

## SIFAPE

# Sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme für Elektrofahrräder

Projektabschlussbericht

Stand: 30.09.2019

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Projektabschlussbericht

Zuwendungsempfänger: **Technische Universität Kaiserslautern**

Förderprogramm: **Nationaler Radverkehrsplan 2020  
(NRVP 2020)**

Förderkennzeichen: **VB1603**

Vorhabenkennzeichnung: **Sicherheitsorientierte Fahrerassistenz-  
systeme für Elektrofahrräder**

Laufzeit des Vorhabens: **01.04.2016 – 14.07.2019**

Berichtszeitraum: **01.04.2016 – 14.07.2019**

# Inhaltsverzeichnis

<b>I. Kurze Darstellung</b>	<b>1</b>
<b>1. Aufgabenstellung</b>	<b>2</b>
1.1. Zusammenarbeit mit anderen Stellen . . . . .	4
<b>2. Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde</b>	<b>4</b>
2.1. Bisherige Arbeiten der Projektpartner . . . . .	4
2.2. Ablauf- und Meilensteinplanung . . . . .	6
<b>3. Stand der Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn</b>	<b>8</b>
3.1. Unfallgeschehen . . . . .	8
3.2. Sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme . . . . .	9
<b>II. Eingehende Darstellung</b>	<b>11</b>
<b>1. Executive Summary</b>	<b>12</b>
1.1. AP1 Analyse der Potenziale und Bedingungen für sicherheitsorientierte FAS . . .	13
1.2. AP2 Konzeption von sicherheitsorientierten FAS . . . . .	17
1.3. AP3 Realisierung und Evaluation von sicherheitsorientierten FAS . . . . .	18
1.4. Weitere Erkenntnisse zur technischen Realisierungen für Elektrofahrräder . . . . .	20
<b>2. Verwendung der Zuwendung und wissenschaftlich-technische Ergebnisse</b>	<b>22</b>
2.1. Systematisierung der Unfallarten und Assistenzsysteme (AP 1) . . . . .	22
2.1.1. Systematisierung der Unfallarten (AP 1.1) . . . . .	22
2.1.2. Systematisierung von Fahrerassistenzsystemen (AP 1.2) . . . . .	25
2.2. Potenzialbestimmung und Eignungsprüfung relevanter FAS . . . . .	38
2.2.1. Nutzerstudie zu Fahrerassistenzsystemen (AP 1.3) . . . . .	38
2.2.2. Potenzial von Fahrerassistenzsystemen anhand des Unfallgeschehens und der Systemausführung (AP 1.4) . . . . .	44
2.2.3. Bewertung der Realisierbarkeit . . . . .	52
2.3. Konzeption von FAS Komponenten AP(2) . . . . .	56
2.3.1. Konzeption von Anzeige- und Bedienelementen (AP 2.1) . . . . .	56
2.3.2. Konzeption von Sensoren- und Aktoren (AP 2.2) . . . . .	58
2.3.3. Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Realisierung (AP 2.3)	58
2.3.4. Zusammenfassung . . . . .	63
2.4. Realisierung von sicherheitsorientierten FAS (AP 3.1) . . . . .	64
2.4.1. Spurverlassenswarnung . . . . .	65
2.4.2. Frontkollisionswarnung . . . . .	71
2.4.3. Fahrtrichtungsanzeiger . . . . .	74
2.4.4. Schlaglochwarnung . . . . .	74
2.4.5. Versuchsträger mit Querführungs- und Längsführungsaktorik . . . . .	75
2.4.6. Zusätzliche Systeme . . . . .	75
2.5. Evaluation der sicherheitsorientierten FAS (AP 3.2) . . . . .	79
2.5.1. Evaluationskonzept und Versuchsaufbau . . . . .	79
2.5.2. Ergebnisse der Befragung . . . . .	87

2.5.3. Ergebnisse der Datenauswertung . . . . .	105
2.5.4. Zusammenfassung . . . . .	108
2.6. Weiterentwicklung und Optimierung der sicherheitsorientierten FAS (AP 3.3) . .	110
2.6.1. Benutzeroberfläche . . . . .	110
2.6.2. Sensorkonzept . . . . .	111
2.6.3. Trajektorienprädiktion . . . . .	111
2.7. Wesentliche Erkenntnisse und weiterer Forschungsbedarf . . . . .	114
2.7.1. Wesentliche Erkenntnisse zum Potenzial und zur Akzeptanz . . . . .	114
2.7.2. Wesentliche Erkenntnisse zur technischen Realisierung . . . . .	116
<b>3. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse</b>	<b>122</b>
<b>4. Fortschritte anderer Stellen während der Projektlaufzeit</b>	<b>122</b>
<b>5. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse</b>	<b>123</b>
5.1. Veröffentlichungen im Berichtszeitraum . . . . .	123
5.2. Ereignisse während des Berichtszeitraums . . . . .	124
<b>6. Literatur</b>	<b>125</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>129</b>
A.1. Online-Fragebogen (AP 1.3) . . . . .	129
A.2. Fragebogen zum Probandentest (AP 3.2) . . . . .	148

# Teil I.

## Kurze Darstellung

## 1. Aufgabenstellung

Als Elektrofahrräder (anglizistisch-umgangssprachlich E-Bikes) werden Fahrräder mit einem elektrisch angetriebenen Hilfsmotor bezeichnet. Je nach Staat gibt es unterschiedliche Regelungen hinsichtlich Motorleistung, Höchstgeschwindigkeit, Versicherungs- oder Helmpflicht. In Deutschland differenziert man Elektrofahrräder im Wesentlichen in zwei Kategorien:

- Pedelecs (Pedal Electric Cycles) sind Fahrräder mit Hilfsmotor, der sich nur bei aktivem Treten des Fahrers<sup>1</sup> zuschaltet. Bis zu einer Geschwindigkeit von 25 km/h unterstützt der Elektromotor (max. 250 Watt) in Abhängigkeit von der geschalteten Stufe. Über 25 km/h, etwa auf Gefällestrecken, schaltet sich der Motor automatisch ab. Seit etwa 2013 werden Pedelecs vermehrt mit einer Schieberregelung ausgestattet, die es Menschen gestattet, Pedelecs anstrengungslos über Rampen und Schieberillen zu bewegen.
- S-Pedelecs weisen eine unterstützte Höchstgeschwindigkeit bis 45 km/h auf. Aufgrund der höheren Fahrgeschwindigkeiten ist der Elektromotor leistungsfähiger und die Bauelemente des Rads sind stabiler konstruiert. Das Rad gilt nicht mehr als Fahrrad im Sinne der StVO, d. h. eine Radwegebenutzungspflicht entfällt. Fahrerlaubnis-, Versicherungs- und Helmpflicht führen dazu, dass dieser Typ nicht universell einsetzbar ist. Eine Mitnahme in Bahnen und Bussen ist nicht erlaubt (vgl. [GDV11, S. 4]).

Weitere elektrisch angetriebene Zweiräder ohne Notwendigkeit des Mittretens fallen in die Kategorie der Mofas / Kleinkrafträder, d. h. der autonom angetriebenen Fahrzeuge, und werden nicht weiter erwähnt. Der Pedelecboom begann in Deutschland etwa 2007/2008; dafür, dass ein Ende nicht absehbar ist, sondern sich Pedelecs als eigene Fahrradgattung am Markt langfristig behaupten, sprechen verschiedene Faktoren. Dazu zählen technische Weiterentwicklungen von Elektromotor, Steuerungselektronik und Akku sowie eine stetig zunehmende Modelldiversifizierung. Mittlerweile werden Pedelecs der ersten Generation und preiswerte Modelle durch aktuelle Produkte ersetzt, wobei 5 % des Marktanteils auf S-Pedelecs entfallen. Bei ca. 400.000 neu verkauften Pedelecs jährlich wird sich die Zahl von über 2 Mio. fahrbereiten Pedelecs in naher Zukunft dennoch deutlich erhöhen. Denn die Vorteile für bestimmte Zielgruppen bleiben bestehen: Insbesondere die fahrradanalog-einfache Handhabung, die höhere Durchschnittsgeschwindigkeit verbunden mit einem größeren Aktionsradius, die leichtere Bewältigung von Steigungsstrecken und der Ausgleich körperlicher Handikaps lassen die Elektrofahrradnutzung von solchen Nutzerkreisen zu, die ansonsten gar nicht oder deutlich weniger Fahrrad fahren würden. Dieser Trend überlagert sich mit der demografischen Entwicklung in Deutschland. Die Personengruppe der mobilen Generation wird älter, ihr absoluter wie relativer Anteil größer.

Gerontologen gehen davon aus, dass der Anteil der 80-Jährigen und älter von 4% der Gesamtbevölkerung 2009 auf über 10% im Jahre 2030 ansteigen wird. Und noch ein Trend ist erkennbar: Diese „Generation fit, aktiv und mobil“ lässt sich durch kleinere körperliche Beeinträchtigungen nicht vom Mobilsein abhalten, sondern ist bestrebt, die bewussten motorischen und sensorischen Schwächen durch technische Hilfsmittel auszugleichen. Außerdem verfügt sie i. d. R. über die entsprechenden finanziellen Möglichkeiten.

Die erhöhten Durchschnittsgeschwindigkeiten von Pedelecs in Kombination mit (Fahrrad-)Mobilität im Alter erfordern jedoch grundlegend neue Sicherheitskonzepte für Elektrofahrräder. Passive Sicherheitseinrichtungen wie Helme wurden in vergangenen Jahren umfassend untersucht und sind, auch im konventionellen Radverkehr, weit verbreitet. Aktive Sicherheitseinrichtungen wie

<sup>1</sup> Im Folgenden kann aus Lesbarkeitsgründen auch nur die männliche Form verwendet werden

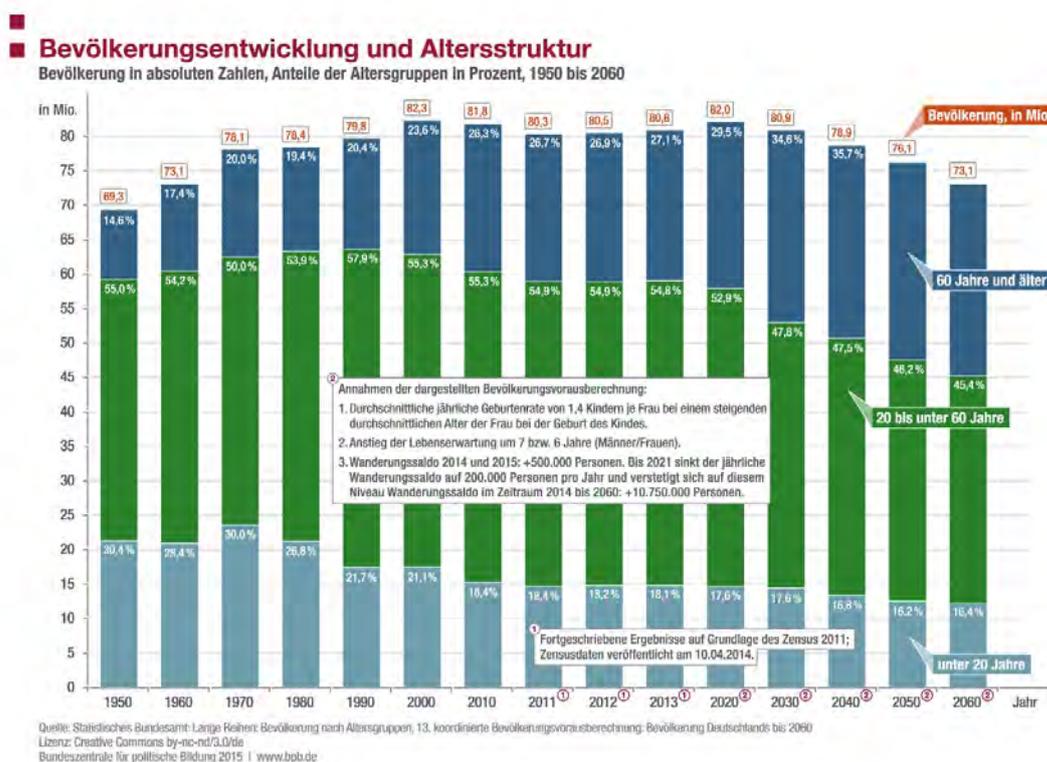


Abbildung 1: Bevölkerungsentwicklung und Altersstruktur [Bun15]

Fahrerassistenzsysteme (FAS) wurden dagegen bislang kaum erforscht und sind nur vereinzelt verfügbar. Es fehlt bislang eine systematische Übersicht und Evaluierung der einzelnen Systeme, um ihren jeweiligen Nutzen den nötigen Aufwendungen gegenüberzustellen.

Die Wirksamkeit sicherheitsorientierter FAS zur Reduktion der Unfallzahlen und Unfallfolgen konnte für PKW, LKW und Krafträder in zahlreichen Studien nachgewiesen werden (z. B. [HKBL11]). Eine ähnliche Wirksamkeit ist auch für Elektrofahrräder zu erwarten. Hierzu muss allerdings noch eine grundlegende Forschung erfolgen. An diesem Punkt setzt das Projekt an.

Ziele des Projekts war die Potentialanalyse, Konzeption sowie exemplarische Realisierung und Evaluation von sicherheitsorientierten FAS für Elektrofahrräder. Als Basis wurden FAS für PKW, LKW und Krafträder herangezogen. Für den Einsatz in Elektrofahrrädern mussten diese FAS jedoch hinsichtlich der Eignung evaluiert, adaptiert und weiterentwickelt werden. Hierbei wurden sowohl fahrzeugtechnische Rahmenbedingungen (Verbaubarkeit, Energiebedarf, Robustheit, Kosten) als auch verkehrswissenschaftliche Aspekte (Ablenkung, Wirksamkeit, Nutzerakzeptanz) berücksichtigt. Wesentliche Ergebnisse des Projekts sind

- eine Machbarkeitsstudie und Potentialanalyse zu FAS für Elektrofahrräder
- eine Nutzerstudie zu FAS für Elektrofahrräder
- ein Leitfaden zur Konzeption von FAS für Elektrofahrräder

- eine exemplarische Realisierung und Evaluation von FAS für Elektrofahrräder

Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist ein modularer und skalierbarer Versuchsträger sowie eine flexible Evaluationsumgebung, die für weitergehende Forschungsaktivitäten vielseitig verwendet werden kann. Die Ergebnisse des Projekts wurden in den relevanten Zielgruppen verbreitet, unter anderem durch Präsentationen, Publikationen und Kurzmitteilungen

- in Fachzeitschriften (beispielsweise Verkehrszeichen, Transportation Research, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems)
- auf Fachkonferenzen (beispielsweise Nationaler Radverkehrskongress, Velo-city Global, IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems)
- in weiteren Medien (beispielsweise Radwelt, Pressemitteilungen)
- auf Fachmessen (beispielsweise Eurobike, IAA)
- auf dem NRVP-Portal.

In die Forschungsaktivitäten wurden Studierende über studentische Arbeiten aktiv eingebunden. Hierdurch wurde im Rahmen des Projekts zusätzlich die Qualifikation von Fachkräften auf den Gebieten der Unfallforschung und der Fahrradtechnologie gefördert.

### 1.1. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Projekt wurde gemeinsam durch das Fachgebiet für Elektromobilität (FEM, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik) und das Institut für Mobilität und Verkehr (imove, Fachbereich Bauingenieurwesen) der Technischen Universität Kaiserslautern durchgeführt. Hierbei war das FEM für die technischen und imove für die verkehrswissenschaftlichen Aspekte verantwortlich. Die genauen Zuständigkeiten sind den jeweiligen Arbeitspaketen zugeordnet, im Kapitel 2.2 abgebildet.

## 2. Voraussetzungen, unter denen das Projekt durchgeführt wurde

### 2.1. Bisherige Arbeiten der Projektpartner

Das Projekt wurde gemeinsam durch das Fachgebiet für Elektromobilität (FEM, Fachbereich Elektro- und Informationstechnik) und das Institut für Mobilität und Verkehr (imove, Fachbereich Bauingenieurwesen) der Technischen Universität Kaiserslautern durchgeführt. Hierbei war das FEM für die technischen und imove für die verkehrswissenschaftlichen Aspekte verantwortlich. Die genauen Zuständigkeiten sind den jeweiligen Arbeitspaketen zugeordnet, im Kapitel 2.2 abgebildet.

Die Forschung von FEM hat einen Schwerpunkt auf dem assistierten und automatisierten Fahren, dem Energiemanagement in Elektro- und Hybridfahrzeugen sowie der Netzintegration von Elektrofahrzeugen. Relevante laufende bzw. abgeschlossene Forschungsaktivitäten sind:

- Projekt „Verbrauchsorientierte Fahrerassistenzsysteme für On- und Offroad-Nutzfahrzeuge“ im Landesforschungsschwerpunkt „Zentrum für Nutzfahrzeugtechnologie (2013-2016)“

- DFG-Projekt „Ereignisbasierte verteilte Regelung von Multiagentensystemen mit Beschränkungen“ mit potentiellen Applikationen für das kooperative assistierte und automatisierte Fahren (2015-2018)
- BMWi-Projekt „Energiemanagementsystem für autarke, regenerativ betriebene, speicher-gestützte Ladeinfrastrukturen basierend auf stochastischen Prognose- und Regelungs-algorithmen“ (2015-2018)
- ZIM-Kooperationsprojekt „Elektromobile Personentransportlösungen im Kali- und Salz-bergbau“ (2013-2014)
- Netzwerk Elektromobilität Rheinland-Pfalz (2010-2014).

Ferner gab es verschiedene Industrieprojekte zu nachhaltigen Nutzfahrzeugen (2014-2016). Insbesondere die Forschungsaktivitäten zu verbrauchsorientierten und sicherheitsorientierten Fahrerassistenzsystemen wurden in jüngster Zeit stark ausgebaut. Diese Kompetenzen sollen in das Projekt eingebracht und im Kontext von Elektrofahrrädern gezielt erweitert werden. Für die praktische Umsetzung des Projekts sind umfassende Erfahrungen bei der Entwicklung von Hardware und Software vorhanden. Unter anderem hat JEM maßgeblich bei der Entwicklung eines Systems zur Langzeitdatenerfassung in Elektrofahrzeugen für das Netzwerk Elektromobilität Rheinland-Pfalz mitgearbeitet. Für die Realisierung und die Evaluation von Hardware und Software ist eine umfangreiche Laborausstattung verfügbar.

Die Forschung von imove ist fokussiert auf neue Methoden und Verfahren für eine in die Stadt- und Regionalplanung integrierte Verkehrsplanung. Themenschwerpunkte sind die Elektromobilität, neue Mobilitätsdienstleistungen, die Verbesserung öffentlicher Verkehrssysteme, barrierefreie Infrastrukturen, Mobilitätsmanagement, der Zusammenhang von Siedlungsentwicklung und Mobilitätskosten sowie die Mobilität sozialer Gruppen. Relevante laufende bzw. abgeschlossene Forschungsaktivitäten sind:

- Netzwerk Elektromobilität Rheinland-Pfalz (MWKEL<sup>2</sup>, 2010-2014)
- eVelo Rheinland-Pfalz (MWKEL, 2015-2016)
- Potenziale und mögliche Entwicklungspfade für Elektromobilität in Leipzig und alternative Mobilitätsmaßnahmen (Stadt Leipzig, 2012)
- Gutachten zur Fahrradmitnahme im Schienenpersonennahverkehr (SPNV) (NVBW<sup>3</sup>, 2010)
- Aufstellung des Landesradverkehrsplans Baden-Württemberg (Los 2, Projektleiter Team Red, MVI, laufend)
- Radverkehrskonzept Albstadt (Stellv. Projektleiter Team Red, Stadt Albstadt, Abschluss Juli 2014)
- Evaluation und Folgeevaluation Fahrradverleihsystem MeinRad Mainz (stellv. Projektleiter Team Red, MVG, Abschluss Oktober 2011 und Oktober 2012).

<sup>2</sup> Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz

<sup>3</sup> Nahverkehrsgesellschaft Baden-Württemberg

Aus den oben genannten Forschungsaktivitäten von FEM und imove sind in den letzten Jahren zahlreiche Publikationen in Fachzeitschriften und auf Fachkonferenzen entstanden. Die Bearbeitung des Projekts erfolgt durch wissenschaftliche Angestellte mit Hochschulabschluss (Diplom/-Master) und dem erforderlichen fahrzeugtechnischen bzw. verkehrswissenschaftlichen Fachwissen.

Weitere Informationen über die Fachgebiete sind unter <https://www.eit.uni-kl.de/jem/home/> bzw. <http://www.bauing.uni-kl.de/imove/aktuell/> einsehbar.

## 2.2. Ablauf- und Meilensteinplanung

Das Projekt ist in vier Hauptarbeitspakete mit mehreren Unterarbeitspaketen unterteilt, welche vom jeweilig verantwortlichen Bearbeiter (imove|FEM) durchgeführt wurden. Zusätzlich wurden mehrere Meilensteine geplant, um den genauen zeitlichen Ablauf des Projektes darzustellen und ggf. Abweichungen darzustellen. Die Ablauf- und Meilensteinplanung und die Verantwortlichkeiten der Arbeitspakete sind in Abbildung 1 im Detail dargestellt.

Während der Projektlaufzeit konnten alle Meilensteine innerhalb ihrer Fälligkeit vollständig bearbeitet werden, sodass sich keine Änderungen zur dargestellten Ablauf- und Meilensteinplanung ergeben haben.

**Sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme für Elektrofahräder (SIFAFE)**

**Balkenplan**

AP	Bezeichnung	JEM	imove	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
1	Analyse der Potentiale und Bedingungen für sicherheitsorientierte FAS	4	11																																						
1.1	Systematisierung relevanter Unfallarten bei Elektrofahrädern	0	2			M1																																			
1.2	Systematisierung relevanter FAS für PKW, LKW und Krafträder	2	0		M2																																				
1.3	Nutzerstudie zu sicherheitsorientierten FAS für Elektrofahräder	0.5	6					M3			M4																														
1.4	Eignungsprüfung & Potentialbestimmung relev. FAS f. Elektrofahräder	1.5	3								M5																														
2	Konzeption von sicherheitsorientierten FAS	11.5	4.5																																						
2.1	Konzeption von Anzeige- und Bedienelementen	5	3										M6	M7			M8																								
2.2	Konzeption von Sensoren und Aktoren	5	0.5														M9					M10																			
2.3	Untersuchungen zur technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit	1.5	1																				M11																		
3	Realisierung und Evaluation von sicherheitsorientierten FAS	17	17																																						
3.1	Realisierung von sicherheitsorientierten FAS	12	2																					M12				M13										M14			
3.2	Evaluation der sicherheitsorientierten FAS	3	13																																					M17	
3.3	Weiterentwicklung und Optimierung der sicherheitsorientierten FAS	2	2																																					M18	
4	Ergebnissynthese, Handlungsempfehlungen und Reporting	3.5	3.5																																						
	Summe Personenmonate	36	36																																						

Abbruchkriterium

**Meilensteinplan**

- M1 Systematisierung relevanter Unfallarten bei Elektrofahrädern abgeschlossen
- M2 Systematisierung relevanter FAS für PKW, LKW und Krafträder abgeschlossen
- M3 Nutzerstudie zu sicherheitsorientierten FAS für Elektrofahräder konzipiert
- M4 Nutzerstudie zu sicherheitsorientierten FAS für Elektrofahräder durchgeführt
- M5 Eignungsprüfung und Potentialbestimmung relevanter FAS für Elektrofahräder durchgeführt
- M6 Konzeption der optischen Anzeigeelemente abgeschlossen
- M7 Konzeption der akustischen Anzeigeelemente abgeschlossen
- M8 Konzeption der haptischen Anzeigeelemente abgeschlossen
- M9 Konzeption der Sensoren abgeschlossen
- M10 Konzeption der Aktoren abgeschlossen
- M11 Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit durchgeführt
- M12 Konzeption und Realisierung des Versuchsträgers abgeschlossen
- M13 Realisierung erster sicherheitsorientierter FAS abgeschlossen
- M14 Realisierung weiterer sicherheitsorientierter FAS abgeschlossen
- M15 Konzeption und Realisierung der Evaluationsumgebung abgeschlossen
- M16 Evaluation erster sicherheitsorientierter FAS abgeschlossen
- M17 Evaluation weiterer sicherheitsorientierter FAS abgeschlossen
- M18 Optimierung und Weiterentwicklung der sicherheitsorientierten FAS abgeschlossen

Tabelle 1: Ablauf- und Meilensteinplanung

### 3. Stand der Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn

#### 3.1. Unfallgeschehen

Aus der Literatur geht hervor, dass Pedelecs allgemein keinem erhöhten oder anders gelagerten Unfall- oder Sicherheitsrisiko unterliegen als konventionelle. Die Unfallforschung der Versicherer (UDV) fand heraus, dass es generell kaum Unterschiede bezüglich Nutzung, Wegstrecken oder Geschwindigkeiten gibt. Pedelecs seien nur geringfügig schneller unterwegs und kämen ähnlich oft in kritische Situationen wie normale Fahrräder ohne Motor. Auch andere Quellen unterstreichen diese Erkenntnisse, wie zum Beispiel Jörg Thiemann-Linden in seinem Bericht in Verkehrszeichen 3/15. Die Beratungsstelle für Unfallverhütung (bfu) Bern untersucht jedes Jahr das Unfallgeschehen auf Schweizer Straßen und stellt die Ergebnisse im SINUS-Report ([bfu15]) vor. Unter anderem wurden dabei Unfälle und Unfalltypen von Fahrrädern mit und ohne Elektroantrieb untersucht und dargestellt. Demnach nimmt die Anzahl der Unfälle proportional zu deren Bestand zu. Gestiegene Unfallzahlen seien auf die gestiegene Nachfrage und vermehrte Verbreitung zurückzuführen. Prozentual gesehen blieb die Zahl der Fahrradunfälle also auf dem Niveau des Vorjahres, da ebenso mehr Fahrräder auf den Straßen unterwegs wie Unfälle zu verzeichnen waren.

Betrachtet man das Unfallgeschehen etwas intensiver und detaillierter, so stellt man fest, dass doch Unterschiede zwischen Fahrrädern mit und ohne Elektromotor bestehen. Die bfu stellte fest, dass sich das Unfallgeschehen bei Pedelecs zu den älteren Verkehrsteilnehmern (Ü45 und Ü64) hin verschiebt. Senioren erleiden demnach die schwersten Unfälle und 45- bis 64-jährige die häufigsten (vgl. [bfu15], S.38). Statistisch gesehen erleiden Fahrer von Pedelecs generell schwerere Unfälle als die konventioneller Fahrräder. Thiemann-Linden stellte fest, dass diese erhöhten Zahlen von schweren Unfällen vor allem auf die besondere Vulnerabilität der Nutzergruppe Senioren zurückzuführen ist. Hauptgründe für viele der Unfälle seien Absperrpfosten auf Radwegen, unebene Seitenränder oder Nebeneinanderfahrten. Aber auch die Nutzung des Pedelecs außerorts könne gefährlich sein, da das Fehlen von Radinfrastruktur dazu führt, dass Pedelecs dort auf der Fahrbahn fahren, wo Kfz-Fahrer nicht damit rechnen. Hinzu kommen höheren Geschwindigkeiten der Kfz im Vergleich zum innerstädtischen Bereich. Auch vom Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (GDV) wurden überdurchschnittlich viele Unfälle mit außerorts verletzten und getöteten Pedelec-Fahrern festgestellt (vgl. [GDV14b]). Zu diesen Faktoren hinzu kommt oft mangelnde Kenntnis und Beherrschung des Elektrofahrrads durch die Nutzer selbst hinzu. Eine hohe Zahl an Selbstunfällen ist die Folge, was gleichfalls aus einer Veröffentlichung vom Auto Club Europa (ACE) hervorgeht, die sich auf die Analyse von Unfallzahlen der Jahre 2010-2012 bezieht (vgl. [Aut13]). Vor allem die Bauart mancher Pedelecs, bei denen der Antrieb über einen Nebenmotor im Vorderrad realisiert wird, in Kombination mit dem Fahren auf nassem Untergrund und/oder in Kurven kann zu kritischen Situationen führen, wenn die Tretunterstützung ruckartig oder verzögert reagiert und es somit zum Wegrutschen des Vorderrades kommt.

Neben Selbstunfällen sind Vorfahrtsmissachtungen und Überholvorgänge die Hauptunfallursachen. Die meisten Kollisionen entstehen durch seitliche Treffer von Fahrrad oder PKW infolge von zu dichtem Überholen oder Missachtung der Vorfahrt durch den PKW (vgl. [GDV14b, bfu15, The14]). Die Statistik der bfu zeigt, dass in 66% aller Unfälle der Kollisionsgegner Hauptverursacher ist. Im Vergleich zum Jahr 2013 haben 2014 Kollisionen um 50% zugenommen. Der Bericht Every Bicyclist Counts der League of American Bicyclists ([The14]) beschreibt die gleichen Erkenntnisse, die im Zuge einer eigenen Studie festgestellt wurden. Demnach sind die am häufigsten vorkommende Kollisionstypen ebenfalls Hecktreffer („rear end collision“), Seitentreffer des Rad-

fahrers von PKWs oder umgekehrt Kollisionen von Fahrrädern mit der Seitenwand eines PKW. Auch der GDV fand heraus, dass zu den häufigsten Unfalltypen im Stadtverkehr Längsunfälle sowie Konflikte beim Ein-/Abbiegen oder Kreuzen gehören (vgl. [GDV14b], S.9ff). Alkohol und Geschwindigkeit gehören nach bfu nicht zu den häufigsten Unfallursachen (vgl. [bfu15], S.40ff).

Für die häufigste Unfallursache „seitlicher Treffer“ sind ebenso Unfallfolgen für Radfahrende bekannt. In eigenen Crashtests mit Dummies wurden bei der GDV aufgrund der leicht höheren Geschwindigkeiten vorprogrammierte Überholmanöver von Pedelecs, Kollisionen von Fahrrädern mit der Seite eines PKWs sowie Kollisionen mit Fußgängern simuliert. Dabei wurden schwere Hals- und Brustbelastungen sowie große Nackenbeugemomente festgestellt (vgl. [GDV11]).

### 3.2. Sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme

Sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme werden in Personen- und Lastkraftwagen seit vielen Jahren sehr erfolgreich eingesetzt und deren Wirksamkeit in zahlreichen Studien nachgewiesen (z. B. [HKBL11]). Die Systeme können kategorisiert werden in [WHL15]

- Systeme auf der Navigationsebene
- Systeme auf der Führungsebene
- Systeme auf der Stabilisierungsebene.

Systeme auf der Navigationsebene unterstützen den Fahrer bei der Wahl der Fahrroute, der Abschätzung der Fahrzeit und der Anpassung der Fahrroute bei Störungen (Staus, Sperrungen). Solche Systeme wirken zeit- und ortsdiskret im Minuten- bis Stundenbereich. Typische Beispiele sind Navigations- und Verkehrstelematiksysteme (Verkehrsfunk, Radiodatensystem).

Systeme auf der Führungsebene unterstützen den Fahrer bei der Wahl der Fahrspur und Geschwindigkeit. Solche Systeme wirken zeitkontinuierlich im Sekunden- bis Minutenbereich sowie antizipatorisch durch Vorausschau der Straßen- und Verkehrssituation. Wesentliche Beispiele sind adaptive Geschwindigkeitsregelungen (ACC), Brems-, Spurhalte-, Spurwechsel-, Kreuzungs- und Stauassistenzsysteme sowie Sichtverbesserungssysteme (adaptive Lichtsysteme, Nachtsichtsysteme).

Systeme auf der Stabilisierungsebene helfen dem Fahrer bei der Haltung der Fahrspur und -geschwindigkeit. Solche Systeme wirken zeitkontinuierlich im Millisekunden- bis Sekundenbereich sowie kompensatorisch durch Regelung von Bremse, Antrieb und Lenkung. Wichtige Beispiele sind Antiblockiersysteme (ABS), Antriebsschlupfregelungen (ASR) und Fahrdynamikregelungen (FDR, ESP).

Die Systeme können zusätzlich kategorisiert werden in

- informierende Systeme
- kontinuierlich wirkende automatisierende Systeme
- eingreifende Notfallsysteme.

Sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme werden in Krafträdern momentan relativ selten verwendet. Verbreitet sind lediglich eingreifende Notfallsysteme auf der Stabilisierungsebene wie

ABS und ASR sowie informierende Systeme auf der Navigationsebene wie Navigations- und Verkehrstelematiksysteme. Insbesondere die Wirksamkeit von ABS wurde in zahlreichen Studien nachgewiesen (z. B. [RHK09]). Konsequenterweise wird ABS für alle in der Europäischen Union neu zugelassenen Krafträder ab dem Jahr 2017 zur Pflicht. Neuere Entwicklungen fokussieren sich auf Stabilisierungssystemen mittels aktiven Fahrwerksregelungen [WER12] und Reaktionsrädern [KYKY11].

Sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme sind bei Fahrrädern derzeit äußerst selten anzutreffen. Lediglich die Antiblockiersysteme von Bosch, Brake Force one, Brovedani, Biria und Sumpar als eingreifende Notfallsysteme auf der Stabilisierungsebene, das Varia Fahrrad-Radar von Garmin als informierendes System auf der Führungsebene [Gar15], die Varia Fahrradbeleuchtung von Garmin als kontinuierlich wirkendes automatisierendes System auf der Navigationsebene [Gar15] und Navigationssysteme verschiedener Hersteller als informierende Systeme auf der Navigationsebene sind bekannt. Die Antiblockiersysteme verhindern das Blockieren der Räder beim Bremsen und damit den Verlust der Richtungsstabilität und verhindern einen Überschlag über das Vorderrad. Insbesondere für Elektrofahrräder sind einfache elektrische oder elektrohydraulische Antiblockiersysteme denkbar, die in Kraftfahrzeugen seit vielen Jahren erfolgreich eingesetzt werden.

Das Varia Fahrrad-Radar erfasst bis zu acht Fahrzeuge hinter dem Fahrrad über eine Entfernung von 140 m und stellt diese auf einem Display dar. Das System adaptiert ferner die Intensität der Rückleuchte bei näher kommenden Fahrzeugen. Die Varia Fahrradbeleuchtung adaptiert schließlich den Lichtkegel abhängig von der Geschwindigkeit und dem Umgebungslicht. Das System kann ferner zur Fahrtrichtungsanzeige verwendet werden.

Weitere Unternehmen beschäftigen sich in Analogie zu Ansätzen der Automobilindustrie mit dem vernetzten Fahrrad. Die Deutsche Telekom und der Fahrradhersteller Canyon haben Funktionalitäten wie Diebstahlschutz und Wartungsinformationen in ihr Konzept einfließen lassen, befassen sich aber nicht mit unfallpräventiven Maßnahmen, wie sie bei SIFAFE angedacht sind.

Die verfügbaren Systeme für Kraft- und Fahrräder zeigen grundsätzlich die technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit von sicherheitsorientierten Fahrerassistenzsystemen für Pedelecs. Es handelt sich jedoch lediglich um punktuelle Lösungen. Eine umfassende Untersuchung zu den Wirkmechanismen und zur Wirksamkeit sowie zur Nutzbarkeit und Nutzerakzeptanz einzelner Systeme sowie kombinierter Systeme wurde bislang nicht durchgeführt. Für den gezielten Einsatz solcher Systeme und damit eine nachhaltige Verringerung von Unfällen und der Unfallschwere sind derartige Untersuchungen jedoch entscheidend.

Erste Untersuchungen zu diesen Aspekten wurden in dem Forschungsprojekt „Slimme Fiets“ („Schlaue Fahrräder“) seitens der Niederländischen Organisation für angewandte naturwissenschaftliche Forschung (TNO) durchgeführt [TNO15]. Im Rahmen des Projekts wurden informierende Systeme auf der Führungsebene betrachtet. Konkret wurden ein Warnsystem für rückseitig nähernde Fahrzeuge und ein Warnsystem für vorderseitig nähernde Hindernisse untersucht. Das Projekt hat erste wichtige Ergebnisse geliefert, jedoch lediglich nur einzelne Aspekte der Thematik Fahrerassistenzsysteme adressiert.

Insgesamt besteht somit ein umfassender und tiefgreifender Forschungsbedarf zu sicherheitsorientierten Fahrerassistenzsystemen für Elektrofahrräder.

## Teil II.

# Eingehende Darstellung

Im Folgenden werden der Verlauf und die Ergebnisse des SIFAFE Projekts in Form eines Executive Summaries beschrieben. Dieses fasst die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse der Projekts zusammen. Detaillierte Auswertungen und Beschreibungen sind in den Folgekapiteln dieses Berichts aufgeführt. Im Executive Summary wird an diese Stellen entsprechend verwiesen.

## 1. Executive Summary

Pedelecs sind ein wesentlicher Baustein für nachhaltige Mobilitätskonzepte. Neue Nutzerkreise (z. B. Wiedereinsteiger und ältere Menschen), neue Nutzungsprofile (z. B. Überlandstrecken und Lastenverkehr) und für wenig versierte Nutzer erhöhte Geschwindigkeiten machen für diesen neuen Fahrradtyp jedoch grundlegend neue Sicherheitskonzepte erforderlich. Passive Sicherheitseinrichtungen wie Helme wurden in vergangenen Jahren umfassend untersucht und sind weit verbreitet. Aktive Sicherheitseinrichtungen wie Fahrerassistenzsysteme (FAS) sind dagegen für den Radverkehr bislang kaum verfügbar. Die technischen Voraussetzungen für aktive Sicherheitseinrichtungen, insbesondere die Energieversorgung, sind bei Elektrofahrrädern jedoch gegeben. An dieser Stelle setzt das Forschungsprojekt an.

Ziel des Projekts war die Potenzialanalyse, Konzeption sowie exemplarische Realisierung und Evaluation von sicherheitsorientierten FAS für Elektrofahrräder. Als Basis wurden FAS für PKW, LKW und Krafträder herangezogen. Für den Einsatz in Elektrofahrrädern mussten diese FAS jedoch hinsichtlich der Eignung evaluiert, adaptiert und weiterentwickelt werden. Hierbei wurden sowohl fahrzeugtechnische Rahmenbedingungen (Verbaubarkeit, Energiebedarf, Robustheit, Kosten) als auch verkehrswissenschaftliche Aspekte (Ablenkung, Wirksamkeit, Nutzerakzeptanz) berücksichtigt. Wesentliche Teilziele des Projekts waren:

1. Eine Machbarkeitsstudie und Potenzialanalyse zu FAS für Elektrofahrräder
2. Eine Nutzerstudie zu FAS für Elektrofahrräder
3. Ein Leitfadens zur Konzeption von FAS für Elektrofahrräder
4. Eine exemplarische Realisierung und Evaluation von FAS für Elektrofahrräder

Ein weiteres wichtiges Teilziel war der Aufbau eines modularen und skalierbaren Versuchsträgers sowie einer flexiblen Evaluationsumgebung, die für weitergehende Forschungsaktivitäten vielseitig verwendet werden kann.

Die Durchführung und die Ergebnisse können anhand der drei übergeordneten Arbeitspakete des Projekts eingeteilt werden:

AP1 : Analyse der Potentiale und Bedingungen für sicherheitsorientierte FAS

AP2 : Konzeption von sicherheitsorientierten FAS

AP3 : Realisierung und Evaluation von sicherheitsorientierten FAS

Diese Arbeitspakete wiederum sind in weitere Unterarbeitspakete zu bestimmten Themengebieten unterteilt. Diese Unterarbeitspakete sowie deren wesentliche Ergebnisse sollen im Folgenden vorgestellt werden.

## 1.1. AP1 Analyse der Potenziale und Bedingungen für sicherheitsorientierte FAS

Essentiell für die Konzeption von sicherheitsorientierten Fahrerassistenzsystemen (FAS) war eine Nutzerstudie, um einerseits auf Erfahrungen und Eindrücke der Fahrrad- und Pedelecfahrerinnen und -fahrer zurückgreifen, und andererseits die Erwartungen, Wünsche und Hemmnisse potentieller Nutzerinnen und Nutzer abschätzen zu können. Dazu wurde eine bundesweite Onlineumfrage durchgeführt, um allgemeine Nutzungsmuster und -daten zum Fahrrad und Pedelec, Unfalldaten und deren Ursachen sowie das Potential von Fahrerassistenzsystemen abzufragen.

Im Ergebnis haben ca. 300 Personen mit unterschiedlichen Nutzungsmustern und Kenntnisstand zu Fahrerassistenzsystemen an der Umfrage teilgenommen. Als am meisten gewünschte Systeme haben sich Lichtassistenten, wie beispielsweise ein Fahrtrichtungsanzeiger, sowie Systeme, die vor unerwünschten Spurwechseln oder Hindernissen warnen, herausgestellt. Ebenso wurden ein Antiblockiersystem und ein Notbremsassistent sehr häufig genannt. Da diese Systeme jedoch bereits kurz vor dem Markteintritt stehen, hat sich das SIFAFE Projekt auf die Entwicklung der erstgenannten Assistenten konzentriert. Als Warnelemente werden übergreifend Elemente bevorzugt, die am Fahrrad bzw. Pedelec befestigt werden können. Probandentests haben ergeben, dass eine haptische Warnung die am meisten zielführende verglichen mit optischen oder akustischen Warnungen, ist. Die vollständige Auswertung der Nutzerumfrage findet sich in Abschnitt 2.2.1.

Als Ausgangslage für die weiteren technischen Entwicklungen wurde eine Systematisierung existierender Lösungen für Assistenzsysteme aus dem PKW/LKW/Motorrad-Sektor durchgeführt. Hierfür wurden Steckbriefe<sup>4</sup> für 18 gängige Assistenzsysteme angelegt, in welchen die folgenden Informationen abgebildet sind:

1. Funktion: Eine Beschreibung der Assistenzfunktion.
2. Bemerkung: Zusätzliche Informationen zum Assistenzsystem, z.B. falls dieses nur als Forschungsprototyp existieren, sowie Informationen, die besonders für den Einsatz eines solchen Systems am Pedelec relevant sind.
3. Ebene: Auf welcher Ebene das Assistenzsystem kategorisiert ist, Navigationsebene, Führungsebene oder Stabilisierungsebene.
4. Kategorie: Welcher Kategorie das System angehört, informierendes System, kontinuierlich wirkendes automatisierendes System oder eingreifendes Notfallsystem.
5. Anzeigeelement: Ob und welche Anzeigeelemente eingesetzt werden können.
6. Bedienelement: Ob Bedienelemente eingesetzt werden.
7. Sensoren: Welche Art von Sensoren eingesetzt werden exterozeptive und/oder propriozeptive Sensorik.
8. Aktoren: Welche Art von Aktoren zum Einsatz kommen.
9. Unfalltyp: Welche Unfalltypen (nach Typenkatalog des Gesamtverbands der deutschen Versicherungswirtschaft) durch das System adressiert werden.

