte von Position und Zeit der Empfänger auf der Erde hängt dabei von den Messergebnissen der von den Satelliten gesendeten Signale ab und unterliegt mehreren Faktoren mit unterschiedlichen Einflüssen, z. B.:

- Konstellation der empfangenen Satelliten zueinander: Je enger die ausgewählten Satelliten beieinanderstehen oder je näher sie auf einer gedachten Linie im Orbit liegen, desto schlechter ist das Ergebnis. Durch eine gute Sichtbarkeit der Satelliten am Himmel und geeignete Auswahl lässt sich diese Fehlerquelle reduzieren. In urbanen Räumen und insbesondere in Häuserschluchten ist die Sichtbarkeit der Satelliten am Himmel allerdings durch Bebauung eingeschränkt, weshalb nicht immer optimale Satellitenkonstellationen zur Verfügung stehen. (Kouwenhoven, Timo 2011). Kennzeichen der Satellitenkonstellation und damit der prognostizierten Streuung der Messwerte liefert beispielsweise der sogenannte DOP-Wert (dilution of precision).
- Signalübertragung durch atmosphärische Schichten: Die Signallaufzeitmessung wird durch das Durchlaufen der Signale unterschiedlicher atmosphärischer Medien verfälscht. Die Ionosphäre liefert hier einen maßgeblichen Einfluss. Sie ist eine elektrisch leitfähige Schicht der Erdatmosphäre, deren Leitfähigkeit von der Sonneneinstrahlung über den Tag verändert wird. Das Ausmaß der Fehler kann durch allgemein bekannte Korrekturmodelle reduziert werden. Andere Schichten der Atmosphäre wirken sich ebenfalls auf die Lichtgeschwindigkeit aus, allerdings gibt es für sie keine allgemeingültigen Korrekturmodelle. (Subirana, J. Sanz u. a. 2011a, 2011b)
- Mehrwegeausbreitung: Das Satellitensignal wird dabei von Oberflächen wie beispielsweise Haus- oder Stahlwänden reflektiert (non-line of sight, NLOS). Durch diese Reflexion legt das Signal einen längeren Weg zurück als im Fall einer nicht reflektierten Signalübertragung (line of sight, LOS). Dieser Laufzeitfehler wirkt sich damit auf die tatsächliche Positionsbestimmung aus. Analog zur Satellitenkonstellation ist dieser Einfluss ortsabhängig und kann nicht ohne weiteres korrigiert werden. (Kaplan und Hegarty 2017)

Neben den physikalischen Verschlechterungen des Signals durch Umwelteinflüsse gibt es auch künstliche Störungen der GNSS-Signale. Eine sehr bekannte Störung war die Selective availability (SA) in Navstar GPS. Diese wurde im Jahr 2000 abgeschaltet, kann jedoch jederzeit wieder aktiviert werden. (Karaim u. a. 2018)

Ein wichtiger Punkt bei der Nutzung von GNSS für Fahrräder ist die Antennenposition. Sie ist so zu wählen, dass möglichst große Bereiche des Himmels permanent sichtbar sind und nicht durch das Fahrrad oder den Radfahrenden verdeckt werden. Die Verdeckung durch Häuserschluchten und Mehrwegeausbreitung lässt sich nicht vermeiden, allerdings können Augmentation Systems dazu beitragen, trotzdem ausreichend genaue Positions- und Zeitwerte zu liefern. Es gibt verschiedene Augmentation Systems, mit deren Hilfe eine genauere Position ermittelt werden kann, als wenn ausschließlich die Satellitendaten genutzt werden. Bei allen Augmentation Systems gibt es Bodenstationen, deren Position und Zeit präzise bekannt sind. Diese Stationen können nun für die Satelliten eine Rückwärtsrechnung vornehmen und die Fehler in deren Signallaufzeiten ermitteln. Üblicherweise spricht man in diesem Zusammenhang von differentiellen Systemen, da der GNSS-basierte

Ortungsfehler differentiell durch die Kenntnis des Fehlers an der Bodenstation korrigiert werden kann. Ein GNSS-Empfänger kann mit diesen Korrekturdaten der Bodenstation und den Satellitensignalen seine Position in höherer Genauigkeit bestimmen. Dabei ist zu beachten, dass die Korrekturdaten eine begrenzte räumliche Validität haben. Allgemein gilt, dass je größer der Abstand eines Objektes zur Bodenstation ist, desto größer ist auch der Fehler. In der Regel sind solche Augmentation Systems kostenpflichtig. (Kaplan und Hegarty 2017)

4.2 Dynamikdaten

Neben Position und Zeit sind auch Dynamikdaten für C-ITS-Teilnehmer relevant. Insbesondere die aktuelle Geschwindigkeit und die Fahrtrichtung (Heading) sollten über C-ITS-Nachrichten geteilt werden, ggf. auch Änderungsraten. Hierzu zählen Beschleunigung und insbesondere die Gierrate durch Lenkbewegungen. Diese Werte ermöglichen einem Empfänger eine bessere Prädiktion der aktuellen Bewegung eines Verkehrsteilnehmers in die nahe Zukunft, so dass potentielle Konflikt- oder Unfallsituation vorhergesagt werden können. Eine zuverlässige Erhebung dieser Daten sorgt für einen gewinnbringenden Einsatz von C-ITS und kann die Sicherheit für Radfahrer erhöhen.

Im Gegensatz zu Kfz sind Fahrräder üblicherweise nicht oder mit deutlich weniger Sensoren ausgestattet, so dass kinematische oder gar fahrdynamische Daten nicht oder nur mit zusätzlicher Sensorik am Fahrrad erhoben werden können. Die Geschwindigkeit könnte beispielweise über einen Fahrradacho bezogen werden. Alternativ liegt die Geschwindigkeit in einem GNSS-Empfänger vor. Dieser Ansatz hätte den Vorteil, dass auch ein Heading aus den GNSS-Daten ermittelt werden kann. Jedoch ist bei einer sehr langsamen Fahrt die Bestimmung des Headings über die GNSS-Daten fehlerbehaftet, so dass sich eine Kombination mit einer Inertialsensorik empfiehlt. Je nach Qualität des GNSS-Empfängers stehen noch interne Daten aus einer Inertialsensorik zur Verfügung. Das Heading über einen magnetischen Kompass zu bestimmen, ist nicht ausreichend, da sich der magnetische und der Nordpol nach WGS84 unterscheiden und eine Korrektur erfordern (Langley 2003). Ebenfalls unterliegt der magnetische Kompass ortsabhängigen Einflüssen, die zu berücksichtigen wären. Die Änderungsraten der Geschwindigkeit (und des Headings) ließen sich ebenfalls über GNSS ermitteln, wären jedoch zeitverzögert, da eine zweifache Differentiation der Positionen über die Zeit erfolgt. Eine inertielle Messeinheit (IMU) misst die Dreh- und Änderungsraten der drei Raumdimensionen direkt und kann genauere Ergebnisse mit weniger Zeitverzug liefern. Da die Dynamik von Fahrrädern im Vergleich zu Kfz recht hoch sein kann, ist eine Messmethode mit minimalem Zeitverzug zu bevorzugen, um den anderen Verkehrsteilnehmern möglichst realitätsnahe Werte für ihre Situationsbewertung zu liefern (Twaddle u. a. 2014).

Weitere relevante Informationen können die geplante, zukünftige Trajektorie und die aktuell vom Fahrrad genutzte Spur oder Art der Spur sein. Die Information zur Spur kann durch andere C-ITS-Teilnehmer auf ihre Kartendaten gemappt werden. So kann der Ort des Radfahrenden und dessen Erreichbarkeit besser bestimmt werden. Ist beispielsweise der Radfahrende auf einem baulich getrennten Radweg unterwegs, kann die Situation anders behandelt werden, als wenn der Radfahrende auf der Fahrbahn fährt wie Kfz. Die Ermittlung der genauen Art der Spur in einer harmonisierten C-ITS-Anwendung, bei der die Verkehrsteilnehmer jedoch nicht die gleiche Datenbasis teilen, ist eine anspruchsvolle Aufgabe, die unter anderem in (CAR 2 CAR Communication Consortium 2023c) adressiert wird und zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vollständig im C-ITS-Kontext nutzbar ist.

4.3 Antennenposition und Sendecharakteristik

Neben der Festlegung der GNSS-Antennenposition ist auch eine geeignete Position für die Kommunikationsantenne zu wählen, sodass möglichst wenig Abdeckung durch das Fahrrad oder den Radfahrer erfolgt. Die Antenne sollte in alle Richtungen der Ebene gleichmäßig ausstrahlen, um auch alle anderen Verkehrsteilnehmer in der Nähe zu erreichen. Die relevanten Informationen über den Radfahrer (siehe Kapitel 3.2) kann sowohl für Verkehrsteilnehmer vor, hinter oder seitlich vom Radfahrer relevant sein. Antennen mit starker Richtwirkung in eine Abstrahlungsrichtung können sich hierbei nachteilig gegenüber isotrop-strahlenden Antennen auswirken. Eine Abstrahlung in die Höhe ist insgesamt dabei weniger relevant, da sich der Verkehr in der Ebene bewegt.

Für die Kommunikation im C-ITS-Bereich wird das 5,9-GHz-Frequenzband genutzt. Die Signale in diesem Frequenzband breiten sich quasi-optisch aus und werden weniger stark gebeugt als es bei niedrigen Frequenzen der Fall ist. Von daher ist eine direkte Sichtverbindung zwischen Sende- und Empfangsantenne zu bevorzugen (d. h. LOS). (Alexander u. a. 2011) Bei NLOS kann über eine Reflexion des Signals an einer Hauswand eine erhöhte Reichweite erreicht werden (Erlacher u. a. 2014). Das kann im städtischen Raum für weitere Herausforderungen sorgen, beispielsweise wenn Radverkehrsinfrastruktur und Fahrbahn durch parkende Fahrzeuge gegenseitig verdeckt sind. Ist die Antenne am Fahrrad zu niedrig angebracht, besteht das Risiko, dass die Nachrichten nicht alle relevanten Verkehrsteilnehmer (rechtzeitig) erreichen, da die parkenden Fahrzeuge die Signalausbreitung beeinflussen oder verhindern. Von daher wäre eine besonders hohe Montageposition am Fahrrad zu bevorzugen, um ggf. über seitliche Hindernisse hinweg mit anderen Verkehrsteilnehmer Informationen auszutauschen.

4.4 Mensch-Maschine-Schnittstelle (HMI)

Mit einem HMI tritt das Assistenzsystem mit dem Nutzer in Interaktion, um Situationsbewusstsein für eine bestimmte Situationen zu erzeugen oder den Nutzer zu einer Reaktion zu bewegen. Grundsätzlich können Maschinen mit dem Nutzer über sensorische (Fühlen), optische (Sehen) oder akustische Verfahren (Hören) in Interaktion treten. (Dahm 2006) Dem HMI als Schnittstelle zum Radfahrer unterliegt eine große Bedeutung bezüglich der Wirkung und Akzeptanz in dem Gesamtsystem (Berge u. a. 2022). In dieser Studie erfolgt keine Umsetzung eines HMI am Fahrrad. Aus diesem Grund wird ausschließlich der Stand der Technik zum HMI am Fahrrad in Kapitel 2 dargestellt.

4.5 Stromversorgung

Der Einsatz von aktiven Sende- und Empfangssystemen setzt voraus, dass die dabei zum Einsatz kommenden Komponenten eine Stromversorgung besitzen. Im motorisierten Fahrzeug ist dies in der Regel über die Stromversorgung mit der Bordelektronik sichergestellt. In der Leistungsbilanz spielen die C-ITS-Geräte eine untergeordnete Rolle gegenüber den anderen Steuergeräten bzw. dem Antriebsstrang. Während bei Motorrädern von einer vergleichbaren Erwartungshaltung wie beim Pkw ausgegangen werden kann, ist für Fahrräder und Passanten eine genauere und differenziertere Betrachtung nötig.

5 Szenariendefinition

Im Rahmen der Szenariendefinition werden die Interaktionsszenarien Dooring (Kapitel 5.1.4), Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342 (Kapitel 5.1.5) und Ausfahrt aus einer Ausfahrt (Kapitel 5.1.6) hinsichtlich ihrer Kritikalität analysiert. Bei dieser Analyse werden der Zeitbedarf für die Vermeidung von Unfällen und die dabei zu berücksichtigende Unfallschwere (auf der Grundlage aktueller Untersuchungen zur Verletzungswahrscheinlichkeit) bestimmt und so die für die Abwendung solcher Unfälle erforderlichen menschlichen und technischen Latenzzeiten abgeleitet.

5.1 Physikalische Beschreibung

Ausgangspunkt sind zwei sich auf Kollisionskurs bewegende Verkehrsbeteiligte – im Folgenden mit 1 und 2 bezeichnet –, von denen mindestens einer ein Radfahrender ist. Der Kollisionspunkt – im Folgenden CP bezeichnet – ist die Kontaktstelle, an der sich beide Verkehrsbeteiligte treffen (Bild 8).

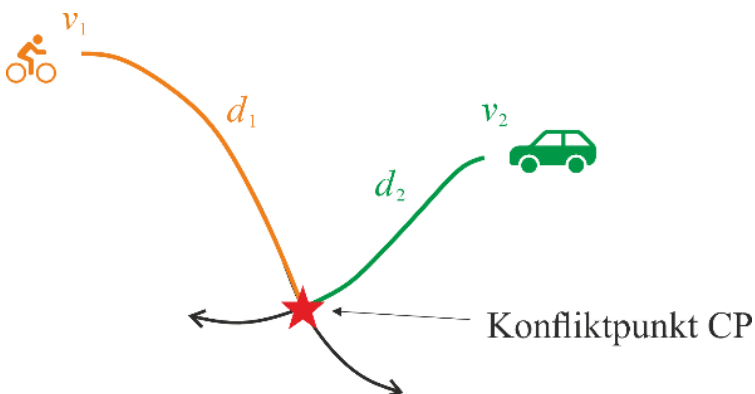


Bild 8. Zwei Verkehrsteilnehmende mit ihren Bewegungspfaden auf Kollisionskurs. Sie haben die Abstände d_1 und d_2 zum Konfliktpunkt CP und bewegen sich mit den Geschwindigkeiten v_1 und v_2

Diese Verkehrsteilnehmer sollen vor einer potentiell gefährlichen Unfallsituation rechtzeitig gewarnt werden. Es wird also angenommen, dass es ein technisches System S gibt, welches solche Situationen erkennen, bewerten und an die Interaktionsbeteiligten kommunizieren kann. S muss also Komponenten der sensorischen Perzeption besitzen, die die Situation erfassen und eine Abschätzung ermöglichen, ob es in den nächsten Sekunden zu einem Unfall kommen kann. Dies wird als technische Latenz t_{proc} bezeichnet; sie fasst alle Verarbeitungsschritte zusammen, die bei der technischen Perzeption auftreten. Das betrifft beispielsweise die technische Objekterkennung, die Schätzung der Bewegungspfade und die Bestimmung des Kollisionsrisikos. So soll S in der Lage sein, ein bestehendes Kollisionsrisiko in geeigneter Art und Weise an die betroffenen Verkehrsteilnehmer zu kommunizieren, vorzugsweise per V2X, beispielsweise als DENM. Diese Latenz wird t_{trans} bezeichnet; sie fasst alle zeitlichen Verzögerungen zusammen, die zwischen Sender und Empfänger auftreten. Neben diesen technischen Latenzen muss mindestens einer der Interaktionsbeteiligten in die Lage versetzt werden, in Form eines Ausweichmanövers zu reagieren. Die Zeit, die dazu nötig ist, ist die Reaktionszeit t_{reac} , die die menschliche sensorische

Erfassung, Perzeption, Auswahl des Ausweichmanövers und motorische Bewegungszeit zusammenfasst. Es ist offensichtlich, dass die Latenzen t_{proc} , t_{trans} und insbesondere t_{reac} niemals gleich, sondern stets größer als null sind.

5.1.1 Zeitbedarfe

Unabhängig von der Charakteristik des zu betrachtenden Verkehrsraumes, befinden sich die Verkehrsteilnehmenden 1 und 2 mit den Distanzen d_1 und d_2 auf eindimensionalen Kurven von CP entfernt. Bewegen sich 1 und 2 mit den Geschwindigkeiten $v_1 \geq 0$ und $v_2 \geq 0$ zum gemeinsamen CP, so gilt für die Zeitdauern $t_{i,exp}$ bis zum Erreichen des CP mit $i = \{1, 2\}$:

$$t_{i,exp}(t) = \frac{d_i(t)}{v_i(t)} \quad (1)$$

$t_{i,exp}$ repräsentiert die zum Zeitpunkt t erwartete Dauer, bis der Verkehrsbeteiligte i den CP erreicht. Aus Übersichtlichkeitsgründen wird der Zeitbezug im Folgenden weggelassen.

Die Summe aller Latenzen, die sich aus der Prozessierung des Kollisionsrisikos, dessen Kommunikation an den/die Empfänger und der individuellen Reaktionszeit des Verkehrsteilnehmers ergibt sich zu:

$$t_{i,lat} = t_{i,proc} + t_{i,trans} + t_{i,reac} \quad (2)$$

Werden alle technischen und menschlichen Latenzen aus Gleichung (2) in Gleichung (1) berücksichtigt, verringert sich die erwartete Dauer bis zum Erreichen von CP zu einer Dauer $t_{i,exp,eff}$ – hier als effektive Dauer bezeichnet:

$$t_{i,exp,eff} = t_{i,exp} - t_{i,lat} \quad (3)$$

Demnach verbleibt dem Verkehrsbeteiligten i die Zeit $t_{i,rem}$ für die Durchführung eines Ausweichmanövers, z. B. Bremsen oder Ausweichen (mit $t_{i,ea}$ als Ausweichzeit zur Vermeidung eines Unfalls, siehe Kapitel 5.1.2):

$$t_{i,rem} = t_{i,exp,eff} - t_{i,ea} \quad (4)$$

Folgende Aussagen können zu den Gleichungen (1) bis (4) getroffen werden:

- $t_{i,exp}$ ist eine Größe, die anhand des Abstandes zum CP, d. h. $d_i(t)$ und der Geschwindigkeit $v_i(t)$, extrapoliert wird.
- Sind d_i und v_i Messgrößen, weisen sie stets Fehler auf, die zu Ungenauigkeiten bei der Bestimmung von $t_{i,exp}$ führen können.
- $t_{i,exp,eff}$ spiegelt die um alle Verarbeitungsschritte reduzierte erwartete Zeit bis Erreichen CP wider, die erforderlich ist, um ein potentielles Kollisionsrisiko zu erkennen und es an die Verkehrsbeteiligten zu kommunizieren.

Eine notwendige, aber nicht hinreichende Bedingung für eine sichere Interaktion liegt vor, wenn

$$t_{i,rem} > 0 \text{ bzw. } t_{i,exp,eff} > t_{i,ea} \quad (5)$$

weil dann sichergestellt werden kann, dass alle technischen und menschlichen Latenzen berücksichtigt wurden. Da Verkehrsteilnehmer eine entsprechende Größe (d.h. Länge,

Breite, Höhe) haben, muss zusätzlich die zeitliche Überlappung zwischen den Verkehrsbeteiligten 1 und 2 am CP berücksichtigt werden, um Warnungen an die relevanten Empfänger zu senden. Das gelingt beispielsweise durch Betrachtung der Differenz der effektiven Dauer zwischen $t_{1,exp,eff}$ und $t_{2,exp,eff}$:

$$DTA = t_{1,exp,eff} - t_{2,exp,eff} \quad (6)$$

Die Größe DTA (difference in time to arrival) (Mohammadi u. a. 2023) beschreibt das Zeitintervall, um das sich beide Verkehrsbeteiligte unter Berücksichtigung der Latenzzeiten t_{lat} , aber ohne Ausweichzeit t_{ea} , verpassen. Mit ihr kann anhand des Vorzeichens identifiziert werden, welcher Interaktionspartner zuerst am CP eingetroffen ist. Wird der Betrag von DTA , also $|DTA|$, als Schwellwert betrachtet, kann er für bestimmte Kritikalitätsmetriken, z. B. PET , mit Werten $PET \leq 2$ s belegt werden, um die Intensität des Verpassens zu quantifizieren (Várhelyi 1998).

Unter Berücksichtigung der Aktionszeit beim Ausweichen der Verkehrsbeteiligten, d.h. $t_{1,ea}$ und $t_{2,ea}$, und Außerachtlassen der Latenzzeiten $t_{1,lat}$ und $t_{2,lat}$ erhält man den folgenden Zusammenhang:

$$|t_{1,rem} - t_{2,rem}| > \varepsilon \quad (7)$$

Dabei stellt ε eine reelle, positive Zahl größer null dar, die quantifiziert, wieviel Zeitdifferenzpuffer für beide Interaktionspartner zur Verfügung stehen soll, um nicht zu kollidieren. Je größer ε , desto sicherer ist eine Interaktionssituation.

5.1.2 Ausweichzeit

Die Ausweichzeit $t_{i,ea}$ ist individuell unterschiedlich und von physikalischen und menschlichen Faktoren abhängig, z. B.:

- Verkehrsteilnehmer haben zwei Möglichkeiten, ein Ausweichmanöver durchzuführen und einen Unfall zu verhindern: (1) Bremsen/Beschleunigen und (2) Ausweichen im Sinne einer Richtungsänderung. Es ist bekannt (Green 2000), dass beim Ausweichen im Falle eines Kfz-Führenden die Ausweichzeit kleiner ist als die Bremszeit, da mehr Zeit benötigt wird, den Fuß auf das Bremspedal zu setzen als zu lenken. Beim Radfahren konnten keine Studien dazu identifiziert werden, die die Zeitbedarfe zum Ausweichen und Bremsen quantifizieren und vergleichen. Es wird aber davon ausgegangen, dass der Zeitbedarf für das Bremsen etwas größer ist als der zum Ausweichen. Obwohl die Bedieneinheiten am Fahrrad bereits in Kontakt zum Körper stehen (Hände am Lenker bzw. Füße am Pedal), muss beim Ausweichen der zurückzulegende Ausweichabstand kompensiert und beim Bremsen die kinetische Energie abgebaut werden. Bei höheren gefahrenen Geschwindigkeiten ist davon auszugehen, dass die Bremszeit zum Stillstand daher höher ist als die Ausweichzeit, und kann damit als kritischerer Zeitbedarf identifiziert werden.
- Die Ausweichzeit ist von Intensität und Dauer der Durchführung des Ausweichmanövers abhängig, die wiederum abhängig sind von den physikalischen Rahmenbedingungen wie Reibwerte zwischen Asphalt und Rad, Wetterbedingungen, aber auch Kraft und Durchführbarkeit des Ausweichmanövers durch den Ausweichenden.

Wird vom Bremsen zum Stillstand als Ausweichmanöver zur Verhinderung eines Unfalls ausgegangen, so können Bremsweg $d_{i,brake}$ und Bremszeit zum Stillstand $t_{i,ea} = t_{i,brake}$ mit der Bremsbeschleunigung $a_{i,brake}$ und der Geschwindigkeit v_i wie folgt bestimmt werden:

$$d_{i,\text{brake}} = \frac{v_i^2}{2a_{i,\text{brake}}} \quad (8)$$

$$t_{i,\text{brake}} = \sqrt{\frac{2d_{i,\text{brake}}}{a_{i,\text{brake}}}} = \frac{v_i}{a_{i,\text{brake}}} \quad (9)$$

Die Bremszeit $t_{i,\text{brake}}$ beschreibt also die Dauer, die für den Bremsvorgang zum Stillstand benötigt wird. Befindet sich Verkehrsteilnehmer 1 auf Kollisionskurs mit Verkehrsteilnehmer 2, dann besteht die Aufgabe aber nicht darin, zum Stillstand zu bremsen, sondern stattdessen die *TTC* (time to collision)³ zu kompensieren, um einen Unfall gerade noch verhindern zu können. Die *TTC* – hier als t_{ttc} bezeichnet – ist wie folgt definiert mit Δv als Differenzgeschwindigkeit der beiden Verkehrsteilnehmer:

$$t_{\text{ttc}} = \frac{d}{\Delta v} \quad (10)$$

Es fällt auf, dass $t_{\text{ttc}} = \infty$, wenn $\Delta v = 0$. In Abhängigkeit von Δv kann t_{ttc} negativ oder positives Vorzeichen aufweisen, je nachdem, welcher der beiden Verkehrsteilnehmer die höhere Geschwindigkeit besitzt. Ist $\Delta v > 0$, so entspricht sie der Zeit, die zur Unfallvermeidung notwendig ist. Je geringer/größer Δv ist, desto mehr/weniger Zeit bleibt zur Unfallvermeidung. Wird angenommen, dass sich die Verkehrsteilnehmer auf Kollisionskurs befinden und auf einer eindimensionalen Kurve auf ihren gemeinsamen CP zubewegen (siehe Bild 8), so können die folgenden Annahmen getroffen werden:

- Bewegen sich die Verkehrsteilnehmer orthogonal zueinander, d. h. $v_1 \perp v_2$, oder steht Verkehrsteilnehmer 1, d. h. $v_1 = 0$, so kann Gleichung (10) wie folgt vereinfacht werden (steht Verkehrsteilnehmer 2, so wird der Index ausgetauscht):

$$t_{2,\text{ttc}} = \frac{d_2}{v_2} = \frac{v_2}{2a_{2,\text{brake}}} = \frac{v}{2a_{\text{brake}}} \quad (11)$$

- Bewegen sich die Verkehrsteilnehmer nicht orthogonal zueinander, sondern fahren aufeinander zu, so addieren sich die Geschwindigkeitsbeträge, d. h. $\Delta v = v_1 + v_2$. Dieser Fall in diesem Bericht nicht weiter betrachtet.

Werden die Gleichungen (9) und (11) miteinander verglichen, so fällt auf, dass $t_{i,\text{ttc}}$ genau halb so groß ist wie $t_{i,\text{brake}}$. Die Ausweichzeit t_{ea} in den Gleichungen (4) und (5) ist durch t_{ttc} zu ersetzen:

$$t_{i,\text{rem}} = t_{i,\text{exp,eff}} - t_{i,\text{ttc}} \quad (12)$$

$$t_{i,\text{rem}} > 0 \text{ bzw. } t_{i,\text{exp,eff}} > t_{i,\text{ttc}} \quad (13)$$

Hinweis: Befinden sich zwei Verkehrsteilnehmer auf Kollisionskurs auf eindimensionalen Kurven zum CP, dann weisen beide dieselbe *TTC* auf, z. B. in Fahrzeugfolgekonfliktsituationen oder beim *Dooring* (siehe Kapitel 5.1.4). Befinden sich die Verkehrsteilnehmer stattdessen in einer Kreuzen-Situation, z. B. beim Rechtsabbiegen kreuzt der eine

³ Die *TTC* beschreibt den Zeitpuffer, der zwei sich auf Kollisionskurs befindenden Verkehrsteilnehmern bleibt, um eine Kollision zu verhindern, wenn nicht mindestens einer der beiden sein Verhalten (z. B. Bremsen) ändert.

Verkehrsteilnehmer den Bewegungspfad des anderen (siehe Kapitel 5.1.5), so können sie zu unterschiedlichen Zeitpunkten am CP eintreffen. Aus diesem Grund wird in den Gleichungen (12) und (13) der Index i mitgeführt und nur dann entfernt, wenn er nicht benötigt wird.

In Bild 9 ist der Zeitbedarf aus Gleichung (11) beispielhaft dargestellt, der ausgehend von einer gefahrenen Geschwindigkeit v (Abszisse) für unterschiedliche Bremsbeschleunigungen resultiert, wenn eine Kollision verhindert werden soll. Wird beispielweise mit $a_{\text{Brake}} = -5,5 \text{ m/s}^2$ aus 40 km/h gebremst, um einen Unfall zu verhindern, dann beträgt $t_{\text{ttc}} \approx 1 \text{ s}$.

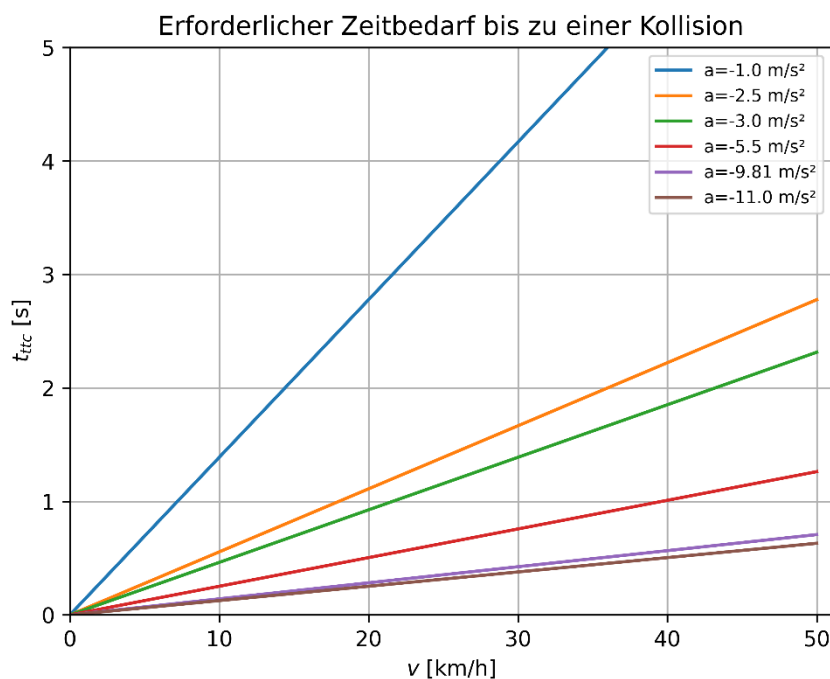


Bild 9. Erforderlicher Zeitbedarf t_{ttc} für unterschiedliche Bremsbeschleunigungen in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit

Zusammengefasst kann festgestellt werden, dass eine höhere Ausgangsgeschwindigkeit zu höheren Ausweichzeiten führt.

Ungenauigkeiten bei der Lokalisierung

Die Genauigkeit der Lokalisierung von Verkehrsteilnehmern oder Objekten im Verkehrsraum ist abhängig von dem zur Anwendung kommenden Lokalisierungs- oder Ortungssystem und den dabei auftretenden beeinflussenden Faktoren (z. B. Mehrwegeausbreitung bei GNSS). Prinzipiell kann die Lokalisierungs- oder Positionsgenauigkeit wie folgt modelliert werden (mit p als wahren und p_{meas} als gemessenem Ort eines Verkehrsobjektes und den Koordinaten x und y sowie deren Abweichungen Δx und Δy):

$$p_{\text{meas}} = p(x + \Delta x, y + \Delta y) \quad (14)$$

Der Fehler bei der Ortskoordinate ergibt sich demnach zu:

$$\Delta p = (\Delta x, \Delta y) \quad (15)$$

Werden zwei interagierende Verkehrsteilnehmer 1 und 2 betrachtet, so treten die Lokalisierungsfehler Δp_1 und Δp_2 auf, die in Relation zueinander bzw. zu einem gemeinsamen Konfliktpunkt gesetzt werden müssen. Demnach ergibt sich durch Berechnung der L₂-Norm $\|\cdot\|_2$ der folgende Zusammenhang mit für die wahren und gemessenen Abstände d und d_{meas} und dem resultierenden Abstandsfehler Δd_i :

$$d = \|p_1 - p_2\|_2 \quad (16)$$

$$d_{\text{meas}} = \|p_{1,\text{meas}} - p_{2,\text{meas}}\|_2 \quad (17)$$

$$\Delta d_i = \|\Delta p_i\|_2 \quad (18)$$

Der maximale Fehler zwischen den beiden Lokalisierungen p_1 und p_2 ergibt sich, indem der tatsächliche Abstand d durch die Messfehler verkürzt oder vergrößert wird:

$$\Delta d_{\text{max}} = \Delta d_1 + \Delta d_2 \quad (19)$$

Die folgenden Aussagen können getroffen werden:

- Der Distanzfehler Δd_i entspricht der resultierenden Distanz bei der Lokalisierung des Verkehrsteilnehmers i . Dieser verkürzt oder vergrößert scheinbar den wahren Abstand d der interagierenden Verkehrsteilnehmer zum CP. Der Distanzfehler Δd_{max} ist der größte anzunehmende Fehler, der insbesondere dann relevant sein kann, wenn die Lokalisierung der Verkehrsteilnehmer unterschiedlich erfolgt.
- Eine Verkürzung bedeutet, dass eine Warnung früher getriggert werden würde, als sie erforderlich wäre. Das könnte zu einer erhöhten Fehlalarmrate eines potentiellen Warnsystems führen.
- Die scheinbare Vergrößerung bedeutet, dass eine Warnung später getriggert werden würde, als sie erforderlich wäre. Das könnte im schlimmsten Fall zu einer erhöhten Anzahl an Unfällen führen.
- Anhand der scheinbaren Verkürzung bzw. Vergrößerung der tatsächlichen Abstände zum Konfliktpunkt wird deutlich, wie präzise die Lokalisierung der Verkehrsteilnehmer erfolgen muss, um Fehlalarme bei einer zu frühen und schwere Unfallfolgen bei einer zu späten Warnung zu vermeiden. Fehlalarme können zu Akzeptanzproblemen führen (Bliss 1993; Wickens u. a. 2009), so dass sich die erhoffte Wirkung eines Warnsystems zur Erhöhung der Verkehrssicherheit in das Gegenteil verkehren kann. Weitaus kritischer sind aber die unmittelbar daraus potentiell resultierenden Unfälle, wenn zu spät gewarnt wird.

Anhand dieser Feststellungen sowie Gleichung (18) ergibt sich der resultierende Zeitfehler $t_{i,\text{err}}$, der auch die Zeitdauer verkürzt oder vergrößert, aus dem Zusammenhang zwischen Δd_i und der gefahrenen Geschwindigkeit v_i :

$$t_{i,\text{err}} = \frac{\Delta d_i}{v_i} \quad (20)$$

In Bild 10 ist t_{err} für unterschiedliche aus dem Stand der Technik (Kapitel 5.2.5) identifizierte Distanzfehler Δd dargestellt. Es wird deutlich, dass sich t_{err} bei geringen Geschwindigkeiten erhöht und bei höheren Geschwindigkeiten verringert. Liegen beispielsweise

eine lokale Ungenauigkeit von 0,58 m und eine Geschwindigkeit von 10 km/h vor, dann beträgt der resultierende Zeitfehler $t_{err} \approx 0,2$ s. Wird dagegen von einem Lokalisierungsfehler von 3,8 m und einer Geschwindigkeit von 10 km/h ausgegangen, so beträgt $t_{err} \approx 1,4$ s.

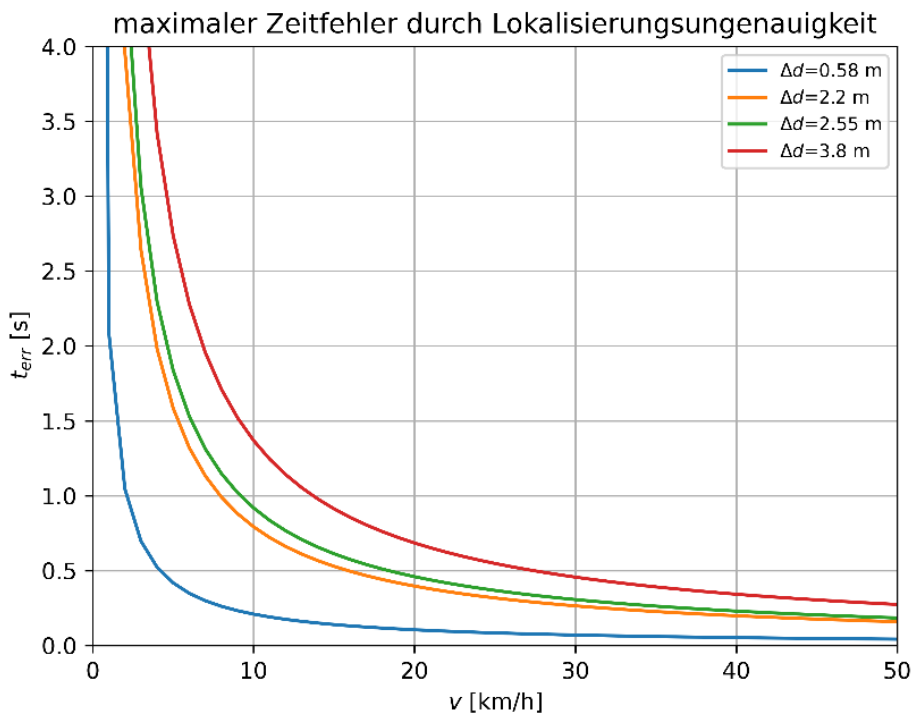


Bild 10. Zeitfehler t_{err} in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit

Die folgenden Aussagen können zum Lokalisierungs- und dem damit einhergehenden Zeitfehler t_{err} getroffen werden:

- Niedrige Geschwindigkeiten führen zu verhältnismäßig hohen t_{err} und umgekehrt. Da aber langsame Verkehrsteilnehmer mehr Zeit vor einem bevorstehenden Konflikt/Unfall haben als schnelle bei gleichem Abstand zum CP, tritt dieser Effekt nicht so deutlich zutage.
- Niedrige Geschwindigkeiten (z. B. 4 km/h oder geringer) von Radfahrenden und Kfz treten eher selten auf. Darüber hinaus sind die energetischen Wirkungen moderat und führen selten zu schweren Verletzungen, wenn davon ausgegangen wird, dass der Radfahrende mit einem stehenden Fahrzeug kollidiert. Kollidiert ein Fahrzeug mit dem Radfahrenden, dann ist mit schweren Verletzungen zu rechnen.
- Kritisch sind eher die geringen erwarteten Zeiten $t_{exp,eff}$ bzw. die resultierenden Restzeiten t_{rem} , wenn die Geschwindigkeiten hoch sind. Durch den Lokalisierungsfehler werden diese geringen zeitlichen Puffer zusätzlich – wenn auch gering – verkürzt.

Ungenauigkeiten bei der Geschwindigkeitsbestimmung

Analog zur Lokalisierungsproblematik im vorangegangenen Kapitel sind Ungenauigkeiten bei der Schätzung der Geschwindigkeiten von Verkehrsteilnehmern von unterschiedlichen Faktoren abhängig. Wird beispielsweise ein bildbasiertes Verfahren eingesetzt, das die

Bewegungen der Objekte anhand ihrer Pixelbewegungen abschätzt (man spricht beispielsweise vom Optischen Fluss), so spielen neben Bildauflösung und -rate auch die Verfahren der Objekterkennung und -klassifizierung und Kalibrierung (Transformation der Bild- in Weltkoordinaten) eine wichtige Rolle. Oft ist es so, dass Bewegung anhand der Veränderung der Positionen der Objekte erkannt wird und so beispielsweise einfache Differenzverfahren oder aber komplexere Methoden der adaptiven Filterung (z. B. Kalman- und Partikelfilter) mitsamt den zugrundeliegenden (nicht-)linearem Bewegungsmodellen genutzt werden, Geschwindigkeiten zu quantifizieren. Wird angenommen, dass die Geschwindigkeit mit demselben System/Verfahren bestimmt wurde wie die Lokalisierung, dann trifft der bekannte Zusammenhang zu, dass die Geschwindigkeit ein Derivat der Distanz ist, d. h. die erste Ableitung des Ortes. Genau dann ist der Geschwindigkeitsfehler Δv mit dem Distanzfehler korreliert, d. h. es gilt mit Δt als Zeitfehler:

$$\Delta v \sim \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (21)$$

Wird diese Relation genauer betrachtet, so fällt auf, dass sich mit dem Lokalisierungsfehler Δd der Geschwindigkeitsfehler Δv ergibt, da das Zeitintervall konstant bleibt. Das führt zu der Konsequenz, dass sich der Distanzfehler proportional auf die Geschwindigkeitsbestimmung auswirkt. Wird dagegen der Fall angenommen, dass ein anderes Verfahren zur Bestimmung der Geschwindigkeit als zur Lokalisierung eingesetzt wird, dann gilt Relation (21) nicht. In diesem Fall muss der Geschwindigkeitsfehler separat betrachtet werden. Dann wird angenommen, dass es einen Geschwindigkeitsfehler Δv gibt, der die wahre Geschwindigkeit v eines Verkehrsteilnehmenden beeinflusst und zu einer gemessenen Geschwindigkeit v_{meas} führt, die entweder kleiner oder größer als die tatsächliche ist:

$$v_{\text{meas}} = v \pm \Delta v \quad (22)$$

Dieser Geschwindigkeitsfehler wirkt sich schließlich auf die geschätzte Zeit $t_{i,\text{exp,err}}$ gemäß Gleichung (1) mit $v_i^2 - \Delta v_i^2 > 0$ aus (der Lokalisierungsfehler wird vorerst vernachlässigt):

$$t_{i,\text{exp,err}} = \frac{d_i}{v_i \pm \Delta v_i} \quad (23)$$

$$\Delta t_{i,\text{err}} = \frac{d_i}{v_i - \Delta v_i} - \frac{d_i}{v_i + \Delta v_i} = \frac{2d_i \Delta v_i}{v_i^2 - \Delta v_i^2} \quad (24)$$

In Bild 11 sind die Auswirkungen des Geschwindigkeitsfehlers Δv auf den Zeitfehler Δt_{err} nach Gleichung (24) veranschaulicht. Es wird deutlich, dass dieser mit der Zeit und damit mit der Entfernung von CP ansteigt. Beträgt beispielsweise $\Delta v = 1$ km/h bei $t_{\text{exp}} = 6$ s (das entspricht $d_{\text{cp}} \approx 12$ m bei $v = 7$ km/h), dann führt das bereits zu $\Delta t_{\text{err}} \approx 0,5$ s. Ist Δv größer, dann erhöht sich Δt_{err} entsprechend. Bei höheren Geschwindigkeiten nimmt dieser Fehler relativ zu t_{exp} erwartungsgemäß ab (Bild rechts). Wird beispielsweise von $v = 17,6$ km/h ausgegangen, dann beträgt der resultierende Zeitfehler $\Delta t_{\text{err}} \approx 0,2$ s bei $t_{\text{exp}} = 6$ s.

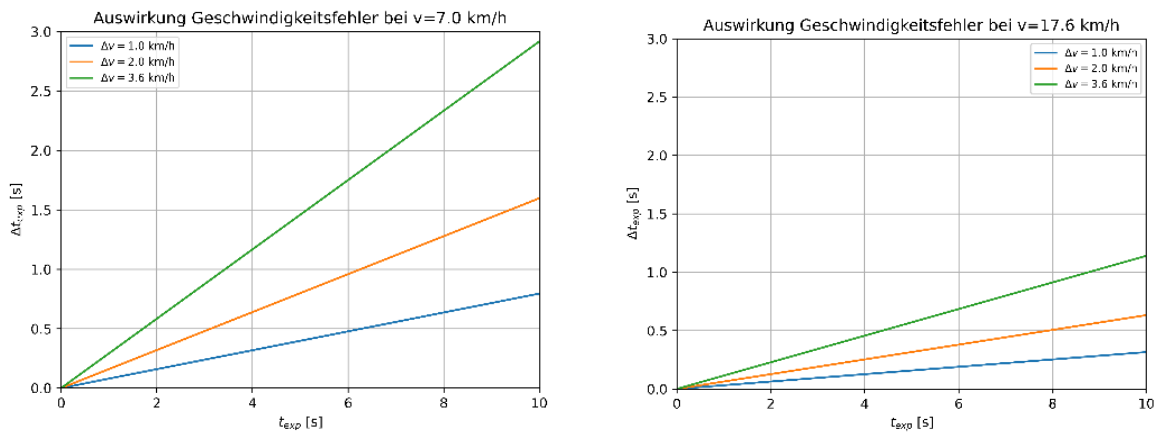


Bild 11. Auswirkungen des Geschwindigkeitsfehlers nach Gleichung (24) für Geschwindigkeiten von 7 km/h (links) und 17,6 km/h (rechts)

Wird der Lokalisierungsfehler in Gleichung (23) berücksichtigt, so kann die erwartete Zeit bis zur Ankunft an CP und der resultierende Zeitfehler $\Delta t_{i,err}$ wie folgt geschätzt werden (mit $v_i^2 - \Delta v_i^2 > 0$):

$$t_{i,exp,err} = \frac{d_i \pm \Delta d_i}{v_i \pm \Delta v_i} \quad (25)$$

$$\Delta t_{i,err} = \frac{d_i + \Delta d_i}{v_i - \Delta v_i} - \frac{d_i - \Delta d_i}{v_i + \Delta v_i} = \frac{2(d_i \Delta v_i + \Delta d_i v_i)}{v_i^2 - \Delta v_i^2} \quad (26)$$

Gleichung (26) kann dabei wie folgt erläutert werden: der resultierende Zeitfehler unter Berücksichtigung von Lokalisierungs- und unkorreliertem Geschwindigkeitsfehler ergibt sich aus der Diskrepanz zwischen den geschätzten größten Werten für $t_{i,exp}$ (d.h. bei vergrößerter Distanz bei gleichzeitig verringerter Geschwindigkeit) und den niedrigsten Werten für $t_{i,exp}$ (d.h. bei verringerter Distanz bei gleichzeitig vergrößerter Geschwindigkeit). Im Unterschied zu Gleichung (24) sorgt der Term $\Delta d_i v_i / (v_i^2 - \Delta v_i^2)$ dafür, dass sich Δt_{err} entsprechend vergrößert. Auf einen Plot wurde an dieser Stelle aber verzichtet. Die folgenden Aussagen können zum Geschwindigkeitsfehler getroffen werden:

- Sind die Geschwindigkeiten korreliert mit der Lokalisierung, dann muss der Geschwindigkeitsfehler nicht weiter betrachtet werden, und es gilt Gleichung (20). Ist er allerdings nicht mit dem Lokalisierungsfehler korreliert, so ist er gemäß Gleichung (26) zu berücksichtigen.
- Der Geschwindigkeitsfehler Δv kann die wahren Geschwindigkeiten scheinbar erhöhen oder verringern.
- Verringert sich die Geschwindigkeit, so liegt scheinbar mehr Zeit bis zum Erreichen des CP vor, als tatsächlich zur Verfügung steht. Dieser Fall ist als gefährlich einzuschätzen, da eine Warnung vor einer kritischen Situation zu spät käme. Vergrößert sich die Geschwindigkeit, so liegt scheinbar weniger Zeit bis zum Eintreffen am CP vor als tatsächlich zur Verfügung steht. In diesem Fall käme eine Warnung vor einer kritischen Situation zu früh, und Fehlalarme könnten die Akzeptanz der Warnung negativ beeinflussen.
- Als Konsequenz ergibt sich die Notwendigkeit einer möglichst genauen und verlässlichen Geschwindigkeitsbestimmung, um in der Lage zu sein, verlässlich vor gefährlichen Situationen bei gleichzeitig geringer Fehlalarmrate zu warnen.

Zusammenfassung zu Lokalisierungs- und Geschwindigkeitsfehler

Es kann festgestellt werden, dass die für die Kritikalitätsbetrachtungen relevanten Bedingungen dann bestehen, wenn folgendes gilt:

$$t_{i,\text{exp}} = \frac{d_i + |\Delta d_i|}{v_i - |\Delta v_i|} \quad (27)$$

Lokalisierungsfehler sind dann kritisch, wenn sie den tatsächlichen Abstand des Verkehrsteilnehmers zum CP überschätzen. Geschwindigkeitsfehler sind dann kritisch, wenn sie die tatsächliche Geschwindigkeit unterschätzen. In beiden Fällen kann eine „just-in-time“-Warnung der Verkehrsteilnehmenden zu spät kommen. Im Falle der Korrelation von Geschwindigkeits- und Lokalisierungsfehler, gilt folgendes:

$$t_{i,\text{exp}} = \frac{d_i + |\Delta d_i|}{v_i} \quad (28)$$

Gleichung (28) bildet die Grundlage für alle weiteren Betrachtungen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird der Lokalisierungsfehler aus den zukünftig in diesem Bericht erscheinenden Gleichungen entfernt. Dabei ist zu beachten, dass der Lokalisierungsfehler in den gemessenen Distanzen der weiter unten im Bericht vorgestellten Szenarien implizit enthalten ist. Es wird demnach die Distanz zum CP wie folgt definiert:

$$d := d + \Delta d \quad (29)$$

Bei dieser Betrachtung ist den Autoren dieses Berichts bewusst, dass auch der andere Fall wichtig ist, wenn sich die Distanz scheinbar verringert. Wie oben angemerkt, kann davon ausgegangen werden, dass dieser Fall zu einer erhöhten Anzahl von falsch-positiven Warnmeldungen führen kann und so die Fehlalarmrate erhöhen würde. Als Konsequenz könnten potentielle Nutzer das Gerät abschalten, so dass dann von einer Verringerung der Verkehrssicherheit auszugehen wäre. Dieser Fall wird in diesem Bericht nicht weiter untersucht, weil die scheinbare Erhöhung der Distanz gemäß Festlegung in Gleichung (29) zu unmittelbar sicherheitskritischen Ereignissen führen würde.

5.1.3 Betrachtung der Unfallschwere

Unfälle können mit leichten, schweren oder sogar tödlichen Verletzungen der am Unfall beteiligten Personen einhergehen. Einfluss nehmen dabei nicht nur die kinetischen Bewegungsenergien der Interaktionspartner, die beim Zusammenprall beispielsweise durch die kollidierenden Massen in Verformungsenergien umgewandelt werden, sondern auch die bestehenden Schutzmechanismen. Ein relativ leichter Radfahrer wird bei einem Zusammenprall praktisch immer mit ungünstigeren Unfallfolgen zu rechnen haben als ein Kfz-Führer, der durch ein schweres Chassis und weitere passive Sicherheitskomponenten geschützt ist. Typischerweise wird die Unfallschwere auf der Basis der Umsetzung der kinetischen Bewegungsenergien der Interaktionspartner unmittelbar vor dem Zusammenstoß in kinetische Bewegungs- und Verformungsenergie bestimmt. Das geschieht durch eine idealisierte Betrachtung der Kollision als unelastischer Stoß (Laureshyn u. a. 2017).

Eine alternative, aber auf der Grundlage europaweit und mit unterschiedlichen Variablen und Granularitätsstufen verfügbaren Unfalldatendatenbanken entwickeltes Modell ist das der Verletzungsrisikofunktion IRF (injury risk function) (Jordanka Kovaceva 2018; Wisch

u. a. 2017). Mit der IRF wird das Verletzungsrisiko qualitativ nach AIS⁴ bzw. MAIS⁵ für pro Person bestimmt. In die Bestimmung der IRF der Verkehrsbeteiligungsarten fließen vor allem die Schwere und die Art (Körperregion) der Verletzungen der Unfallbeteiligten als abhängige und gefährere Geschwindigkeiten oder Differenzgeschwindigkeiten als unabhängige Variablen ein. IRF für Radfahrende, die mit einem Kfz kollidieren, haben bei geringen Unfallschweren ihr Maximum bei niedrigen, bei ernsthaften Unfallschweren bei mittleren und bei tödlichen Unfallschweren bei sehr hohen Geschwindigkeiten.

5.1.4 Dooring

Unter Dooring wird eine Interaktions- oder auch Unfallsituation zwischen einem bewegten Radfahrenden und einem stehenden oder parkendem Kfz verstanden, bei der der Radfahrende mit der (zumeist plötzlich) geöffneten Fahrzeurtür kollidiert (Bild 12). Dooring kann zu schweren Verletzungen beim Radfahrenden führen.