<sup>4</sup> Diese Steckbriefe können in Kapitel 2.1.2 gefunden werden.

Zusätzlich wurde eine Aufschlüsselung der konkreten Sensoren, Aktoren und Anzeigeelemente vorgenommen. Diese ist als tabellarische Gesamtübersicht für jedes der vorgestellten Systeme in Abbildung 2 dargestellt und wird im Weiteren näher erläutert.

	Ebene			Kategorie			Messung										Aktor				Anzeigeelemente			Horizontale Summe (Nur Messung, Aktor)			
	Navigations-	Führungs-	Stabilisierungs-	Kategorie A	Kategorie B	Kategorie C	extern			intern							Kommunikation	Bremsystem	Lenksystem	Licht	Optisch	Akustisch	Haptisch				
							Geschwindigkeit (Objekte)	Szene/Objekt	Abstand	Bremsdruck	Lenkwinkel	Geschwindigkeit/Raddrehzahl	Drehraten/Beschleunigung	Position	Bremshebelweg												
<b>Assistenzsystem</b>																											
Frontkollisionswarnung		X		X			X	X	X					X	X									X	X	X	5
Schlaglochwarnung	X	X		X				X								X							X	X	X	3	
Bremsassistent			X		X					X			X	X		X		X									5
Notbremsassistent			X			X	X	X	X	X			X	X				X						X	X	X	7
Spurverlassenswarnung		X		X				X			X			X									X	X	X	3	
Spurhalteassistent		X			X			X			X	X	X					X					X	X	X	5	
Spurwechselassistent/ Totwinkel-Assistent/Digitaler Rückspiegel		X		X			X	X	X		X	X											X	X	X	5	
Ampel Assistent		X		X										X		X							X	X	X	3	
Einbiegen/ Kreuzenassistent		X		X			X	X	X		X	X	X	X		X							X	X	X	8	
Linksabbiegeassistent		X			X		X	X	X	X	X	X	X				X						X	X	X	8	
Adaptive Lichtverteilung		X			X						X	X	X													4	
Markierungslicht		X			X			X			X	X											X			4	
Variable Leuchtweitenregelung		X			X			X			X	X											X			4	
Blendungsfreies Fernlicht		X			X			X			X	X	X										X			5	
Antiblockiersystem				X		X							X	X			X									4	
Navigationsystem	X			X											X		X						X	X		2	
<b>Vertikale Summe</b>	<b>2</b>	<b>12</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>11</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>9</b>	<b>13</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>9</b>					

Abbildung 2: Systematisierung im Überblick

Die Messungen sind unterteilt in extern und intern, wobei externe Messungen beispielsweise Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern und deren Geschwindigkeit umfasst, während die internen Messungen sich auf das eigene Fahrzeug beziehen und z. B. die eigene Geschwindigkeit oder Beschleunigung enthalten. In der Übersicht ist zusätzlich die vertikale und horizontale Summe der einzelnen Spalten und Zeilen dargestellt. Die vertikale Summe stellt dabei das Maß dar, wie häufig ein bestimmtes Element (z. B. Kommunikation bei Aktoren) bei den Assistenzsystemen zum Einsatz kommt. Je höher die Zahl, desto häufiger kommt die Messung, der Aktor oder das Anzeigeelement in Assistenzsystemen zum Einsatz. Aus einer hohen Zahl lässt sich somit erkennen, dass dieser Sensor/Aktor/Anzeigeelement sehr häufig eingesetzt wird und damit die Möglichkeit besteht, ohne oder mit geringerem Mehraufwand weitere Assistenzsysteme zu realisieren. Die horizontale Summe wird lediglich über die Spalten „Messung“ und „Aktor“ gebildet. Diese Summe kann sehr gut als erstes Bewertungssystem für den Realisierungsaufwand herangezogen werden. Die Zahl drückt dabei die Summe der benötigten Sensor und Aktor Komponenten aus. Da Anzeigeelemente in erster Linie abhängig von der gewünschten Konfiguration bei der Realisierung sind, wurden diese nicht bei den Summen berücksichtigt, da abgesehen von Navigationssystemen stets alle drei Anzeigeelemente möglich sind bei warnenden Systemen. Ebenso muss berücksichtigt werden, dass Sensorkonfigurationen bei Assistenzsystemen sehr flexibel gestaltet werden können und ein umfangreicheres Sensorkonzept durch Sensorfusion in der Regel zu besseren Ergebnissen

führt. Bei der Systematisierung ist jedoch zu berücksichtigen, dass die technischen Ausführungen sowie der Funktionsumfang eines bestimmten Assistenzsystems sich von Hersteller zu Hersteller unterscheiden können und hier lediglich eine Basisversion angenommen wurde, sodass diese Übersicht in erster Linie als erste Orientierung gedacht ist.

Um das Potenzial der Assistenzsysteme anhand des Unfallgeschehens abzuschätzen, wurde die Statistik der Verkehrsunfälle des Statistischen Bundesamtes aus dem Jahr 2015 verwendet. Hierbei wurden die Unfallursachen von Unfällen mit Fahrrad-/Pedelec-beteiligung betrachtet und abgeschätzt, ob aufgrund der Funktionsweise eines Assistenzsystems ein positiver Einfluss auf den Verlauf eines Unfalls mit der jeweiligen Unfallursache genommen werden kann. Für jedes Assistenzsystem wurden daher sämtliche dieser beeinflussbaren Unfallursachen aufsummiert und in Bezug zur Anzahl der Gesamtunfälle gesetzt, sodass sich für jedes System ein theoretisches Potential zur Folgenverminderung von Unfällen ergibt. Die Betrachtung des Unfallgeschehens anhand der Statistik hat hierbei jedoch Grenzen. So können bei passiven Systemen nicht immer konkrete Ursachen zugewiesen werden, obwohl diese prinzipiell auf jeglichen Unfall einwirken können. Eine Detailanalyse von konkreten Unfallhergängen mit Fahrrädern und Pedelecs könnte hier eine genauere Einschätzung des Potentials eines Assistenzsystems liefern. Ebenso wird von einer hohen Dunkelziffer bei Alleinunfällen ausgegangen, wodurch auch hier ein durchaus höheres Potential für einzelne Systeme wahrscheinlich ist. Neben dem Unfallgeschehen ist für das Potenzial ebenso relevant, welche Anzeigeelemente und somit Warnstrategie eingesetzt wird sowie die Art der eingesetzten Umfelderkennung.

Hierfür wurde ein Punktesystem eingesetzt, wodurch jedes Assistenzsystem anhand der verwendeten Anzeigeelemente und der Umfelderkennung, entsprechend des für die Funktionsweise notwendigen Konzepts, Punkte erhält wie in Tabelle 2 dargestellt. Diese Bewertung und das Potential anhand des Unfallgeschehens sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Hierbei stellen die in der Tabelle mit einem \* gekennzeichneten Systeme die passiven Systeme und Lichtsysteme dar, welche von den zuvor genannten Problemen bezüglich der Auswertung der Statistik betroffen sind und eine weitere Detailanalyse erfordern, um das Potenzial bezogen auf das Unfallgeschehen genauer zu repräsentieren.

Punkte	0	1	2
<b>Anzeigeelemente</b>	Keine Anzeige	Optisch	Akustisch und/oder Haptisch
<b>Umfelderfassung</b>	keine	Objekte/ Verkehrsteilnehmer in Fahrtrichtung <b>oder</b> V2x Kommunikation <b>oder</b> rückwärtiger Richtung	Objekte/ Verkehrsteilnehmer in Fahrtrichtung sowie in rückwärtiger Richtung

Tabelle 2: Bewertungsschema

Assistenzsystem	Anzeigeelemente	Umfelderfassung	Unfallgeschehen
Frontkollisionswarnung	1-2	1	18,94%
Einbiegen/Kreuzenassistent	1-2	1	15,16%
Notbremsassistent	1-2	1	12,64%
Spurwechselassistent/ Totwinklassistent	1-2	1	7,54%
Antiblockiersystem (ABS)*	-	0	6,98%
Spurverlassenswarnung	1-2	0	4,87%
Spurhalteassistent	1-2	0	4,87%
Verkehrszeichenerkennung	1-2	1	3,26%
Linksabbiegeassistent	1-2	1	2,9%
Schlaglochwarnung	1-2	1	1,56%
Bremsassistent*	-	0	1,38%
Adaptive Lichtverteilung*	-	1	0,36%
Markierungslicht*	-	0	0,36%
Variable Leuchtweitenregelung*	-	1	0,36%
Blendungsfreies Fernlicht*	-	0	0,36%
Navigationssystem	1	0	0,04%
Unfallerkennung	1	1	0%
Ampelassistent*	0	0	0%

Tabelle 3: Bewertung der FAS

Weiterhin wurde die Realisierbarkeit der in der Systematisierung aufgeführten Komponenten für den Einsatz im Pedelec bewertet. Bewertungskriterien waren hierbei Kosten, Bauraum/Gewicht, Energiebedarf und Entwicklungsaufwand für die Hardware. Als Unterteilung für die Bewertungskriterien wurde hoch, mittel und gering verwendet (z.B. hohe Kosten, mittlere Kosten, geringe Kosten). Die Bewertung erfolgte hierbei durch eine Marktrecherche sowie Experteneinschätzungen und soll die Tendenzen in den einzelnen Bewertungskriterien aufzeigen sowie als erste Orientierung dienen. Die genaue Bewertung der einzelnen Komponenten findet sich in den Tabellen 12 bis 14. Zusammenfassend ergibt sich hier jedoch, dass für Anzeigeelemente und Sensorik Bauraum/Gewicht, Energiebedarf und der Entwicklungsaufwand gering oder mittel ausfallen. Lediglich die Kosten für Kamera, Lidar und Radar sind vergleichsweise hoch. Diese bilden jedoch auch die Grundlage für die Umfelderfassung von FAS, besonders für Systeme, welche im Längsverkehr wirken. Es ist jedoch anzumerken, dass im Zuge des automatisierten Fahrens und der generellen technischen Fortschritte dieser Sektor stark in Bewegung ist und insbesondere die Punkte Kosten, Bauraum/Gewicht sowie Energiebedarf auf lange Sicht von Verbesserungen profitieren werden. Bei der Aktorik ist lediglich eine Kommunikationseinrichtung problemlos zu realisieren. Steuerbare Systeme wie Licht, Bremssystem oder Lenksystem stellen dabei den größten Aufwand dar, da hier nicht auf vorhandene Lösungen zurückgegriffen werden kann, sondern komplette Neuentwicklungen notwendig sind. Diese Systeme sind daher mit erheblichem Zeit- und Kostenaufwand verbunden, was die Realisierbarkeit von unterschiedlicher Aktorik deutlich einschränkt.

## 1.2. AP2 Konzeption von sicherheitsorientierten FAS

Bei der Konzeption der Komponenten für den Einsatz im Pedelec wurden die Anforderungen an Anzeigeelemente, Bedienelemente, Sensoren und Aktoren für den Einsatz im Pedelec betrachtet. Eine gemeinsame Anforderung ist z.B., dass alle Komponenten sowohl Witterungs- als auch Schockresistent sein bzw. entsprechend geschützt montiert werden müssen. Die Resultate dieser Betrachtungen sind in den Abschnitten 2.3.1 und 2.3.2 dargestellt.

Den Abschluss der Konzeption bildete die Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Realisierung von Assistenzsystemen. Hierbei wurden Komponenten (z.B. Sensorik, Bedien- und Anzeigeelemente) ausgewählt, um ein möglichst kostengünstiges und flexibles Gesamtsystem zu erhalten, welches für die Realisierung von sicherheitsorientierten FAS (AP3) eingesetzt wird. Hierbei wurde für konkrete Anzeige- und Bedienelemente der Aufwand für Software und Hardware-Entwicklung abgeschätzt sowie, auf Basis einer Marktrecherche, die zu erwartenden Kosten für Anschaffung und Montage. Die Details hierzu sind in Abschnitt 2.3.3 zu finden.

Aus technischer Sicht ist es sinnvoll, für Steuergeräte sowie Anzeige- und Bedienelemente ein möglichst flexibles Entwicklungskonzept zu realisieren, um die aus den Forschungsergebnissen resultierenden Verbesserungen möglichst schnell und einfach umzusetzen. Dabei bietet sich das Smartphone als Kombination aus Anzeige und Bedienelement besonders an und ist auch aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll, da die meisten potenziellen Nutzer über ein Smartphone verfügen. Aufgrund seiner guten Rechenleistung und dem geringen Leistungsbedarf, dem geringen Bauraum sowie der vorhandenen Kommunikations- und Hardwareschnittstellen, hat sich der Raspberry Pi als erste Basisplattform für das Steuergerät angeboten.

Aus technischer Sicht jedoch ist es sinnvoll, auf Dauer ein leistungsstärkeres Steuergerät einzusetzen, um verbesserte Assistenzfunktionen zu implementieren. Zu Testzwecken wurde hierfür ein Jetson TX2 Developer Kit eingesetzt, welches insbesondere eine erheblich verbesserte Bildverarbeitung ermöglicht.

Für die Abstandssensorik ist der Ansatz über ein Solid State Lidar sinnvoll, da zum einen ein Assistenzsystem mit diesem Sensor wirtschaftlich realisierbar ist und zum anderen noch erheblicher Forschungsbedarf zum Einsatz dieser Sensorik in Assistenzsystemen besteht. Eine Kombination mit einem Radar-Sensor wäre hier am wünschenswertesten, ist jedoch aus wirtschaftlicher Sicht für den Einsatz im Fahrrad zurzeit schwer denkbar. Für die Kamera wurde ein wirtschaftlich sehr günstiges Konzept über eine Raspberry Pi Kamera für die Realisierung gewählt, um den Forschungsbedarf zu ermitteln.

### 1.3. AP3 Realisierung und Evaluation von sicherheitsorientierten FAS

Im Zuge von AP 1 und 2 wurden die folgenden Assistenzsysteme basierend auf den meist gewünschten FAS aus der Nutzerstudie (AP1.3), den Systemen mit dem höchsten Potenzial (AP1.4) sowie den technisch und wirtschaftlich am besten zu realisierenden ausgewählt und realisiert:

- Spurverlassenswarnung
- Frontkollisionswarnung
- Fahrtrichtungsanzeiger

Bei den prototypisch realisierten Systemen besteht grundsätzlich keine Zulassung nach StVZO. Generell ist jedoch zu erwähnen, dass ein Fahrtrichtungsanzeiger an Fahrrädern in Ausnahmefällen erlaubt ist, sofern es sich um ein mehrspuriges Fahrrad handelt oder ein Fahrrad, welches durch einen Heckaufbau das Handzeichen verdeckt.

Neben den genannten selbst realisierten Systemen wurden weitere bereits auf dem Markt erhältliche Systeme für die Evaluation beschafft. Diese sind in Tabelle 4 dargestellt

Name	Bedienelement	Anzeigeelement	Funktionen	StVZO Zulassung
Garmin Varia Fahrrad Radar	-	Optische Anzeige	Warnt vor von hinten herannahenden Fahrzeugen.	Ja
Tern Vizy Light	-	-	Projiziert roten Kreis auf den Boden unter das Fahrrad, um die Sichtbarkeit des Radfahrers zu erhöhen.	Nein
LED Rücklicht mit Markierungslicht und Blinker	Fernbedienung	-	Projiziert rote Linien seitlich unter das Fahrrad auf den Boden, um die Sichtbarkeit des Radfahrers zu erhöhen. Über Fernbedienung am Lenker lässt sich der entsprechende Blinker setzen.	Nein
Signal Pod	Fernbedienung	-	Über Fernbedienung am Lenker lässt sich der entsprechende Blinker setzen.	Nein
LS614 Duo Flat Signal	-	-	Bei Erkennen des Bremsvorgangs wird automatisch ein helleres Bremslicht aktiviert.	Ja

Tabelle 4: Übersicht der zusätzlichen Systeme für Evaluationszwecke

Für die selbst entwickelten Systeme wurden getrennt ansteuerbare Vibrationsmotoren in den Lenkergriffen verbaut zum Realisieren von haptischen Warnungen. Für optische und akustische Warnungen wurde ein Smartphone verwendet, welches mit dem als Steuergerät genutzten Raspberry Pi kommuniziert und dabei gleichzeitig auch als Bedienelement zum Steuern der Assistenzfunktionen dient.

Eine Frontkollisionswarnung für Pedelecs soll den Fahrer vor drohenden Kollisionen mit Hindernissen oder anderen Verkehrsteilnehmern in Fahrtrichtung warnen. Die verwendeten Komponenten sind der Raspberry Pi zum Ausführen des Algorithmus sowie ein Solid State Lidar Sensor für die Abstandsmessung, welcher mittig am Lenker angebracht ist. Der verwendete Algorithmus besteht dabei aus einer Auswertung der Abstandsmessungen des Lidar Sensors, einem anschließenden Tracking der gefundenen Objekte gefolgt von einer Kollisionserkennung. Sollte ein bestimmter Abstand zu einem Objekt im Fahrkorridor unterschritten werden, wird eine Warnung für den Fahrer aktiv. Diese Warnschwelle ist abhängig von der aktuellen Geschwindigkeit des Radfahrers und der Reaktionszeit sowie dem erwarteten Bremsweg für diese Situation. Die Reaktionszeit ist hierbei durch den Radfahrer einstellbar und ermöglicht diesem, den Warnzeitpunkt nach eigenen Wünschen bzw. Fähigkeiten anzupassen. Die Warnung erfolgt am Lenker haptisch durch eine gepulste Vibration auf beiden Seiten des Lenkers bzw. optisch und akustisch auf dem Smartphone. Weitere Details zur Frontkollisionswarnung finden sich in Abschnitt 2.4.2. In den Probandentests fuhren die Teilnehmenden an feste Hindernisse und ein bewegliches Hindernis heran, vor denen das System sie warnen sollte. Die festen Hindernisse, wie Pfosten, können ebenso im Straßenverkehr auftreten und dort leicht übersehen werden. Das dynamische bzw. bewegliche Hindernis simulierte eine sich plötzlich öffnende Fahrzeughür aus Styropor. Details zur Auswertung sind in Abschnitt 2.5.1 zu finden.

Die Spurverlassenswarnung für Pedelecs soll den Fahrer vor unbeabsichtigtem Verlassen der Fahrspur oder Kollisionen mit Bordsteinen frühzeitig warnen. Hierfür wurde eine mittig am Lenker montierte Raspberry Pi Kamera verwendet, um die Fahrbahnmarkierung bzw. den Bordstein zu erkennen und bei zu dichter Annäherung den Fahrer zu warnen. Mit einem eigens entwickelten Algorithmus wird die Position der Spurmarkierungen erfasst sowie der Abstand zum Pedelec ermittelt. Sollte einer dieser Abstände einen einstellbaren Grenzwert unterschreiten, so wird eine Warnung aktiv. Die Warnung erfolgt am Lenker haptisch auf der Seite, in welcher sich der Begrenzung angenähert wird. Zusätzlich erfolgt eine optische und akustische Warnung über das Smartphone. Die Testerinnen und Tester sind dazu in der Probandenstudie auf der um einen Sportplatz umlaufenden Bahn gefahren. Sobald sie sich einer Bahnbegrenzungslinie näherten oder darüber fuhren, wurde eine Warnung ausgegeben, die Fahrtrichtung zu überprüfen. Weitere Details und Beispiele der Spurerkennung finden sich in Abschnitt 2.4.1 und 2.5.1.

Weiterhin wurde ein Fahrtrichtungsanzeiger auf Basis von Wing Lights der Firma cycle entwickelt. Im Gegensatz zu Fahrzeugen, Motorrädern oder Dreirädern sind Fahrtrichtungsanzeiger (ugs. „Blinker“) am Fahrrad oder Pedelec nicht erlaubt. Dennoch wurde dieses System in der Online-Befragung oft gewünscht, um dem nachfolgenden Verkehr die Fahrtrichtung anzuzeigen, ohne die Hände vom Lenker nehmen zu müssen. Aus diesem Grund wurde der Fahrtrichtungsanzeiger im Projekt ebenfalls untersucht. Für die Entwicklung wurden seitlich am Gepäckträger die Fahrtrichtungsanzeiger angebracht, welche über Taster an den Griffen entsprechend aktiviert werden kann. In Abbildung 16 ist der Fahrtrichtungsanzeiger zu sehen. Neben diesem Fahrtrichtungsanzeiger wurden ebenso ein bereits am Markt erhältlicher Fahrtrichtungsanzeiger, zwei Markierungslichter und ein Bremslicht getestet. Die lichttechnischen Systeme wurden

nicht durch eine Testfahrt, sondern im Stand beurteilt. Zu jedem vorgestellten System haben die Probanden angegeben, ob dadurch die Sichtbarkeit und Sicherheit des Radfahrers erhöht wird. Ebenso haben sie beurteilt, ob sie sich durch die alltägliche Nutzung des jeweiligen Systems gestresster oder entspannter bzw. sicherer oder unsicherer fühlten. Abschließend wurde die Größe, Helligkeit (in Dunkelheit) und die Montageposition beurteilt. Die Ergebnisse der Auswertungen werden in Kapitel 2.5.1 ausführlich und detailliert dargestellt.

#### 1.4. Weitere Erkenntnisse zur technischen Realisierungen für Elektrofahrräder

Aus den Probandenversuchen und den Testfahrten konnten weitere Erkenntnisse und vertiefter Forschungsbedarf ermittelt werden insbesondere zu den Themengebieten:

1. Warnstrategie
2. Umfelderkennung
3. Fahrerabsichtserkennung

##### Warnstrategie

Hier ist besonders der vertiefende Forschungsbedarf zu unterschiedlichen Ausführungsformen der Warnelemente zu nennen. Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass besonders ein haptisches Feedback als positiv bewertet wurde, während optische und akustische Warnung als weniger positiv angesehen wurden. Jedoch konnte ein Unterschied der Bewertung zwischen zwei unterschiedlichen optischen Warnungen festgestellt werden, was eine Untersuchung weiterer Ausführungsformen motiviert:

Über die Hälfte der Teilnehmerinnen und Teilnehmer hat angegeben, dass die Warnung bei der Frontalkollisionswarnung zu spät kommt, 45% finden den Zeitpunkt genau richtig. Die objektive Auswertung des Data Loggings hat hier ähnliche Ergebnisse hervorgebracht. Demnach wird die Warnung im Mittel ungefähr eine halbe Sekunde zu spät ausgegeben. Bei der Spurverlassenswarnung sagen 54%, dass der Warnzeitpunkt richtig ist, bei der rückwärtigen Annäherungswarnung liegt der Anteil sogar bei 75%. Beim Auslösen einer Warnung wird der Nutzer über optische, akustische und haptische Weise darüber informiert. Die optische Warnung wurde bei der Frontalkollisions- bzw. Spurverlassenswarnung zu 53 bzw. 36% nicht wahrgenommen. Im Gegensatz dazu wurden die akustische und haptische Warnung von jeweils über 70% der Probanden als genau richtig beurteilt.

Weiterhin wurde bei Testfahrten die Problematik offensichtlich, dass durch die gegenwärtigen Algorithmen bei Szenarien, in denen gefahrloses Ausweichen oder Umfahren eines Hindernisses möglich sind, häufig unerwünschte Warnungen auftreten. Hier müssen Warnstrategien umgesetzt werden, welche Ausweichmanöver gezielt berücksichtigen. Diese Problematik ist dabei sehr eng mit Umfelderkennung und der Fahrerabsichtserkennung verflochten.

##### Umfelderfassung

Bei der Umfelderkennung wurde ersichtlich, dass die gängigen Methoden aus dem PKW-Bereich in angepasster Form auch im Fahrradbereich angewendet werden können. Jedoch ist für eine Umfelderkennung im Pedelec-Bereich ein deutlich erweiterter Funktionsumfang notwendig. Dies resultiert aus der sehr vielseitigen Nutzungsumgebung eines Fahrrads oder Pedelecs, wodurch deutlich komplexere Algorithmen und zum Teil auch umfangreichere Sensorkonzepte vonnöten sind. Ein Beispiel hierfür wäre das Fahren auf geteilten Fuß- und Radwegen, wodurch sich eine

sehr hohe Nähe zu Passanten und anderen Radfahrern ergibt und entsprechend leistungsfähige Sensorik und Algorithmen zur Erkennung und Prädiktion der Bewegungen benötigt wird, um unerwünschte Warnungen zu vermeiden. Weitere Beispiele und Erläuterungen sind in Abschnitt 2.7.2 zu finden.

### **Fahrerabsichtserkennung**

Die Problematik der Fahrerabsichtserkennung für die Pedelecumgebung ist sehr stark durch die Interaktion des Fahrers mit anderen Objekten und Verkehrsteilnehmern geprägt. Eine große Rolle spielt hierbei die Frage, ob auf ein Hindernis durch Anhalten oder mittels Ausweichen reagiert werden soll. Die hohe Beweglichkeit des Pedelecs sowie die geringe Fahrzeugbreite zusammen mit der geringen Geschwindigkeit des Pedelecs führt zu einer erheblich komplexeren Auswertung der Fahrzeugbewegung, um die Absicht des Fahrers zu erkennen. Ebenso spielen die Fähigkeiten des Radfahrers eine sehr große Rolle, was sich beispielsweise darin zeigt, wann mit einem Überholmanöver begonnen wird. Einige Radfahrer werden ein Überholmanöver später einleiten, während andere Radfahrer etwas früher ausscheren. Eine Fahrerabsichtserkennung muss derlei Unterschiede zuverlässig erkennen und Warnzeitpunkte so gestalten, dass unerwünschte Warnungen unterdrückt werden, aber gleichzeitig bei kritischen Situationen die Warnung zuverlässig aktiv wird. Unter Berücksichtigung der vielseitigen Nutzungsumgebung des Pedelecs ist die Relevanz dieser Problematik deutlich zu erkennen. Hier besteht noch ein grundlegender Forschungsbedarf. Weitere Beispiele und Erläuterungen finden sich in Abschnitt 2.7.2.

### **Weiterer Forschungsbedarf für technische Systeme**

Neben den bereits genannten Themengebieten Warnstrategie (Ausführungsformen von Warneinrichtungen, welche Warnung wann,...), Umfelderkennung (Sensorreichweiten, Mehrsensor- vs. Einzelsensorkonzept,...) und Fahrerabsichtserkennung, in welchen vertiefender Forschungsbedarf besteht, sind besonders auf Funktionsebene viele Fragen offen. Hier wäre insbesondere die Einbindung des Radverkehrs in die Fahrzeug zu Fahrzeug bzw. Fahrzeug zu Infrastruktur Kommunikation (V2x) ein wichtiges Forschungsfeld, welches eine Vielzahl an neuen oder verbesserten Funktionen ermöglichen würde und gleichzeitig aufgrund der Kommunikationsfähigkeit die Umfelderkennung sowie Fahrerabsichtserkennung verbessern könnte. Ebenso wäre eine Detailanalyse der existierenden In-Depth Unfalldatenbanken wünschenswert, um ggf. komplett neue Assistenzfunktionen entwickeln zu können, die auf die kritischsten bzw. häufigsten Unfallursachen abzielen und mit der hier vorliegenden Forschungsarbeit nicht abgedeckt wurden.

## 2. Verwendung der Zuwendung und erzielte wissenschaftlich-technische Ergebnisse mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

### 2.1. Systematisierung der Unfallarten und Assistenzsysteme (AP 1)

#### 2.1.1. Systematisierung der Unfallarten (AP 1.1)

In diesem Kapitel werden die zentralen Ergebnisse der Literaturrecherche zu den Themen Verkehrsverhalten, Sicherheit und Unfallgeschehen von Fahrrädern und Pedelecs dargestellt. Zahlreiche nationale und internationale Studien zeigen dabei ähnliche und zu einem Großteil übereinstimmende Ergebnisse auf. Es gilt zu klären, ob sich das Verkehrsverhalten von Pedelecfahrern von dem der Fahrer konventioneller Fahrräder unterscheidet und ob Auswirkungen auf das Unfallgeschehen festzustellen sind.

Die Gesamtzahl der Fahrräder in Deutschland beträgt derzeit über 70 Millionen [LB13]. Der Anteil an Pedelecs liegt bei 4,8%, was einem Bestand von 3,5 Millionen entspricht [ZIV18]. Bereits im Jahr 2015 lagen die Verkaufszahlen von Pedelecs bei über 500.000 Stück [Roh16] pro Jahr und sind seitdem rasant am steigen. Im Jahr 2016 wurden laut statistischem Bundesamt 600.000 Räder mit Elektromotor verkauft. Einhergehend mit dem steigenden Anteil am Markt, sowohl des Fahrrads als auch des Pedelecs, steigt auch die Zahl der Unfälle mit beteiligten Zweirädern. Ereigneten sich 2015 noch 2313 Unfälle mit Zweiradbeteiligung, so waren es laut statistischem Bundesamt im Folgejahr 2016 bereits 3214 [Sol17]. Dies bedeutet eine Steigerung von fast 40%. Um einen ähnlichen Prozentsatz ist auch die Zahl der Unfälle mit Personenschaden (2016: 628) sowie mit Schwerverletzten (2016: 274) gestiegen. Noch höher liegen die Zahlen getöteter Rad- und Pedelecfahrer: Die Zahl ist von 26 im Jahr 2015 auf 46 im Jahr 2016 gestiegen.

Amtliche Unfallstatistiken beruhen auf der Auswertung polizeilich erfasster Unfälle. Gerade für Radunfälle ist der Erfassungsgrad jedoch sehr gering [PPK16] [Sch16]. Eine hohe Dunkelziffer besteht vor allem bei Alleinunfällen, die weder Sach- noch Personenschäden hervorrufen. Die Unfälle, die schwere Verletzungen zufolge haben, sind jedoch gut abgebildet. Da hauptsächlich diese für die Entwicklung von Assistenzsystemen relevant sind, ist die vorhandene Datenbank der polizeilich erfassten Radunfälle die größte und genaueste Datenbasis, aus der belastbare Ergebnisse erzeugt werden können [SUN15]. Als wichtiges und national sowie international übereinstimmendes Ergebnis ist festzuhalten, dass Pedelecs generell keinem erhöhten oder anders gelagertem Unfallrisiko unterliegen als konventionelle Fahrräder. Das belegen zahlreiche Studien aus Deutschland, der Schweiz, den Niederlanden, der USA und aus China [Zwe17] [GDV14b]. Das unterstreichen ebenfalls [LB13], [The14] sowie [Che07] und [SFH<sup>+</sup>14]. Da Pedelecfahrer im Durchschnitt nur geringfügig schneller unterwegs sind als Fahrradfahrer, spielt die Betrachtung der gefahrenen Geschwindigkeit bei Unfällen zur Identifikation von Unterschieden zwischen Rädern mit und ohne Motor eine untergeordnete Rolle. Je nach Studie liegt die Geschwindigkeitsdifferenz zwischen 1 und maximal 4 km/h [Sch16] [SFH<sup>+</sup>14]. Generell liegt die Fahrgeschwindigkeit des Zweirades vor einem Unfall in 80% der Fälle bei unter 20km/h [RUU<sup>+</sup>16]. Pedelecs waren trotz ihrer leicht höheren Geschwindigkeiten nicht öfter in kritische Situationen im Straßenverkehr verwickelt als konventionelle Fahrräder [Hör15] [SFH<sup>+</sup>14], ebenso bestehen keine signifikanten Unterschiede zwischen Fahrrad und Pedelec in Bezug auf das Mobilitätsverhalten [GDV14b]. Die gestiegene Anzahl der Unfälle ist also nicht auf das Pedelec an sich, sondern vielmehr auf dessen vermehrte Verbreitung und die damit einhergehende erhöhte Kilometerleistung zurückzuführen [Zwe17].

Durch die Unterstützung des Elektromotors können mit einem Pedelec längere Strecken und vor allem Steigungen mit reduzierter Anstrengung bewältigt und höhere Geschwindigkeiten ohne größeren Kraftaufwand erreicht werden [GDV14a]. Das hat zur Folge, dass sich vor allem Senioren und bewegungseingeschränkte Menschen für den unterstützenden Elektromotor interessieren. Der Motor hilft mobil zu bleiben und auf das Zweirad nicht verzichten zu müssen. Die Altersstruktur der Pedelec-Fahrer spielt für die Unfallauswertung eine wichtige Rolle [Par17]. Der überwiegende Anteil der Pedelec-Nutzer ist mehr als 60 Jahre alt [GDV14b]. Im Falle eines Unfalls führt die besondere Vulnerabilität der Senioren dazu, dass Verletzungen gravierender sind [TL15] [SUN15] [SFH<sup>+</sup>14]. Ebenso gehören Wiedereinsteiger der Zweiradnutzung zur vorrangigen Käufergruppe der Pedelecs. Mit der Erwartung eines fahrradähnlichen Fahrverhaltens werden sie häufig von der starken Beschleunigung bzw. Verzögerung sowie des im Vergleich zum konventionellen Rad hohen Gewichts des Pedelecs überrascht und verlieren schneller die Kontrolle während der Fahrt oder beim Auf- und Absteigen als geübte Radfahrer [GDV14a] [SFH<sup>+</sup>14] [SW12].

Allgemein betrachtet sind entstandene Verletzungen bei Pedelec-Fahrern und Radfahrern vergleichbar häufig oder schwerwiegend [OFM14], wenn diese unter gleichen Randbedingungen verglichen werden. Verletzungen bei einem Sturz sind von gleicher Schwere bei Fahrrädern mit wie ohne Elektromotor [n-t15], wenn beide die gleiche Geschwindigkeit fahren und der Fahrer das gleiche Alter hat. Unter Berücksichtigung der Altersstruktur und Vulnerabilität der meisten Pedelec-Nutzer sowie der Geschwindigkeiten sind die Folgen von Unfällen jedoch schwerer als bei Fahrradfahrern [bfu15] [SUN15] [GDV14b]. Das könnte daran liegen, dass die gefahrenen Geschwindigkeiten häufig nicht an die körperliche und mentale Verfassung des Fahrers angepasst sind, sodass es infolgedessen zum Kontrollverlust des Fahrers oder zur Fehleinschätzung durch andere Verkehrsteilnehmer kommen kann [GDV11]. Somit steigt das Unfallrisiko. Durch die bei gleichem oder gar geringerem Kraftaufwand erreichbaren höheren Geschwindigkeiten werden mit einem Pedelec in gleicher Zeit längere Strecken zurückgelegt [Che07]. Somit steigt die Wahrscheinlichkeit in eine kritische Verkehrssituation zu geraten. Ob Pedelecs auch häufiger genutzt werden als konventioneller Fahrräder, ist bislang nicht bekannt. Kommt es zu einem Zusammenstoß oder Sturz, sind die Folgen von Pedelecunfällen dann meist schwerer als bei Fahrradunfällen. Fahrradfahrer sind meist geübter und mit angepassterer Geschwindigkeit unterwegs [Mob14].

Die schwersten Unfälle erleiden laut SINUS Bericht 2015 Senioren über 64 Jahre, dort konnte eine Steigerung der schweren Personenschäden von 14% im Vergleich zum Vorjahr 2014 verzeichnet werden. In der Schweiz konnte sogar eine Reduzierung der Schwerverletztenzahlen bei Personen unter 45 Jahren festgestellt werden [bfu15]. Die Steigerung von schweren Unfällen bei über 60-jährigen wird auch von deutschen Forschern unterstrichen. So stellte Ekman bereits im Jahr 2001 fest, dass Senioren im Vergleich zu jüngeren Fahrern ein 3,7faches Risiko haben, bei einem Fahrradunfall zu sterben [Bel16]. Die Gruppe der 45- bis 64-jährigen erleidet absolut gemessen die meisten Unfälle, was aber vor allem daran liegt, dass diese Altersgruppe auch den größten Anteil der Radfahrer repräsentiert. In Shanghai konnte zusätzlich festgestellt werden, dass Pedelecs bei sehr hohen Verkehrsauslastungen nur geringfügig öfter in Unfälle verwickelt sind als konventionelle Räder, jedoch viel seltener als PKWs. So konnte für Pedelecs eine Unfallrate von 0,17% und für PKWs eine um das Zehnfache erhöhte Rate von 1,6% ermittelt werden [Che07]. Ob diese Zahlen auch auf deutsche Straßen- und Verkehrsverhältnisse übertragbar sind, bleibt zu prüfen.

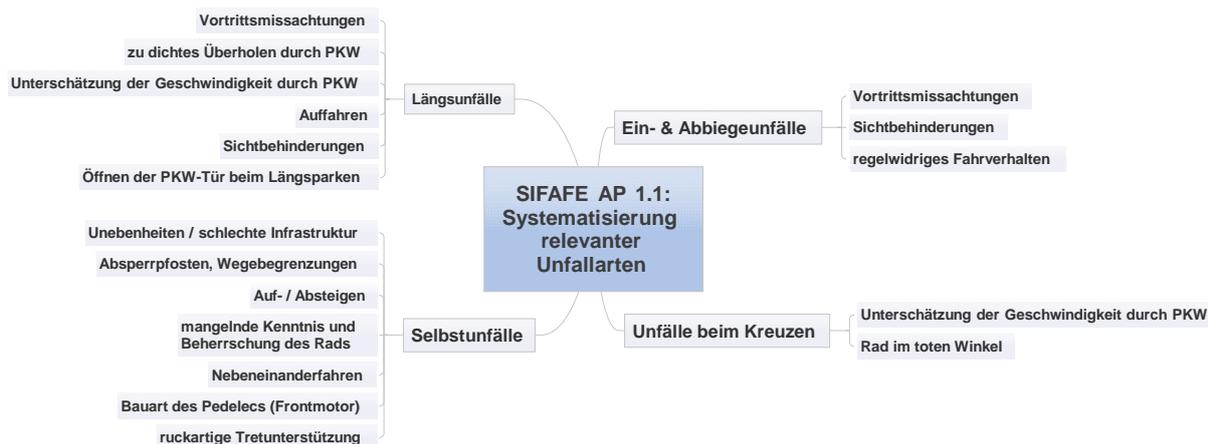


Abbildung 3: Kategorisierung der Unfallarten

Über die Hälfte der Unfälle mit Fahrradbeteiligung passiert innerhalb geschlossener Ortschaften [Bel16]. Innerorts machen Radunfälle ein Drittel aller schweren Unfälle aus. Ein Großteil der polizeilich erfassten Radunfälle geschieht an Knotenpunkten [RUU+16], beim **Einbiegen oder Kreuzen** der Fahrbahn [Sch16] [GDV16a] sowie auch in Fahrtrichtung **durch zu dichtes Auffahren oder beim Überholen** durch andere Verkehrsteilnehmer [The14]. Eine weitere häufige Unfallursache ist außerdem die Missachtung der Vorfahrt oder die Fehleinschätzung der Geschwindigkeit durch andere Verkehrsteilnehmer [GDV15b] [WDR15] [Sch13b]. Vortrittsmissachtungen durch Andere ist in der Schweiz mit 42% die Hauptursache für schwere Kollisionen [bfu15]. Auch in Deutschland und den USA ist in den meisten Fällen der PKW der Unfallverursacher, wenn es zur Kollision gekommen ist [Sch16] [Bel16] [GDV13b].

**Regelwidriges Verhalten** der Radfahrer selbst führt ebenfalls häufig zu Unfällen mit schweren Personenschäden. Dieses Verhalten muss nicht zwangsläufig absichtlich geschehen. Eine Studie aus dem Jahr 2016 hat herausgefunden, dass über der Hälfte der Radfahrer weniger als die Hälfte der Verkehrsregeln bekannt sind und ein regelkonformes Verhalten auch international nur die Ausnahme bildet [HEL16]. Ein Regelverstoß muss also nicht zwangsläufig bewusst erfolgen. Ebenso kann falsches oder zu starkes Bremsen sowie **Ablenkung** bzw. Unaufmerksamkeit die Ursache eines Unfalls sein, wenn es dadurch zu Schleuder- und Selbstunfällen mit anschließender Kollision oder anschließendem Sturz kommt. Auch durch das Übersehen von Absperrpfosten und weiteren **Hindernissen** im Weg, durch unebene Fahrbahnränder und schlechte Infrastruktur sowie durch nicht griffigen Untergrund vor allem an kurvigen Stellen gehören Fahrrad- und Pedelec-fahrer zu der am häufigsten von schweren bis hin zu tödlichen Selbstunfällen betroffenen Gruppe [bfu15] [TL15] [Bel16].

Ebenso kann die Lage des Motors einen Einfluss auf die Sicherheit des Pedelecs haben. Pedelecs werden bezüglich der Lage des Motors in drei verschiedenen Bauarten angeboten. Ein Heck- oder Mittelmotor treibt das Hinterrad an, was ein direktes und sanftes Fahrverhalten hervorruft. Frontmotoren reagieren dahingegen sehr ruckartig und verzögert. So kann es beispielsweise speziell bei Nässe zum Wegrutschen des Vorderrades kommen, wenn ein Frontmotor ruckartig während der Lenkbewegung eingreift [GDV11]. Forscher gehen davon aus, dass der Selbstunfall der bei Radunfällen sogar am häufigsten vorkommende Unfalltyp ist. Hier besteht eine sehr hohe Dunkelziffer, da ein Großteil der Selbstunfälle nicht erfasst wird [Sch13a] [GDV14a]. Neben den Kollisionen mit Hindernissen und anderen Verkehrsteilnehmern entstehen vor allem in den

Niederlanden auch viele Unfälle beim Auf- oder Absteigen vom Pedelec [Mob14] [SFH<sup>+</sup>14] sowie beim Geradeaus- und Kurvenfahren auf separaten Radwegen aufgrund von Überholvorgängen oder schlechtem Untergrund [SW12].

### 2.1.2. Systematisierung von Fahrerassistenzsystemen (AP 1.2)

Um eine Systematisierung von Fahrerassistenzsystemen durchführen zu können, muss zunächst eine Aufstellung zu betrachtender Systeme erfolgen. Da eine reine Betrachtung der auf dem Markt erhältlichen Systeme für PKW, LKW und Krafträder die technischen Möglichkeiten und zukünftigen Entwicklungen sowie die Anforderungen für den Einsatz im Pedelec nur unzureichend widerspiegeln, werden in der folgenden Auflistung neben prototypischen Systemen auch die ggf. angepassten Funktionsweisen der Systeme für das Pedelec aufgeführt.

Im Folgenden wird eine Übersicht über Konzepte der relevantesten Assistenzsysteme dargestellt. Die Systematisierung soll anhand mehrerer Punkte erfolgen:

Name: Name des Assistenzsystems bzw. der Assistenzfunktion

Funktion: Beschreibung der Funktion

Bemerkung: Besonderheiten und Überlegungen zur Nutzung im Pedelec

Ebene: Die Assistenzsysteme können kategorisiert werden in [WHLS15]

- Systeme auf der Navigationsebene
- Systeme auf der Führungsebene
- Systeme auf der Stabilisierungsebene

Systeme auf der Navigationsebene unterstützen den Fahrer bei der Wahl der Fahrroute, der Abschätzung der Fahrzeit und der Anpassung der Fahrroute bei Störungen (Staus, Sperrungen). Solche Systeme wirken zeit- und ortsdiskret im Minuten- bis Stundenbereich. Typische Beispiele sind Navigations- und Verkehrstelematiksysteme (Verkehrsfunk, Radiodatensystem).

Systeme auf der Führungsebene unterstützen den Fahrer bei der Wahl der Fahrspur und -geschwindigkeit. Solche Systeme wirken zeitkontinuierlich im Sekunden- bis Minutenbereich sowie antizipatorisch durch Vorausschau der Straßen- und Verkehrssituation. Wesentliche Beispiele sind Kollisions- oder Spurverlassenswarnungen sowie Kreuzungsassistenzsysteme.

Systeme auf der Stabilisierungsebene helfen dem Fahrer bei der Haltung der Fahrspur und -geschwindigkeit. Solche Systeme wirken zeitkontinuierlich im Millisekunden- bis Sekundenbereich sowie kompensatorisch durch Regelung von Bremse, Antrieb und Lenkung. Wichtige Beispiele sind Antiblockiersysteme (ABS) und Fahrdynamikregelungen.

Kategorie: Die Systeme können zusätzlich kategorisiert werden wie in [WHLS15]

- informierende Systeme (Kategorie A)
- kontinuierlich wirkende automatisierende Systeme (Kategorie B)
- eingreifende Notfallsysteme (Kategorie C)

Systeme der Kategorie A wirken hier stets über den Fahrer auf die Fahrzeugführung ein durch Bereitstellung von relevanten Informationen.

Systeme der Kategorie B haben direkten Einfluss auf die Fahrzeugführung und können in die Längsdynamik oder die Querdynamik des Fahrzeugs eingreifen. Solche Systeme sind stets durch den Fahrer übersteuerbar.

Systeme der Kategorie C greifen ebenfalls direkt in die Längs- und Querdynamik des Fahrzeugs ein. Solche Systeme wirken lediglich in kritischen Situationen, in welchen ein Fahrer in der Regel nicht rechtzeitig reagieren kann.

Anzeigeelement: Elemente, über die Informationen oder Warnungen an den Fahrer übermittelt werden. Relevant sind optische, haptische und akustische Anzeigen. Generell gilt, dass alle der genannten Anzeigeelemente für Warnungen genutzt werden können, jedoch bei einigen informierenden Systemen eine Darstellung komplexerer Informationen z.B. Navigationsanweisungen lediglich sinnvoll auf optischem oder akustischem Wege sind.

Bedienelement: Bedienelemente, welche zur Steuerung des Assistenzsystems genutzt werden. Die Ausführung bleibt der jeweiligen Realisierung überlassen. Jedoch sollte insbesondere bei informierenden Systemen stets ein Bedienelement zum Aktivieren beziehungsweise Deaktivieren der Assistenzfunktion vorhanden sein.

Sensoren: Benötigte Sensorik, um eine Assistenzfunktion zu realisieren, lässt sich in exterozeptive Sensorik und propriozeptive Sensorik unterteilen. Exterozeptive Sensorik umfasst Sensoren, welche Informationen oder Zustände der Umgebung erfassen, z. B. Radar, Lidar, Kamera- und Ultraschallsensoren. Propriozeptive Sensorik umfasst Sensoren, welche interne Größen des Fahrzeugs messen, z. B. Tachometer, Beschleunigungs- und Raddrehzahlsensoren.

Aktoren: Umfassen die notwendige Aktorik, welche benötigt wird, um die Assistenzfunktion zu realisieren. Der Einsatz von Aktorik ist aufgrund der komplexen Fahrzeugdynamik bei Pedelecs mit sehr hohem Kosten-, Konstruktions- und Forschungsaufwand verbunden und eine Untersuchung, ob dies sicher realisierbar ist, ist noch offen.

Unfalltyp: Um eine Zuordnung der Systeme und eine spätere Potenzialbewertung zu ermöglichen, werden den Assistenzsystemen anhand [GDV16b] ein oder mehrere Unfalltypen zugeordnet, welche hauptsächlich durch dieses beeinflussbar sind. Unfalltypen finden in der Unfallforschung Anwendung und stellen eine Beschreibung der konkreten Unfallursache dar. Neben den (einstelligen) Unfalltypen, welche die Konfliktsituation beschreiben, existieren zwei weitere Unterteilungen, die den Hergang genauer beschreiben. Für die Einteilung der Unfalltypen wird lediglich der einstellige Unfalltyp betrachtet. Die Unfalltypen sind aus [GDV16b] entnommen und wie folgt definiert:

- Unfalltyp 1: Fahrrunfall

Ein Unfall, der ohne Zutun eines anderen Verkehrsteilnehmers ausgelöst wurde, beispielsweise durch nicht angepasste Geschwindigkeit oder falsche Einschätzung des Straßenverlaufs bzw. des Straßenzustandes, und infolge dessen die Kontrolle über die Fahrzeugbewegung verloren wird. Durch den Kontrollverlust kann es im weiteren Verlauf zur Kollision mit einem weiteren Verkehrsteilnehmer kommen.

- Unfalltyp 2: Abbiegeunfall  
Ein Abbiegeunfall ist ein Konflikt an einer Kreuzung, Einmündung oder Zufahrt zwischen einem Abbieger und einem anderen Verkehrsteilnehmer, welcher in entgegengerichteter oder gleicher Richtung unterwegs ist.
- Unfalltyp 3: Einbiegen/Kreuzen-Unfall  
Um einen Einbiegen/Kreuzen-Unfall handelt es sich, wenn dieser durch einen Konflikt zwischen einem einbiegenden oder kreuzenden Wartepflichtigen und einem vorfahrtsberechtigten Verkehrsteilnehmer an Kreuzungen, Einmündungen oder Zufahrten verursacht wird.
- Unfalltyp 4: Überschreiten-Unfall  
Ein Überschreiten-Unfall resultiert aus einem Konflikt zwischen einem Fußgänger, welcher die Fahrbahn überquert, und einem Fahrzeug. Dies gilt nicht, wenn der Konflikt während des Abbiegens auftritt.
- Unfalltyp 5: Unfall durch ruhenden Verkehr  
Unfälle durch ruhenden Verkehr resultieren aus dem Konflikt zwischen einem Fahrzeug im fließenden Verkehr und einem Fahrzeug im ruhenden Verkehr (parkend/haltend). Hierzu zählen ebenfalls Konflikte, welche durch Ein- und Ausparken verursacht werden.
- Unfalltyp 6: Unfall im Längsverkehr  
Unfälle im Längsverkehr resultieren aus einem Konflikt zwischen Verkehrsteilnehmern, die sich in gleicher oder entgegengesetzter Richtung bewegen. Dies gilt nur, sofern der Konflikt nicht einem anderen Typ zugeordnet werden kann, z. B. einem Abbiegeunfall.
- Unfalltyp 7: Sonstiger Unfall  
Unfälle, welche sich nicht den anderen Unfalltypen zuordnen lassen, beispielsweise Unfälle mit Hindernissen oder Tieren, Unfälle beim Wenden/Rückwärtsfahren oder auch technisches Versagen.

Name	Frontkollisionswarnung
Funktion	Die Frontkollisionswarnung informiert den Fahrer über das zu schnelle Aufschließen zu einem vorwegfahrenden Verkehrsteilnehmer und somit einen potenziellen Auffahrunfall. Dadurch soll das System durch eine Warnung die Reaktionszeit des Fahrers im Hinblick auf die Gefahrensituation verringern. Solche Systeme können sich bei Ablenkung des Fahrers oder Fehleinschätzung der Geschwindigkeit des vorwegfahrenden Verkehrsteilnehmers (schlechte Sichtverhältnisse, plötzliches Bremsmanöver) vorteilhaft auf die Reaktionszeit auswirken. Neben anderen Verkehrsteilnehmern warnt dieses System ebenfalls vor generischen Objekten in Fahrtrichtung des Pedelecs wie beispielsweise Absperrpfosten oder Verkehrspollern.
Bemerkung	-
Ebene	Führungsebene
Kategorie	A
Anzeigeelement	Akustisch, Optisch, Haptisch
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Exterozeptive Sensorik/propriozeptive Sensorik
Aktoren	-
Unfalltyp	4,5,6

Name	Schlaglochwarnung
Funktion	Informiert den Fahrer frühzeitig über detektierte Schlaglöcher in Fahrtrichtung und ermöglicht so ein frühzeitiges Reagieren. Zusätzlich kann der Ort der entdeckten Schlaglöcher festgehalten werden und an weitere Verkehrsteilnehmer oder Einrichtungen übermittelt werden und somit in der Routenplanung genutzt werden bzw. im Vorfeld auf Straßenschäden aufmerksam gemacht werden bzw. bessere Routen für den Radverkehr gewählt werden.
Bemerkung	Nur Prototypisch bzw. zu Forschungszwecken vorhanden. Hoher Mehrwert für Pedelecfahrer zu erwarten.
Anzeigeelement	Akustisch, Optisch, Haptisch
Ebene	Führungsebene/Navigationsebene
Kategorie	A
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Exterozeptive/propriozeptive Sensorik
Aktoren	Kommunikationseinrichtung
Unfalltyp	1

Name	Bremsassistent
Funktion	Der Bremsassistent soll bei Erkennen einer Notbremsabsicht die maximal mögliche Verzögerung zur Verfügung stellen durch automatisches Erhöhen der Bremskraft auf das in der aktuellen Umgebung mögliche Maximum. Dies soll den Bremsweg verkürzen und Unfälle vermeiden, welche durch zu zögerliche/schwache Betätigung des Bremspedals verursacht werden.
Bemerkung	Dieses System, kann gerade bei Pedelecs einen großen Nutzen bringen, da die wirkungsvolle Vorderradbremse je nach Fahrer sehr zögerlich verwendet wird, aufgrund der Überschlagsgefahr. Ein teil-/automatischer Bremsengriff bei einem Pedelec kann jedoch auch aufgrund der Instabilität des Fahrzeuges und dem Zusammenspiel mit dem Fahrer zu einem Sturz führen und bedarf weiterer Untersuchungen.
Ebene	Stabilisierungsebene
Kategorie	B
Anzeigeelement	-
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Propriozeptive Sensorik
Aktoren	Aktuierbares Bremssystem
Unfalltyp	4,5,6

Name	Notbremsassistent
Funktion	Reagiert auf Hindernisse (Fahrzeuge, Fußgänger, Fahrradfahrer, Absperrpfosten) durch automatisches Ausführen einer Teilbremsung bis hin zur Vollbremsung, um eine Kollision zu verhindern. Ein Notbremsassistent ist eine Erweiterung des Bremsassistenten durch weitere und genauere Sensoren zur Umfeldfassung.
Bemerkung	Ein teil-/automatischer Bremsengriff bei einem Pedelec kann jedoch auch aufgrund der Instabilität des Fahrzeuges und dem Zusammenspiel mit dem Fahrer zu einem Sturz führen und bedarf weiterer Untersuchungen.
Ebene	Stabilisierungsebene
Kategorie	C
Anzeigeelement	Optisch, Akustisch, Haptisch
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Exterozeptive/propriozeptive Sensorik
Aktoren	Aktuierbares Bremssystem
Unfalltyp	4,5,6

Name	Spurverlassenswarnung
Funktion	Dient dazu, den Fahrer bei bzw. kurz vor ungewolltem Verlassen der Fahrspur oder annähern an die Fahrbahnbegrenzung (Bordstein, Grünstreifen ...) zu warnen.
Bemerkung	Als Erweiterung des Funktionsumfangs für Pedelecs wäre es denkbar ebenfalls vor Straßenbahnschienen zu warnen.
Anzeigeelement	Haptisch, Akustisch, Optisch
Ebene	Führungsebene
Kategorie	A
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Exterozeptive Sensorik
Aktoren	-
Unfalltyp	1

Name	Spurhalteassistent
Funktion	Unterstützt den Fahrer beim Halten der Fahrspur, indem aktiv in die Querführung des Fahrzeugs eingegriffen wird, wenn ein Verlassen der Fahrspur bevorsteht. Die Spurhalteassistentz ist eine Erweiterung der Spurverlassenswarnung.
Bemerkung	Die Realisierung dieser Funktion ist ähnlich wie beim Bremsengriff sehr sicherheitskritisch aufgrund des Eingriffs in die Fahrdynamik. Da die Querführung und Stabilität eines Pedelecs sehr stark durch Gewichtsverlagerung (Neigung) des Fahrers beeinflusst wird, kann dies hier durch einen Eingriff im schlimmsten Fall zu einem Sturz führen. Aus diesem Grund müssen hier weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um das Zusammenspiel zwischen Fahrer und Aktorik sicher zu gestalten.
Ebene	Führungsebene
Kategorie	B
Anzeigeelement	Haptisch, Akustisch, Optisch
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Exterozeptive Sensorik
Aktoren	Steuerbares Lenksystem
Unfalltyp	1

Name	Spurwechsellassistent/Totwinkel-Assistent/Digitaler Rückspiegel
Funktion	Ein Spurwechsellassistent bzw. eine Totwinkelüberwachung dient dazu ein sicheres Wechseln der Spur zu gewährleisten. Die Funktion kann aus einer Warnung vor Fahrzeugen im toten Winkel links und rechts des eigenen Fahrzeugs bestehen oder auch auf das Herannahen von anderen Fahrzeugen beim Spurwechsel aufmerksam machen. Eine andere Ausführung, welche jedoch die grundlegenden Eigenschaften von Spurwechsel- und Totwinkelassistent teilt, ist der digitale Rückspiegel, welcher das Annähern von anderen Verkehrsteilnehmer von hinten anzeigt, wodurch der Radfahrer nicht mehr über die Schulter blicken muss.
Bemerkung	-
Ebene	Führungsebene
Kategorie	A
Anzeigeelement	Akustisch, Optisch, Haptisch
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Exterozeptive Sensorik
Aktoren	-
Unfalltyp	6

Name	Ampel-Assistent
Funktion	Ein Ampelassistent kommuniziert mit der Infrastruktur, um Umschaltzeitpunkte von Ampeln zu ermitteln. Durch diese Information sollen Rotdurchfahrten sowie Auffahrunfälle vermieden werden, indem durch das System frühzeitig eine entsprechende Warnung an den Fahrer erfolgt, wenn bei gemessenem Abstand zur Infrastruktur und der gegenwärtigen Geschwindigkeit eine Durchfahrt empfehlenswert ist bzw. ein Halt notwendig ist.
Bemerkung	-
Ebene	Führungsebene
Kategorie	A
Anzeigeelement	Akustisch, Optisch, Haptisch
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Exterozeptive/propriozeptive Sensorik
Aktoren	Kommunikationseinrichtung
Unfalltyp	3,6

Name	Einbiege-/Kreuzenassistent
Funktion	Diese Systeme nutzen Fahrzeug-zu-Fahrzeug- und, Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation sowie weitere Sensorik zur Erfassung anderer Verkehrsteilnehmer und der Ermittlung des Kreuzungszustandes (Vorfahrtsregelung, Ampelschaltzeitpunkte, Fahrzeuge auf der Kreuzung). Hierdurch soll der Fahrer durch Meldungen unterstützt werden, um schnell zu erkennen, ob Vorrang oder Wartepflicht besteht und Gefahrensituationen entstehen können.
Bemerkung	Sehr hohe Relevanz für den generellen Radverkehr, insbesondere mit Hinblick auf Rechtsabbiegeunfällen mit LKW. Hauptsächlich prototypisch bzw. zu Forschungszwecken vorhanden.
Ebene	Führungsebene
Kategorie	A
Anzeigeelement	Akustisch, Optisch, Haptisch
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Exterozeptive/propriozeptive Sensorik
Aktoren	Kommunikationseinrichtung
Unfalltyp	3,6

Name	Linksabbiegeassistent
Funktion	Ein Linksabbiegeassistent dient dazu, bei einem Linksabbiegemanöver eine Kollision mit entgegenkommendem Verkehr zu verhindern. Hierdurch wird bei Erkennung einer kritischen Situation zunächst gewarnt und bei zunehmendem Kollisionsrisiko kann eine autonome Bremsung durchgeführt werden. Dabei sind autonome Bremsungen vom Fahrer stets übersteuerbar.
Bemerkung	Da der Eingriff in ein Linksabbiegemanöver bei einem Pedelec besonders kritisch ist (Stabilität oder unerwünschte Geschwindigkeitsverringerung bei Überquerung der Gegenfahrbahn), wäre es auch denkbar komplett auf einen Eingriff zu verzichten und lediglich zu warnen.
Ebene	Führungsebene
Kategorie	B
Anzeigeelement	Optisch, Akustisch, Haptisch
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Exterozeptive/propriozeptive Sensorik
Aktoren	Aktuierbares Bremssystem
Unfalltyp	2

Name	Adaptive Lichtverteilung
Funktion	Die adaptive Lichtverteilung passt den Lichtkegel des Fahrzeuges an die Strecke an, um die Sicht bei Gefällen, Steigungen oder Kurven (Kurvenlicht) zu verbessern. Dabei wird der Winkel des Lichtkegels angehoben bzw. gesenkt oder nach außen hin gelenkt, um einen größeren Teil der Straße zu beleuchten.
Bemerkung	Dies kann ebenfalls einen Mehrgewinn darstellen, durch Verbesserung der Sichtbarkeit des Radfahrers für andere Verkehrsteilnehmer.
Ebene	Führungsebene
Kategorie	B
Anzeigeelement	-
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Propriozeptive Sensorik
Aktoren	Aktuierbares Lichtsystem
Unfalltyp	-

Name	Markierungslicht
Funktion	Das Markierungslicht projiziert mittels Licht eine Form auf den Boden, wodurch der Radfahrer in der Dunkelheit besser erkannt werden kann.
Bemerkung	-
Ebene	Führungsebene
Kategorie	A
Anzeigeelement	-
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Exterozeptive/propriozeptive Sensorik
Aktoren	-
Unfalltyp	-

Name	Variable Leuchtweitenregelung
Funktion	Bei der variablen Leuchtweitenregelung werden durch ein Kamerasystem entgegenkommende Verkehrsteilnehmer erkannt und der Lichtkegel so angepasst, dass diese nicht geblendet werden (z. B. Verkürzen des Lichtkegels). Ohne Gegenverkehr oder vorausfahrende Verkehrsteilnehmer wird Fernlicht verwendet.
Bemerkung	Dies kann ebenfalls einen Mehrgewinn darstellen, durch Verbesserung der Sichtbarkeit des Radfahrers für andere Verkehrsteilnehmer.
Ebene	Führungsebene
Kategorie	B
Anzeigeelement	-
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Exterozeptive/propriozeptive Sensorik
Aktoren	Aktuierbares Lichtsystem
Unfalltyp	-

Name	Blendungsfreies Fernlicht
Funktion	Das blendungsfreie Fernlicht hat eine ähnliche Funktionsweise wie die variable Leuchtweitenregelung. Andere Verkehrsteilnehmer werden ebenfalls durch ein Kamerasystem erkannt. Das System ermittelt den konkreten Ort der anderen Verkehrsteilnehmer und dimmt bzw. schaltet das Licht in den entsprechenden Gebieten aus, während der restliche Lichtkegel unverändert bleibt. Dadurch soll eine maximale Sichtweite trotz anderer Verkehrsteilnehmer gewährleistet werden.
Bemerkung	-
Ebene	Führungsebene
Kategorie	B
Anzeigeelement	-
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Exterozeptive/propriozeptive Sensorik
Aktoren	Aktuierbares Lichtsystem
Unfalltyp	-

Name	Verkehrszeichenerkennung
Funktion	Das System erkennt Verkehrszeichen mittels einer Kamera und stellt diese Information auf einer Anzeige für den Fahrer da. Zusätzlich kann auf eine zu hohe Geschwindigkeit mittels einer Warnung hingewiesen werden.
Bemerkung	Im Pedelecumbereich wäre ein solches System zusätzlich hilfreich, um auf die Nutzung falscher Infrastrukturen hinzuweisen.
Ebene	Führungsebene
Kategorie	A
Anzeigeelement	Optisch, Akustisch
Bedienelement	-
Sensoren	Exterozeptive/propriozeptive Sensorik
Aktoren	-
Unfalltyp	1

Name	Unfallerkennung
Funktion	Unfallerkennungen sind in zwei Varianten im Einsatz. Zum einen werden Unfallstellen erkannt zum anderen wird erkannt, dass das eigene Fahrzeug in einen Unfall verwickelt ist. Dabei kann ein automatischer Notruf abgesetzt werden durch das System, bei Erkennen eines Unfalls.
Bemerkung	-
Ebene	Führungsebene/Navigationsebene
Kategorie	A
Anzeigeelement	Optisch, Akustisch
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Exterozeptive/propriozeptive Sensorik
Aktoren	Kommunikationseinrichtung
Unfalltyp	alle

Name	Antiblockiersystem (ABS)
Funktion	Ein ABS verhindert das Blockieren der Räder bei Bremsmanövern, sodass die Lenkbarkeit gewährleistet bleibt. Durch eine Bremsdruckregelung wird sichergestellt, dass stets eine möglichst hohe Bremskraft erreicht wird, ohne zum Blockieren der Räder zu führen, was neben der Lenkbarkeit ebenfalls zu einem kürzeren Bremsweg führt. Zusätzlich kann durch die Rücknahme der Bremskraft auf der Vorderradbremse verhindert werden, dass es durch falsches Bremsen zu einem Überschlag kommt.
Bemerkungen	-
Ebene	Stabilisierungsebene
Kategorie	C
Anzeigeelement	-
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Propriozeptive Sensorik
Aktoren	Aktuierbares Bremssystem
Unfalltyp	alle

Name	Navigationssystem
Funktion	Der Fahrer gibt ein Wunschziel der Fahrt an und das Navigationssystem ermittelt anhand mehrerer Kriterien die bestmögliche Route. Während der Fahrt erhält der Fahrer Informationen über die Route optisch angezeigt bzw. akustisch über Sprachansagen. Die meisten Navigationssysteme verfügen zusätzlich über eine Anzeige der aktuell zulässigen Höchstgeschwindigkeit und je nach Ausführung über akustische Warnungen bei Überschreitung.
Bemerkung	-
Ebene	Navigationsebene
Kategorie	A
Anzeigeelement	Optisch, Akustisch
Bedienelement	Aktivieren/Deaktivieren
Sensoren	Propriozeptive Sensorik
Aktoren	Kommunikationseinrichtung
Unfalltyp	alle

Im Weiteren werden die einzelnen Systeme eingeordnet, um eine Übersicht über beispielsweise gemeinsam genutzte Sensorik oder Aktorik zu geben. Hierfür wird eine kurze Übersicht über die verwendete Sensorik und Aktorik gegeben.

Um eine Einteilung der FAS anhand der verwendeten Sensorik durchführen zu können, muss zunächst eine Aufstellung der möglichen Sensoren erfolgen. Da zumeist eine Kombination aus Sensoren in einem bestimmten FAS genutzt wird, ist es sinnvoll, im Vorfeld eine kurze Übersicht über die Art der Messung und die entsprechenden Sensoren aufzustellen. An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Einordnung der Sensorik sich auf eine mögliche Realisierung für ein Assistenzsystem bezieht, jedoch je nach Implementierung unterschiedliche Sensorik eingesetzt werden kann, als Stellschraube zwischen Kosten und Präzision. Da Pedelecs in der Regel lediglich über Geschwindigkeitsmessungen für den elektrischen Antrieb verfügen, wird für die Einordnung jeweils eine Minimalrealisierung angenommen, sodass diese den notwendigen Mehraufwand für weitere Sensorik widerspiegelt.

Die relevante exterozeptive Sensorik umfasst

- Szenenerfassung und Objekterkennung  
Hauptsächlich umgesetzt durch Kamera- oder Lidarsensoren (Laserscanner).
- Abstandsmessung  
Häufig eingesetzte Sensoren sind Radar- und Lidarsensoren sowie Stereokameras. Für kürzere Entfernungen werden häufig auch Ultraschallsensoren verwendet.
- Geschwindigkeitsmessung (andere Verkehrsteilnehmer)  
Für die Messung der Geschwindigkeit anderer Verkehrsteilnehmer werden hauptsächlich Lidar- und Radarsensoren verwendet.

Die relevante propriozeptive Sensorik besteht in der Regel aus dedizierten Sensoren, die fahrzeuginterne Größen erfassen. Da diese sich zwar im Messverfahren unterscheiden, jedoch keine unterschiedlichen Größen erfassen, werden lediglich die einzelnen Messgrößen aufgeführt.

- Raddrehzahl/Geschwindigkeit
- Drehrate/Beschleunigung (insbesondere Nickwinkel)
- Bremsdruck
- Bremshebelweg
- Lenkwinkel
- Position (GPS)

Die Einordnung anhand der Aktorik untergliedert sich hauptsächlich in die relevanten Längs- und Querdynamikelemente zur Steuerung der Bremsung und Lenkung sowie zusätzlich in ein verstellbares Lichtsystem. Zusätzlich werden Kommunikationseinrichtungen bei der Aktorik aufgeführt, obwohl dies ebenfalls bei der Sensorik möglich wäre. Kommunikationseinrichtungen umfassen Systeme (drahtlos Netzwerke), welche zur Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation sowie Fahrzeug-zu-Infrastruktur-Kommunikation genutzt werden, um so Informationen auszutauschen.

## Zusammenfassung

In Abbildung 4 ist die Systematisierung im Überblick in Tabellenform dargestellt. Die Messungen sind unterteilt in extern und intern, wobei externe Messungen beispielsweise Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern und deren Geschwindigkeit umfasst, während die internen Messungen sich auf das eigene Fahrzeug beziehen und z. B. die eigene Geschwindigkeit oder Beschleunigung misst.

	Ebene			Kategorie			Messung								Aktor				Anzeigeelemente			Horizontale Summe (Nur Messung, Aktor)	
	Navigations-	Führungs-	Stabilisierungs-	Kategorie A	Kategorie B	Kategorie C	extern			intern					Kommunikation	Bremsystem	Lenksystem	Licht	Optisch	Akustisch	Haptisch		
							Geschwindigkeit (Objekte)	Szene/Objekt	Abstand	Bremsdruck	Lenkwinkel	Geschwindigkeit/Raddrehzahl	Drehraten/Beschleunigung	Position									Bremshelbeweg
<b>Assistenzsystem</b>																							
Frontkollisionswarnung		X		X			X	X	X			X	X						X	X	X	5	
Schlaglochwarnung	X	X		X				X						X					X	X	X	3	
Bremsassistent			X		X				X		X	X		X		X						5	
Notbremsassistent			X		X		X	X	X	X	X	X			X				X	X	X	7	
Spurverlassenswarnung		X		X				X			X	X							X	X	X	3	
Spurhalteassistent		X			X			X		X	X	X				X			X	X	X	5	
Spurwechselassistent/ Totwinkel-Assistent/Digitaler Rückspiegel		X		X			X	X	X		X								X	X	X	5	
Ampel Assistent		X		X								X		X		X			X	X	X	3	
Einbiegen/ Kreuzenassistent		X		X			X	X	X		X	X	X	X		X			X	X	X	8	
Linksabbiegeassistent		X			X		X	X	X	X	X	X	X			X			X	X	X	8	
Adaptive Lichtverteilung		X			X						X	X	X					X				4	
Markierungslicht		X			X			X			X	X						X				4	
Variable Leuchtweitenregelung		X			X			X			X	X						X				4	
Blendungsfreies Fernlicht		X			X			X			X	X	X					X				5	
Antiblockiersystem			X			X			X			X	X			X						4	
Navigationsystem	X			X										X		X			X	X		2	
<b>Vertikale Summe</b>	<b>2</b>	<b>12</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>11</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>9</b>	<b>13</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	

Abbildung 4: Systematisierung im Überblick

In der Übersicht ist zusätzlich die vertikale und horizontale Summe der einzelnen Spalten und Zeilen dargestellt. Die vertikale Summe stellt dabei das Maß dar, wie häufig ein bestimmtes Kriterium (z. B. Kommunikation bei Aktoren) bei den Assistenzsystemen zum Einsatz kommt. Je höher die Zahl, desto häufiger kommt die Messung, der Aktor oder das Anzeigeelement in Assistenzsystemen zum Einsatz. Somit lässt sich erkennen, dass dieser/dieses Sensor/Aktor/-Anzeigeelement sehr häufig eingesetzt wird und damit die Möglichkeit besteht, ohne oder mit geringerem Mehraufwand weitere Assistenzsysteme zu realisieren. Die horizontale Summe wird lediglich über die Spalten „Messung“ und „Aktor“ gebildet. Diese Summe kann sehr gut als erstes Bewertungssystem für den Realisierungsaufwand herangezogen werden. Die Zahl drückt dabei die Summe der benötigten Sensor und Aktor Komponenten aus. Da Anzeigeelemente in erster Linie abhängig von der gewünschten Konfiguration bei der Realisierung sind, wurden diese nicht bei den Summen berücksichtigt, da abgesehen von Navigationssystemen stets alle drei Anzeigeelemente möglich sind bei warnenden Systemen. Ebenso muss berücksichtigt werden, dass Sensorkonfigurationen bei Assistenzsystemen sehr flexibel gestaltet werden können und ein umfangreicheres Sensorkonzept durch Sensorfusion in der Regel zu besseren Ergebnissen führt. Diese Übersicht stellt also lediglich ein Beispiel für eine Minimalrealisierung der Assistenzsysteme dar.

## 2.2. Potenzialbestimmung und Eignungsprüfung relevanter FAS für Elektrofahrräder (AP 1)

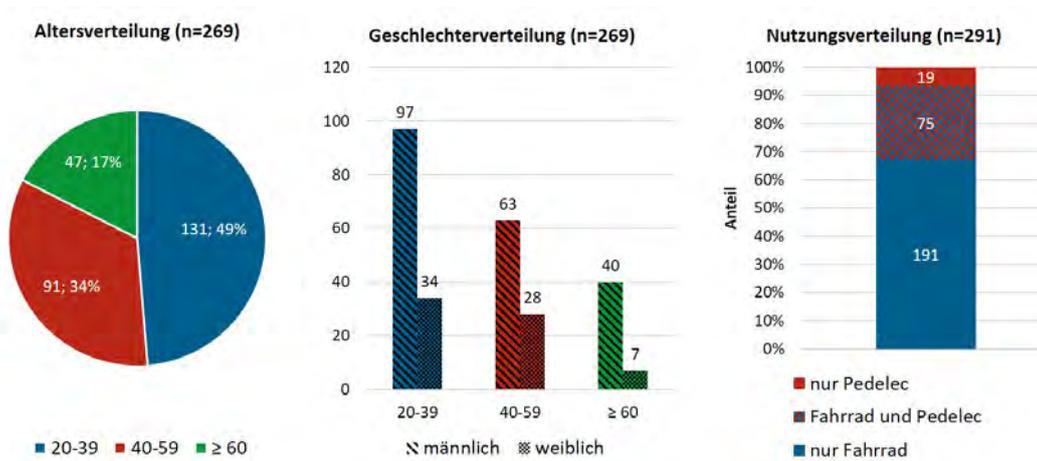
### 2.2.1. Nutzerstudie zu Fahrerassistenzsystemen (AP 1.3)

Essenziell für die Konzeption von sicherheitsorientierten Fahrerassistenzsystemen ist eine Nutzerstudie, um einerseits auf Erfahrungen und Eindrücke der Fahrrad- und Pedelecfahrer zurückgreifen, und andererseits die Erwartungen, Wünsche und Hemmnisse potenzieller Nutzer abschätzen zu können.

Dazu wurde eine bundesweite Onlineumfrage durchgeführt, um Nutzungsdaten zum Fahrrad und Pedelec, Unfalldaten und deren Ursachen sowie das Potenzial von Fahrerassistenzsystemen abzufragen. Zusätzlich wurde eine Telefonnummer auf Aushängen angegeben und die Möglichkeit angeboten, ein persönliches Interview durchzuführen, um auch Personen zu erreichen, die keinen Zugang zum Internet haben. Die Umfrage wurde mit Unterstützung der Verbände ADFC und ADAC, VCD und AGFK durch Aushänge und Rundmails sowie im Internet verbreitet. Die Befragung war zwischen Ende Januar und Ende April 2017 für einen Zeitraum von etwas länger als drei Monate online, insgesamt konnten so fast 300 Teilnehmer erreicht werden.

Der Fragebogen als gedruckte Version der Onlineumfrage ist in Anhang A.1 aufgeführt.

#### Grundgesamtheit



Innerhalb der drei Monate haben insgesamt 291 Menschen an der Onlineumfrage teilgenommen. Allerdings wurde nicht jede Frage von allen Teilnehmern beantwortet, wodurch sich teilweise unterschiedliche Anzahlen in der Auswertung verschiedener Fragen ergeben. Von allen Teilnehmern sind 94 Personen Pedelecbesitzer, 75 davon besitzen zusätzlich ein konventionelles Fahrrad. Die übrigen 191 Teilnehmer besitzen ausschließlich Fahrräder ohne Motor. Die Hälfte der Personen ist zwischen 18 und 39 Jahre alt (49%), ein Drittel zwischen 40 und 59 (34%). 17% der Teilnehmer waren Senioren über 60 Jahre. Drei Viertel der Teilnehmer sind männlich (74%), nur ein Viertel weiblichen Geschlechts. Diese Verteilung ist auch in den jeweiligen Altersklassen wiederzufinden.

## Nutzungsmuster

Um Unterschiede zwischen den Nutzungsmustern von Fahrrädern mit und ohne Elektromotor herauszufinden, wurden Fragen zum Zweck, zur Länge oder zur Häufigkeit der Fahrten gestellt. Im Ergebnis konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Nutzungsprofilen der Fahrräder und der Pedelecs festgestellt werden.

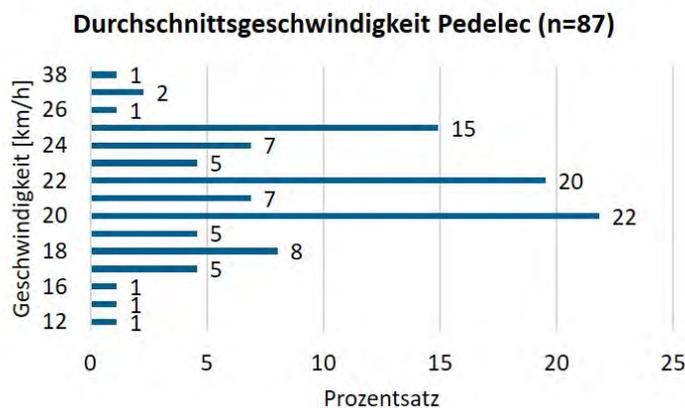
Alle Zweiräder werden vorwiegend (>60%) für Fahrten zur Arbeit bzw. zur Ausbildungsstätte genutzt. Des Weiteren sind Fahrten zum Einkaufen (>79%) und Fahrten zu Freizeitaktivitäten beliebte Einsatzzwecke. Leichte Unterschiede sind hier beim Einsatz als Sportgerät festzustellen. Während das Fahrrad für fast die Hälfte der Befragten als Sportgerät dient, wird das Pedelec dazu nur von weniger als 30% genutzt.

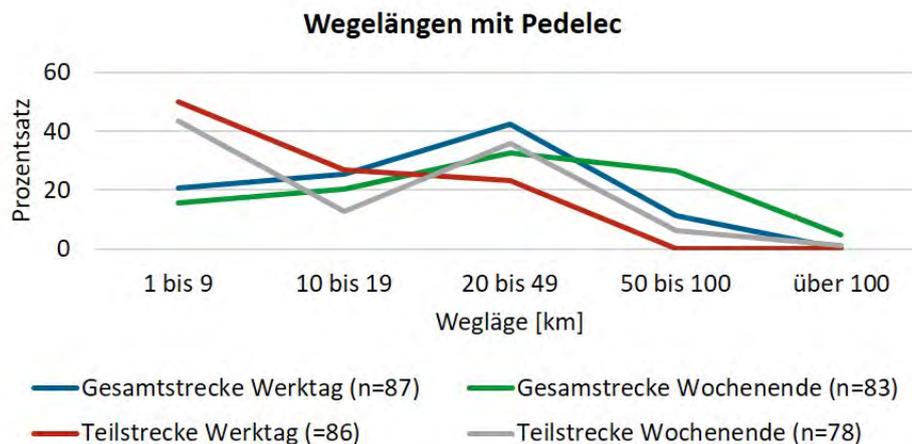
Die Teilnehmer der Befragung gaben an, die vorhandenen Fahrräder und Pedelecs unter der Woche regelmäßig zu nutzen. In diesem Zusammenhang zeigen die Ergebnisse, dass beide Arten zu 80% mindestens zweimal wöchentlich genutzt werden. Signifikante Unterschiede zwischen der Nutzung an Werk- und Wochenendtagen lassen sich dabei nicht erkennen.

Die Witterung hat nur geringen Einfluss auf die Nutzung. Bei Regen oder niedrigen Temperaturen entscheiden sich immer noch über die Hälfte der Befragten für das Fahrrad oder Pedelec. Bei besseren Witterungsbedingungen liegen die Nutzungsanteile bei nahezu 90%. Bei Schnee verzichten ca. zwei Drittel der Zweiradfahrer auf ihr Verkehrsmittel.

## Geschwindigkeiten

Da es bei der Nutzerstudie vorrangig um das Unfallgeschehen von Pedelecs geht, wurden allen Pedelecfahrern zusätzlich Fragen zur durchschnittlichen Geschwindigkeit und Wegelänge gestellt.





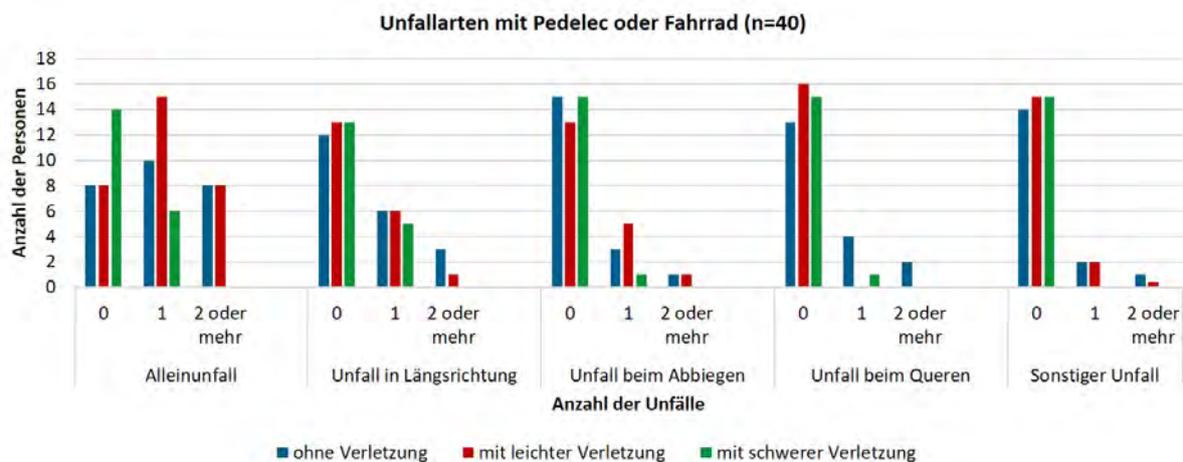
Es hat sich gezeigt, dass fast 80% der Befragten ihre Durchschnittsgeschwindigkeit auf über 20km/h schätzen. Ein Anteil von 20% schätzte seine Geschwindigkeit sogar auf mehr als 25km/h, was über der vom Elektromotor maximal unterstützten Grenze liegt.

Bei der Abfrage der Wegelängen wurde zwischen Werktag und Wochenende sowie jeweils zwischen der längsten Teilstrecke und den Tageskilometern unterschieden. Hier lassen sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Kategorien feststellen. Werktags fährt der größte Anteil zwischen 10 und 19 Tageskilometer (25%) bzw. zwischen 20 und 49 Tageskilometer (43%). Am Wochenende werden eher weitere Strecken gefahren. Der Anteil an Pedelecfahrern, der 50 bis 100km am Tag fährt, ist in dieser Gruppe ebenso hoch wie der, der zwischen 20 und 49km am Tag fährt (jew. ca. 30%). Bei den Teilstrecken lassen sich keine signifikanten Unterschiede feststellen. Sowohl werktags als auch am Wochenende sind die Teilstrecken der meisten Befragten weniger als 10km lang (>40%).

80% der Befragten nutzt das Pedelec schon seit mehr als sechs Monaten, die Hälfte seit mehr als zwei Jahren. Bei den Fahrten sind keine Vorlieben bestimmter Infrastrukturen festzustellen. Die Umfrage hat zwischen dem Fahren auf baulichen Radwegen, Radfahrstreifen, Schutzstreifen und dem Fahren auf der Fahrbahn unterschieden. Zudem wurden Waldwege, gemeinsame Rad- und Fußwege sowie auch nicht für Radfahrer freigegebene Gehwege integriert. Die Auswertung zeigt, dass alle legal mit dem Fahrrad oder Pedelec befahrbaren Wege zu etwa gleichen Anteilen auch genutzt werden.