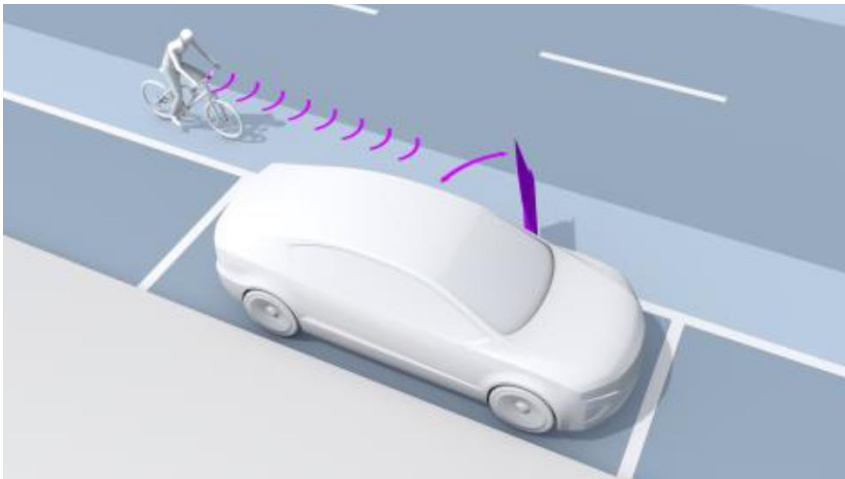


Bild 12. Dooring-Situation

Zeitbedarfe

Ausgangspunkt für die Bestimmung der Zeitbedarfe sind die Gleichungen (1) bis (13). Da beim Dooring das Kfz steht ($v_2 = 0$), reduziert sich die Bestimmung des Zeitbedarfs t_{rem} sowie der TTC-Kompensationszeit auf den Radfahrenden, der sich mit einem Abstand $d_1 = d \geq 0$ und der Geschwindigkeit $v_1 = v > 0$ auf das Kfz zubewegt:

$$t_{\text{exp}} = \frac{d}{v} \quad (30)$$

$$t_{\text{exp,eff}} = t_{\text{exp}} - t_{\text{lat}} \quad (31)$$

$$t_{\text{rem}} = t_{\text{exp,eff}} - t_{\text{ttc}} \quad (32)$$

⁴ AIS (abbreviated injury scale)

⁵ MAIS (maximum abbreviated injury scale)

In Bild 13 ist die verbleibende Zeit t_{rem} über den Abstand zum Konfliktpunkt für unterschiedliche Geschwindigkeiten und Bremsbeschleunigungen dargestellt. Die Schnittpunkte zwischen den Verläufen von t_{rem} mit der Abszisse stellen die Abstände eines Radfahrenden vom Konfliktpunkt dar. Dabei sind Latenzzeiten gemäß Gleichung (2) noch nicht berücksichtigt. So wird beispielsweise visuell deutlich, dass ein Radfahrender bei einer Geschwindigkeit von 17,6 km/h und einer Bremsbeschleunigung von $-2,5 \text{ m/s}^2$ etwa 5 m von CP entfernt sein muss, um eine Bremsung zur Kollisionsvermeidung durchzuführen. Bei einer Bremsbeschleunigung von $-5,5 \text{ m/s}^2$ beträgt dieser Abstand ca. 4 m.

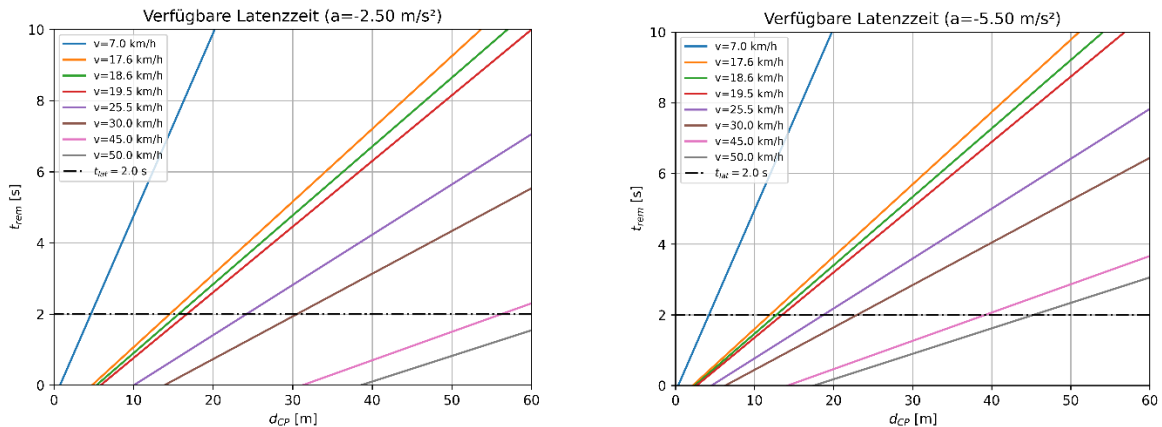


Bild 13. t_{rem} über d_{cp} (links: $a_{brake} = -2,5 \text{ m/s}^2$ und rechts: $a_{brake} = -5,5 \text{ m/s}^2$)

In Bild 14 ist eine alternative Darstellung des in Bild 13 visualisierten Zusammenhangs zwischen der verbleibenden Restzeit t_{rem} über t_{exp} dargestellt. Im Unterschied zu Bild 13 wird durch die Schnittpunkte der t_{rem} -Verläufe mit der Abszisse nicht der räumliche, sondern der zeitliche Abstand bis zum Erreichen des Konfliktpunkts veranschaulicht. Auch in diesem Fall sind noch keine Latenzzeiten berücksichtigt. Bei $v = 17,6 \text{ km/h}$ und einer Bremsbeschleunigung von $-2,5 \text{ m/s}^2$ bzw. $-5,5 \text{ m/s}^2$ liegt bereits bei $t_{exp} \approx 1 \text{ s}$ bzw. $t_{exp} \approx 0,5 \text{ s}$ die jeweilige verfügbare Zeit $t_{rem} = 0$ vor; auch hier sind Latenzen noch nicht berücksichtigt.

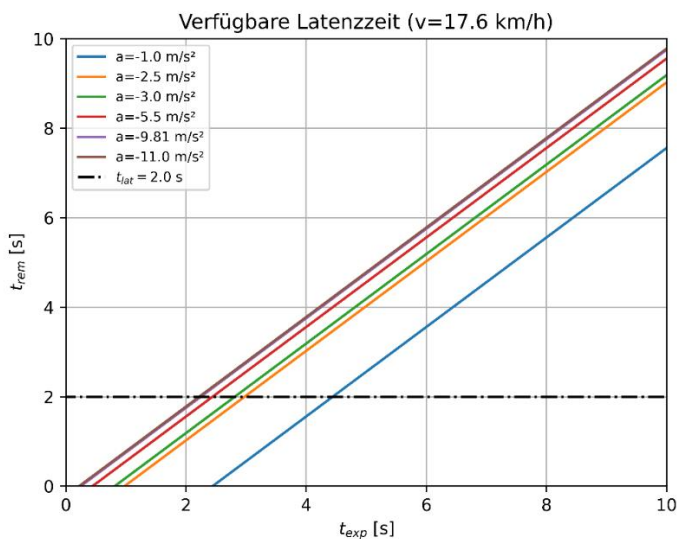


Bild 14. t_{rem} über t_{exp} bei unterschiedlichen Bremsbeschleunigungen

Aus den Betrachtungen in den Gleichungen (30) bis (32) lässt sich die für Latenzen, d. h. technische Latenz- und menschliche und Reaktionszeiten, erforderliche Zeitdauer t_{lat} bestimmen:

$$t_{\text{lat}} > t_{\text{exp}} - t_{\text{ttc}} \quad (33)$$

Wird Ungleichung (33) im Zusammenhang mit Bild 13 und Bild 14 gesehen, dann wird klar, dass die Berücksichtigung von Latenzen die für eine sichere Interaktion erforderlichen zeitlichen und räumlichen Abstände, d. h. d_{CP} und t_{rem} , weiter vergrößern. Wird beispielsweise eine Latenzzeit von 2,0 s angenommen (siehe waagrecht zur Abszisse in Bild 13 und Bild 14 eingezeichnete Strichlinien), dann betragen Mindestabstand bzw. -zeit des Radfahrenden von CP bei einer gefahrenen Geschwindigkeit von 17,6 km/h und einer Bremsbeschleunigung von $-2,5 \text{ m/s}^2$ bereits 14 m bzw. etwa 3 s und bei einer Bremsbeschleunigung von $-5,5 \text{ m/s}^2$ schließlich 12 m bzw. ca. 2,4 s.

Konkrete Beispiele zu in der Praxis üblichen Latenzzeiten werden in Kapitel 5.2 behandelt.

5.1.5 Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Beim Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342 wird eine Interaktions- oder auch Unfallsituation zwischen einem bewegten Radfahrenden, der den Pfad eines rechtsabbiegenden Kfz kreuzt, verstanden. In dieser Untersuchung soll es sich um einen entgegen der Bewegungsrichtung fahrenden Radfahrenden handeln. Beim Rechtsabbiegen allgemein kommt es weltweit immer wieder zu schweren Verletzungen von Radfahrenden, insbesondere wenn Lkw den Bewegungspfad des Radfahrenden kreuzen. Kommt der Radfahrende aus der entgegenkommenden Richtung, so wird dieser oft von rechtsabbiegenden Kfz übersehen, und ein Zusammenprall kann u. U. noch weitaus schwerwiegendere Folgen haben, z. B. im Falle einer Frontalkollision mit dem abbiegenden Kfz. In Bild 15 ist eine solche Interaktionssituation dargestellt.

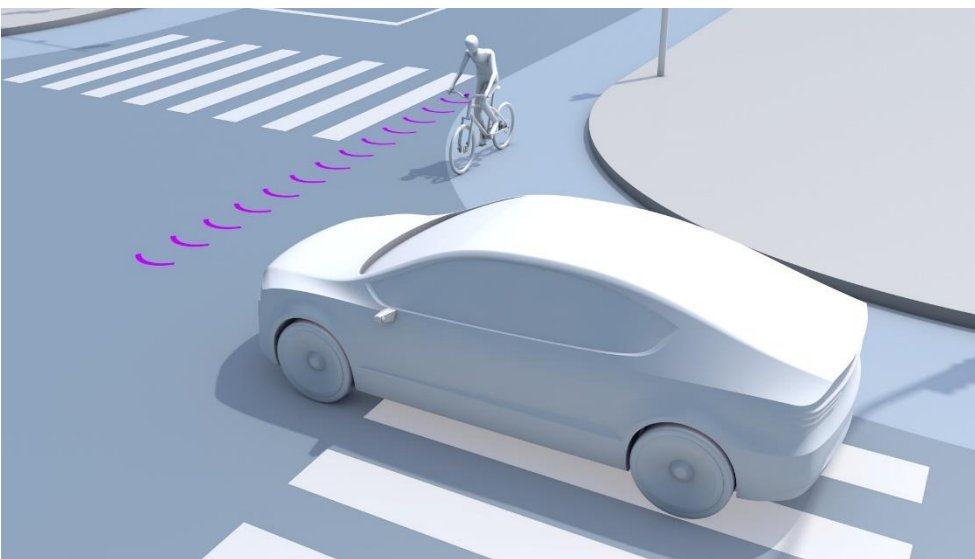


Bild 15. Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Zeitbedarfe

Ausgangspunkt für die Bestimmung der Zeitbedarfe sind die Gleichungen (1) bis (13), die die Zusammenhänge zwischen erwarteter Zeit bis zum Erreichen CP, Latenzen und Ausweichzeiten bilden. Beim Rechtsabbiegen wird idealisiert davon ausgegangen, dass sich die Verkehrsteilnehmer zwar auf zwei eindimensionalen Kurven zu einem bekannten CP bewegen, ihre Ankunft dort aber orthogonal zueinander erfolgt, d. h. ihre Geschwindigkeitsvektoren stehen senkrecht aufeinander, d. h. $v_1 \perp v_2$. Vor diesem Hintergrund gilt zwar Gleichung (11), aber beide Verkehrsteilnehmer können zum CP unterschiedliche TTCs aufweisen, da sie sich „verpassen“ können. Dieser Unterschied führt dazu, dass für die Beschreibung dieses Interaktionsszenarios die aus der Verkehrskonflikttechnik bekannte Größe T_2 zur Anwendung (Laureshyn u. a. 2017) kommt und zwei zur Unfallvermeidung von den Verkehrsteilnehmenden zu kompensierende TTCs betrachtet werden müssen. T_2 ist der erwartete Zeitbedarf zweier sich auf Kollisionskurs befindender interagierender Verkehrsteilnehmer, wobei unabhängig von der Konflikt- oder Unfallursache der zeitlich zweite in den gemeinsamen Konfliktbereich einfahrende Verkehrsteilnehmer den Konflikt definiert:

$$T_2 = \max(t_{1,exp}; t_{2,exp}) \quad (34)$$

Die Kenngröße T_2 ist in Bild 16 beispielhaft für unterschiedliche Geschwindigkeiten veranschaulicht. Der Einfachheit halber wurde angenommen, dass sich Radfahrender und Kfz-Führender mit dem gleichen Geschwindigkeitsbetrag im gleichen Abstand zum CP bewegen. Beispielsweise beträgt bei einer Geschwindigkeit von 17,6 km/h und $d_{CP} = 20$ m bereits $T_2 \approx 4$ s.

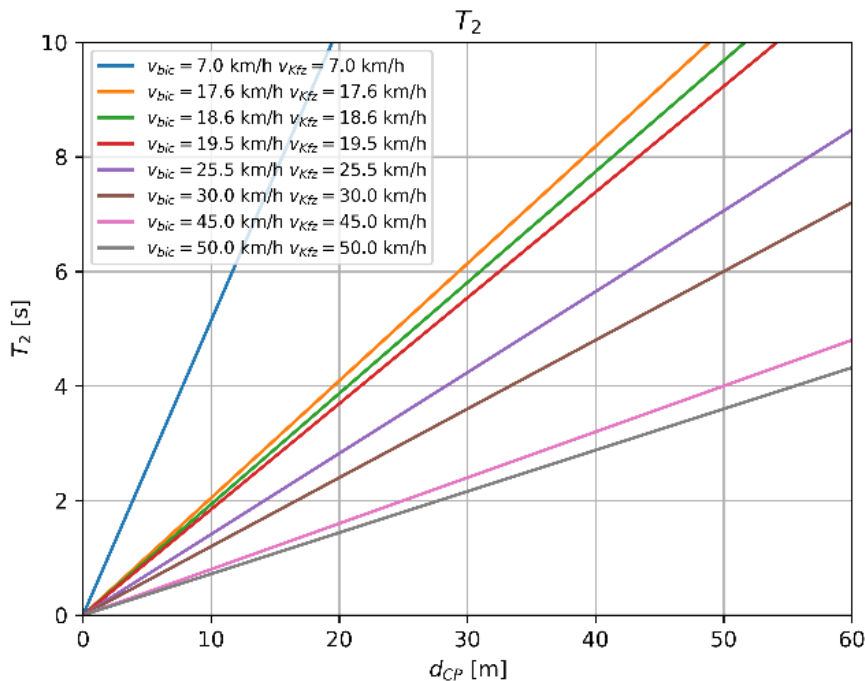


Bild 16. T_2 über d_{CP}

Die folgenden Aussagen können zu Gleichung (34) und Bild 16 getroffen werden:

- T_2 ist die erwartete Zeit, die der zweite, d. h. später, in den Konfliktbereich einfallende Verkehrsteilnehmer bis zur Kollision hat, wenn er sein Verhalten nicht ändert oder ein Ausweichmanöver durchführt. Es besteht also nicht die Voraussetzung, dass beide zur gleichen Zeit am Konfliktpunkt ankommen müssen.
- T_2 ist berechenbar, solange der erste Verkehrsteilnehmer, der den Konfliktbereich durchquert, diesen nicht verlassen hat. Fährt der erste Verkehrsteilnehmer aus dem Konfliktbereich aus, dann gibt es keinen Konflikt mehr. Aus diesem Grund ist stets der zweite, d. h. später am Konfliktbereich eintreffende Verkehrsteilnehmer maßgebend dafür, ob sich aus einer Interaktionssituation eine Konflikt- oder Unfallsituation ergibt.
- Der letzte Wert von T_2 in einem kontinuierlich erhobenen Verlauf, bevor der erste Verkehrsteilnehmer den Konfliktbereich verlässt, entspricht der in der Verkehrskonflikttechnik bekannten Metrik *PET* (post-encroachment time) bei Kreuzen-Konflikten. Die *PET* quantifiziert, wie knapp sich zwei denselben Konfliktbereich teilende Verkehrsteilnehmer verpassen, wenn sie räumlich am nächsten sind.
- Der minimale Wert $T_{2,\min}$ ist der Wert mit dem zeitlich minimalen Abstand der Interaktionspartner vom CP.

Durch Anwendung des Maximum-Operators in Gleichung (34) ergeben sich die zwei folgenden Restzeiten, wobei angenommen wird, dass $t_{i,ea} = t_{i,ttc}$ mit $i = \{1, 2\}$:

$$\begin{aligned} t_{lat,\min} &> T_2 - \max(t_{1,ea}; t_{2,ea}) \\ t_{lat,\min} &> T_2 - \max(t_{1,ttc}; t_{2,ttc}) \end{aligned} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} t_{lat,\max} &> \max(t_{1,\exp} - t_{1,ea}; t_{2,\exp} - t_{2,ea}) \\ t_{lat,\max} &> \max(t_{1,\exp} - t_{1,ttc}; t_{2,\exp} - t_{2,ttc}) \end{aligned} \quad (36)$$

Folgende Aussagen können zu den Ungleichungen (35) und (36) getroffen werden:

- Gleichung (35) repräsentiert die minimale für Latenzen zur Verfügung stehende Zeitdauer, die unabhängig von unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des zuletzt am CP eintreffenden Verkehrsteilnehmers gilt. Entscheidend ist die Ankunft des ersten Interaktionspartners am CP.
- Gleichung (36) repräsentiert die maximale für Latenzen zur Verfügung stehende Zeitdauer, die unabhängig von unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen des zuerst am CP eintreffenden Verkehrsteilnehmers gilt. Entscheidend ist die Ankunft des zuletzt am CP eintreffenden Interaktionspartners.
- Aus diesen Feststellungen heraus erscheint es auf den ersten Blick völlig ausreichend zu sein, nur den zuletzt am CP eintreffenden Verkehrsteilnehmer vor einer potentiell gefährlichen Situation zu warnen. Da sich eine Konfliktsituation dynamisch innerhalb von Sekundenbruchteilen ändern kann, ist dieses Vorgehen nicht empfehlenswert und unbedingt zu vermeiden. Daher sind $t_{lat,\min}$ maßgeblich für den zuerst und $t_{lat,\max}$ maßgeblich für den zuletzt am CP eintreffenden Interaktionspartner.
- Tritt der Sonderfall ein, dass sich die Verkehrsteilnehmer 1 und 2 mit gleichen Geschwindigkeiten bewegen und sich in ihrer Ausweichaktion gleich verhalten, so gilt: $t_{lat,\min} = t_{lat,\max}$.
- Gemäß Gleichung (6) ist die *DTA* zweier, sich auf Kollisionskurs befindender Verkehrsteilnehmer zu quantifizieren. Mit den Gleichungen (35), (36) und (6) sind schließlich die notwendigen und hinreichenden Bedingungen für sicheres Rechtsabbiegen und damit rechtzeitiges Warnen definiert.

In Bild 17 ist die für technische und menschliche Latenzen verfügbare Restzeit t_{rem} über d_{CP} für unterschiedliche Geschwindigkeiten und Beschleunigungen aufgetragen, wobei für Kfz und Radfahrende die gleichen Geschwindigkeiten angenommen werden. Die Schnittpunkte der t_{rem} -Verläufe mit der Abszisse stellen die erforderlichen Restzeiten ohne Berücksichtigung der Latenzen dar. Die gestrichelte Linie stellt ein Beispiel für Latenzzeiten

von $t_{lat} = 2,0$ s dar. Schneiden die t_{rem} -Verläufe diese Linie, so wird deutlich, wie sehr sich die erforderlichen Abstände zum CP vergrößern.

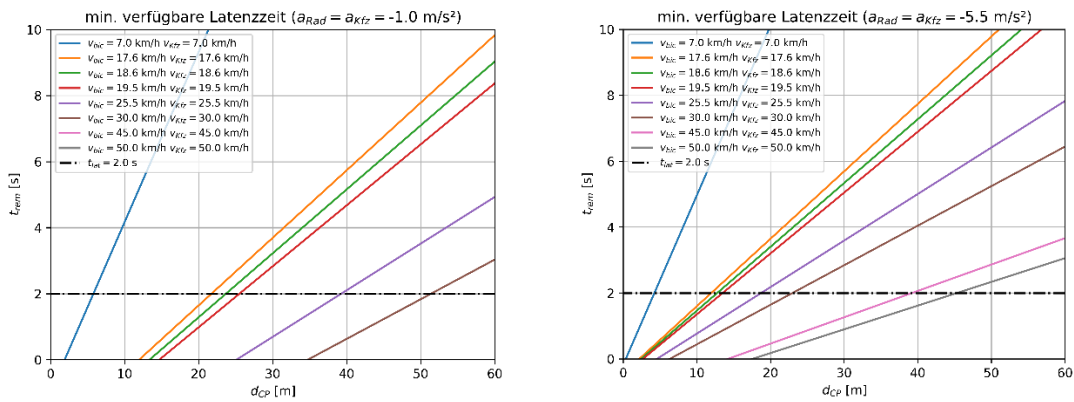


Bild 17. t_{rem} über d_{CP} (links: $a_{brake} = -1,0$ m/s² und rechts: $a_{brake} = -5,5$ m/s²). Hinweis: bei geringen Bremsverzögerungen können die Verläufe der Geschwindigkeiten größer oder gleich 45 km/h im Bild links nicht mehr visualisiert werden

Im linken Bild wird deutlich, dass bei einer sehr geringen Bremsbeschleunigung von lediglich $-1,0$ m/s² für beide Interaktionspartner bei der Geschwindigkeit von 17,6 km/h bereits etwa 12 m vor CP gehandelt werden muss. Wird eine Gesamtlatenz von 2,0 s (gestrichelte Linie) berücksichtigt, dann ergeben sich schon etwa 22 m. Erwartungsgemäß verringern sich bei einer Bremsbeschleunigung von $-5,5$ m/s² diese Entfernungen bei 17,6 km/h zu etwa 3 m bzw. 12 m vor CP.

In Bild 18 ist die bereits in Bild 17 dargestellte Restzeit t_{rem} nun über T_2 aufgetragen. Bremsen beide Interaktionspartner mit $-1,0$ m/s² bei einer Geschwindigkeit von 17,6 km/h, wird deutlich, dass (linkes Bild) bereits etwa 2,5 s (ohne Berücksichtigung von t_{lat}) bzw. 4,5 s (mit $t_{lat} = 2,0$ s, siehe gestrichelte Linie) vorher gehandelt werden muss. Bei Bremsbeschleunigungen von $-5,5$ m/s² verkürzen sich diese Zeiträume entsprechend auf ca. 0,5 s (ohne Latenz) bzw. ca. 2,5 s (mit Latenz). Im rechten Bild sind diese Zusammenhänge für eine Geschwindigkeit von 25,5 km/h dargestellt. Da vergrößern sich die erforderlichen Zeiträume erwartungsgemäß bei gesteigerter Geschwindigkeit.

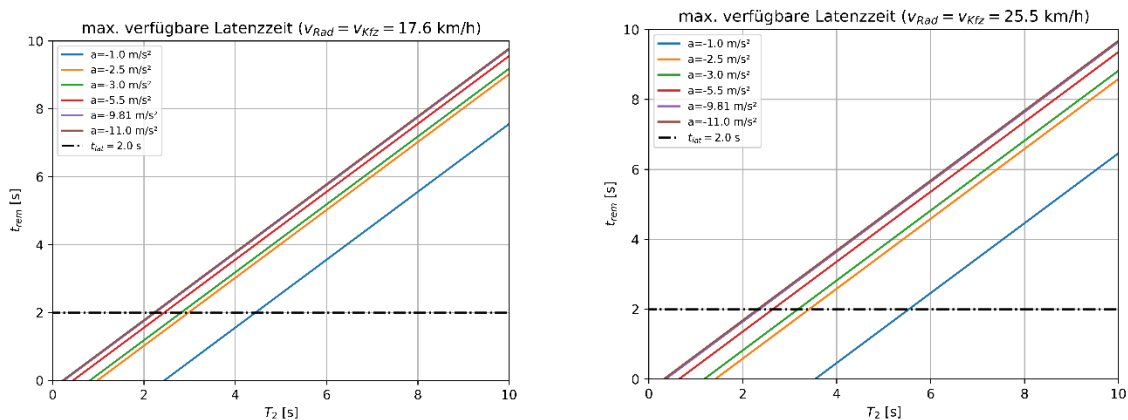


Bild 18. t_{rem} über T_2 (links: $v = 17,6$ km/h und rechts: $v = 25,5$ km/h)

In Bild 19 und Bild 20 ist der in den vorangegangenen Bildern dargestellte Zusammenhang zwischen der verfügbaren Restzeit t_{rem} und d_{CP} bzw. T_2 beispielhaft für extrem unterschiedliche Bremsbeschleunigungen ($a_{Rad} = -1,0 \text{ m/s}^2$ und $a_{Kfz} = -9,81 \text{ m/s}^2$) der Interaktionspartner dargestellt. Die Autoren weisen darauf hin, dass es sich hierbei um ein akademisches Beispiel handelt, um die Unterschiede zwischen minimaler und maximaler verfügbarer Latenz gemäß den Gleichungen (35) und (36) zu veranschaulichen. Praktisch ist bei vernünftiger Fahrweise eher nicht von derartigen Diskrepanzen der Bremsbeschleunigungen auszugehen. Während sich $t_{lat,min}$ nicht ändert (Bild 17 links ist identisch zu Bild 19 links), unterscheidet sich $t_{lat,max}$, weil sich die maximale Latenz an der betragsmäßig höheren Bremsbeschleunigung von $9,81 \text{ m/s}^2$ orientiert. Wird beispielsweise bei einer Gesamtlatenz von $2,0 \text{ s}$ (siehe gestrichelte Linie) eine Geschwindigkeit von $17,6 \text{ km/h}$ für beide Interaktionspartner angenommen (orangefarbene Verläufe in Bild 19), so beträgt $d_{CP} \approx 22 \text{ m}$ für $t_{lat,min}$, während für $t_{lat,max}$ dann $d_{CP} \approx 11 \text{ m}$ beträgt.

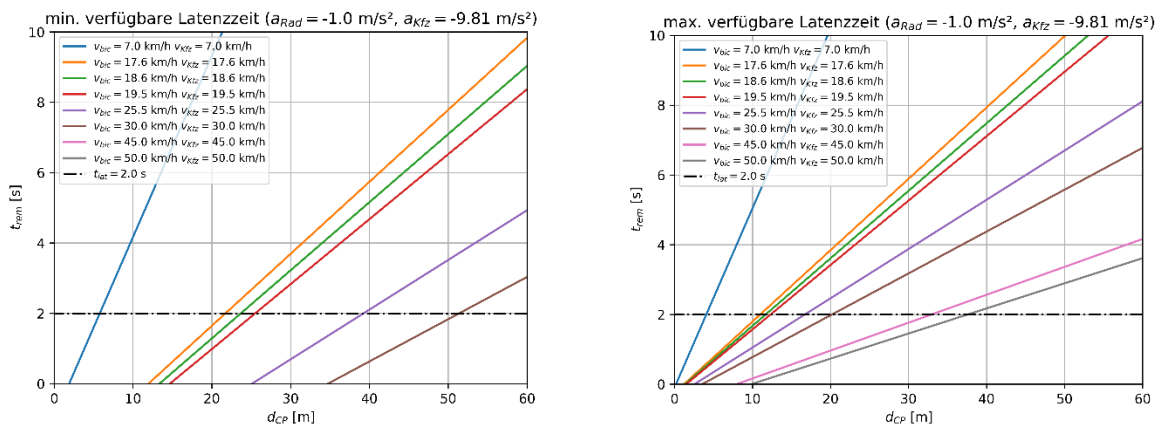


Bild 19. t_{rem} für die minimalen (links) und maximalen verfügbaren (rechts) Latenzzeiten über d_{CP} für die beispielhaften extrem unterschiedlichen Bremsbeschleunigungen von $a_{Rad} = -1,0 \text{ m/s}^2$ und $a_{Kfz} = -9,81 \text{ m/s}^2$.

In Bild 20 ist der in Bild 19 dargestellte Sachverhalt über T_2 veranschaulicht. So werden die Diskrepanzen zwischen $t_{lat,min}$ und $t_{lat,max}$ zeitlich repräsentiert. Bei $t_{lat,min}$ ist die betragsmäßig geringste Bremsbeschleunigung von $-1,0 \text{ m/s}^2$ maßgebend, während das bei $t_{lat,max}$ die betragsmäßig größte ist, d. h. $|-9,81| \text{ m/s}^2$. Es ergibt sich, dass sich bei einer Geschwindigkeit von $v = 17,6 \text{ km/h}$ und einer angenommenen Gesamtlatenz von $2,0 \text{ s}$ (siehe gestrichelte Linie) für $t_{lat,min}$ ein zeitlicher Puffer T_2 von ca. $4,5 \text{ s}$ benötigt wird, während für $t_{lat,max}$ lediglich T_2 von ca. $2,3 \text{ s}$ ausreichend ist (siehe Schnittpunkte mit gestrichelter Linie).

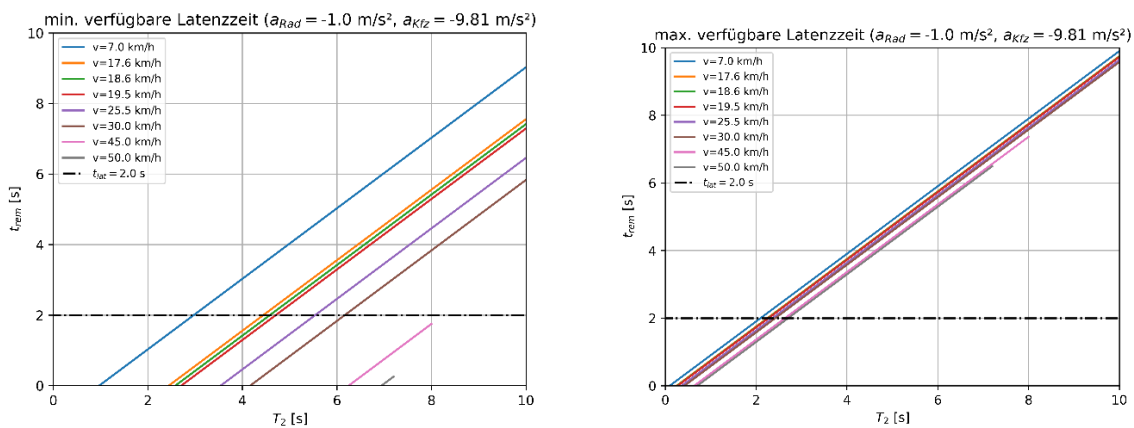


Bild 20. t_{rem} im Sinne der minimal (links) und maximal verfügbaren (rechts) Latenzzeiten über T_2 für extrem unterschiedliche Bremsbeschleunigungen von $a_{Rad} = -1,0 \text{ m/s}^2$ und $a_{Kfz} = -9,81 \text{ m/s}^2$. Hinweis: im Bild links werden aufgrund der definierten Wertebereiche nicht alle Werte für die Geschwindigkeiten größer oder gleich 45 km/h dargestellt.

5.1.6 Ausfahren aus einer Ausfahrt

Beim Ausfahren aus einer Ausfahrt handelt es sich um eine Interaktionssituation zwischen einem Radfahrendem auf einer Radverkehrs- oder Fußverkehrsanlage, der den Pfad eines aus einer Ausfahrt – manchmal sogar rückwärts – ausfahrenden Kfz kreuzt. Diese Situation ist oft durch beiderseitig massive Sichtbehinderungen, z. B. durch Bepflanzungen, Gebäude, parkende Fahrzeuge, eingeschränkt und führt zu Unfällen mit Verletzungen, vor allem beim Radfahren oder zu Fuß gehenden. In Bild 21 ist eine solche Situation veranschaulicht. Dabei kommen der Radfahrende mit der Geschwindigkeit $v_1 = v$ (in Bewegungsrichtung) bzw. $v_1 = -v$ (entgegen der Bewegungsrichtung) und das Kfz mit der orthogonalen Geschwindigkeit $v_2 = 0$, meist in sehr geringen Distanzen zum CP, aufeinander zu.

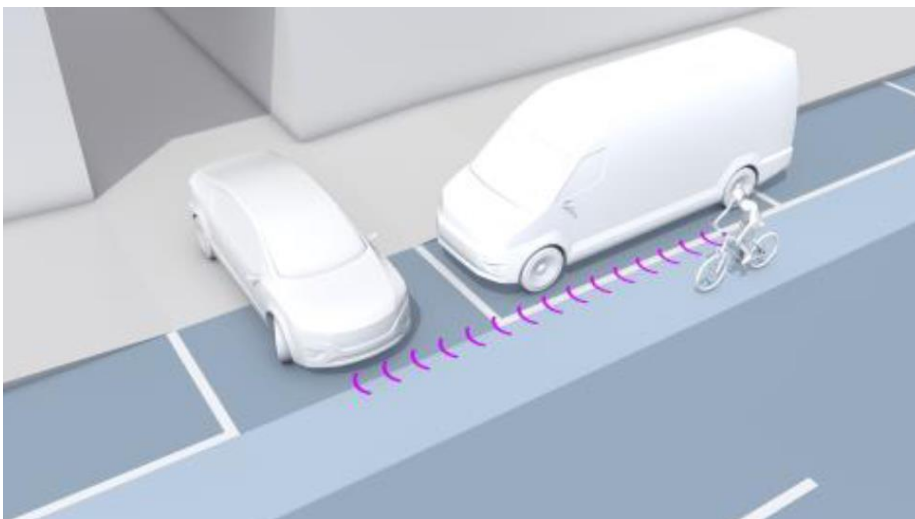


Bild 21. Ausfahren aus einer Ausfahrt ist ein Szenario, das oft mit beiderseitigen Sichtbehinderungen einhergeht

Zeitbedarfe

Die Bestimmung der Zeitbedarfe unterscheidet sich ganz allgemein nicht von den grundlegenden Gleichungen (1) bis (7) und im Speziellen nicht von den Betrachtungen zum Rechtsabbiegen gemäß der Gleichungen (34) bis (36). Daher wird an dieser Stelle auf eine theoretische Betrachtung/Herleitung verzichtet.

5.2 Quantifizierung der relevanten Parameter

5.2.1 Geschwindigkeit und Beschleunigung

Für diese Untersuchung wird sich anhand rechtlich möglicher, städtischer und im Rahmen von Fahrten mit dem Fahrrad möglichen und zulässigen Geschwindigkeiten orientiert. In Tabelle 1 ist die Menge der betrachteten Geschwindigkeiten erläutert, die in den theoretischen Betrachtungen verwendet wurden.

Tabelle 1. Geschwindigkeiten

Nr.	Geschwindigkeit	Erläuterung
1	7 km/h	7 km/h ist die Geschwindigkeit, die in der Rechtsprechung als Schrittgeschwindigkeit angesehen wird. Juristisch ist der Bereich zwischen 5 und 15 km/h anerkannt.
2	17,6 km/h	Diese Geschwindigkeit wurde auf der Grundlage von empirischen Erhebungen von in Summe 16.060 Radfahrenden an der AIM-Forschungskreuzung in Braunschweig unmittelbar vor der Radfahrerfurt als mittlere Geschwindigkeit ermittelt. Diese wird auch durch Untersuchungen (z.B. Rossi et al., 2017) gestützt.
3	18,5 km/h	Analog zu Nr. 2 handelt es sich hierbei um die mittlere Abbiegegeschwindigkeit von in Summe 103.243 Kfz beim Rechtsabbiegen in der Kurve an der AIM-Forschungskreuzung in Braunschweig.
4	19,6 km/h	Dabei handelt es sich um die mittlere Radfahrergeschwindigkeit von in Summe 16.060 Radfahrenden auf der Furt an der AIM-Forschungskreuzung in Braunschweig.
5	25,5 km/h	Dabei handelt es sich um die mittlere Kfz-Geschwindigkeit von in Summe 103.243 Kfz auf der Furt an der AIM-Forschungskreuzung in Braunschweig.
6	30 km/h	Dabei handelt es sich um von üblicherweise 50 km/h reduzierte Geschwindigkeitszonen in der Nähe von Wohngebieten
7	45 km/h	Diese Geschwindigkeit ist die max. motorisch unterstützte Geschwindigkeit von S-Pedelecs, welche auch als „bauartbedingte Höchstgeschwindigkeit“ bezeichnet wird.
8	50 km/h	In urbanen Bereichen üblicherweise zulässige Höchstgeschwindigkeit.

In **Tabelle 2** werden die in dieser Untersuchung verwendeten Bremsbeschleunigungswerte erläutert.

Tabelle 2. Bremsbeschleunigungen

Nr.	Beschleunigung	Erläuterung
1	-1,0 m/s ²	Sehr geringe Bremsbeschleunigungen können auftreten, wenn die Witterungs- und Fahrbahnbedingungen ungünstig sind, beispielsweise bei mit Schnee oder Eis bedeckter Fahrbahnoberfläche. Demnach dient dieser Wert ganz allgemein als Beispiel für geringe Bremsbeschleunigungen für die Verkehrsteilnehmenden.
2	-2,5 m/s ²	Dieser Wert entspricht der betragsmäßig unteren Bremsbeschleunigung bei Fahrrädern gemäß (Famiglietti u. a. 2020).
3	-3,0 m/s ²	Diese Größe tritt bereits bei moderaten Bremsmanövern von Kfz auf. Dieser Wert ist sozusagen eine Referenz für die Bremsung bei Kfz.
4	-5,5 m/s ²	In (Famiglietti u. a. 2020) wurden am Fahrrad Bremsbeschleunigungswerte von bis zu -6,97 m/s ² gemessen. Jedoch muss unterhalb einer Verzögerung von ca. -5,5 m/s ² mit dem Abheben des Hinterrades gerechnet werden. Daher wurde die betragsmäßig maximale Bremsverzögerung auf -5,5 m/s ² gesetzt.
5	-9,81 m/s ²	Bei einem Reibwert zwischen Asphalt und Rad von 1 beträgt die Bremsbeschleunigung der Fallbeschleunigung auf der Erde. Dieser betragsmäßig hohe Wert wird in Kapitel 5.1 für starke Verzögerungen des Kfz verwendet.
6	-11,0 m/s ²	In der Praxis werden Reibwerte größer als 1 gemessen, so dass vom Betrag her deutlich höhere Bremsbeschleunigungen praktisch auftreten können als die Fallbeschleunigung auf der Erde. Das gilt nicht für Fahrzeuge, bei denen aufgrund der Schwerpunktlage das Hinterrad abheben kann. Solche betragsmäßig hohen Werte werden in Kapitel 5.1 verwendet, um extreme Verzögerungen von Kfz zu illustrieren.

5.2.2 Reaktionszeit t_{reac}

(Green 2000) definiert Reaktionszeit t_{reac} als die Summe von Sensierzeit (Zeit zur Wahrnehmung eines Objektes), Perzeptionszeit (Zeit zur Erfassung der Bedeutung), Auswahlzeit des Manövers (Entscheidung zum Bremsen oder Ausweichen), Bewegungszeit (Zeit für die menschliche Motorik) und Responsezeit des Fahrzeuges. Dabei fasst er unterschiedliche Studien zur Quantifizierung der Reaktionszeiten beim Bremsen eines Kfz zusammen.

Es wird zwischen erwarteten, unerwarteten und völlig überraschenden Situationen im Verkehr unterschieden. Dabei stellen erwartete Situationen solche dar, die der Verkehrsteilnehmer vorhersieht wie beispielsweise die bereits per Restgrünzeit angekündigte

anstehende Rotphase einer Lichtsignalanlage. In (Green 2000) wurden niedrigsten Werte beim Bremsen mit ca. 0,7 s quantifiziert. Unerwartete Situationen sind solche Situationen, bei denen ein Kfz-Führer ein Ereignis nicht erwartete. Bis auf Ausnahmen lagen die niedrigsten Werte beim Bremsen bei ca. 1,3 s. Unter völlig überraschenden Situationen sind solche zu verstehen, mit denen die Kfz-Führer nicht gerechnet haben, z. B. durch seitlich in den Bewegungspfad sich hineinbewegende Objekte. Beste Werte beim Bremsen wurden mit etwa Reaktionszeiten von 1,5 s erreicht.

Zusätzlich betrachtete (Green 2000) auch andere Einflüsse wie beispielsweise Alter, Dringlichkeit, kognitive Beanspruchung, Geschlecht und Wahl des Ausweichmanövers. Er stellte fest, dass ältere Menschen etwa 0,1-0,3 s langsamer reagieren, die Dringlichkeit zu größerer Varianz der Reaktionszeiten führt, dass durch Telefonate abgelenkte Personen einen höheren Zeitbedarf indizieren und Ausweichen ca. 0,3 s schneller ist als Bremsen. Geschlechterspezifisch wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Diese Dinge werden in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt. Der resultierende Definitionsbereich zur Adressierung der Reaktionszeiten des Menschen wird daher wie folgt gebildet:

$$t_{\text{reac}} = \begin{cases} 0,7 \text{ s (beste Reaktionszeit)} \\ 1,3 \text{ s (mittlere Reaktionszeit)} \\ 1,5 \text{ s (schlechte Reaktionszeit)} \\ 2,0 \text{ s (ungünstigster Fall)} \end{cases} \quad (37)$$

Da Ausweichen weniger Reaktionszeit (bei Kfz-Führenden) erfordert als Bremsen, werden Bremszeiten in dieser Untersuchung verwendet.

5.2.3 Übertragungszeit t_{trans}

Die Übertragungszeit t_{trans} umfasst alle Transportschritte, um ein prozessiertes Kollisionsrisiko von einem Sender zu einem Empfänger per Funk zu übertragen und das Warnsystem dabei zu aktivieren. Dabei spielen die unterschiedlichsten technischen Standards eine Rolle. Es konnten die folgenden Übertragungszeiten ermittelt werden:

$$t_{\text{trans}} = \begin{cases} 0,01 \text{ s (ITS G5)} \\ 0,025 \text{ s (LTE – V2X im Mittel)} \\ 0,1 \text{ s (LTE – V2X, Mobilfunk ungünstigster Fall)} \\ 0,25 \text{ s (Mobilfunk, Ausreißerbetrachtung)} \\ 0,5 \text{ s (Mobilfunk, obere Grenze)} \end{cases} \quad (38)$$

Hinweis zu den 100 Millisekunden in der dritten Zeile: in der Praxis treten im Mittel Übertragungszeiten von weniger als 50 Millisekunden auf. Es kommt aber häufig zu enormen Ausreißern. Aus diesem Grund wird bei ungünstigen Bedingungen von max. 100 Millisekunden ausgegangen.

5.2.4 Prozessierzeit t_{proc}

Bei der Prozessierzeit t_{proc} handelt es sich um die Summe aller für die technische Ermittlung eines Kollisionsrisikos erforderlichen Verarbeitungsschritte. Wird beispielsweise ein komplexes infrastrukturseitiges System wie das der AIM-Forschungskreuzung in Braunschweig betrachtet, das ergibt sich t_{proc} aus den Zeitdauern, die für die bildbasierte Objekterkennung und -klassifikation, die Ermittlung der Verkehrsteilnehmertrajektorien, deren Prognose im Sinne der Risikobetrachtung und dem daraus abgeleiteten Kollisionsrisiko. (Manz u. a. 2023) haben das grundlegend untersucht und hierfür $542 \pm 12,3$ Millisekunden ermittelt.

Es sind aber auch Systeme denkbar, die weitaus schlanker sind und weniger Komplexität aufweisen, wie beispielsweise Systeme, die einen „heart beat“-Status ermitteln oder Systeme mit leistungsfähigerer Rechentechnik. Da aber keine Prozessierzeiten in Erfahrung gebracht werden konnten, mussten für die Untersuchung in Kapitel 5.1 die Prozessierzeiten geschätzt werden. Folgende Annahmen wurden getroffen:

- Das absolute Minimum zur Bestimmung eines Kollisionsrisikos wird auf 25 Millisekunden geschätzt.
- Systeme mit leistungsfähiger Rechentechnik und optimierter Architektur erreichen ggf. 100 bis 150 Millisekunden.
- Worst-case-Szenarien werden 800 Millisekunden angenommen.

Anhand dieser Annahmen ergibt sich t_{proc} zu:

$$t_{\text{proc}} = \begin{cases} 0,025 \text{ s (Minimum, bester Fall)} \\ 0,1 \text{ s (optimiertes System untere Grenze)} \\ 0,15 \text{ s (optimiertes System obere Grenze)} \\ 0,542 \text{ s (FoKr Braunschweig)} \\ 0,8 \text{ s (worst case)} \end{cases} \quad (39)$$

5.2.5 Zusammenfassung der resultierenden Latenzen zu t_{lat}

Werden die in den vorangegangenen Kapiteln quantifizierten Reaktions-, Prozessier- und Übertragungszeiten zusammengefasst, so ergibt sich die Gesamtlatenz t_{lat} . Um nicht zu viele unterschiedliche Szenarien in die Untersuchung einfließen zu lassen, werden nicht alle Kombinationen betrachtet, sondern eine Auswahl von Fällen. Diese ergeben sich schließlich zu:

$$t_{\text{lat}} = \begin{cases} 0,735 \text{ s (minimale Latenz)} \\ 1,425 \text{ s (mittlere Latenz)} \\ 1,75 \text{ s (FoKr Braunschweig und ITS – G5)} \\ 2,292 \text{ s (FoKr Braunschweig und LTE)} \\ 3,30 \text{ s (Worst case)} \end{cases} \quad (40)$$

5.2.6 Lokalisierungsungenauigkeiten

Zur Quantifizierung der Lokalisierungsungenauigkeiten wurde auf GNSS-basierte Untersuchungen sowie DLR-interne Analysen zurückgegriffen. So untersuchten (Hesselbarth und Wanninger 2021) die Ortungsgenauigkeiten von Smartphones Xiaomi MI8, Huawei P30 und Samsung S20. Sie stellten Ungenauigkeiten zwischen 1,2 und 2,2 m fest, konstatierten aber auch, dass Submetergenauigkeiten unter stationären Bedingungen auch bei diesen Mobilfunkgeräten erreicht werden können.

(Tang u. a. 2018) untersuchten die GNSS-Genauigkeit mit (non-line of sight) und ohne Verdeckungen (line of sight). Sie stellten fest, dass sich die RMSE zwischen 2,55 m (ohne Verdeckungen) und 3,80 m (mit Verdeckungen) bewegten.

Lokalisierungsfehler werden in den vorangegangenen Untersuchungen daher wie folgt quantifiziert:

$$\Delta d = \begin{cases} 2,20 \text{ m (mittlere Genauigkeit, mittlerer Fehler)} \\ 2,55 \text{ m (schlechte mittlere Genauigkeit, RMSE)} \\ 3,80 \text{ m (schlechteste mittlere Genauigkeit, RMSE)} \end{cases} \quad (37)$$

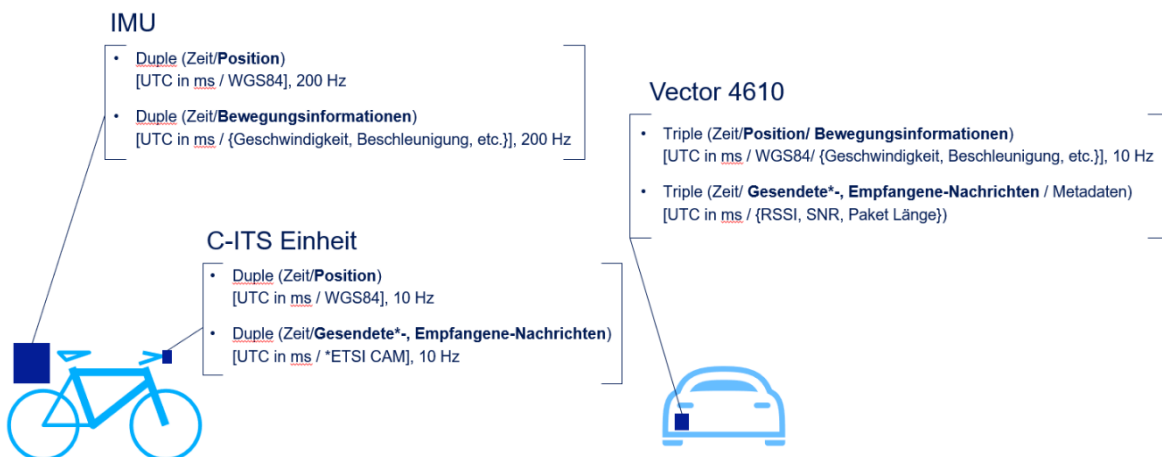
5.2.7 Geschwindigkeitsfehler

Der Geschwindigkeitsfehler wird aufgrund der Annahme einer Korrelation mit dem Lokalisierungsfehler nicht weiter betrachtet.

6 Aufbau, Konzeption und Durchführung der Versuche

6.1 Messkonzept

Das Messkonzept in dieser Studie dient der Planung und dem Design der Versuchsdurchführung mit dem Fahrradversuchsträger. Dabei besteht das Ziel darin, die unter Kapitel 5.2 aufgeführten relevanten Parameter für die spätere Auswertung zu ermitteln. In diesem Kapitel wird konkret darauf eingegangen, wie diese Parameter ermittelt werden sollen. Die Realisierung für die praktischen Versuche wird im Kapitel 6.2 beschrieben. Als Versuchsträger stehen ein Fahrrad- und ein Pkw-Versuchsträger zur Verfügung. Bei dem Fahrrad handelt es sich um ein handelsübliches Pedelec, welches um eine C-ITS-Einheit und eine IMU erweitert wird. Der Pkw wird mittels einer Messlösung der Firma Vector dazu befähigt, C-ITS-Nachrichten zu senden und zu empfangen. Eine Kopplung der C-ITS-Einheiten an die jeweiligen internen Bussysteme des Fahrrads und des Pkw ist nicht möglich. In Bild 22 ist die Messkonzeption für die Versuchsträger grafisch dargestellt. Zur Ermittlung von Positions-, Geschwindigkeits-, und Beschleunigungsfehlern der C-ITS-Einheit am Fahrrad ist es notwendig, eine vertrauenswürdige Vergleichsgröße zu ermitteln, gegen die der Fehler bestimmt wird. In dieser Studie ist dies die IMU, die auf dem Fahrrad installiert wird. Diese liefert im Position- und Bewegungsinformationen des Fahrrads mit 200 Hz. Diese werden mit den Positionsinformationen aus dem GNSS-Empfänger der C-ITS-Einheit verglichen. Sie liefert NMEA-Rohstrings mit 10 Hz, welche für eine weitere Auswertung in ein CSV-Format konvertiert werden. Da die C-ITS-Einheit und die IMU zeitlich synchronisiert auf die GNSS-Zeit, jedoch nicht untereinander synchronisiert sind, erfolgt bei der IMU eine deutlich höhere Aufnahme der Informationen. Dadurch wird der Fehler, der durch die nicht synchronisierte Aufnahme der Daten resultiert, auf ein Minimum reduziert. Der Fehler wird maximal die Veränderung der Geschwindigkeit/Position einnehmen, die bei 200 Hz Aufnahmefrequenz innerhalb von 5 Millisekunden auftritt, was bei der zu erwartenden Dynamik des Fahrrads zu vernachlässigen ist. Die Abweichung der Position der GNSS-Antenne der C-ITS-Einheit und der GNSS-Antenne des ADMA-Gerätes wurde mittels Laserentfernungsmessern im Subzentimeterbereich ausgemessen und innerhalb der ADMA hinterlegt. Die ADMA wertet ihre Position hinsichtlich dieser Referenzposition (Position der GNSS-Antenne der C-ITS-Einheit) aus, weshalb keine nachträgliche Kompensation nötig ist.



* ETSI CAM enthält zusätzlich Geschwindigkeit, Heading, Position, Beschleunigung

Bild 22. Messkonzeption

Zur Ermittlung der Güte des Kommunikationskanals werden sowohl am Fahrrad als auch am Pkw die Nachrichtenströme der gesendeten und empfangenen Nachrichten aufgezeichnet. Aus dem Vergleich der Nachrichtenströme erfolgt die Auswertung der Paketfehler, Empfangswahrscheinlichkeiten und Latenzen.

Die Bestimmung des Energiebedarfs erfolgt über eine Auskunft des Herstellers. Eine Messung in der Praxis ist von vielen Randbedingungen abhängig, und ein aussagekräftiges Ergebnis lässt sich anhand der Versuche nicht erzielen.

6.2 Versuchsaufbau

Es werden in Kapitel 6.2.1 der Versuchsaufbau am Fahrrad und in Kapitel 6.2.2 im Pkw beschrieben.