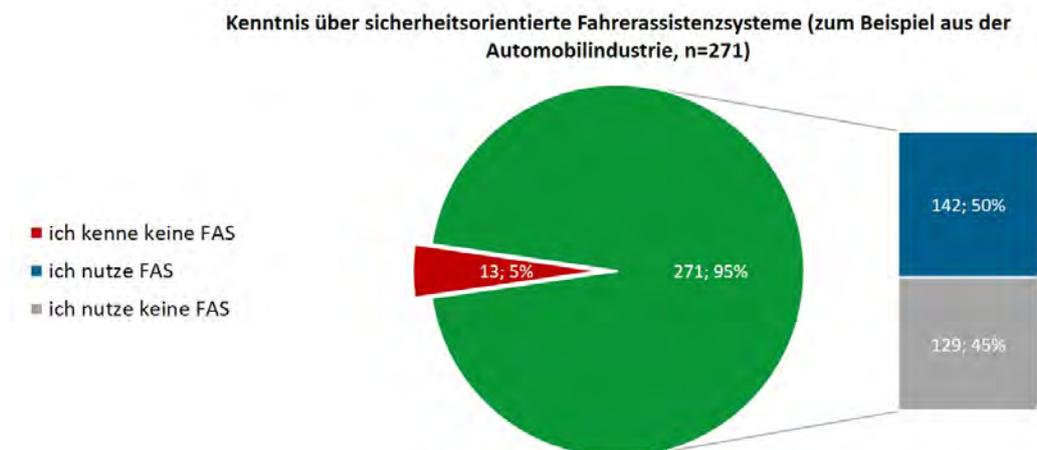
### Unfalldaten

Die Befragung hat ergeben, dass mehr als die Hälfte aller Teilnehmer in ihrem Leben mindestens einmal einen Unfall auf dem Zweirad hatte (54%). 40 Teilnehmer haben genauere Angaben zu den Unfallursachen gemacht. 32 davon (80%) gaben an, dass sie jemals mindestens einen Alleinunfall hatten. Als häufigste Unfallursache wurde zu 25% rutschiger bzw. nicht griffiger Untergrund genannt. Zu jeweils 19% wurden ebenfalls querende sowie abbiegende PKWs oder Hindernisse im Weg aufgeführt. Die verbleibenden 37% haben andere oder keine Ursachen angegeben.



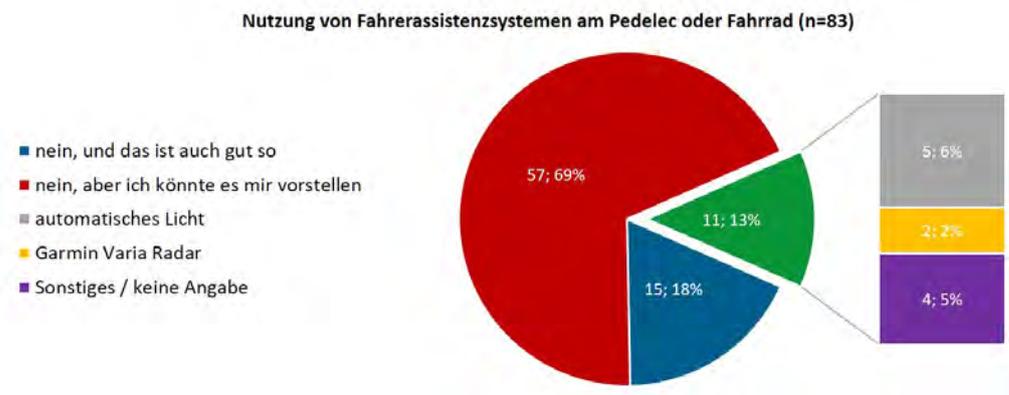
Zur Klassifizierung wurden fünf Unfallkategorien mit jeweils drei Untergruppen zur Unfallschwere gebildet. Die Kategorien unterscheiden zwischen Alleinunfällen, Unfällen in Längs- bzw. Fahrtrichtung, Unfällen beim Abbiegen und beim Queren sowie sonstige Unfälle. Ebenso wurde in schwere, leichte und keine Verletzung untergliedert. Als leichte Verletzung wurden Schürfwunden und Prellungen, als schwere Knochenbrüche, Gehirnerschütterungen und innere Verletzungen definiert. Die häufigste Unfallart ist demnach der Alleinunfall, zu gleichen Teilen ohne und mit leichter Verletzung. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Ergebnissen der Literaturstudie. Im Gegensatz zum (inter-)nationalen Vergleich kamen schwere Verletzungen bei Alleinunfällen unter den Befragten nicht vor. Am zweit- und dritthäufigsten sind Unfälle in Fahrtrichtung und beim Abbiegen. Hier traten neben leichten auch vermehrt schwere Verletzungen auf.

#### Kenntnisstand zu Fahrerassistenzsystemen



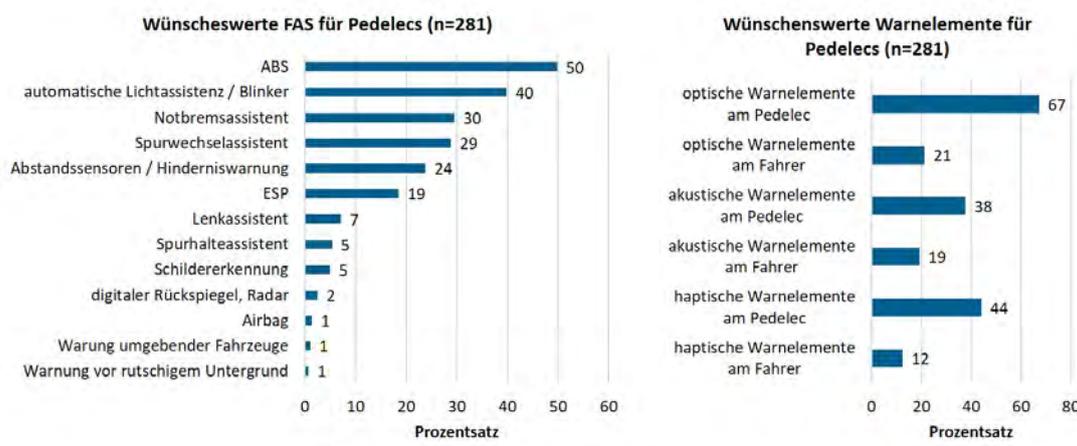
95% der Teilnehmer kennt mindestens ein sicherheitsorientiertes Fahrerassistenzsystem (FAS). Das hat die Befragung nach einzelnen bereits in der Automobilindustrie existierenden Systemen ergeben. Zu etwa gleichen Teilen (jew. ca. 15%) gaben die Befragten an, automatische Lichtassistenten, Abstands- und Hinderniswarnsensoren, den Notbremsassistenten, die Müdigkeitserkennung, den Spurhalte- sowie -wechselsassistenten zu kennen. Ungefähr die Hälfte der Personen, die Assistenzsysteme kennen, nutzt mindestens eins davon bereits aktiv im Fahrzeug. Jeweils knapp ein

Drittel nutzt den Lichtassistenten und/oder Abstands- und Hinderniswarnsensoren. Die übrigen genannten technischen Hilfssysteme wurden zu geringeren Anteilen von jeweils 5-10% genannt.



Die Frage nach der Nutzung von FAS am Fahrrad oder Pedelec konnten nur 13% positiv beantworten. Das am meisten genannte System ist auch hier der automatische Lichtassistent. 87% der Befragten nutzen keine FAS am Rad. 20% davon könnten sich die Nutzung auch nicht vorstellen und sind zufrieden ohne technische Hilfe.

#### Nutzerwünsche zu Fahrerassistenzsystemen



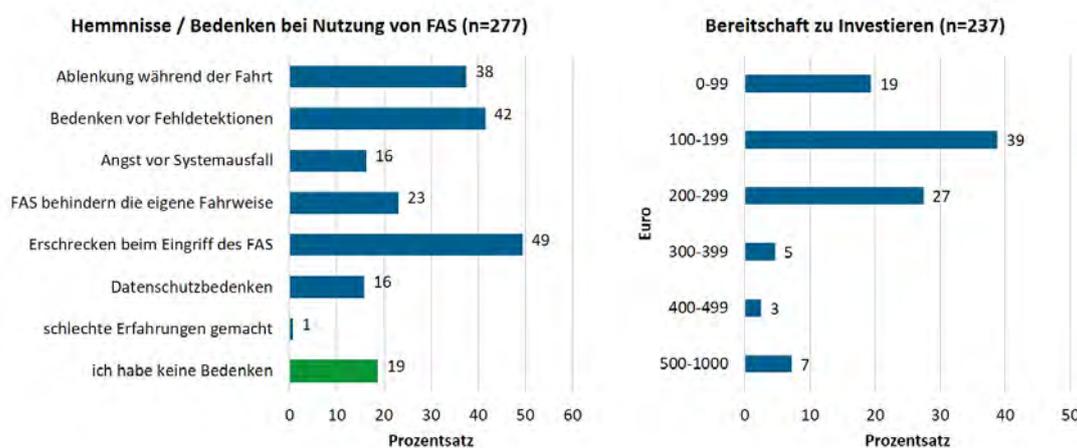
Den Personen, die angegeben haben, bereits FAS im Fahrzeug oder am Zweirad zu nutzen, wurde eine Frage zur Beurteilung der Systeme gestellt. Jeweils über 70% gaben an, FAS als gut und nützlich zu beurteilen. Nur 2% empfinden FAS als störend.

Alle Teilnehmer wurden gefragt, welche Assistenzsysteme sie als wünschenswert für den Einsatz an Pedelecs ansehen. Mit 50% der Antworten wurde das ABS (Antiblockiersystem) am häufigsten genannt. Ebenfalls häufige Nennungen erhielten der automatische Lichtassistent (40%), der Notbrems- (30%) und der Spurwechselassistent (29%) sowie die Abstands- und Hinderniswarnung (24%) und das ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm, 19%). Die Teilnehmer konnten angeben, wie sie sich am ehesten vorstellen könnten, von FAS gewarnt zu werden. Dabei wurde bei den Antwortmöglichkeiten zwischen der Anbringung des Warnelements am Pedelec und am Fahrer und in die drei Kategorien der optischen, akustischen und haptischen Elemente unterschieden. Eine deutliche Mehrheit stimmte jeweils für Warnelemente am Pedelec selbst. Dabei

erhielten optische Warnelemente am Pedelec zwei Drittel der Stimmen, akustische 38% und haptische 44%.

Ebenso wie nach den Gründen dafür, wurde auch nach Hemmnissen und Bedenken zu FAS gefragt. Keine Hemmnisse haben 20% der Befragten. Fast die Hälfte der Befragten gab an, dass sie Angst vor Erschrecken beim Eingriff des FAS während der Fahrt hätten. Jeweils ca. 40% hat Bedenken vor Fehldetektionen oder Ablenkung. 23% gaben an, dass FAS ihre eigene Fahrweise behindern könnte. Für die Nutzung von FAS entscheiden würde sich ein Großteil der Befragten, wenn das System abschaltbar ist, wenn es bei umfangreichen Feldtests fehlerfrei funktioniert hat und in jeder Situation gleich gut reagiert.

### Hemmnisse und Investitionsbereitschaft



Der Großteil der Rad- und Pedelecfahrer wäre bereit, mehr als 100 Euro in ein sicherheitsorientiertes Fahrerassistenzsystem zu investieren. Dabei gaben 40% an, bis zu 200 Euro bezahlen zu wollen, 27% bis zu 300 Euro. 8% der Befragten wären bereit, bis zu 500 Euro und 7% sogar bis zu 1.000 Euro in ein FAS zu investieren. 20% würden maximal 100 Euro ausgeben.

Bei der Anschaffung eines Pedelecs legt die Mehrheit der Befragten Wert auf die Wertigkeit der Bauteile und Komponenten, auf den Fahrkomfort sowie auf die Antriebsart und Reichweite.

### 2.2.2. Potenzial von Fahrerassistenzsystemen anhand des Unfallgeschehens und der Systemausführung (AP 1.4)

Im Folgenden wird, basierend auf der Systematisierung der Fahrerassistenzsysteme das Potenzial von Fahrerassistenzsystemen für Pedelecs betrachtet. Um eine Potenzialbestimmung für Assistenzsysteme durchzuführen, müsste neben einer Betrachtung des Unfallgeschehens eine genaue Analyse von existierenden Assistenzsystemen mit deren konkreter Realisierung (Systemgrenzen, Umfelderkennung, Anzeigeelementen und Warnstrategien) durchgeführt werden. Da diese Systeme für ein Pedelec jedoch nicht vorhanden oder lediglich experimentell (ohne Details zur Realisierung) umgesetzt wurden, kann dies nicht mit dem benötigten Detailgrad durchgeführt werden. Stattdessen wird die Potenzialbestimmung für die Realisierung basierend auf den Ergebnissen und Erfahrungen die während der Projektlaufzeit durch Testfahrten mit dem Prototypen, der Nutzerbefragung und der Probandenstudie gesammelt wurden durchgeführt und sollen eine erste Einschätzung für die technische Realisierung sowie deren Nutzerakzeptanz liefern.

Um eine Potenzialbestimmung durchzuführen, müssen die FAS in Bezug gesetzt werden zum Unfallgeschehen bei Pedelecs. Um eine möglichst genaue Potenzialbestimmung durchzuführen, bietet sich vor allem eine Betrachtung des konkreten Unfallgeschehens an und ein Vergleich mit einem fiktiven Fahrzeug, welches ein bestimmtes Assistenzsystem in der gleichen Unfallsituation nutzt ("Was wäre wenn..."Methode) [HKBL11]. Hierbei wird die Konfliktsituation simulativ für das fiktive Fahrzeug mit FAS durchgeführt und betrachtet, ob der Unfall verhindert oder positiv beeinflusst werden kann (z. B. deutlich reduzierte Aufprallgeschwindigkeiten). Auf diese Weise lässt sich ein theoretisches Sicherheitspotenzial für jedes Assistenzsystem mit Bezug auf bestimmte Unfalltypen ermitteln.

Das Problem einer solchen Potenzialbestimmung ist, dass hierfür äußerst detaillierte Informationen über einen Unfallhergang vorhanden sein müssen, um diesen simulativ zu rekonstruieren. Weiterhin müssen ein umfangreicher Datenbestand und Beispielrealisierungen von zu beurteilten Assistenzsystemen vorhanden sein, damit die Ergebnisse aussagekräftig sind. Hieraus entsteht die Problematik, dass für Pedelecs zum Zeitpunkt der Projektdurchführung noch keine Unfalldaten mit der benötigten Informationstiefe in ausreichendem Umfang verfügbar sind, um eine solche Methodik durchzuführen.

Um dennoch eine Potenzialbestimmung durchführen zu können, muss eine alternative Methodik eingesetzt werden. Betrachtet man den generellen Ablauf eines Unfalls, so lässt sich dieser in mehrere Phasen aufteilen [WHLS15]. Eine solche Aufteilung ist in Abbildung 5 dargestellt. Phase 1 entspricht der normalen Fahrt, in welcher zunächst keine unmittelbare Konfliktsituation für den Fahrer erkennbar ist, jedoch bereits erste Anzeichen vorhanden sein können. In Phase 2 ist die Konfliktsituation aufgetreten und es entsteht ein Reaktionsfenster, in welchem der Fahrer die Möglichkeit hat, durch richtige Aktionen eine drohende Kollision oder einen Sturz zu verhindern und so die Konfliktsituation aufzulösen. Phase 3 beschreibt das Zeitfenster unmittelbar vor einer Kollision oder einem Sturz. Hier besteht lediglich noch die Möglichkeit, die Folgen des Sturzes oder der Kollision zu verringern. In Phase 4 tritt die eigentliche Kollision bzw. der Sturz auf. In Phase 5 haben alle Unfallbeteiligten ihre Endposition erreicht und etwaige Rettungsmaßnahmen werden eingeleitet. Unter den jeweiligen Phasen sind zusätzlich die Kategorien der relevanten Assistenzsysteme angegeben. Hierbei sind Systeme der Kategorie A hauptsächlich in Phase 1 und Phase 2 im Einsatz, um dem Fahrer frühzeitig Informationen über die Konfliktsituation zu liefern und so den Unfall zu verhindern. In Phase 2 werden zusätzlich Systeme der Kategorie B aktiv, welche in die Längs- und Querdynamik eingreifen und gleichzeitig den Fahrer informieren und so das Zeitfenster für eine korrekte Aktion des Fahrers verlängern. In Phase 3 sind Systeme

der Kategorie B und insbesondere Notfallsysteme der Kategorie C im Einsatz, um die Unfallfolgen so weit wie möglich zu verringern, da hier das Reaktionsvermögen eines Fahrers zumeist nicht ausreicht, um der Situation entsprechend bestmöglich zu agieren. In Phase 4 können lediglich noch Systeme der Kategorie C genutzt werden, um möglichst schnell zum Stillstand zu kommen. Dies trifft jedoch hauptsächlich auf LKW/PKW zu, da bei Zweirädern in der Regel nach einer Kollision direkt ein Sturz erfolgt oder bei geringen Geschwindigkeiten der Stillstand erreicht ist. In Phase 5 sind Systeme der Kategorie A, wie die Unfallerkennung, aktiv, um entsprechend einen Notruf abzusetzen.

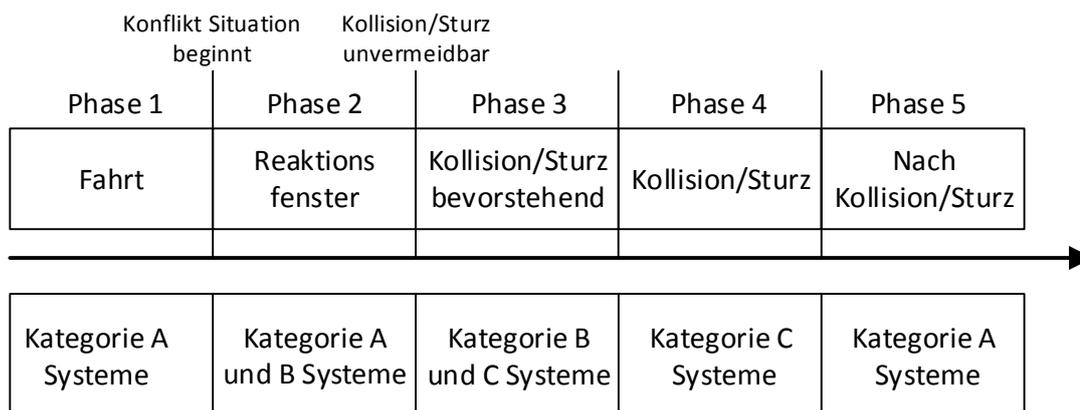


Abbildung 5: Unfallablauf

An diesem Ablaufschema ist zu erkennen, dass besonders in den ersten beiden Phasen, welche einen Unfall vermeiden können, das größte Potenzial besteht. Daraus ergeben sich die beiden wichtigsten Kriterien für die Bestimmung des Potenzials. Dies sind die Umfelderkennung sowie die Anzeigeelemente. Je besser eine Umfelderkennung ist, desto früher und genauer kann eine potenzielle Konfliktsituation erkannt werden und ein besserer Handlungsvorschlag an den Fahrer übermittelt werden. Zudem sind die Anzeigeelemente relevant, da diese bestimmen, ob die Reaktion des Fahrers rechtzeitig und korrekt entsprechend der jeweiligen Konfliktsituation ausfällt. Um diese zu bewerten, wird ein Punktesystem verwendet, welches in Tabelle 5 mit den jeweiligen Bewertungskriterien abgebildet ist. Bei der Bewertung für die Anzeigeelemente werden je nach genutzten Anzeigeelementen (optisch, haptisch oder akustisch) Punkte vergeben. Die Anzahl der Punkte stellt hierbei einen Vorgriff auf die Ergebnisse der innerhalb des Projektes durchgeführten Nutzerbefragung und Probandenstudie dar, welche in Kapitel 2.2.1 und 2.5.1 ausführlich betrachtet werden. Akustische und haptische Anzeigen wurden am besten bewertet, während bei der optischen Warnung zwei Varianten eingesetzt wurden. Hierbei wurde eine gewerbliche am Lenker verbaute Variante als gut und eine Variante über das Smartphone als weniger gut bewertet. Akustische und haptische Warnungen werden mit der vollen Punktzahl bewertet, da diese von den Nutzern aufgrund ihrer Wirkungsweise, sie lenken nicht vom Fahrbahngeschehen ab, als positiv bewertet wurden. Die optische Warnung wird mit einem Punkt bewertet, da diese oft als nicht unbedingt notwendig empfunden wurde bzw. die Aufmerksamkeit vom Fahrbahngeschehen ablenken kann. Diese Bewertung stellt hierbei eine erste Tendenz dar, jedoch muss das Thema Anzeigeelemente an Fahrrädern noch umfangreicher untersucht werden, um z. B. mehrstufige

Warnungen über unterschiedliche Sinneskanäle zu bewerten oder auch unterschiedliche Ausführungen der jeweiligen Anzeigeelemente auf deren Wirksamkeit hin zu prüfen.

Bei der Umfelderkennung wird nach Erfassung von Objekten und Verkehrsteilnehmern unterschieden. Hierbei wird jeweils angenommen, dass Objekte in einem Winkel von  $180^\circ$  erkannt werden, sodass auch Objekte neben dem Fahrzeug erfasst werden. Daraus ergibt sich eine maximale Punktzahl für Systeme, die eine Rundumerfassung mit einem Winkel von  $360^\circ$  zulassen. Systeme welche lediglich über Kommunikation verfügen, verfügen prinzipiell über dieselben Eigenschaften wie eine  $360^\circ$  Erfassung, jedoch nur wenn alle anderen Verkehrsteilnehmer ebenfalls über Kommunikation verfügen, daher wird hier lediglich ein Punkt vergeben. Es ist jedoch anzumerken, dass diese bei entsprechender Verbreitung das höchste Potenzial besitzen.

Punkte	0	1	2
<b>Anzeigeelemente</b>	Keine Anzeige	Optisch	Akustisch und/oder Haptisch
<b>Umfelderfassung</b>	keine	Objekte/ Verkehrsteilnehmer in Fahrtrichtung <b>oder</b> V2x Kommunikation <b>oder</b> rückwärtiger Richtung	Objekte/ Verkehrsteilnehmer in Fahrtrichtung sowie in rückwärtiger Richtung

Tabelle 5: Bewertungsschema

Neben diesen Eigenschaften ist für das Potenzial vor allem das Unfallgeschehen relevant. Hierzu wird die Statistik der Verkehrsunfälle (2015) des Statistischen Bundesamtes [Sta16] genutzt, um ein Kriterium zu entwickeln, welches das Potenzial eines FAS im Bezug auf konkrete Unfallursachen darstellt. Die Statistik führt die Ursachen von Unfällen auf. Dabei kann einem Unfall eine Kombination von bis zu acht Ursachen zugeordnet werden. Diese Ursachen werden in allgemeine Ursachen unterteilt wie Witterungsverhältnisse, Sichtverhältnisse und Hindernisse sowie personenbezogene Fehlverhalten wie zu schnelles Fahren oder Vorfahrtsmissachtung. Um hieraus ein Kriterium zu entwickeln, werden sämtliche Ursachen mit der Funktionsweise und der Umfelderkennung der Assistenzsysteme verglichen, um abzuleiten, welche Ursachen ermittelt werden können, sodass auf einen potenziellen Unfall eingewirkt werden kann. In Tabelle 6 und 7 sind die relevanten Unfallursachen für Fahrräder aufgelistet. Dabei wurden Ursachen wie Alkohol oder Drogeneinfluss nicht mit einbezogen.

Unfallursachen	Prozentualer Anteil	Anzahl der Unfälle
Andere Fehler beim Fahrzeugführer	27,14%	16711
Alleinunfälle	22,98%	14147
Benutzung der falschen Fahrbahn (auch Richtungsfahrbahn) oder verbotswidrige Benutzung anderer Straßenteile	14,34%	8826
Nicht angepasste Geschwindigkeit in anderen Fällen	6,29%	3873
Fehler beim Einfahren in den fließenden Verkehr z.B. aus einem Grundstück, von einem anderen Straßenteil oder Anfahren vom Fahrbahnrand	5,8%	3569
Verstoß gegen das Rechtsfahrgebot	4,13%	2540
Nichtbeachten der die Vorfahrt regelnden Verkehrszeichen	3,26%	2009
Fehler beim Abbiegen	2,83%	1742
Ungenügender Sicherheitsabstand	2,75%	1690
Nichtbeachten der Regel "rechts vor links"	2,41%	1484
Nichtbeachten der Verkehrsregelung durch Polizeibeamte oder Lichtzeichen	1,92%	1183
Falsches Verhalten gegenüber Fußgängern an anderen Stellen	1,91%	1175
Sonstige Fehler beim Überholen (z.B. ohne genügenden Seitenabstand)	0,82%	505
Überholen trotz unklarer Verkehrslage	0,37%	228
Nichtbeachten der Beleuchtungsvorschrift	0,36%	224
Nebeneinanderfahren, fehlerhafter Wechsel des Fahrstreifens beim Nebeneinanderfahren oder Nichtbeachten des Reißschlussverfahrens	0,4%	222
Unzulässiges Rechtsüberholen	0,31%	193
Fehler beim Überholtwerden	0,3%	182
Unzureichend gesicherte Ladung oder Fahrzeugzubehöerteile	0,2%	125
Nichtbeachten der Vorfahrt durch Fahrzeuge, die aus Feld- und Waldwegen kommen	0,2%	123
Falsches Verhalten gegenüber Fußgängern an Fußgängerfurten	0,2%	122
Nichtbeachten des Vorranges entgegenkommender Fahrzeuge beim Vorbeifahren an haltenden Fahrzeugen, Absperrungen oder Hindernissen	0,13%	81
Falsches Verhalten gegenüber Fußgängern an Haltestellen (auch haltenden Schulbussen mit eingeschaltetem Warnblinklicht)	0,12%	73
Überholen trotz Gegenverkehrs	0,09%	59
Fehler beim Wiedereinordnen nach rechts	0,09%	56
Fehler beim Wenden oder Rückwärtsfahren	0,09%	56
Überladung, Überbesetzung	0,09%	54
Falsches Verhalten gegenüber Fußgängern beim Abbiegen	0,07%	42
Nichtbeachten des Vorranges entgegenkommender Fahrzeuge	0,07%	41

Tabelle 6: Auszug aus der Unfallstatistik 1

<b>Unfallursachen</b>	<b>Prozentualer Anteil</b>	<b>Anzahl der Unfälle</b>
Nichtbeachten des Vorranges v. Schienenfahrzeugen an Bahnübergängen	0,06%	37
Falsches Verhalten gegenüber Fußgängern an Fußgängerüberwegen	0,05%	30
Starkes Bremsen des Vorausfahrenden ohne zwingenden Grund	0,04%	27
Überholen ohne Beachtung des nachfolgenden Verkehrs und/oder ohne rechtzeitige und deutliche Ankündigung des Ausscherens	0,04%	27
Nicht angepasste Geschwindigkeit mit gleichzeitigem Überschreiten der zulässigen Höchstgeschwindigkeit	0,04%	27
Nichtbeachten des nachfolgenden Verkehrs beim Vorbeifahren an haltenden Fahrzeugen, Absperrungen oder Hindernissen und/oder ohne rechtzeitige und deutliche Ankündigung des Ausscherens	0,04%	26
Nichtbeachten der Vorfahrt des durchgehenden Verkehrs auf Autobahnen oder Kraftfahrtstraßen	0,04%	26
Verkehrswidriges Verhalten beim Ein- oder Aussteigen, Be- oder Entladen	0,02%	13
Überholen trotz unzureichender Sichtverhältnisse	0,02%	11
Unzulässiges Halten oder Parken	<0,01%	2
Mangelnde Sicherung haltender oder liegengebliebener Fahrzeuge und von Unfallstellen sowie Schulbussen, bei denen Kinder ein- oder aussteigen	<0,01%	1
<b>Gesamtsumme</b>	61562	

Tabelle 7: Auszug aus der Unfallstatistik 2

Ursachen für Alleinunfälle werden in der Statistik nicht eigens aufgeführt. Da diese jedoch eine herausragende Rolle spielen, wurde hierfür eine Einordnung nach Ursachen aus [SW12] genutzt und auf die Anzahl der Alleinunfälle der Statistik angewendet. Die Einteilung in [SW12] basiert auf einer Befragung von Radfahrern in den Niederlanden, welche aufgrund eines Alleinunfalls medizinisch behandelt werden mussten. In Tabelle 8 sind die Ursachen, der prozentuale Anteil aus [SW12], sowie die entsprechend resultierende Anzahl an Unfällen bezogen auf die Statistik dargestellt.

Unfallursachen	Prozentualer Anteil	Anzahl der Unfälle
Abkommen von Straße und Kollision mit Randstein oder einem Hindernis abseits des Straßenrands	21,2%	2999
Wegrutschen eines Rades aufgrund eines glatten oder rutschigen Untergrunds	17,6%	2489
Sturz bei niedrigen Geschwindigkeiten wenn die Stabilisierung des Fahrrads am schwierigsten ist	15,6%	2206
Abrupte Lenkbewegungen (z.B. Bei Ausweichbewegung)	13%	1839
Kollision mit einem Hindernis	11,5%	1626
Kontrollverlust über das Rad aufgrund eines unebenen Untergrunds oder loser Objekte auf der Fahrspur (z.B. Steine)	6,8%	961
Fehler beim Bremsen	6%	848

Tabelle 8: Alleinunfälle

Bezüglich der Alleinunfälle ist erwähnenswert, dass hier von einer sehr großen Dunkelziffer ausgegangen wird, da sehr viele Alleinunfälle keine polizeiliche Aufnahme bzw. medizinische Behandlung nach sich ziehen und daher auch nicht in der Statistik auftauchen. Daher ist davon auszugehen, dass FAS in diesem Zusammenhang ein höheres Potenzial zur positiven Beeinflussung des Unfallgeschehens aufweisen, als dies aus der Statistik hervorgeht.

Um die Assistenzsysteme zu bewerten wird betrachtet, welche der Unfallursachen von einem FAS vorab erkannt werden können und dementsprechend darauf eingewirkt werden kann.

Hierzu ein Beispiel: Eine Frontkollisionswarnung mit Ursache „ungenügender Sicherheitsabstand“ kann aufgrund der Funktion, bereits bevor es zum Konflikt kommt, aus der Abstands- und Geschwindigkeitsmessung eine Warnung generieren und so den Unfall verhindern oder zumindest positiv beeinflussen. Nach diesem Schema werden sämtliche Ursachen, welche durch ein FAS beeinflusst werden können, zusammengezählt. Es wird dabei angenommen, dass die genutzte Sensorik eine perfekte Detektion bzw. Messung ermöglicht. Eine Übersicht der beeinflussbaren Unfälle ist in Tabelle 9 gegeben.

Assistenzsystem	Anzahl der beeinflussbaren Unfälle	prozentualer Anteil
Frontkollisionswarnung	11657	18,94%
Einbiegen/Kreuzenassistent	9334	15,16%
Notbremsassistent	7784	12,64%
Spurwechselassistent/Totwinkel-Assistent	4643	7,54%
Antiblockiersystem (ABS)	4298	6,98%
Spurverlassenswarnung	2999	4,87%
Spurhalteassistent	2999	4,87%
Verkehrszeichenerkennung	2009	3,26%
Linksabbiegeassistent	1783	2,9%
Schlaglochwarnung	961	1,56 %
Bremsassistent	848	1,38%
Adaptive Lichtverteilung	224	0,36%
Markierungslicht	224	0,36%
Variable Leuchtweitenregelung	224	0,36%
Blendungsfreies Fernlicht	224	0,36%
Navigationssystem	27	0,04%
Unfallerkennung	0	0%
Ampel Assistent	0	0%

Tabelle 9: Übersicht beeinflussbare Unfälle

Diese Betrachtung spiegelt lediglich das Unfallgeschehen wieder, jedoch muss berücksichtigt werden, dass auch die Wirkungsweise des Assistenzsystems eine erhebliche Rolle spielt, so kann eine Warnung durch den Fahrer ignoriert bzw. nicht wahrgenommen werden oder ein unerwarteter Eingriff seitens eines eingreifenden Systems am Pedelec zu einem Sturz führen. Ohne eine umfangreiche Untersuchung dieser Problemstellung lässt sich zu diesem Zeitpunkt die Wirkungsweise nicht quantitativ einbeziehen.

Assistenzsystem	Anzeigeelement	Umfelderfassung	Unfallgeschehen
Frontkollisionswarnung	1-2	1	18,94%
Einbiegen/Kreuzenassistent	1-2	1	15,16%
Notbremsassistent	1-2	1	12,64%
Spurwechselassistent/ Totwinkel-Assistent	1-2	1	7,54%
Antiblockiersystem (ABS)*	-	0	6,98%
Spurverlassenswarnung	1-2	0	4,87%
Spurhalteassistent	1-2	0	4,87%
Verkehrszeichenerkennung	1-2	1	3,26%
Linksabbiegeassistent	1-2	1	2,9%
Schlaglochwarnung	1-2	1	1,56%
Bremsassistent*	-	0	1,38%
Adaptive Lichtverteilung*	-	1	0,36%
Markierungslicht*	-	0	0,36%
Variable Leuchtweitenregelung*	-	1	0,36%
Blendungsfreies Fernlicht*	-	0	0,36%
Navigationssystem	1	0	0,04%
Unfallerkennung	1	1	0%
Ampel Assistent*	0	0	0%

Tabelle 10: Bewertung der FAS

Die Bewertung der Assistenzsysteme sind in Tabelle 10 zusammengefasst. Aufgrund der Konfigurierbarkeit der Anzeigeelemente ist in der Tabelle lediglich die mögliche Bepunktung abhängig davon angegeben, ob ein Anzeigeelement benötigt wird oder nicht. Eine besondere Betrachtung ist hierbei notwendig für Systeme, welche in der Tabelle durch \* gekennzeichnet sind. Dies liegt zum Teil an der Wirkungsweise des Assistenzsystems sowie der unzureichenden Detailtiefe der Statistik. Dem Ampel-Assistenten beispielsweise lassen sich keine konkreten Ursachen zuordnen, da dieser Assistent speziell zum Verhindern von Rotdurchfahrten und damit verbunden Unfällen gedacht ist und diese nicht gesondert in der Statistik aufgeführt sind. Ebenfalls zu bedenken gilt, dass einige Systeme lediglich passiv wirken wie Lichtassistent, ABS und Bremsassistent. Diese Systeme sind lediglich bewertbar durch eine konkrete Analyse von detaillierten Unfalldaten, da durch die passive Wirkungsweise prinzipiell auf jeglichen Unfall eingewirkt werden kann. Dies gilt besonders für Bremsassistent und ABS, welche in jeder Konfliktsituation bei einem Bremsmanöver den Unfall positiv beeinflussen können. Hier existieren bereits erste Realisierungen für ein Pedelec-ABS jedoch fehlen derzeit noch genauere Untersuchungen über deren Wirksamkeit. Daher lässt sich zu diesem Zeitpunkt keine belastbare Aussage über das Sicherheitspotenzial treffen.

### 2.2.3. Bewertung der Realisierbarkeit

Neben dem Sicherheitspotenzial spielt die Realisierbarkeit für die weitere Konzeption eine ausschlaggebende Rolle. Die Realisierbarkeit lässt sich hierbei anhand mehrerer Kriterien für Sensorik sowie Aktorik ableiten:

- Kosten
- Bauraum/Gewicht
- Energiebedarf
- Entwicklungsaufwand (Hardware)

Der Kostenpunkt stellt dabei stets ein wichtiges Kriterium dar, sowohl auf Seiten des Nutzers als auch auf Seiten des Herstellers. Bauraum/Gewicht sowie der Energiebedarf sind hierbei für die Fahrdynamik und die Reichweite eines Pedelecs von großer Bedeutung. Ein hohes Gewicht bzw. hoher Bauraum kann sich hier negativ auf das Fahrgefühl auswirken, da der Schwerpunkt des Fahrrads hierdurch verschoben wird. Ebenfalls führt ein hohes Gewicht zu einer Verringerung der möglichen Reichweite, da für die Trittunterstützung mehr Energie aufgewendet werden muss, um die gleiche Geschwindigkeit zu erreichen/beizubehalten. Der Energiebedarf der Sensorik/Aktorik wirkt sich ebenfalls direkt auf die Reichweite aus und sollte daher ebenfalls so gering wie möglich sein. Ein sehr wichtiges Bewertungskriterium für die Realisierbarkeit, in Bezug auf Sensorik und Aktorik in einem Pedelec ist der Entwicklungsaufwand, da bisher nur wenige Assistenzsysteme für Pedelecs existieren. Daher ist auch die entsprechend benötigte Aktorik nur in geringem Umfang, sofern überhaupt, vorhanden während die Sensorik dagegen meist aus anderen Anwendungsgebieten übernommen werden kann. Daraus ergibt sich ein Mehraufwand, um vorhandene Sensorik an den Einsatz im Fahrrad anzupassen. Bei der Entwicklung der Aktorik ergibt sich der Mehraufwand dahingehend, dass meist eine komplette Neuentwicklung des Systems erforderlich ist. Der hier betrachtete Entwicklungsaufwand bezieht sich an dieser Stelle auf die Hardware. Betrachtet man insbesondere die Auswertung der umfelderfassenden Sensoren (Radar, Lidar und Kamera) so bringen diese für den Einsatz im Pedelec einen erheblichen Mehraufwand bei der softwareseitigen Entwicklung mit sich, da grundlegende Erweiterungen zu den üblichen Verfahren notwendig sind. Diese sind jedoch in erster Linie Teil der Funktionsentwicklung für Assistenzsysteme und werden in Kapitel 2.7 betrachtet.

Das Bewertungsschema ist für Aktorik, Sensorik und Anzeigeelemente gleich, dargestellt in Tabelle 11. Eine hohe Punktzahl bedeutet hierbei, dass das System besser realisierbar ist.

Punkte	1	2	3
<b>Kosten</b>	Hohe Kosten	Mittlere Kosten	Geringe Kosten
<b>Bauraum/Gewicht</b>	Hoher Bauraumbedarf und Gewicht	Mittlerer Bauraumbedarf und Gewicht	Geringer Bauraumbedarf und Gewicht
<b>Energiebedarf</b>	Hoher Energiebedarf	Mittlerer Energiebedarf	Geringer Energiebedarf
<b>Entwicklungsaufwand (Hardware)</b>	Hoher Aufwand	Mittlerer Aufwand	Geringer Aufwand

Tabelle 11: Bewertungsschema Realisierbarkeit

Die Bewertung für die Sensorik ist in Tabelle 12 dargestellt.

	Kosten	Bauraum und Gewicht	Energiebedarf	Entwicklungsaufwand (Hardware)	Gesamt
<b>Raddrehzahl</b>	3	3	3	3	12
<b>Beschleunigung</b>	3	3	3	3	12
<b>Ultraschall</b>	3	3	2	3	11
<b>Bremspedalweg</b>	3	3	3	2	11
<b>Lenkwinkel</b>	3	3	3	2	11
<b>Bremsdruck</b>	3	2	3	2	10
<b>Kamera</b>	2	2	2	3	9
<b>Lidar</b>	1	2	2	3	8
<b>Radar</b>	1	2	2	3	8

Tabelle 12: Bewertung Sensorik

Bei der Sensorik sind Bauraum/Gewicht sowie Entwicklungsaufwand und Energiebedarf relativ gering. Dies liegt darin begründet, dass die Anforderungen für den Einsatz im PKW/LKW oder Kraftrad sehr ähnlich zu denen im Pedelec sind, sodass hier nur geringfügige Adaptionen an bereits verfügbaren Sensoren notwendig sind. Es ist anzumerken, dass in Pedelecs bereits einige Sensoren für beispielsweise Raddrehzahl oder Beschleunigung verbaut sind, sodass hier keinerlei Aufwand notwendig ist, sofern die geforderte Genauigkeit der Messung erreicht werden kann. Sensoren wie Bremspedalweg, Lenkwinkel und Bremsdruck haben einen etwas höheren Entwicklungsaufwand als die anderen genannten, da hier zusätzlich Befestigungen und Messbereiche geplant und umgesetzt werden müssen. Deutliche Unterschiede sind lediglich bei Kamera, Lidar und Radar vorhanden, welche einen vergleichsweise hohen Kostenaufwand und etwas höheren Energiebedarf haben aufgrund der technologischen Komplexität, hierbei jedoch auch die Basis für eine genaue Umfelderkennung darstellen. Da jedoch ein unvermindert großes Interesse in der Automobilbranche besteht, sind hier in Zukunft mit deutlichen Verbesserungen in der Technik als auch mit sinkenden Preisen zu rechnen.

Für die Aktorik ist die Bewertung in Tabelle 13 abgebildet.

	Kosten	Bauraum und Gewicht	Energiebedarf	Entwicklungsaufwand (Hardware)	Gesamt
<b>Kommunikation</b>	3	3	3	3	12
<b>Steuerbares Lichtsystem</b>	1	2	3	1	7
<b>Steuerbares Bremssystem</b>	1	2	2	1	6
<b>Steuerbares Lenksystem</b>	1	1	1	1	4

Tabelle 13: Bewertung Aktorik

Die Realisierung einer Kommunikationseinrichtung lässt sich problemlos umsetzen, da hier bereits vielfältige Lösungen bestehen wie beispielsweise das Nutzen des Mobilfunknetzes zum Übertragen von Daten an zentrale Einrichtungen oder lokale drahtlose Netzwerke zur Kommunikation mit Verkehrsteilnehmern oder Infrastruktur in näherem Umkreis. Für ein steuerbares Brems- oder Lenksystem hingegen ist ein erheblicher Entwicklungsaufwand notwendig, welcher entsprechende Kosten mit sich bringt. Dabei ist für das Bremssystem verglichen mit dem Lenksystem ein geringerer Bauraum, sowie Energiebedarf notwendig. Dies folgt daraus, dass für das steuerbare Lenksystem ein weiterer Elektromotor notwendig ist, welcher den Lenker bewegen kann und daher einen eigenen Aufbau am Lenker, sowie eine ausreichende Leistung für die Bewegung benötigt. Für ein steuerbares Lichtsystem hat man den Vorteil des geringen Energiebedarfs von LED Technologie. Der Kostenvorteil wird jedoch dadurch aufgegeben, dass für Lichtassistenzsysteme stets mehrere LED-Module eingesetzt werden, um die Lichtverteilung auf der Fahrbahn dynamisch anpassen zu können. Für das steuerbare Lichtsystem ist ebenfalls ein hoher Entwicklungsaufwand notwendig, da hier Konzepte von PKW/LKW nicht auf das Fahrrad übertragen werden können, aufgrund des deutlich anderen Fahrverhaltens (Neigung des Fahrrads oder abrupte Lenkerbewegungen). Mögliche Systeme aus dem Kraftradbereich wiederum haben deutlich höheren Bauraum und Energiebedarf, sodass auch diese nicht problemlos auf das Pedelec übertragen werden können.