6.2.1 Fahrrad

Der Grundaufbau des Fahrrads besteht aus einer C-ITS-Einheit und einer IMU. Zur Versorgung der IMU mit Energie ist eine weitere Spannungsversorgung nötig. Die Spannungsversorgung muss in der Lage sein, bei Leistungsspitzen zuverlässig die Versorgung und eine einwandfreie Datenaufzeichnung und stabilen dGNSS-Fix der IMU aufrecht zu erhalten. Ein Neustart der IMU sorgt während der Versuchsdurchführung für einen erheblichen Zeitverlust, da die IMU bei jedem Neustart eine längere Zeit benötigt, einen stabilen DGNSS-Fix zu erlangen. Aus diesem Grund ist die Dimensionierung der Spannungsversorgung so zu wählen, dass dies verhindert wird. Die Messaufnahme erfolgt nicht direkt in der IMU, sondern mittels eines dedizierten Messrechners. Alle Komponenten, Messrechner und Spannungsversorgung benötigen einen entsprechenden Bauraum, weshalb das Fahrrad mit einem Fahrradanhänger ausgestattet wurde. In Bild 23 ist der Versuchsaufbau am Fahrrad schematisch dargestellt. Diese Darstellung entspricht auch der Platzierung der Komponenten im Aufbau. Somit ist ein Vergleich mit den Fotos des Aufbaus (siehe Bild 24) möglich.

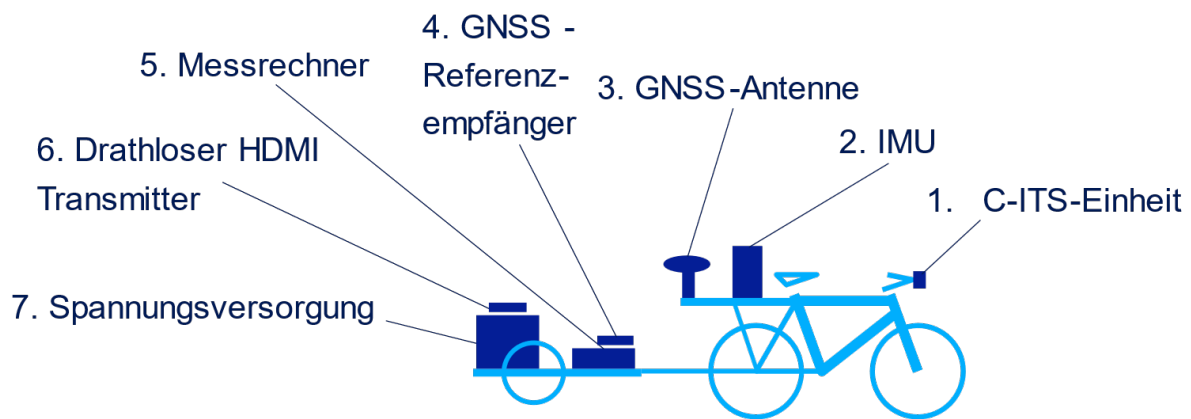


Bild 23. Versuchsaufbau Fahrrad

Folgende Komponenten wurden in dem Aufbau genutzt:

1. C-ITS-Einheit: Als C-ITS-Einheit wurde das Autotalks ZooZ-Gerät in der Version 2 verwendet (Autotalks 2024).
2. IMU-ADMA-G Pro +: Bei der bei der Versuchsdurchführung eingesetzten IMU handelt es sich um eine ADMA-G Pro+ der Firma GeneSys (GeneSys 2024)
3. GNSS-Antenne: GNSS-1-Antennenvariante (Standard, im Lieferumfang der ADMA-G Pro+)
4. GNSS-Referenzempfänger: Die Versorgung des ADMA-Gerätes mit d-GNSS Referenzdaten erfolgte über eine NTRIP-DGNSSBox-4 (GeneSys 2023)
5. Messrechner: DEWETRON DEWE3-M4
6. Wireless HDMI Transmitter: DIGITUS Wireless HDMI KVM Extender Set 200 m, Full HD
7. Spannungsversorgung: ANKER POWER 757



Bild 24. Fahrradaufbau mit Anhänger

Anbringung, Konfiguration und Datenflüsse zwischen den Systemen werden nachstehend erläutert:

C-ITS-Einheit

Die C-ITS-Einheit (1) verfügt über einen V2X-Chip von Autotalks und wird mit einem C-ITS-Stack ausgeliefert. Dieses Gerät kann sowohl Nachrichten über ITS-G5 als auch LTE-V2X versenden. Bei den Versuchsfahrten wurde mit der Technologie ITS-G5 auf dem Kanal 180 mit einer Sendeleistung von 23 dBm konfiguriert. Der C-ITS-Stack sendet kontinuierlich CAMs mit 10 Hz. Die Datenfelder zur Position und Bewegungsinformation in der CAM werden ausschließlich mit GNSS-Informationen befüllt; die ZooZ-interne IMU wird nicht genutzt (siehe Kapitel 8.1.2). Die Aufnahme der gesendeten und empfangenen Nachrichten erfolgte auf der C-ITS-Einheit (1) direkt. Da der GNSS-Empfänger mit dem CITS-Stack per serieller Schnittstelle kommuniziert, ist ein Abgriff auf dieser Schnittstelle nicht rückwirkungsfrei möglich. Eine Alternative besteht in der Nutzung des im Lieferumfang des Geräts enthaltenen Debug-Moduls, mit dem es möglich ist, die NMEA-Nachrichten des GNSS-Empfängers parallel zur Nutzung mitzulesen und aufzuzeichnen. Dieses Debug-Modul muss dazu direkt an dem ZooZ-Gerät (1) und an einem Rechner angebunden werden. Auf das ZooZ-Gerät (1) greift das Modul mit einem prioritären Protokoll zu. An dem Rechner wird es per USB angeschlossen. Bei den Versuchen ist die Anbindung dazu an den Messrechner (5) erfolgt. Die Aufnahme der NMEA-Nachrichten erfolgte durch den Rechner über die serielle Schnittstelle des Debug-Moduls. Die GNSS-Antenne des ZooZ-Gerätes (1) (siehe Bild 25) ist über einen magnetischen Smartphone-Halter direkt über der Ahead-Kappe des Fahrradlenkers platziert. Dies verhindert Abschattungen durch den Fahrer und eine Position, die sich nur im Heading durch die Lenkerbewegung verändert. Eine Anbringung an den Seiten des Lenkers führt je nach Lenkbewegung zu einer mehr oder weniger großen Positionsveränderung in Bezug auf den Mittelpunkt des Fahrrads. Dagegen kommt es auf der Ahead-Kappe zu keiner lenkerabhängigen Positionsverschiebung. Eine Anbringung im hinteren Teil des Fahrrads war aufgrund der dort platzierten Komponenten ADMA (2) und GNSS-Antenne (3) nicht möglich. Als GNSS-Antenne wurde eine aktive Multiband-Antenne-L1/L2 verwendet, welche nicht zum Lieferumfang des ZooZ-Geräts (1) gehört. Dieses ist einem mitgelieferten Halter am Lenker des Fahrrads befestigt worden.



Bild 25. Befestigung des ZooZ Geräts und Position der GNSS-Antenne

ADMA und GNSS-Antenne

Die ADMA (2) und die GNSS-Antenne (3) der ADMA sind wie in Bild 26 dargestellt auf dem Gepäckträger des Fahrrads platziert. Der Gepäckträger wurde dazu mit einer Grundplatte aus Siebdruckholz versehen, die fest mit dem Fahrradrahmen verbunden ist. Auf der Grundplatte ist eine Eisenplatte angebracht, die der magnetischen GNSS-Antenne (3) als Befestigungspunkt dient. Die ADMA (2) wird mit der Siebdruckplatte über Schrauben verbunden. Dazu sind in die Siebdruckplatte passende Gewindehülsen eingelassen, die über ein Feingewinde verfügen. Zudem verfügt die Grundplatte noch über einen Fallschutz aus Aluminium. Dieser soll im Falle eines Sturzes einen direkten Aufschlag der ADMA (2) auf dem Boden verhindern. Die ADMA (2) ist so konfiguriert, dass die virtuelle Messposition auf der Höhe der Position der GNSS-Antenne in X- und Y-Achse des ZooZ-Gerätes (1) liegt und auf der Rollebene bei der Z-Achse. Durch die Konfiguration der X- und Y-Achsen ist keine Anpassung der Positionsdaten für den Vergleich zwischen der Referenzposition des ADMA- (2) und ZooZ-Gerätes (1) nötig. Die Verlagerung der Z-Achse auf die Rollebene führt zu einem stabileren Regelverhalten (Seiniger 2009). Die ADMA (2) wird direkt mit der GNSS-Antenne (3) verbunden. Zudem wird sie per DGNSS-Referenzempfänger (4) mit Korrektursignalen versorgt, die eine hochgenaue Ortung über GNSS ermöglichen. Die Korrektursignale werden von dem Empfänger (4) per GSM vom SAPOS-Dienst in Niedersachsen bezogen. Die Positionsdaten der ADMA (2) werden von dem Messrechner (5) aufgezeichnet. Die Stromversorgung erfolgt über eine Powerbank (7), die auf dem Fahrradanhänger mitgeführt wird.

Messrechner, GNSS-Referenzempfänger, Wireless HDMI Transmitter und Spannungsversorgung

Die Einheiten DGNSS-Referenzempfänger (4), Messrechner (5), Wireless HDMI Transmitter (6) und Spannungsversorgung (7) sind in dem Fahrradanhänger platziert. Die Befestigung erfolgt mittels Spanngurten. Ein fester Einbau in einen Profilrahmen wurde nicht vorgenommen, da die Einheiten nicht ausschließlich für dieses Projekt zur Verfügung standen. Damit die Systeme während der Versuchsdurchführung überwacht und gesteuert werden können ist die HDMI- und USB-Schnittstelle des Messrechners (5) mittels Wireless HDMI Transmitter (6) an einen mobilen Arbeitsplatz übertragen worden. An dem mobilen Arbeitsplatz wird die Datenaufnahme der gesendeten- und empfangenen Nachrichten sowie der NMEA-Nachrichten des ZooZ-Gerätes (1) für jede Messfahrt gestartet und gestoppt. Zudem wird dort die ADMA (2) laufend überwacht und die Messung gestartet und gestoppt. Die Überwachung/Steuerung hat den Vorteil, dass Fehler während der Messung direkt erkannt werden und eine Wiederholung unverzüglich erfolgen kann. Zudem ist die Versuchsdurchführung effizienter. Der Fahrradfahrer kann während der Datensichtung bereits wieder die Ursprungsposition für die nächste Versuchsdurchführung einnehmen. Die GSM-Antennen des DGNSS-Referenzempfänger (4) sind an den Seiten des Fahrradanhängers montiert. Der Messrechner (5) ist wie bereits beschrieben mit der ADMA (2) gekoppelt und an das ZooZ-Gerät (1) angebunden und fungiert als zentraler Knoten zur Steuerung und Datenaufnahme. Die Live-Sichtung und Sicherung der Information von der ADMA (2) erfolgt über die Messsoftware OXYGEN von DEWITRON (DEWETRON 2024). Sämtliche Systeme auf dem Anhänger werden über die Spannungsversorgung (7) mit Leistung versorgt. Bei Bedarf erfolgt eine Spannungsversorgung der C-ITS Einheit (1) über einen USB-Port des Messrechners (5).



Bild 26. ADMA und GNSS-Antenne am Fahrrad

6.2.2 Pkw

Der Pkw wurde mittels einer C-ITS-Messeinheit von Vector (VN 4610) (Vector 2024) dazu befähigt, C-ITS-Nachrichten zu versenden. Auf seinem Fahrzeugdach ist eine externe magnetische Antenne von Mobilmark mit einem Antennengewinn von 5 dBi für die ITS-G5-Kommunikation montiert. Diese wurde durch eine GNSS-Antenne aus dem Lieferumfang des Vector-Systems ergänzt. Die Steuerung der C-ITS-Einheit erfolgt über einen Laptop mit der Software CANoe von Vector, die eine eigene Messkonfiguration verwendet. Die Bild 27 zeigt einen Screenshot der Messkonfiguration eines Dooring-Versuchs. Die CAM des Versuchsfahrzeugs wird von CANoe über die VN 4610 mit einer Sendeleistung von 23 dBm gesendet. Die Senderate entspricht den CAM Generation Rules des Standards (ETSI 2019a). CANoe ist so konfiguriert, dass die vom Pkw verschickte CAM der Position der C-ITS-Einheit entspricht und direkt beim Starten der Konfiguration versendet wird. In CANoe sind mehrere Fenster zu sehen; so beispielsweise die gesendeten und empfangenen Nachrichten im Trace-pWLAN-Fenster. Dort können beispielsweise Inhalte der Nachricht, der C-ITS-Header, Empfangszeit/-rate oder Empfangsstärke direkt während der Messung eingesehen werden. Das „Kartenfenster“ stellt die Szenarien grafisch auf einer OSM-Karte dar. Vergleichbar zur grafischen Darstellung des mobilen Arbeitsplatzes können Fehler in der Messung oder fehlerhafte Versuchsdurchführungen direkt erkannt und korrigiert werden. CANoe zeichnet zur späteren Auswertung sämtliche empfangene als auch gesendete C-ITS-Nachrichten auf. Zudem erfolgt eine Aufnahme der Systemvariablen. Diese enthalten die Informationen über den GNSS-Empfänger der VN 4610. Neben der Aufzeichnung und Live-Auswertung ist es möglich, in CANoe historische Messdaten abzuspielen und somit im Nachgang zu analysieren. Die Stromversorgung für den Laptop mit der Software CANoe als auch für die VN 4610 wird über die Bordspannungssteckdose realisiert.

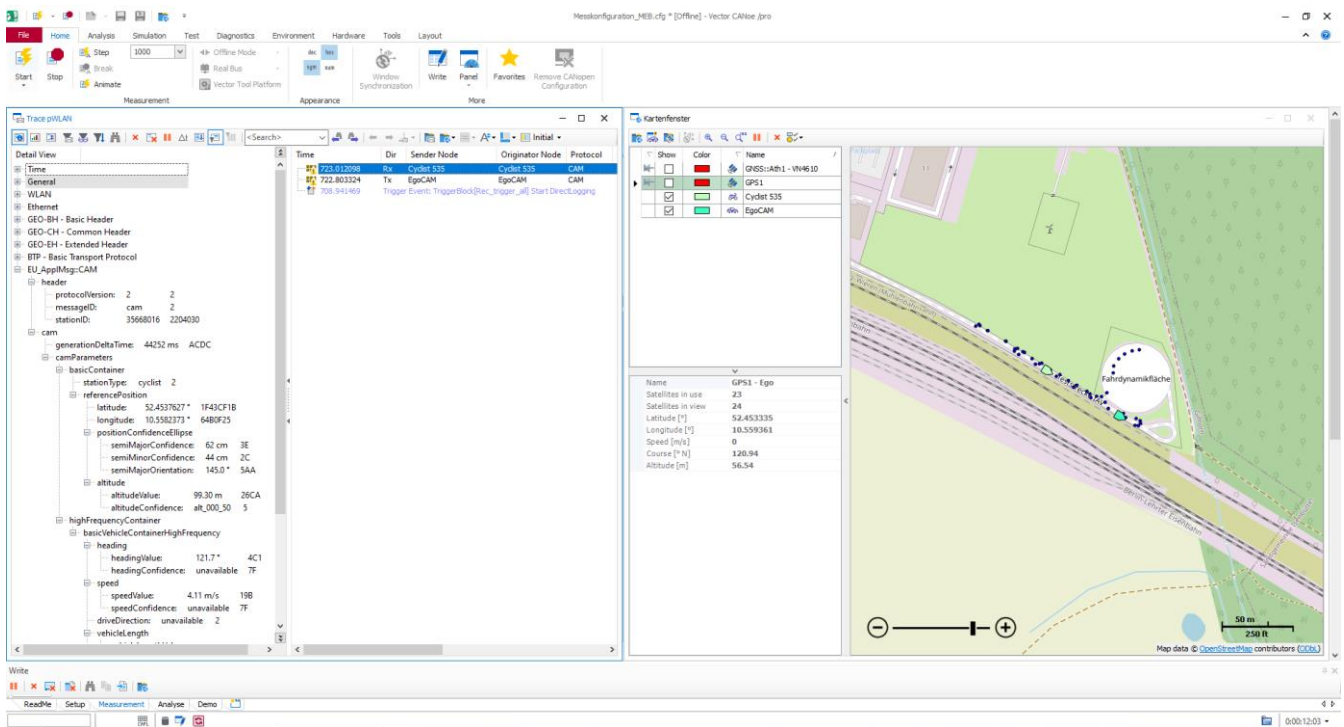


Bild 27. Screenshot aus der Vector-Messkonfiguration (Beispiel Dooring-Versuch)

6.3 Versuchskonzeption

6.3.1 Übergreifende Informationen zur Versuchskonzeption

Im Rahmen der Studie gilt es die unter Kapitel 5.1.4 (Szenario 1: Dooring), 5.1.5 (Szenario 2: Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342) und 5.1.6 (Szenario 3: Ausfahren aus einer Ausfahrt) definierten Szenarien in der Praxis nachzubilden und Messdaten für eine offline-Auswertung einzufahren. Als Versuchsorte sind ein Testgelände und die Umgebung um einen Bürokomplex auf dem Standort des Konsortialführers IAV vorgesehen (siehe Bild 28). Auf dem Testgelände liegen weder mögliche Signalbeeinflussungen (z. B. Mehrwegeausbreitung GNSS, Störungen der ITS-G5-Kommunikation) der Versuchsteilnehmer durch Gebäude noch Vegetation vor, so dass man von Freifeldversuchen an einem funktechnisch idealen Versuchsort sprechen kann. Im Gegensatz dazu stellt die Umgebung um den Bürokomplex durch seine komplexere Umgebung eine Herausforderung hinsichtlich der Abschätzung von GNSS und Mobilfunk dar. An diesem Versuchsort sollen die Bedingungen nachgestellt werden, wie sie ansonsten in der Stadt zu finden sind (Urban Canyon). Dieser Bürokomplex umfasst fünf Stockwerke mit einem Hauptgebäude und von dem Hauptgebäude abgehende Nebengebäude (als Gebäudefinger bezeichnet). In Bild 28 sind beispielhaft die Gebäudefinger 2 bis 5 dargestellt.

Für die Versuche zu den Szenarien 2 und 3 findet hinsichtlich der Bewegungsparameter nur eine Richtungsumkehr des Fahrradfahrenden statt. Bei Szenario 2 kommt dieser aus Sicht des Pkw von rechts und in Szenario 3 von links. Die Richtung des Pkw bleibt unverändert. Der Unterschied kann als Spiegelung am Treffpunkt von Fahrrad und Auto beschrieben werden. Hinsichtlich der Kommunikationsparameter führt dies zu keiner Veränderung. Aus diesem Grund erfolgten eine Zusammenlegung der Versuchsdurchführung und Auswertung für die Szenarien 2 und 3. Die Versuche sind für zwei unterschiedliche Geschwindigkeiten des Fahrrads und Pkw durchzuführen, einmal mit 15 km/h und einmal mit

20 km/h. Die Geschwindigkeiten wurde anhand einer Untersuchung des DLR an der Forschungskreuzung gewählt. Dort betrug die mittlere Geschwindigkeit der Fahrradfahrenden an einem Kreuzungsarm auf dem Radweg vor der Radfahrerfurt 17,6 km/h. Dieser Wert wurde anhand von 16.060 Radfahrertrajektorien im Zeitraum vom 22.08. – 28.08.2016 ermittelt.



Bild 28. Versuchsorte am IAV-Standort in Gifhorn: Gebäude 5 mit Ansicht auf die Nebengebäude Finger 2 bis 5 (links); Testgelände (rechts)

6.3.2 Versuchsaufbau Szenario 1: Dooring

Bei dem Dooring-Versuch ist der Pkw statisch am Punkt A1 geparkt, so dass A1 zugleich dem Konfliktpunkt CP entspricht. Der Messvorgang wird gestartet. Der Radfahrende nähert sich A1 mit konstanter Geschwindigkeit von Startpunkt R1 und passiert den Pkw bis zum Punkt R2. Aus Sicherheitsgründen wird die Fahrertür des Pkw während der Versuche nicht geöffnet. Dies hat auf die Kommunikations- und Lokalisierungseigenschaften keinen Einfluss. Der Radfahrende stoppt an R2, und der Messvorgang wird sowohl am Fahrrad als auch im Pkw gestoppt. Eine messtechnische Erfassung der der Rückfahrt des Radfahrenden von R2 zu R1 erfolgt nicht. In Bild 29 ist das Dooring-Szenario schematisch auf einer OSM-Karte, und in Bild 30 sind beispielhaft zwei Fotos aus der Versuchsdurchführung dargestellt.

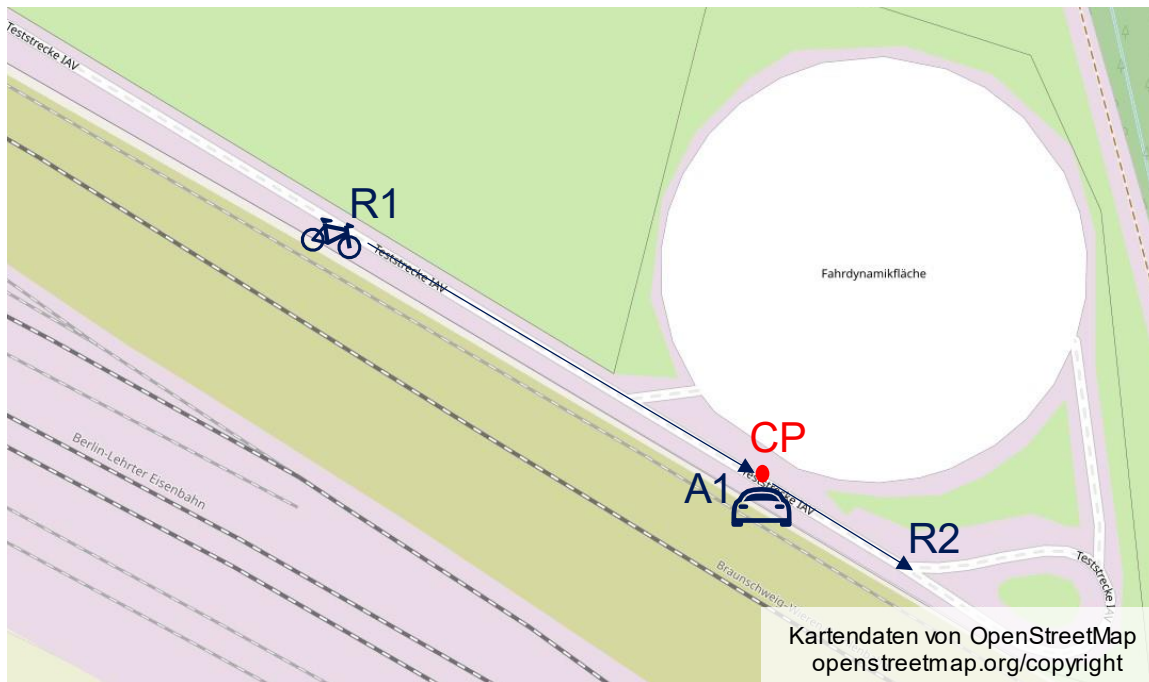


Bild 29. Szenario 1: Schematische Beschreibung des Szenarios 1 (Dooring)

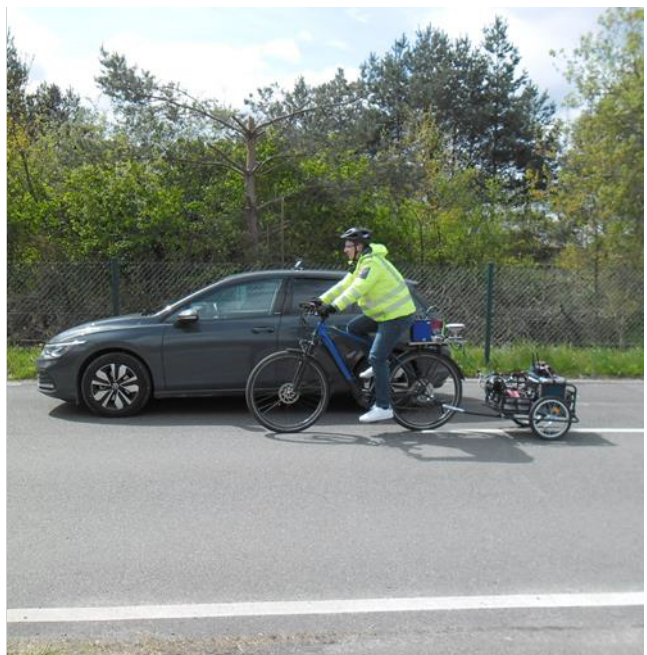


Bild 30. Versuchsdurchführung Szenario 1: Dooring (links: Frontalansicht, rechts: Seitenansicht)

6.3.3 Versuchsaufbau Szenario 2: Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahren nach GDV 342

Im Gegensatz zum Dooring-Versuch bewegt sich der Pkw (siehe Bild 31). Das Fahrrad fährt die gleiche Trajektorie wie beim Dooring. Es startet an der Position R1 und fährt mit konstanter Geschwindigkeit auf den Punkt CP zu. Der Pkw startet mit etwa gleichem zeitlichen und räumlichen Abstand zum CP am Punkt A1 und fährt mit der gleichen Geschwindigkeit wie das Fahrrad auf CP zu. An dem Punkt A2 kommt der Pkw zum Stehen und fährt aus

Sicherheitsgründen nicht in die Trajektorie des Fahrrads ein, um mögliche Kollisionen zu vermeiden. Vor der Versuchsdurchführung ist der optimale Bremspunkt zu bestimmen und zu markieren. Der gewählte Bremspunkt sieht weiterhin einen Sicherheitsabstand zum CP vor, um bei einer verzögerten Bremsung am Bremspunkt eine Gefährdung des Fahrradfahrers auszuschließen. Der Fahrradfahrer passiert CP und fährt bis zum Punkt R2 mit konstanter Geschwindigkeit weiter. Der Messvorgang wird am Fahrrad als auch im Pkw an R1 bzw. A1 gestartet und bei Erreichen von R2 gestoppt. Die Rückfahrt von R2 bzw. A2 zu R1 bzw. A1 wird nicht aufgezeichnet. In der Bild 31 ist dieses Szenario schematisch auf einer OSM-Karte, und die Beispielbilder der Versuchsdurchführung sind in Bild 32 dargestellt.

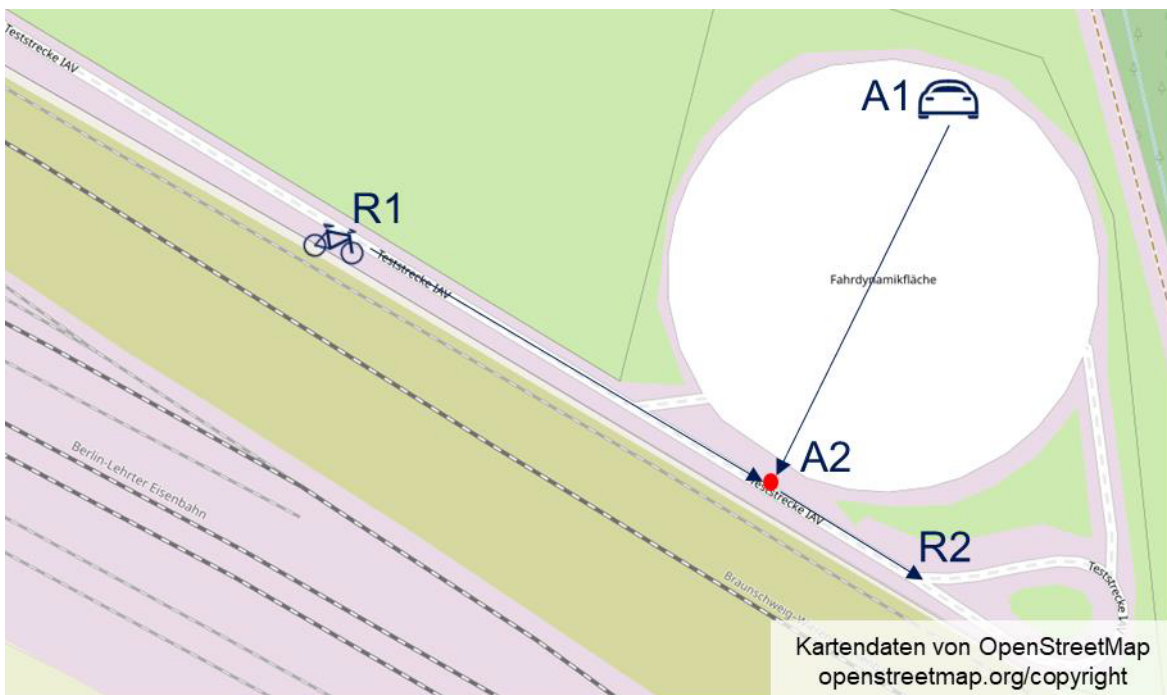


Bild 31. Szenario 2: Schematische Beschreibung des Szenarios 2 Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahren nach GDV 342



Bild 32. Versuchsdurchführung Szenario 2: Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

6.3.4 Versuchsaufbau Szenario 3: Ausfahren aus einer Ausfahrt

In Analogie zum Szenario 2 (siehe Bild 33) bewegen sich sowohl Pkw als auf Fahrrad bei der Ausfahrt aus einer Ausfahrt mit einem nahezu identischen Bewegungsablauf. Der Unterschied besteht lediglich in der Bewegungsrichtung des Radfahrenden sowie der Durchführung als Abschattungsversuch am Gebäudekomplex der IAV. Der Radfahrende kommt in der gewählten Konstellation von links aus Sicht des Pkw. Sowohl der Radfahrende als auch der Pkw-Führende können sich erst spät kurz vor CP wahrnehmen, was aus dem Kartenausschnitt in Bild 33 und den Gebäudefingern in Bild 28 (links) erkennbar ist. Für die Kommunikation und den GNSS-Empfang stellen diese Nebengebäude eine Störung dar, da die Signale Mehrwegeausbreitungseinflüssen unterliegen. Zur sicheren Durchführung des Versuches aus ethischen Gründen wurde nicht nur ein Bremspunkt mit Sicherheitsabstand definiert, sondern auch ein Streckenposten am Konfliktpunkt positioniert, der die Versuchsdurchführung überwachte und die Versuchsteilnehmer informieren konnte. Beispiel-fotos der Versuchsdurchführung sind unter in Bild 34 dargestellt.

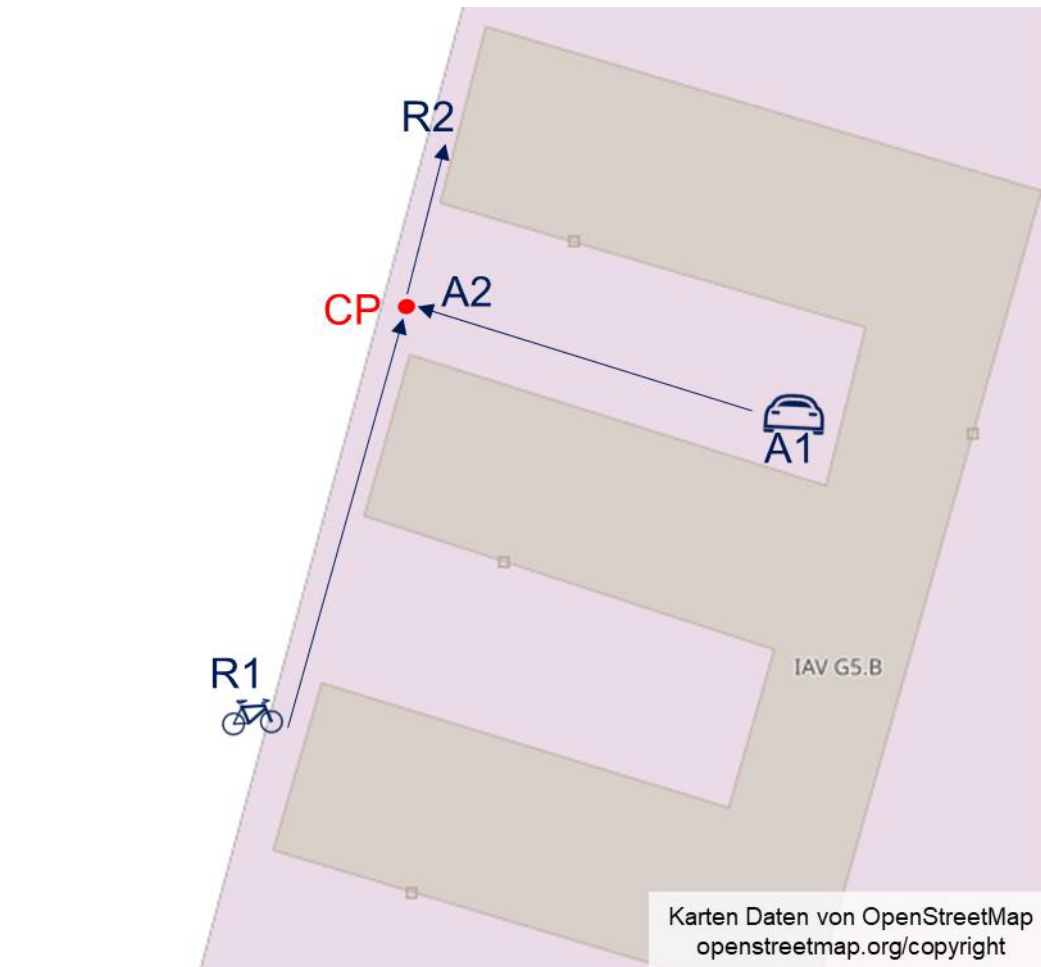


Bild 33. Szenario 3: Ausfahren aus einer Ausfahrt



Bild 34. Versuchsdurchführung Szenario 3: Ausfahren aus einer Ausfahrt

6.4 Bewertung und Erkenntnisse der Versuchsdurchführung

Alle Fahrversuche wurden von den Teilnehmenden als realistisch beurteilt. Hinsichtlich der gefahrenen Geschwindigkeiten wurde der Fahrradfahrer als angemessen schnell wahrgenommen. Bei Szenario 2 (Abbiegen mit kreuzendem Radfahrer nach GDV 342) im Freifeld wurde die Geschwindigkeit des Pkw als zu gering wahrgenommen, während sie bei Szenario 3 (Ausfahrt aus einer Einmündung) kurz vor dem Konfliktpunkt als zu hoch wahrgenommen wurde. Aufgrund der ungünstigen Sichtverhältnisse war ein langsames Annähern an den Konfliktpunkt erforderlich. Die bei diesem Versuch gewählte Geschwindigkeit des Pkw wurde bei diesem Szenario maßgeblich von dem individuellen Empfinden des Pkw-Führenden und den Sichtverhältnissen bestimmt.

Bei der Durchführung der Versuche im Freifeld wurde bei unbewegtem Pkw bei dem System von Vector eine große Positionsveränderung um bis zu 50 m in CANoe festgestellt. Zu diesem Zeitpunkt wurde die GNSS-Antenne von der kombinierten Antenne von Mobilmark genutzt. Da diese fehlerhafte Bewegung bei anderen früheren Versuchen mit der GNSS-Antenne im Lieferumfang von Vector nicht festgestellt werden konnte, wurde infolgedessen die GNSS-Antenne getauscht. Das führte zu einer deutlich stabileren Verortung des Systems. Die genaue Fehlerursache konnte anhand der vorliegenden Antennendatenblätter nicht identifiziert werden. Es wurde daher auf einen Defekt in der zuvor verwendeten Antenne geschlossen. Diese Feststellung zeigte deutlich, dass der Auswahl der GNSS-Antenne für das spätere Produktivsystem große Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte.

Bei der Versuchsdurchführung von Szenario 3 wurde die nativ auf dem ZooZ-Gerät implementierte Warnung des Radfahrenden vor einem mit der Geschwindigkeit von 20 km/h kreuzenden Pkw zuverlässig ausgelöst. Das ZooZ-Gerät wertete dabei die CAMs der umliegenden Teilnehmer aus. Anhand eines vom Anbieter nicht offengelegten Bewertungsalgorithmus wird eine akustische und optische Warnung ausgegeben. Diese Warnung wurde von den Radfahrenden als positiv bewertet. Eine erforderliche Bremsung beim ersten Sichtkontakt zum Pkw wäre von den Radfahrenden subjektiv als kritisch eingestuft worden.

7 Versuchsauswertung

Wesentliche Voraussetzung zur verlässlichen Information oder Warnung von Verkehrsteilnehmern bei kritischen Situationen ist die akkurate und verlässliche Lokalisierung der Verkehrsteilnehmenden sowie die Sicherstellung eines stabilen Kommunikationskanals, der die Anforderung der Applikation unterstützt. Um das zu quantifizieren, wurden drei unterschiedliche, besonders praxisrelevante Szenarien untersucht (1. Dooring, 2. Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden, 3. Ausfahren aus einer Ausfahrt). Die Fahrversuche wurden dabei bei 1. und 2. im Freifeld, bei 3. in einem funktechnisch abgeschatteten Umfeld durchgeführt, um realistische Auswirkungen zur Beeinflussung der Messungen durch Mehrwegeausbreitung und Paketverluste und die resultierenden Einflüsse auf die Lokalisierungsgenauigkeit zu untersuchen. Die Versuche sowie die daraus resultierenden Auswertungen sind als Durchstiche von praxisnahen Situationen zu betrachten und nicht als allgemeingültig für alle Szenarien anzusehen. Das Gesamtsystem ist darauf ausgelegt, Messgrößen zu validieren. Für eine Umsetzung in der Praxis ist die Validierung von Messgrößen nicht mehr nötig und die Komplexität des Systems kann erheblich reduziert werden, daher sind die verwendeten Versuchskomponenten in Bezug auf ihre Leistungsfähigkeit und Eignung für den Serieneinsatz zu hinterfragen.

Der Fokus lag dabei auf der Auswertung des Kommunikationskanals und der Positionierungsgenauigkeit, wie sie im Folgenden präsentiert werden.

7.1 Kommunikationskanal

In diesem Kapitel erfolgt die Auswertung zu dem Kommunikationskanal zwischen der C-ITS-Einheit am Fahrrad und der C-ITS-Einheit am Fahrzeug. Details zu den verwendeten Einheiten sind in dem Kapitel 6.2 zu finden. Zunächst wird auf die Latenz und das generelle Sendeverhalten eingegangen. Anschließend wird der Paketverlust, welcher in den jeweiligen Szenarien erfahren wurde, dargestellt. Nachfolgend erfolgt eine Diskussion zu dem Update-Delay. Dieses beschreibt wie viele Pakete zwischen zwei erfolgreich übermittelten Paketen verloren gehen. Das Situationsbewusstsein am Empfänger sinkt stärker, wenn mehrere Pakete aufeinanderfolgend verloren gehen, als wenn nur einzelne Pakete zwischen weiteren erfolgreich übertragenen Paketen verloren gehen. Abschließend wird die Auswertung zu dem Kommunikationskanal in einem Fazit zusammengefasst.

7.1.1 Latenz und Sendeverhalten

Die Latenz und das Sendeverhalten sind nicht abhängig von dem gefahrenen Szenario. Aus diesem Grund wird auf eine Darstellung pro Szenario verzichtet. Zudem zeigen alle Messergebnisse das gleiche Verhalten jeweils zwischen den Teilmessungen als auch zwischen den Szenarien. Untersucht wird die Informationslatenz. Dies ist nicht die reine Übertragungszeit in der Kommunikation von Teilnehmer A zu Teilnehmer B, sondern das Informationsalter, welches der Empfänger erfährt. Die Informationslatenz ist im Vergleich zur Übertragungslatenz zum Beispiel erhöht, wenn der Sender eine bereits ältere Positions- und Zeitangabe in dem Paket verwendet oder das Paket aufgrund einer regulatorischen Beschränkung nicht direkt auf den Kanal geben darf.

Methodik

Zur Bestimmung der Latenz und des Sendeverhaltens ist das zu untersuchende Gerät die ZooZ-Einheit auf dem Fahrrad. Das Aufnahme- und Vergleichssystem ist die Vector-Einheit im Versuchs-Pkw. Die gemessene Latenz im Rahmen der Versuche ist die Zeitdifferenz zwischen dem Generieren des Pakets beim Sender (ZooZ-Einheit) und dem Zeitpunkt an dem die Nachricht beim Empfänger (Vector-System im PKW) entpackt und dekodiert zur Verfügung steht. Beide Systeme nutzen als Zeitbasis die GNSS-Zeit aus ihren jeweiligen Empfängern. Je nach genutzten Satelliten und GNSS kann diese Zeit minimal unterschiedlich sein. Insgesamt ist diese Zeitdifferenz zu vernachlässigen.

Auf der ZooZ-Einheit steht die GNSS-Zeit nur dem C-ITS-Stack zur Verfügung. Die ZooZ-Systemzeit ist nicht gegen die GNSS-Zeit synchronisiert. Eine Synchronisation ist ohne ein Custom-Betriebssystem zudem nicht möglich. Aus diesem Grund steht keine Messmethode auf der ZooZ-Einheit mit nutzbaren absoluten Zeitstempeln zur Verfügung. Die Ermittlung der Latenz erfolgte ausschließlich auf Basis der Messdateien beim Empfänger. In der Nachricht, die von der ZooZ-Einheit erzeugt wird, sind insgesamt zwei Zeitstempel vorhanden. Der erste Zeitstempel ist die Generation-Delta-Time in der CAM. Diese wird über eine Modulo-Operation mit der ITS-Time gebildet. Der Divisor ist 65 536. Dabei ist die ITS-Time eine Zeitbasis in Millisekunden ausgehend von dem 01.01.2004 um 0:00 Uhr gemessen in der TAI-Zeit. Somit wiederholt sich der Zeitstempel alle 65 536 Millisekunden und ist für Auswertung nur eingeschränkt brauchbar, da zur Rekonstruktion jeweils der aktuelle Zeitstempel beim Empfang der Nachricht nötig ist. Einfacher zu nutzen ist der Zeitstempel im sogenannten Long Position Vector aus dem Geonetworking Protokoll. Dieser wird auch mit der ITS-Time und einer Modulo-Operation gebildet. Jedoch ist der Divisor mit 2^{32} deutlich größer. Dadurch kommt es nur ca. alle acht Jahre zu einem Überlauf. In den Versuchen im Rahmen des Projektes ist es zu keinem Überlauf gekommen.

In der Messdatei selbst sind alle Nachrichten relativ zum Beginn der Messung mit einem Zeitstempel versehen. In der Auswertung wurde zur Ermittlung der Latenz eines Pakets die Differenz des Zeitstempels der gesendeten Nachricht mit dem Empfangszeitstempel in der Messdatei berechnet. Da in der Messdatei die Zeitstempel relativ, jedoch nicht zueinander synchronisiert sind, wurde mit der ersten gesendeten Nachricht des Messfahrzeugs ein Nullzeitpunkt festgelegt. Mit diesem Nullzeitpunkt und den relativen Zeiten in der Messdatei wurden für den Empfangszeitpunkt absolute Zeitpunkte errechnet, die in dem Vergleich genutzt wurden.

Auswertungsergebnis einer Einzelmessung

Bild 35 zeigt eine exemplarische Latenzmessung aus einem Dooring-Versuch. Auf der Abszisse ist die Nummer des gesendeten Pakets von der ZooZ-Einheit aufgeführt. Auf der Ordinate ist die Latenz zwischen dem Zeitpunkt der Erzeugung der Nachricht und dem Zeitpunkt des Empfangs der Nachricht zu sehen. Insgesamt sind drei Besonderheiten zu erkennen die zunächst nicht durch das Projektteam erwartet worden sind. Die Besonderheiten sind weiterhin so in jeder Messung wieder zu finden und lassen sich nach einer genaueren Analyse erklären.

1. Spitzen ca. alle zehn Nachrichten

Die Spitzen, die alle zehn Nachrichten auftreten, lassen sich über nicht synchronisierte Prozesse auf der ZooZ-Einheit erklären. In der ZooZ-Einheit ist der C-ITS-Stack so konfiguriert alle 100 Millisekunden eine Nachricht zu erzeugen. In der Basis Konfiguration liefert der GNSS-Empfänger alle 100 Millisekunden ein Update

der Position auf der internen Schnittstelle, die dem C-ITS-Stack zur Verfügung gestellt wird. Beide Prozesse arbeiten dabei nicht synchron. Gemäß dem ETSI-Standard sind die Position und Zeit der Nachricht bei der Generation immer auf den letzten bekannten Zeitpunkt zu setzen, dies sowohl für den Zeitstempel in der CAM (ETSI 2019a) als auch in dem Geonetworking-Header (ETSI 2020a). Somit kann es vorkommen, dass der C-ITS-Stack eine Nachricht generiert, ohne dass der GNSS-Empfänger ein neues Positionsupdate zur Verfügung gestellt hat. Der Stack nutzt somit das letzte Positionsupdate für die Nachrichtengeneration welches 100 Millisekunden alt ist. Dadurch springt auch die Empfangslatenz genau um diese 100 Millisekunden gegenüber der Basislinie nach oben.

2. Zufällige Spitzen

Die zufälligen Spitzen (in der gezeigten Grafik in Summe zwei) sind sporadisch in einzelnen Messergebnissen in variierenden Häufigkeiten zu beobachten. Bei diesen Messergebnissen sind drei Nachrichten in Folge mit der gleichen Zeit und Position versendet worden. Somit springt die Latenz um 200 Millisekunden. Bei Einzelanalysen der Messdaten konnte festgestellt werden, dass zu diesen Zeitpunkten durch den GNSS-Empfänger keine neuen Informationen auf der Schnittstelle zum Stack bereitgestellt wurden.

3. Sägezahnmuster in der Latenz

Neben den Spitzen ist ein wiederkehrendes Sägezahnmuster zu sehen. Dieses Muster wiederholt sich in allen Messungen nach ca. 200 Nachrichten. Die Erklärung für dieses Verhalten liegt in dem nicht exakt konstanten Takt der gesendeten Nachrichten. Die ZooZ-Einheit sendet die Nachrichten nicht exakt im 10-Hz-Takt, sondern mit einer leicht darunter liegenden Frequenz (gemessen anhand der Messdateien der gesendeten Nachrichten an der ZooZ-Einheit). Der GNSS-Empfänger hingegen ist näher an dem 10-Hz-Takt. Dadurch laufen die beiden Prozesse Positionsbereitstellung und CAM-Generation auseinander. Zunächst steigt die Basislatenz an. Die Nachricht wird mit einem Positions- und Zeitsignal befüllt, was zunehmend älter ist. An einem bestimmten Zeitpunkt überholt der GNSS-Empfänger die CAM-Generation und die Latenz fällt um einen Taktzyklus von 100 Millisekunden. Die negative Zeit ist über die fehlende absolute Zeitbasis an der ZooZ-Einheit zu erklären. Die Festlegung des Nullpunktes am Empfänger erfolgt zu einem unbekanntem Zeitpunkt in dem Sägezahnmuster. Die Theorie zur Bildung des Sägezahnmusters kann über den Takt validiert werden. Die Taktverschiebung in dem Fall der Messung gegenüber einem genauen 10-Hz-Takt beträgt 0,48 Millisekunden, dividiert durch die Sprungzeit von 100 Millisekunden ergibt sich eine Anzahl von 208 Paketen. Diese Anzahl findet sich in der Grafik als Umlaufzeit des Sägezahnmusters wieder. Die Zeit des Sendeintervalls ist zwischen den Messungen jeweils leicht unterschiedlich gewesen. Bei Stichprobenanalysen konnte die Berechnung der Umlaufzeit über die Paketanzahl bestätigt werden.

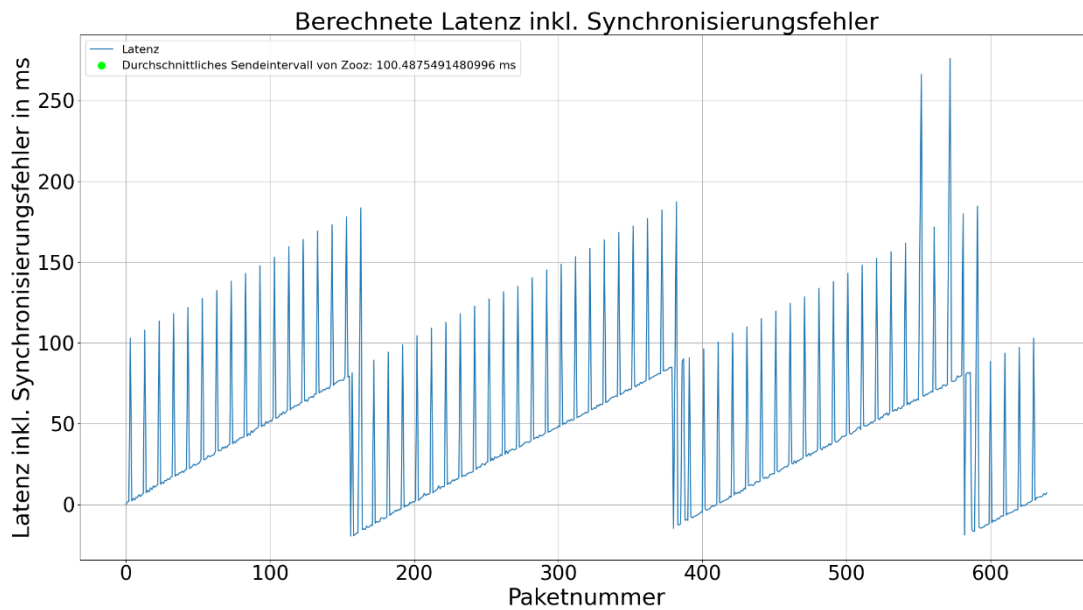


Bild 35. Ergebnisse der Latenzmessung aus einem Dooring-Versuch

Nachgelagerte Tests mit einer geänderten Updaterate des GNSS-Empfängers

Der an der ZooZ-Einheit verwendete GNSS-Empfänger ist variabel in der Ausgabefrequenz der GNSS-Informationen zwischen 1 und 30 Hz. Um die erläuterten Einflüsse zu bestätigen sind Nachtests zum Sendeverhalten mit unterschiedlichen Updateraten durchgeführt worden. Exemplarisch ist in Bild 36 die Latenz bei einer Updaterate von 29 Hz gezeigt. Das Sägezahnmuster ist in diesem aufgebrochen und die Amplitude der Hüllkurve ist auf ca. 35 Millisekunden gefallen. Dieses Verhalten spiegelt wider, dass die Position ungefähr dreimal häufiger geupdatet wird als das Aussenden einer Nachricht. Die in der Nachricht verwendeten Positions- und Zeitsignale sind somit maximal 35 Millisekunden alt. Die Spitzen treten weiterhin auf, wenn einzelne Nachrichten des GNSS-Empfängers fehlen bzw. nicht aktualisiert wurden. Bei Tests mit einer Frequenz von 20 und 30 Hz ist das Sägezahnmuster wieder feststellbar jedoch mit einer geringeren Amplitude. Das Muster liegt darin begründet, dass Nachrichten-Generationsfrequenz und die GNSS-Ausgaberate einen ganzzahligen Teiler besitzen.

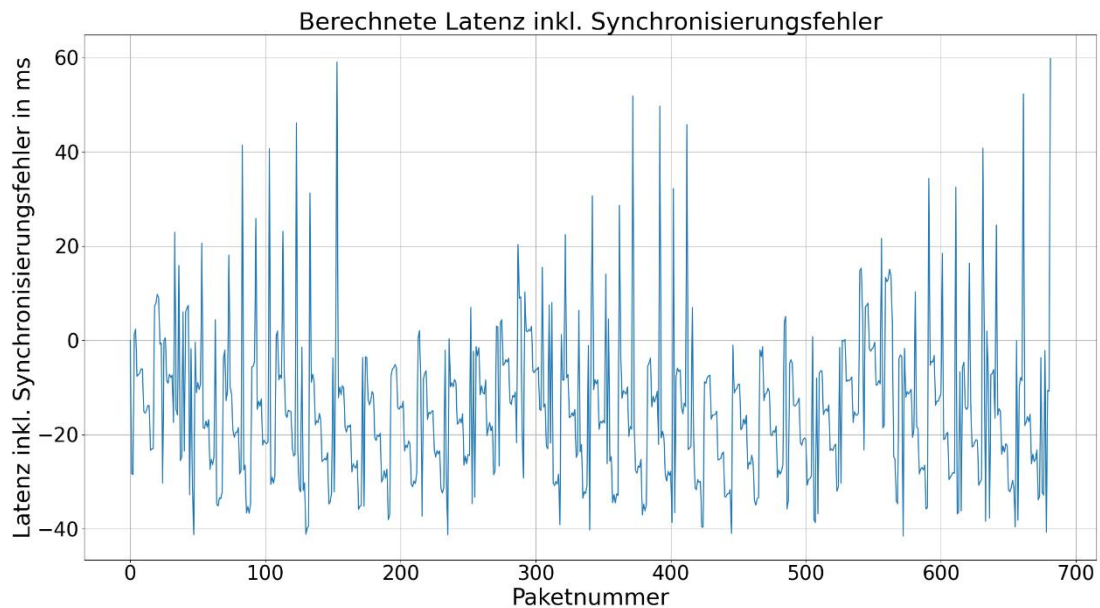


Bild 36. Darstellung der Latenz mit einer Ausgaberate von 29 Hz

Fazit des Latenz- und Sendeverhaltens

Eine dedizierte Messung der Ende-zu-Ende-Latenz hinsichtlich der Nachrichtengeneration, Übertragung und Dekodierung war aufgrund der fehlenden absoluten Zeitstempel auf der ZooZ-Einheit nicht möglich. Eine manuelle Synchronisierung des Gerätes zu Beginn der Messungen ist aufgrund der zeitlich geringen Messgröße nicht für eine Auswertung der Latenz belastbar. Jedoch zeigt die Auswertung deutlich, dass die Latenz für die Empfänger der Nachrichten maßgeblich von dem Systemverhalten abhängt. Gerade die Bereitstellung der Positions- und Zeitinformation an den C-ITS-Stack ist dabei ausschlaggebend, und diese Quelle ist vollständig unabhängig von der verwendeten Kommunikationstechnologie. In Summe ist festzustellen, dass die direkte Nahbereichskommunikation über ITS-G5 zusammen mit den systembedingten Zusatzlatenzen aus dem Zusammenspiel zwischen den GNSS-Empfänger und der CAM-Generation, welche den deutlich größeren Teil der Gesamtlatenz ausmachen, eine Information in den überwiegenden Fällen in unter 100 Millisekunden bereitstellen kann. Möglichkeiten zur Verringerung der systembedingten Latenz durch den GNSS-Empfänger sind

- die Synchronisation der Prozesse zur Nachrichtengeneration und zur GNSS-Datenbereitstellung,
- eine erhöhte Ausgaberate des GNSS-Empfängers zu nutzen (in Kapitel 8.1 wird auf Vor- und Nachteile dieser Maßnahme eingegangen) und
- die Verwendung der CAM-Generationsregeln des ETSI-Standards. Diese regeln die Generationsrate überwiegend durch die Dynamikveränderung von Position, Geschwindigkeit und Heading. In den Versuchen wurde darauf bewusst verzichtet, da diese zu einer ungleichmäßigen Erzeugung der Nachricht führen, wodurch die wissenschaftliche Auswertung des Kommunikationskanals erschwert wird.

7.1.2 Paketverlust

In diesem Kapitel wird auf die Paketverluste eingegangen, die während der Versuche messtechnisch ermittelt wurden. Die Versuche wurden ohne Geonetworking-Security (GN-Security) durchgeführt. Dementsprechend ist zu berücksichtigen, dass mit GN-Security die Pakete größer werden und die Fehleranfälligkeit steigt. Zunächst wird auf die Differenz der Paketverluste eingegangen, die zwischen den Kommunikationsrichtungen, d. h. Fahrrad zu Pkw und Pkw zu Fahrrad, aufgetreten sind. Anschließend wird die Methodik der Paketverlustauswertung dargestellt. Nachfolgend werden die Ergebnisse für die drei untersuchten Szenarien dargestellt und diskutiert. Zuletzt erfolgt ein Fazit der Paketverlustuntersuchung.

Differenz der Paketverluste in Abhängigkeit der Kommunikationsrichtung

Im Rahmen der Auswertung der Versuche wurde festgestellt, dass eine erhebliche Differenz zwischen den Paketverlusten in Abhängigkeit der Kommunikationsrichtung aufgetreten ist. Die Kommunikationsrichtung bezieht sich dabei auf die Rolle des Senders und die des Empfängers bei den Versuchen. Die Kommunikationsrichtung Fahrrad zu Pkw bezeichnet die Rolle des Fahrrads als Sender und des Pkws als Empfänger der Nachrichten. Umgekehrt bezeichnet die Kommunikationsrichtung Pkw zu Fahrrad die C-ITS-S im Pkw in der Rolle des Senders und die ZooZ-Einheit auf dem Fahrrad als Empfänger der Nachrichten.

Während bei den Auswertungen der Paketverluste vom Pkw zum Fahrrad in allen Versuchen und Szenarien unterschiedliche Paketverluste in Abhängigkeit der Entfernung festgestellt wurden, waren bei der Kommunikationsrichtung vom Fahrrad zu Pkw in sämtlichen Messungen gar keine Paketverluste festzustellen. Diese große Differenz wurde nicht erwartet. Für einen Empfänger ist die empfangene Signalstärke (Englisch: „Received Signal Strength Indicator“ (RSSI)) und der Signal-Rausch-Abstand (Englisch: Signal-to-noise ratio (SNR)) hauptsächlich dafür verantwortlich, ob ein Paket erfolgreich dekodierbar ist. Die empfangene Signalstärke ist abhängig von der Sendeleistung des Pakets, der Dämpfung durch den Kanal und Verstärkungen (z. B. Antennengewinne durch Richtantennen bei einem drahtlosen Übertragungskanal). Die Dämpfungen und Verstärkungen sind in der Regel als reziprok anzusehen. Das bedeutet zum gleichen Zeitpunkt ist die Leistungsbilanz von Sender A zum Empfänger B die gleiche wie die vom Sender B zum Empfänger A. (Molisch 2012)

In den Versuchen wurden beide C-ITS-Einheiten so eingestellt, dass Sie die gleiche Sendeleistung von 23 dBm nutzen. Zwar sendeten die Einheiten nicht zeitgleich und befanden sich nicht immer am gleichen Ort, jedoch war über die Summe aller Versuche davon auszugehen, dass die Dämpfung aus dem Übertragungskanal nicht dazu geführt hat, dass die Paketverluste stark zwischen der Kommunikationsrichtung variiert haben. Die C-ITS-Einheit im Pkw von Vector zeichnet in einem Metadatenheader neben der eigentlichen Nachricht auch die RSSI des jeweiligen Pakets mit auf. Bei den maximalen Entfernungen zwischen den beiden Kommunikationspartnern lagen diese regelmäßig bei -99 dBm, was zugleich der niedrigste Wert war, der gemessen wurde. Für die C-ITS-Einheit im Pkw (VN4610), welche einen NXP-Chip verwendet, stellte dies auch die minimale Leistung dar, bis zu der ein Paket dekodierbar war (Sensitivität). Der in dem Datenblatt verfügbare Wert der Sensitivität ist für die Datenrate von 3 Mbit/s ausgewiesen (Cohda Wireless 2024). Während die in den Versuchen eingesetzte Datenrate bei 6 Mbit/s liegt, was auch der aktuellen Datenrate für den operativen Einsatz entspricht. Bei einer steigenden Datenrate verringert sich die Sensitivität weiter, weshalb bei 6 Mbit/s kein geringeres Limit als

bei 3 Mbit/s gelten kann und daher auch hier -99 dBm das absolute Minimum darstellt. Für die ZooZ-Einheit liegen keine publizierten Empfängersensitivitäten vor. Jedoch muss davon ausgegangen werden, dass diese niedriger sind, da sich der Unterschied in den Paketverlustzahlen sonst nicht erklären ließe.

Methodik Auswertung Paketverluste

Für die Ermittlung der Paketverluste wurden die vom Pkw gesendeten Nachrichten mit den Nachrichten, die das Fahrrad empfangen hat, verglichen. Beide Messdateien wurden dazu zunächst kombiniert und der Start- und Endzeitpunkt synchronisiert. Anschließend wurden Entfernungsintervalle von 10 m gebildet. Die Entfernung ist dabei die euklidische Distanz zwischen der Position des Fahrrads und des Pkws. In den Entfernungsintervallen wurde geprüft, wie viele Nachrichten von der C-ITS-Einheit im Pkw ausgesendet wurden und wie viele das Fahrrad empfangen hat. Daraus resultiert die relative Paketverlustrate. Damit eine höhere statistische Sicherheit gegeben ist, wurden alle Messungen (30 pro Szenario) für die jeweiligen Szenarien gemittelt. Als Darstellungsform wurden Box-Plots gewählt. Da die Messwerte nicht symmetrisch um den Mittelwert verteilt sind, sind Box-Plots aussagekräftiger als eine Darstellung des Mittelwerts mit der dazugehörigen Standardabweichung. Der Mittelwert ist zusätzlich als Roter Punkt mit in den Grafiken eingebracht. Box-Plots stellen den Median und das obere (75 % der Daten) und untere Quartil (25 % der Daten) als Box dar. Die Antennen der Box-Plots wurden so gewählt, dass diese dem 1,5-fachen Interquartilsabstand entsprechen. Jedoch enden die Antennen bei dem letzten Datenpunkt, der innerhalb dieses Abstands liegt. Ausreißer sind als Kreise dargestellt. Die absoluten Anzahlen der gesendeten und empfangenen Pakete sind im oberen Bereich der Grafik mit aufgeführt. Zusätzlich ist die Anzahl der Pakete als Summe über alle Messungen des Szenarios mit in der Grafik dargestellt.

Ergebnisse Paketverluste: Dooring

In Bild 37 ist der Paketverlust aus den aggregierten Einzelfahrten für das Szenario Dooring zu sehen. Die Spannbreiten der Boxen sowie der Antennen zeigen deutlich, dass die Messergebnisse eine große Varianz aufweisen. Die Paketverluste nehmen deutlich mit verringerter Distanz ab. Dieses Verhalten wurde erwartet. Im Mittel ist der Paketverlust bei keiner Distanz größer als 50 %. Die Analyse der Paketfehler in verschiedenen Intervallen zeigt eine auffallende Diskrepanz im Bereich von 60 bis 70 m. Es wurde festgestellt, dass in diesem speziellen Intervall die Paketfehlerrate untypischerweise stark ansteigt (Median bei anderen Intervallen bei 0 %) und bei größeren Distanzen wieder abfällt. Dieses Phänomen konnte bisher wissenschaftlich nicht belastbar erklärt werden. Bei dem Szenario Dooring bewegt sich ausschließlich der Radfahrende in einer geraden Bewegung auf den Pkw zu. Eine Erklärung über die Bewegungsvektoren ist somit nicht möglich. Aus dem Umfeld der Messungen lässt sich auch keine Ursache für dieses Phänomen identifizieren. Zudem ist zu erkennen, wie einzelne Ausreißer im Bereich von 10 m bis 50 m den Mittelwert beeinflussen.

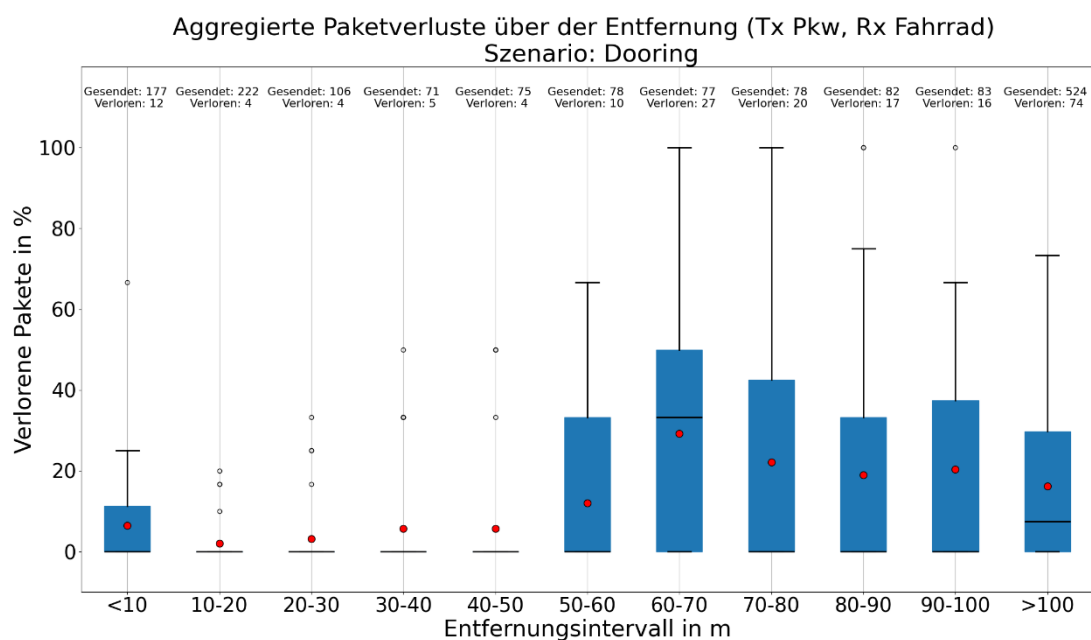


Bild 37. Paketverluste im Szenario Dooring

Ergebnisse Paketverluste: Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

In Bild 38 ist der aggregierte Paketverlust für das Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342 dargestellt. Dieser Versuch erfolgte am gleichen Ort wie der Versuch Dooring mit dem Unterschied, dass beide Kommunikationsteilnehmer in Bewegung waren und sich orthogonal zueinander zum gemeinsamen Konfliktpunkt näherten. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Paketverlustrate signifikant geringer ist als beim Dooring und bereits früher viel stärker abfällt. In einem Bereich ab 70 m Distanz zwischen den Teilnehmern kann von einer vollständig verlustfreien Kommunikation gesprochen werden. In dem Bereich 70 und 90 m sind auch nur einzelne Messergebnisse als Ausreißer mit Paketverlusten vorhanden. Da für beide Antennen, sowohl an der ZooZ-Einheit als auch für die Antenne am Vector System kein Antennendiagramm vorliegt, ist die Ursache für dieses Verhalten nicht zweifelsfrei zu erklären. Der deutliche Unterschied legt jedoch nahe, dass die Antennen in der orthogonalen Relation zueinander einen höheren Antennengewinn aufweisen.

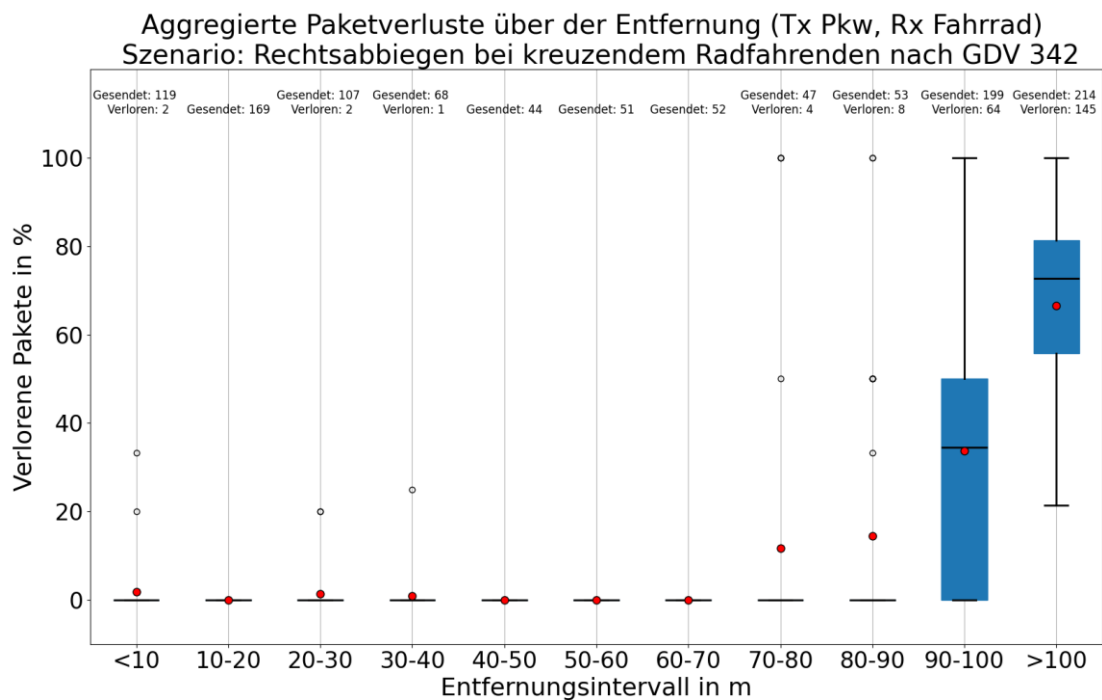


Bild 38. Paketverlust im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Ergebnisse Paketverluste: Ausfahren aus einer Ausfahrt

In Bild 39 ist der Paketverlust in dem Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt zu sehen. Dieses ist von den Bewegungsvektoren ähnlich zum Rechtsabbiegen, jedoch ist die Versuchsdurchführung unter Abschattungsbedingungen wie in Kapitel 6.3.4 dargestellt erfolgt. Der Verlauf der Kurve ist ähnlich zum Szenario Rechtsabbiegen, nur dass der Verlauf insgesamt weiter nach links verschoben ist (also nur bei geringerer Distanz wenig Verluste aufweist), was auch durch die Abschattung zu erwarten war. Die absoluten Zahlen der Pakete bei den Distanzen über 80 m zeigen, dass dort überhaupt nur wenige Pakete versendet wurden. Dies lag an den räumlichen Beschränkungen an dem Versuchsort. Eine statistische Sicherheit ist dort nicht gegeben, weshalb nur die Ergebnisse im Bereich < 80 m für eine weitere Betrachtung Verwendung finden. Im Bereich < 50 m ist kein Line-of-sight (LOS) gegeben, und trotzdem kann eine geringe Paketverlustrate beobachtet werden. Die Varianz zwischen den Einzelmessungen ist jedoch höher als bei den Szenarien ohne die Abschattung durch die Gebäude.

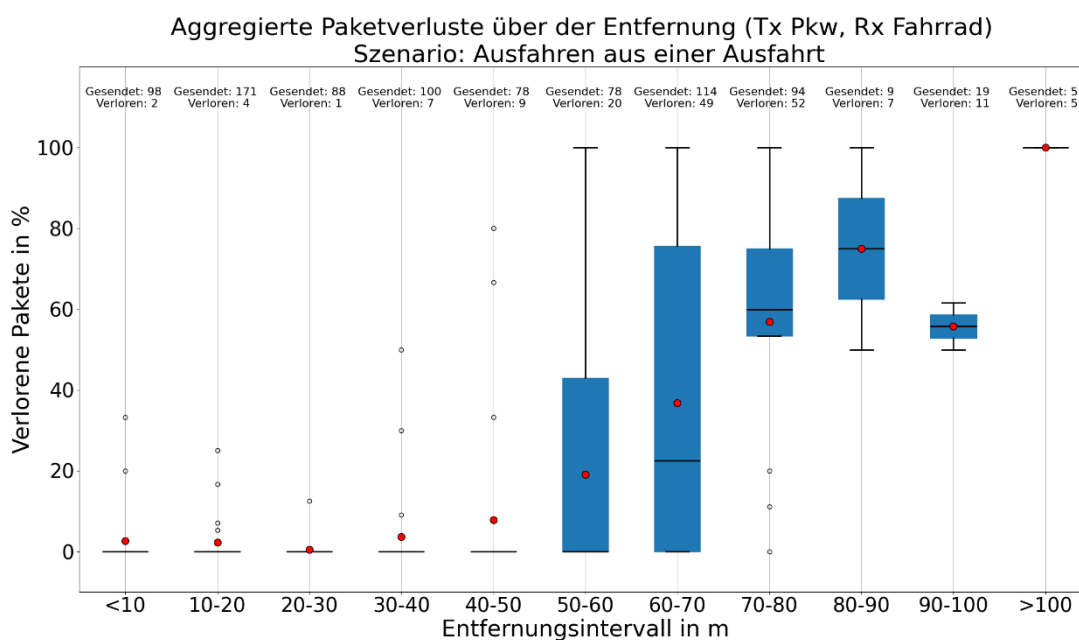


Bild 39. Paketverlust im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

Fazit Paketverlust

Die Abhängigkeit der Kommunikationsrichtung des Paketverlusts zeigt deutlich das Potenzial was durch eine Leistungsverbesserung des Systems erzielt werden kann. Der Unterschied der Ergebnisse zwischen den Dooring-Versuchen und dem Szenario zum Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342 wurde so nicht erwartet. Eine Einflussanalyse der Antennencharakteristik könnte weitere Erkenntnisse produzieren. Vorteilhaft für die Applikationsentwicklung ist, dass selbst bei einer Abschattung der Kommunikationsteilnehmer eine Kommunikation möglich ist und somit eine Information oder Warnung der Teilnehmer möglich sein kann.

7.1.3 Update-Delay

Das Update-Delay ist neben der Paketfehlerrate eine weitere wichtige Kenngröße, um den Einfluss von Übertragungsfehlern zu bewerten. Für die jeweilige Empfängeranwendung ist nicht nur die Anzahl der Paketfehler entscheidend, sondern auch deren Verteilung und zeitlicher Verlauf. Jede korrekt empfangene Nachricht führt zu einer Aktualisierung der bisher erfassten Informationen (z. B. Position und Bewegungsrichtung des Senders). Verfügt die Anwendung über ein implementiertes Bewegungsmodell inkl. einem adaptiven Schätzverfahren wie beispielsweise ein Kalman-Filter, können auftretende Lücken bei der Übertragung der Daten durch Prädiktion der relevanten Bewegungszustände bis zu einem gewissen Grad geschlossen werden, solange die Qualität der verfügbaren Informationen noch ausreichend für den vorgesehenen Zweck ist.

Methodik

Das Update-Delay wird kontinuierlich berechnet. Dargestellt wird die prozentuale Verteilung der Paketverluste auf verschiedene aufeinanderfolgende Paketverluste. Einzelne Paketverluste bedeuten, dass ein Paket zwischen zwei erfolgreich übertragenen Paketen verloren geht. Es wird zwischen bis zu vier und mehr als vier aufeinanderfolgenden verloren

gegangenen Paketen unterschieden. Da keine Anforderungen bezüglich des zeitlichen Updates der Anwendung vorliegen, ist eine Darstellung von Funktionsgrenzen nicht möglich. Aufgrund der kontinuierlichen Auswertung beziehen sich die angegebenen Prozentsätze immer auf den verbleibenden Bereich bis zur 0-Meter-Marke. Das bedeutet, bei einer Distanz von 100 m wird die Verteilung der Paketverluste von 100 m bis 0 m am Punkt der 100 m auf der Abszisse dargestellt. Bei einer Distanz von 50 m ist dies die Verteilung der Paketverluste von 50 m bis 0 m. Die Ergebnisse sind aggregiert über alle Messfahrten, und die angezeigten Werte entsprechen dem Durchschnitt.

Ergebnisse Update-Delay: Dooring

Das Bild 40 zeigt das Update-Delay bei den Dooring-Versuchen. Es ist zu sehen, dass die bis zu einer Distanz von 60 m im Mittel immer genau ein Paket verloren geht. Es kommen also nur einzelne Paketverluste in diesem Intervall vor. Ab 60 m Distanz steigt die Anzahl der verlorenen gegangenen Pakete an. Deutlich zu erkennen ist, dass der Anteil der aufeinander folgenden Paketfehler mit der Distanz steigt. Bis 65 m Distanz traten in den Versuchen nicht mehr als zwei verloren gegangene Pakete hintereinander auf. Bei 85 m kommt es zu Paketverlusten, die größer als vier aufeinander folgende Pakete sind. Im Vergleich zu Bild 37 zeigt sich, dass die durchaus signifikanten Paketverluste zwischen 50 m und 70 m Distanz nicht gehäuft auftreten und mit einer entsprechenden Prädiktion durch ein implementiertes Bewegungsmodell beim Empfänger zu kompensieren sind.

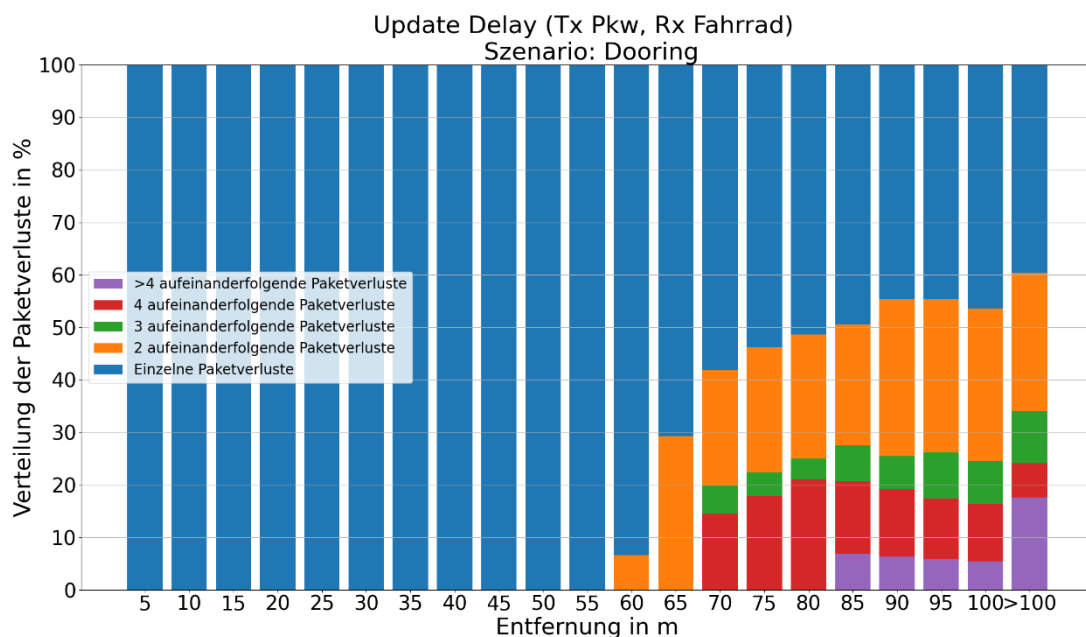


Bild 40. Update-Delay im Szenario Dooring

Ergebnisse Paketverluste: Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Das Update-Delay der Versuche zum Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342 in Bild 41 zeigt deutlich die Notwendigkeit dieser Auswertung. Während im Intervall von 70-100 m Paketverluste auftreten, werden selten mehr als ein verloren gegangenes aufeinanderfolgendes Paket bis zu dem Bereich von 85 m bis 90 m

maximal zwei aufeinanderfolgende Paketverluste. Diese Verluste sind mit einer entsprechenden Prädiktion ausgleichbar.

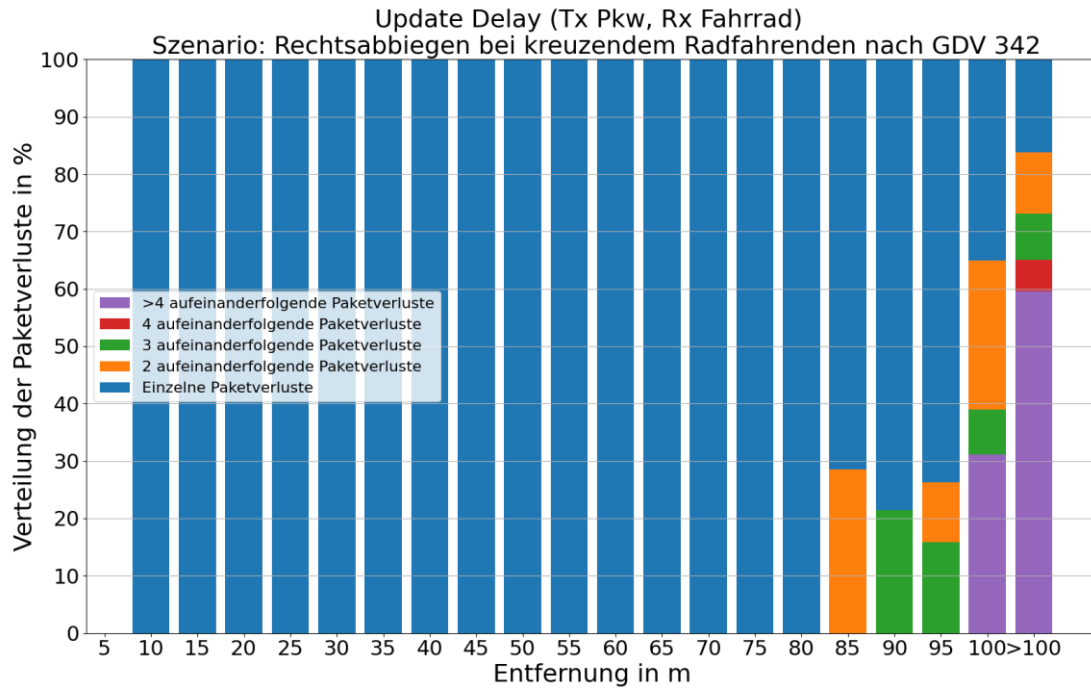


Bild 41. Update-Delay im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Ergebnisse Update-Delay: Ausfahren aus einer Ausfahrt

Das Update-Delay bei den Versuchen zum Ausfahren aus einer Ausfahrt, dargestellt in Bild 42, zeigt gegenüber den anderen Szenarien bereits bei geringeren Distanzen größere zusammenhängende Paketverluste, während aber bei Distanzen von bis zu 40 m eher einzelne Pakete verloren gehen. Der zusammenhängende Paketverlust bricht bei unter 40 m deutlich zusammen. Im Vergleich mit dem Bild 39 fällt auf, dass im Intervall 40-50 m Paketverluste aufgetreten sind, während es im Intervall 50-60 m bei ca. 50 % der Daten zu gar keinen Paketverlusten kam. Durch die Abschattung wird die Anzahl der zusammenhängenden Paketverluste erhöht. Dies macht es einer Prädiktion schwieriger der Applikation valide Informationen bereitzustellen.

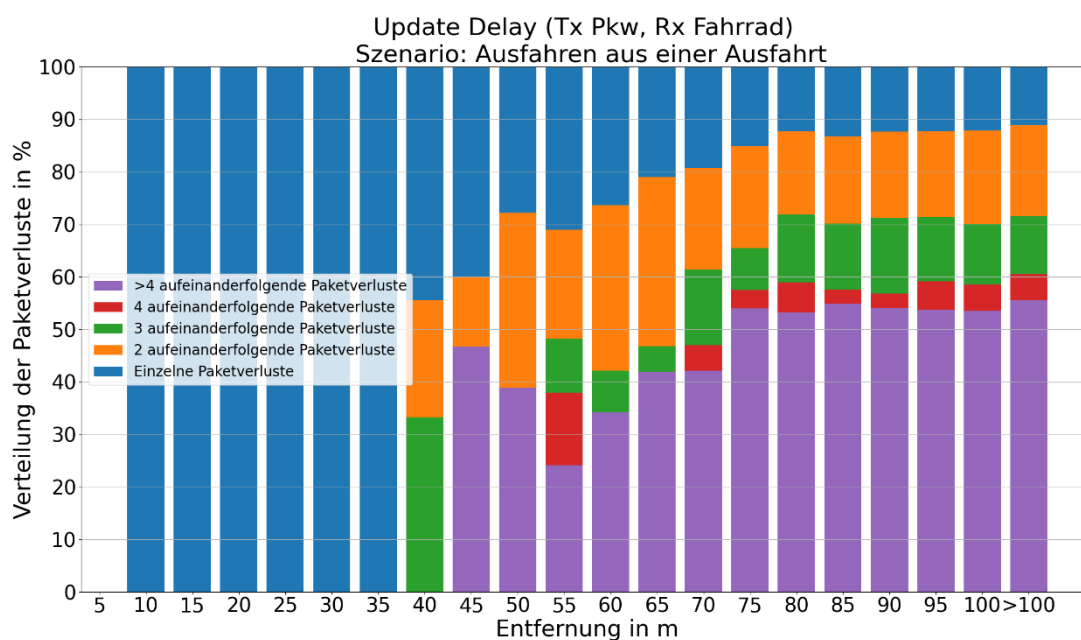


Bild 42. Update-Delay im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

Fazit Update-Delay

Die Darstellung des Update-Delays verdeutlicht, dass bei den Freifeldversuchen, trotz einer großen Anzahl an verloren gegangenen Paketen, diese nicht gehäuft auftreten. Eine Vorhersage der Bewegungsparameter des Kommunikationspartners ermöglicht es der Applikation, mit Daten von ausreichender Genauigkeit versorgt zu werden, um ihre Funktion sicherzustellen. Der zulässige Umfang des zeitlichen Ausfalls der Kommunikation hängt dabei von den spezifischen Anforderungen der Applikation ab. Bei den Versuchen, die das Ausfahren aus einer Ausfahrt unter Abschattungsbedingungen beinhalteten, zeigt sich, dass die Häufung von aufeinanderfolgenden Paketverlusten größer ist als bei den Freifeldversuchen. Der Kommunikationskanal verhält sich in solchen Situationen eher wie ein binäres System, bei dem Paketverluste, wenn sie auftreten, überwiegend in Clustern geschehen.

7.2 Positionsgenauigkeit

In diesem Kapitel wird die Positionsgenauigkeit quantifiziert, die während der Versuchsfahrten messtechnisch mit den beiden Geräten ADMA und ZooZ anhand des gewählten Versuchsaufbaus (siehe Kapitel 6.2) ermittelt werden konnte. Die Bestimmung der Positionsgenauigkeit erfolgte dabei einerseits bei Stillstand des Fahrrades und andererseits bei bewegtem Fahrrad gemäß Versuchskonzeption in Kapitel 6.3. Die Erhebung erfolgte unter Verwendung hochwertiger Komponenten, um möglichst gute Positionsgenauigkeiten zu erhalten, aber die Voraussetzungen für einen optimalen Betrieb des GNSS-Empfängers in der ZooZ-Einheit waren nicht immer gegeben. So wurde zwar das ZED-F9R-d-GNSS-Modul verwendet, allerdings ohne die Einbindung eines Wheel-Tick-Sensors. Zudem wurde die interne IMU des ZED-F9R-d-GNSS-Moduls nicht verwendet. Des Weiteren waren keine Korrekturdaten für die GNSS-Signale verfügbar. In Kapitel 8.1.2 werden die Gründe genannt. Dieses Kapitel ist wie folgt strukturiert. Zuerst wird in Kapitel 7.2.1 die Positionsgenauigkeit bei Stillstand des Fahrrades beschrieben, danach in Kapitel 7.2.2 die

Positionsgenauigkeit bei bewegtem Fahrrad. Den Schluss dieses Kapitels bildet ein zusammenfassendes Fazit (Kapitel 7.2.3).

7.2.1 Ruhelokalisierung

Ziel der Bestimmung der Lokalisierungsgenauigkeit des unbewegten Fahrrades ist es abzuschätzen, mit welchen zufälligen Abweichungen man bei der Verwendung der beiden Geräte ADMA und ZooZ gerechnet werden kann. Nebenbei bestand die Aufgabe auch darin, herauszufinden, ob die von der ADMA bereitgestellten Informationen zur Lokalisierungsgenauigkeit plausibel sind und ob gerätespezifische Verfahren zur Stillstandsdetektion zur Anwendung kommen.

Methodik

Die Genauigkeit der Ruhelokalisierung wurde schwellwertbasiert heuristisch geschätzt. Da die Daten von ZooZ und ADMA Positions- und Geschwindigkeitsinformationen enthielten, wurden diese Daten verwendet, um Bewegung von Stillstand zu separieren. So wurde anhand der Geschwindigkeitshistogramme der durchgeführten Versuchsfahrten überprüft, wann die Geschwindigkeitswerte definierte Schwellwerte unter- oder überschritten haben. Die für diesen Zweck erforderlichen Geschwindigkeitsschwellwerte wurden ebenso aus diesen Geschwindigkeitshistogrammen ermittelt. Zur Auswertung wurden die resultierenden Daten mittelwertfrei gemacht, um einen direkten Vergleich der Abweichungen zu ermöglichen. Visualisiert werden die Mediane der Positionsabweichungen der Einzelversuchsfahrten sowie die aggregierten Standardabweichungen aller Versuchsfahrten als Box-Plots für ADMA und ZooZ separat. Bei diesen Plots quantifizieren die Ränder der Boxen die Interquartile (unten 25% und oben 75%), die waagerechten Linien die Mediane und die Antennen die Konfidenzintervalle (unten 5% und oben 95%). Ausreißer werden aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht dargestellt.

Ergebnisse der Ruhelokalisierung ZooZ

Eine Stillstandsdetektion lag bei der ZooZ-Einheit nicht vor bzw. sie war deaktiviert. Anhand der Ränder der Geschwindigkeitsverteilung konnte festgestellt werden, dass ein Schwellwert von $3 \text{ km/h} \approx 0,8 \text{ m/s}$ geeignet erschien, um zwischen Bewegung und Stillstand zu unterscheiden. Das resultierende Intervall, um einen Datenpunkt als „in Ruhe“ bewerten zu können, ergab sich schließlich zu $0 \leq v \leq 0,8 \text{ m/s}$.

Szenario Dooring:

In Bild 43 sind euklidischen Abweichungen des ZooZ-Gerätes bei der Ruhelokalisierung in den zweiten 15 der 30 unmittelbar aufeinanderfolgenden Freifeldversuchsfahrten im Szenario Dooring dargestellt. Bei der ersten Versuchsreihe schlug die Heuristik zur Stillstandsdetektion fehl, so dass hierfür lediglich die zweite Versuchsreihe verwendet werden konnte. Es fällt auf, dass die Abweichungen vom Median immer weniger als 75 cm betragen, zumeist sogar unterhalb von 20 cm. Die größten Abweichungen traten beispielsweise in den Versuchsfahrten 16, 20 und 30 auf.

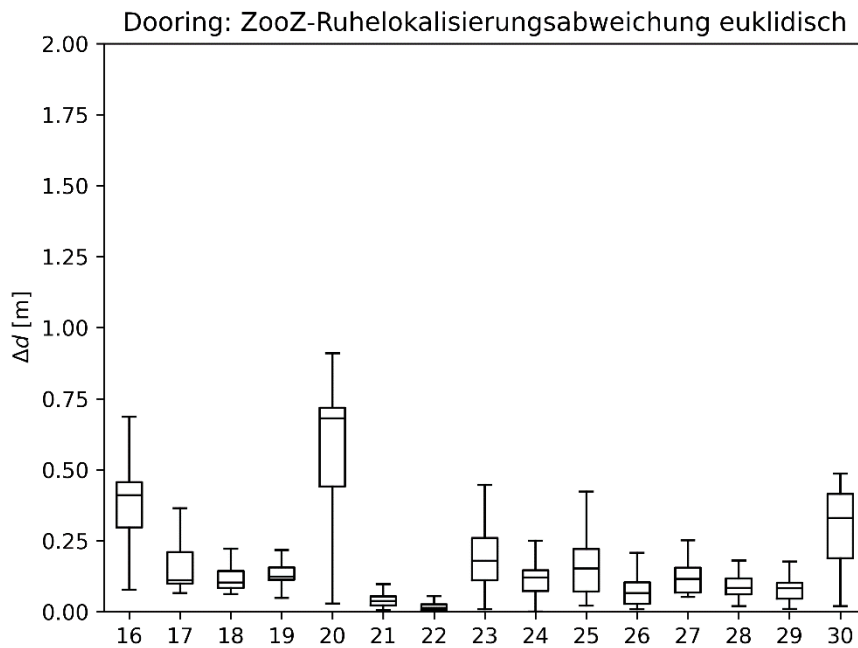


Bild 43. Euklidische Abweichungen des ZooZ-Gerätes während der Ruhelokalisierung über die Versuchsfahrten 16 bis 30 beim Dooring

In Bild 44 sind die bei der ZooZ-Ruhelokalisierung ermittelten aggregierten Standardabweichungen im Szenario Dooring dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass die aggregierten Standardabweichungen mit Medianen von 6 und 11 cm und Interquartilsabständen von 11 bzw. 6 cm betragen. Die aggregierte Standardabweichung im Falle der euklidischen Abweichung beträgt ebenso 6 cm bei einem Interquartilsabstand von 6 cm. Die größeren Abweichungen (etwas mehr als 20 cm) sind für die y-Koordinate zu verzeichnen.

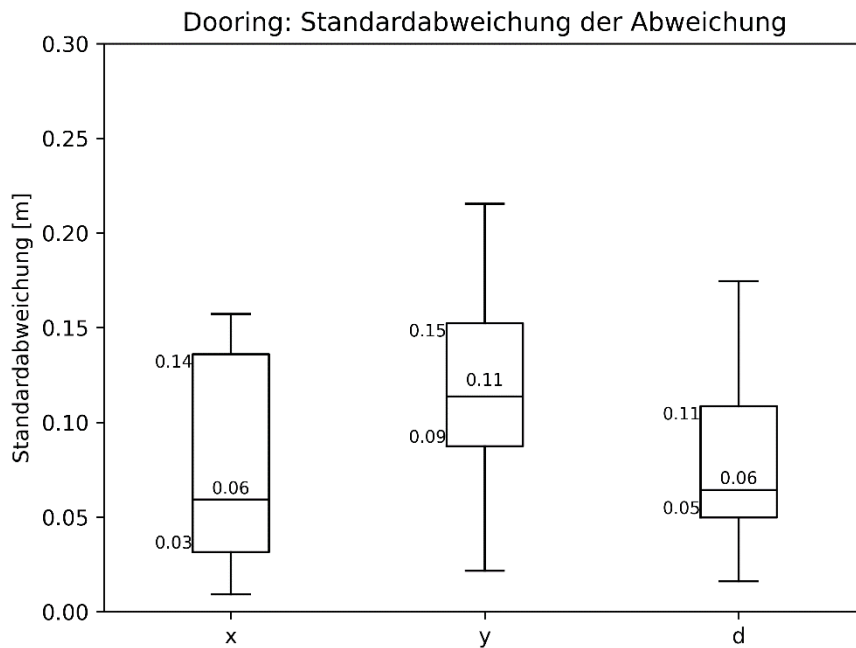


Bild 44. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y-Koordinaten sowie der euklidischen Abweichung des ZooZ-Gerätes bei der Ruhelokalisierung beim Dooring

Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342:

In Bild 45 sind euklidischen Abweichungen des ZooZ-Gerätes bei der Ruhelokalisierung in den 30 unmittelbar aufeinanderfolgenden Versuchsfahrten im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342 dargestellt. Diese Abweichungen betragen vom Median her immer weniger als 1 m, sie sind oft sogar deutlich geringer als 50 cm. Größere Abweichungen traten bei den Versuchsfahrten 7, 10 und 16 auf.

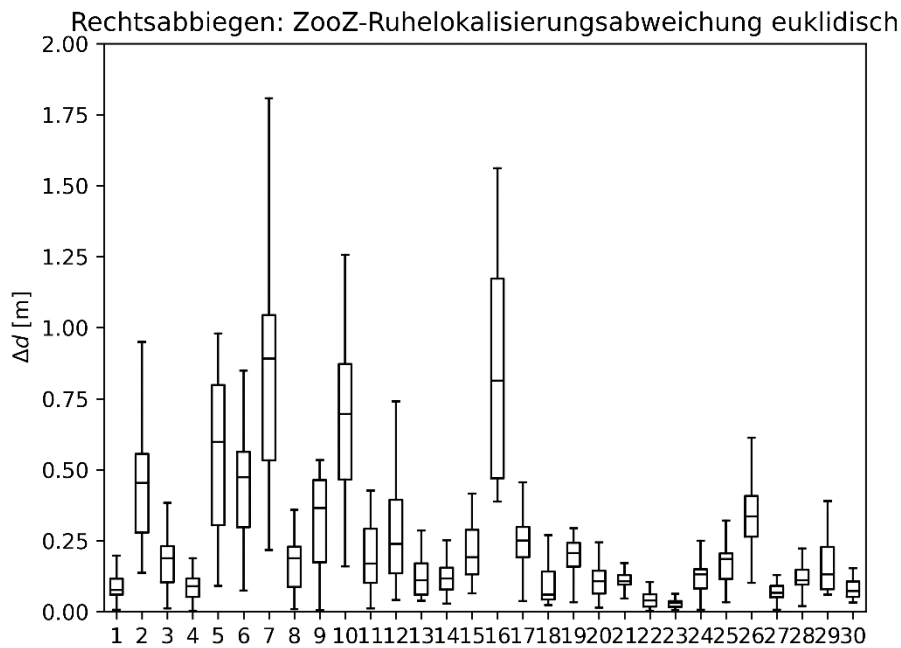


Bild 45. Euklidische Abweichungen des ZooZ-Gerätes während der Ruhelokalisierung über die Versuchsfahrten im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

In Bild 46 sind die bei der ZooZ-Ruhelokalisierung ermittelten aggregierten Standardabweichungen im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342 dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass die Standardabweichungen für x- und y-Koordinaten mit Medianen von 13 und 11 cm und Interquartilsabständen von jeweils 16 cm gleich sind. Bei der euklidischen Abweichung beträgt die Standardabweichung 7 cm bei einem Interquartilsabstand von 9 cm. Die größeren Abweichungen (etwas mehr als 40 cm) sind für die y-Koordinate zu verzeichnen.

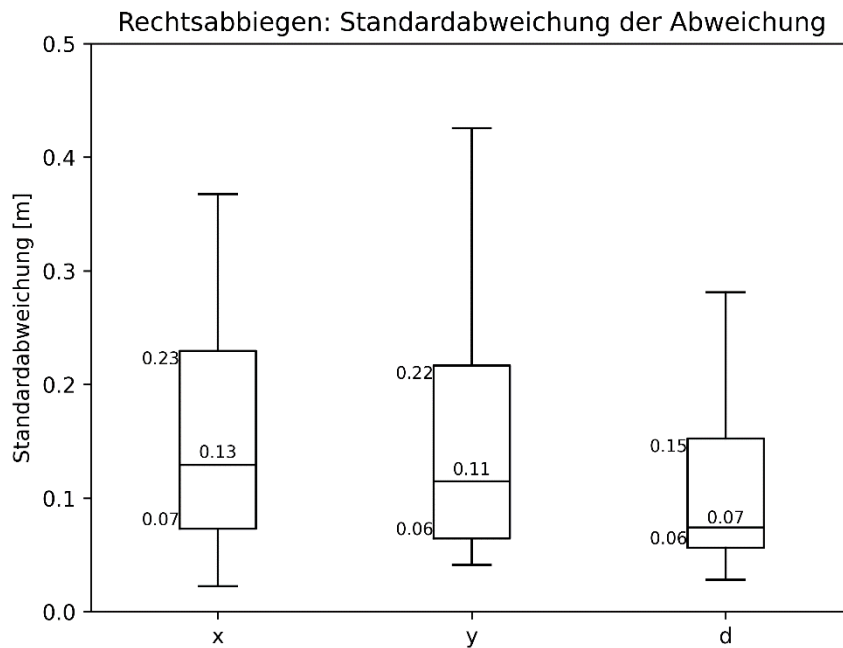


Bild 46. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y-Koordinaten sowie der euklidischen Abweichung bei der Ruhelokalisierung des ZooZ-Gerätes im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt:

In Bild 47 sind euklidischen Abweichungen des ZooZ-Gerätes bei der Ruhelokalisierung in den 24 unmittelbar aufeinanderfolgenden Versuchsfahrten im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt dargestellt. Diese Abweichungen betragen vom Median her ebenso wie die Versuchsfahrten beim Rechtsabbiegen stets weniger als 1 m. Größere Abweichungen traten bei den Versuchsfahrten 20 und 23 auf. Bei den Versuchsfahrten 2 und 4 traten deutlich höhere Abweichungen auf, die hier nicht dargestellt sind.

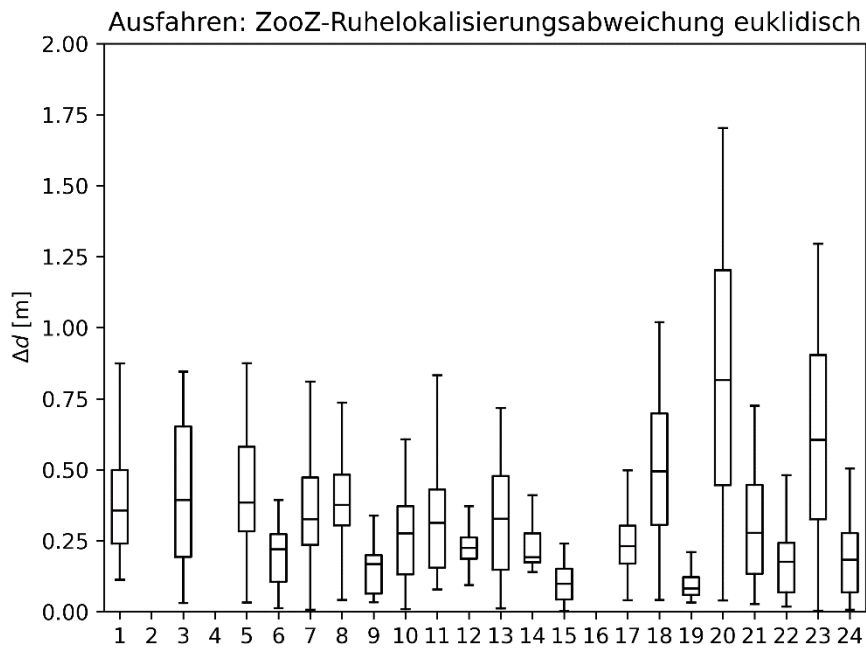


Bild 47. Euklidische Abweichungen des ZooZ-Gerätes während der Ruhelokalisierung über die Versuchsfahrten im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

In Bild 48 sind die bei der ZooZ-Ruhelokalisierung ermittelten aggregierten Standardabweichungen für die Versuchsfahrten im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass die Standardabweichungen im Vergleich zu Freifeldversuchsfahrten deutlich größer sind. Mit Medianen von 24 und 26 cm und Interquartilsabständen von 28 und 32 cm bei den x- und y-Koordinaten sind die Ungenauigkeiten deutlich größer als in den Freifeldversuchsfahrten. Die Standardabweichungen der euklidischen Abweichung sind mit einem Median von 19 cm und einem Interquartilsabstand von 15 cm ebenso deutlich größer als bei den Freifeldversuchsfahrten. Die größten Standardabweichungen von ca. 60 cm sind für beide Koordinaten in etwa gleich.

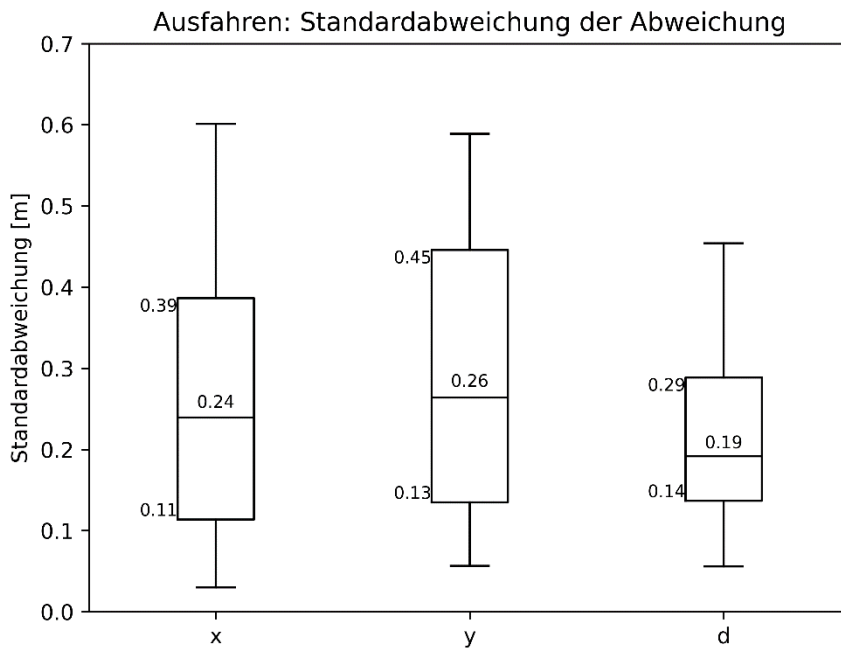


Bild 48. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y-Koordinaten des ZooZ-Gerätes bei der Ruhelokalisierung im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

Ergebnisse der Ruhelokalisierung ADMA

Die ADMA wendete ein den Autoren nicht bekanntes Verfahren zur Stillstandsdetektion an, so dass sehr geringe Ortsbewegungen als Stillstand identifiziert wurden. Anhand der erhobenen Daten fand sich ein geeignetes Geschwindigkeitsintervall zur Bewertung der Daten als „in Ruhe“: $0,05 \leq v \leq 0,2$ m/s.

Szenario Dooring:

In Bild 49 sind euklidischen Abweichungen des ADMA-Gerätes bei der Ruhelokalisierung in den zweiten 15 der 30 unmittelbar aufeinanderfolgenden Freifeldversuchsfahrten im Szenario Dooring dargestellt. Bei der ersten Versuchsreihe schlug die Heuristik zur Stillstandsdetektion fehl, so dass hierfür lediglich die zweite Versuchsreihe verwendet werden konnte. Es kann festgestellt werden, dass die Abweichungen meist geringer als 2 cm und damit im Vergleich zum ZooZ-Gerät in Größenordnungen (Faktor 10) niedriger sind. Sie überschreiten in keiner der Versuchsfahrten Ungenauigkeiten von 3 cm. Die größten Abweichungen traten beispielsweise in den Versuchsfahrten 17, 23, 24, 27 und 30 auf.