Die Realisierung von Anzeigeelementen zeigt sich, ähnlich wie bereits die Realisierung der Sensorik und ist in Tabelle 14 abgebildet.

	Kosten	Bauraum und Gewicht	Energiebedarf	Entwicklungsaufwand (Hardware)	Gesamt
<b>Optisch</b>	3	3	3	3	12
<b>Akustisch</b>	3	3	3	3	12
<b>Haptisch</b>	3	3	3	3	12

Tabelle 14: Bewertung Anzeigeelemente

Die technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit von Anzeigeelementen ist problemlos möglich, da hier bereits eine Vielzahl an Elementen auf dem Markt verfügbar ist und sich einfach für den Einsatz im Pedelec adaptieren lassen. Beispiele für optische Anzeigeelemente mit geringem Bauraum, Energiebedarf und Entwicklungsaufwand wären Anzeigen basierend auf LED-Technik, welche bereits vielfältig genutzt werden. Für haptische und akustische Anzeigeelemente bietet die in Smartphones verbaute Technik bereits ein alltägliches Beispiel für die Verfügbarkeit von kostengünstigen, kleinen und energieeffizienten Elementen.

Es ist abschließend anzumerken, dass die hier dargestellte Bewertung auf den Recherchen im Zuge des Projektes sowie den Erfahrungen bei der Realisierung des Prototypens basieren und daher nicht die zukünftigen Entwicklungen auf dem Markt berücksichtigen bzw. verringerte Kosten die sich durch eine industrielle Fertigung ergeben können.

Zusammenfassend lässt sich hier erkennen, dass für Anzeigeelemente und Sensorik Bauraum/-Gewicht, Energiebedarf und der Entwicklungsaufwand gering oder mittel ausfallen. Lediglich die Kosten für Kamera, Lidar und Radar sind vergleichsweise hoch, bilden jedoch auch die Grundlage für die Umfelderkennung von FAS. Insgesamt lässt sich aus den bisherigen Ergebnissen erkennen, dass die Realisierung mehrerer Sensoren zur Zustandserfassung des Pedelecs sowie Anzeigeele-

mente, wie von den meisten FAS benötigt, technisch und wirtschaftlich möglich ist. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Kosten für die Sensorik zur Umfelderkennung insbesondere bei Mehrsensorkonzepten die Gesamtkosten deutlich erhöhen können. Bei der Aktorik ist lediglich eine Kommunikationseinrichtung problemlos zu realisieren. Steuerbare Systeme wie Licht, Bremssystem oder Lenksystem stellen dabei den größten Aufwand dar, da hier nicht auf vorhandene Lösungen zurückgegriffen werden kann, sondern komplette Neuentwicklungen notwendig sind. Diese Systeme sind daher mit erheblichem Zeit- und Kostenaufwand verbunden, was die Realisierbarkeit von unterschiedlicher Aktorik deutlich einschränkt.

## 2.3. Konzeption von FAS Komponenten AP(2)

### 2.3.1. Konzeption von Anzeige- und Bedienelementen (AP 2.1)

In diesem Kapitel werden generelle Betrachtungen und Anforderungen zur Konzeption von Anzeige- und Bedienelementen für Pedelecs vorgestellt, sowie ein kurzer Ausblick auf konkret realisierte Ausführungen für AP3.1 gegeben. Eine genaue Beschreibung sowie Abbildungen der realisierten Elemente finden sich in Kapitel 2.4 .

Da die Bewertung spezifischer Konzepte für Anzeige- und Bedienelemente eines der Hauptresultate von AP3.2 sind, wurde an dieser Stelle ein möglichst kostengünstiges und gleichzeitig flexibles Gesamtkonzept basierend auf den Anforderungen der einzelnen Komponenten erstellt und realisiert.

#### Anforderungen an Anzeigeelemente

Für die drei betrachteten Formen der Anzeigeelemente, optisch, haptisch und akustisch ergeben sich einige gemeinsame Anforderungen, wie eine wasserdichte Bauform, um Nässe zu widerstehen, sowie eine robuste Bauform, um den Vibrationen während des Fahrens zu widerstehen. Eine zusätzliche Anforderung für Systeme, welche den Fahrer informieren sollen, ist, dass die Bauform möglichst klein und leicht sein muss. Dies ist beispielsweise erkennbar, wenn eine Montage am Lenker vorgesehen wird, da durch den Bordcomputer, die Taster zur Einstellung der Unterstützungsstufe des Elektromotors, als auch die Fahrradklingel bereits ein großer Teil des Lenkers belegt ist. Ein weiterer sehr wichtiger Punkt bei der Konzeption von Anzeigeelementen für den Einsatz in Elektrofahrrädern ist, dass im Gegensatz zu PKW/LKW nicht nur der visuelle Sinneskanal stark beansprucht wird, sondern ebenfalls der auditive Sinneskanal durch die Nähe zum Verkehr sowie der haptische Sinneskanal durch Vibrationen.

#### Optische Anzeigeelemente

Für die optische Anzeige muss neben den bereits genannten Punkten, zusätzlich die Sichtbarkeit bei hellem Tages- oder auch Scheinwerferlicht gewährleistet sein. Zusätzlich muss bei optischen Anzeigen berücksichtigt werden, dass diese je nach Bauform einen unterschiedlichen Informationsgehalt haben können, so kann mittels eines Bildschirms eine deutlich komplexere Information dargestellt werden als beispielsweise mit einer Leuchtdiode. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Einbaulage der Anzeige, da diese maßgeblich die Nutzerakzeptanz als auch die Ablenkung/Wirksamkeit beeinflusst. Bereits die Ergebnisse der Nutzerstudie AP1.3 zeigen hier, dass generell eine geringere Akzeptanz gegenüber Anzeigeelementen am Fahrer besteht, während am Pedelec verbaute Anzeigeelemente als deutlich wünschenswerter empfunden wurden. Da Anzeigeelemente am Fahrer zusätzlich technisch schwer zu realisieren und entsprechend teuer sind, wurde für Anzeigeelemente generell eine Montage am Pedelec vorgesehen. Das Garmin Varia Fahrrad Radar ist bereits im Einsatz und verfügt hierbei über eine am Lenker montierte Anzeigeeinheit mit LED's als Anzeigeelement. Ergänzend für eigene Systeme wird zunächst ein Element mit Bildschirm realisiert zur Darstellung unterschiedlich komplexer Informationen. Konkret wird hier ein Smartphone eingesetzt, wodurch zusätzlich akustische Warnungen durch den Lautsprecher, sowie Bedienelemente für die einzelnen realisierten Fahrerassistenzsysteme einfach und kompakt umgesetzt werden können.

### Akustische Anzeigeelemente

Bei akustischen Anzeigeelementen ist insbesondere zu beachten, dass diese neben den Umgebungsgeräuschen (Verkehrslärm, Fahrgeräusche) klar und deutlich vom Fahrer wahrgenommen werden müssen. Auch hier gibt es unterschiedliche Ausführungen mit unterschiedlichem Informationsgehalt, beispielsweise ein einfacher Piepton oder eine gesprochene Warnung. Dabei hat Ersteres einen geringen Informationsgehalt, aber auch eine geringe Komplexität, während Zweitgenanntes einen hohen Informationsgehalt hat, aber ebenfalls eine hohe Komplexität sowie Dauer, was einen Einfluss auf die Reaktionszeit hat.

### Haptische Anzeigeelemente

Bei haptischen Anzeigeelementen kommt es hauptsächlich auf den Einbauort an und sollte sich an Stellen mit direktem Kontakt zum Fahrer befinden, sodass Vibrationen möglichst direkt und gut lokalisierbar sind. Dies sind insbesondere Sattel, Lenker und Pedale. Da die Pedale beweglich sind, ist hier eine Lösung nur schwer realisierbar und aufgrund des Schuhwerks sind Vibrationen an dieser Stelle in der Regel weiter gedämpft, was zusätzliche Probleme aufwirft. Eine Sattelmontage wäre realisierbar, hat jedoch ebenfalls aufgrund der Kleidung als auch dem Sattelmaterial eine gewisse Dämpfung und möglicherweise eine geringe Nutzerakzeptanz. Für die Realisierung des haptischen Anzeigeelements wurde jeweils ein Vibrationsmotor in die Lenkergriffe eingesetzt, wodurch die Lokalisierbarkeit der Vibrationen zusätzlich gegeben ist.

### Anforderungen an Bedienelemente

Auch für Bedienelemente gilt, dass diese möglichst kompakt und resistent gegen Nässe sind, sowie vor ungewollter Betätigung durch Vibration geschützt werden müssen. Hier wird jeweils ein mechanischer Schalter eingesetzt sowie der Touchscreen des Smartphones. Der mechanische Schalter wird genutzt, um beispielsweise die Blinker zu setzen, und geben durch das Einrasten und die mechanische Stellung direkt ein haptisches Feedback an den Fahrer, ohne das der Blick vom Verkehr abgewandt werden muss. Generell werden mechanische Schalter verwendet, wenn die Funktion während des Fahrens genutzt werden soll und nur eine minimale Ablenkung durch die Betätigung zulässig ist, dabei jedoch ebenfalls ein direktes Feedback (Schalter Position oder Betätigungszustand) für den Fahrer notwendig ist (durch Tastsinn). Das Smartphone als Bedienelement dient hauptsächlich zur Steuerung der Assistenzfunktionen (Ein- und Ausschalten oder Parameter einstellen) und Darstellung von Statusinformationen und ist für Nutzung während des Stillstandes gedacht. Durch das Display können direkt, interaktiv und verständlich die komplexeren Bedienmöglichkeiten des FAS erklärt werden.

### 2.3.2. Konzeption von Sensoren- und Aktoren (AP 2.2)

#### Anforderungen an Sensoren

Für Sensorik am Fahrrad gelten ebenfalls die bereits unter AP2.1 genannten Anforderungen an Vibrations- und Witterungsresistenz. Da Sensorik physikalische Größen messen, ist hierdurch in den meisten Fällen bereits prinzipbedingt der Einbauort und die Einbaulage festgelegt bzw. deutlich eingeschränkt (Bsp. Lenkwinkelsensor am Steuerrohr des Pedelecs) ebenfalls sind Sensoren in der Regel in sehr kleinen Formfaktoren erhältlich und haben daher einen geringen Bauraumbedarf. Im Zuge von AP1.4 wurde bereits eine Aufstellung der gängigen Sensoren für den Einsatz in Fahrerassistenzsystemen aufgestellt sowie deren Realisierbarkeit bewertet.

Die ersten selbst realisierten Assistenzsysteme welche Sensorik benötigen, sind die Frontkollisionswarnung sowie eine Spurverlassenswarnung. Das Pedelec verfügt hierbei bereits über einen Geschwindigkeitssensor und wird daher direkt eingesetzt. Als zusätzliche Sensorik wurde ein Lidar Sensor für die Abstandsmessung und eine Kamera zur Szeneerfassung für die grundlegende Realisierung der genannten FAS hinzugefügt. Als weitere Sensorik zur Verbesserung der FAS Funktionen und besseren Evaluation wurde ein Lenkwinkelsensor zur Erfassung des Lenkwinkels, ein Beschleunigungssensor sowie GPS zum Pedelec hinzugefügt. Weitere Sensorik ist in Form des Smartphones zusätzlich vorhanden und abhängig vom verwendeten Modell (Temperatur, Accelerometer, Proximitysensor,...) diese werden jedoch gegenwärtig noch nicht einbezogen, könnten jedoch für Weiterentwicklungen und Optimierungen der Assistenzfunktionen eingesetzt werden.

#### Anforderungen an Aktoren

Auch für Aktoren ist die höchste Priorität die Vibrations- und Witterungsresistenz. Wie bereits unter AP1.4 diskutiert sind die meisten Aktoren für den Einsatz im Pedelec sehr schwer realisierbar aufgrund ihrer Komplexität und müssen von Grund auf neu konzipiert werden und sind somit noch ein offenes Forschungsfeld. Anforderungen ergeben sich in erster Linie aus der Lage der Komponenten, so muss Querführungsaktorik am Steuerrohr angebracht werden. Bei einem hydraulischen Bremssystem beispielsweise lässt sich die Aktorik flexibler unterbringen, während bei einem über einen Seilzug funktionierenden Aktor diese am besten auf den Bremshebel selbst wirkt, um gleichzeitig dem Fahrer Feedback über die Aktivierung zu liefern. In beiden Fällen müssen hier Wirkbereiche für Bremsdruck bzw. Lenkmomente für das jeweilige Pedelec und den Fahrer untersucht und festgelegt werden.

Basierend auf den Ergebnissen der Nutzerstudie AP1.3 wurde der Fahrtrichtungsanzeiger als zweit häufigst gewünschtes Assistenzsystem genannt und aufgrund der vergleichsweise guten Realisierbarkeit für das Pedelec entwickelt.

### 2.3.3. Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Realisierung (AP 2.3)

Eine generelle Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit für einzelne Komponenten wurde bereits im Zuge von AP1.4 erstellt. An dieser Stelle soll eine Betrachtung der für die Realisierung der konkreten FAS benötigten Komponenten durchgeführt werden, unter Berücksichtigung der in der Konzeption aufgeführten Anforderungen. Da die technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit auch eng mit den Vorstellungen und der Akzeptanz der Nutzer einhergeht, werden hier weitere Ergebnisse im Zuge der Evaluation gewonnen und an entsprechender Stelle ergänzt.

Die technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit unterscheidet sich sehr stark abhängig von den betrachteten Komponenten. Bedien- und Anzeigeelemente sind aufgrund ihres Einsatzes in vielen Sparten (Automobil, Industrie, Installation) sowie dem Einsatz in rauen Umgebungen (Bedien- oder Anzeigeelemente für Maschinen in Fertigungsanlagen) in sehr vielen Bauformen sowie in hohen Stückzahlen verfügbar. Dies führt dazu, dass diese Elemente auch als Einzelstück kostengünstig im Projekt eingesetzt werden können. Das Hauptproblem sind hier insbesondere der geringe Platz am Lenker des Fahrrads und die mitunter umfangreichen Möglichkeiten zur Steuerung der Assistenzfunktionen, welche letztlich zu viel Bauraum beanspruchen würde. Zusätzlich benötigt jedes dieser Elemente eine Spannungsversorgung (verringerte Batterielaufzeit) und entsprechende Signalverarbeitung, welche zusätzlichen Verkabelungsaufwand und somit unerwünschtes Gewicht und weitere Platzprobleme mit sich bringen, neben der erhöhten Komplexität für den Nutzer.

Um diese Probleme zu umgehen, wird ein Ansatz über das Smartphone gewählt. Aus technischer Sicht hat die Nutzung des Smartphones erhebliche Vorteile, da dieses bereits sämtliche Arten an Anzeigeelementen wie Lautsprecher, Display und Vibrationsalarm mit sich bringt, wobei der Vibrationsalarm aufgrund der Positionierung für das Projekt nicht weiter relevant ist. Durch die grafische Oberfläche des Touchdisplays wiederum können Bedienelemente einfach und flexibel gestaltet und angepasst werden, sodass das Nutzerfeedback über die Gestaltung der Bedienoberfläche auch nachträglich, einfach umgesetzt werden kann. An dieser Stelle sei ebenfalls noch erwähnt, dass die Sensorik des Smartphones ebenfalls eingesetzt werden kann, um weitere Funktionen zu realisieren oder zu verbessern. Ebenfalls bietet das Smartphone durch den mobilen Zugang zum Internet weitere Einsatzmöglichkeiten und Forschungsaspekte für zukünftige Erweiterungen. Der Nachteil des Smartphones liegt in der Komplexität des Gesamtkonzeptes, hierbei vor allem in der Software und der (Drahtlos-)Kommunikation zwischen Smartphone und Steuergerät des Assistenzsystems, da hier eine höhere Einstiegshürde besteht (z. B. App Entwicklung in Java für Smartphone, C/C++/Python Programm auf Steuergeräten) im Vergleich zu einem System mit mechanischen Bedienelementen bzw. simpleren Anzeigeelementen wie LEDs, 7 Segment Anzeigen oder Summern/Buzzern. Die mechanische Realisierbarkeit ist dagegen lediglich auf eine Fahrradhalterung für das Smartphone beschränkt, welche bereits für 10€ erhältlich sind.

Auch aus wirtschaftlicher Sicht ist es sinnvoll auf ein Smartphone zurückzugreifen. Im Jahr 2017 verfügten knapp 95,5% [Sta17] der privaten Haushalte über mindestens ein Mobiltelefon (Smartphone, Handy). Somit ist anzunehmen, dass durch das Nutzen eines Smartphones die Gesamtkosten des Systems für den Nutzer deutlich verringert werden und somit auch die Nutzerakzeptanz steigt. Ebenfalls entfallen die zusätzlichen Kosten, welche für Verkabelung und Steuerelektronik bei Anzeigeelementen und mechanischen Bedienelementen notwendig sind.

In Tabelle 15 ist ein Vergleich zwischen Smartphone und einigen gängigen alternativen Anzeige- und Bedienelementen dargestellt. Da die tatsächlichen Kosten von der konkreten Realisierung abhängen, sollen die hier dargestellten Kosten hauptsächlich zur Orientierung dienen.

Komponente	Aufwand Software	Aufwand Montage	Kosten Komponente	Kosten Montage
Smartphone	hoch	gering	keine bzw. Smartphone abhängig	5-50€ <sup>1</sup>
Mechanische Bedienelemente (Schalter, Taster)	gering	hoch	3-20€ <sup>1</sup> pro Element	15-30€ <sup>2</sup>
Optische Anzeigeelemente (LED, Leuchten)	gering	hoch	0,20-3€ <sup>1</sup> pro Element	15-30€ <sup>2</sup>
Optische Anzeigeelemente (LCD Display)	mittel	hoch	3-200€ <sup>3</sup> pro Element	30-60€ <sup>2</sup>
Akustische Anzeigeelemente (Summer-Lautsprecher)	gering-mittel	hoch	0,50-35€ pro Element	0-60€ <sup>4</sup>
Haptisches Anzeigeelement (Vibrationsmotor)	gering	hoch	1-7€ <sup>3</sup> pro Element	10-20€

1: Typische Preisspanne für einzelne Komponenten, abhängig von Hersteller, verwendetem Material und Grad des Schutzes vor Wasser und Vibration.

2: Preisspanne beinhaltet beispielsweise Verkabelung, Befestigungsmaterial und Gehäuse. Da in der Regel mehradrige Leitungen bzw. größere Gehäuse angeschafft werden, entstehen hier keine Mehrkosten, falls mehrere Elemente genutzt werden.

3: Preisspanne beinhaltet unterschiedliche Versionen z.B. eine 7 Segment Anzeige mit 4 Zeichen ist bereits für 3€ erhältlich und Versionen mit mehreren Zeilen und mehr Zeichen sind entsprechend teurer. Beginnend ab ca. 40€ sind auch grafische Module (Displays) erhältlich die je nach Anzahl der Pixel (Auflösung) teurer werden.

4: Sollte ein Bluetooth fähiges Steuergerät eingesetzt werden, so kann auch ein Bluetooth Lautsprecher verwendet werden, dies erhöht die Komplexität der Software, umgeht jedoch sämtliche Verkabelung. Der Lautsprecher kann in eine entsprechende Halterung oder in Jacke/Hose/Taschen gesteckt werden.

Tabelle 15: Vergleich technische und wirtschaftliche Realisierbarkeit von Anzeige und Bedienelementen

Bei der verwendeten Sensorik wiederum muss insbesondere beachtet werden, dass hier gerade bei Sensoren für die Abstandsmessung Komponenten für den Automobileinsatz verwendet werden sollten, da diese in den meisten Fällen entsprechend robust, klein und leicht gebaut sind. Für die technische Realisierung der Abstandssensorik kommen mehrere Sensoren in Betracht, wie Lidar, Radar oder ein Stereo-Kamerasystem. Hierbei gibt es in jeder der drei Rubriken unterschiedliche Ausführungsformen mit ihren eigenen Vor- und Nachteilen. In PKW's wird in der Regel eine Kombination aus zwei oder allen drei der genannten Sensoren verwendet, um durch Sensorfusion eine bestmögliche Repräsentation der Umgebung zu erhalten. Eine solche Lösung ist jedoch aufgrund der hohen Einzelkosten von Lidar und Radar aus wirtschaftlicher Sicht nur bedingt sinnvoll. Da eine Radar basierte Lösung bereits in [TNO15] untersucht worden ist, bietet sich für

den vorliegenden Forschungsaspekt eine Lösung mittels Lidar an. Da das Varia-Fahrrad Radar von Garmin eingesetzt wird, wird dadurch zusätzlich ein Radar basiertes System evaluiert und somit grundlegende Erkenntnisse zum Nutzen dieser Technologie geliefert. Zusätzlich wird eine Kamera zur Realisierung einer Spurverlassenswarnung und besserer Evaluierung der Ergebnisse verbaut. Da für die Sensorik eine erhebliche Anzahl an Varianten mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen aus technischer und wirtschaftlicher Sicht existieren, wird an dieser Stelle nur auf die verwendeten Komponenten eingegangen. Eine Übersicht der verwendeten Komponenten im eingebauten Zustand ist in Abbildung 6 in Kapitel 2.4 zu sehen.

Für die Frontkollisionswarnung wird ein Solid State Lidar Sensor eingesetzt, welcher eine besondere Version der gängigen Lidar Systeme darstellt, da er ohne rotierende Teile auskommt und somit deutlich robuster und kostengünstiger als die üblichen Varianten ausfällt. Jedoch haben diese auch eine erheblich eingeschränkte Auflösung und liefern weniger Datenpunkte und somit weniger detailliertere Informationen über die Umgebung. Diese Art des Lidar Sensors ist relativ neu als Variante für den Einsatz im PKW, weshalb bei dieser Technik noch ein großer Forschungsbedarf besteht. In Tabelle 16 sind die Kenndaten des verwendeten Lidar Sensors abgebildet.

Name	Leddar Vu8 (LeddarTech)
Field of View (horizontal)	Gesamt 20°, bestehend aus 8 Segmenten
Field of View (vertikal)	3°
Nennspannung	12V
Leistungsaufnahme	2,2W
Reichweite	120m
Distanzauflösung	1 cm
Distanzgenauigkeit	±5 cm
Dimensionen (h×b×t)	70mm ×35,2mm×67,5mm
Gewicht	110,3g
Kosten	475€

Tabelle 16: Lidar Sensor Kenndaten

Für die Spurverlassenswarnung wird eine einfache Raspberry Pi Camera V2 eingesetzt, welche eine kostengünstige Monokamera mit sehr kleinen Abmaßen ist. Diese besitzt durch den verwendeten Raspberry Pi eine direkte Hard- und Software-Unterstützung für die Kamera. In Tabelle 17 sind die Kenndaten der verwendeten Kamera abgebildet. Es ist zusätzlich erwähnenswert, dass die eingesetzte Kamera in direkter Nähe zum Lidar Sensor verbaut ist und somit auch durch Bildmaterial aus Perspektive des Sensors bzw. dem Vorderrad, die Evaluierungsergebnisse deutlich verbessert. Neben Monokameras sind ebenfalls Stereokameras denkbar, welche zusätzlich eine Abstandsmessung ermöglichen, dafür jedoch auch höheren Bauraum benötigen, höhere Kosten als eine Monokamera aufweisen und deutlich bessere Hard- und Software für die Bildverarbeitung voraussetzen.

Name	Raspberry Pi Camera V2
Field of View (horizontal)	62,2°
Field of View (vertikal)	48,8°
Auflösung Einzelbild	3280 × 2464 pixels (8 Megapixel)
Video	1080p@30fps, 720p@60fps
Dimensionen (h×b×t)	23,86mm × 25mm × 9mm
Gewicht	3g
Kosten	ca. 25€

Tabelle 17: Kamera Kenndaten

Für die Realisierung der Assistenzfunktionen wird ein entsprechend flexibles und leistungsstarkes Steuergerät benötigt. Eingesetzt wird derzeit ein Raspberry Pi 3, ein Einplatinencomputer, welcher eine sehr gute Kombination aus guter Rechenleistung, geringem Bauraum und geringem Leistungsbedarf bei gleichzeitig geringen Kosten bietet. Dabei bietet der Raspberry ein breites Spektrum an Hardwareschnittstellen zur Ansteuerung von Elektronik (Digital In-/Outputs) sowie die meisten gängigen Kommunikationsschnittstellen (Bus-Systeme, WLAN, Ethernet, Bluetooth). Zusätzlich ist der Raspberry ein global sehr häufig eingesetztes System und hat eine entsprechend große Unterstützung von verfügbaren Software Bibliotheken, welche die Entwicklung bestimmter Funktionen deutlich beschleunigt. Jedoch stößt der Raspberry insbesondere bei der notwendigen Bildverarbeitung für die Spurverlassenswarnung an die Grenzen der verfügbaren Rechenleistung. Aus diesem Grund ist für den weiteren Verlauf des Projektes ein Nvidia Jetson TX2 Developer Kit als zusätzliches Steuergerät im Einsatz. Dieses ist ein kompakter Hochleistungsrechner, welcher insbesondere für den Einsatz in mobilen Systemen wie Drohnen oder Robotern gedacht ist und entsprechend energiesparend und leicht ist. Hierbei ist der Hauptunterschied, dass das Jetson TX2 über eine sehr leistungsstarke Graphics Processing Unit (GPU) verfügt, welche die Bildverarbeitung extrem beschleunigt und zusätzlich Ansätze über Neuronale Netzwerke (Deep Learning) ermöglicht. In Tabelle 18 ist ein Vergleich der Kenndaten zwischen Raspberry und dem Jetson TX2 Developer Kit aufgeführt.

Name	Raspberry Pi 3	Jetson Tx2 Developer Kit
CPU	1,2GHz Quad-Core	2 GHz Dual-Core + 2GHz Quad-Core
Arbeitsspeicher	1GB	8GB
Leistungsaufnahme	max 5,1W	max 15W
Konnektivität	Ethernet, WLAN, Bluetooth	Ethernet, WLAN, Bluetooth
Sonstiges	UART, SPI, I2C, I2S, GPIOs	CAN, UART, SPI, I2C, I2S, GPIOs
Dimensionen (h×b×t)	85mm × 56mm × 17mm	170mm × 170mm × 50mm
Gewicht	41,2g	1,54kg
Kosten	32€	350€

Tabelle 18: Raspberry Pi und Jetson TX2 Developer Kenndaten

#### 2.3.4. Zusammenfassung

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt lässt sich zusammenfassen, dass aus technischer Sicht für das Steuergerät sowie die Anzeige- und Bedienelemente ein möglichst flexibles Konzept realisiert werden sollte, um die aus den Forschungsergebnissen resultierenden Verbesserungen möglichst schnell und einfach umzusetzen. Dabei bietet sich das Smartphone als Kombination aus Anzeige und Bedienelement besonders an und ist auch aus wirtschaftlicher Sicht sinnvoll, da die meisten potenziellen Nutzer über ein Smartphone verfügen. Als Steuergerät hat sich hier der Raspberry Pi als erste Basisplattform angeboten, aufgrund der sehr guten Kombination aus guter Rechenleistung, geringem Leistungsbedarf, geringem Bauraum, vielseitigen Kommunikations- und Hardwareschnittstellen und breiter Softwareunterstützung bei gleichzeitig geringem Preis. Aus technischer Sicht jedoch ist es sinnvoll, auf Dauer ein leistungsstärkeres Steuergerät einzusetzen, um verbesserte Assistenzfunktionen zu implementieren, hierfür wird ein Jetson TX2 Developer Kit eingesetzt, welches insbesondere eine erheblich verbesserte Bildverarbeitung ermöglicht.

Für die Abstandssensorik ist der Ansatz über ein Solid State Lidar sinnvoll, da noch erheblicher Forschungsbedarf zum Einsatz dieser Sensorik in Assistenzsystemen besteht und der technische Aufwand deutlich geringer ist, als beispielsweise für eine Stereokamera. Eine Kombination mit einem Radar Sensor wäre hier am wünschenswertesten, ist jedoch aus wirtschaftlicher Sicht für den Einsatz im Pedelec zurzeit schwer denkbar. Für die Kamera wurde ein wirtschaftlich sehr günstiges Konzept über eine Raspberry Pi Kamera für die Realisierung gewählt, um den Forschungsbedarf zu ermitteln.

## 2.4. Realisierung von sicherheitsorientierten FAS (AP 3.1)

Im Zuge von AP 2 und 3 wurden die folgenden Assistenzsysteme basierend auf den meist gewünschten FAS aus der Nutzerstudie (AP1.3), den Systemen mit dem höchsten Potenzial (AP1.4) sowie technisch und wirtschaftlich am besten zu realisierenden ausgewählt und realisiert:

- Spurverlassenswarnung
- Frontkollisionswarnung
- Fahrtrichtungsanzeiger

Bei den prototypisch realisierten Systemen besteht grundsätzlich keine Zulassung nach StVZO. Die im Zuge der Untersuchung angeschafften, auf dem Markt bereits erhältlichen, Fahrtrichtungsanzeiger haben keine Zulassung nach StVZO und wurden lediglich zur Untersuchung des prinzipiellen Nutzens und der Akzeptanz eingesetzt. Generell ist zu erwähnen, das Fahrtrichtungsanzeiger an Fahrrädern zum aktuellen Zeitpunkt (Juli 2019) lediglich in Ausnahmefällen erlaubt ist, sofern es sich um ein mehrspuriges Fahrrad handelt oder ein Fahrrad, welches durch einen Heckaufbau das Handzeichen verdeckt.

Neben den genannten selbst realisierten Systemen wurden weitere bereits auf dem Markt erhältliche Systeme für die Evaluation beschafft. Diese sind:

- Garmin Varia Fahrrad Radar (Warnung vor rückwärtigem Verkehr)
- Tern Vizy Light (Markierungslicht)
- LED Rücklicht mit Markierungslicht und Blinker
- Signal Pod (Fahrtrichtungsanzeiger)
- LS 614 Duo Flat Signal (Rückleuchte mit Bremslicht)

In Tabelle 19 in Abschnitt 2.4.6 befindet sich eine Kurzvorstellung der Systeme sowie die Information über deren Zulassung nach StZVO.

Im Folgenden werden für die einzelnen Systeme deren Funktionsweise, die jeweilig realisierten Konzepte für Anzeige- und Bedienelemente sowie die eingesetzte Sensorik aufgeführt.

### 2.4.1. Spurverlassenswarnung

Eine Spurverlassenswarnung für Pedelecs soll den Fahrer vor unbeabsichtigtem Verlassen der Fahrspur oder Kollisionen mit Bordsteinen frühzeitig warnen. Hierfür wird eine mittig am Lenker montierte Raspberry Pi Kamera verwendet, um die Fahrbahnmarkierung bzw. den Bordstein zu erkennen und bei zu dichter Annäherung den Fahrer zu warnen. Die Sensorik und das Steuergerät für die Spurverlassenswarnung und die Frontkollisionswarnung sind gemeinsam in einer Box mit durchsichtiger Frontscheibe mittig vor dem Lenker angebracht. In Abbildung 6 ist eine vergrößerte Aufnahme dieser Box am Lenker zu sehen, mit einer Kennzeichnung der jeweiligen Komponenten.

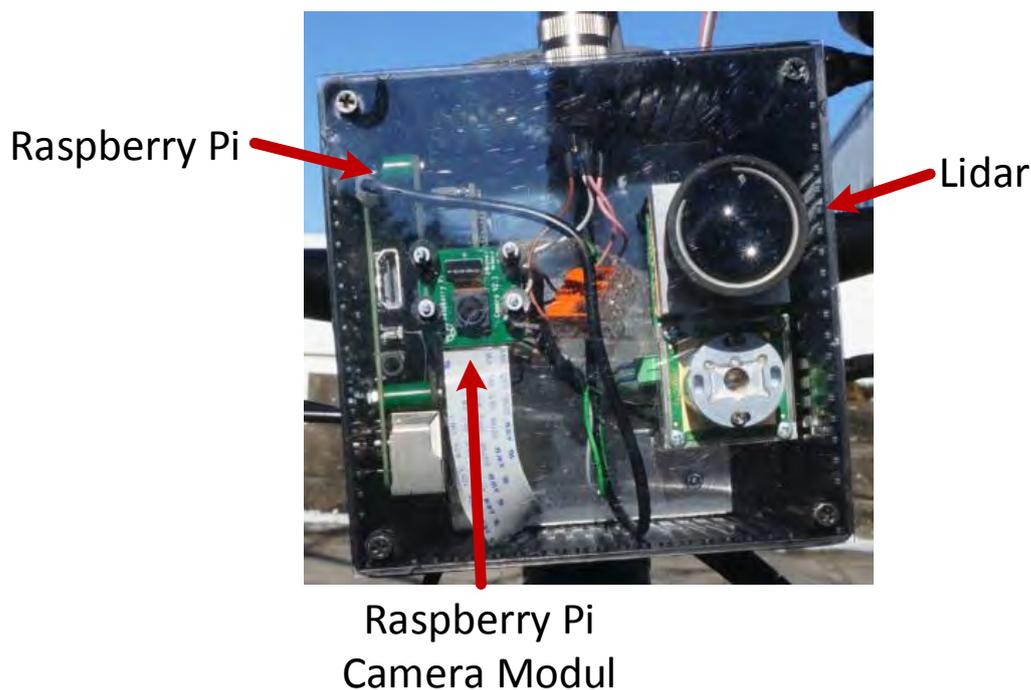


Abbildung 6: Am Lenker verbaute Box für Sensorik und ECU (Quelle: eigene Darstellung)

### Sensorkonzept

Das Sensorkonzept der Spurverlassenswarnung basiert hauptsächlich auf dem Raspberry Pi Kamera Modul V2 und dem zugehörigen Bildverarbeitungsalgorithmus. Als weitere Ergänzung wird der Pedelec interne Geschwindigkeitssensor verwendet, durch den sich geschwindigkeitsabhängig die Warnschwelle (Abstand zur Fahrbahnmarkierung) einstellen lässt, um beispielsweise bei höherer Geschwindigkeit früher zu warnen. Zusätzlich wird mithilfe eines Lenkwinkelsensors überprüft, ob bereits eine Lenkbewegung durchgeführt wird, um eine Kollision oder das Übertreten der Fahrspur zu vermeiden und so eine störende Fehlwarnung zu verhindern.

## Anzeigeelemente

Die Anzeige der Warnung erfolgt haptisch. Bei Annäherung des Fahrers an die linke Fahrbahnbegrenzung, erfolgen Vibrationen im linken Lenkergriff. Bei Annäherung nach rechts, im rechten Lenkergriff. Durch die Vibration soll hier zum einen die Aufmerksamkeit auf die Gefahr gelenkt werden, als auch zum anderen eine schnelle Reaktion bei guter Lokalisierbarkeit ermöglichen wie z. B. direkte Gegenlenkbewegung. Die Lokalisierbarkeit der Vibrationen ist hierbei einer der wichtigsten Punkte der Untersuchung. Als zusätzliche oder alternative Warnung wird das Smartphone verwendet. Hier kann wahlweise ein Warnton die Aufmerksamkeit auf den Bildschirm lenken und eine optische Anzeige eingesetzt werden, ähnlich einer im PKW eingesetzten oder auch eine gesprochene Warnung. Eine beispielhafte Anzeige der optischen Warnung ist in Bild 7 zu sehen, bei einer Warnung erscheinen bei der jeweiligen Spurmarkierung die Pfeile und beginnen zu blinken.



Abbildung 7: Beispiel optische Warnung für Spurverlassenswarnung (Quelle: eigene Darstellung)

## Bedienelemente

Als Bedienelement für die Spurverlassenswarnung kommt lediglich das Smartphone zum Einsatz und dient dazu die Funktion ein- bzw. auszuschalten. Die Bedienoberfläche teilt sich das System hierbei zusammen mit den anderen Assistenzsystemen. Die Bedienung selbst basiert auf einer Bluetooth Low Energy (BLE) Schnittstelle, welche auf dem eingesetzten Raspberry Pi und auf dem Smartphone in Form einer App implementiert wurde. Abbildung 8 zeigt die für die Nutzertests genutzte simple Bedienoberfläche der App. Über die beiden oberen Toggle Buttons lassen sich die Spurverlassenswarnung und die Frontkollisionswarnung aktivieren bzw. deaktivieren. Durch Record lassen sich, für eine späteres Auswerten der Situation, gezielt Fahrtvideos mit der verbauten Raspberry Pi Kamera aufnehmen. Der Test Feedback Button dient dazu, nacheinander die verschiedenen Warnelemente zu demonstrieren, um so ein mögliches Erschrecken bei Ungewohntem oder Erstmaligem nutzen zu verhindern. Über Shutdown FAS werden sämtliche Assistenzfunktionen deaktiviert und der Raspberry Pi fährt herunter.

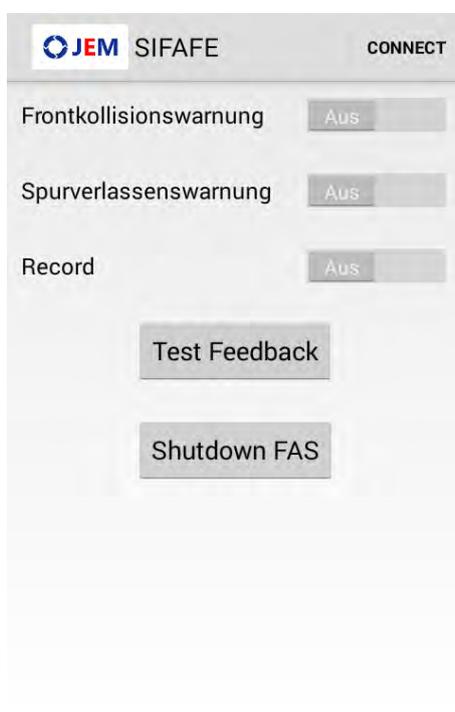


Abbildung 8: Hauptmenü (Quelle: eigene Darstellung)

## Funktionsweise

Die Funktionsweise der Spurverlassenswarnung lässt sich in mehrere Schritte unterteilen und ist in Bild 9 in der Übersicht dargestellt. Dieses Vorgehen wird in einer Endlosschleife so lange ausgeführt, bis die Assistenzfunktion vom Nutzer deaktiviert wird.

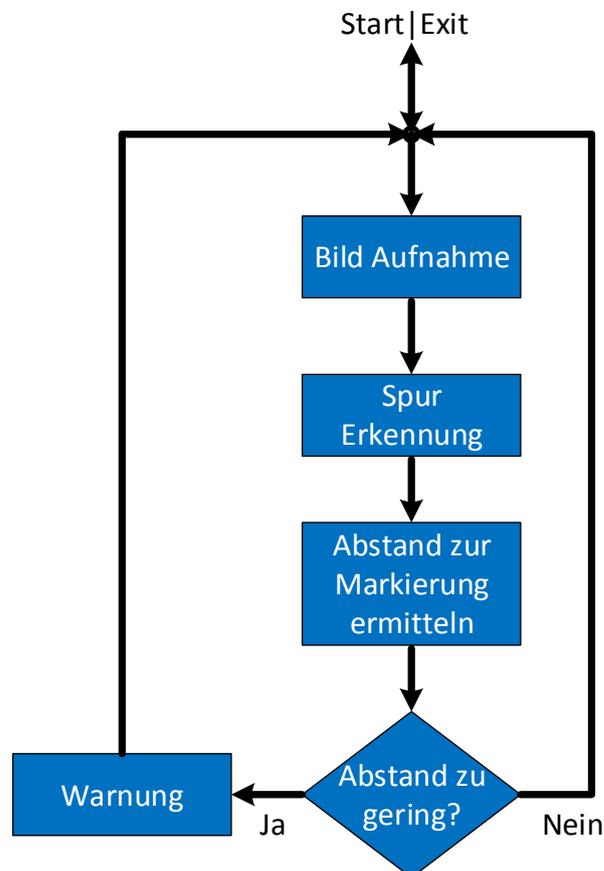


Abbildung 9: Ablauf Spurverlassenswarnung (Quelle: eigene Darstellung)

Zunächst wird das Bild aufgenommen, formatiert und schließlich an den Algorithmus für die Spurerkennung übergeben.

Der Algorithmus für die Spurerkennung wurde eigens für den Fahrradeinsatz entwickelt und implementiert. Dieser lässt sich hierbei wiederum in verschiedene Teilschritte zerlegen:

1. Extraktion der Region of Interest und Kantendetektion, um nicht relevante Bereiche wie beispielsweise den Horizont oder Gebäude/Gelände abseits der Straße zu entfernen und so die Rechenzeit zu verringern. Die Kantendetektion dient dazu, lediglich sich deutlich von der Straße abhebende Strukturen wie die Spurmarkierungen hervorzuheben.
2. Perspektiventransformation, um eine "Vogelperspektive" der Spur zu erhalten, dadurch werden aus den vormals spitz zulaufenden schrägen Spurmarkierungen nahezu grade und parallele Linien.

3. Houghtransformation, um gerade Linien und somit Kandidaten für Spurmarkierungen im Bild zu finden. Dieses Verfahren findet hierbei eine Vielzahl an Linien und somit potenziellen Spurkandidaten, welche über mehrere Heuristiken auf die wahrscheinlichsten Kandidaten eingegrenzt werden.
4. Window Search und Approximation der Spur. Bei der Window Search wird beginnend vom unteren Rand des Bildes aus, ein Suchfenster in festen Abständen zueinander genutzt, um die zur Spurmarkierung zugehörigen Pixel zu finden. Jedes Suchfenster wird abhängig von den gefundenen Pixeln, dem Ergebnis der Houghtransformation sowie dem darunter liegenden Suchfenster jeweils neu zentriert. Mit den gefunden Pixeln wird anschließend ein Polynom approximiert, welches die Spur repräsentiert.