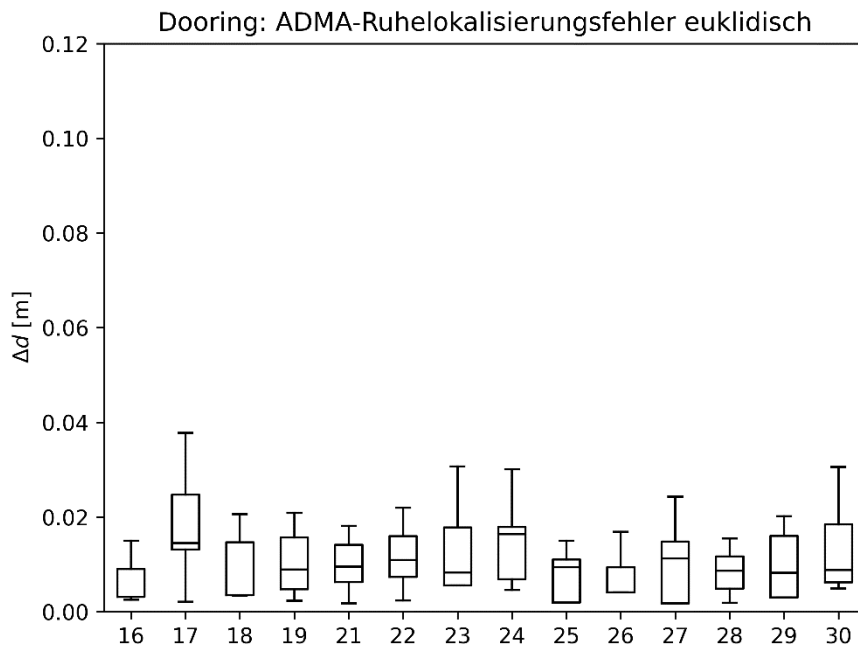


Bild 49. Euklidische Abweichungen des ADMA-Gerätes während der Ruhelokalisierung beim Dooring

In Bild 50 sind die bei der ADMA-Ruhelokalisierung ermittelten aggregierten Standardabweichungen für die Dooring-Versuchsfahrten dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass die aggregierten Standardabweichungen für x- und y-Koordinaten mit Medianen von 0,7 und 0,9 cm und Interquartilsabständen von ca. 0,4 bzw. 0,3 cm ebenfalls sehr niedrig sind. Wird die aggregierte Standardabweichung der euklidischen Abweichung betrachtet, beträgt der Median 0,6 cm und der Interquartilsabstand 0,2 cm. Die höchsten Standardabweichungen betragen in x-Richtung allerdings ca. 1,1 cm und in y-Richtung ca. 1,2 cm.

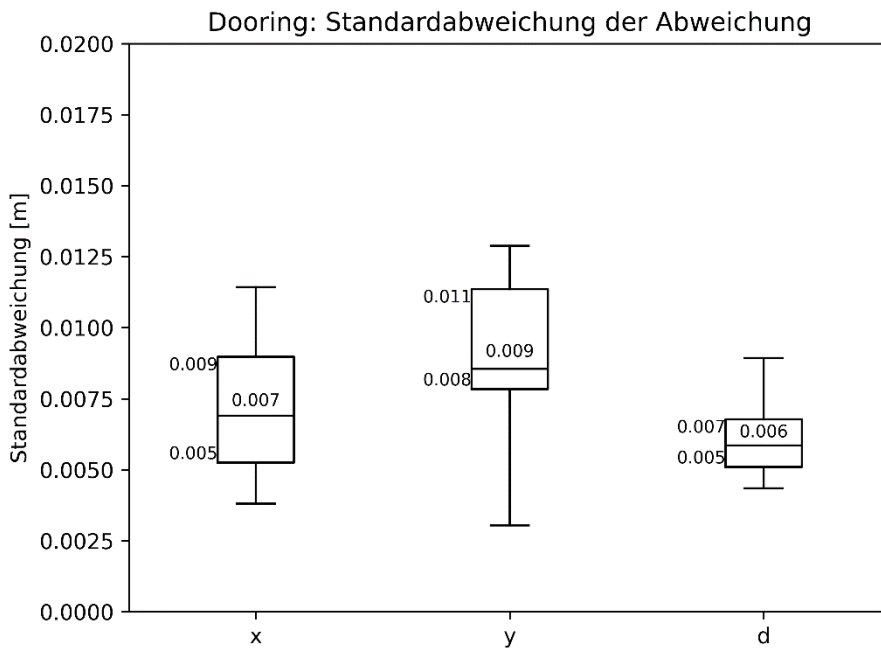


Bild 50. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y-Koordinaten bei der Ruhelokalisierung des ADMA-Gerätes im Szenario Dooring

Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342:

In Bild 51 sind euklidischen Abweichungen des ADMA-Gerätes bei der Ruhelokalisierung in den 30 unmittelbar aufeinanderfolgenden Versuchsfahrten im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342 dargestellt. Diese Abweichungen betragen vom Median her stets – ausgenommen Versuchsfahrt 26 – weniger als 2 cm. Die größte Abweichung trat mit einem Median von knapp 8 cm bei Versuchsfahrt 26 auf.

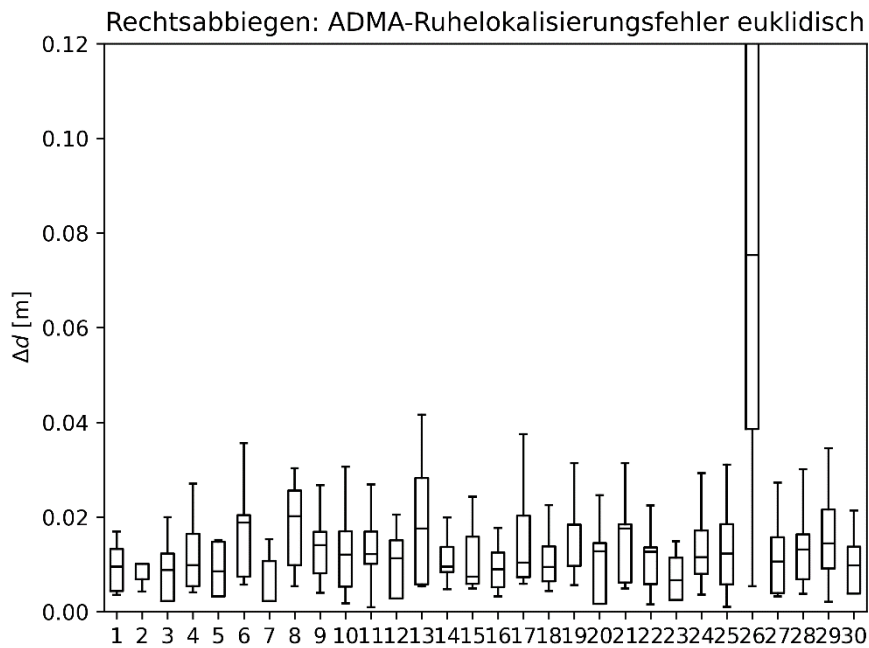


Bild 51. Euklidische Abweichungen des ADMA-Gerätes während der Ruhelokalisierung im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

In Bild 52 sind die bei der ADMA-Ruhelokalisierung ermittelten aggregierten Standardabweichungen im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342 dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass die Mediane stets geringer oder gleich 1 cm bei Interquartilsabständen zwischen 0,3 und 0,4 cm betragen. Die höchsten aggregierten Standardabweichungen betragen in x-Richtung ca. 1,3 cm und in y-Richtung ca. 1,7 cm.

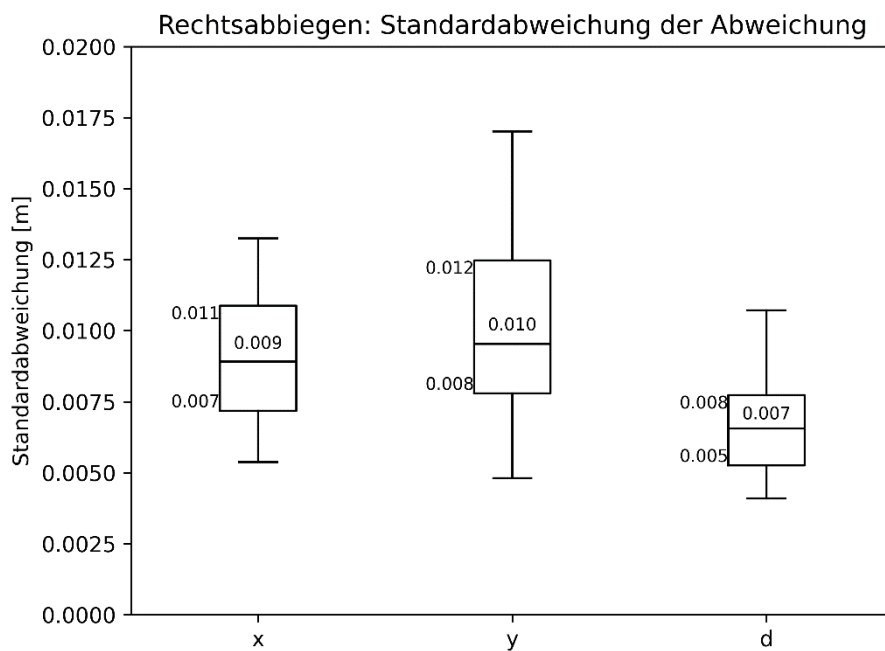


Bild 52. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y-Koordinaten sowie der euklidischen Abweichung bei der Ruhelokalisierung des ADMA-Gerätes im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt:

In Bild 53 sind euklidischen Abweichungen des ADMA-Gerätes bei der Ruhelokalisierung in den 24 unmittelbar aufeinanderfolgenden Versuchsfahrten im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt dargestellt. Diese Abweichungen betragen vom Median her stets – ausgenommen Versuchsfahrt 20 – zwischen 3-4 cm. Die größte Abweichung trat mit einem Median von etwas mehr als 4 cm bei Versuchsfahrt 20 auf.

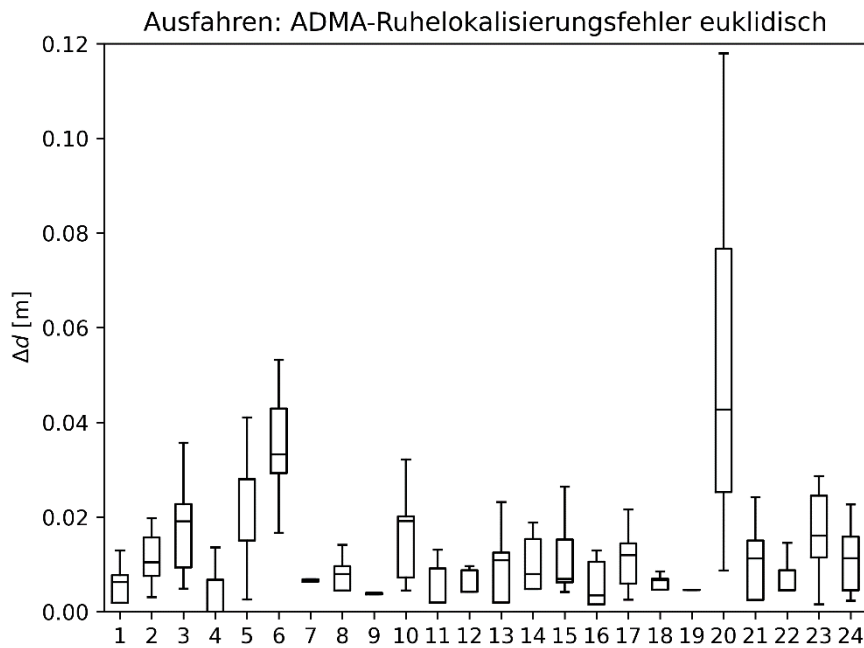


Bild 53. Euklidische Abweichungen des ADMA-Gerätes während der Ruhelokalisierung im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

In Bild 54 sind die bei der ADMA-Ruhelokalisierung ermittelten aggregierten Standardabweichungen für die Abschattungsversuchsfahrten im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass die aggregierten Standardabweichungen für die euklidische Abweichung, den x- und y-Koordinaten mit Medianen von 0,5-0,8 cm noch geringer sind als in den Freifeldversuchsfahrten (Dooring und Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342), jedoch die Interquartilsabstände von 0,4-0,7 cm etwa doppelt so hoch sind. Die höchsten Standardabweichungen betragen in x-Richtung allerdings ca. 1,7 cm und in y-Richtung ca. 2,1 cm und sind damit größer als in den Freifeldversuchen.

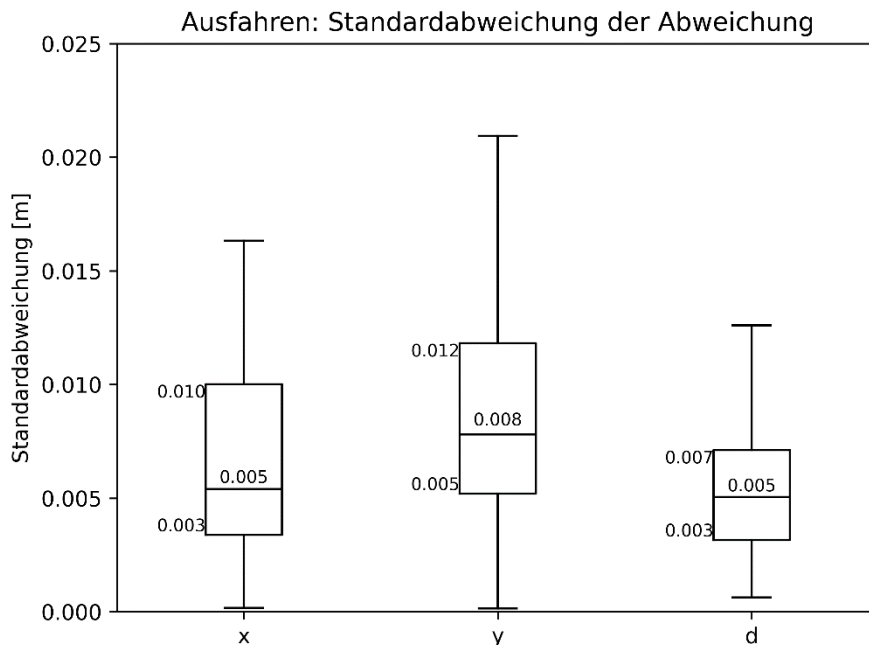


Bild 54. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y-Koordinaten des ADMA-Gerätes bei der Ruhelokalisierung im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

Vergleich der ADMA-Angaben zur Standardabweichung von den GNSS-Positionen

Das ADMA-Gerät macht bei der Positionsbestimmung selbst Angaben zur Genauigkeit in Form von bereitgestellten Standardabweichungen. Diese wurden ebenso in den drei Szenarien Dooring, Rechtsabbiegen und Ausfahren aus einer Ausfahrt analysiert und den oben beschriebenen statistischen Ergebnissen gegenübergestellt. In diesem Bericht wird jedoch auf eine Illustration dieser Ergebnisse verzichtet, weil sich bei dieser Analyse herausgestellt hat, dass die von dem ADMA-Gerät bereitgestellten Standardabweichungen als sehr robust einzuschätzen sind und dass sie die aus den Positionsangaben ermittelten Standardabweichungen bestätigen.

Anhand der durchgeführten Versuchsfahrten unter Freifeld- und Abschattungsbedingungen wurde lediglich festgestellt, dass diese Standardabweichungen unter Freifeldbedingungen tendenziell etwas kleiner und unter Abschattungsbedingungen tendenziell etwas höher sind. Überdies konnte eine etwas niedrigere Varianz gegenüber den aus den Positionsangaben ermittelten Standardabweichungen festgestellt werden. Ob diese Indikatoren signifikant sind, müsste eine zusätzliche Untersuchung zeigen.

Fazit Ruhelokalisierung

Die Ergebnisse der Ruhelokalisierung der verwendeten Geräte ZooZ und ADMA sind in Tabelle 3 zusammengestellt. Zusammenfassend lassen sich für Ruhelokalisierung mit ADMA- und ZooZ-Geräten folgende Aussagen anhand der validen Versuchsfahrten (N = 30 im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342, N = 24 im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt und N = 15 im Szenario Dooring) treffen:

- Das ZooZ-Gerät ist grob um den Faktor 10-20 genauer, d. h. besser als das ADMA-Gerät im Stillstand bei Abweichungen grob zwischen 20-50 cm in den Freifeldversuchen und weniger als 1 m in den Abschattungsversuchen. Die aggregierten Standardabweichungen der euklidischen Abweichungen betragen in den Freifeldversuchen weniger als 10 cm und knapp 20 cm bei den Abschattungsversuchen. Schlussfolgernd können im Freifeld mit Schwankungsbreiten der Standardabweichung von für die x- und y-Koordinaten von 10-30 cm und unter Abschattungsbedingungen von 50-60 cm gerechnet werden.
- Das ADMA-Gerät kann als sehr genau und vor allem robust gegenüber Mehrwegeausbreitung angesehen werden. Deren Genauigkeit kann in Freifeldversuchen bei etwa 2 cm und in den Abschattungsversuchen bei 3-4 cm quantifiziert werden. Dabei treten aggregierte Standardabweichungen in den Freifeldversuchen mit etwa 0,5-0,6 cm und unter Abschattungsbedingungen mit bis zu etwa 0,8 cm auf.
- Die vom ADMA-Gerät selbst bereitgestellten Angaben zur Positionsgenauigkeit bestätigen im Wesentlichen die aus den Positionsangaben ermittelten Standardabweichungen.

Tabelle 3. Überblick über die aggregierten Ergebnisse zur euklidischen Abweichung bei unbewegtem Fahrrad

	Dooring (Freifeldversuch)	Rechtsabbiegen (Freifeldversuch)	Ausfahren (Abschattungsversuch)
ZooZ			
Median der Abweichung	< 75 cm, zumeist < 20 cm	< 100 cm, zumeist < 50 cm	< 100 cm
Median der Standardabweichung	6 cm	7 cm	19 cm
ADMA			
Median der Abweichung	< 2 cm	< 2 cm	< 4 cm
Median der Standardabweichung	0,6 cm	0,7 cm	0,5 cm

7.2.2 Lokalisierung in Bewegung

Ziel der Bestimmung der Lokalisierungsgenauigkeit des bewegten Fahrrades ist es zu quantifizieren, mit welchen Abweichungen des ZooZ-Gerätes in hochkritischen Interaktionssituationen im Freifeld, aber insbesondere auch unter Abschattungsbedingungen gerechnet werden muss.

Methodik

Das ADMA-Gerät wird als hochgenaues Referenzsystem zur Abschätzung der Positionsgenauigkeiten des ZooZ-Gerätes eingesetzt. Dieses Vorgehen wird damit gerechtfertigt, dass das ADMA-Gerät in den vorangegangenen Analysen zur Ruhelokalisierung (Kapitel 7.2.1) gezeigt hat, dass mit Abweichungen im Zentimeterbereich gerechnet und somit eine um den Faktor 10-20 höhere Lokalisierungsgenauigkeit erreicht werden kann. Überdies wurden die ADMA-Daten bei Bewegung des Fahrrades hinsichtlich ihrer Plausibilität geprüft, indem beispielsweise die Äquidistanz der Datenpunkte und die damit einhergehenden Geschwindigkeiten pro Datenpunkt plausibilisiert werden konnten. Die Autoren dieses Berichts weisen aber darauf hin, dass diese oben getroffene Annahme dennoch mit Vorsicht zu genießen ist, da Mehrwegeausbreitungseffekte systembedingt nicht vollumfänglich korrigiert werden können und es je nach Konfiguration des Gerätes zu Fehlern

kommen kann. Die ADMA selbst wendet kein Bewegungsmodell, welches spezifisch für Fahrräder erzeugt wurde, an und kann daher den zum Tracking integrierten Kalman Filter für die Nutzung der IMU nicht geeignet initialisieren. Nach Rücksprache mit der Herstellerfirma wurde uns bestätigt, dass bei vollständiger Unterstützung des GNSS-Empfangs mit dGNSS-Korrekturdaten die interne Fusion mit der IMU nicht verwendet wird, wenn diese nicht eingeschwungen ist. Bei der Versuchsdurchführung wurde der entsprechende Parameter, der die Unterstützung von dGNSS überwacht, mit ausgewertet. Messergebnisse ohne vollständige dGNSS-Unterstützung wurden nicht verwendet. Bei den Versuchen war die dGNSS-Unterstützung stabil. Ausschließlich beim Neustart des ADMA-Geräts gab es eine Verzögerung, bis diese zur Verfügung stand. Die Positionsdaten des ZooZ-Gerätes werden demnach mit denen des ADMA-Gerätes in den drei Szenarien Dooring, Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahren nach GDV 342 und Ausfahren aus einer Ausfahrt verglichen. Bei diesem Vergleich werden die relevanten Werte des ZooZ-Gerätes von denen des ADMA-Referenzsystems subtrahiert, um eine eindeutige Zuordnung der Ergebnisse zu ermöglichen. In Analogie zur Ruhelokalisierung werden die Ergebnisse für alle Versuchsfahrten und deren Aggregation dargestellt. Schließlich werden gezielt Einzelversuchsfahrten ausgewählt und mit Plots visualisiert. Auf der Grundlage der quantifizierten Positionsgenauigkeiten können Zeitbedarfe ermittelt werden, die durch die Positionsfehler zu kompensieren sind.

Visualisiert werden die statistischen Kennwerte (überwiegend Mediane und Standardabweichungen) der Positionsabweichungen der Einzelversuchsfahrten sowie deren Aggregationen aller Versuchsfahrten als Box-Plots. Bei den Beispielfahrten werden die Positionsabweichungen in x- und y-Richtung sowie dem Betrag (euklidischer Abstand) gegenüber den mit dem ADMA-Gerät zurückgelegten Weg sowie die Trajektorien von ADMA und ZooZ geplottet. Die Visualisierung der durch die Positionsungenauigkeiten zu kompensierenden Zeitintervalle erfolgt in Analogie zur Präsentation der Positionsgenauigkeiten mit Box-Plots.

Bei Box-Plots quantifizieren die Ränder der Boxen die Interquartile (unten 25% und oben 75%), die waagerechten Linien die Mediane und die Antennen die Konfidenzintervalle (unten 5% und oben 95%). Auf eine Darstellung von Ausreißern (unterhalb von 5% und oberhalb von 95%) wird aus Gründen der Übersichtlichkeit verzichtet.

Ergebnisse der Lokalisierung in Bewegung

Szenario Dooring:

In Bild 55 und Bild 56 sind die Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ für x- und y-Koordinaten über alle 30 zeitlich unmittelbar hintereinander durchgeführten Versuchsfahrten im Szenario Dooring dargestellt, von denen die ersten 15 mit 15 km/h und die zweiten 15 mit 20 km/h zurückgelegt wurden. Es kann festgestellt werden, dass die x-Abweichungen eher kleiner und die y-Abweichungen eher größer als die Referenzwerte sind. Es kann kein systematisches Muster bei den ermittelten Abweichungen in Abhängigkeit von der Versuchsfahrt festgestellt werden.

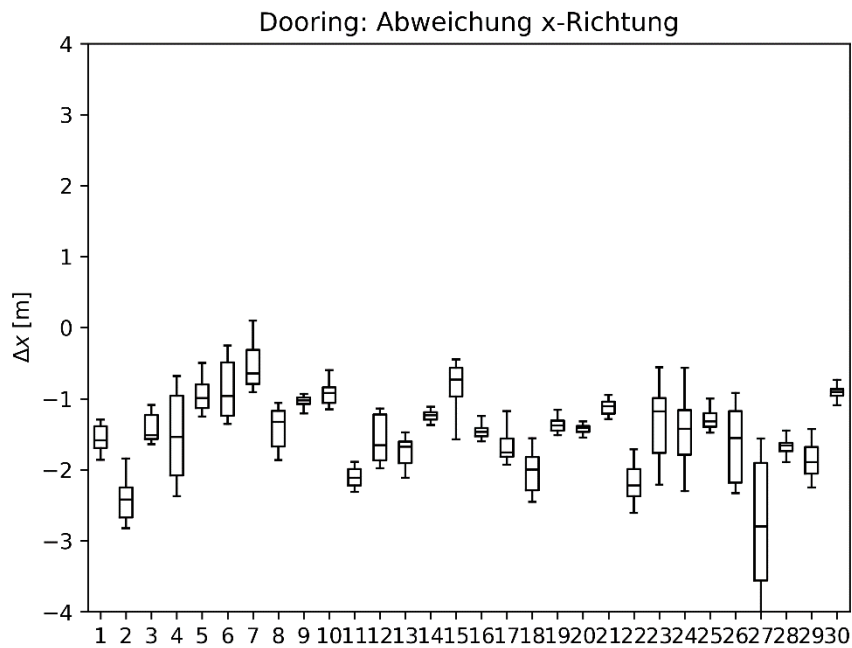


Bild 55. Abweichungen der x-Koordinate zwischen ADMA und ZooZ beim Dooring

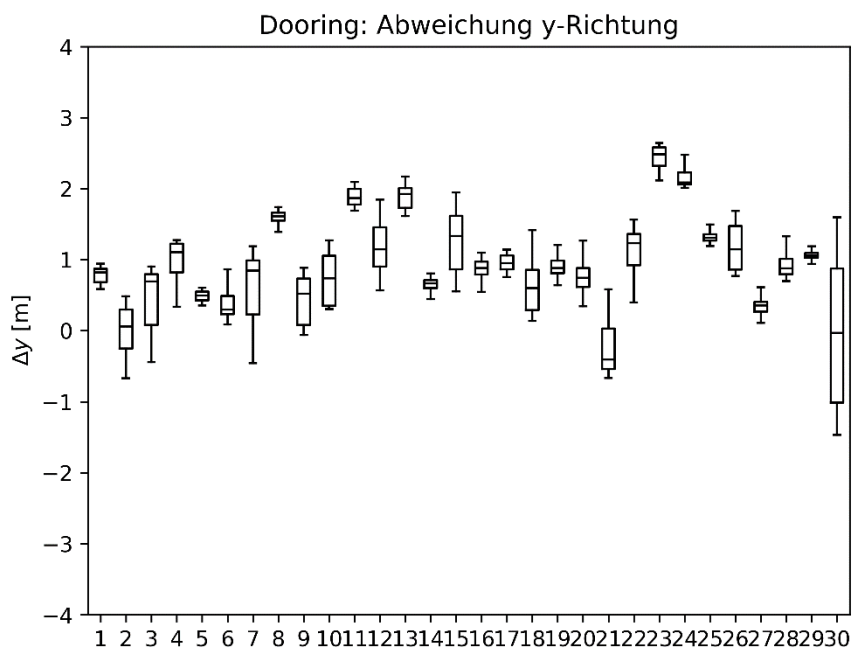


Bild 56. Abweichungen der y-Koordinate zwischen ADMA und ZooZ beim Dooring

In Bild 57 sind die euklidischen Abweichungen der x- und y-Koordinaten (siehe Bild 55 und Bild 56) zwischen ADMA und ZooZ dargestellt. Die Mediane der euklidischen Abweichung bewegen sich stets oberhalb von 1 m und unterhalb von 3 m.

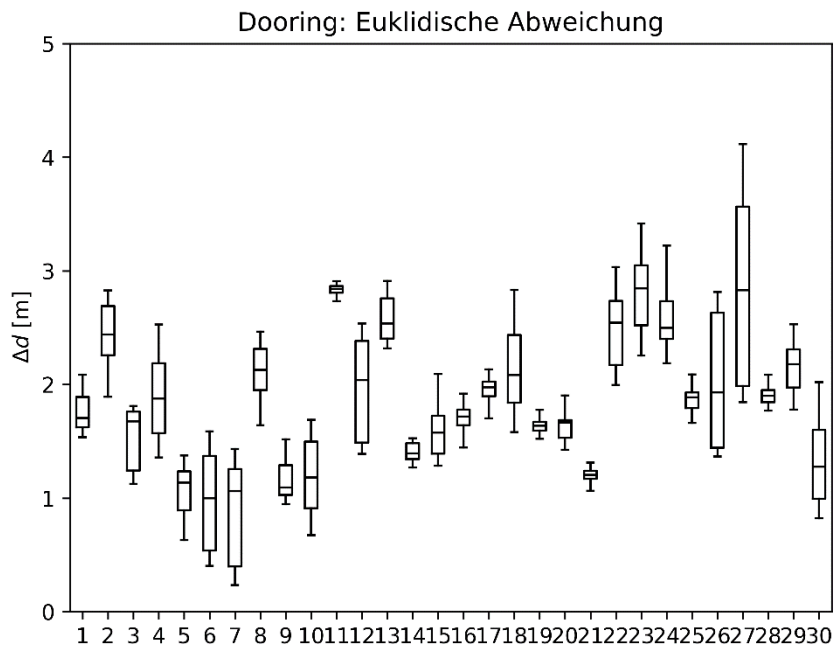


Bild 57. Euklidische Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ beim Dooring

In Bild 58 sind die aggregierten Mediane der Abweichungen zwischen ZooZ und ADMA über alle Dooring-Versuchsfahrten dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass das ZooZ-Gerät die x-Koordinate mit einem Median von -1,44 m, die y-Koordinate mit einem Median von 0,88 m und resultierend der Median der euklidischen Abweichung mit 1,88 m bestimmt wird. Die Interquartilsabstände sind für die x-Koordinate mit 0,55 m und 0,59 m für die y-Koordinate fast gleich groß, für die euklidische Abweichung beträgt der Interquartilsabstand 0,73 m.

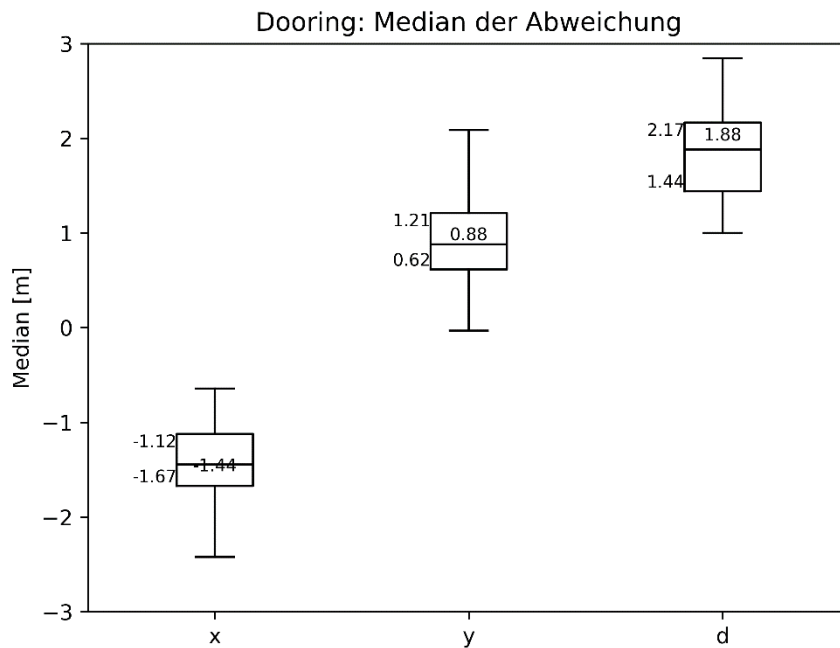


Bild 58. Aggregierte Mediane der x- und y- sowie euklidischen Abweichungen d zwischen ADMA und ZooZ beim Dooring

In Bild 59 sind die aggregierten Standardabweichungen für die x- und y- sowie die euklidische Abweichung illustriert. Die Mediane der Standardabweichungen sind mit 0,20 m für die x-Koordinate, mit 0,21 m für die y-Koordinate und mit 0,22 m für den euklidischen Abstand fast identisch, während der Interquartilsabstand der Standardabweichung der x-Koordinate mit 0,16 m etwas kleiner ist als der der y-Koordinate mit 0,21 m. Der Interquartilsabstand der Standardabweichung des euklidischen Abstandes beträgt 0,11 m. Die y-Koordinate weist demzufolge eine etwas größere Varianz als die x-Koordinate auf.

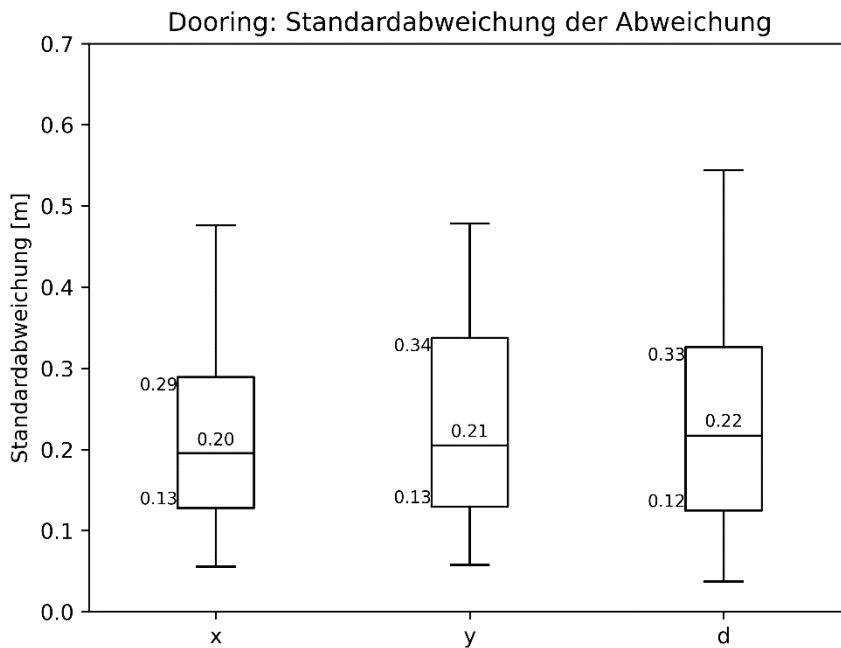


Bild 59. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y- sowie euklidischen Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ beim Dooring

In Bild 60 sind die Abweichungen zwischen ZooZ und ADMA in der Versuchsfahrt 30 der Dooring-Messung und in Bild 61 die Trajektorien beider Geräte dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass sich die euklidische Abweichung von etwa 2,0 m auf etwa 0,8 m verringert und schließlich wieder auf 1,8 m erhöht. Dabei fällt auf, dass die x-Komponente sich von anfangs in Höhe von ca. $|-1,4|$ m über die Zeit verringert, dann aber nahezu unverändert bei ca. $|-1,0|$ m bleibt und schließlich auf ca. $|-0,7|$ m absinkt. Die y-Abweichung liegt anfangs bei ca. $|-1,5|$ m, verringert sich und steigt allerdings nahezu linear auf 1,5 m an.

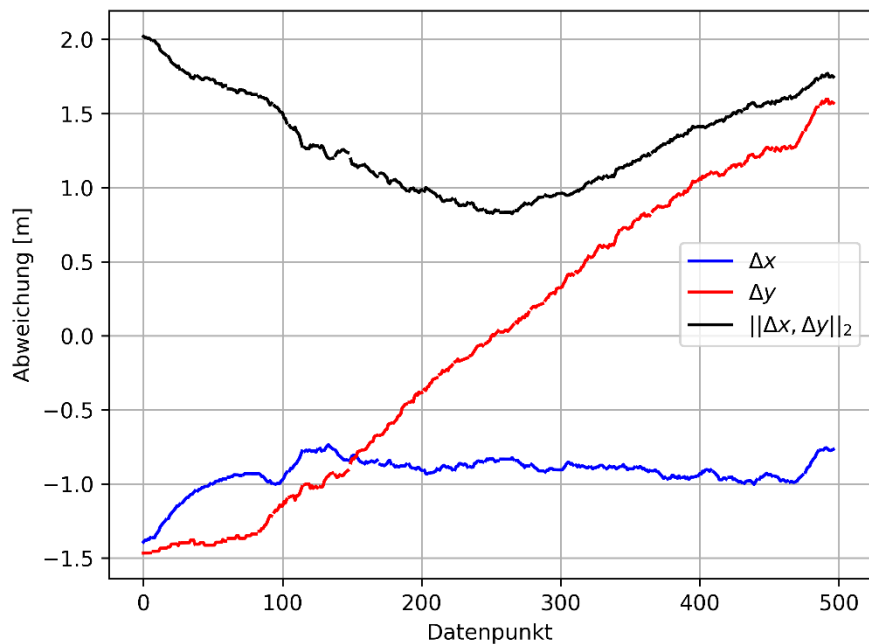


Bild 60. Abweichungen der Koordinaten des ZooZ-Gerätes bei der Dooring-Fahrt 30 (blau: x-Koordinate, rot: y-Koordinate, schwarz: Betrag)

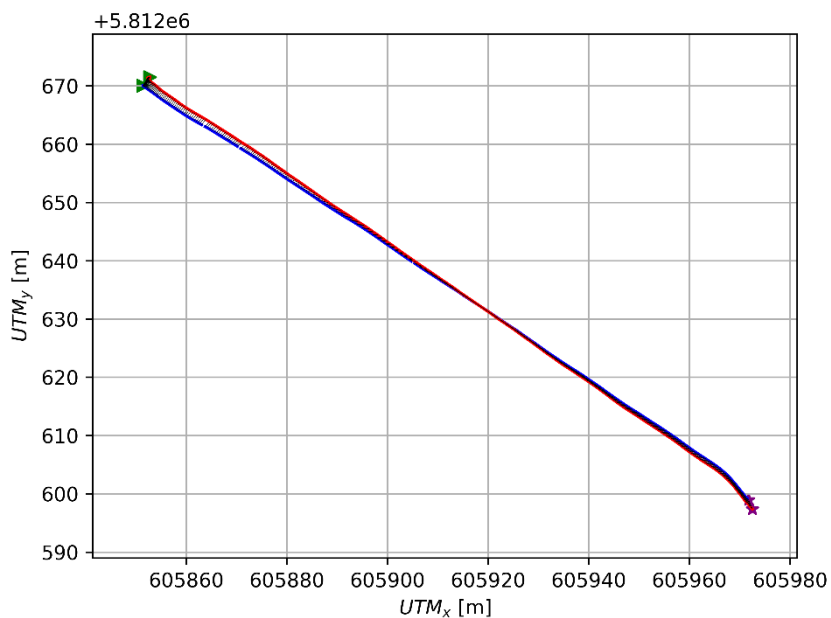


Bild 61. Zugehörige UTM-Trajektorien zur Dooring-Versuchsfahrt 15 (blau: ADMA, rot: ZooZ, Dreieck: Start, Stern: Ende)

In Bild 62 sind die bei den Dooring-Versuchsfahrten gemessenen Zeiten dargestellt, die notwendig sind, um die bei gefahrenen 15 km/h (Versuchsfahrten 1-15) bzw. 20 km/h (Versuchsfahrten 16-30) resultierenden Positionsungenauigkeiten zu kompensieren. Es kann festgestellt werden, dass das Spektrum grob im Median von etwa 0,2 s (bei hoher

Positionsgenauigkeit, siehe Versuchsfahrt 21) auf etwa 0,7 s (bei geringer Positionsgenauigkeit, siehe Versuchsfahrt 11) reicht, wenn von einer Vergrößerung des Abstandes zum Konfliktpunkt ausgegangen wird. Dabei muss beachtet werden, dass zu diesen Kompensationszeiten noch die Summe aller Latenzzeiten (Reaktionszeit, Prozessier- und Übertragungslatenz) sowie die Ausweich-/Bremszeit hinzukommen, um vor kritischen Situationen rechtzeitig zu informieren bzw. zu warnen.

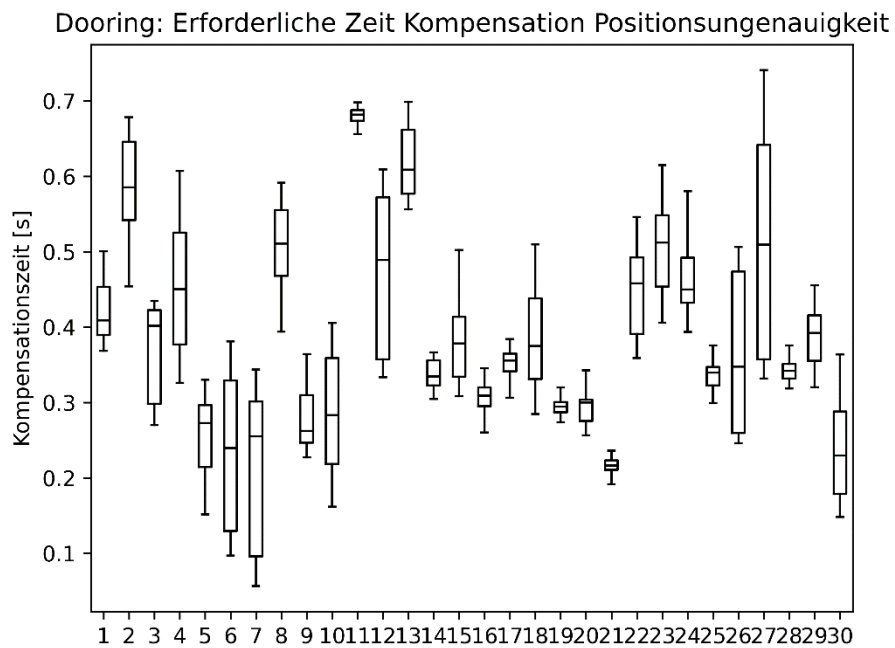


Bild 62. Erforderliche Zeit zur Kompensation der Positionsungenauigkeiten beim Dooring

In Bild 63 sind die aggregierten Mittelwerte und Mediane zu den in Bild 62 illustrierten Werten dargestellt. Beim Dooring kann mit knapp 0,4 s Kompensationszeit bei Interquartilsabständen von knapp 0,2 s und einer Standardabweichung von ca. 0,05 s (nicht dargestellt) gerechnet werden.

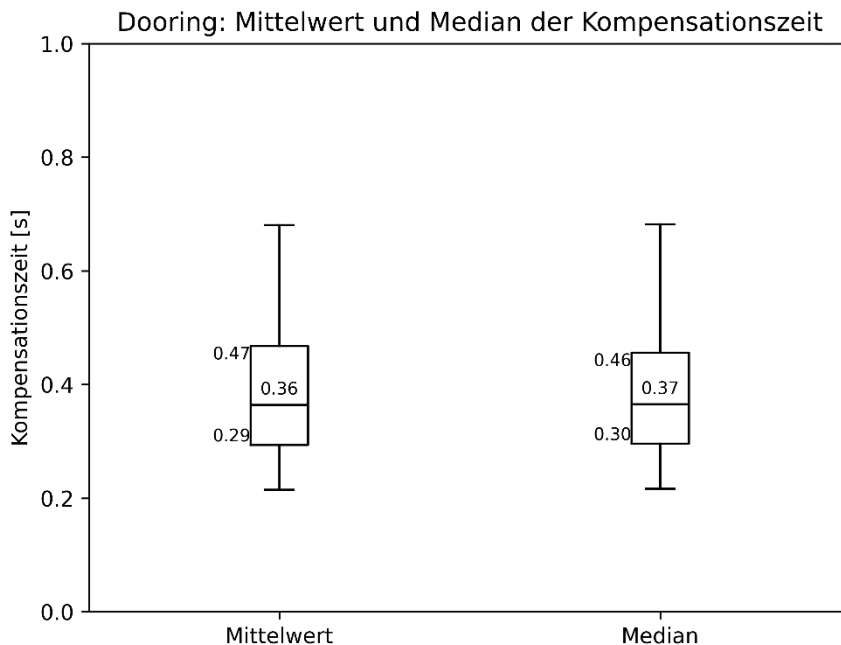


Bild 63. Aggregierte Mittelwerte und Mediane der Kompensationszeiten beim Dooring

In Bild 65 sind die prozentualen Erreichbarkeiten einer gegebenen Positionsgenauigkeit der Freifeldversuchsfahrten im Szenario Dooring dargestellt, wenn von einer Positionsgenauigkeit von 3 m im Median ausgegangen wird (siehe auch Fazit der Positionsgenauigkeitsbestimmung in Kapitel 7.2.3). Links wird binär mit dem Wert von 100% illustriert, wenn diese Positionsungenauigkeit nicht ein einziges Mal überschritten wird, während ein Wert von 0% ein mindestens einmaliges Überschreiten anzeigt. In dem Bild rechts dagegen wird für jeden Datenpunkt erfasst, wie häufig die Positionsungenauigkeit erfüllt ist. Dabei werden fehlende Datenpunkte mitgezählt. Diese Illustration ist demnach nicht binär. Je höher der abgebildete Wert, desto häufiger wird die gestellte Anforderung erreicht.

In beiden Bildern wird deutlich, dass bei allen Versuchsfahrten die oben getroffene Anforderung einer Positionsgenauigkeit von 3 m erfüllt ist. Lediglich in dem Bild rechts erfüllt ein kleiner Teil der Datenpunkte der Versuchsfahrten 22-24 und 27 diese Anforderung nicht, was auf fehlende Datenpunkte zurückzuführen ist.

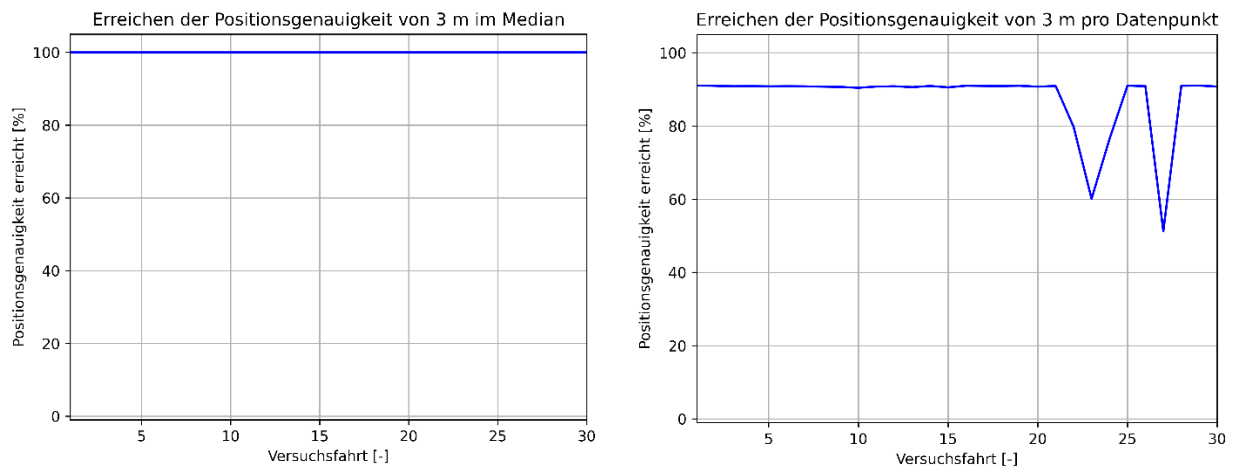


Bild 64. Erreichen der Positionsgenauigkeit von 3 m im Median im Szenario Dooring; links: binäre Darstellung, rechts: nicht-binäre Darstellung

Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342:

In Bild 65 sind die Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ bei Lokalisierung für x- und y-Koordinaten über alle 30 zeitlich unmittelbar hintereinander durchgeführten Versuchsfahrten im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342 dargestellt. Dabei wurden die ersten 15 Fahrten mit 15 km/h und die restlichen 15 Fahrten mit 20 km/h zurückgelegt. Es kann festgestellt werden, dass die y-Abweichungen vom Betrag her größer sind als die x-Abweichungen. Zudem weisen einzelne Fahrten, z. B. Fahrt 8 in x- und y-Richtung oder Fahrt 17 in y-Richtung, eine größere Varianz auf als andere.

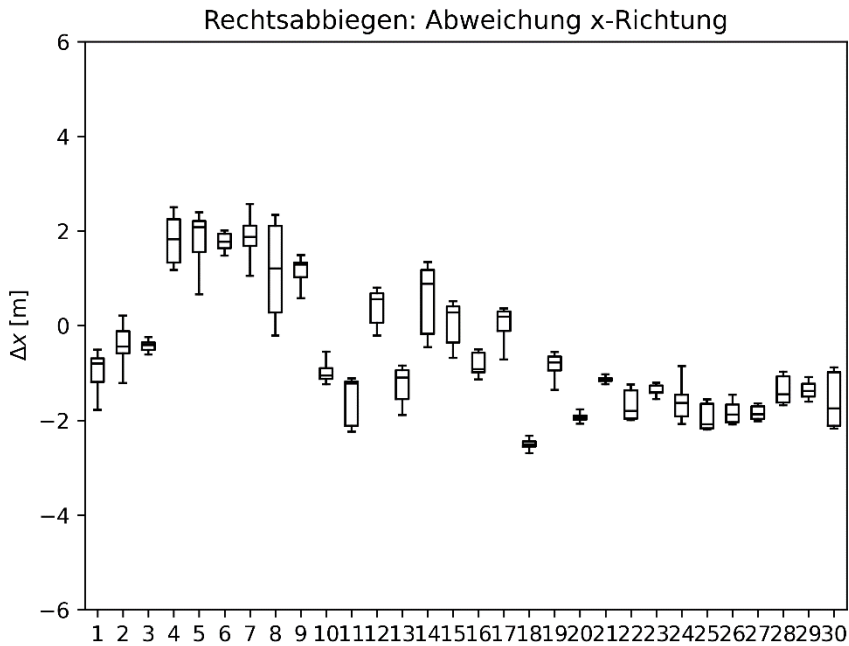


Bild 65. Abweichungen der x-Koordinate zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

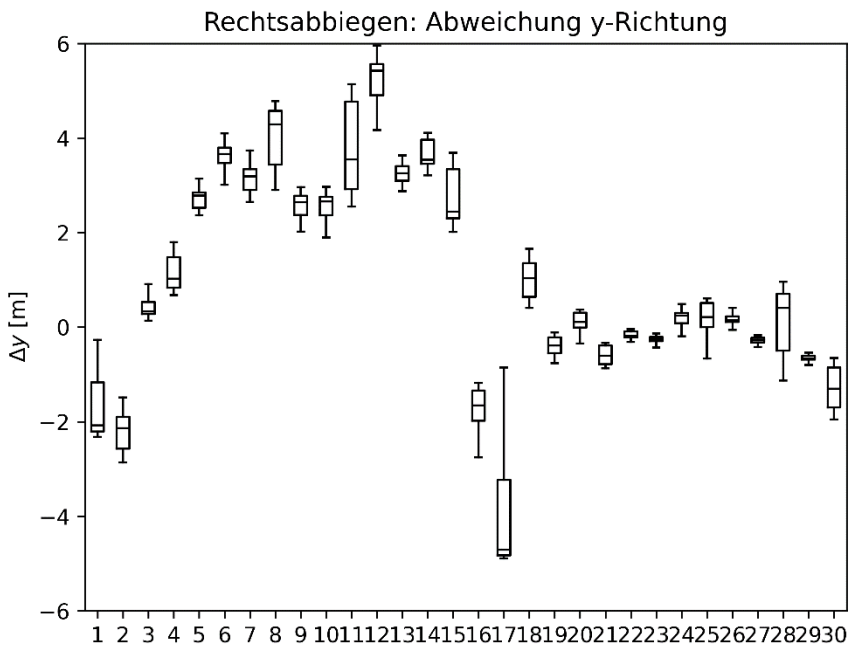


Bild 66. Abweichungen der y-Koordinate zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

In Bild 67 sind die euklidischen Abweichungen der x- und y-Koordinaten (siehe Bild 65 und Bild 66) zwischen ADMA und ZooZ dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass die

euklidische Abweichung im Median stets unterhalb von 5 m, bei der ersten Hälfte der Versuche zumeist oberhalb von 2 m und unterhalb von 4,5 m und bei der zweiten Hälfte der Versuche dagegen zumeist oberhalb von 1 m und unterhalb von 2 m liegt.

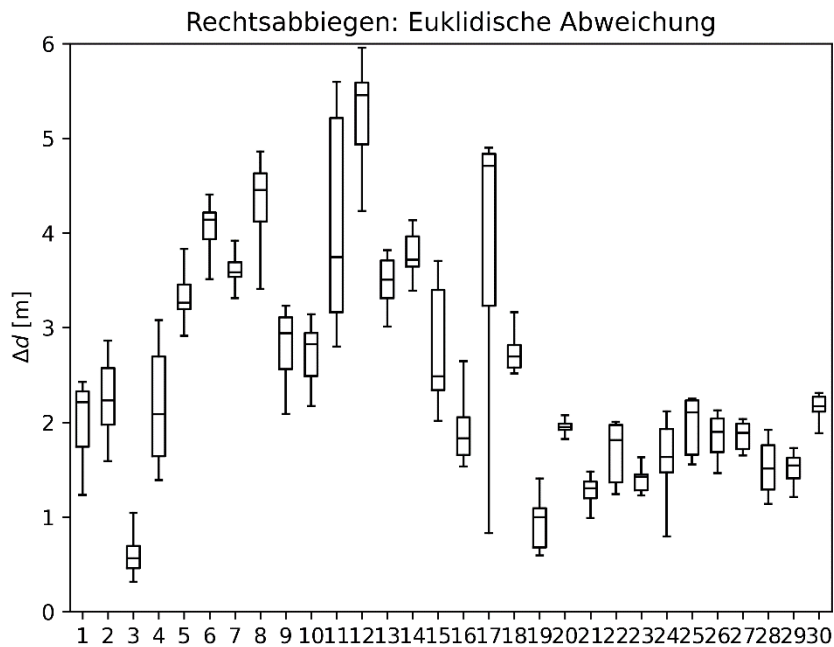


Bild 67. Euklidische Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

In Bild 68 sind die aggregierten Mediane der Abweichungen zwischen ZooZ und ADMA über alle Versuchsfahrten im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342 dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass das ZooZ-Gerät die x-Koordinate mit einem Median von -0,99 m und die y-Koordinate mit einem Median von 0,29 m bestimmt, so dass für die euklidische Abweichung ein Median von 2,19 m resultiert. Die Interquartilsabstände liegen für die x-Koordinate mit 2,08 m deutlich niedriger als mit 3,11 m für die y-Koordinate, während sie für die euklidische Abweichung 1,63 m betragen. Die Varianz der y-Koordinate ist demzufolge viel höher als die der x-Koordinate.

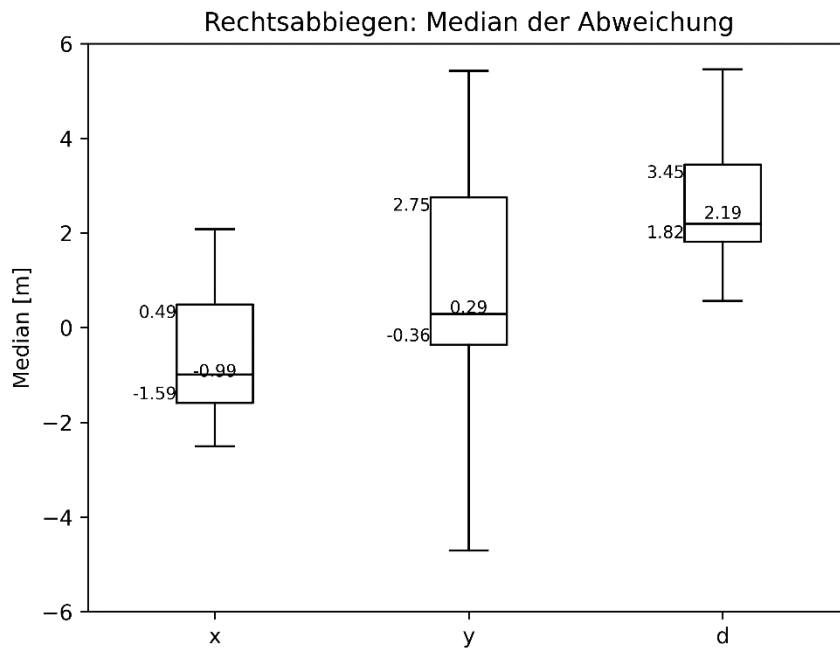


Bild 68. Aggregierte Mediane der x- und y- sowie euklidischen Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

In Bild 69 sind die aggregierten Standardabweichungen für die x- und y- und euklidischen Abweichungen illustriert. Die Mediane der Standardabweichungen sind mit 0,28 m für beide Koordinaten sowie 0,26 m für die euklidische Abweichung bestimmt. Die Interquartilsabstände mit 0,22 m für die x-Koordinate bzw. 0,25 m für die y-Koordinate nahezu identisch, während er bei der euklidischen Abweichung 0,14 m beträgt. Die y-Koordinate weist eine etwas größere Varianz als die x-Koordinate auf.

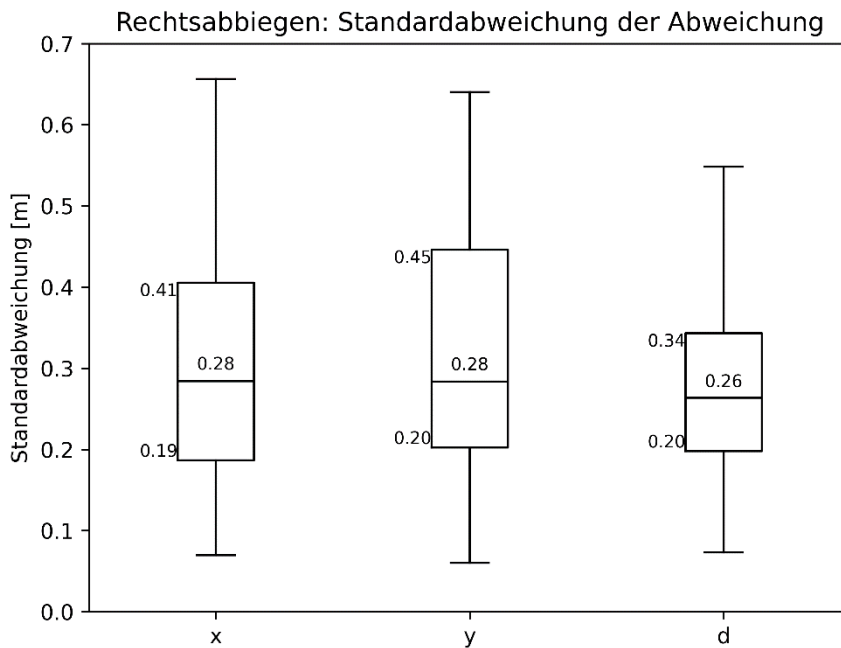


Bild 69. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y-Koordinaten sowie der euklidischen Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

In Bild 70 sind die Abweichungen zwischen ZooZ und ADMA in der Versuchsfahrt 17 und in Bild 71 die zugehörigen Trajektorien im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342 dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass sich die anfangs mit ca. $|-4,7|$ m große y-Abweichung im Laufe der Fahrt auf ca. $|-0,3|$ m verringert, während sich die x-Abweichung mit ca. 0,3 m zuerst verringert, schließlich aber auf knapp $|-1,0|$ m erhöht. Das führt zu einer betragsmäßig großen Abweichung von ca. 5 m, die sich erst ab der Hälfte der Versuchsfahrt auf ca. 1 m reduziert.

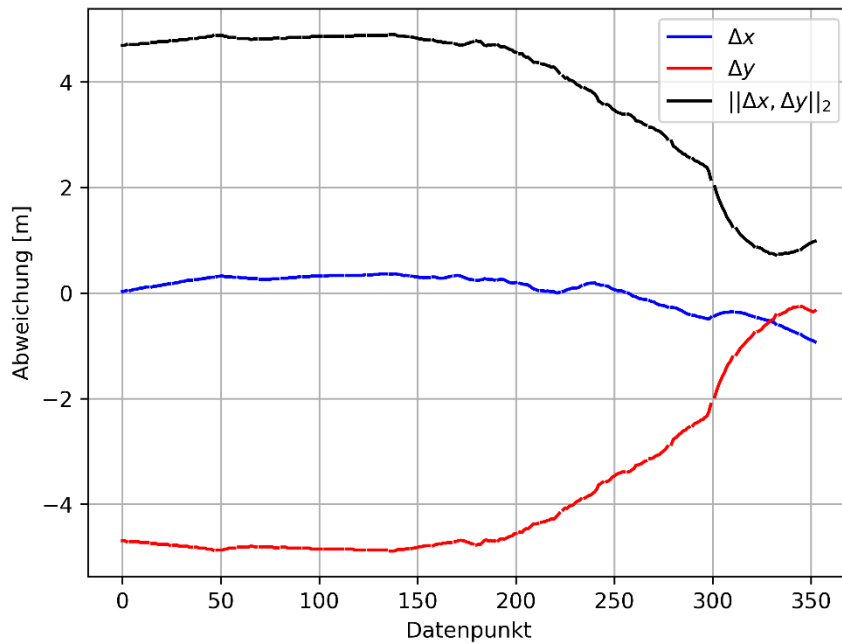


Bild 70. Abweichungen der Koordinaten des ZooZ-Gerätes bei der Versuchsfahrt 17 im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342 (blau: x-Koordinate, rot: y-Koordinate, schwarz: Betrag)

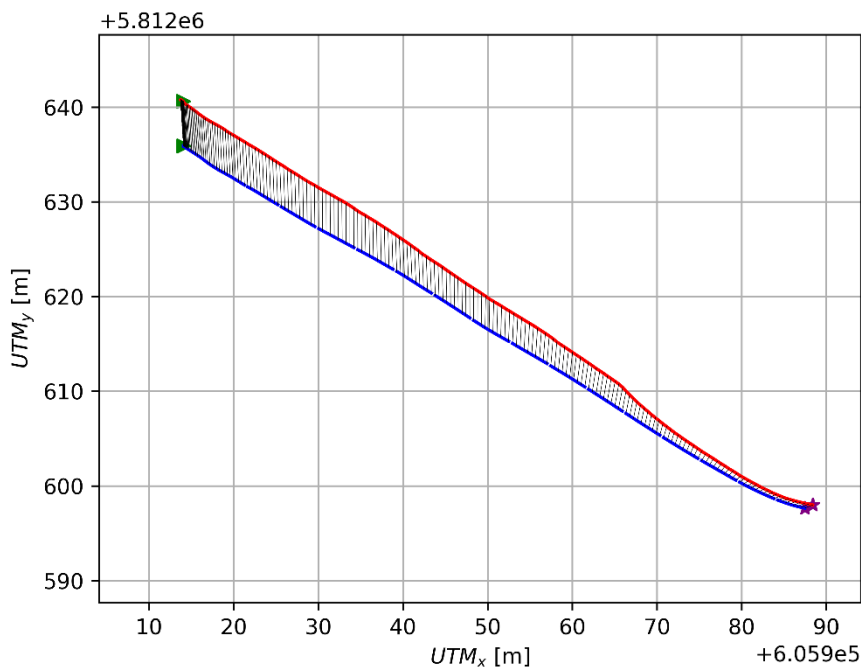


Bild 71. Zugehörige UTM-Trajektorien zur Versuchsfahrt 17 im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342 (blau: ADMA, rot: ZooZ, Dreieck: Start, Stern: Ende)

In Bild 72 sind die bei den Versuchsfahrten beim Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden gemessenen Zeiten dargestellt, die notwendig sind, um die bei gefahrenen

15 km/h (Versuchsfahrten 1-15) bzw. 20 km/h (Versuchsfahrten 16-30) resultierenden Positionsungenauigkeiten zu kompensieren. Es kann festgestellt werden, dass sich die Kompensationszeiten bei 20 km/h (rechte Hälfte) deutlich niedriger sind als bei 15 km/h (linke Hälfte). Eine mögliche Ursache kann die Satellitenkonstellation und die daraus resultierende Streuung der erhobenen Daten sein. Des Weiteren fällt auf, dass Kompensationszeiten von knapp 0,2 s (bei hoher Positionsgenauigkeit, siehe Versuchsfahrt 3) auf etwa 1,3 s (bei geringer Positionsungenauigkeit, siehe Versuchsfahrt 11) benötigt werden, wenn von einer Vergrößerung des Abstandes zum Konfliktpunkt ausgegangen wird. Wie in der Betrachtung zum Dooring muss beachtet werden, dass zu diesen Kompensationszeiten noch die Summe aller Latenzzeiten (Reaktionszeit, Prozessier- und Übertragungslatenz sowie der erforderliche Zeitbedarfswert ε zum Ausgleich der DTA, siehe Gleichung (6) in Kapitel 5.1.1) sowie die Ausweich-/Bremszeit hinzukommen, um vor kritischen Situationen rechtzeitig zu informieren bzw. zu warnen.

Rechtsabbiegen: Erforderliche Zeit Kompensation Positionsungenauigkeit

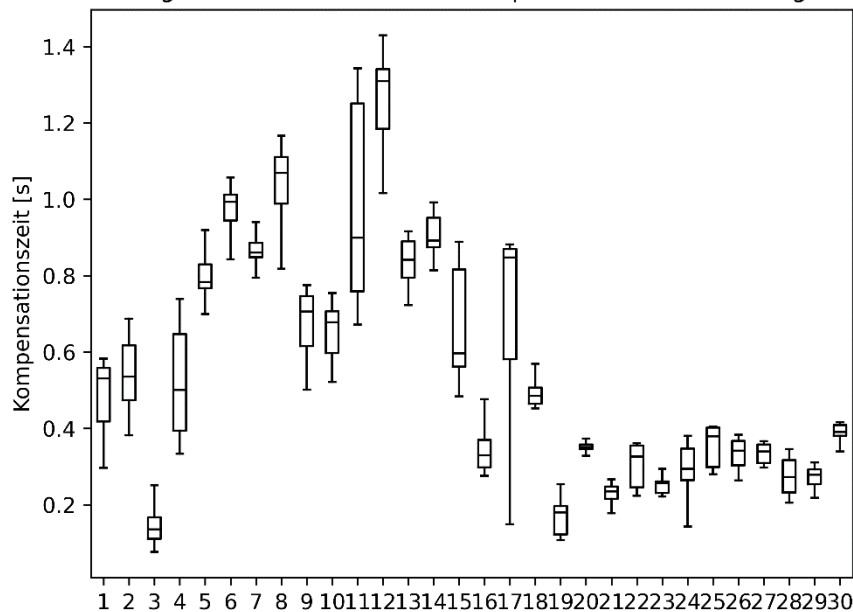


Bild 72. Erforderliche Zeit zur Kompensation der Positionsungenauigkeiten im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahren nach GDV 342

In Bild 73 sind die aggregierten Mittelwerte und Mediane zu den in Bild 72 illustrierten Werten dargestellt. Im Szenario Rechtsabbiegen kann mit knapp 0,5 s Kompensationszeit bei Interquartilsabständen von etwa 0,5 s und einer Standardabweichung von ca. 0,06 s (nicht dargestellt) gerechnet werden.

Rechtsabbiegen: Mittelwert und Median der Kompensationszeit

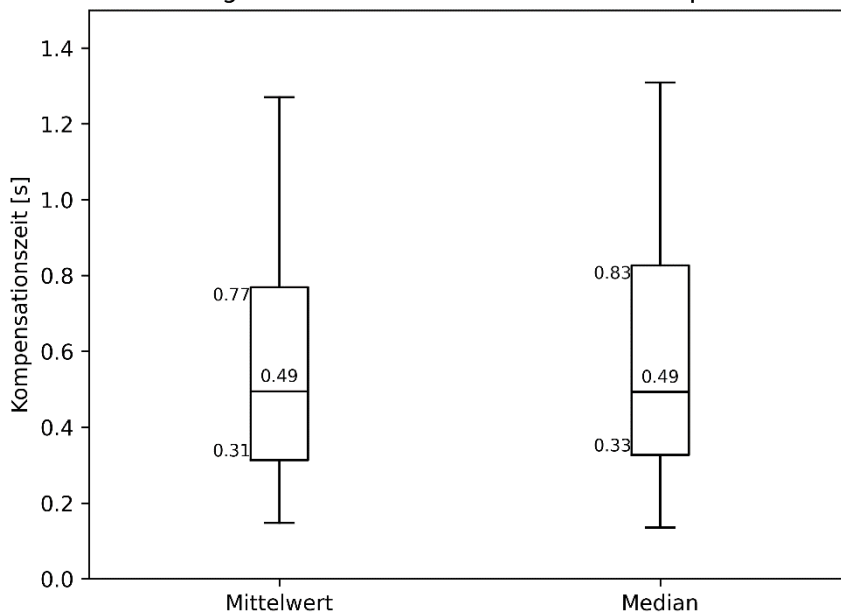


Bild 73. Aggregierte Mittelwerte und Mediane der Kompensationszeiten im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahren nach GDV 342

In Bild 74 sind die prozentualen Erreichbarkeiten der Freifeldversuchsfahrten im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahren nach GDV 342 bei einer akzeptierten Positionsgenauigkeit von 3 m im Median (siehe auch Fazit der Positionsgenauigkeitsbestimmung in Kapitel 7.2.3) visualisiert.

Während im Bild links lediglich einige wenige Versuchsfahrten mit 15 km/h die Anforderungen an Positionsgenauigkeit insgesamt erfüllen (z. B. Versuchsfahrten 5-7, 9-10, 15-16), so erfüllen diese Anforderungen alle Versuchsfahrten 17-30 bei 20 km/h. In der Darstellung rechts ist der prozentuale Anteil dargestellt, der auch miterfasste fehlende Datenpunkte enthält.

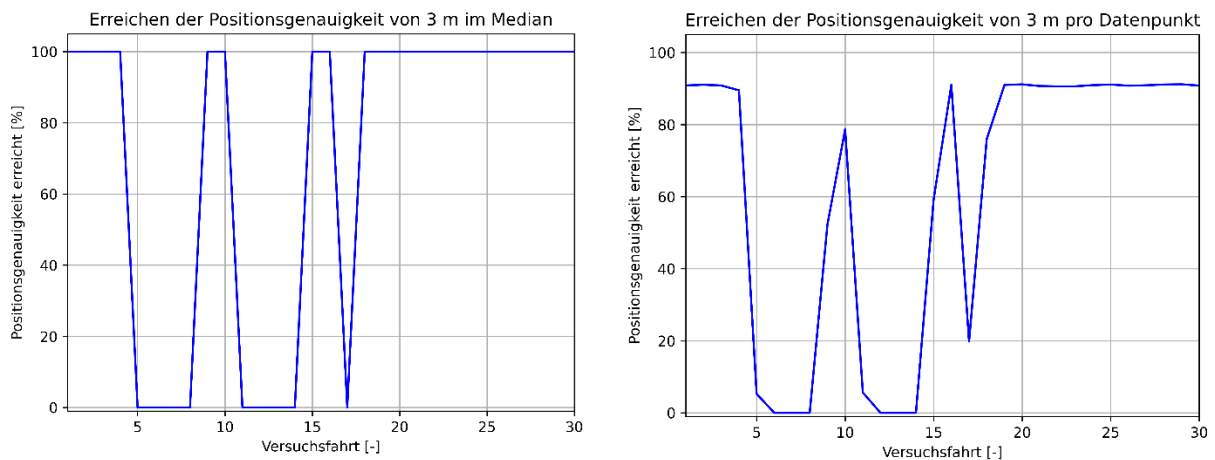


Bild 74. Erreichen der Positionsgenauigkeit von 3 m im Median im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahren nach GDV 342; links: binäre Darstellung, rechts: nicht-binäre Darstellung

Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt:

In Bild 75 und Bild 76 sind die Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ bei Lokalisierung für x- und y-Koordinaten über alle 24 zeitlich unmittelbar hintereinander durchgeführten Versuchsfahrten im Abschattungsszenario Ausfahren aus einer Ausfahrt dargestellt. Dabei wurden die ersten zwölf Fahrten mit 15 km/h und die zweiten zwölf mit 20 km/h zurückgelegt. Es kann festgestellt werden, dass die x-Abweichungen vom Betrag her größer sind als die y-Abweichungen. Es treten erwartungsgemäß größere Abweichungen aufgrund der hier Einfluss nehmenden Mehrwegeausbreitung auf, die in Einzelfällen auch 10 m überschreiten können (z. B. Versuchsfahrt 18). Überdies fallen keine Muster auf, die eine systematische Beeinflussung der Lokalisierungsgenauigkeiten in Abhängigkeit der Versuchsfahrt erkennen lassen.

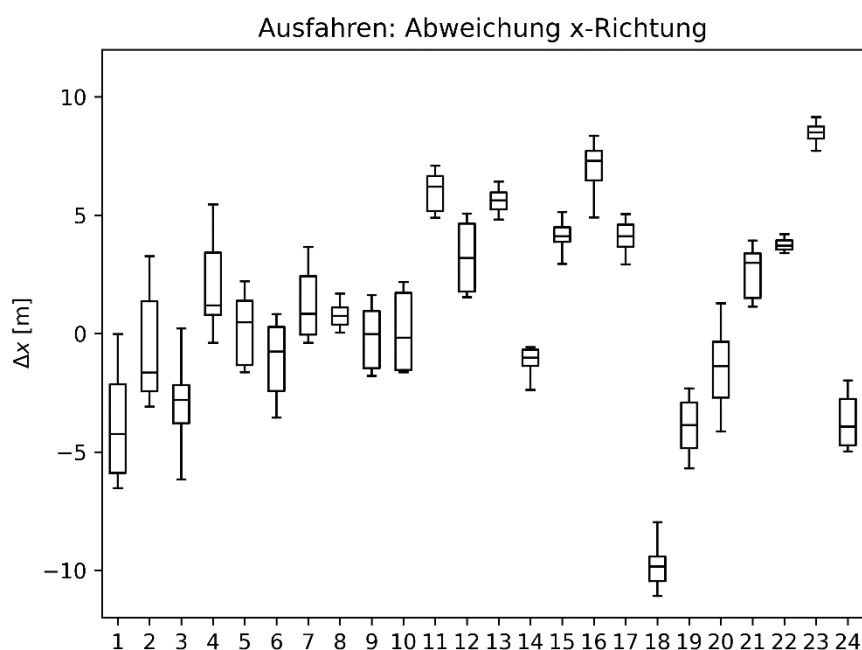


Bild 75. Abweichungen der x-Koordinate zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt unter Abschattungsbedingungen

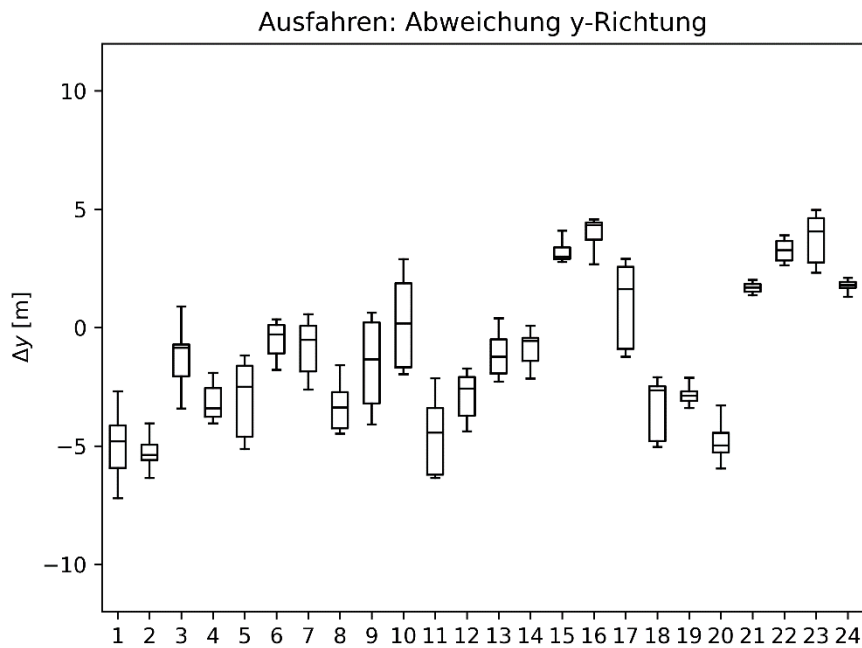


Bild 76. Abweichungen der y-Koordinate zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt unter Abschattungsbedingungen

In Bild 77 sind die euklidischen Abweichungen der x- und y-Koordinaten (siehe Bild 75 und Bild 76) zwischen ADMA und ZooZ dargestellt. Es fällt auf, dass sich die Abweichungen vom Median her im gesamten Spektrum zwischen knapp 1 m (Versuchsfahrt 6) bis hin zu ca. 10 m (Versuchsfahrt 18) bewegen. Überdies muss festgestellt werden, dass diese Abweichungen für die Versuchsfahrten 1-15 tendenziell niedriger sind als die für die Versuchsfahrten 16-30. Eine Ursache könnten die dabei unterschiedlichen gefahrenen Geschwindigkeiten von 15 km/h (erste Versuchshälfte) bzw. 20 km/h (zweite Versuchshälfte) sein, die auf eine Streuung der Daten aufgrund der Satellitenkonstellation zurückzuführen sein können.

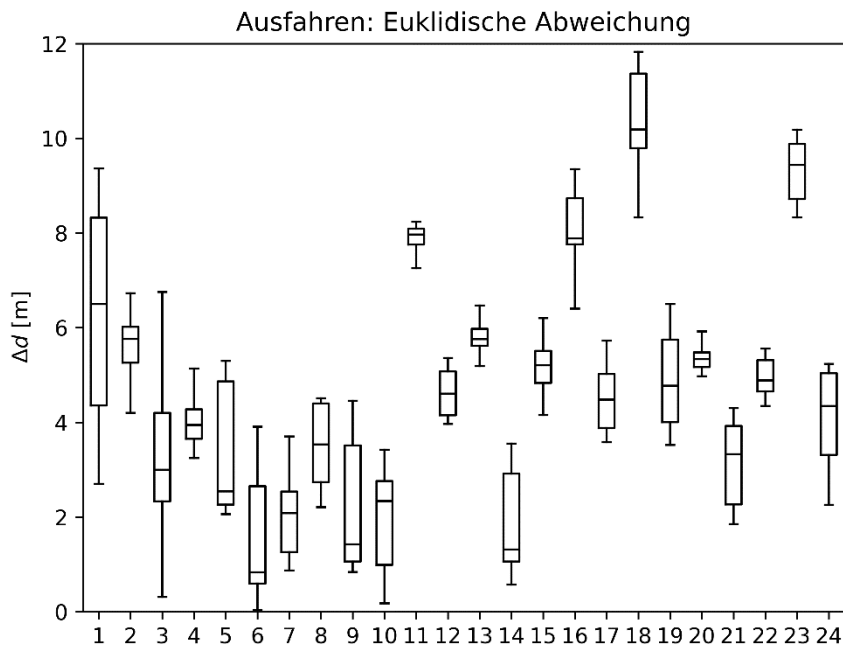


Bild 77. Euklidische Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt unter Abschattungsbedingungen

In Bild 78 sind die aggregierten Mediane der Abweichungen zwischen ZooZ und ADMA über alle Abschattungsversuchsfahrten im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass die Abweichungen des ZooZ-Gerätes für die x-Koordinate mit einem Median von 0,62 m und y-Koordinate mit -1,04 m bestimmt werden. Das führt zu einer euklidischen Abweichung von im Median 4,54 m. Die Interquartilsabstände sind mit 5,26 m für die x- und 4,64 m für die y-Koordinate sowie 2,88 m für die euklidische Abweichung sehr hoch. Die Varianz der x-Koordinate ist etwas größer als die der y-Koordinate.

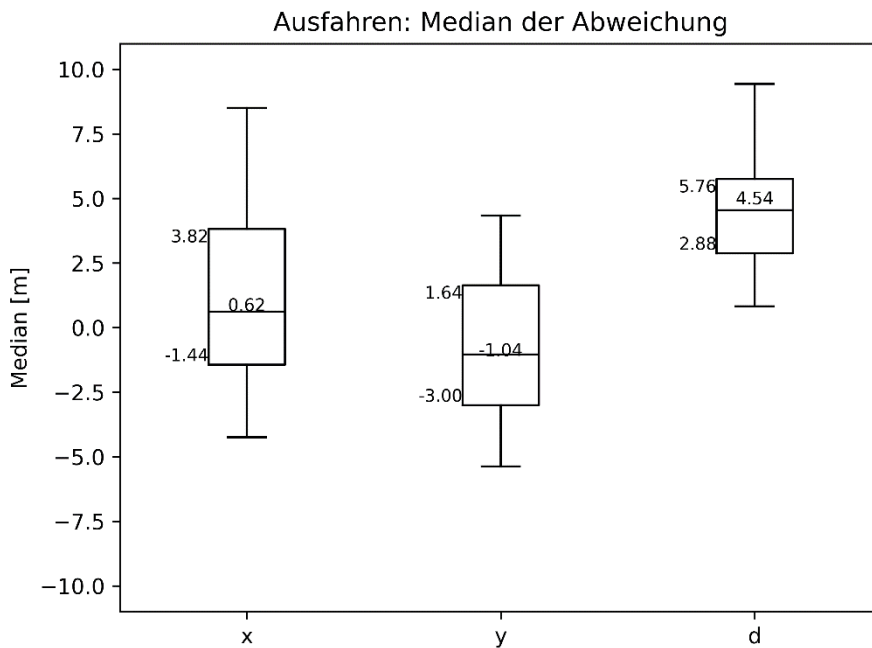


Bild 78. Aggregierte Mittelwerte der x- und y-Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

Die Mediane der aggregierten Standardabweichungen über alle Versuchsfahrten in diesem Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt betragen 1,08 m für die x- und 0,80 m für die y-Koordinate sowie 0,80 m für die euklidische Abweichung und sind damit deutlich höher als in den Freifeldversuchen. Die Interquartilsabstände der Standardabweichungen sind mit 0,80 m für die x- und 0,57 m für die y-Richtung sowie 0,64 m für die euklidische Abweichung ebenfalls deutlich höher als in der Freifeldmessung.

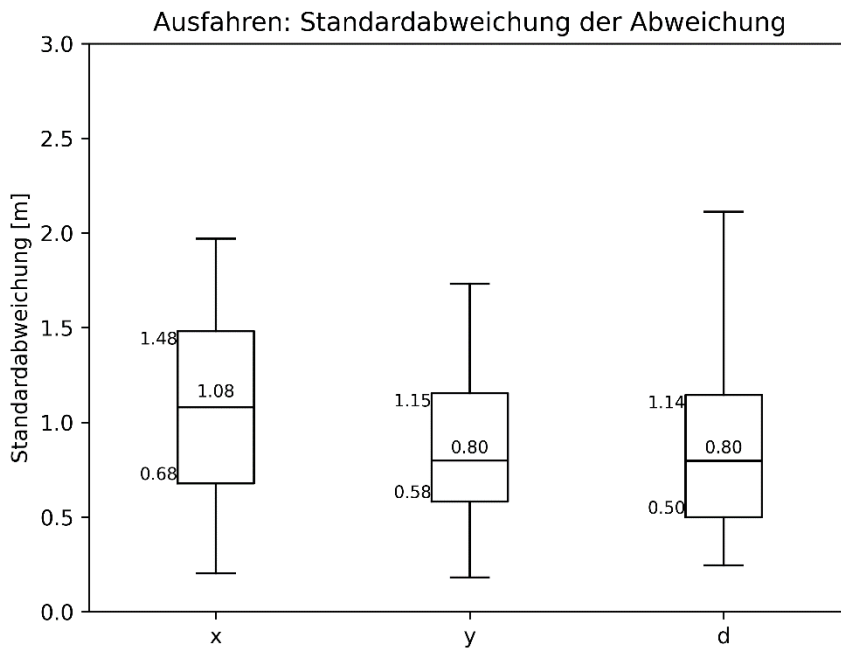


Bild 79. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y- sowie euklidischen Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

In Bild 80 und sind die Abweichungen des ZooZ-Gerätes in Relation zum ADMA-Gerät in der Versuchsfahrt 4 und in Bild 81 die zugehörigen Trajektorien im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt dargestellt. Es kann festgestellt werden, dass sich die anfangs geringe x-Abweichung von ca. 1,0 m im Laufe der Messung auf ca. 5,5 m erhöht, während sich die anfangs mit $|-4,0|$ m große y-Abweichung auf ca. $|-2,0|$ m verringert. Das führt einer betragsmäßig hohen Abweichung über die gesamte Versuchsfahrt von weitestgehend 4 m, die an Ende nochmal auf fast 6 m ansteigt.

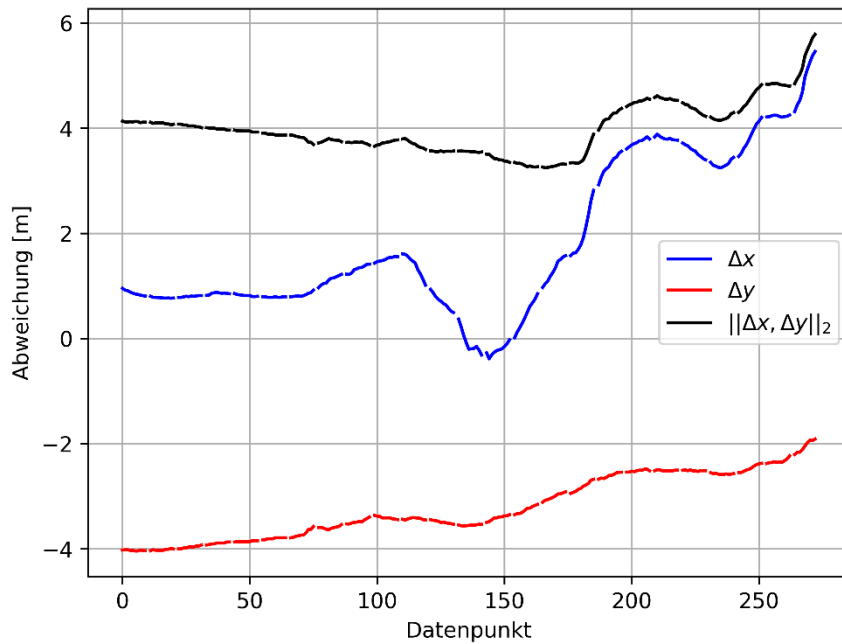


Bild 80. Abweichungen der Koordinaten des ZooZ-Gerätes bei der Versuchsfahrt 4 im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt (blau: x-Koordinate, rot: y-Koordinate, schwarz: Betrag)

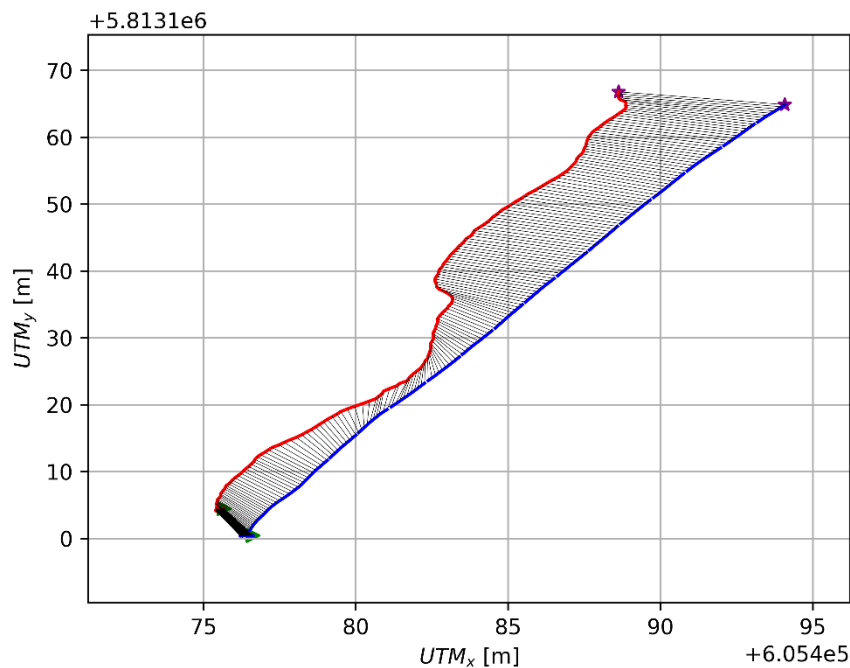


Bild 81. Zugehörige UTM-Trajektorien zur Versuchsfahrt 4 im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt (blau: ADMA, rot: ZooZ, Dreieck: Start, Stern: Ende)

In Bild 82 sind die bei den Versuchsfahrten beim Ausfahren aus einer Ausfahrt gemessenen Zeiten dargestellt, die notwendig sind, um die bei gefahrenen 15 km/h

(Versuchsfahrten 1-12) bzw. 20 km/h (Versuchsfahrten 13-24) resultierenden Positionsungenauigkeiten zu kompensieren. Es kann festgestellt werden, dass Kompensationszeiten von knapp 0,2 s (bei hoher Positionsgenauigkeit, siehe Versuchsfahrt 6) auf etwa 1,9 s (bei geringer Positionsungenauigkeit, siehe Versuchsfahrt 11) benötigt werden, wenn von einer Vergrößerung des Abstandes zum Konfliktpunkt ausgegangen wird. Wie in der Betrachtung zum Dooring und zum Rechtsabbiegen muss beachtet werden, dass zu diesen Kompensationszeiten noch die Summe aller Latenzzeiten (Reaktionszeit, Prozessier- und Übertragungslatenz sowie der erforderliche Zeitbedarfswert ε zum Ausgleich der DTA, siehe Gleichung (6) in Kapitel 5.1.1) sowie die Ausweich-/Bremszeit hinzukommen, um vor kritischen Situationen rechtzeitig zu informieren bzw. zu warnen.

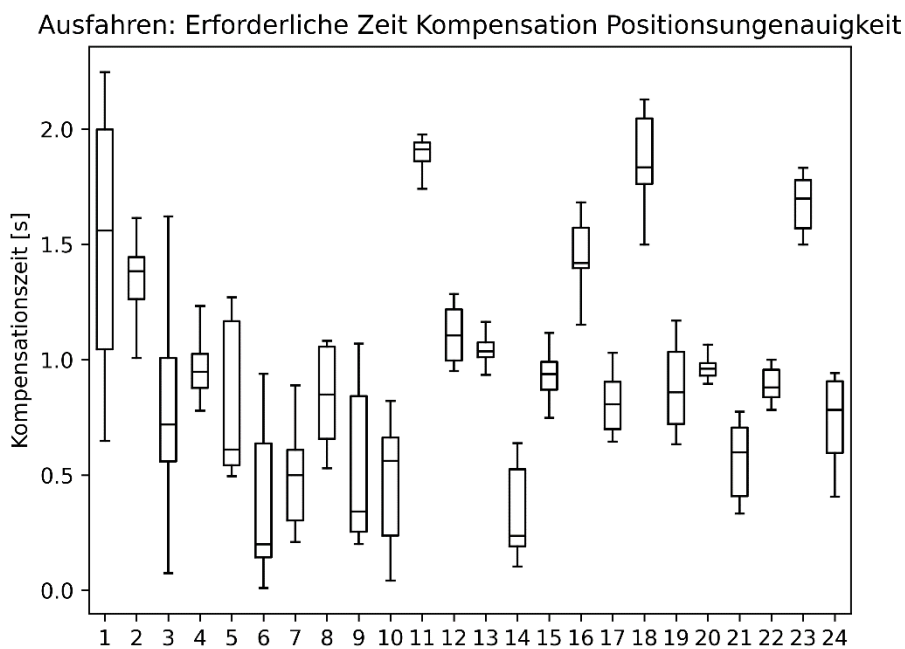


Bild 82. Erforderliche Zeit zur Kompensation der Positionsungenauigkeiten im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

In Bild 83 sind die aggregierten Mittelwerte und Mediane zu den in Bild 82 illustrierten Werten dargestellt. Im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt kann mit knapp 0,9 s Kompensationszeit bei Interquartilsabständen von knapp 0,6 s und einer Standardabweichung von ca. 0,16 s (nicht dargestellt) gerechnet werden.

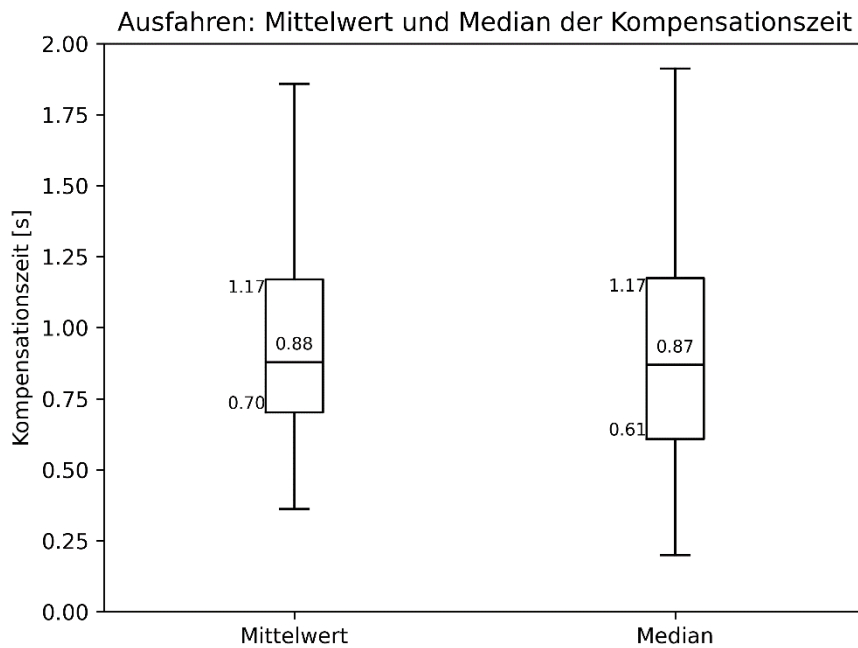


Bild 83. Aggregierte Mittelwerte und Mediane der Kompensationszeiten im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

In Bild 84 sind die prozentualen Erreichbarkeiten der Abschattungsversuchsfahrten bei einer akzeptierten Positionsgenauigkeit von 3 m im Median (siehe auch Fazit der Positionsgenauigkeitsbestimmung in Kapitel 7.2.3) visualisiert.

Im Bild links fällt auf, dass die Versuchsfahrten 15 bis 24 die Anforderungen an die Positionsgenauigkeit nicht erfüllen, was auf die erhöhte Geschwindigkeit von 20 anstatt 15 km/h zurückzuführen ist. Von den ersten 12 Versuchsfahrten bei 15 km/h erfüllt weniger als die Hälfte diese Anforderung. Im Bild rechts wird die prozentuale Aufteilung pro Datenpunkt deutlich, in der auch fehlende Datenpunkte berücksichtigt werden.

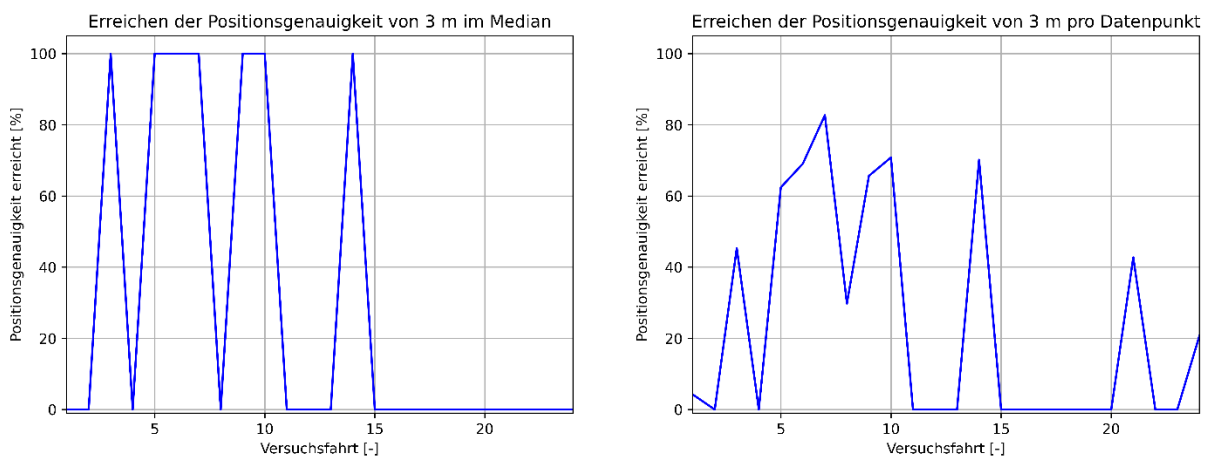


Bild 84. Erreichen der Positionsgenauigkeit von 3 m im Median im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt; links: binäre Darstellung, rechts: nicht-binäre Darstellung

Fazit der Lokalisierungsbestimmung in Bewegung

Die Ergebnisse der Lokalisierung des ZooZ-Gerätes in Referenz zum ADMA-Gerät bei bewegtem Fahrrad sind in Tabelle 4 zusammengestellt und in Bild 85 und Bild 86 illustriert. Anhand dieser sowie insbesondere aus Ergebnissen zu den x- und y-Koordinaten lassen sich die folgenden Aussagen anhand der Versuchsfahrten im Freifeld (Szenarien Dooring und Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342) sowie unter Abschattungsbedingungen (Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt) treffen:

- In den Freifeldversuchen Dooring und Rechtsabbiegen konnten mit aggregierten Medianen von 1,88 m und 2,19 m ähnliche Abweichungen festgestellt werden. Die aggregierten Interquartilsabstände lagen beim Rechtsabbiegen mit dem Median von 1,63 m deutlich höher als beim Dooring mit 0,73 m. Im Gegensatz dazu waren die aggregierten Standardabweichungen mit 0,22 m bzw. 0,26 m in beiden Szenarien fast gleich. In den disaggregierten Ergebnissen lagen die Abweichungen in beiden Szenarien grob zwischen 1-5 m. Es konnte aber festgestellt werden, dass im Szenario Rechtsabbiegen die Genauigkeiten bei den Fahrten, die bei 15 km/h durchgeführt wurden (Mediane zwischen 2-4,5 m) deutlich niedriger waren als die Fahrten, die bei 20 km/h stattfanden (Mediane zwischen 1-2 m). Ob es tatsächlich einen Einfluss der Geschwindigkeit auf die Positionsgenauigkeit der Ortung gibt, konnte nicht geklärt werden. Werden die euklidischen Abweichungen getrennt nach ihren kartesischen Anteilen in x- und y-Koordinate betrachtet, so kann festgestellt werden, dass die Abweichungen der x-Koordinate eher kleiner als die Referenzwerte waren (sie bewegten sich im Spektrum grob zwischen -4 bis +9 m), während die Abweichungen der y-Koordinate eher größer als die Referenzwerte waren (sie bewegten sich grob zwischen -5 bis +4 m).
- In den Abschattungsversuchen im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt waren die Abweichungen mit einem aggregierten Median von 4,54 m den Erwartungen entsprechend signifikant höher als in den Freifeldversuchen. Ebenso verhielt es sich mit dem Interquartilsabstand von 2,88 m und dem Median der Standardabweichung in Höhe von 0,80 m. Werden die Versuchsfahrten im Einzelnen betrachtet, so traten zwar euklidische Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ von 1-10 m auf, aber die Ergebnisse der Abweichungen verhielten sich genau umgekehrt zu den Freifeldversuchen, wenn die x- und y-Koordinaten betrachtet wurden. Das bedeutet, dass die Abweichungen der x-Koordinate (sie bewegten sich grob im Spektrum von -12 bis +9 m) eher größer und die Abweichungen der y-Koordinate (sie bewegten sich grob im Spektrum von -7 bis +5 m) eher kleiner waren als die Referenzwerte. Im Vergleich zu den Freifeldversuchen kann festgestellt werden, dass die Positionsungenauigkeiten bei den Abschattungsversuchen im Median ca. zwei-dreimal so ungenau waren. Werden die aggregierten Standardabweichungen betrachtet, so ergab sich diese als fast viermal so groß wie bei den Freifeldversuchen. Werden die x- und y-Koordinaten anstatt der euklidischen Abweichung betrachtet, so kann festgestellt werden, dass die Mediane der Standardabweichungen der x-Koordinate bei Abschattung für die x-Koordinaten ca. vier- bis fünfmal und für die y-Koordinaten etwa drei- bis viermal so groß wie bei den Freifeldversuchsfahrten.
- Es konnten keine Muster in den Daten erkannt werden, die auf systematische Einflüsse in Abhängigkeit der Versuchsfahrt intraszenarisch schließen lassen. Die ermittelten Abweichungen erschienen pro Versuchsfahrt zufällig zu sein. Es wird an dieser Stelle aber nicht ausgeschlossen, dass sich neben Mehrwegeausbreitungseffekten bei den Abschattungsversuchen weitere systematische Einflussfaktoren auswirken, beispielsweise die oben angesprochene mögliche Indikation der Fahrgeschwindigkeit des Radfahrenden.
- Für die aufgrund der Positionsungenauigkeiten zu kompensierenden Zeiten bei den in den Fahrversuchen gewählten Geschwindigkeiten von 15 bzw. 20 km/h ergaben sich die geringsten aggregierten Kompensationszeiten beim Dooring mit ca. 0,4 s im Vergleich zu 0,5 s beim Rechtsabbiegen 0,9 s beim Ausfahren aus einer Ausfahrt. Die

aggregierten Interquartilsabstände waren beim Dooring mit ca. 0,2 s auch deutlich geringer als die mit ca. 0,5 s beim Rechtsabbiegen und etwa 0,6 s beim Ausfahren aus einer Ausfahrt. Es ist also davon auszugehen, dass unter Freifeldbedingungen grob mit etwa zwischen 0,5-0,8 s und unter Abschattungsbedingungen mit etwa 1,2 s Kompensationszeit zu rechnen ist.

Tabelle 4. Überblick über die aggregierten Ergebnisse zur euklidischen Abweichung zwischen ADMA und ZooZ bei bewegtem Fahrrad

	Dooring (Freifeldversuch)	Rechtsabbiegen (Freifeldversuch)	Ausfahren (Abschattungsversuch)
Median der Abweichung	1,88 m	2,19 m	4,54 m
Interquartilsabstand der Abweichung	0,73 m	1,63 m	2,88 m
Median der Standardabweichung	0,22 m	0,26 m	0,80 m
Interquartilsabstand der Standardabweichung	0,11 m	0,14 m	0,64 m

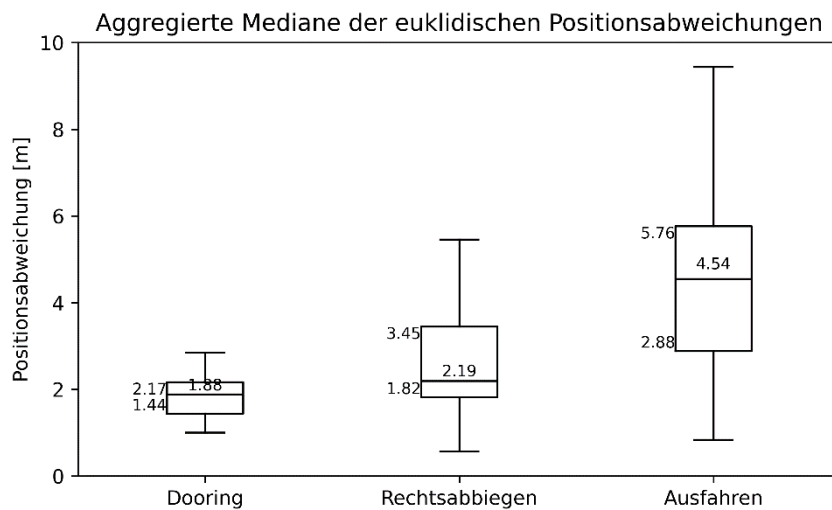


Bild 85. Aggregierte Mediane der euklidischen Positionsabweichungen für die drei untersuchten Szenarien.

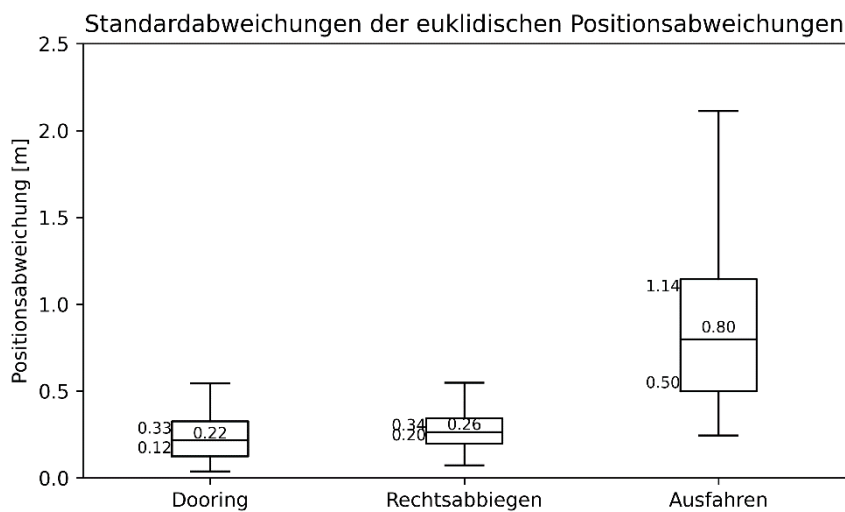


Bild 86. Aggregierte Standardabweichungen der euklidischen Positionsabweichungen für die drei untersuchten Szenarien.