In Abbildung 10 ist der Algorithmus und die jeweiligen Teilschritte anhand eines Beispielbildes dargestellt. Hierbei sind Schritt 1 und 2 im oberen Bild zur besseren Anschaulichkeit, für das original Bild durchgeführt, während im unteren Bild die tatsächliche Repräsentation als Binär Bild abgebildet ist. Das Ergebnis der Spurerkennung ist im unteren Teil von Abbildung 10 als grüne Fläche dargestellt.

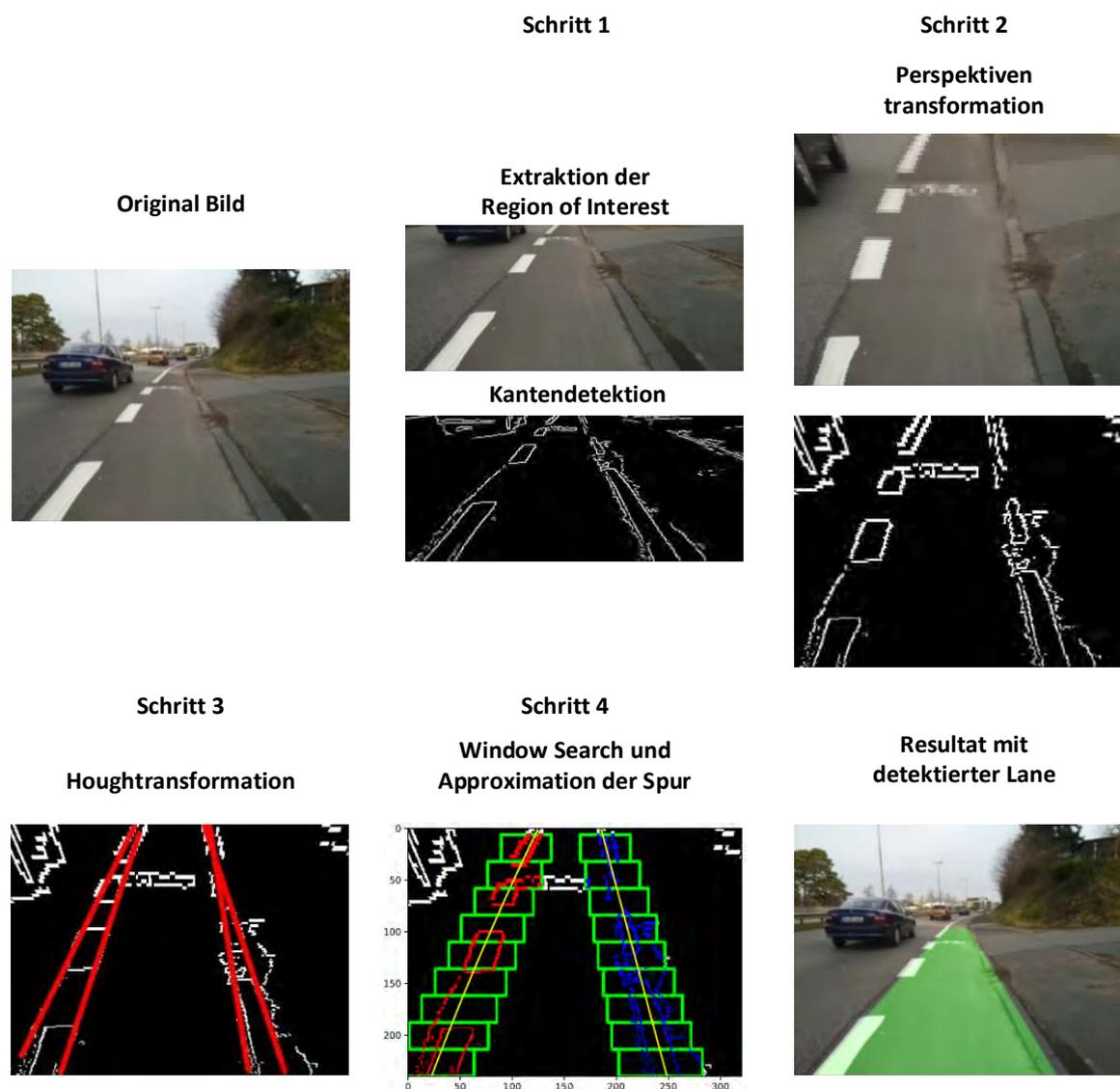


Abbildung 10: Algorithmus Schritte 1 und 2 (Quelle: eigene Darstellung)

Nach Erkennung der Spur wird der Abstand vom Rad zur Markierung ermittelt, dies erfolgt anhand des untersten Pixels im Bild und ist in Abbildung 11 für das Bild dargestellt. Zuvor wurden für den fertigen Aufbau mehrere Kalibrierungsmessungen durchgeführt, um das Umrechnungsverhältnis zwischen Spurbreite in Metern und Pixel im Bild zu ermitteln. Da die Position des Rades im Bild stets an derselben Stelle ist, kann über die Anzahl der Pixel bis zur rechten bzw. linken Spurbegrenzung sowie dem Umrechnungsverhältnis die Distanz in  $m$  ermittelt werden.

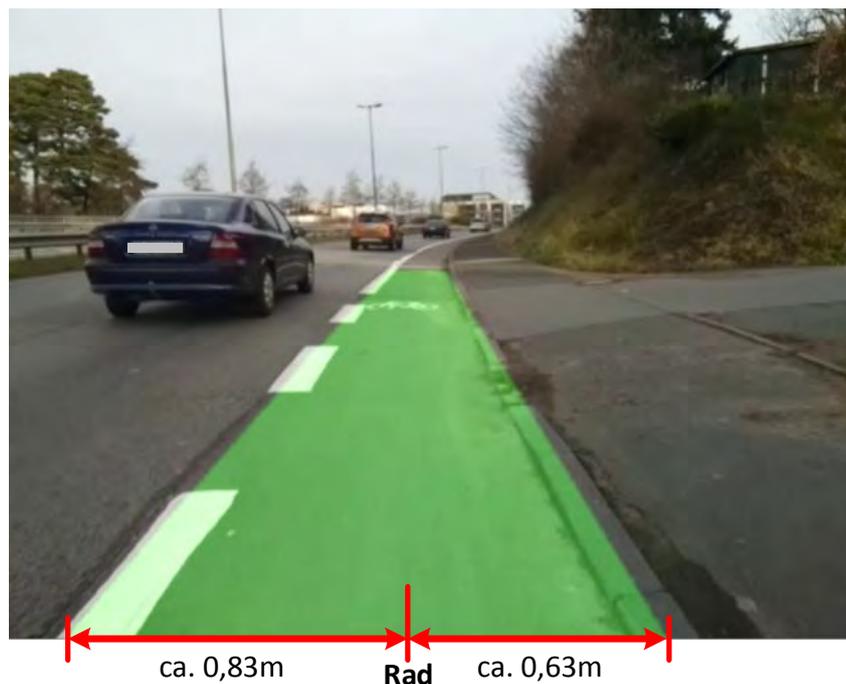


Abbildung 11: Darstellung der Distanz zwischen Rad und Markierung (Quelle: eigene Darstellung)

Anschließend wird überprüft, ob der kleinere Abstand (Abstand zur rechten Spur in Abb. 11) einen festgelegten Schwellwert  $\sigma$  unterschreitet. Sollte dies zutreffen, so wird die entsprechend eingestellte Warnung aktiviert. Sollte keine Warnung notwendig sein bzw. nachdem die Warnung aktiviert wurde, startet das Verfahren wieder von vorne für das aktuelle Bild.

#### 2.4.2. Frontkollisionswarnung

Eine Frontkollisionswarnung für Pedelecs soll den Fahrer vor drohenden Kollisionen mit Hindernissen oder anderen Verkehrsteilnehmern in Fahrtrichtung warnen. Die verwendeten Komponenten sind der Raspberry Pi, zum Ausführen des Algorithmus, sowie der Lidar Sensor für die Abstandsmessung, welche bereits in Abbildung 6 zu sehen waren.

#### Sensorkonzept

Die Hauptkomponente der Frontkollisionswarnung ist der Lidar Sensor, welcher mittels eines Lasers den Abstand zu potenziellen Hindernissen in dessen Sichtbereich (engl. Field of View, kurz FoV) ermittelt. Abbildung 12 stellt das Messprinzip sowie noch einmal die wichtigsten Kenndaten des Sensors dar, hierbei ist der horizontale Sichtbereich in 8 Segmente unterteilt, in welchen jeweils Objekte erkannt werden können. Im dargestellten Fall ist ein Hindernis in den 3 äußeren Segmenten detektiert und der Sensor würde die jeweiligen Abstände für alle 3 Segmente als Ergebnis liefern. Der Sensor ist dabei in der Lage mehrere Objekte in seinem Sichtbereich zu detektieren, ebenfalls können mehrere Objekte im selben Segment detektiert werden, sofern das vorderste Objekt nicht die dahinter liegenden verdeckt. Als weiterer Sensor wird der Geschwindigkeitssensor des Pedelecs benötigt, wodurch sich die relative Geschwindigkeit zwischen Objekt und Fahrrad ermitteln lässt.

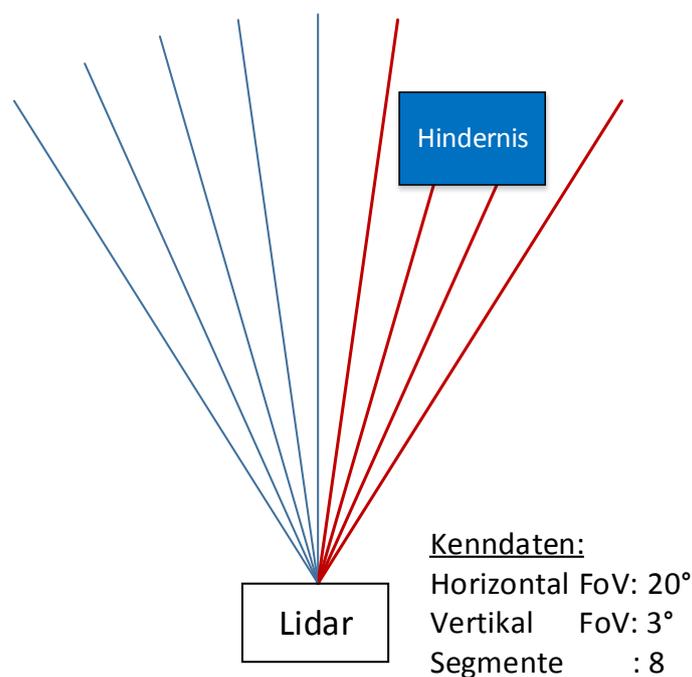


Abbildung 12: Darstellung und Kennwerte des Lidar Sensors (Quelle: eigene Darstellung)

### Anzeigeelemente

Auch die Frontkollisionswarnung nutzt die Vibrationsmotoren, um auf ein Hindernis aufmerksam zu machen. Dabei werden beide Motoren zusammen verwendet, um eine Unterscheidung zur Warnung der Spurverlassenswarnung zu ermöglichen. Zu der genannten Technik wird zusätzlich das Smartphone eingesetzt. Dieses nutzt das Verfahren aus akustischer Vorwarnung und optischer Displayanzeige, welches bereits beim Thema Spurverlassenswarnung vorgestellt wurde. Eine Möglichkeit für die optische Anzeige besteht beispielsweise aus dem in Abbildung 13 dargestellten Zeichen. Hierbei wird, durch Aufblinker des Schriftzuges und des Pfeiles zwischen Fahrrad und PKW zusätzlich Aufmerksamkeit geschürt.



Abbildung 13: Beispiel optische Warnung für Frontkollisionswarnung (Quelle: eigene Darstellung)

## Bedienelemente

Siehe Spurverlassenswarnung

## Funktionsweise

Die Funktionsweise der Frontkollisionswarnung besteht aus mehreren Teilschritten, welche in Abbildung 14 dargestellt ist. Auch hier wird der Algorithmus solange ausgeführt, bis dieser vom Nutzer deaktiviert wird.

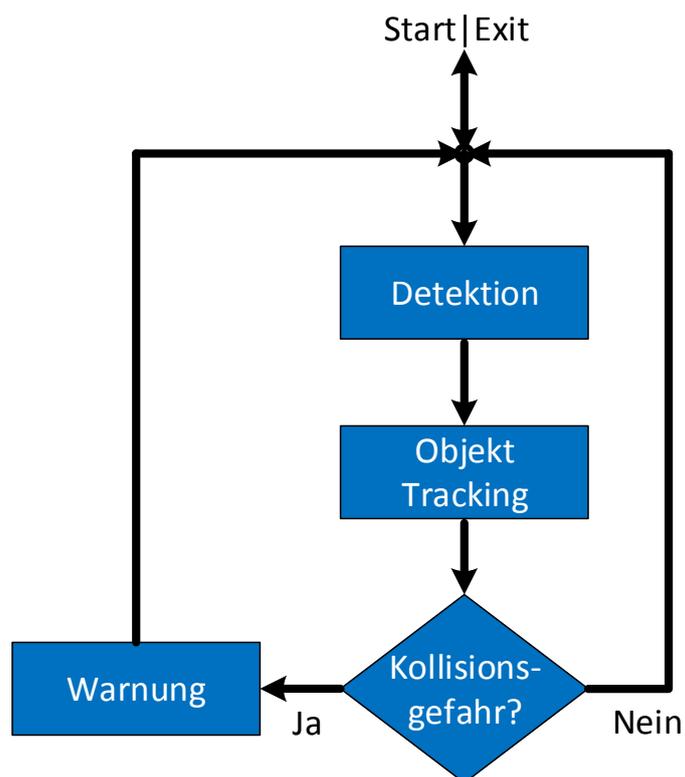


Abbildung 14: Ablauf Frontkollisionswarnung (Quelle: eigene Darstellung)

1. Zunächst werden die Messungen des Lidar Sensors abgerufen, um eine Repräsentation der in der Umgebung befindlichen Objekte zu erhalten. Diese liegen in Form von Kombination aus Segment und Abstand vor und ermöglichen so eine ungefähre Zuordnung der Position des Objektes.
2. Der wichtigste Schritt der Frontkollisionswarnung ist das Objekt Tracking, welches benötigt wird, um die Messungen einem konkreten Objekt zuzuordnen, welches durch den Algorithmus zeitlich (über mehrere Algorithmus Abläufe) verfolgt wird. Durch das Zuordnen einer Messung zu einem Objekt und dessen zeitlicher Verfolgung, ist es möglich, festzustellen wie sich der Abstand zwischen Fahrrad und Objekt verändert und auch, ob ein Objekt plötzlich aus dem Sichtfeld verschwindet, wie beispielsweise im Falle eines abbiegenden vorausfahrenden PKWs oder auch auftaucht bei einem einbiegenden Fahrzeug. Der Ablauf des Trackings selbst ist relativ einfach, so wird für jedes Objekt ein Prädiktionsmodell genutzt, welches zum gegenwärtigen Zeitpunkt ( $k$ ) seine Position für den nächsten Zeitschritt ( $k+1$ )

prädiziert. Im nächsten Zeitschritt wird nun jede Messung überprüft, ob diese in einem gewissen Umfeld um die prädizierte Position eines Objektes liegt und wenn dies zutrifft, diesem Objekt zugeordnet. Um die Prädiktion fortwährend zu verbessern (Geschwindigkeitsänderungen und Positionsänderungen) wird nun das Prädiktionsmodell mit der neuen Messung upgedatet. Sollte eine vorhandene Messung keinem Objekt zugeordnet werden können, so wird ein neues Objekt erstellt. Dies entspricht beispielsweise dem Fall, dass das Fahrrad zu einem anderen Verkehrsteilnehmer aufschließt, welcher zuvor außerhalb der Sensor Reichweite war. Sollte einem Objekt in mehreren aufeinanderfolgenden Durchläufen des Algorithmus keine Messungen zugeordnet werden, wird das Objekt gelöscht, da dieses nicht länger existiert, was dem genannten Fall eines abbiegenden Fahrzeugs entspricht.

3. Abschließend muss nun überprüft werden, ob eine Kollisionsgefahr mit einem der Objekte besteht. Dabei wird mithilfe eines Beschleunigungskriteriums ermittelt, welcher Abstand  $d_B$  benötigt wird, um das Fahrrad soweit abzubremesen, dass eine Kollision nicht mehr möglich ist (d. h. Objekt und Radfahrer bewegen sich mit gleicher Geschwindigkeit). Zusätzlich muss die Reaktionszeit des Fahrers berücksichtigt werden und wird als zusätzlicher Abstand  $d_R = v_{\text{rel}} \cdot \tau_R$  einbezogen, mit der relativen Geschwindigkeit  $v_{\text{rel}}$  und der Reaktionszeit  $\tau_R$ . Sollte nun der Abstand zu einem der Objekte die jeweilige objektabhängige Warnschwelle von  $d_{\text{warn}} = d_B + d_R$  erreichen bzw. unterschreiten so wird die Warnung aktiviert.

### 2.4.3. Fahrtrichtungsanzeiger

Der Fahrtrichtungsanzeiger, soll den Radfahrer bei einem Abbiegemanöver durch das Anzeigen der Abbiegeabsicht unterstützen. Hierzu werden am Heck des Fahrrades Blinkleuchten montiert (siehe Abbildung 16). Diese Fahrtrichtungsanzeiger werden durch einen Schalter am Lenker in der Nähe der Griffe aktiviert und entlasten den Fahrer dadurch, dass Arm und Hand nicht länger vom Lenker gehoben und seitlich ausgestreckt werden müssen, um die Abbiegeabsicht anzuzeigen. Hierdurch kann unter Umständen auch das Sturzrisiko oder unbeabsichtigtes Lenken durch den Fahrer vermieden werden. Für die Realisierung wurden die bereits verfügbaren (jedoch nicht StVZO zugelassen) Fahrradblinker "Winglights" der Firma CYCL verwendet und für den gewünschten Einsatz wie in Abbildung 16 dargestellt umgebaut.

### 2.4.4. Schlaglochwarnung

Im Zuge eines Studienprojektes wurde von Studenten eine prototypische Schlaglochwarnung konzipiert und implementiert. Hierfür wurde zunächst mithilfe der Daten eines Beschleunigungssensors und eines GPS Sensors ein Algorithmus entwickelt, welcher detektiert, dass ein Schlagloch durchfahren wurde und diese Information mit der aktuellen GPS Position verbindet. Mithilfe dieses Algorithmus wurden für eine Teststrecke sämtliche durchfahrene Schlaglöcher kartiert. Basierend auf diesen Daten wurden ein weiterer Algorithmus sowie eine einfache Warneinrichtung entwickelt, welche den Radfahrer mittels einer akustischen Warnung bei einer Annäherung an eines der kartierten Schlaglöcher auf der Teststrecke warnt. Das System wurde anschließend auf der Teststrecke erfolgreich getestet. Die Ergebnisse dieser Studienarbeit stellen hierbei eine erste Entwicklungsstufe zu einem System dar, welches über Smartphones jedem Radfahrer die Möglichkeit zum Detektieren und Kartieren von Schlaglöchern bietet. Über einen Crowdsourcing Ansatz könnten via Internet allen Nutzern die Positionen der Schlaglöcher mitgeteilt und darauf basierende Warnalgorithmen eingesetzt werden.

### 2.4.5. Versuchsträger mit Querführungs- und Längsführungsaktorik

Da die Fragestellung zu Möglichkeiten bezüglich Aktorik für Quer- und Längsführung sowie steuerbaren Bremssystemen offen ist, wurde ein Versuchsträger aufgebaut, um grundlegende Eigenschaften zu untersuchen und genaue Anforderungen zu bestimmen. Der Versuchsträger konnte aufgrund von Lieferverzögerungen erst kurz vor Abschluss des Projekts fertiggestellt werden, sodass noch keine umfassenden Untersuchungen durchgeführt werden konnten. Diese Untersuchungen werden im Nachgang des Projekts durchgeführt.

### 2.4.6. Zusätzliche Systeme

Die zusätzlich beschafften, am Markt erhältlichen Systeme, welche ebenfalls in die Evaluation einbezogen werden sollen, sind in Tabelle 19 mit ihren jeweiligen Funktionen aufgeführt:

Name	Bedienelement	Anzeigeelement	Funktionen	StVZO Zulassung
Garmin Varia Fahrrad Radar	-	Optische Anzeige	Warnt vor von hinten herannahenden Fahrzeugen.	Ja
Tern Vizy Light	-	-	Projiziert roten Kreis auf den Boden unter das Fahrrad, um die Sichtbarkeit des Radfahrers zu erhöhen.	Nein
LED Rücklicht mit Markierungslicht und Blinker	Fernbedienung	-	Projiziert rote Linien seitlich unter das Fahrrad auf den Boden, um die Sichtbarkeit des Radfahrers zu erhöhen. Über Fernbedienung am Lenker lässt sich der entsprechende Blinker setzen.	Nein
Signal Pod	Fernbedienung	-	Über Fernbedienung am Lenker lässt sich der entsprechende Blinker setzen.	Nein
LS614 Duo Flat Signal	-	-	Bei Erkennen des Bremsvorgangs wird automatisch ein helleres Bremslicht aktiviert.	Ja

Tabelle 19: Übersicht der zusätzlichen Systeme für Evaluationszwecke

Zur Veranschaulichung ist in Bild 15 das Garmin Varia Fahrrad-Radar sowie das LED Rücklicht mit Blinker und Markierungslicht abgebildet. In Bild 16 sind der selbst implementierte Fahrtrichtungsanzeiger sowie das LS614 Duo Flat Signal Rücklicht/Bremslicht abgebildet. Die beiden eingesetzten Markierungslichter sind in Abbildung 17 dargestellt, wobei im oberen Teilbild das Tern Vizy Light mit projiziertem rotem Kreis zu sehen ist und im unteren Bild die Variante mit projizierten Linien.



Abbildung 15: Garmin Varia Fahrrad-Radar und LED Rücklicht mit Blinker und Markierungslicht (Quelle: eigene Darstellung)

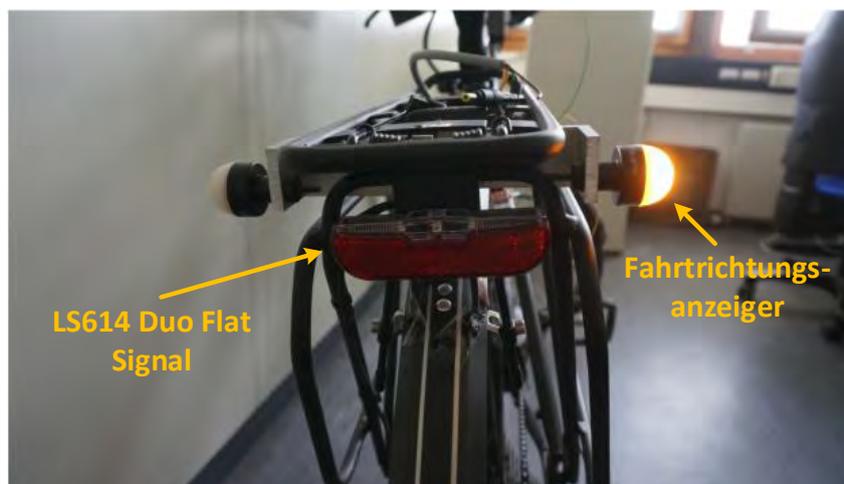


Abbildung 16: Garmin Varia Fahrrad-Radar und LED Rücklicht mit Blinker und Markierungslicht (Quelle: eigene Darstellung)

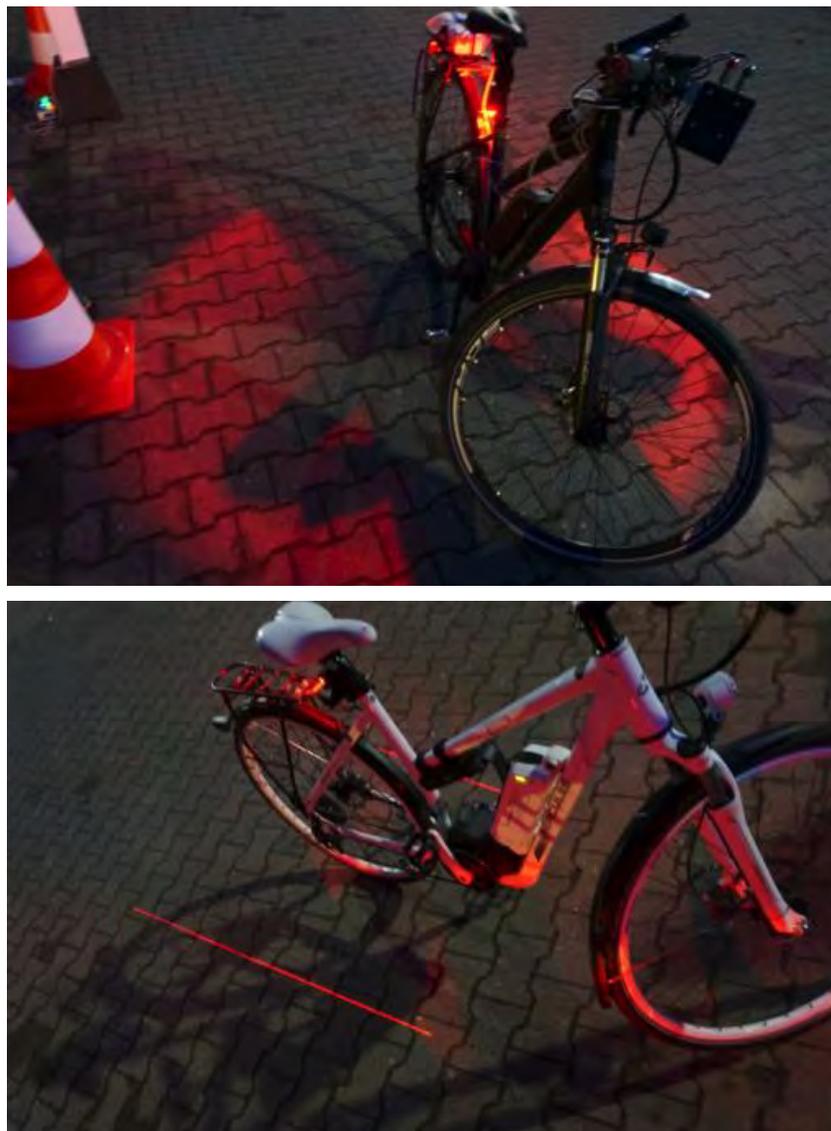


Abbildung 17: Garmin Varia Fahrrad-Radar und LED Rücklicht mit Blinker und Markierungslicht (Quelle: eigene Darstellung)

## 2.5. Evaluation der sicherheitsorientierten FAS (AP 3.2)

### 2.5.1. Evaluationskonzept und Versuchsaufbau

#### Versuchsfahrrad

Das Versuchsfahrrad wurde mit mehreren Sensoren, Bedieneinheiten und Warneinrichtungen versehen. Es wurden eine Frontalkollisionswarnung, eine Spurverlassenswarnung sowie ein Fahrtrichtungsanzeiger angebaut. Ein Algorithmus verarbeitet die Sensorwerte und gibt je nach Situation und aktivem System (z.B. Erkennung eines Hindernisses) Warnungen an den Radfahrenden aus. Die verschiedenen Systeme können über ein Smartphone aktiviert und deaktiviert werden. Ebenso sind darüber einzelne Schwellenwerte und Einstellungen individuell änderbar. Das Smartphone dient ebenso als optische und akustische Warneinrichtung. Zusätzlich werden Warnungen über Vibrationsgeber in beiden Lenkgriffen ausgegeben. Durch die Vibration in den Griffen wird eine genaue und direkte Warnung ohne Unterbrechung des Blickkontakts zur Straße und des Verkehrs möglich. So kann beispielsweise bei der Spurverlassenswarnung eine Warnung auf derjenigen Lenkerseite geschehen, auf der ein Überfahren der Spur droht.

Das Versuchsfahrrad mit allen Komponenten wird in folgender Abbildung 18 gezeigt. Da es sich bei allen Systemen um Prototypen handelt, wären für einen kommerziellen Nutzen noch weitere Entwicklungen in Richtung Größe, Form, Funktionalität und Zulassung nötig.



Abbildung 18: Das SIFAFE Versuchspedelec mit diversen Sensoren und Assistenzsystemen (Quelle: eigene Darstellung)

Die Frontalkollisionswarnung besteht aus einem Lidarsensor und dem Auswerte-Algorithmus. Dieser erkennt Hindernisse und andere Verkehrsteilnehmerinnen und Verkehrsteilnehmer in Fahrtrichtung und verfolgt sie im Sichtbereich des Sensors (tracking). Sobald sich ein Objekt in kritischer

Nähe zum Pedelec befindet, wird eine Warnung ausgegeben. Typische Unfallarten, die von diesem System adressiert werden, sind das Übersehen eines Pfostens oder das Überholen eines langsameren Fahrradfahrenden, der plötzlich bremst, oder sich plötzlich öffnende Fahrzeurtüren beim Parken am Straßenrand.

Die Spurverlassenswarnung ist aus dem Fahrzeugsektor inspiriert und an die Anforderungen des Radverkehrs adaptiert. Das System basiert auf einer Kamera, die Fahrbahnmarkierungen, Randsteine, Straßenbahnschienen oder Grasnarben erkennt. Bei zu starker Annäherung an die Fahrbahnrandmarkierung oder einem Bordstein, wird auf der Gefahrenseite ein haptisches Warnsignal an den Radfahrer ausgegeben. Typische Unfallszenarien, die adressiert werden, sind das unabsichtliche Abweichen von der Fahrspur wegen eines Schulterblicks oder durch Ablenkung, wenn das Rad dadurch an den Randstein oder in den folgenden bzw. seitlichen Fahrzeugverkehr fährt.

Zusätzlich zu den bereits genannten Systemen wurde ein Gerät zur Warnung vor rückwärtigen Fahrzeugannäherungen installiert. Dieses nutzt einen Radarsensor, der sich rückwärtig nähernde Fahrzeuge erkennt und Radfahrende über ein Display an der Lenkstange in Form einer Abstandsmeldung optisch anzeigt.

Im Gegensatz zu Fahrzeugen, Motorrädern oder Dreirädern sind Fahrtrichtungsanzeiger (ugs. „Blinker“) am Fahrrad oder Pedelec nicht erlaubt. Dennoch wurde dieses System in der Online-Befragung oft gewünscht, um dem nachfolgenden Verkehr die Fahrtrichtung anzuzeigen, ohne die Hände vom Lenker nehmen zu müssen. Am Versuchspedelec sind zwei verschiedene Bauarten solcher Systeme installiert. Das erste setzt sich aus zwei gelben großen LED-Leuchten am Gepäckträger und jeweils einem Taster direkt an beiden Griffen zur Aktivierung der Leuchte auf der jeweiligen Seite zusammen. Das zweite System besteht aus einem Bauteil mit integrierten gelben Leuchten zur Befestigung an der Sattelstange. Es wird per Fernbedienung aktiviert, die an der Lenkstange befestigt werden kann.

Als weitere lichttechnische Systeme wurden ein Bremslicht sowie zwei Arten von Markierungslichtern am Pedelec montiert. Diese Systeme dienen dazu, die Aufmerksamkeit anderer Verkehrsteilnehmer auf das Fahrrad bzw. Pedelec und somit die eigene Sichtbarkeit in der Dunkelheit zu erhöhen. Hierzu projizieren Markierungslichter ein Licht auf den Boden unter oder um das Fahrrad bzw. Pedelec. In diesem Fall wurden beispielhaft Systeme getestet, die einen roten Kreis unter bzw. zwei rote Linien neben das Rad projizieren (vgl. folgende Abbildungen 19).

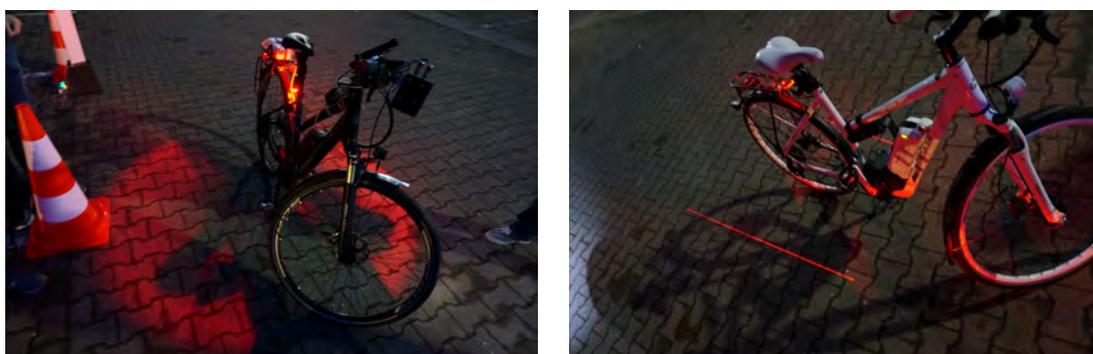


Abbildung 19: Markierungslichter (Kreis links und Linien rechts) (Quelle: eigene Darstellung)

## Evaluationskonzept

Zur Bewertung und Beurteilung der entwickelten und eingesetzten sicherheitsorientierten Fahrerassistenzsysteme wurde ein dreistufiges Konzept entwickelt. Das Konzept wurde bereits im zweiten Zwischenbericht vom 30.04.2018 ausführlich vorgestellt und anschließend im Projektbeirat diskutiert. Der Input des Beirats, Anpassungen an den Systemen sowie das Zeitmanagement haben im Vergleich zum Stand April 2018 Änderungen des Konzeptes ergeben. Von der Durchführung einer Videobefragung wurde abgesehen, an dessen Stelle wurde ein Pretest der Systeme durchgeführt. Das überarbeitete Konzept sieht folgende drei Stufen vor und wird anschließend detailliert erläutert:

- Pretest der Systeme
- Probandentest der Systeme in einem Testparcours
- Befragung und Datalogging

Die selbst entwickelten Systeme „Frontkollisionswarnung“ und „Spurverlassenswarnung“ sind so konzipiert, dass sie eine Warnung ausgeben, wenn Situationen im Straßenverkehr erkannt werden, die dies erfordern. Die Kalibrierung der Reaktionszeiten, Warnzeiten und Funktionalität der Systeme wurde mithilfe eigener Testfahrten realisiert. Dazu wurden kritische Situationen, wie sie im Straßenverkehr auftreten können, nachgestellt. Die Situationen wurden so gewählt, dass das jeweilige System eine Warnung ausgibt.

Für die Evaluation von Warnzeitpunkten für die Frontkollisionswarnung sind die Situationen „Entgegenkommender Radfahrer“ sowie „Auffahren“ des Radfahrenden auf ein Hindernis oder einen anderen Verkehrsteilnehmer relevant. Diese drei Situationen unterscheiden sich im Hinblick auf die Relativgeschwindigkeiten. Bei entgegenkommenden Verkehrsteilnehmern ist sie am höchsten, beim Auffahren auf ein statisches Hindernis entspricht die relative Geschwindigkeit der gefahrenen Geschwindigkeit, beim Auffahren auf einen anderen (fahrenden) Verkehrsteilnehmer ist die Relativgeschwindigkeit am niedrigsten. Um Warnzeitpunkte für die Spurverlassenswarnung angeben zu können wurde eine „Wellenfahrt“ auf einem markierten Fahrstreifen durchgeführt. Die Testfahrten haben Aufschluss über jeweils geeignete Warnzeitpunkte gegeben. Diese wurden im Algorithmus der Systeme hinterlegt und durch freiwillige Testpersonen im Rahmen einer Veranstaltung bewertet. Diese Bewertung wurde anhand von Schulnoten vorgenommen und gab einen ersten Aufschluss über die Funktionalität der Systeme. Die Bewertung ist in Abbildung 20 dargestellt. Eine detaillierte Bewertung der Systeme anhand eines Fragebogens und ausführlichen Fahrversuchen wurde im Rahmen der Probandentests im Parcours durchgeführt. Ergebnisse hierzu werden in Abschnitt 2.5.2 vorgestellt.

Bereits auf dem Markt erhältliche Systeme für Beleuchtung und lichttechnische Einrichtungen am Fahrrad oder Pedelec wurden ebenfalls durch Freiwillige anhand von Schulnoten bewertet (siehe Abbildung 20). Von eigenen Testfahrten wurde abgesehen, da sich die Systeme bereits am Markt etabliert haben und kein Einfluss auf ihre Funktionsweise genommen werden kann. Die Ergebnisse der Bewertung im Rahmen der Probandentests werden in Abschnitt 2.5.2 vorgestellt.

Die Pretests wurden im Winter 2017 sowie im Frühjahr 2018 durchgeführt.

**Nacht, die Wissen schafft**

Sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme für Elektrofahräder

Bewertung der gesteteten Assistenzsysteme und Einrichtungen  
Skala nach Schulnoten : 1 = sehr ~~schlecht~~ bis 6= ungenügend

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Frontkollisions- warnung						Spurverlassens- warnung						Heckkollisions- warnung						Bremslicht						Positions-leuchten						Blinker					
1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
X								X																											
X								X																											
	X							X																											
	X	X						X																											
	X	X	X					X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X				X																											
	X	X	X	X																															

## Probandentest mit Testparcours

Die Effektivität des Nutzens, die Nutzerfreundlichkeit und die Systemeigenschaften der Sicherheitssysteme wurden im Sommer 2018 in Versuchsfahrten getestet und durch die Teilnehmerinnen und Teilnehmer bewertet. Dazu wurde ein Testparcours aufgebaut, der verschiedene Alltagssituationen simuliert, die zu einem Unfall führen können. Die aktiven Systeme warnen Radfahrende rechtzeitig vor Gefahren, die passiven erhöhen die Sicherheit der Radfahrenden durch Verstärkung der Aufmerksamkeit anderer Verkehrsteilnehmerinnen und Verkehrsteilnehmer. Der Parcours diente dem praktischen Test der Systeme. Er enthielt verschiedene Arten an Aufgaben und Hindernissen sowie unterschiedliche Untergründe. Der Parcours wurde mehrmals mit aktiviertem sowie auch deaktiviertem Assistenzsystem durchfahren. Im Detail waren folgende Elemente Bestandteil des Parcours:

- statisches und gut erkennbares Hindernis
- statisches und schwer erkennbares Hindernis
- dynamisches Hindernis
- verschiedene Untergründe wie Asphalt oder nicht griffige Oberflächen
- Linien auf dem Boden und Abweichen von der Spur

Die Hindernisse, eventuelle Sichtschutzwände und weitere Einbauten waren dabei immer nur auf einer Seite der Strecke, sodass die andere immer frei zum Ausweichen war.

Die meisten Testfahrten fanden auf der umlaufenden Bahn des Sportplatzes der Universität statt (siehe folgende Abbildung 21). Nur eines der Systeme wurde auf einer schwach befahrenen Straße auf dem Campus (Gültigkeitsbereich der StVO, maximale Verkehrsbelastung von 80 KFZ/h) getestet. Durch dieses im Vorhinein definierte Testfeld und durch die Bündelung aller Fahrten über einen Zeitraum von ca. vier Wochen im Juni 2018 konnten für alle Testerinnen und Tester dieselben Konditionen hergestellt werden. Alle Testfahrten fanden bei guten und vergleichbaren Witterungsbedingungen (kein Regen, mehr als 20°C) statt. Insbesondere trockene Bedingungen waren für die prototypischen Systeme wichtig, da sie bei Regen beschädigt werden konnten.

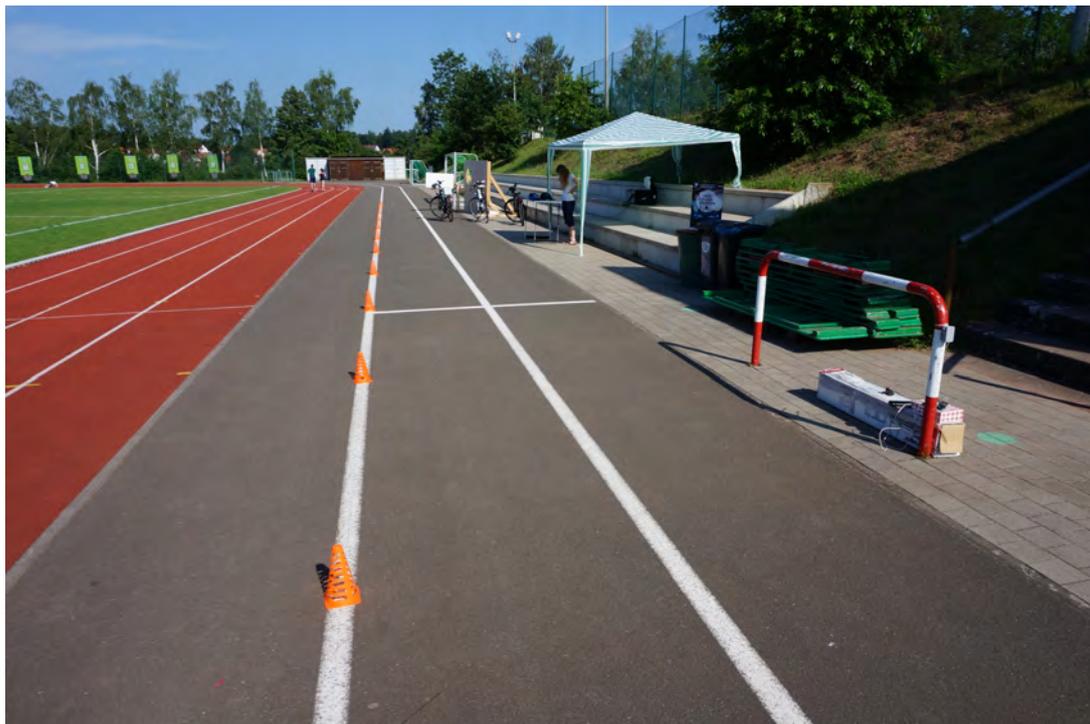


Abbildung 21: Testparcours auf dem Sportgelände der TU Kaiserslautern (Quelle: eigene Darstellung)

Am äußeren Rand der umlaufenden Bahnen um den Sportplatz befinden sich viele Hindernisse, wie Fußballtore oder Pfosten. Weiße Linien auf dem Boden markieren die verschiedenen Bahnen. Vor Beginn eines Tests musste jeder Proband eine Teilnahmevereinbarung unterschreiben und einen kurzen Fragebogen über Fahrverhalten, Nutzungsgewohnheiten, gewöhnliche Fahrstrecken und Kenntnisse zu Fahrerassistenzsystemen ausfüllen. Anschließend wurden alle vorgestellten Systeme separat getestet und bewertet.