7.2.3 Fazit der Positionsgenauigkeitsauswertung

Die Bestimmung der Positionsgenauigkeiten erfolgte separiert für ZooZ- und ADMA-Geräte hinsichtlich ihrer Abweichungen bei unbewegtem Fahrrad und mit dem ADMA-Gerät als hochgenaue Referenz im Falle des bewegten Fahrrades. Bei bewegtem Fahrrad konnte so das ZooZ-Gerät direkt mit dem ADMA-Gerät verglichen werden. Zusammenfassend können die folgenden Aussagen getroffen werden:

- Das ADMA-Gerät stellte bei der Bestimmung der Abweichungen bei unbewegtem Fahrrad sowohl unter optimalen Freifeldbedingungen als auch im Falle von Abschattungen hochpräzise Lokalisierungsergebnisse und Standardabweichungen bereit, die sich im Zentimeterbereich bewegten. Aufgrund dieser Feststellung und der durchgeführten Plausibilitätsuntersuchungen des ADMA-Gerätes in Bewegung wurde angenommen, dass sie als Referenzsystem zur Bewertung des ZooZ-Gerätes bei bewegtem Fahrrad geeignet ist. Die ADMA weist zur Erkennung von fehlerhaften bzw. ungenauen Messergebnissen eine Eigenüberwachung auf. Messergebnisse, welche durch die Eigenüberwachung ggf. als problematisch eingestuft wurden, sind nicht in die Auswertung eingeflossen. In Summe sind nur sehr wenige Messergebnisse als ungeeignet erkannt worden.
- Das ZooZ-Gerät lieferte erwartungsgemäß mindestens um den Faktor 10 größere Ungenauigkeiten bei der Ruhelokalisierung als das ADMA-Gerät. In den Abschattungsversuchen wies das ZooZ-Gerät aufgrund der Mehrwegeausbreitung deutlich höhere Abweichungen auf als in den Freifeldversuchen. Bei den Freifeldversuchen traten zwar vereinzelte Abweichungen des ZooZ-Gerätes zwischen betragsmäßig bis zu 5-9 m auf, die allerdings im Interquartilsabstand von 25-75 % unterhalb von 2-3 m betragen. Bei den Abschattungsversuchen traten vereinzelt Abweichungen von bis zu 12 m auf, die im Interquartilsabstand von 25-75 % unterhalb von betragsmäßig zwischen 4 und etwas mehr als 5 m lagen.
- Applikationstechnisch gesehen müssten Positionsungenauigkeiten von ca. 3-5 m in Kauf genommen werden und dennoch eine verlässliche Kollisionswarnung bzw. -information erfolgen (Hinweis: Verkehrsteilnehmer legen 3-5 m bei 15 bzw. 20 km/h in 0,54-1,2 s zurück). Die zum Ausgleich dieser Positionsungenauigkeiten erforderlichen Kompensationszeiten wurden für die während der Versuchsfahrten gefahrenen Geschwindigkeiten von 15 und 20 km/h berechnet. Diese Kompensationszeiten betragen

grob zwischen 0,4-0,9 s bei Interquartilsabständen zwischen 0,2-0,6 s. In Summe muss zum Ausgleich der Positionsungenauigkeiten mit ca. 1,2 s Kompensationszeit gerechnet werden.

- Aus den theoretischen Überlegungen in den Kapiteln 5.1 und 5.2 geht bei Radfahrgeschwindigkeiten zwischen 7 und 25,5 km/h ein stets erforderlicher Zeitbedarf von etwa 1,7-2,2 s hervor, der aufgebracht werden muss, um eine kritische Situation als unerwartetes Ereignis durch den Radfahrenden zu identifizieren (Reaktionszeit bei unerwartetem Ereignis: 1,3 s), technisch zu erfassen (Prozessierzeit: 0,15 s) und als Risiko per Funk zu kommunizieren (Übertragungszeit: 0,1 s) sowie der erforderlichen Zeitbedarf, um den Bremsvorgang mit einer Bremsverzögerung von $-5,5 \text{ m/s}^2$ mit dem Fahrrad zu beginnen (t_{TTC} : 0,18-0,64 s). Wird im Falle der untersuchten Szenarien Rechtsabbiegen bzw. Ausfahren aus einer Ausfahrt die Größe ε zum Ausgleich der Fahrzeuggröße bei derartigen Begegnungssituationen in Höhe von 1 s angesetzt, werden anstatt der oben geschilderten 1,7-2,2 s bereits 2,7-3,2 s im Vorlauf benötigt, um einer kritischen Situation zu begegnen. Die Konsequenz daraus ist, dass 1,7-2,2 s bzw. 2,7-3,2 s vor einer potentiell kritischen Interaktionssituation eine verlässliche Kollisionsprognose erfolgen muss. (Junghans u. a. 2024) haben im Anwendungsfall „rechtsabbiegender Kfz vs. geradeausfahrender Radfahrender“ an der Braunschweiger Forschungskreuzung mit Hilfe eines videobasierten Erfassungssystems gezeigt, dass eine verlässliche Warnung zwischen 1,5-2,9 s und 10-11 m vor dem Konfliktpunkt praktisch tatsächlich möglich ist⁶.
- Zu diesen oben genannten Zeitbedarfswerten von 1,7-2,2 s bzw. 2,7-3,2 s kommt die Kompensationszeit von bis zu etwa 1,2 s hinzu, die zum Ausgleich der Positionsungenauigkeiten erforderlich ist, wenn angenommen wird, sich die Positionsungenauigkeit auf eine scheinbare Erhöhung des Abstandes zum Konfliktpunkt auswirkt. Praktisch bedeutet das, dass für eine verlässliche Kollisionsprognose bei gleichzeitigem Ausgleich von Positionsungenauigkeiten ein zeitlicher Vorlauf von 2,9-3,4 s bzw. 3,9-4,4 s erforderlich wäre.
- Anhand dieser Ergebnisse kann festgestellt werden, dass die menschliche Reaktionszeit (ca. 1,3 s bei unerwarteten Situationen) sowie die Ungenauigkeit bei der Positionsbestimmung (ca. 1,2 s Kompensationszeit) den größten Einfluss auf die hohe Vorlaufzeit bei der Konflikterkennung, -kommunikation und -beseitigung von in Summe ca. 2,5 s haben. Das Reduktionspotential dieses Zeitpuffers wird von den Autoren dieses Berichts bei etwa 1,5 s gesehen, wenn es gelingt, die menschliche Reaktionszeit bei unerwarteten Situationen durch Erhöhung des Situationsbewusstseins um 0,6 s von 1,3 s auf 0,7 s bei erwarteten Situationen zu verringern. Das kann beispielsweise durch das Aussenden einer Informations- oder „Awareness“-Nachricht erreicht werden. Des Weiteren wird vermutet, dass die Kompensationszeit der Positionsungenauigkeit von 1,2 s technisch durch Verwendung genauere Ortungssysteme und dedizierte Verfahren (z. B. durch Verwendung von besseren Bewegungsmodellen, dGNSS-Systeme mit Korrekturdaten, Fusion mit komplementären Datenquellen, Landmarkendetektion) um ca. 0,9 s auf etwa 0,3 s verringert werden kann. Wenn das gelingt, so besteht das Potential einer Reduktion der oben genannten Zeitbedarfswerte von 2,9-3,4 s bzw. 3,9-4,4 s auf 1,4-1,9 s bzw. 2,4-2,9 s, was den praktisch ermittelten Werten von 1,5-2,9 s (Junghans u. a. 2024) deutlich näherkommt.
- Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es grob eines Zeitpuffers von 3-4,5 s vor der potentiell gefährlichen Situation bedarf, in der eine verlässliche Identifikation, Übertragung an und Response des Radfahrenden unter Berücksichtigung der Positionsungenauigkeiten erfolgen muss, um einen Unfall zu verhindern. Diesen Zeitbedarf algorithmisch verlässlich, d. h. mit geringen falsch-positiven und falsch-negativen

⁶ Dabei ist zu beachten, dass die Voraussetzungen und Bedingungen andere waren. Es kam ein videobasiertes Erfassungssystem mit einer geschätzten Positionsungenauigkeit von ca. 0,6 m zur Anwendung, dass eine technische Gesamtlatenz von knapp 0,6 s aufwies.

Ereignismeldungen, umzusetzen, ist jedoch nur bei einer hohen Konfidenz der Ereignisdetektion möglich und damit technisch eine große Herausforderung. Es ist aber durchaus technisch realisierbar, statt einer Warnmeldung eine Meldung im Sinne einer Information über potentiell bevorstehende Ereignisse zu übertragen.

- Bei den Versuchsfahrten konnten keine systematischen Einflüsse auf die Positionsgenauigkeit und damit resultierende Muster identifiziert werden. In einigen Versuchsfahrten waren die Abweichungen zum Anfang der Fahrt groß und verringerten sich; in anderen Versuchsfahrten verhielt es sich genau umgekehrt. Manche Versuchsfahrten offenbarten eine anwachsende Abweichung der Positionsungenauigkeit im Laufe der Messung. Aufgrund des Abbruchs der Messung nach Beendigung der Versuchsfahrt ist aber nicht klar, ob sich die Abweichungen weiter erhöht hätten. Das gilt es in weiterführenden Untersuchungen zu prüfen.

8 Weitergehende Betrachtungen

8.1 Ortungsbasierte Eigenschaften

In diesem Kapitel wird auf weitere Eigenschaften der Ortung eingegangen, die nicht direkt durch die bisherigen Auswertungen abgedeckt wurden. Zunächst wird das Aufstartverhalten von GNSS-Empfängern in Kapitel 8.1.1 thematisiert. Anschließend wird die Nutzung einer IMU für VRUs in Kapitel 8.1.2 näher erläutert. Abschließend erfolgt eine Diskussion der Ausgaberate des GNSS-Empfängers in Kapitel 8.1.4, welche die systembedingte Latenz, wie in Kapitel 7.1.1 dargestellt, aufgreift.

8.1.1 Aufstartverhalten des GNSS-Empfängers

In diesem Bericht wird die Aufstartzeit eines GNSS-Empfängers definiert als der Zeitraum, der vergeht, bis der GNSS-Empfänger nach seiner Aktivierung einen stabilen GNSS-Fix bereitstellen kann. Ein GNSS-Fix (Global Navigation Satellite System Fix) bezeichnet den Prozess und den Zustand, in dem ein GNSS-Empfänger ausreichend Satellitensignale empfängt und verarbeitet, um seine eigene geografische Position (Längen- und Breitengrad) sowie Höhe präzise zu bestimmen. Ein Fix bedeutet also, dass der Empfänger erfolgreich eine Positionsberechnung durchgeführt hat und nun die genaue Position des Empfängers bekannt ist. Diese Zeitspanne ist von entscheidender Bedeutung, um zu bestimmen, ab welchem frühestmöglichen Zeitpunkt eine Verbesserung des Sicherheitsniveaus durch eine C-ITS-Einheit erzielt werden kann. Eine erste stabile und dann kontinuierliche GNSS-Position ist erforderlich, um valide Nachrichten von Radfahrenden zu übermitteln.

Die Zeit bis zum Fix eines GNSS-Empfängers wird auch als Time to first Fix (TTFF) bezeichnet. Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob es sich um einen Kalt-, Warm- oder Heißstart handelt. Bei einem Kaltstart hat der Empfänger keinerlei Informationen über seinen Standort, die Uhrzeit oder Almanach-Daten. Beim Warmstart verfügt der Empfänger über Almanach-Daten, jedoch nicht über aktuelle Ephemeriden. Bei einem Heißstart hat der Empfänger alle notwendigen Informationen gespeichert und benötigt lediglich eine Bestätigung seiner aktuellen Position. Diese Zeiten können sich jedoch je nach Qualität des Empfängers, der Satellitenkonstellation, den atmosphärischen Bedingungen und anderen Faktoren wie urbaner Bebauung verändern. Bei der Nutzung von allen verfügbaren GNSS-Systemen und einer günstigen Signalstärke ist die für die TTFF mit wenigen Sekunden bis zu einer halben Minute zu rechnen. (Garcia-Molina u. a. 2023; Han u. a. 2018; Paonni u. a. 2010) In den Versuchen mit der ZooZ-Einheit wurde bei der Nutzung im Freiraum direkt nach dem Hochfahren eine stabile Positionsangabe zur Verfügung gestellt. Somit konnte die Zeit nicht messtechnisch ermittelt werden, sowohl im Kalt-, Warm- als auch im Heißstart. Die ZooZ-Einheit verwendet als GNSS-Empfänger den uBlox ZED-F9R.

8.1.2 Nutzung einer IMU für VRUs

Für die Verbesserung der Positionsinformationen und die Kompensation von Signalabbrüchen (Dead reckoning) kann eine IMU genutzt werden. Hochwertige GNSS-Empfänger, wie

der von der ZooZ-Einheit verwendete uBlox ZED-F9R, liefern dazu bereits interne Dynamikmodelle und Sensoren. Für die korrekte Nutzung der IMU ist ein entsprechend angepasstes Dynamikmodell notwendig, welches zu dem Trägersystem (z. B. Pkw, Fahrrad, Zug, etc.) passt. Beispielsweise besitzt der uBlox ZED-F9R ein E-Scooter-Modell, das laut Angaben des Herstellers auch für Fahrräder genutzt werden könnte, jedoch für die Verwendung fürs Fahrrad zu validieren wäre. Die Nutzung der uBlox IMU setzt in diesem speziellen Fall die Anbindung eines Geschwindigkeitssignals voraus. Ein Gyroskop und ein Beschleunigungssensor sind auf dem GNSS-Chip untergebracht.

Neben den Anforderungen an die Hardware, sind Anforderungen an die Montage und Konfiguration zu beachten. Zu den Montageanforderungen gehört unter anderem die Anbringung des Gerätes möglichst über der Achse des Geschwindigkeitssensors. Außerdem sollte von einer Anbringung des GNSS-Empfängers am Fahrradlenker abgesehen werden. Gerade wiederholte kleine Bewegungen des Lenkers lassen ein Bewegungsrauschen entstehen, was zu einer Degradierung der Filterqualität führen kann. (u-blox 2023) Eine Montage an einer anderen Position als dem Lenker kann jedoch bei Einheiten, die die Antennen und die HMI-Komponenten im Gerät integriert haben, ggf. zu einer verschlechterten Sichtbarkeit des HMIs und zu einer Abschattung der Antennen führen. Zudem ist es erforderlich, die IMU zu kalibrieren. Ein Wechsel der C-ITS-Einheit zur Nutzung an verschiedenen Trägersystemen zieht ggf. eine Neukalibrierung nach sich. Informationen wie Rahmengröße, Radumfang und andere sind händisch durch den Nutzer über ein HMI oder eine App anzupassen. Die Kalibrierung der IMU an dem Trägersystem selbst erfolgt bei modernen GNSS-Empfängern automatisch. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass eine IMU-Nutzung durchaus sinnvoll sein kann, jedoch die relevanten Randbedingungen zu berücksichtigen sind, um eine möglichst hohe Positionsgenauigkeit zu erwirken. In den durchgeführten Versuchsfahrten mit dem Forschungsfahrrad wurde die integrierte IMU des GNSS-Empfängers aufgrund des fehlenden Geschwindigkeitssignals und der Anbringung am Fahrradlenker nicht genutzt. Daher ist davon auszugehen, dass sich die Positionsgenauigkeit der in diesem Bericht beschriebenen Versuche durch die Nutzung einer IMU weiter verbessern lassen. Eine nicht korrekt eingemessene und parametrisierte IMU würde dazu im Gegensatz zu einer weiteren Verschlechterung der Positionsgenauigkeit führen.

8.1.3 Nutzung von Korrekturdaten

Für die Verbesserung der Genauigkeit von GNSS-Empfängern durch Korrekturdaten gibt es verschiedene Möglichkeiten. Dem Anwender stehen dabei verschiedene Methoden zur Verfügung. Die Wahl der Methode hängt von den spezifischen Anforderungen an die Genauigkeit, die geografische Lage und das Budget ab. Jede Methode hat ihre eigenen Vor- und Nachteile in Bezug auf Kosten, Verfügbarkeit und erforderliche Ausrüstung. Der uBlox ZED-F9R kann als Korrektursignale folgende Eingangsformate verarbeiten: RTCM v. 3.3, SPARTN 2.0. Über RTCM lassen sich z. B. RTK (Real Time Kinematic) Signale an den ZED-F9R übergeben, der einen eingebauten RTK-Rover besitzt. (u-blox 2023) Der RTK-Rover erzeugt hochpräzise Positionsdaten, indem er Korrekturdaten verwendet, die von einer Basisstation oder einem Netzwerk von Basisstationen gesendet werden. RTK ist eine fortgeschrittene Form der Positionsbestimmung, die die Phasen der Trägerwellen der GNSS-Signale nutzt, um eine Genauigkeit im Zentimeterbereich oder sogar besser zu erreichen. Die RTK-Daten sind über einen zusätzlichen Dienst zu beziehen. Dies kann über das Internet, terrestrische Funkübertragungen oder Satellitenkommunikation erfolgen, was in der Vergangenheit mit zusätzlichem Hardwareaufwand und Kosten verbunden war. Seit kurzem stehen über das L6-Band solche Korrektursignale zur Verfügung. Dadurch sind diese für

die GNSS-Empfänger einfacher zugänglich und können kostenfrei genutzt werden. (Suzuki 2023) In den Versuchen wurden keine Korrektursignale verwendet. Das L6-Band wird noch nicht vom GNSS-Empfänger unterstützt.

8.1.4 Erhöhung der Ausgaberate des GNSS-Empfängers

Die in Kapitel 7.1.1 dargestellte systembedingte Latenz lässt sich wie in den Zusatzmessungen aufgeführt durch eine Erhöhung der Ausgaberate des GNSS-Empfängers verringern. Der GNSS-Empfänger uBlox ZED-F9R lässt eine frei wählbare Ausgaberate von 10-30 Hz zu (u-blox 2023). Jedoch ist diese Einstellung nicht für jeden GNSS-Empfänger möglich, da eine maximale Ausgaberate von 10 Hz üblich ist. Eine höhere Ausgaberate ist eher bei spezialisierten GNSS-Empfängern möglich. Es ist aber zu untersuchen, ob die Ausgabeschnittstelle die Datenrate bei einer erhöhten Ausgabenrate unterstützen kann. Bevor diese Maßnahme ergriffen wird, ist die Kosten-Nutzen-Frage abzuwägen. Bei dieser Abwägung sind auch die Applikationen mit einzubeziehen, die die Informationen auswerten.

8.2 Energetische Betrachtung am Fahrrad

Wie bereits im Kapitel 4.5 aufgeführt, ist die energetische Betrachtung bei der Einbindung von VRUs in die C-ITS-Kommunikation eine entscheidende Frage. So ist essentiell, ob das Fahrrad das Gerät mit Energie versorgen kann oder ob es eine eigene Energiequelle (z. B. Akku) besitzen muss. Fällt das Gerät während der Nutzung aus, kann keine Kommunikation stattfinden und damit auch der gewünschte Sicherheitsgewinn nicht erzielt werden. Für die Bewertung der energetischen Betrachtung wird in diesem Kapitel eine Leistungsbilanz aufgestellt. Auf der einen Seite wird aufgeführt, wie viel Energie am Fahrrad zur Verfügung steht und auf der anderen Seite, wie viel Energie abgerufen wird. Liegt mehr Energie zur Verfügung als abgerufen wird, so kann dieser Überschuss als mögliches Nutzungspotential der C-ITS-Einheit verstanden werden. Der typische Energiebedarf von verfügbaren C-ITS-Einheiten ist jedoch hinsichtlich des Nutzungszwecks der OBU einzuordnen. Die meisten verfügbaren Geräte sind nicht für einen geringen Energieverbrauch optimiert, bzw. Geräte für den Einsatzzweck der VRU-Ausstattung sind zurzeit als Prototypen anzusehen, weswegen hinsichtlich des Energiebedarfes ein Verbesserungspotenzial zur Auslegung der C-ITS-Einheiten für den VRU-Einsatz besteht.

8.2.1 Leistungsbilanz am Fahrrad

Bei den Fahrrädern sind zwei Typen zu unterscheiden. Der erste Typ stellt Fahrräder dar, die die benötigte elektrische Energie mit einem Dynamo aus der Bewegungsenergie entnehmen. Beim zweiten Typ handelt es sich um Fahrräder, die mit einem eigenen Akku ausgestattet sind und über einen elektronischen Hilfsmotor verfügen, der den Radfahrenden bei der Fortbewegung unterstützt, z. B. Pedelecs.

Für Fahrräder des ersten Typs stehen am Markt unterschiedliche Dynamos zur Verfügung. Diese liefern typischerweise die Energie für die Vorder- und Rückbeleuchtung. Die Dynamos selbst greifen dabei Bewegungsenergie ab und wandeln diese in elektrische Energie um. Der Abgriff ist immer ein Kompromiss, möglichst genügend Energie für die Beleuchtung zu gewinnen, jedoch nicht zu viel Energie aus der Bewegung entnehmen zu müssen. Zudem sollen die Dynamos langlebig, wartungsarm und robust gegenüber Witterung und Umwelt sein. Am Markt haben sich weitestgehend Nabendynamos durchgesetzt, die dauerhaft mitlaufen. Seitenläufer dagegen werden meist ausschließlich bei Bedarf zugeschaltet. Die Dynamos selbst liefern eine Wechselspannung von typischerweise 6 V bei einer

Nennleistung von 3 W. In Deutschland legen dies die Prüfbestimmungen für Fahrradlichtmaschinen (TA 24) fest. Die Spannung und Leistung sind jedoch abhängig vom Abnahmewiderstand (Verbraucher) und der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit. Für die weitere Analyse ist dieser Wert als Richtgröße anzusehen. (Wilfried Schmidt 2006) Energieabnehmer sind die Vorder- und Rückbeleuchtung. Um Zusatzkomponenten, wie beispielsweise Fahrradnavigationsgeräte, Smartphones oder ähnliche Systeme, laden zu können, haben sich am Markt Nabendynamos mit Ladeadapter etabliert. (Andreas Oehler 2010) Diese nutzen meist vollständig die Energie des Nabendynamos, wenn die Beleuchtung am Tage nicht benötigt wird. Ein Laden gemeinsam mit der Beleuchtung ist nur eingeschränkt möglich bzw. hängt von der verwendeten Beleuchtung und dem Laderegler selbst ab. (Andreas Oehler 2022). Eine Leistungsabnahme per USB von 1,5-2 W ist ohne Beleuchtung durchaus realistisch. Einzelne Laderegler können mit einem eigenen Akku ausgestattet sein, der im Falle eines unbewegten Fahrrades eine Energieversorgung sicherstellt.

Fahrräder des zweiten Typs mit eingebautem Akku und Hilfsmotor, also Pedelecs, sind hinsichtlich der Ladeleistung für Zusatzkomponenten eher unkritisch zu sehen. Die Ladeleistung entspricht eher einem Bruchteil der Leistung, die für die Bewegungsunterstützung eingesetzt wird. Kritischer ist jedoch die Leistungsabnahme am Fahrrad selbst. Bosch bietet in einer bestimmten Pedelec-Serie dazu einen Power-Port an, der für die Nachrüstung von Komponenten eine Leistung von 12 W bereitstellt. Andere Systeme greifen nachträglich Energie von der Beleuchtung ab. Eine Abnahme dort kann jedoch den für die Beleuchtung zuständigen Laderegler überlasten. (Matthias Schwindt 2023)

8.2.2 Energieaufnahme von C-ITS-Einheiten

Die Energieaufnahme von C-ITS-Einheiten ist stark abhängig von der Hardwarearchitektur, der Anzahl der verarbeiteten Nachrichten und den Applikationen, die auf der Einheit betrieben werden. So ist zum Beispiel bei vielen Einheiten eine Mobilfunkanbindung vorhanden. Seitens der Hersteller wird in der Regel keine Auskunft über die typische Leistungsaufnahme gegeben. Ein Produkt, welches für die Bus-Priorisierung gedacht ist, gibt im Datenblatt eine Leistungsaufnahme von 5,5 W an (Yunex Traffic 2023b). Diese Einheit bringt ein Display und ein integriertes Mobilfunkmodem mit, welches einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Leistungsaufnahme hat. Erfahrungen mit C-ITS-Einheiten aus Automobilen zeigen, dass eine Leistungsaufnahme von 3 W (ohne Display und Mobilfunk) durchaus realistisch ist. Durch Optimierung der Einheiten hinsichtlich einer geringen Leistungsaufnahme sollten 3 W und darunter als möglich betrachtet werden. Eine offene Fragestellung besteht jedoch bezüglich des Updates von Zertifikaten für die Geonetworking-Security und die Auslegung (haptisch, akustisch, optisch) des HMI der C-ITS-Einheit. Eine Mobilfunkverbindung sowie ein komplexes HMI über ein Display würden die Leistungsaufnahme erhöhen.

8.2.3 Gegenüberstellung Leistungsverfügbarkeit zur Leistungsaufnahme

Beim Vergleich der Leistungsverfügbarkeit und -aufnahme ist zu erkennen, dass für Pedelecs die erforderliche Leistung für den Betrieb von C-ITS-Einheiten vorhanden ist. Dort ist die Art der Abnahme der Leistung von dem Fahrrad der kritische Punkt. Für Fahrräder, die nicht über einen Akku verfügen, ist der Einsatz herausfordernder, jedoch nicht ausgeschlossen. Hier besteht für die Anbieter von C-ITS-Einheiten der Auftrag, Produkte speziell für diesen Bereich zu konzipieren und auf den Markt zu bringen. Sollte das Mobiltelefon für die Verbindung zur C-ITS-PKI (zum Abrufen der Zertifikate) und zur Anzeige von

Informationen/Warnungen genutzt werden, ist zu berücksichtigen, dass für dieses ggf. auch eine Leistungsversorgung erforderlich ist.

8.3 Human Factors und Warnstufen eines Assistenzsystems

Wie sich in den vorangegangenen Untersuchungen gezeigt hat, stellen die Gewährleistung hoher Positionsgenauigkeiten bei der Lokalisierung der Verkehrsteilnehmer (i. S. des resultierenden zeitlichen Verzuges einer Warnmeldung auf der Grundlage des Lokalisierungsfehlers) sowie die Verringerung der Reaktionszeiten des Menschen (i. S. des resultierenden zeitlichen Verzuges durch die menschliche Latenz) die entscheidenden technischen und menschlichen Faktoren dar, um C-ITS-basierte Assistenzsysteme zur rechtzeitigen und vor allem von den Verkehrsteilnehmenden akzeptierten Warnung vor potentiell gefährlichen und zeitkritischen Interaktionssituationen einzusetzen. Es zeigte sich aus technischer Sicht weiter, dass die Reichweiten der verfügbaren und in der Praxis erprobten Technologien für diesen Zweck völlig ausreichend sind, da stets Empfangssicherheit mit sehr geringen Übertragungsfehlern über die für diesen Zweck relevanten Distanzen sichergestellt werden kann.

Aus Sicht menschlicher Einflussfaktoren, z. B. Reaktionszeit, ist die größte Herausforderung darin zu finden, wie es gelingt, das Situationsbewusstsein des Menschen so zu beeinflussen, dass seine Reaktionszeit möglichst minimiert wird, um damit den zeitlichen Puffer für eine bevorstehende Interaktionssituation zu maximieren und das Aktionsbewusstsein für Manöveralternativen (Bremsen, Beschleunigen, Ausweichen) zu schaffen. Das ist einer der Gründe, der dafürspricht, verkehrliche Interaktionssituationen nach ihrer Kritikalität zu unterteilen und darauf verkehrliche Situations- oder Fahrassistenz aufzubauen.

In dem von der EU geförderten Projekt XCYCLE (Jonas Ihlström u. a. 2019) wurde ein infrastrukturseitiges, vor Kollisionen zwischen Kfz und Radfahrenden beim bedingt verträglichem Rechtsabbiegen warnender Schutzblinker entwickelt, in Betrieb genommen und erfolgreich getestet. Dieser Schutzblinker war situationsadaptiv, d. h. er warnte die Verkehrsteilnehmer nur dann, wenn eine Kollision prädictiert wurde, und vermied so den Cry-Wolf-Effekt, z. B. (Bliss 1993; Wickens u. a. 2009).

Dabei wurde die Art der Information der Interaktionspartner nach der Gefährlichkeit der Situation quantifiziert. So werden die in Tabelle 5 dargestellten Risikostufen unterschieden, die jedoch räumlich und zeitlich unscharf definiert sind. Ein Kritikpunkt an diesem Schema ist, dass verschiedene Eskalationsstufen vor einer Kollision unterschieden werden, aber eine Warnung unmittelbare und dringende Aktion des Fahrenden erwartet wird. (5GAA 2024; ETSI 2013) Demnach erscheint es sinnvoll, dass zwischen Risikostufe 1 (Information) und Risikostufe 2 eine weitere Zwischenstufe „Situation Awareness“ eingefügt wird.

Tabelle 5. Risikostufen aus dem Projekt XCYCLE im Anwendungsfall „rechtsabbiegendes Kfz vs. geradeausfahrender Radfahrender“ (modifiziert nach (Jonas Ihlström u. a. 2019))

Risiko- stufe	Bezeichnung	Definition
0	Kein Risiko	Kein oder nur ein Verkehrsteilnehmer präsent.

1	Information	Radfahrender und Kfz sind präsent. Sie befinden sich nicht auf Kollisionskurs
1.5	Situation Awareness	Radfahrender und Kfz sind präsent. Sie befinden sich auf Kollisionskurs, aber sie sind noch ein Stück vom Kollisionspunkt entfernt, so dass erstens, Zeit zum Vermeiden der Kollision bleibt und zweitens, eine Situation-Awareness-Nachricht eine Erhöhung des Situationsbewusstseins der Interaktionspartner für den Fall einer weiterführenden Eskalation der Situation erwirkt.
2	Warnung	Radfahrender und Kfz befinden sich auf Kollisionskurs, sie sind aber noch ein Stück vom Kollisionspunkt entfernt. Es besteht dringender Handlungsbedarf mind. eines Verkehrsteilnehmenden zum Vermeiden einer potentiellen Kollision.
3	Assistenz	Radfahrender und Kfz befinden sich auf Kollisionskurs unmittelbar vor dem Kollisionspunkt. Eine Ausweichaktion zum Vermeiden einer potentiellen Kollision ist durch Fahrerassistenz möglich.
4	Intervention	Eine Kollision steht unmittelbar bevor und wird von der Fahrerassistenz verhindert oder deren Folgen gemindert.

Diese Risikostufen können grob wie folgt eingeordnet werden: Risikostufe 4 (Intervention) muss technisch realisierbar sein, um einen Unfall zu verhindern oder zumindest dessen Folgen zu mindern, wenn der Mensch nicht in der Lage war, diese Situation wahrzunehmen und durch eine Ausweichaktion zu vermeiden. Grob kann von 1-3 s vor dem potentiellen Unfall ausgegangen werden. Im Fall der Risikostufen 2 (Warnung) und 3 (Assistenz) kann von einem zeitlichen Puffer von ca. 2 s (Prohn und Herbig 2023) vor der potentiellen Kollision ausgegangen werden. In einer Simulatorstudie (McGehee und Carsten 2010) wurden 1,8 s als optimales zeitliches Intervall ermittelt. Schwieriger wird es bei der Quantifizierung des Zeitbedarfes für Risikostufe 1 (Information), da diese einer Warnung vorausgehen und ein technisches System auch in der Lage sein muss, diese Situation verlässlich zu erkennen. In (von Sawitzky u. a. 2022) wurde am Beispiel der Dooring-Situation untersucht, ab welchem Zeitpunkt vor einer potentiellen Kollision eines Radfahrenden mit der Fahrzeugtür eine Information sinnvoll ist, um das Situationsbewusstsein des Radfahrenden zu erhöhen. Es stellte sich das Zeitintervall 6-9 s vor der potentiellen Situation als geeignet heraus.

In XCYCLE wurden die Risikostufen 1, 2 und 3 des Warnalgorithmus per Entscheidungsbaum mit Hilfe realer Interaktionssituationen vom Rechtsabbiegen trainiert, wobei für die Risikostufe 4 zu wenig Daten vorlagen und diese damit nicht trainiert werden konnte (Saul u. a. 2021). Entscheidend war aber der multifaktorielle Einfluss der Abstände der Interaktionspartner vom Konfliktpunkt, deren gefahrene Geschwindigkeiten sowie die prädierte post-encroachment time (pPET) zwischen Radfahrendem und Rechtsabbieger, um die Risikostufen voneinander zu trennen. Darüber hinaus konnte in (Junghans u. a. 2024) gezeigt werden, dass eine verlässliche Kollisionsprognose in diesem konkreten Anwendungsfall 10-11 m bzw. im Durchschnitt 0,9-2,4 s vor dem Kollisionspunkt gelang.

9 Physikalisch-technische Mindestanforderungen

Auf Basis der theoretischen und in Versuchsfahrten mit dem Versuchsfahrrad gewonnenen Erkenntnisse zur Positionsgenauigkeit können in diesem Kapitel die physikalisch-technischen Mindestanforderungen abgeleitet werden, die ein kooperatives Fahrradassistenzsystem erfüllen muss, um rechtzeitig und verlässlich – d. h. mit hoher Konfidenz – vor potenziell gefährlichen Situationen im Sinne des „spätesten technischen Eingriffs“ warnen zu können. Dabei ist zu beachten, dass sich wesentliche Einflussfaktoren wie beispielsweise die Positionsgenauigkeit unmittelbar auf räumlich-zeitliche Aspekte im Verlauf der Konflikterkennung und -kommunikation auswirken. Das bedeutet, dass die dynamischen Aspekte bei der Bewegung der Verkehrsteilnehmer „in den Konflikt hinein“ stets geschwindigkeitsabhängig sind: je höher die Geschwindigkeit eines Verkehrsteilnehmers ist, desto weniger Zeit bleibt für die Konflikterkennung, -kommunikation und -beseitigung. Aus diesem Grund wird von den Autoren dieses Berichts explizit darauf hingewiesen, dass sich die in Tabelle 6 abgeleiteten technischen Mindestanforderungen nicht aus den technischen Möglichkeiten, sondern aus den Erfahrungswerten und den Bedingungen ergeben, wie sie während der Versuchsfahrten mit dem Forschungsfahrrad bestanden. Zudem wird deutlich, dass Anforderungen die Positionsgenauigkeiten deutlich schärfer sind als sie technisch mit dem ZooZ-Gerät erreicht werden konnten. Im Einzelnen wurden folgende Werte verwendet:

- Bremsbeschleunigung:
 - Praktisch wurden beim Fahrrad maximal $|-6,97| \text{ m/s}^2$ gemessen (Famiglietti et al., 2020)
 - Da mit Instabilitäten des Fahrrades bei betragsmäßig hohen Bremsbeschleunigungen zu rechnen ist, z. B. Abheben des Hinterrades, wurden für die Bremsbeschleunigung $-5,5 \text{ m/s}^2$ als realistisch erreichbar angesetzt.
- Geschwindigkeiten: die Versuchsfahrten wurden mit 15 bzw. 20 km/h durchgeführt.
- Resultierende Zeitbedarfe der TTC für den Bremseinsatz
 - Bei 15 km/h:
 - Bei $a_{\text{Brake}} = -6,97 \text{ m/s}^2$: 299 Millisekunden
 - Bei $a_{\text{Brake}} = -5,5 \text{ m/s}^2$: 379 Millisekunden
 - Bei 20 km/h
 - Bei $a_{\text{Brake}} = -6,97 \text{ m/s}^2$: 399 Millisekunden
 - Bei $a_{\text{Brake}} = -5,5 \text{ m/s}^2$: 505 Millisekunden
- Reaktionszeit: 700 ms bei erwarteten und 1300 Millisekunden bei unerwarteten Situationen

Tabelle 6. Technische Mindestanforderungen an eine rechtzeitige und verlässliche Warnung

Nr.	Kenngroße	Grenzen der technischen Realisierung	Abgeleitete technische Mindestanforderung
1	Übertragungslatenz (Ende-zu-Ende-Latenz)	10 Millisekunden	100 Millisekunden

2	Prozessierlatenz	≈ 25 Millisekunden	150 Millisekunden
3	technische Gesamlatenz (Summe der Nummern 1-2)	35 Millisekunden	250 Millisekunden
4	Positionsungenauigkeit	< 2 cm ⁷	1-2 m
5	Aus Positionsungenauigkeit resultierende Kompensationszeit	< 1 Millisekunde	200-500 Millisekunden
6	Gesamter technischer Zeitbedarf (Summe der Nummern 3 und 5)	36 Millisekunden	450-750 Millisekunden
7	Resultierender Zeitbedarf im Vorlauf einer Kollisionswarnung (unter Berücksichtigung von Reaktions- und Bremszeit)	1035 Millisekunden (bei 15 km/h) 1134 Millisekunden (bei 20 km/h) (Reaktionszeit: 700 Millisekunden)	2129-2429 Millisekunden (bei 15 km/h) 2255-2555 Millisekunden (bei 20 km/h) (Reaktionszeit: 1300 Millisekunden)

Anhand der Ergebnisse aus Tabelle 6 lässt sich feststellen, dass die Auslösung einer Kollisionswarnung eines Radfahrenden unter Berücksichtigung aller relevanten Erkenntnisse zu technischen und menschlichen Latenzen spätestens bei den gefahrenen Geschwindigkeiten von 15 bzw. 20 km/h ca. 2,1-2,6 s vor einer kritischen Situation erfolgen muss, um den bevorstehenden Unfall zu vermeiden. Es wird darauf hingewiesen, dass sich dieser Auslösezeitpunkt weiter nach vorn verschiebt, wenn höhere Geschwindigkeiten angenommen werden. Die praktischen Untersuchungen mit dem Forschungsfahrrad haben aber gezeigt, dass insbesondere die aus der Lokalisierung des Fahrrades hervorgehende Positionsungenauigkeit derzeit diese Anforderung (Nummer 5 in Tabelle 6) im Sinne einer rechtzeitigen und verlässlichen Kollisionswarnung in den meisten Fällen nicht erfüllt. Daher weisen die Autoren dieses Berichtes darauf hin, dass die zur Anwendung gekommenen Applikationen nicht für eine Warnung vor Kollisionen oder gar Intervention eingesetzt werden können, aber stattdessen zur Information des Radfahrenden im Sinne der Erhöhung des Situationsbewusstseins. Um solche Applikationen für den Zweck der Kollisionswarnung einzusetzen, ist es notwendig, das unter Kapitel 7.2.3 beschriebene Potenzial zur Reduktion der menschlichen Reaktionszeiten sowie der Positionsungenauigkeiten umzusetzen. In Kapitel 10 werden gezielte Handlungsvorschläge gemacht. Hinsichtlich der Kommunikation kann anhand der Ergebnisse aus den Kapiteln 7.1.2 und 7.1.3 davon ausgegangen werden, dass für die relevanten Raumbereiche, die sich aus der zeitlichen Betrachtung ergeben, ein weitestgehend stabiler Kommunikationskanal vorhanden ist. Im Pkw wurden sämtliche Nachrichten der ZooZ-Einheit empfangen, während bei der ZooZ-Einheit ein Paketverlust aufgetreten ist. Bei den Freifeldversuchen sind unter 50 m relativer Distanz ausschließlich einzelne geringfügige Einzelpakete verloren gegangen. Bei dem Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt unter Abschattungsbedingungen gibt es einzelne Ausreißer, die unter 50 m zu

⁷ Dieser Wert ist technisch durch das ADMA-Referenzsystem erreicht worden. Es muss davon ausgegangen werden, dass die verwendeten Komponenten zu teuer sind, um an Fahrrädern Anwendung zu finden.

partiell degradierten Ergebnissen führen, jedoch dort auch ab ca. 35 m nur noch in einzelnen Paketverlusten auftreten. Die Applikationen sollten in der Lage sein, mit einzelnen Paketverlusten umzugehen. Ein entsprechender Handlungsvorschlag ist in Kapitel 10 aufgeführt.

10 Handlungsvorschläge für die Entwicklung von kooperativen Fahrrad-Assistenzsystemen

Das Ziel dieses Kapitels ist es, Handlungsvorschläge für die Entwicklung und den Einsatz von C-ITS am Fahrrad zu formulieren, die auf den gewonnenen Erkenntnissen dieses Projekts basieren. Diese Vorschläge können als Leitfaden dienen, um die Entwicklung solcher Systeme zu unterstützen und Radfahrende und potentielle Kollisionspartner rechtzeitig und zuverlässig vor potenziell kritischen/gefährlichen Situationen benutzerfreundlich und energieeffizient zu warnen, damit in Zukunft keine Radfahrenden mehr verunglücken. Durch die Implementierung dieser Empfehlungen kann ein wichtiger Beitrag zur Förderung der umweltfreundlichen und gesundheitsförderlichen Fahrradmobilität und zur Verbesserung der Verkehrssicherheit geleistet werden. Der Nutzen jeder Maßnahme ist in Hinblick auf die damit umzusetzende Applikation zu bewerten. Nicht für jede Applikation ist z. B. eine Lokalisierung im Sub-Meter-Bereich nötig.

1. Optimierung des System- und Sendeverhaltens

- **Priorisierung der Nachrichtenübermittlung von GNSS-Empfängern:** Um Relevanz und Aktualität der übermittelten Informationen zu maximieren, sollte die Nachrichtenübermittlung priorisiert werden, sobald aktuelle und verlässliche Daten vom GNSS-Empfänger verfügbar sind. Dies trägt zur Reduktion von zusätzlichen Systemlatenzen bei.
- **Definition von Prädiktionshorizonten:** Die Ermittlung von Prädiktionshorizonten für Applikationen ist essenziell, um einzelne Paketausfälle zu überbrücken und die Leistungsgrenzen der zu entwickelnden Applikationen zu verstehen. Dies ermöglicht eine robustere Systemkonfiguration und eine verbesserte Vorhersagegenauigkeit.
- **Quantifizierung, Kodierung und Übermittlung der Positionsunsicherheit:** Eine Kodierung der Positionsunsicherheit ist notwendig, um die Zuverlässigkeit der übermittelten Positionsinformationen der Verkehrsteilnehmenden zu kommunizieren und die Positions(un)genauigkeit abzuschätzen. Dies unterstützt nicht nur eine transparente Informationsübermittlung an den Nutzer, sondern ermöglicht die Quantifizierung der resultierenden Zeitfehler und damit der Zuverlässigkeit einer übermittelten Warnung. Die C-ITS Nachrichten erlauben die Übertragung dieser Information bereits. Es ist jedoch entscheidend, dass die dort encodierten Informationen auch verlässlich sind.

2. Integration und Fusion mit weiteren Datenquellen

- **IMU-Nutzung:** Die Nutzung einer IMU ergänzt die zum Einsatz kommenden GNSS-Empfänger und erweitert ihren Erfassungshorizont, so dass mit einer verbesserten, fusionierten Positionsschätzung und höheren Updateraten zu rechnen ist. Zudem ermöglicht sie die Kompensation von Ausfällen des GNSS-Empfängers, was die Systemzuverlässigkeit erhöht.

- Herausforderungen und Lösungsansätze: Die Nutzung einer IMU setzt häufig die Existenz zusätzlicher Sensoren, z. B. eines Wheel-Tick-Sensors, voraus. Das erfordert eine sorgfältige Berücksichtigung der Montage der IMU auf dem Fahrrad sowie der Anpassung vom ggf. auf der IMU implementierten Bewegungsmodellen für die Nutzung am Fahrrad. Die Nutzung von Wheel-Tick-Sensoren ist keine Voraussetzung für die Nutzung einer IMU, trägt jedoch erheblich zur Verbesserung der Positionierung bei. Sensoren mit genauen Abtastpunkten, wie beispielsweise Daten eines Fahrrad-ABS, können zur Lösung dieser Herausforderungen beitragen. Zudem ist es nötig die IMU für das entsprechende Fahrrad zu positionieren. Ein Wechsel der C-ITS-Einheit auf ein anderes Fahrrad, welches nicht über die Sensoren oder eine andere Montageposition verfügt, führt i. Allg. zu einer schlechteren Positionierung mit einer IMU und bedarf i. Allg. einer Konfigurationsanpassung bzw. Neukalibrierung.
 - Nutzung weiterer Datenquellen: Des Weiteren besteht das Potenzial, die GNSS-bedingte Positionsungenauigkeit und den daraus resultierenden Kompensationszeiten (im Durchschnitt 1,2 s, siehe Kapitel 7.2) über die Nutzung weiterer Datenquellen zu reduzieren. Beispielsweise könnte eine relative Positionierung über hochgenaue Landmarken ermöglicht werden, wie sie beim Einsatz vom autonomen Fahren in der Diskussion stehen.
3. Nutzung von Korrektursignalen im GNSS-Empfänger
- Dem GNSS-Empfänger stehen verschiedene Möglichkeiten bereit, Korrektursignale zu empfangen. Durch die Nutzung des L6/E6-Bands wird dies auch ohne zusätzliche Hardware und durchgehende Mobilfunkverbindung möglich.
4. Situations-/Fahrassistenz und Nutzerinteraktion
- Erhöhung des Situationsbewusstseins der Verkehrsteilnehmenden durch gezielte Verlagerung einer unerwarteten oder völlig überraschenden zu einer erwarteten Situation und damit einer Herabsetzung der menschlichen Reaktionslatenz auf ca. 0,7 s.
 - Definition der Art der Einflussnahme auf die Verkehrsteilnehmer: Unterscheidung in 1. Information über eine potenzielle bevorstehende kritische Situation, 2. Warnung der Verkehrsteilnehmenden vor einer bevorstehenden kritischen Situation, 3. Assistenz bei der Durchführung eines Manövers zur Vermeidung eines Unfalls, 4. Intervention zur Vermeidung eines bevorstehenden Unfalls bzw. der Verminderung der Unfallfolgen.
 - HMI-Umsetzung: Das HMI ist so zu implementieren, dass eine effiziente Nutzerinteraktion gewährleistet werden kann. Die Versuche mit der ZooZ-Einheit wurden von den Versuchsteilnehmern auch am Fahrrad als hilfreich wahrgenommen. HMI-Umsetzung: Das HMI ist so zu implementieren, dass eine effiziente Nutzerinteraktion gewährleistet werden kann. Die Versuche mit der ZooZ-Einheit wurden von den Versuchsteilnehmern auch am Fahrrad als hilfreich wahrgenommen.
5. Platzierung von Komponenten
- Optimierung der Komponentenplatzierung: Die Platzierung von IMU und Antenne sollte so erfolgen, dass die Funktionalität des Systems nicht beeinträchtigt wird. Während die IMU idealerweise über dem Hinterrad positioniert wird, sollte die Antenne für GNSS und direkte Kommunikation möglichst wenig abgeschattet sein, um eine optimale Signalqualität zu gewährleisten, was einer Positionierung über dem Hinterrad entgegenspricht.
6. Energieeffizienz
- Minimierung Stromverbrauch: Die Entwicklung des Systems sollte auf einen geringen Stromverbrauch ausgerichtet sein, um eine breite Anwendbarkeit auch an

konventionellen Fahrrädern zu ermöglichen (Leistungsaufnahme < 3 W). Die Nutzung von Pedelec-Power-Ports zur Energieversorgung des Systems wird empfohlen.

7. Integration und Herausgabe von Sensorinformationen

- Die Herausgabe von Sensorinformationen (wie z. B. Geschwindigkeiten, Bremsen-
griffe) an Pedelecs kann die Synergieeffekte zwischen dem Assistenzsystem und dem
Pedelec erhöhen. Dies ermöglicht eine verbesserte Datenintegration und -nutzung für
erweiterte Funktionalitäten.

Neben den technischen Handlungsvorschlägen basierend auf der direkten Kommunikation der Verkehrsteilnehmer, die innerhalb dieses Projektes erarbeitet wurden, gibt es weitere Maßnahmen, die die Sicherheit erhöhen können, jedoch nicht Bestandteil des Projektes waren. Dies umfasst bauliche Maßnahmen, wie z. B. eine räumliche Trennung, Maßnahmen in der Verkehrssteuerung, z. B. an Lichtzeichenanlagen oder die Verringerung von Geschwindigkeiten. Unter anderem bietet die FGSV dazu auf ihrer Homepage einige Informationen (Ortlepp 2024).

11 Ausblick auf potentielle zukünftige Fördervorhaben

Um die Sicherheit von Radfahrenden weiter zu erhöhen und für diesen Zweck eingesetzte C-ITS-Assistenzsysteme zu optimieren, wird eine Fortsetzung der Forschung im Bereich der Fahrradsicherheit und C-ITS empfohlen. Dies schließt die Untersuchung von Applikationen und HMI-Technologien ein. Dabei ist zwischen Forschungsvorhaben und Umsetzungsförderungen, z. B. im Rahmen von Pilotprojekten, zu unterscheiden. Im Rahmen von Forschungsvorhaben sind grundsätzliche Fragestellungen zu klären, wie beispielsweise die Genauigkeit der Lokalisierung durch die Integration heterogener Datenquellen verbessert werden kann. Dagegen sollten Umsetzungsförderungen oder Pilotprojekte dazu beitragen, die Einführung von C-ITS zu beschleunigen und den Anwender bei der Parametrierung der Applikationen zu unterstützen. Hierbei stehen den entwickelnden Unternehmen bereits alle technischen Grundlagen zur Verfügung, die in geeigneter Weise zu kombinieren sind und die auf den jeweiligen Anwendungsfall ausgelegt werden müssen. Im Folgenden werden konkrete Vorschläge zur Weiterführung der Untersuchungen im Rahmen von Forschungsvorhaben getroffen:

- Verbesserung der Verfahren zur Ortungsqualität durch Fusion unterschiedlicher komplementärer Datenquellen. Beispielsweise bieten sich mittlerweile im Nutzersegment günstige LiDAR-/Radar-Sensoren am Fahrrad an, um Landmarken hochgenau zu bestimmen und so die satellitengestützte Ortungsqualität zu verbessern.
- Durchführung einer Simulatorstudie zu HMI-Konzepten und zur Akzeptanz von C-ITS-Systemen in urbanen Umgebungen bei unterschiedlichen Ausstattungsgraden mit der C-ITS-Technologie. Insbesondere der Einfluss auf die Nutzerakzeptanz bei häufigen Interaktionen mit Radfahrenden bedarf einer genaueren Untersuchung, die innerhalb des Simulators genauer analysiert werden kann.

Mittels Umsetzungsförderungen/Pilotprojekten werden folgende Vorschläge gemacht:

- Detaillierte Untersuchung zur Erkennung und Behandlung von falsch-positiven und falsch-negativen Ergebnissen bei dem Aussenden von Informations- und Warnmeldungen von Radfahrenden vor bevorstehenden Kollisionen. Obwohl falsch-negative Meldungen als sicherheitskritisch einzustufen sind, haben falsch-positive Meldungen einen negativen Einfluss auf die Akzeptanz solcher Applikationen (z. B. Cry-Wolf-Effekt), die im extremen Fall von den Nutzern abgeschaltet werden. Es ist daher essenziell, ein Gleichgewicht zwischen der Vermeidung von Fehlalarmen und der zuverlässigen Erkennung tatsächlicher Gefahrensituationen zu finden. Dies bedingt jedoch die Entwicklung und den Einsatz von prototypischen Applikationen, welche selbst auf Annahmen beruhen und keine allgemeingültigen Aussagen bereitstellen können. Insbesondere die Auslegung von Applikationen ist erheblich mit der Firmenphilosophie des jeweiligen OEMs korreliert. Erfahrungen, wie unterschiedliche Anbieter im Fahrradbereich mit Informationen/Warnungen umgehen, liegen nicht vor.
- Detaillierte Untersuchung der Ortungstechnologien auf Fahrrädern, einschließlich des Einflusses der IMU, ihrer Positionierung und Lage, der Austauschbarkeit der C-ITS-Einheiten zwischen verschiedenen Fahrradtypen, der Interaktion mit den Nutzern und des Einflusses auf die Antennen. Insbesondere ist der Einfluss der Bebauung in Abhängigkeit ihres Abstandes zum Fahrrad zu ermitteln, da durch die Mehrwegeausbreitung

der GNSS-Empfang negativ beeinflusst wird und die Unterstützung durch die IMU eine größere Rolle spielt.

- Verbesserung der Verlässlichkeit und Genauigkeit von fahrradseitigen Verfahren zur Information, Warnung oder Assistenz von Radfahrenden. Dabei sind insbesondere Verfahren zu untersuchen, mit denen sich der Beobachtungshorizont für eine Kollisionsprognose vergrößern lässt, ohne dabei an Genauigkeit und Verlässlichkeit einzubüßen. Hierfür werden KI-basierte Verfahren vorgeschlagen.

12 Fazit

Der vorliegende Bericht zeigt eine tiefgreifende Analyse der vielfältigen Potenziale und der damit verbundenen Herausforderungen, die sich aus der Entwicklung und dem Einsatz von C-ITS am Fahrrad ergeben. Durch eine detaillierte Untersuchung von fortschrittlichen Kommunikationstechnologien, durchgeführten experimentellen Versuchen und der eingehenden Betrachtung spezifischer Anwendungsfälle, liefert dieser Bericht essenzielle Erkenntnisse, die entscheidend zur Steigerung der Verkehrssicherheit und zur Optimierung der Effizienz für Radfahrende beitragen können. Insbesondere die Analyse von herausfordernden und oftmals sehr kritischen Verkehrssituationen wie Dooring, Rechtsabbiegen bei kreuzendem Radverkehr nach GDV 342 sowie das Ausfahren aus Ausfahrten, beleuchtet die Notwendigkeit, physikalisch-technische Mindestanforderungen zu definieren, die von den Systemen zuverlässig erfüllt werden müssen.

Die theoretischen Überlegungen zu den oben genannten Szenarien werden durch praxisnahe Experimente mit einem speziell ausgerüsteten Forschungsfahrrad ergänzt. Diese Experimente dienen der Überprüfung der Wirksamkeit und Effizienz der C-ITS-Kommunikation unter realen Bedingungen. Es hat sich gezeigt, dass die Kommunikation über ITS-G5 für die untersuchten Applikationen nicht den limitierenden Faktor darstellt. Dieses Erkenntnis lässt sich zudem mit großer Wahrscheinlichkeit auf andere Kommunikationstechnologien der Nahbereichskommunikation übertragen. Für die Langbereichskommunikation kann die Zusatzlatenz für warnende Applikationen kritisch/funktionsverhindernd sein. Im Bereich von rein informierenden Applikationen, die ein Situationsbewusstsein schaffen sollen, ist die Zusatzlatenz der Langbereichskommunikation weniger kritisch, ist jedoch für ein konkretes Szenario im Detail zu validieren. Vielmehr konnten die größten Einflussfaktoren auf die Verlässlichkeit von C-ITS am Fahrrad mit der Reaktionszeit des Radfahrenden/Verkehrsteilnehmenden als menschlicher und der GNSS-basierten Positionsgenauigkeit als technischer Faktor identifiziert werden. So haben die Ergebnisse bei der Bestimmung der Positionsgenauigkeit mit dem ZooZ-Gerät gezeigt, dass unter Freifeldversuchsbedingungen mit einer Positionsgenauigkeit mit aggregierten Werten von etwa 2 m und unter Abschattungsbedingungen mit aggregierten Werten von etwa 4,5 m zu rechnen ist.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse in den theoretischen Überlegungen und deren praktischen Untersuchungen mit dem Forschungsfahrrad konnte insbesondere anhand der ermittelten Positionsgenauigkeit festgestellt werden, dass eine rechtzeitige und verlässliche Warnung von Radfahrenden vor Kollisionen derzeit nicht möglich ist (siehe physikalisch-technische Mindestanforderungen in Kapitel 9). Es kann aber konstatiert werden, dass die derzeit verfügbaren Applikationen durchaus gewinnbringend sind, wenn sie im Sinne der Informationsbereitstellung (Situationsbewusstsein erzeugen) des Radfahrenden, dass eine potentiell gefährliche Situation bevorstehen kann, verwendet werden. Es ist davon auszugehen, dass eine reine Information zur Erhöhung des Situationsbewusstseins bereits hilfreich sein kann, um Unfälle zu vermeiden – natürlich bedarf das einer detaillierten Untersuchung, z. B. im Rahmen einer Simulatorstudie, um die Akzeptanz solcher Assistenzsysteme zu ermitteln. So konnte bei den Versuchsfahrten festgestellt werden, dass die ZooZ-Einheit eine Information bei einer bevorstehenden Kollision ausgibt, wenn sie die CAM des interagierenden Pkw empfängt. Diese Information über die bevorstehende Kollision wurde von den Versuchsteilnehmern als hilfreich wahrgenommen, was unter

anderem auch daran lag, dass der Versuchsort keine Sichtverbindung zwischen Radfahrenden und Pkw-Fahrenden ermöglicht hatte. Daraus zeigt sich, dass eine einfache Information unter Abschattungsbedingungen hilfreich sein kann. Die Parametrierung von einer umgebungs-basierten Applikation ist für Pkw durch die On-Board-Sensorik realistisch, für Systeme auf Fahrrädern dagegen nicht. Informative Systeme stellen zudem auch weniger starke Anforderungen an die Lokalisierung. Die grundsätzliche Akzeptanz ist jedoch der ausschlaggebende Faktor. Informieren diese Assistenzsysteme zu häufig, werden diese durch den Nutzer deaktiviert. Dabei ist zudem die Häufigkeit der Warnung stark mit der Ausstattungsrate korreliert, was bei der Bewertung der Akzeptanz zu berücksichtigen ist. Vorteilhaft bei informativen Systemen ist, dass diese weniger komplex zu entwickeln sind. Komplexe Applikationen sind zumeist fehleranfälliger und im Testen deutlich schwieriger abzusichern. Zur iterativen Entwicklung und einer evolutionären Verbesserung der Systeme bietet es sich somit an, mit einfachen C-ITS-basierten Assistenzsystemen zu starten. Dabei bieten sich bei der Entwicklung des Lokalisierungssystems umfangreiche Gestaltungsspielräume, die einen entscheidenden Einfluss auf die praktische Umsetzung haben und im Hinblick auf die Komplexität der Applikation sowie der geplanten Interaktion mit dem Nutzer gesehen werden müssen (Information/Warnung/Intervention). Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse werden in diesem Bericht praxisorientierte Handlungsempfehlungen unterbreitet, die eine hohe Relevanz für die Weiterentwicklung von C-ITS für das Fahrrad besitzen. Hierbei wird neben den kommunikationstechnischen und Lokalisierungsaspekten auf energetische Fragestellungen eingegangen, wobei hervorgehoben wird, dass eine Ausrüstung von Fahrrädern mit C-ITS-Einheiten ohne zusätzlichen Akku für das Antriebssystem realisierbar ist, sofern der Energieverbrauch dieser Einheiten auf ca. unter 3 W Leistungsaufnahme minimiert wird.

Zusammenfassend verdeutlicht dieser Bericht, dass die fortschreitende Vernetzung und Digitalisierung im Verkehrssektor signifikante Chancen zur Verbesserung der Sicherheit von Radfahrenden ermöglicht. Durch die kontinuierliche Forschung und Entwicklung in diesem Bereich können innovative Lösungen entwickelt werden, die einen substantiellen Beitrag zur Reduzierung von Verkehrsunfällen leisten, da diese im Voraus zuverlässig erkannt werden können, und so die nachhaltige Mobilität maßgeblich fördern. Die Umsetzung der vorgeschlagenen Handlungsempfehlungen wird als entscheidender Schritt betrachtet, um die Potenziale von sicheren, intelligenten und vernetzten Fahrrädern zu erschließen und einen nachhaltigen Beitrag zur Gestaltung einer sichereren und effizienteren Verkehrszukunft zu leisten.

Literatur

- 5GAA (2023a): Accelerate the understanding and adoption of VRU protection services enabled by C-V2X, [online] <https://5gaa.org/content/uploads/2023/02/5gaa-p-220057-accelerate-the-understanding-and-adoption-of-vru-protection-services-enabled-by-c-v2x.pdf> [16.05.2024].
- 5GAA (2022): C-V2X standardisation in China, [online] <https://5gaa.org/content/uploads/2022/10/C-V2X-standardisation-in-China.pdf> [15.11.2023].
- 5GAA (2021): Deployment band configuration for C-V2X at 5.9 GHz in Europe, [online] https://5gaa.org/content/uploads/2021/06/5GAA_S-210019_Position-paper-on-European-deployment-band-configuration-for-C-V2X_final.pdf [07.11.2023].
- 5GAA (2023b): Open statement Europe Converging towards 5G-V2X Including Direct Communications, [online] <https://5gaa.org/content/uploads/2023/09/5gaa-open-letter.pdf> [15.11.2023].
- 5GAA (2024): Reflections and findings from the WI VRU-DEMO experience and lessons learned, [online] <https://5gaa.org/content/uploads/2024/07/5gaa-wi-vru-demo-241378-vru-demo-tr-v4-proofread-1.pdf> [11.09.2024].
- Alexander, Paul; Haley, David; Grant, Alex (2011): Cooperative intelligent transport systems: 5.9-GHz field trials, in: *Proceedings of the IEEE*, IEEE, Jg. 99, Nr. 7, S. 1213–1235.
- Andreas Oehler (2010): Steckdose unterwegs, *Fahrrad Zukunft*, [online] <https://fahrradzukunft.de/11/steckdose-unterwegs> [16.07.2024].
- Andreas Oehler (2022): Steckdose unterwegs – Teil 9, *Fahrradzukunft*, [online] <https://fahrradzukunft.de/34/steckdose-unterwegs-9> [16.07.2024].
- Anwar, Waqar; Franchi, Norman; Fettweis, Gerhard (2019): Physical Layer Evaluation of V2X Communications Technologies: 5G NR-V2X, LTE-V2X, IEEE 802.11bd, and IEEE 802.11p, in: *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, S. 1–7, doi: 10.1109/VTCFall.2019.8891313.
- Audegond, Yoan (2022): *SECUR Deliverable 2.2 Suitability of the different technologies for the selected use cases*, (Deliverable Nr. 2.2) UTAC.
- Autotalks (2022): Autotalks announces immediate availability of ZooZ 2 safety device for bikes and scooters, [online] <https://auto-talks.com/autotalks-announces-immediate-availability-of-zooz-2-safety-device-for-bikes-and-scooters-2/> [20.11.2023].
- Autotalks (2024): ZooZ Mircomobility Safety Device, [online] <https://auto-talks.com/products/zooz/> [08.05.2024].
- Berge, Siri Hegna; Hagenzieker, Marjan; Farah, Haneen; u. a. (2022): Do cyclists need HMIs in future automated traffic? An interview study, in: *Transportation research part F: traffic psychology and behaviour*, Elsevier, Jg. 84, S. 33–52.
- bitsdirectory (2023): About Bicycles and Intelligent Transport Systems Directory (ITS), [online] <https://www.bitsdirectory.com/about-project> [20.11.2023].

- Bliss, James P. (1993): The cry-wolf phenomenon and its effect on alarm responses, in.:
- Bloessl, Bastian; Segata, Michele; Sommer, Christoph; u. a. (2017): Performance assessment of IEEE 802.11 p with an open source SDR-based prototype, in: *IEEE transactions on mobile computing*, IEEE, Jg. 17, Nr. 5, S. 1162–1175.
- BMDV (2017a): Ermittlung von radverkehrsspezifischen Gefahrenstellen im öffentlichen Straßen- und Wegenetz für Karten und Navigationsanwendungen – GefahrenstelleRAD, [online] <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/gefahrenstellen-fuer-radfahrer-in-navigationsanwendungen.html> [20.11.2023].
- BMDV (2022): FAQ Mobilithek, [online] <https://mobilithek.info/help/FAQ> [26.10.2023].
- BMDV (2017b): Früherkennung von Gefahrenstellen im Straßenverkehr – FeGiS, [online] <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/frueherkennung-von-gefahrenstellen-im-strassenverkehr-fegis.html> [20.11.2023].
- BMDV (2019): Früherkennung von Gefahrenstellen im Straßenverkehr durch Smart Data – FeGiS+, [online] <https://www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/fegis-plus.html> [20.11.2023].
- BMDV (2023): Technische Schnittstellenbeschreibung Version 1.2, [online] <https://mobilithek.info/cms/downloads/tssb-de> [02.11.2023].
- Boreal Bikes (2023): Boreal Bikes, [online] <https://www.borealbikes.com/> [20.11.2023].
- Burbano-Abril, Andres; McCarthy, Brian; Lopez-Guerrero, Miguel; u. a. (2021): MCS Adaptation within the Cellular V2X Sidelink, in: *2021 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, S. 111–117, doi: 10.1109/CSCN53733.2021.9686168.
- Canyon (2023): CANYON PLANT DIE INTEGRATION VON AUTOTALKS' V2X-TECHNOLOGIE IN FAHRRÄDERN, UM UNFÄLLE ZU VERMEIDEN, [online] <https://media-centre.canyon.com/de-DAC/227679-canyon-plant-die-integration-von-autotalks-v2x-technologie-in-fahrradern-um-unfalle-zu-vermeiden> [20.11.2023].
- CAR 2 CAR Communication Consortium (2017): A petition on the proposal of splitting the 5.9 GHz frequency band, [online] https://www.car-2-car.org/fileadmin/documents/General_Documents/C2C_Impacts_of_spectrum_split_170906.pdf [07.11.2023].
- CAR 2 CAR Communication Consortium (2022): Additional investigation of ITS-G5 and Sidelink LTE-V2X Co-Channel Coexistence Mitigation Methods, [online] https://www.car-2-car.org/fileadmin/documents/General_Documents/C2CCC_WP_2096_Co-ChannelCoexistence_MitigationMethods_AdditionalInvestigation_V1.0.pdf [17.08.2022].
- CAR 2 CAR Communication Consortium (2023a): Next Generation V2X –IEEE 802.11bd as fully backward compatible evolution of IEEE 802.11p, [online] https://www.car-2-car.org/fileadmin/documents/General_Documents/C2CCC_WP_2098_IEEE_802.11bd_TheV2XEvolution_V1.0.pdf [20.10.2023].

- CAR 2 CAR Communication Consortium (2023b): Vehicle C-ITS station profile, [online] https://www.car-2-car.org/fileadmin/documents/Basic_System_Profile/Release_1.6.4/C2CCC_RS_2037_Profile.pdf [16.11.2023].
- CAR 2 CAR Communication Consortium (2021): White paper on ITS-G5 and Sidelink LTE-V2X Co-Channel Coexistence Mitigation Methods, [online] https://www.car-2-car.org/fileadmin/documents/General_Documents/C2CCC_WP_2091_Co-ChannelCoexistence_MitigationMethods_V1.0.pdf [17.08.2022].
- CAR 2 CAR Communication Consortium (2023c): White Paper on the description of lane layouts, [online] https://www.car-2-car.org/fileadmin/documents/General_Documents/C2CCC_WP_2099_DescriptionOfLaneLayouts_V1.0.pdf [17.11.2023].
- CEPT (2019): *Report from CEPT to the European Commission in response to the Mandate to study the extension of the Intelligent Transport Systems (ITS) safety-related band at 5.9 GHz*, (Nr. 71) CEPT ECC.
- Chen, Shanzhi; Sun, Shaohui; Kang, Shaoli (2020): System integration of terrestrial mobile communication and satellite communication—the trends, challenges and key technologies in B5G and 6G, in: *China communications*, IEEE, Jg. 17, Nr. 12, S. 156–171.
- Cohda Wireless (2024): MK5 OBU, [online] https://www.cohdawireless.com/wp-content/uploads/2024/06/CW_DL-Product-Brief-sheet-MK5-OBU.pdf [12.07.2024].
- Commsignia (2023): Commsignia announces the OBU Lite for bicycles and micromobility, [online] <https://www.commsignia.com/news/commsignia-announces-the-obu-lite-for-bicycles-and-micromobility/> [20.11.2023].
- Connected Motorcycle Consortium (2020): Evaluation Report, [online] <https://www.cmc-info.net/evaluation-report.html> [21.11.2023].
- Corneo, Lorenzo; Eder, Maximilian; Mohan, Nitinder; u. a. (2021): Surrounded by the clouds: A comprehensive cloud reachability study, in: *Proceedings of the Web Conference 2021*, S. 295–304.
- C-Roads (2023): *C-ITS IP Based Interface Profile Version 2.0.8*, C-Roads.
- Dahm, Markus (2006): *Grundlagen der Mensch-computer-interaktion*, Pearson Studium München.
- De Ponte Müller, Fabian; Rashdan, Ibrahim; Schmidhammer, Martin; u. a. (2021): ITS-G5 and C-V2X Link Level Performance Measurements, in.:
- DEWETRON (2024): OXYGEN - Intuitive Messsoftware von DEWETRON, [online] <https://www.dewetron.com/de/messtechnik-produkte/oxygen-software/> [08.05.2024].
- Dr. Protzmann, Robert; Dr. Radosch, Ilja; Dr. Festag, Andreas; u. a. (2018): *IV2X INTEGRIERTE BETRACHTUNG FAHRZEUGKOMMUNIKATION*, (Projekt Report) Berlin: Digitales Testfeld Stadtverkehr.
- Durepaire, Vincent (2021): LS to ETSI on coexistence between road ITS technologies,.
- E-Bike News (2023): Vernetzter Verkehr: Wenn das E-Bike mit dem Auto spricht, [online] <https://www.elektrofahrrad24.de/blog/e-bike-v2x-assistenz-bosch> [20.11.2023].

- ECOSense (2020): ECOSense, [online] <https://www.ecosense.mein-dienstrad.de/> [20.11.2023].
- Erlacher, Felix; Klingler, Florian; Sommer, Christoph; u. a. (2014): On the impact of street width on 5.9 GHz radio signal propagation in vehicular networks, in: *2014 11th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, IEEE, S. 143–146.
- ETSI (2017): ETSI EN 302 571 V2.1.1 (2017-02) Intelligent Transport Systems (ITS); Radio-communications equipment operating in the 5 855 MHz to 5 925 MHz frequency band; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU,.
- ETSI (2019a): ETSI EN 302 637-2 V1.4.1 (2019-04) Intelligent Transport Systems (ITS); Vehicular Communications; Basic Set of Applications; Part 2: Specification of Cooperative Awareness Basic Service, ETSI.
- ETSI (2020a): ETSI EN 302 663 V1.3.1 (2020-01) Intelligent Transport Systems (ITS); ITS-G5 Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band,.
- ETSI (2010): ETSI EN 302 665 V1.1.1 (2010-09) Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture, ETSI.
- ETSI (2020b): ETSI EN 303 613 V1.1.1 (2020-01) Intelligent Transport Systems (ITS); LTE-V2X Access layer specification for Intelligent Transport Systems operating in the 5 GHz frequency band,.
- ETSI (2016): ETSI TR 103 442, Railways Telecommunications (RT); Shared use of spectrum between Communication Based Train Control (CBTC) and ITS applications, V1.2.1,.
- ETSI (2019b): ETSI TR 103 580, Urban Rail ITS and Road ITS applications in the 5,9 GHz band; Investigations for the shared use of spectrum,.
- ETSI (2013): ETSI TS 101 539-1 V1.1.1 (2013-08): Intelligent Transport Systems (ITS); V2X Applications; Part 1: Road Hazard Signalling (RHS) application requirements specification, ETSI.
- ETSI (2023a): ETSI TS 102 894-2 V2.2.1 Intelligent Transport Systems (ITS); Users and applications requirements; Part 2: Applications and facilities layer common data dictionary; Release 2,.
- ETSI (2023b): Multi-access Edge Computing (MEC), [online] <https://www.etsi.org/technologies/multi-access-edge-computing> [01.11.2023].
- EU (2010): *Directive 2010/40/EU of the European Parliament and of the Council of 7 July 2010 on the framework for the deployment of Intelligent Transport Systems in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport Text with EEA relevance, 2010/40/EU*,.
- EU (2022a): ECC Decision (08)01 The harmonised use of Safety-Related Intelligent Transport Systems (ITS) in the 5875-5935 MHz frequency band,.
- EU (2022b): ECC Recommendation (08)01 Use of the band 5855-5875 MHz for Intelligent Transport Systems (ITS),.

- Famiglietti, Nicholas; Nguyen, Benjamin Mai; Fatzinger, Edward; u. a. (2020): Bicycle Braking Performance Testing and Analysis, in.:
- FCC (2023): FCC Order DA 23-343,.
- Filippi, Alessio; Moerman, Kees; Martinez, Vincent; u. a. (2017): IEEE802. 11p ahead of LTE-V2V for safety applications, in: *Autotalks NXP*, Jg. 1, S. 1–19.
- Fritz, Jannis (2023): Widening the Scope: New Cooperations and Use Cases for Volkswagen’s V2X Deployments, Göteborg, 8.11.2023.
- Garcia, Mario H. Castañeda; Molina-Galan, Alejandro; Boban, Mate; u. a. (2021a): A Tutorial on 5G NR V2X Communications, in: *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Jg. 23, Nr. 3, S. 1972–2026, doi: 10.1109/COMST.2021.3057017.
- Garcia, Mario H. Castañeda; Molina-Galan, Alejandro; Boban, Mate; u. a. (2021b): A Tutorial on 5G NR V2X Communications, in: *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Jg. 23, Nr. 3, S. 1972–2026, doi: 10.1109/COMST.2021.3057017.
- Garcia-Molina, JA; Wallner, S; Miguez, J; u. a. (2023): Galileo Data Signals: Enabling Fast-TTFF and Flexibility with the GeoFocus and GNSE Schemes, in: *Proceedings of the 36th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS+ 2023)*, S. 1316–1327.
- GeneSys (2024): ADMA-G: GNSS/inertial reference system for vehicle dynamics testing, [online] <https://genesys-offenburg.de/en/adma-g/> [08.05.2024].
- GeneSys (2023): NTRIP-DGNSS-Box 4 Manual, [online] <https://genesys-offenburg.de/en/support/guides-and-manuals/ntrip-dgnss-box-4/ntrip-dgnss-box-4-manual/> [08.05.2024].
- GEVAS software GmbH (2023): trafficpilot - RIDE THE GREEN WAVE, [online] <https://www.trafficpilot.eu/?portfolioCats=105> [26.10.2023].
- Ghislaine van Berkomp-Smits (2023): *The Future of Traffic Signal Priority: An innovative and dynamic approach in a C-ITS environment*, Monotch.
- Gonzalez-Martín, Manuel; Sepulcre, Miguel; Molina-Masegosa, Rafael; u. a. (2019): Analytical Models of the Performance of C-V2X Mode 4 Vehicular Communications, in: *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Jg. 68, Nr. 2, S. 1155–1166, doi: 10.1109/TVT.2018.2888704.
- Green, Marc (2000): „How Long Does It Take to Stop?“ Methodological Analysis of Driver Perception-Brake Times, in: *Transportation Human Factors*, Routledge, Jg. 2, Nr. 3, S. 195–216, doi: 10.1207/STHF0203_1.
- Han, Kahee; Lee, Jung-Hoon; Im, Ji-Ung; u. a. (2018): A-GNSS performance test in various urban environments by using a commercial low cost GNSS receiver and service, in: *Journal of Positioning, Navigation, and Timing*, The Institute of Positioning, Navigation, and Timing, Jg. 7, Nr. 4, S. 205–215.
- Hesselbarth, Anja; Wanninger, Lambert (2021): GNSS-Messungen mit Smartphones: Analyse der Beobachtungsdaten und cm-genaue Positionsbestimmung, in: *ZfV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Jg. 3/2021, S. 189–197, doi: 10.12902/zfv-0355-2021.

- ISO (1998): ISO/IEC 8802-2:1998 Information technology — Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks — Specific requirements — Part 2: Logical link control, ISO.
- ISO (2012): ISO/IEC/IEEE International Standard - Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, in: *ISO/IEC/IEEE 8802-11:2012(E) (Revision of ISO/IEC/IEEE 8802-11-2005 and Amendments)*, S. 1–2798, doi: 10.1109/IEEESTD.2012.6361248.
- its International (2021): Ground-breaking neutral V2X platform for C-ITS, [online] <https://www.itsinternational.com/its5/its7/feature/ground-breaking-neutral-v2x-platform-c-its> [24.05.2024].
- ITU (1994): ITU-T X.200 (07/1994): „Information technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model: The basic model Data Networks and open system communications“, ITU-T.
- Jenkins, Michael; Duggan, Daniel; Negri, Alessandro (2017): Towards a connected bicycle to communicate with vehicles and infrastructure: Multimodal alerting interface with Networked Short-Range Transmissions (MAIN-ST), in: *2017 IEEE Conference on Cognitive and Computational Aspects of Situation Management (CogSIMA)*, IEEE, S. 1–3.
- Jonas Ihlström; Dick de Waard; Arjan Stuiver; u. a. (2019): *D6.2 – CYCLE SAFETY EVALUATION RESULTS*,.
- Jordanka Kovaceva, Alvaro Esquer, András Bálint, Ron Schindler, Anja Schneider, Johann Stoll, Sandra Breunig, Julia Bräutigam, Marie Jaussein, Marie-Pierre Bruyas, Pablo Puente Guillen, David Large, Klaus Perlet, Mats Petersson (2018): *Assessment of the PROSPECT safety systems including socioeconomic evaluation*, (Nr. D2.3).
- Junghans, Marek; Zhang, Meng; Saul, Hagen; u. a. (2024): Reliability of cooperative ADAS and the importance of the acceleration function for cycling safety (Eingereicht am 24.01.2024), in: *Traffic Safety Research (TSR)*,.
- Kaplan, Elliott D; Hegarty, Christopher (2017): *Understanding GPS/GNSS: principles and applications*, Artech house.
- Karaim, Malek; Elsheikh, Mohamed; Noureldin, Aboelmagd; u. a. (2018): GNSS error sources, in: *Multifunctional Operation and Application of GPS*, InTech London, UK, S. 69–85.
- Kouwenhoven, Timo (2011): An intuitive approach to the GNSS positioning, [online] https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=An_intuitive_approach_to_the_GNSS_positioning [16.11.2023].
- Kreißig, Isabel; Springer-Teumer, Sabine; Willner, Robert; u. a. (2022). A Cyclist Warning System to enhance Traffic Safety - Development, Implementation & Evaluation in a Bicycle Simulator, in: *Contributions to the 10th International Cycling Safety Conference 2022*. <https://doi.org/10.25368/2022.467>
- Langley, Richard B (2003): The magnetic compass and GPS, in: *GPS World*, S. 70–80.
- Laureshyn, Aliaksei; Ceunynck, Tim De; Karlsson, Christoffer; u. a. (2017): In search of the severity dimension of traffic events: Extended Delta-V as a traffic conflict

- indicator, in: *Accident Analysis & Prevention*, Jg. 98, S. 46–56, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2016.09.026>.
- Luber, Stefan; Donner, Andreas (2018): Was ist WiMAX (802.16)?, [online] <https://www.ip-insider.de/was-ist-wimax-80216-a-771592/> [26.10.2023].
- Maglogiannis, Vasilis; Naudts, Dries; Hadiwardoyo, Seilendria; u. a. (2021): Experimental V2X evaluation for C-V2X and ITS-G5 technologies in a real-life highway environment, in: *IEEE Transactions on Network and Service Management*, IEEE, Jg. 19, Nr. 2, S. 1521–1538.
- Mannoni, Valerian; Berg, Vincent; Sesia, Stefania; u. a. (2019): A Comparison of the V2X Communication Systems: ITS-G5 and C-V2X, in: *2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring)*, S. 1–5, doi: 10.1109/VTCSpring.2019.8746562.
- Manz, Wilko; Mellinger, Nicolas; Görge, Daniel; u. a. (2023): *Fahrzeugtechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Radverkehrssicherheit (MARS) FE 82.0698/2017*, (Nr. 82.0698/2017) Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern (Grüne Reihe Nr 75).
- Mao, Yuyi; You, Changsheng; Zhang, Jun; u. a. (2017): A Survey on Mobile Edge Computing: The Communication Perspective, in: *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Jg. 19, Nr. 4, S. 2322–2358, doi: 10.1109/COMST.2017.2745201.
- Matthias Schwindt (2023): USB Ladeelektronik am eBike nachrüsten, [online] <https://gps-radler.de/ratgeber/usb-ladeelektronik-ebike/> [16.08.2024].
- McGehee, Daniel V; Carsten, Oliver MJ (2010): Perception and biodynamics in unalerted precrash response, in: *Annals of Advances in Automotive Medicine/Annual Scientific Conference*, Association for the Advancement of Automotive Medicine, S. 315.
- Mohammadi, Ali; Piccinini, Giulio Bianchi; Dozza, Marco (2023): How do cyclists interact with motorized vehicles at unsignalized intersections? Modeling cyclists' yielding behavior using naturalistic data, in: *Accident Analysis & Prevention*, Jg. 190, S. 107156, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107156>.
- Molina-Masegosa, Rafael; Gozalvez, Javier; Sepulcre, Miguel (2020): Comparison of IEEE 802.11 p and LTE-V2X: An evaluation with periodic and aperiodic messages of constant and variable size, in: *IEEE Access*, IEEE, Jg. 8, S. 121526–121548.
- Molisch, Andreas F (2012): *Wireless communications*, John Wiley & Sons.
- Monotch (2021): Data sharing platform NordicWay 3 goes live, [online] <https://monotch.com/news/data-sharing-platform-nordicway-3-goes-live/> [24.05.2024].
- Naik, Gaurang; Choudhury, Biplav; Park, Jung-Min (2019): IEEE 802.11bd & 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications, in: *IEEE Access*, Jg. 7, S. 70169–70184, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919489.
- Neuhetzki, Thorsten (2022): Starlink kommt auf jedes Handy: Satelliten-Internet für alle kommt, [online] <https://www.inside-digital.de/news/starlink-kommt-auf-jedes-handy-satelliten-internet-fuer-alle-kommt> [26.10.2023].

- O. A. (2023a): Mobilitäts Daten Marktplatz MDM, *MDM Portal*, [online] <https://www.mdm-portal.de/> [26.10.2023].
- O. A. (2023b): Mobilithek.info, [online] <https://mobilithek.info/> [26.10.2023].
- O. A. (2023c): NAPCORE, *About NAPCORE*, [online] <https://napcore.eu/> [26.10.2023].
- ODG und Partner (2018): OCIT-C Center to Center Daten V2.0_A01, [online] https://www.ocit.org/media/ocit-c_daten_v2.0_a01.pdf [02.11.2023].
- Ortlepp, Jörg (2024): 2.5 Radverkehr, [online] <https://www.fgsv.de/netzwerk/gremien/ag-2-strassenentwurf/25-radverkehr> [02.09.2024].
- Paonni, Matteo; Anghileri, Marco; Wallner, Stefan; u. a. (2010): Performance assessment of GNSS signals in terms of time to first fix for cold, warm and hot start, in: *Proceedings of the 2010 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, S. 1051–1066.
- Prohn, Maria J; Herbig, Britta (2023): Potentially Critical Driving Situations During “Blue-light” Driving: A Video Analysis, in: *Western journal of emergency medicine*, California Chapter of the American Academy of Emergency Medicine (Cal/AAEM), Jg. 24, Nr. 2, S. 348.
- Roux, Pierre; Sesia, Stefania; Mannoni, Valerian; u. a. (2019): System level analysis for ITS-G5 and LTE-V2X performance comparison, in: *2019 IEEE 16th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS)*, IEEE, S. 1–9.
- Saul, Hagen; Junghans, Marek; Dotzauer, Mandy; u. a. (2021): Online risk estimation of critical and non-critical interactions between right-turning motorists and crossing cyclists by a decision tree, in: *Accident Analysis & Prevention*, Jg. 163, S. 106449, doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2021.106449>.
- Sauter, Martin (2018): *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme LTE-Advanced Pro, UMTS, HSPA, GSM, GPRS, Wireless LAN und Bluetooth*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, doi: 10.1007/978-3-658-21647-4_5.
- von Sawitzky, Tamara; Grauschopf, Thomas; Riener, Andreas (2022): Hazard notifications for cyclists: comparison of awareness message modalities in a mixed reality study, in: *Proceedings of the 27th International Conference on Intelligent User Interfaces*, S. 310–322.
- Schönfelf, Markus; Wittich, Holger; Baumann, Uli (2023): VW Tiguan (2024) Preise für die 3. Generation stehen fest, [online] <https://www.auto-motor-und-sport.de/neuheiten/neuer-vw-tiguan-neue-suv-generation-vorstellung/> [21.11.2023].
- Schwung (2024): Schwung, [online] <https://schwung.nu/> [16.05.2024].
- Seiniger, Patrick Alexander (2009): *Erkennbarkeit und Vermeidbarkeit von ungebremsten Motorrad-Kurvenunfällen*, Darmstadt: Technischen Universität Darmstadt.
- Shafi, Mansoor; Molisch, Andreas F.; Smith, Peter J.; u. a. (2017): 5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice, in: *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Jg. 35, Nr. 6, S. 1201–1221, doi: 10.1109/JSAC.2017.2692307.

- Shimizu, Takayuki; Lu, Hongsheng; Kenney, John; u. a. (2019): Comparison of DSRC and LTE-V2X PC5 mode 4 performance in high vehicle density scenarios, in: *Proceedings of the ITS World Congress*, S. 1–7.
- spoke (2023): Safe. Connected. For All., *spoke*, [online] <https://www.spokesafety.com/> [20.11.2023].
- Subirana, J. Sanz; Hernández-Pajares, M; Zornoza, J.M. Juan (2011a): Ionospheric Delay, [online] https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=Ionospheric_Delay [16.11.2023].
- Subirana, J. Sanz; Hernández-Pajares, M; Zornoza, J.M. Juan (2011b): Klobuchar Ionospheric Model, [online] https://gssc.esa.int/navipedia/index.php?title=Klobuchar_Ionospheric_Model [16.11.2023].
- Suzuki, Taro (2023): Evaluation of L6 augmentation signal reception characteristics and positioning accuracy of compact and lightweight GNSS antennas, in: *Scientific Reports*, Jg. 13, Nr. 1, S. 21766, doi: 10.1038/s41598-023-48954-0.
- Tang, Dezhang; Lu, Debiao; Cai, Baigen; u. a. (2018): GNSS Localization Propagation Error Estimation Considering Environmental Conditions, in: *2018 16th International Conference on Intelligent Transportation Systems Telecommunications (ITST)*, S. 1–7, doi: 10.1109/ITST.2018.8566771.
- Twaddle, Heather; Schendzielorz, Tobias; Fakler, Oliver (2014): Bicycles in urban areas: Review of existing methods for modeling behavior, in: *Transportation research record*, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, Jg. 2434, Nr. 1, S. 140–146.
- u-blox (2023): ZED-F9R High precision sensor fusion GNSS receiver Integration manual, [online] https://content.u-blox.com/sites/default/files/ZED-F9R_Integrationmanual_UBX-20039643.pdf [17.07.2023].
- Uzcategui, Roberto A.; De Sucre, Antonio Jose; Acosta-Marum, Guillermo (2009): Wave: A tutorial, in: *IEEE Communications Magazine*, Jg. 47, Nr. 5, S. 126–133, doi: 10.1109/MCOM.2009.4939288.
- Várhelyi, András (1998): Drivers' speed behaviour at a zebra crossing: a case study, in: *Accident Analysis & Prevention*, Jg. 30, Nr. 6, S. 731–743, doi: [https://doi.org/10.1016/S0001-4575\(98\)00026-8](https://doi.org/10.1016/S0001-4575(98)00026-8).
- Vector (2024): VN4610 - 802.11p/CAN (FD)/GNSS Interface, [online] <https://www.vector.com/de/de/produkte/produkte-a-z/hardware/netzwerk-interfaces/vn4610/#> [14.05.2024].
- Wickens, Christopher D; Rice, Stephen; Keller, David; u. a. (2009): False alerts in air traffic control conflict alerting system: Is there a “cry wolf” effect?, in: *Human factors*, Sage Publications Sage CA: Los Angeles, CA, Jg. 51, Nr. 4, S. 446–462.
- Wilfried Schmidt (2006): Aufbau und Wirkungsweise von Fahrradlichtmaschinen, *Fahrradzukunft*, [online] <https://fahrradzukunft.de/1/wirkungsweise-fahrradlichtmaschinen> [16.07.2024].
- Winograd, Tamara (2023): Unternehmen aus den Bereichen Automotive, Fahrrad und Technologie gründen „Coalition for Cyclist Safety“ in Nordamerika, [online] <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/unternehmen-aus-den->

bereichen-automotive-fahrrad-und-technologie-gruenden-coalition-for-cyclist-safety-in-nordamerika-259136.html [20.11.2023].

Wisch, Marcus; Lerner, Markus; Vukovic, Elvir; u. a. (2017): Injury patterns of older car occupants, older pedestrians or cyclists in road traffic crashes with passenger cars in Europe—Results from SENIORS, in: *Proceedings of the 2017 IRCOB conference, Antwerp, Belgium*, S. 13–15.

Yunex Traffic (2023a): Intelligent Bike Solutions, [online] <https://www.yunextrafic.com/portfolio/traffic-management/connected-mobility-solutions/intelligent-bike-solutions/> [21.11.2023].

Yunex Traffic (2023b): Onboard Unit 2X, [online] https://www.yunextrafic.com/wp-content/uploads/2023/05/Yunex-Traffic_OBU2X_EN.pdf [16.07.2024].

Zieglowski, Kilian; Kinkelin, Holger (2020): An Overview on Vehicular Communication Standards, in: *Network*, Jg. 57.

Bilder

Bild 1. ITS-Referenzarchitektur für ITS-S (eigene Darstellung nach (ETSI 2010))

Bild 2. Frequenz- und Kanalzuteilung in Europa (eigene Darstellung)

Bild 3. Schematische Darstellung des Ressourcenzugriffs unter ITS-G5

Bild 4. Schematische Darstellung des Ressourcenzugriffs bei LTE-V2X (eigene Darstellung nach (Mannoni u. a. 2019))

Bild 5. Kompatibilität der Technologien (grün: ja, rot: nein)

Bild 6. Vergleich der Architekturoptionen zwischen der Nahbereichs- und der Langbereichskommunikation

Bild 7. Komponenten der Mobilithek (eigene Darstellung nach (BMDV 2023))

Bild 8. Zwei Verkehrsteilnehmende mit ihren Bewegungspfaden auf Kollisionskurs. Sie haben die Abstände d_1 und d_2 zum Konfliktpunkt CP und bewegen sich mit den Geschwindigkeiten v_1 und v_2

Bild 9. Erforderlicher Zeitbedarf t_{ttc} für unterschiedliche Bremsbeschleunigungen in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit

Bild 10. Zeitfehler t_{err} in Abhängigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit

Bild 11. Auswirkungen des Geschwindigkeitsfehlers nach Gleichung (24) für Geschwindigkeiten von 7 km/h (links) und 17,6 km/h (rechts)

Bild 12. Dooring-Situation

Bild 13. t_{rem} über d_{cp} (links: $a_{brake} = -2,5 \text{ m/s}^2$ und rechts: $a_{brake} = -5,5 \text{ m/s}^2$)

Bild 14. t_{rem} über t_{exp} bei unterschiedlichen Bremsbeschleunigungen

Bild 15. Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Bild 16. T_2 über d_{cp}

Bild 17. t_{rem} über d_{cp} (links: $a_{brake} = -1,0 \text{ m/s}^2$ und rechts: $a_{brake} = -5,5 \text{ m/s}^2$). Hinweis: bei geringen Bremsverzögerungen können die Verläufe der Geschwindigkeiten größer oder gleich 45 km/h im Bild links nicht mehr visualisiert werden

Bild 18. t_{rem} über T_2 (links: $v = 17,6 \text{ km/h}$ und rechts: $v = 25,5 \text{ km/h}$)

Bild 19. t_{rem} für die minimalen (links) und maximalen verfügbaren (rechts) Latenzzeiten über d_{cp} für die beispielhaften extrem unterschiedlichen Bremsbeschleunigungen von $a_{Rad} = -1,0 \text{ m/s}^2$ und $a_{Kfz} = -9,81 \text{ m/s}^2$.

Bild 20. t_{rem} im Sinne der minimal (links) und maximal verfügbaren (rechts) Latenzzeiten über T_2 für extrem unterschiedliche Bremsbeschleunigungen von $a_{Rad} = -1,0 \text{ m/s}^2$ und $a_{Kfz} = -9,81 \text{ m/s}^2$. Hinweis: im Bild links werden aufgrund der definierten Wertebereiche nicht alle Werte für die Geschwindigkeiten größer oder gleich 45 km/h dargestellt.

Bild 21. Ausfahren aus einer Ausfahrt ist ein Szenario, das oft mit beiderseitigen Sichtbehinderungen einhergeht

Bild 22. Messkonzeption

Bild 23. Versuchsaufbau Fahrrad

Bild 24. Fahrradaufbau mit Anhänger

Bild 25. Befestigung des ZooZ Geräts und Position der GNSS-Antenne

Bild 26. ADMA und GNSS-Antenne am Fahrrad

Bild 27. Screenshot aus der Vector-Messkonfiguration (Beispiel Dooring-Versuch))

Bild 28. Versuchsorte am IAV-Standort in Gifhorn: Gebäude 5 mit Ansicht auf die Nebengebäude Finger 2 bis 5 (links); Testgelände (rechts)

Bild 29. Szenario 1: Schematische Beschreibung des Szenarios 1 (Dooring)

Bild 30. Versuchsdurchführung Szenario 1: Dooring (links: Frontalansicht, rechts: Seitenansicht)

Bild 31. Szenario 2: Schematische Beschreibung des Szenarios 2 Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Bild 32. Versuchsdurchführung Szenario 2: Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Bild 33. Szenario 3: Ausfahren aus einer Ausfahrt

Bild 34. Versuchsdurchführung Szenario 3: Ausfahren aus einer Ausfahrt

Bild 35. Ergebnisse der Latenzmessung aus einem Dooring-Versuch

Bild 36. Darstellung der Latenz mit einer Ausgaberate von 29 Hz

Bild 37. Paketverluste im Szenario Dooring

Bild 38. Paketverlust im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Bild 39. Paketverlust im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

Bild 40. Update-Delay im Szenario Dooring

Bild 41. Update-Delay im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Bild 42. Update-Delay im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

Bild 43. Euklidische Abweichungen des ZooZ-Gerätes während der Ruhelokalisierung über die Versuchsfahrten 16 bis 30 beim Dooring

Bild 44. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y-Koordinaten sowie der euklidischen Abweichung des ZooZ-Gerätes bei der Ruhelokalisierung beim Dooring

Bild 45. Euklidische Abweichungen des ZooZ-Gerätes während der Ruhelokalisierung über die Versuchsfahrten im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Bild 46. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y-Koordinaten sowie der euklidischen Abweichung bei der Ruhelokalisierung des ZooZ-Gerätes im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Bild 47. Euklidische Abweichungen des ZooZ-Gerätes während der Ruhelokalisierung über die Versuchsfahrten im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

Bild 48. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y-Koordinaten des ZooZ-Gerätes bei der Ruhelokalisierung im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

Bild 49. Euklidische Abweichungen des ADMA-Gerätes während der Ruhelokalisierung beim Dooring

Bild 50. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y-Koordinaten bei der Ruhelokalisierung des ADMA-Gerätes im Szenario Dooring

Bild 51. Euklidische Abweichungen des ADMA-Gerätes während der Ruhelokalisierung im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Bild 52. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y-Koordinaten sowie der euklidischen Abweichung bei der Ruhelokalisierung des ADMA-Gerätes im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Bild 53. Euklidische Abweichungen des ADMA-Gerätes während der Ruhelokalisierung im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

Bild 54. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y-Koordinaten des ADMA-Gerätes bei der Ruhelokalisierung im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

Bild 55. Abweichungen der x-Koordinate zwischen ADMA und ZooZ beim Dooring

Bild 56. Abweichungen der y-Koordinate zwischen ADMA und ZooZ beim Dooring

Bild 57. Euklidische Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ beim Dooring .

Bild 58. Aggregierte Mediane der x- und y- sowie euklidischen Abweichungen d zwischen ADMA und ZooZ beim Dooring

Bild 59. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y- sowie euklidischen Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ beim Dooring

Bild 60. Abweichungen der Koordinaten des ZooZ-Gerätes bei der Dooring-Fahrt 30 (blau: x-Koordinate, rot: y-Koordinate, schwarz: Betrag)

Bild 61. Zugehörige UTM-Trajektorien zur Dooring-Versuchsfahrt 15 (blau: ADMA, rot: ZooZ, Dreieck: Start, Stern: Ende)

Bild 62. Erforderliche Zeit zur Kompensation der Positionsungenauigkeiten beim Dooring

Bild 63. Aggregierte Mittelwerte und Mediane der Kompensationszeiten beim Dooring

Bild 64. Erreichen der Positionsgenauigkeit von 3 m im Median im Szenario Dooring; links: binäre Darstellung, rechts: nicht-binäre Darstellung

Bild 65. Abweichungen der x-Koordinate zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nac

Bild 66. Abweichungen der y-Koordinate zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nac

Bild 67. Euklidische Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Bild 68. Aggregierte Mediane der x- und y- sowie euklidischen Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Bild 69. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y-Koordinaten sowie der euklidischen Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Bild 70. Abweichungen der Koordinaten des ZooZ-Gerätes bei der Versuchsfahrt 17 im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342 (blau: x-Koordinate, rot: y-Koordinate, schwarz: Betrag)

Bild 71. Zugehörige UTM-Trajektorien zur Versuchsfahrt 17 im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342 (blau: ADMA, rot: ZooZ, Dreieck: Start, Stern: Ende)

Bild 72. Erforderliche Zeit zur Kompensation der Positionsungenauigkeiten im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Bild 73. Aggregierte Mittelwerte und Mediane der Kompensationszeiten im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342

Bild 74. Erreichen der Positionsgenauigkeit von 3 m im Median im Szenario Rechtsabbiegen mit kreuzendem Radfahrenden nach GDV 342; links: binäre Darstellung, rechts: nicht-binäre Darstellung

Bild 75. Abweichungen der x-Koordinate zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt unter Abschattungsbedingungen

Bild 76. Abweichungen der y-Koordinate zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt unter Abschattungsbedingungen

Bild 77. Euklidische Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt unter Abschattungsbedingungen

Bild 78. Aggregierte Mittelwerte der x- und y-Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

Bild 79. Aggregierte Standardabweichungen der x- und y- sowie euklidischen Abweichungen zwischen ADMA und ZooZ im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

Bild 80. Abweichungen der Koordinaten des ZooZ-Gerätes bei der Versuchsfahrt 4 im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt (blau: x-Koordinate, rot: y-Koordinate, schwarz: Betrag)

Bild 81. Zugehörige UTM-Trajektorien zur Versuchsfahrt 4 im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt (blau: ADMA, rot: ZooZ, Dreieck: Start, Stern: Ende)

Bild 82. Erforderliche Zeit zur Kompensation der Positionsungenauigkeiten im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

Bild 83. Aggregierte Mittelwerte und Mediane der Kompensationszeiten im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt

Bild 84. Erreichen der Positionsgenauigkeit von 3 m im Median im Szenario Ausfahren aus einer Ausfahrt; links: binäre Darstellung, rechts: nicht-binäre Darstellung

Bild 85. Aggregierte Mediane der euklidischen Positionsabweichungen für die drei untersuchten Szenarien.

Bild 86. Aggregierte Standardabweichungen der euklidischen Positionsabweichungen für die drei untersuchten Szenarien.

Tabellen

Tabelle 1. Geschwindigkeiten

Tabelle 2. Bremsbeschleunigungen

Tabelle 3. Überblick über die aggregierten Ergebnisse zur euklidischen Abweichung bei unbewegtem Fahrrad

Tabelle 4. Überblick über die aggregierten Ergebnisse zur euklidischen Abweichung zwischen ADMA und ZooZ bei bewegtem Fahrrad

Tabelle 5. Risikostufen aus dem Projekt XCYCLE im Anwendungsfall „rechtsabbiegender Kfz vs. geradeausfahrender Radfahrender“ (modifiziert nach (Jonas Ihlström u. a. 2019))

Tabelle 6. Technische Mindestanforderungen an eine rechtzeitige und verlässliche Warnung

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen Unterreihe „Fahrzeugtechnik“

2023

F 151: Integration von öffentlichem und privatem Parkraummanagement

Höpping, Jonas, Becker, Krüger, Freudenstein, Krampe, Godschachner, Inninger, Scholz, Hüttner, Grötsch, Stjepanovic

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 152: On-Board-Diagnose (OBD) – Analyse der OBD in Bezug auf zukünftig verfügbare Emissionsdaten für die Periodische Technische Inspektion (PTI)

Hausberger, Matzer, Lipp, Blassnegger, Hametner, Prosenec

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2024

F 153: Zusammenstellung geeigneter Sicherheitsindikatoren für die Bewertung der Mensch-Maschine-Interaktion von Level 3 Systemen

Yan, Pichen, Schmitz, Sklorz, Baumann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 153b: Compilation of suitable safety indicators for the evaluation of Human-Machine Interaction of level 3 systems

Yan, Pichen, Schmitz, Sklorz, Baumann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 154: Systematisierung geeigneter fahrfremder Tätigkeiten für automatisiertes Fahren von schweren Güterkraftfahrzeugen

Flämig, Beck, Hoffmann, Tjaden, Höger, Brandt, Haase, Wolter, Müller, Damer, Hettich, Schnücker

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 155: Handbuch Rollstuhlbeförderung bei Ausschreibungen

Boenke, Deuster

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 156: Entwicklung eines Konzepts und Lastenheftes für eine Szenariendatenbank zur Bewertung der Sicherheitswirkung hochautomatisierter Fahrfunktionen

Klinge, Krampitz, Ehrich, Siemon, Wiegand, Lassowski, Stavesand, Simon

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 157: Statistischer und methodischer Ansatz zur Erhebung vertiefter Verkehrsunfalldaten

Bäumer, Hautzinger, Pfeiffer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 158: Wissenschaftliche Begleitung der Teilnahme von Elektrokraftfahrzeugen am Straßenverkehr

Unger, Grosche, Rößler, Uhlenhof, Bierbach, Huster, Panwinkler, Straßgütl, Suing, Zelazny

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 159: Pilotprojekt zu Emissionsmessungen mittels Remote Sensing Devices

Hager, Kathmann, Brandt, Roggendorf, Scharrenbroich, Borken-Kleefeld

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2025

F 160: Verbesserte Unfallrekonstruktion durch zusätzliche Anknüpfungstatsachen und KI

Breitlauch, Erbsmehl, Schramm, Urban, Hauck, Sinen, Espig, Walter, Jänsch

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 161: Datenverknüpfung zur Erfassung von Fahrzeugausstattungen in GIDAS

Rößler, Uhlenhof

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 162: Motorrad Kurven-ABS MOKABS

Erlinger, Kraut, Tomasch, Ausserer, Rieß, Kaufmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 163a: Anhänger mit elektrisch angetriebener Unterstützungssachse

Seiniger, Bierbach, Bartels, Gail

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 163b: Trailers with an electrically powered support axle

Seiniger, Bierbach, Bartels, Gail

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 164: Methodenstudie zur Konzeption der Fahrleistungserhebung 2026

Bäumer, Pfeiffer, Kathmann, Müller, Wyrich, Eisenmann, Nobis

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 165: Prognose des Kraftschlusspotenzials bei schweren Güterkraftfahrzeugen (> 12 t zGG.)

Büteröwe, Müller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 166a: Forschungsbedarf Teleoperation

Arbeitsgruppe „Forschungsbedarf Teleoperation“

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 167: Psychologisch-technische Anforderungen an einen Teleoperatorarbeitsplatz

Gary, Maag, Merkel, Neukum

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 168: Erhebung des Informationsverhaltens der Verkehrsteilnehmer

Bäumer, Pfeiffer, Kathmann, Müller, Lammer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 169: Werbung an Fahrzeugen

Zwicker, Schulze, Petzoldt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 170: Recherche zu Bremsstaubemissionen im Rahmen von EURO 7 – Technologiebewertung verschiedener Bremssysteme zur Erfüllung der Euro 7 Bremspartikelgrenzwerte

Crampen, Vossen, Seibel

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 171: Bewertung der Usability und Akzeptanz eines kontinuierlichen Informations- und situationsspezifischen dynamischen Warnkonzeptes

Graefe, Karakaya, Bengler, Prasz, Maruhn

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

F 172: Vernetzung von Fahrrädern – Direkte Kommunikation von Fahrrädern mit anderen Verkehrsteilnehmenden

Bargmann, Pflug, Hermann, Junghans

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG


Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen

Telefon (04 21) 3 69 03 - 0 · E-Mail: kontakt@schuenemann-verlag.de

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.



ISSN 0943-9307
ISBN 978-3-95606-900-0
<https://doi.org/10.60850/bericht-f172>

www.bast.de