Nach jeder Testfahrt eines Systems wurden Fragen zur Funktionalität gestellt. Die Probanden sollten beurteilen, ob der Zeitpunkt der Warnung zu früh, genau richtig oder zu spät war. In gleicher Weise sollten sie die Intensität der Warnung beurteilen. Zusätzlich wurden Fragen zum Stress- und Sicherheitsgefühl während der Testfahrten gestellt. Ebenso sollte auch angegeben werden, wie stark die Ablenkung während der Fahrt durch die getesteten Systeme war. Jeder Fragebogen sah ausreichend Platz für eigene Kommentare und Beschreibungen zum Hervorheben besonders positiver oder negativer Eigenschaften der Systeme vor. Zum Abschluss jedes Teil-Fragebogens wurde die Frage nach der Kaufbereitschaft des getesteten Systems gestellt und wie viel Euro die Testerin oder der Tester bereit wäre, zu investieren.

Jedes System wurde in seinem speziellen Anwendungsfeld getestet. Die Frontalkollisionswarnung erkennt sowohl statische als auch dynamische Hindernisse, daher sollten auch beide Arten im Test beurteilt werden. Die Tester fuhren auf ebenem und festem Untergrund an feste Hindernisse und ein bewegliches Hindernis (siehe folgende Abbildung 22) heran, vor denen das System sie warnen sollte. Die festen Hindernisse, wie Pfosten, können ebenso im Straßenverkehr auftreten und dort leicht übersehen werden. Das dynamische bzw. bewegliche Hindernis simulierte eine sich plötzlich öffnende Fahrzeughür. Aus Sicherheitsgründen wurde anstatt der Tür eine poröse Styroporplatte gewählt, die in den Fahrweg klappte, um das Verletzungsrisiko im Falle eines nicht rechtzeitigen

Bremsens zu minimieren. Durch den gewählten Versuchsaufbau konnte der Überraschungseffekt nur bedingt nachgestellt werden. Das Anwendungsszenario der sich öffnenden Fahrzeurtür konnte jedoch verdeutlicht werden. Die Testerinnen und Tester sollten vor jedem Hindernis selbst entscheiden, ob sie bremsen und/oder ausweichen wollten. Im anschließenden Fragebogen sollten sie beurteilen, ob das Assistenz- und Warnsystem zu ihrer Zufriedenheit gearbeitet hat oder nicht.



Abbildung 22: Dynamisches Hindernis bei den Testfahrten der Frontalkollisionswarnung (Quelle: eigene Darstellung)

Die Spurverlassenswarnung wurde in ähnlicher Weise getestet. Anstatt auf Hindernisse zuzufahren sollten die Testerinnen und Tester auf der um den Sportplatz umlaufenden Bahn fahren. Sobald sie sich einer Bahnbegrenzungslinie näherten oder darüber fuhren, wurde eine Warnung ausgegeben, die Fahrtrichtung zu überprüfen.

Das System zur Warnung vor rückwärtigen Fahrzeugen wurde im realen Straßenverkehr auf einer schwach befahrenen Straße (StVO, maximale Verkehrsstärke 80 KFZ/h) auf dem Campus getestet. Da das System auf Radarmessungen basiert, werden ausschließlich Fahrzeuge (keine Fahrräder oder Fußgänger) erkannt. Die Anzahl und der Abstand der folgenden Fahrzeuge wird auf einem Display an der Lenkstange angezeigt. Die Probanden sollten im Nachhinein ihre Erfahrungen im Fragebogen festhalten.

Die lichttechnischen Systeme (Fahrtrichtungsanzeiger, Markierungslichter, Bremslicht) wurden nicht durch eine Testfahrt, sondern im Stand beurteilt. Zu jedem vorgestellten System sollten die Probanden angeben, ob dadurch die Sichtbarkeit und Sicherheit des Radfahrers erhöht wird.

Ebenso sollten sie beurteilen, ob sie sich durch die alltägliche Nutzung des jeweiligen Systems gestresster oder entspannter bzw. sicherer oder unsicherer fühlen würden. Abschließend sollte die Größe, Helligkeit (in Dunkelheit) und die Montageposition beurteilt werden.

Der Versuchsträger, mit dem die Probanden den Parcours durchfahren haben, war neben den Assistenzsystemen mit zahlreichen Sensoren ausgestattet. Diese haben die Beschleunigung und Geschwindigkeit über die Raddrehzahl, die Schräglage über ein 9-Achsen-Gyroskop, den Lenkwinkel mittels dafür vorgesehenem Sensor sowie die Stellung der Bremshebel gemessen, sodass der Zeitpunkt eines Verzögerungsbeginns und -endes erfasst werden konnte. Ebenso wurden Daten von der Strecke erfasst, wie Abstände und Bremswege. Diese Daten wurden während allen Testfahrten kontinuierlich auf einer SD-Karte gespeichert und konnten im Nachhinein exakt ausgewertet werden. Zur Bewertung der Systeme wurde ein Fragebogen in persönlichen Interviews mit den Probanden ausgefüllt. Der Fragebogen zur Beurteilung der Systeme ist vollständig im Anhang A.2 beigelegt. Die Ergebnisse der Auswertungen der Log-Daten sowie der Fragebögen werden in den folgenden Abschnitten ausführlich und detailliert dargestellt.

## 2.5.2. Ergebnisse der Befragung

### Grundgesamtheit

Im Folgenden werden einige Grafiken vorgestellt, die die Ergebnisse der Auswertung zeigen. Die Balken geben dabei immer die prozentualen Anteile, die Beschriftungen die absoluten Werte an.

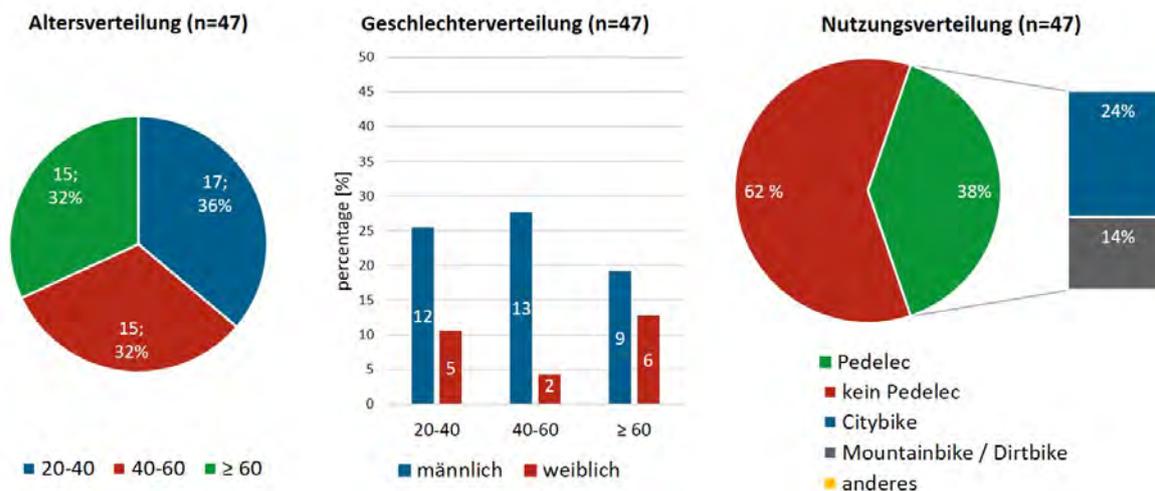


Abbildung 23: Alters- und Geschlechterverteilung

Innerhalb der vier Testwochen haben 47 Menschen an der Probandenstudie teilgenommen (vgl. Abbildung 23). Von den Testteilnehmern besitzen 38% ein Pedelec und 62% ein Fahrrad ohne E-Motor. Bei den Pedelecbesitzern gaben 63% an, ein entsprechendes Citybike zu besitzen. Die anderen 37% gaben an ein Mountainbike mit E-Motor zu besitzen. Es gab keine Probanden, die weder ein Fahrrad noch Pedelec besitzen. Jeweils ungefähr ein Drittel der Personen ist zwischen 20 und 39 Jahre, zwischen 40 und 59 sowie über 60 Jahre alt. Drei Viertel ist männlich (72%), ein Viertel weiblichen Geschlechts. Die Mehrheit männlicher Teilnehmer ist auch innerhalb der jeweiligen Altersklassen wiederzufinden.

## Nutzungsmuster

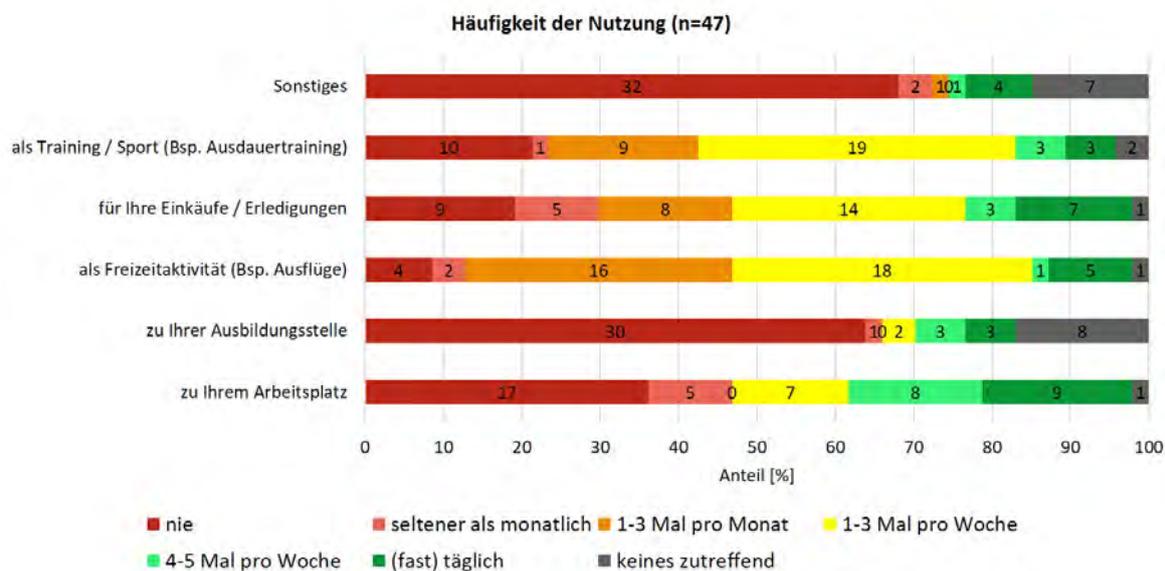


Abbildung 24: Häufigkeit der Nutzung

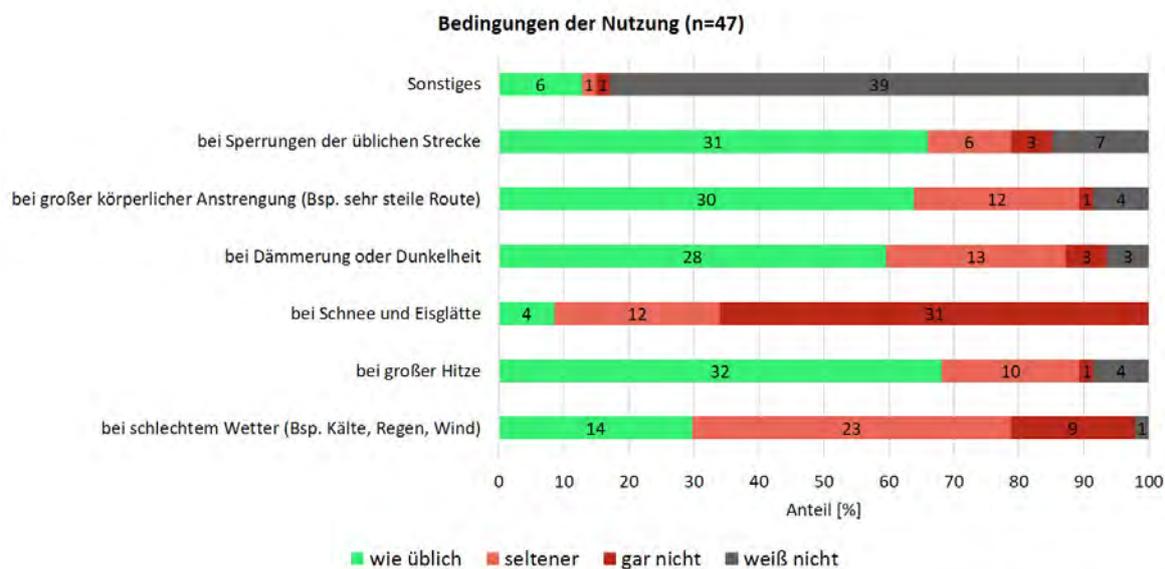


Abbildung 25: Bedingungen der Nutzung

Die Probanden nutzen ihr Zweirad hauptsächlich für Fahrten zum Arbeitsplatz (36% min. vier Mal pro Woche, 51% min. einmal pro Woche) und zur Erledigung von Einkäufen (21% min. vier Mal pro Woche, 51% min. einmal pro Woche). Mindestens einmal pro Woche wird das Rad bzw. Pedelec zusätzlich in der Freizeit (51%) oder als Sportgerät (53%) genutzt. Ebenso ist ein hoher Anteil von zwei Dritteln festzustellen, der das Rad nie für die Fahrt zur Ausbildungsstelle nutzt (vgl. Abbildung 24).

Mehr als die Hälfte (57%) der Teilnehmerinnen und Teilnehmer fährt zwischen 500 und 2.500 Kilometer pro Jahr, die durchschnittliche Dauer eines Weges variiert dabei stark. Durch die Studie wurden also vorrangig fahrradaffine Menschen erreicht, die viele Kilometer im Jahr fahren und gegenüber ungeübten Fahrradfahrerinnen und Fahrradfahrern ggf. geschulter auf Assistenzsysteme reagiert haben. Die meisten brauchen für ihren alltäglichen Weg mehr als 40 Minuten (34%). Der zweitgrößte Anteil fährt einen Weg in unter zehn Minuten (28%). Die verbleibenden Teilnehmerinnen und Teilnehmer haben ungefähr zu gleichen Teilen durchschnittliche Fahrzeiten von bis zu 20 Minuten (15%), bis zu 30 Minuten (9%) und bis zu 40 Minuten (13%) angegeben.

Bezüglich der Bedingungen und Voraussetzungen für die Nutzung des Fahrrads oder Pedelecs hat sich gezeigt, dass große Hitze, Dunkelheit, Steigungen oder Sperrungen auf der Strecke bei über 50% der Teilnehmenden keinen Einfluss auf die Verkehrsmittelwahl haben. Bei schlechtem Wetter, wie Kälte oder Regen, sowie bei Schnee und Eisglätte nutzen nur noch 14% bzw. 4% das Rad wie üblich. Der Großteil gab an, dann auf andere Verkehrsmittel auszuweichen (vgl. Abbildung 25).

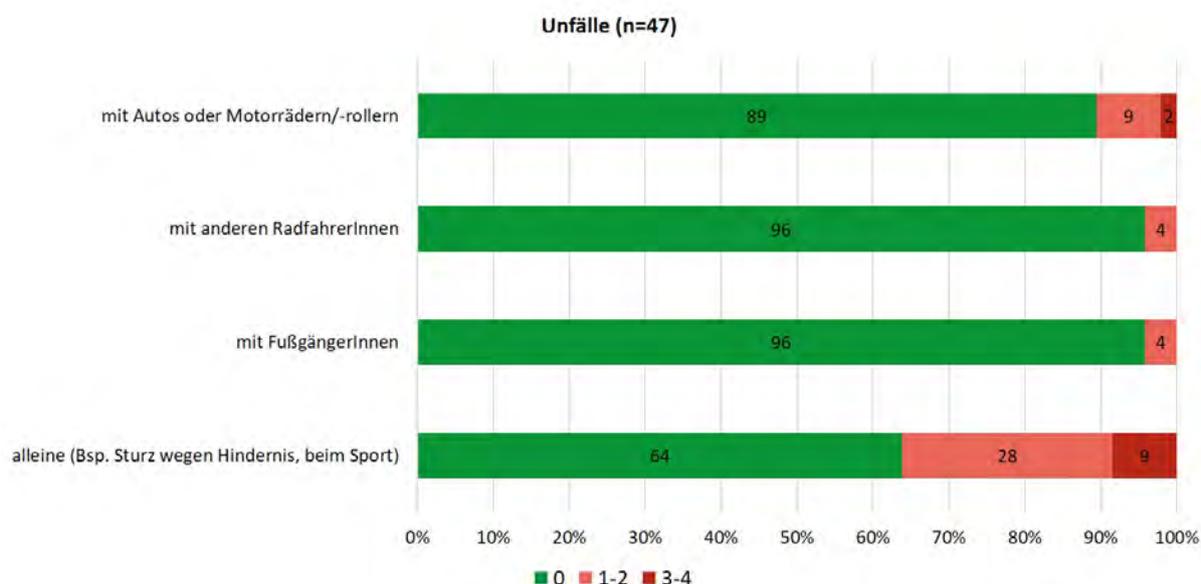


Abbildung 26: Unfallgeschehen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer

Die Befragung der Nutzer nach bisherigen Unfällen hat ergeben, dass nur ca. 5% Unfälle mit anderen Radfahrern oder Fußgängern, bzw. ca. 10% Unfälle mit PKWs in den letzten zwei Jahren erlitten hat. Die Zahl der Alleinunfälle (min. ein Alleinunfall pro Proband) liegt auf einem höheren Niveau bei knapp 40%, die mindestens einen Unfall dieser Kategorie hatten (vgl. Abbildung 26).

Zur Durchführung der Testfahrten wurden den Probanden Pedelecs zur Verfügung gestellt, die mit den diversen Assistenzsystemen ausgestattet waren. Mehr als die Hälfte kam dabei mindestens gleich gut mit den Testrädern zurecht wie mit dem eigenen Fahrrad oder Pedelec (vgl. Abbildung 27). In die Bewertung einbezogen wurden die Punkte Gewicht, Beschleunigung, Bedienung, Sitzposition, Komfort und Handling. Die folgende Grafik zeigt die einzelnen Bewertungen

dieser Punkte. Vor allem im Punkt Beschleunigung hat das Versuchspedelec zu 55% besser abgeschnitten als das jeweils eigene Rad, in Puncto Gewicht eher schlechter oder zu 51% gleich gut. Die verbleibenden Kriterien wurden zum Großteil als gleich gut bewertet.

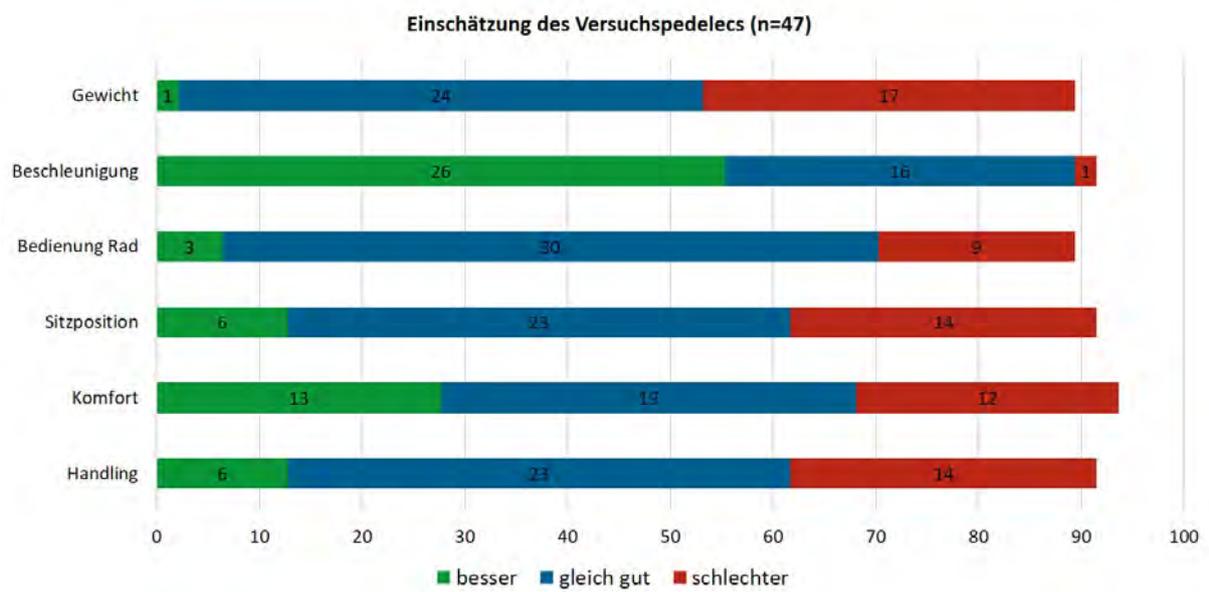


Abbildung 27: Einschätzung des Versuchspedelecs

## Fahrerassistenzsysteme - Vergleichende Bewertung

Die Frage nach der Kenntnis von Fahrerassistenzsystemen konnten nahezu alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer positiv beantworten (siehe Abbildung 28). Da ein Proband hier mehrere Antworten angeben konnte, werden hier lediglich die absoluten Zahlen beschrieben. 46 Testpersonen kennen demnach das Antiblockiersystem (ABS) und das elektronische Stabilitätsprogramm (ESP) aus dem Automobilssektor. Jeweils mehr als 30 Personen sind Abstandssensoren, der Notbremsassistent, Lichtassistent und die Müdigkeitserkennung bekannt. Den Lenk- und Spurwechselassistent kennen jeweils 27 Personen. Lediglich eine Person kannte keine Assistenzsysteme.

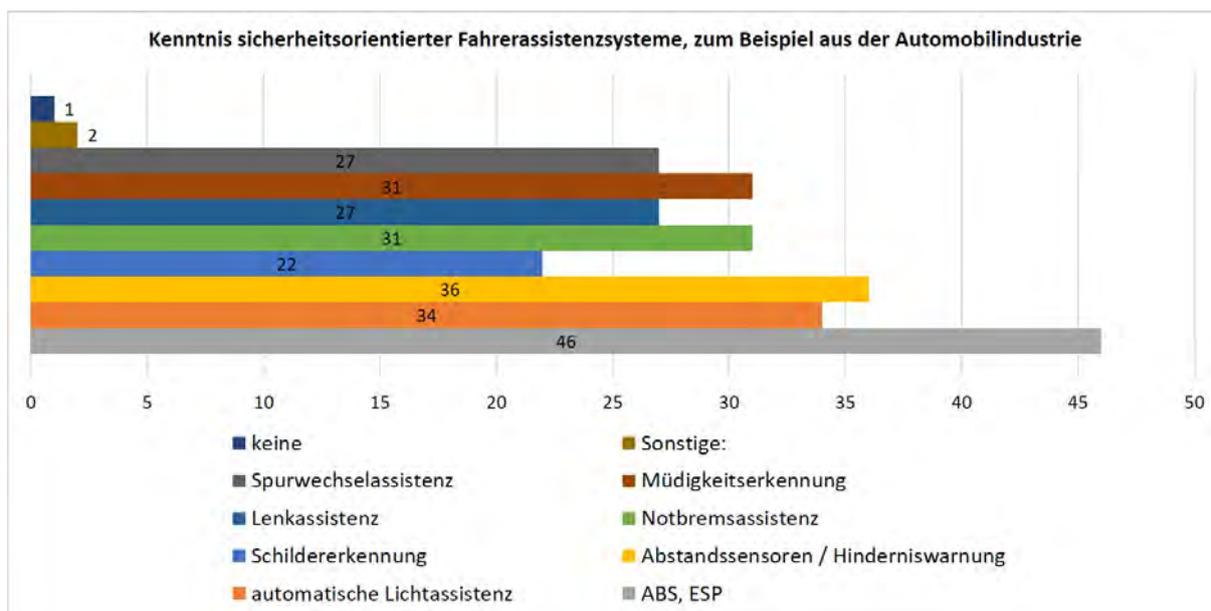


Abbildung 28: Kenntnis sicherheitsorientierter Fahrerassistenzsysteme

Jedes der aktiven Assistenzsysteme wurde separat in seinem jeweiligen Anwendungsfeld getestet. Dabei wurde zwischen der Frontalkollisionswarnung, der Spurverlassenswarnung und der rückwärtigen Annäherungswarnung unterschieden. Zudem wurden passive Systeme zur lichttechnischen Einrichtung eines Rades untersucht. Hierbei wurden zwei Fahrtrichtungsanzeiger (ugs. „Blinker“, ein Kaufprodukt und ein Eigenbauprodukt), ein Bremslicht und zwei Markierungslichter unterschieden. Nach jedem Test wurden Fragen zur Zuverlässigkeit, zum Stresslevel und zum Sicherheitsgefühl gestellt. Ebenso wurden auch Warnzeitpunkte und -intensitäten abgefragt. Zur besseren Vergleichbarkeit der Systeme untereinander wurden diese Fragen identisch gestellt. Darauf aufbauend gab es für jedes Assistenzsystem spezielle Fragen, die anschließend genauer erläutert werden.

Im Folgenden werden die Auswertungen zur Zuverlässigkeit, zum Sicherheitsgefühl sowie zum Stresslevel als Vergleich der Assistenzsysteme vorgestellt.

**Zuverlässigkeit** Die Mehrheit der Teilnehmer hat die Systeme als zuverlässig bewertet (vgl. Abbildung 29). Am besten abgeschnitten hat dabei die rückwärtige Annäherungswarnung, die von 73% der Teilnehmerinnen und Teilnehmer positiv bewertet wurde (30% sehr zuverlässig, 43% zuverlässig), gefolgt von der Frontalkollisionswarnung mit 62% zuverlässigen Bewertungen (0% sehr zuverlässig), aber auch 30% eher nicht zuverlässigen Stimmen. Die Spurverlassenswarnung wurde von 53% als zuverlässig und sehr zuverlässig bewertet, 28% stimmten jedoch auch für eher nicht und nicht zuverlässig ab. Die lichttechnischen Systeme wurden aufgrund ihrer passiven Funktionsweise nicht zum Thema Zuverlässigkeit bewertet.

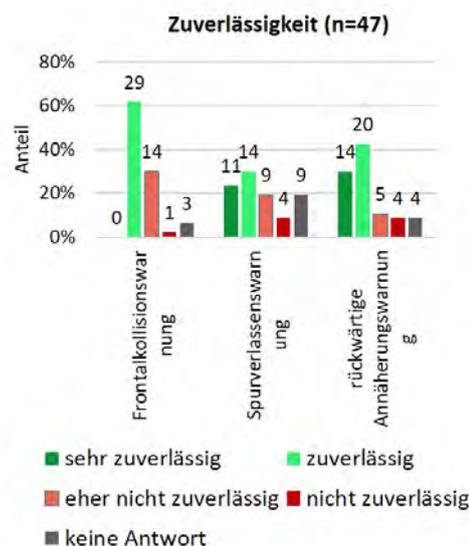


Abbildung 29: Zuverlässigkeit der Assistenzsysteme

**Sicherheitsgefühl** Die aktiven Sicherheitssysteme (Frontalkollisionswarnung, Spurverlassenswarnung und rückwärtige Annäherungswarnung) wurden zu über 50% neutral bewertet. Die Mehrheit gab an, dass sie sich durch die Nutzung der Systeme weder sicherer, noch unsicherer gefühlt hat (siehe Abbildung 30). Jeweils ca. 25% der Befragten haben angegeben, dass sich das Sicherheitsgefühl durch die Systeme erhöht hat. Keiner der Testerinnen und Tester hat sich durch den Einsatz der Systeme besonders unsicher gefühlt, wenige fühlten sich leicht unsicherer mit Einsatz als ohne Einsatz eines Systems (6% durch die Frontalkollisionswarnung, 9% durch die Spurverlassenswarnung, 2% durch die rückwärtige Annäherungswarnung). Die lichttechnischen Systeme wurden besser bewertet, jeweils ca. 60% der Teilnehmerinnen und Teilnehmer hat angegeben, sich durch den Einsatz von Fahrtrichtungsanzeigern, eines Bremslichts oder Markierungslichtern sicherer oder viel sicherer zu fühlen. Jeweils ca. 20% fühlten sich neutral, also weder sicherer noch unsicherer. Jeweils ca. 5% fühlten sich beim Einsatz beider Arten an Fahrtrichtungsanzeigern unsicherer, beim Brems- und Markierungslicht waren es 0%. Die verbleibenden ca. 10-15% haben keine Antwort gegeben.

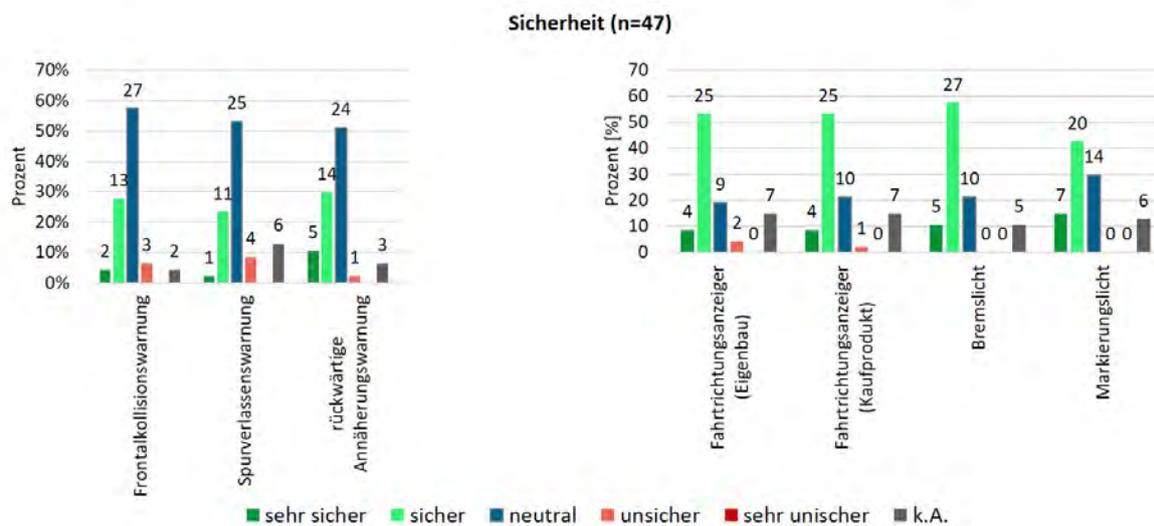


Abbildung 30: Sicherheitsgefühl bei Nutzung der Assistenzsysteme

**Stresslevel** Die Mehrheit der Teilnehmerinnen und Teilnehmer fühlte sich durch den Einsatz der aktiven Systeme weder gestresster noch entspannter, also neutral (38% bei der Frontalkollisionswarnung, 34% bei der Spurverlassenswarnung und 45% bei der rückwärtigen Annäherungswarnung). Während der Nutzung der Frontalkollisionswarnung fühlen sich 23% der Probanden gestresster, als ohne. Ebenso viele fühlen sich entspannter mit System, als ohne. Bei der Nutzung der Spurverlassenswarnung war das gleiche Ergebnis festzustellen (jeweils ca. 18%). Durch die Nutzung der rückwärtigen Annäherungswarnung fühlten sich die Teilnehmer eher entspannter (4% gestresster und 32% entspannter). Sehr entspannt fühlten sich jeweils ca. 12% der Tester bei der Frontalkollisionswarnung und der rückwärtigen Annäherungswarnung. Es gaben 6% der Befragten an, sich bei der Spurverlassenswarnung entspannt zu fühlen. 11% der Probanden hat sich durch die Nutzung der Spurverlassenswarnung jedoch sehr gestresst gefühlt (vgl. Abbildung 31).

Die passiven, lichttechnischen Systeme erhielten auch hier bessere Bewertungen als die aktiven. Jeweils ungefähr die Hälfte der Teilnehmerinnen und Teilnehmer fühlte sich entspannt oder sehr entspannt durch deren Nutzung. Jeweils ca. 20 bis 26% der Befragten fühlten sich neutral und nur 6 bis 8% fühlten sich gestresst, hierbei entfallen die meisten Stimmen auf den Fahrtrichtungsanzeiger (Kaufprodukt) und die Markierungslichter. Der Anteil an Personen, die diese Frage nicht beantwortet haben, lag bei ca. 20%.

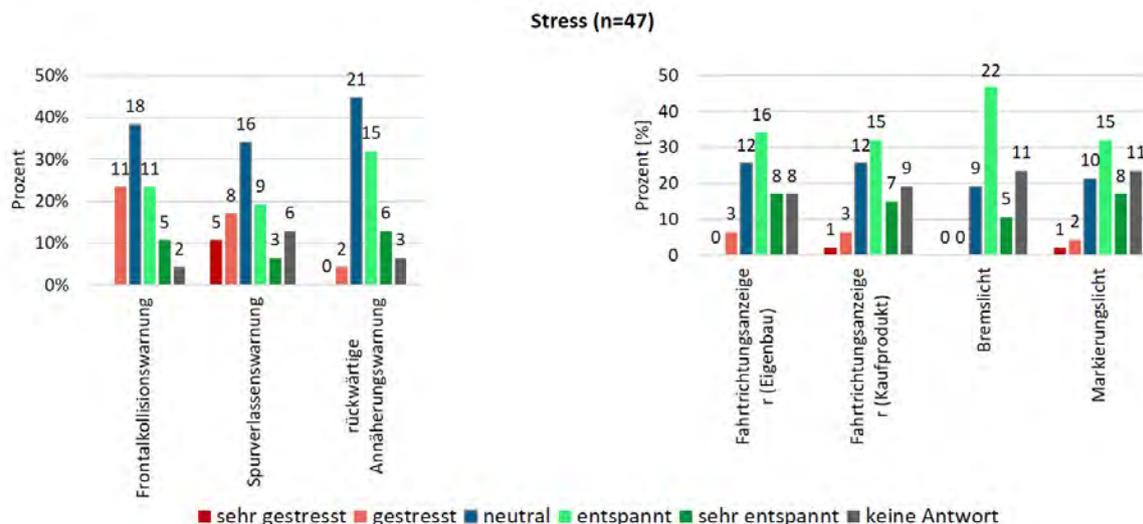


Abbildung 31: Stresslevel bei Nutzung der Assistenzsysteme

### Fahrerassistenzsysteme - Spezielle Bewertung aktive Systeme

Im Folgenden werden systemspezifische Auswertungen aus der Probandenstudie detailliert vorgestellt. Die Abbildungen enthalten fortan lediglich prozentuale Anteile.

**Zeitpunkt der Warnung** Für die aktiven Systeme wurde der Zeitpunkt der Warnung bewertet. Dieser ist zwar über das Smartphone individuell einstellbar, wurde jedoch aufgrund zeitlicher Restriktionen im Testablauf nicht verändert. Die Ergebnisse sind demnach als subjektive Bewertungen des voreingestellten mittleren Warnzeitpunkts zu verstehen und liefern keine Aussage über die grundsätzliche Wirksamkeit des Systems. Die Ergebnisse werden jedoch dazu genutzt, die Einstellungen zum Warnzeitpunkt anzupassen und weiterzuentwickeln.

45% der Teilnehmenden haben für die Frontalkollisionswarnung angegeben, dass die Warnung rechtzeitig erscheint (siehe Abbildung 32). Bei der Spurverlassenswarnung waren es 54%, bei der rückwärtigen Annäherungswarnung sogar drei Viertel. Die Ausgabe der Frontkollisionswarnung kam laut Angabe von über der Hälfte der Testerinnen und Tester zu spät, die Warnung vor dem Verlassen der Fahrspur nur in den Augen von knapp einem Viertel. Ebenso viele sagen aber auch, dass die Warnung hier zu früh kam. 15% der Befragten gaben an, dass die Warnung bei der rückwärtigen Annäherungswarnung zu früh ausgelöst wurde. Dem gegenüber steht, dass 10% der Befragten angaben, dass die Warnung zu spät ausgegeben wurde.

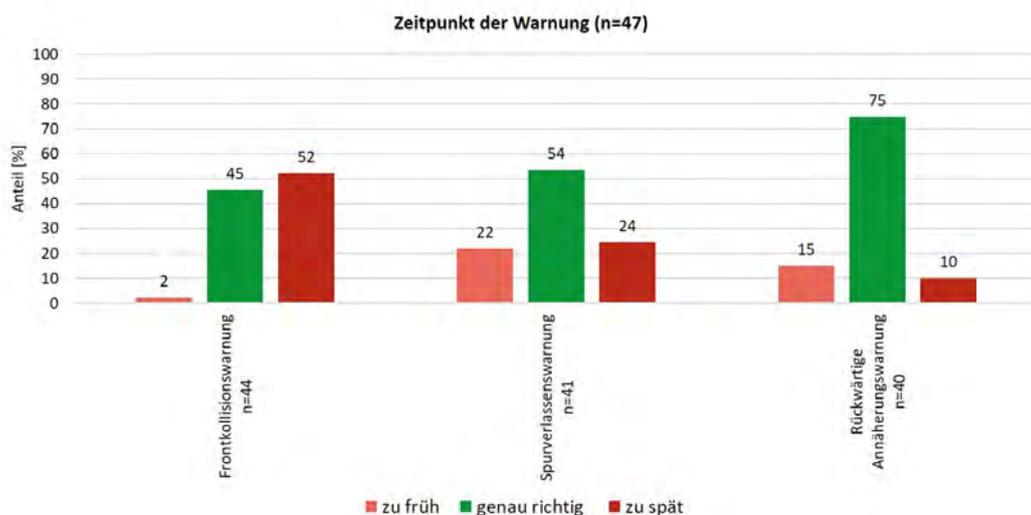


Abbildung 32: Zeitpunkt der Warnung

**Intensität der Warnung** Ebenso wurde auch die Intensität der Warnungen vor einer Frontalkollision und vor dem Verlassen der Fahrspur bewertet. Diese ist, wie auch der Zeitpunkt der Warnung, über das Smartphone einstellbar, wurde jedoch aus den selben Gründen während der Testfahrten ebenfalls nicht verändert. Die Ergebnisse der Auswertung liefern wichtige Tendenzen hinsichtlich der Wirksamkeit einzelner Warnelemente. Eine Warnung wird immer zeitgleich auf drei verschiedenen Kanälen ausgegeben: optisch, haptisch und akustisch. Aus zeitlichen Gründen wurde auf separate Tests der Warnelemente verzichtet. Die Bewertungen sollen zeigen, welche der Elemente wirksam sind bzw. welche aus Nutzersicht vernachlässigt werden können.

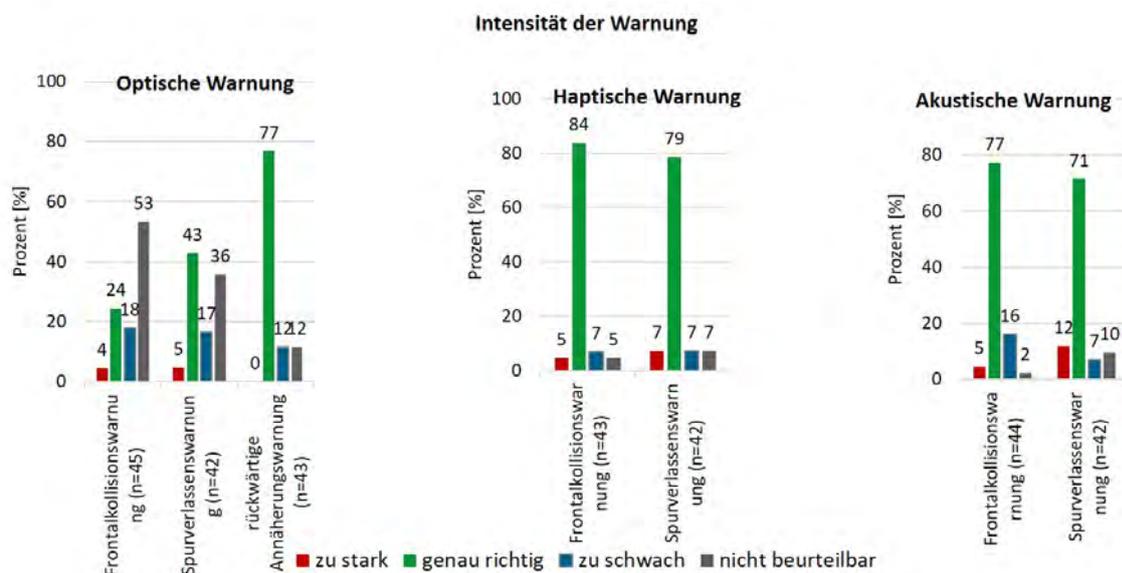


Abbildung 33: Intensität der Warnung

In Abbildung 33 zeigt sich für beide Systeme folgendes klare Bild. Die akustische Warnung in Form eines Signaltons sowie die haptische Warnung durch Vibrationsgeber in den Griffen des Fahrrades erhält eine bessere Bewertung als die optische Warnung in Form eines Hinweises auf

einem Display am Lenker. Die haptische und akustische Warnung wird für beide Systeme mit jeweils zwischen 70% und 80% als genau richtig bewertet. Die haptische Warnung wird von jeweils unter 10% der Teilnehmer als zu stark oder zu schwach bewertet. Bei der akustischen Warnung sind die Anteile teilweise etwas höher (5 bzw. 12% zu stark, 16 bzw. 7% zu schwach für die Frontalkollisionswarnung bzw. Spurverlassenswarnung). Die optische Warnung wurde bei beiden Systemen von sehr vielen Teilnehmerinnen und Teilnehmern nicht wahrgenommen. Bei der Frontalkollisionswarnung haben 53%, bei der Spurverlassenswarnung 36% angegeben, dass sie die optische Anzeige nicht beurteilen können. Die Probanden haben angegeben, dass sie die Anzeige während der Fahrten nicht wahrgenommen haben. Bei der Kollisionswarnung haben 24% angegeben, dass die Warnung genau richtig, 18% gaben an, dass sie zu schwach sei. Die Spurverlassenswarnung haben 43% als genau richtig und 17% als zu schwach bewertet. Der Anteil an Probanden, der die optische Anzeige als zu stark empfunden hat, liegt für beide Systeme bei ca. 5%.

Zusätzlich wurde die optische Anzeige der rückwärtigen Annäherungswarnung bewertet. Hier lässt sich ein gegenteiliges Bild zu den beiden erstgenannten Systemen feststellen. 77% der Teilnehmerinnen und Teilnehmer hat die LED-Anzeige am Lenker als genau richtig empfunden, keiner als zu stark und jeweils 12% für zu schwach bzw. nicht beurteilbar. Die bessere Bewertung der optischen Anzeige der rückwärtigen Annäherungswarnung im Vergleich zu den beiden aktiven Assistenzsystemen kann darin begründet sein, dass die Annäherungswarnung lediglich die optische Anzeige bedient. Wären hier zusätzlich akustische oder haptische Warnelemente verfügbar gewesen, hätte sich vermutlich ein anderes Bewertungsbild ergeben.

Es zeigt sich also das Bild, dass während der Fahrt die Anzeige einer Warnung auf einem Display am Lenker nur schlecht wahrgenommen wird, wenn es zusätzlich andere Warnfunktionen gibt. Die Vibration in den Griffen oder der Signalton werden hier besser wahrgenommen, ohne dass der Blick von der Straßen gewandt werden muss.

**Zuverlässigkeit der Messungen** Durch ein Schulnotensystem von 1 (sehr gut) bis 6 (ungenügend) wurde die Zuverlässigkeit der Messungen und Warnungen bewertet. Dabei ist anzumerken, dass sich die Bewertungen auf die konkreten getesteten Systeme beziehen. Nach technischen Verbesserungen könnten sich hier gegebenenfalls andere Aussagen ergeben. In der folgenden Abbildung 34 ist zu erkennen, dass alle drei Systeme mehrheitlich mit den Noten 1 bis 3 (sehr gut, gut und befriedigend) bewertet wurden. Ungefähr 10% der Teilnehmerinnen und Teilnehmer hat die Note 4 (ausreichend) vergeben, etwa genauso wenige die Noten 5 und 6 (mangelhaft und ungenügend). Auffallend ist ebenso, dass fast die Hälfte der Probanden sich hier der Stimme enthalten hat („k.A.“ = keine Angabe). Eine Begründung hierfür lässt sich in der abstrakten Fragestellung und im vergleichbar hohen zeitlichen Aufwand zur Beantwortung der Frage vermuten.

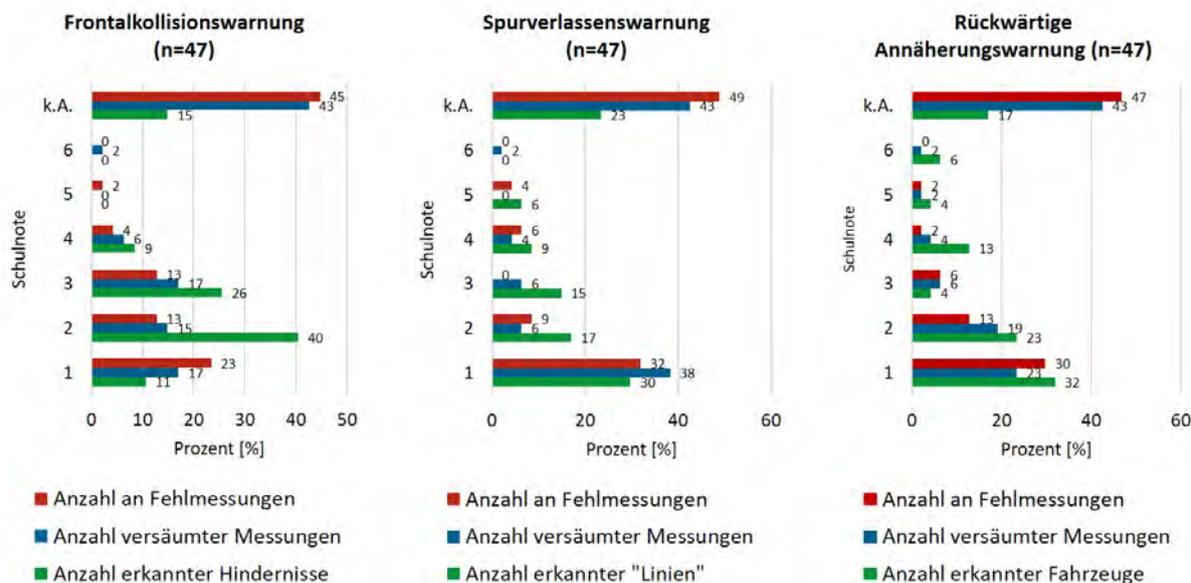


Abbildung 34: Zuverlässigkeit der Assistenzsysteme

Bei der Bewertung wurden drei Kategorien unterschieden, die jeweils mit einer Note versehen wurden: die Anzahl an Fehlmessungen (Warnung ohne Hindernis), die Anzahl versäumter Messungen (Hindernis nicht erkannt) sowie die Anzahl korrekt erkannter Hindernisse.

Für die Anzahl an Fehlmessungen der Frontalkollisionswarnung wurde von den Befragten zu 23% die Note 1 und zu jeweils 13% die Noten 2 und 3 vergeben. Dieses Ergebnis ist so zu interpretieren, dass das System während der Testfahrten wenige Fehlmessungen hatte. Der Anteil an Probanden, der in diesem Punkt keine Bewertung abgegeben hat, liegt bei 45%. Die Anzahl an versäumten Messungen wurde ähnlich bewertet: Jeweils 15-17% haben hierfür die Noten 1, 2 oder 3 vergeben. Die Anzahl an Teilnehmerinnen und Teilnehmern, die keine Bewertung abgegeben haben, liegt auch hier bei ähnlich hohen 43%. Für die Anzahl erkannter Hindernisse wurde die Bestnote 1 von 11%, die Note 2 von 40% und die Note 3 von 26% der Teilnehmenden vergeben. Im Ergebnis wurden Hindernisse also in der Regel gut erkannt. Ein im Vergleich wesentlich geringerer Anteil von 15% hat hierzu keine Bewertung abgegeben.

Die Spurverlassenswarnung hat im Vergleich zum erstgenannten System besser abgeschnitten. Jeweils über 30% der Teilnehmenden haben für die Anzahl an Fehlmessungen, versäumter Messungen und erkannter Linien bzw. Fahrstreifenbegrenzungen (Grasnarbe, Gehwegkante, ...) die Bestnote 1 vergeben. Für die Anzahl erkannter Linien wurden von 17% bzw. 18% ebenso die Noten 2 bzw. 3 vergeben, von 6% allerdings auch die Note 5. Die verbleibenden Teilnehmerinnen und Teilnehmer haben sich der Bewertung enthalten.

30% der Probanden haben die Anzahl an Fehlmessungen der rückwärtigen Annäherungswarnung mit der Note 1 bewertet. Weitere 13% haben die Note 2 vergeben, 6% die Note 3 und jeweils 2% die Noten 4 und 5. Die verbleibenden Teilnehmerinnen und Teilnehmer haben keine Bewertung abgegeben. Die Anzahl an versäumten Messungen wurde zu 42% mit mindestens gut bewertet. Hier haben sich 43% der Testerinnen und Tester der Bewertung enthalten. Die Anzahl an korrekt erkannten Hindernissen wurde zu 32% mit sehr gut, zu 23% mit gut bewertet. 13% haben hier die Note 4, 4% die Note 5 und weitere 6% sogar die Note 6 vergeben. Nur 17% haben sich der

Bewertung enthalten. Für den Großteil der Teilnehmerinnen und Teilnehmer hat das System also gute bis sehr gute Ergebnisse erzielt, einzelne mangelhafte und ungenügende Ergebnisse trüben das positive Ergebnis jedoch.

Der Fragebogen enthielt neben den vorgestellten Bewertungen auch Platz für Freitext. Hier konnten Probleme und Anregungen sowie positive oder negative Eigenschaften der Systeme angegeben werden. Im Folgenden werden die am meisten genannten Antworten vorgestellt.

**Probleme während der Testfahrten** Die mit 19% am meisten genannte Anregung nach einer Testfahrt mit der Frontalkollisionswarnung war, dass die Genauigkeit des Warnzeitpunktes verbessert werden sollte. Ebenso sollte der Warnzeitpunkt einstellbar sein (beispielsweise früh, mittel, spät). 15% der Testerinnen und Tester geben an, dass das Assistenzsystem vor allem in Kurvenfahrten zu Fehlern in der Detektion und Warnung neige. Jeweils 6% haben angegeben, dass die Warnung zu kurz sei, um sie richtig zu erkennen, dass das Display zur optischen Anzeige der Warnung nicht gebraucht werde und dass der Warnton teilweise zu schwach wäre, was sich in den Bewertungen der einzelnen Warnstrategien auch widerspiegelt hat.

Die häufigste Anregung zur Weiterentwicklung der Spurverlassenswarnung war, dass die Warnung teilweise auf der falschen Seite ausgegeben wurde. Hier seien noch Nachbesserungen in der Detektion der Fahrspurbegrenzung erforderlich. Ebenso viele (19%) gaben den Hinweis, dass der Warnzeitpunkt auch bei diesem System einstellbar sein sollte. Auch hier wurde das Display als die am wenigsten erforderliche Warnstrategie empfunden. Des Weiteren wurde angegeben, dass das System ein- und ausschaltbar sein sollte und vor allem im Kurvenbereich noch fehleranfällig sei.

Bei der rückwärtigen Annäherungswarnung wurde kritisiert, dass einige Fahrzeuge nicht erkannt wurden, der Warnzeitpunkt entweder zu früh oder zu spät war und nicht einstellbar sei sowie auch, dass das Display nicht die optimale Lösung zur Warnung darstelle und eine akustische oder haptische Warnung als Ersatz oder Zusatz besser wäre. Zudem wurde angemerkt, dass das Display eine ablenkende Eigenschaft habe und dass die Punkte, die die Fahrzeuge symbolisieren, zu schnell vom Display verschwinden würden.

Diese Anregungen und Kommentare stellen einen wichtigen Input im Forschungsprojekt dar. Die Arbeiten und Nachjustierungen befinden sich derzeit in Arbeit, um die Systeme für Nutzer zu verbessern und weiterzuentwickeln.

**Positive und negative Eigenschaften der Systeme** Die Detektion und Warnung von Hindernissen hat ein gegenteiliges Meinungsbild ergeben. Einerseits wurde positiv hervorgehoben, dass die Warnungen bei der Frontalkollisionswarnung rechtzeitig erscheinen würden und dass das haptische Vibrationsfeedback angenehm spürbar sei. Andererseits zählt zu den am meisten genannten negativen Punkten, dass Hindernisse nicht richtig erkannt wurden und der Zeitpunkt der Warnung schlecht gewählt wäre. Hier lässt sich die stark subjektive Wahrnehmung erkennen, die sich je nach Fahrstil und Erfahrungsschatz im Straßenverkehr unterscheidet. Was für manche Testerinnen und Tester positiv wahrgenommen wurde, stellt für andere einen negativen Punkt dar. Dies unterstreicht die Notwendigkeit der Weiterentwicklung hinsichtlich der Einstellmöglichkeiten der Warnzeitpunkte und Detektionsgenauigkeit.

Als weiterer positiver Punkt der Frontalkollisionswarnung wurde die Bedienung des Systems per Smartphone lobend erwähnt. Negativ wurde das Ablenkungspotenzial und die damit verbundene Unsicherheit empfunden. Zudem wurde auch hier das Display als negativer Faktor des Systems aufgeführt, da es im hellen schlecht lesbar und aufgrund der akustischen und haptischen Warnung nicht notwendig sei.

Die Spurverlassenswarnung wird vor allem im Stadtverkehr als sinnvoll angesehen. Wie auch bei der Frontalkollisionswarnung ist der Warnzeitpunkt gleichzeitig ein positiver wie auch einer der am meisten genannten negativen Punkte. Während ihn manche Teilnehmerinnen und Teilnehmer lobend beschrieben, wird von anderen eine zu späte oder unterlassene Warnung kritisiert. Positiv wurde dabei hauptsächlich die Funktion hervorgehoben, dass die Warnung nur auf der kritischen Seite auslöst, was aber auch hier gleichzeitig einen Kritikpunkt dargestellt hat, wenn die Warnung auf der falschen Seite ausgelöst wurde. Ebenfalls negativ wurden der Warnton und das Display genannt, welche laut Aussagen der Testenden nicht notwendig seien, solange das haptische Feedback vorhanden ist.

Bei den Tests der rückwärtigen Annäherungswarnung wurde positiv hervorgehoben, dass Fahrzeuge vor allem bei Abbiegevorgängen des Radfahrers sowie auch überholende Fahrzeuge gut erkannt wurden. Gleichzeitig gab es zu diesem Punkt auch negative Meinungen, dass Fahrzeuge nicht erkannt oder falsch angezeigt wurden, dass Fahrräder nicht erkannt werden und allgemein die Zuverlässigkeit des Systems in Frage gestellt werden müsse. Ebenso gab es auch ein unterschiedliches Meinungsbild beim Display. Während einige Testerinnen und Tester lobend vermerkten, dass das Display gut im Blickfeld sei und die Differenzierung der Gefahrenstufen durch unterschiedliche Färbungen hervorhoben, merkten andere an, dass die optische Anzeige als alleinige Warnung nicht gut sei und durch akustische und haptische Elemente erweitert werden sollte, dass Entfernungsangaben fehlten und allgemein ein hohes Ablenkungspotenzial vorhanden sei.

## Fahrerassistenzsysteme - Spezielle Bewertung passiver Systeme

Da die lichttechnischen Systeme keine aktiven Sensoren zur Detektion besitzen, wurden sie in den Punkten Lage und Höhe am Fahrrad bzw. Pedelec sowie Größe und Leuchtkraft der Systeme bewertet. Die Bewertungskategorien werden in den Abbildungen 35ff. gezeigt. Bei dieser speziellen Bewertung wurde zwischen den beiden Fahrtrichtungsanzeigern (Eigenbau und Kaufprodukt), dem Bremslicht und den beiden Markierungslichtern (kreisförmige und linienhafte Projektion) unterschieden. Ziel der Bewertung ist es, Aussagen zur Sicherheit und Sichtbarkeit der Fahrräder bzw. Pedelecs im Straßenverkehr zu gewinnen.

**Fahrtrichtungsanzeiger Eigenbau** Der Fahrtrichtungsanzeiger besteht aus zwei Leuchten, die an beiden Seiten des hinteren Endes des Gepäckträgers angebracht sind. Sie werden über zwei separate Taster an beiden Griffen angesteuert.

Diese Lage wurde von 57% der Teilnehmerinnen und Teilnehmer als gut bewertet, 6% fanden die Lage schlecht. Weitere 6% fanden die Lage der Fahrtrichtungsanzeiger nicht relevant. Die verbleibenden Probanden haben sich der Bewertung enthalten. Die Größe der zwei Leuchten haben 57% als genau richtig empfunden, 17% fanden sie zu klein, 2% zu groß. 40% der Teilnehmenden haben die Leuchtkraft als zu dunkel, 37% als genau richtig bewertet. Niemand hat die Leuchten als zu hell empfunden. Der Großteil der Teilnehmerinnen und Teilnehmer (57%) fand die Höhe der Fahrtrichtungsanzeiger nicht relevant zur Beurteilung der Sicherheit. 6% hat sie als zu tief, 10% als genau richtig bewertet.

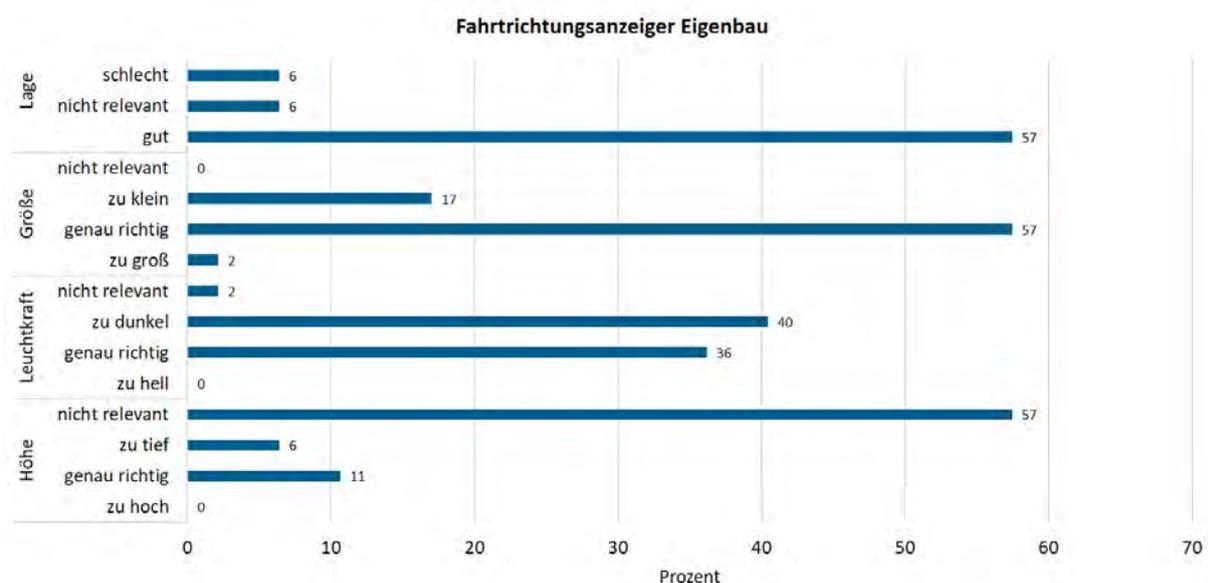


Abbildung 35: Bewertung des Fahrtrichtungsanzeigers (Eigenbauprodukt)

**Fahrtrichtungsanzeiger Kaufprodukt** Der Fahrtrichtungsanzeiger besteht im Gegensatz zur Eigenentwicklung aus einem Modul, das die Leuchten für die Richtungsanzeige nach Links und Rechts enthält. Es wird an der Sattelstütze befestigt und durch eine Fernbedienung, die am Lenker befestigt werden kann, gesteuert.

Die Befestigung an der Sattelstange wurde von 51% der Teilnehmerinnen und Teilnehmer als schlecht beurteilt. 8% fanden sie gut, 4% nicht relevant. Die hohe Anzahl an negativen Bewertungen ist vor allem darin begründet, dass die Sichtbarkeit der Leuchten durch den nachfolgenden

Verkehr stark eingeschränkt ist, wenn Gepäck auf dem Gepäckträger transportiert wird. 42% bewerteten den Fahrtrichtungsanzeiger als zu klein, 30% als genau richtig. Die Leuchtkraft wurde von 55% als zu dunkel eingestuft, 17% fanden die Leuchten ausreichend hell. Die Höhe der Anbringung wurde in etwa zu gleichen Anteilen als zu gering sowie genau richtig bewertet (6 bzw. 9%). 19% beurteilten die Höhe als nicht relevant zur Beurteilung der Sicherheit oder Sichtbarkeit (siehe Abbildung 36).

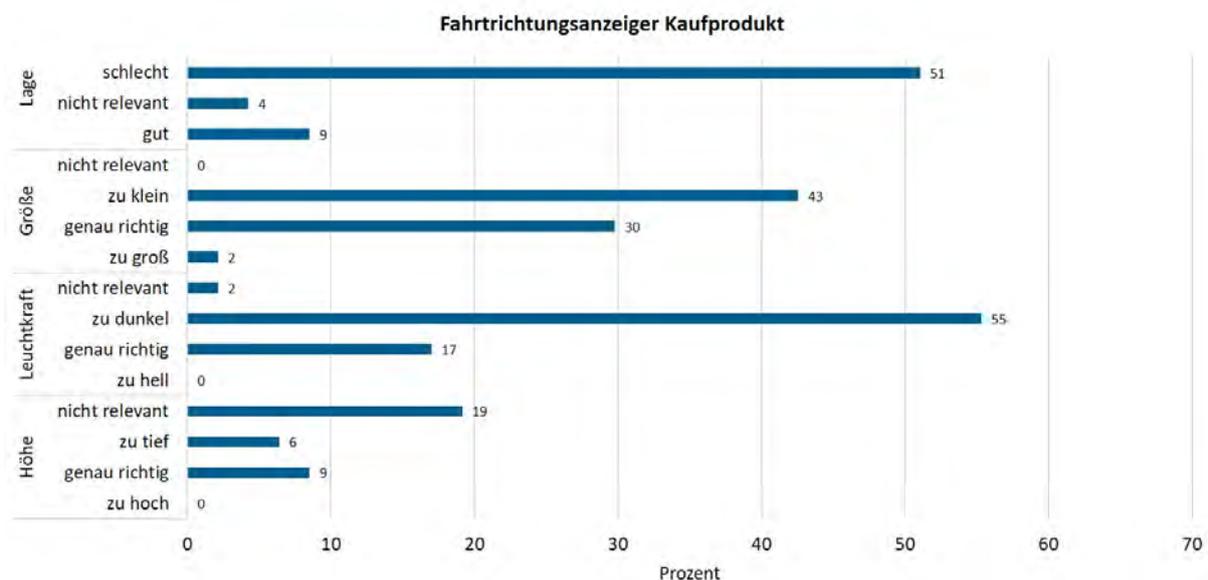


Abbildung 36: Bewertung des Fahrtrichtungsanzeigers (Kaufprodukt)

Die Auswertung der Kommentare zu beiden Fahrtrichtungsanzeigern hat ergeben, dass dieses am Fahrrad ungewohnte System eher kritisch gesehen wird. Die Wahrnehmung durch Autofahrer sowie auch die Helligkeit der Leuchten wurde fraglich gesehen, da sie zu dunkel seien. Wenn zwischen dem Eigenbau- und Kaufprodukt unterschieden werden sollte, wurde das erstgenannte besser dargestellt. Die verschiedenen Taster zur einfachen Bedienung beider Seiten sowie auch die größeren Leuchten und deren Lage am Gepäckträger wurden sinnvoller angesehen als die Fernbedienung des Kaufprodukts und dessen Befestigung an der Sattelstange. Generell wurde auch der Umstand, dass zur Anzeige der Fahrtrichtung beide Hände am Lenker bleiben können, positiv gesehen.

**Bremslicht** Als Bremslicht wurde ein auf dem Markt erhältliches Produkt verwendet, das das werksseitig eingebaute Rücklicht ersetzt und um die Bremsleuchte erweitert. Die Einheit aus Brems- und Rücklicht enthält einen Bewegungssensor, der Geschwindigkeitsänderungen erkennt und das Bremslicht automatisch ansteuert.

Die Lage der Einheit, am hinteren Ende des Gepäckträgers, wurde von 66% der Teilnehmerinnen und Teilnehmer als gut bewertet. 9% der Befragten fanden die Lage nicht relevant, um das Bremslicht zu beurteilen. Die verbleibenden Probanden haben sich der Bewertung enthalten. 63% haben die Größe als genau richtig empfunden, 4% als zu klein und 6% als nicht relevant zur Beurteilung. Da die Testfahrten im Sommer und im Hellen stattfanden, konnten keine Bewertungen bzgl. der Leuchtkraft vorgenommen werden. Dadurch ist der hohe prozentuale Anteil an Teilnehmenden zu erklären, der die Leuchtkraft mit nicht relevant bewertet hat (60%).

Auch die Höhe des Bremslichts wurde von vielen als nicht relevant angesehen (53%), 2% fanden sie zu tief, 19% genau richtig (vgl. Abbildung 37).

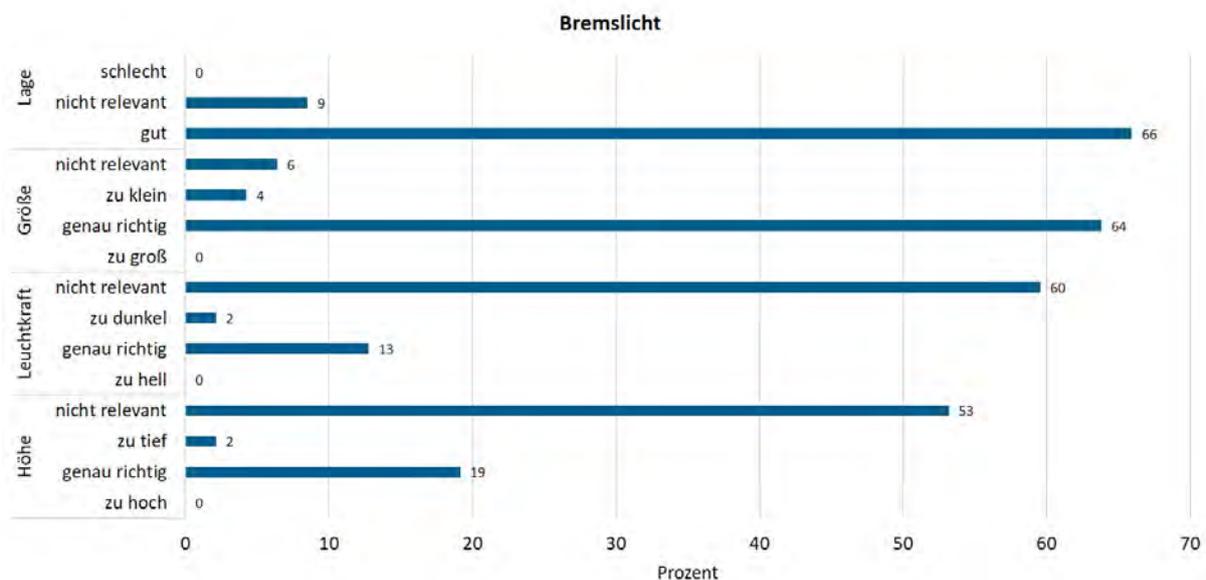


Abbildung 37: Bewertung des Bremslichts

Die Anmerkungen zum Bremslicht haben ergeben, dass die Testerinnen und Tester diesem System kritisch gegenüberstehen. Es wurde vermehrt angemerkt, dass es fraglich sei, ob das Leuchten gesehen werde, vor allem, da am Fahrrad kein Bremslicht erwartet werde.

**Markierungslicht mit kreisförmiger Projektion** Allgemein projizieren Markierungslichter ein Licht auf den Boden unter oder um das Fahrrad/Pedelec. Das getestete System projiziert einen roten Kreis unter das Rad. Das Gehäuse wird an der Sattelstütze befestigt, was von 55% der Personen als gut bewertet wurde. 17% hielten diese Befestigungsart für nicht relevant zur Beurteilung der Sicherheit bzw. Sichtbarkeit, 2% hätten eine andere Position besser gefunden. Die Größe und Leuchtkraft des auf den Boden projizierten Kreises wurde jeweils von 62% als genau richtig, jeweils von 2% als zu klein bzw. zu dunkel und von 4% bzw. 2% als zu groß bzw. zu hell empfunden. 4% fanden die Größe nicht relevant, bei der Leuchtkraft waren es 11%. Die verbleibenden Teilnehmerinnen und Teilnehmer haben sich der Bewertung enthalten. Die Höhe der Anbringung des Gehäuses an der Sattelstange wurde von mehr als der Hälfte als nicht relevant eingestuft (53%), 4% wünschten sich eine höhere Position, 11% bewerteten die Position an der Sattelstütze als genau richtig (vgl. Abbildung 38).

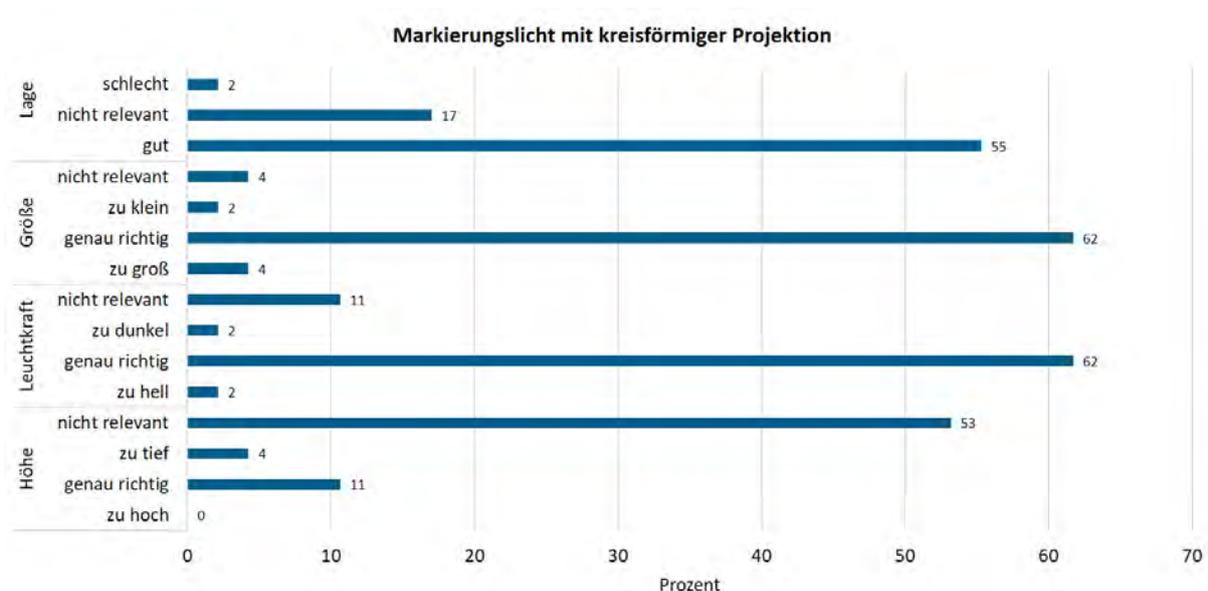


Abbildung 38: Bewertung des Markierungslichts (kreisförmige Projektion)

**Markierungslicht mit linienhafter Projektion** Das zweite Markierungslicht unterscheidet sich lediglich in der Projektion vom ersten. Hier werden zwei rote Linien seitlich links und rechts des Hinterrades auf den Boden projiziert. Die Bewertung der Lage des Gehäuses zeigt ein identisches Ergebnis zum kreisförmigen Markierungslicht (siehe Abbildung 39): über die Hälfte der Teilnehmerinnen und Teilnehmer fand die Lage an der Sattelstütze genau richtig, 17% nicht relevant und 2% schlecht. Bei der Größe der Projektion zeigen sich leichte Unterschiede. Hier bewerteten nur 49% die Linien als genau richtig (62% beim Kreis), 19% haben sie als zu klein empfunden (2% beim Kreis). Während der Kreis von 4% als zu groß bewertet wurde, wurden bei den Linien keine Bewertungen dafür abgegeben. Die Leuchtkraft des zweiten Systems wurde ähnlich bewertet wie die des ersten, jedoch im Vergleich eher als zu dunkel empfunden. 11% der Teilnehmenden haben die projizierten Linien als zu dunkel bewertet (5%-Punkte mehr als beim Kreis), 60% als genau richtig (2%-Punkte weniger als beim Kreis). Es gab keine Bewertungen für zu hell (2% beim Kreis). Die Höhe der Anbringung wurde identisch zum ersten Markierungslicht bewertet, über die Hälfte der Probanden fand die Höhe nicht relevant, 11% bewertete sie als genau richtig.

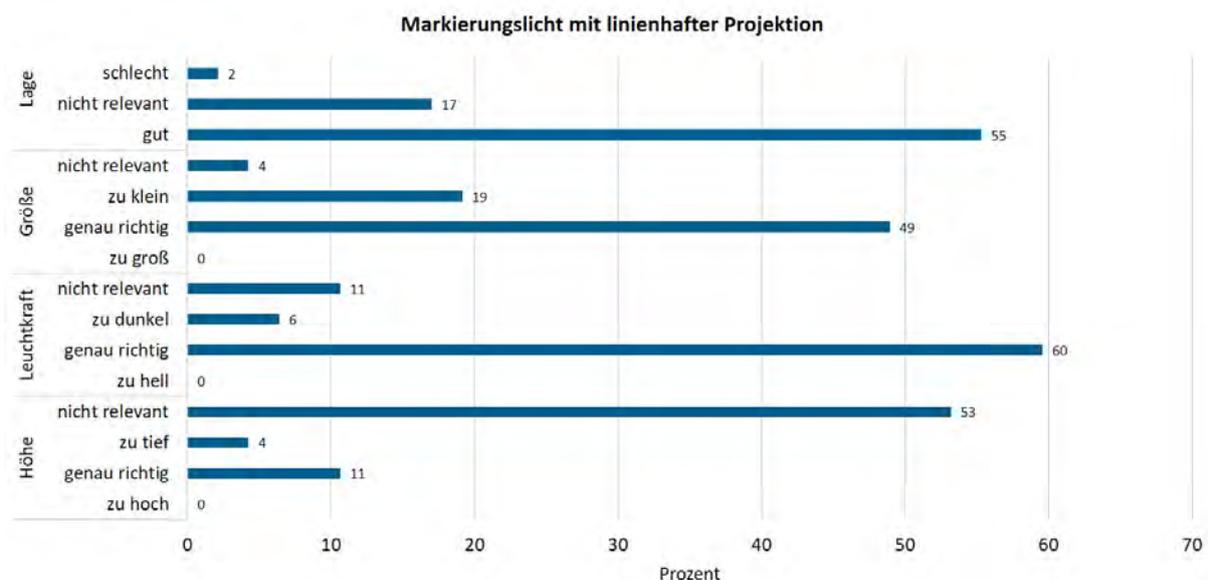


Abbildung 39: Bewertung des Markierungslichts (linienhafte Projektion)

Bei den Markierungslichtern wurde generell angemerkt, dass durch die zusätzliche Beleuchtung am Fahrrad bzw. Pedelec ein Ablenkungspotenzial gesehen wird und es für Radfahrerinnen und Radfahrer und nachfolgende Verkehrsteilnehmende ungewohnt sei. Während von manchen Testrinnen und Testern die Wahrnehmbarkeit der projizierten Kreise oder Linien in Frage gestellt wurde, hoben andere den Aufmerksamkeitsgewinn besonders hervor. Kritisch wurde auch die Befestigungsart an der Sattelstütze gesehen, wenn der Platz dafür wegen anderer Anbauten nicht ausreiche oder das Licht durch Gepäck verdeckt würde. Generell wurde die linienhafte Projektion als besser angesehen als die kreisförmige (12 zu 4%).

### Kaufentscheidung

Am Ende der Bewertung jedes einzelnen Systems wurde die Frage nach der generellen Kaufbereitschaft gestellt. Die Probanden sollten angeben, ob sie das getestete System kaufen würden, wie viel sie dafür bereit wären zu investieren und was eventuelle Voraussetzungen oder Hindernisse für den Kauf wären, wenn die Systeme auf dem Markt erhältlich wären.

Für die aktiven Assistenzsysteme hat sich ein klares Bild ergeben. Für alle drei Systeme wurden weniger Stimmen dafür als gegen einen möglichen Kauf abgegeben. Für die Frontalkollisionswarnung und die rückwärtige Annäherungswarnung haben jeweils 20% für einen Kauf und jeweils 23-24% dagegen gestimmt. Bei positiver Entscheidung waren die Testerinnen und Tester bereit bis zu 500 Euro für die Spurverlassens- und bis zu 250 Euro für die Annäherungswarnung auszugeben. Im Mittel lag der Investitionsbetrag bei 142 bzw. 99 Euro. Bei der Spurverlassenswarnung hat sich ein eindeutigeres Ergebnis herausgestellt: 13% stimmten für, 29% gegen einen Kauf. Der maximale Betrag lag hier bei 300, der mittlere Betrag bei 102 Euro.

Auch das Bremslicht als passives System wurde von 28% abgelehnt und 19% angenommen. Hierfür würden die Probanden maximal 70 und im Mittel 38 Euro ausgeben. Im Gegensatz dazu haben sich bei den anderen lichttechnischen Systemen mehr Testerinnen und Tester für als gegen den Kauf des Produkts ausgesprochen. Bei den Fahrtrichtungsanzeigern haben 32% eine positive und nur halb so viele eine negative Kaufabsicht bekundet. Der maximale Betrag, den die

Teilnehmenden bereit wären zu investieren, liegt hier bei 250, der Mittelwert bei 57 Euro. Bei den Markierungslichtern waren es 26% dafür und 21% dagegen. Hier hat sich ein klares Bild bezüglich des Betrags herausgestellt, den die Probanden zu investieren bereit sind. Der Maximalbetrag liegt bei 50, der Mittelwert bei 42 Euro.

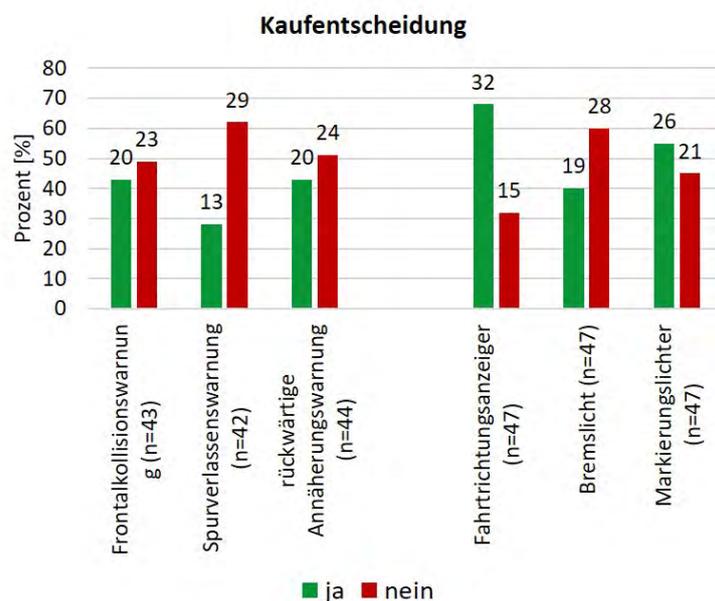


Abbildung 40: Kaufentscheidung zu den Assistenzsystemen

Als Begründung für die negative Kaufabsicht bei allen aktiven Systemen haben die Tester angegeben, dass die Systeme für den Alltag noch nicht ausreichend robust und zuverlässig seien. Außerdem seien die getesteten Prototypen (Frontalkollisions- und Spurverlassenswarnung) noch zu groß und hätten zu viel Gewicht für den täglichen Einsatz. Die positiven Kaufabsichten wurden bei allen Systemen teilweise an einen akzeptablen Preis gekoppelt oder daran, dass die Systeme bei einem neuen Rad bereits integriert sein müssten.

Bei den passiven Systemen wurden als Hemmnisse genannt, dass die Lichttechnik bereits ins Rad integriert und für den Straßenverkehr zugelassen sein sollte. Außerdem müsse die Helligkeit bei Tageslicht noch verbessert werden.

### 2.5.3. Ergebnisse der Datenauswertung

Neben der subjektiven Bewertung der Systeme wurde auch eine objektive Bewertung vorgenommen. Dazu wurde das Versuchsfahrrad während der Testfahrten mit Sensoren ausgestattet, die die Beschleunigung und Geschwindigkeit über die Raddrehzahl, die Schräglage über ein 9-Achsen-Gyroskop, den Lenkwinkel mittels dafür vorgesehenem Sensor sowie die Stellung der Bremshebel gemessen haben. Diese Daten wurden während allen Testfahrten auf einer SD-Karte aufgezeichnet. So konnte im Nachhinein beispielsweise der Zeitpunkt eines Verzögerungsbeginns und -endes erfasst werden. Durch die Synchronisierung der aufgezeichneten Werte mit den Videoaufzeichnungen der Kamera des Assistenzsystems konnte zudem überprüft werden, ob Fehlwarnungen aufgetreten sind, wie oft die Warnung vor Hindernissen nicht funktioniert hat und vor welchem Hindernis gewarnt wurde.

Die aufgezeichneten Daten (Logging Daten) wurden getrennt für die beiden im Rahmen des Projekts entwickelten Systeme Frontalkollisionswarnung und Spurverlassenswarnung ausgewertet. Für ersteres werden die Ergebnisse im Folgenden vorgestellt.

### Ergebnisse der Frontalkollisionswarnung

Die Frontalkollisionswarnung erkennt sowohl statische als auch dynamische Hindernisse. Die Tester führen auf beide Arten von Hindernissen zu (vgl. Abschnitt 2.5.1) und sollten selbst entscheiden, ob sie ausweichen oder bremsen wollten. Das System hat dabei gespeichert, wann eine Warnung ausgegeben wurde, die am Rad verbauten Sensoren haben dabei die Geschwindigkeit, den Lenkwinkel, das Bremsverhalten und über die Kamera das Hindernis aufgezeichnet. Bei der Auswertung wurden die Fälle

1. Fehlwarnung (eine Warnung, ohne dass ein Hindernis im Weg war)
2. Warnung ohne Bremsen (Warnung vor einem Hindernis, aber der Radfahrende ist vor dem Hindernis ausgewichen)
3. Warnung mit Bremsen (Warnung vor einem Hindernis und der Radfahrende hat deswegen gebremst)
4. Bremsen ohne Warnung (Bremsen wegen eines Hindernisses, aber es wurde keine Warnung ausgegeben)
5. kein Bremsen, keine Warnung (keine Warnung vor einem Hindernis und der Radfahrende ist vor dem Hindernis ausgewichen)

unterschieden. Im ersten Fall kann die Warnung durch große Gegenstände, wie beispielsweise Fahrzeuge am Fahrbahnrand oder ein Garagentor, wegen zu großer Neigung des Fahrrades oder wegen Pfosten oder Säulen neben der Fahrspur ausgelöst worden sein. Der zweite Fall stellt ein Ausweichen der Probandin oder des Probanden vor dem Hindernis dar. Der dritte Fall wurde unterschieden in Situationen, in denen die Warnung rechtzeitig, also vor Betätigung der Bremsen ausgegeben wurde, und Situationen, in denen die Warnung erst während des Verzögerungsvorgangs ausgelöst wurde. Der vierte Fall stellt Situationen dar, in denen eine Warnung erwartet, aber keine ausgegeben wurde. Im fünften Fall wurden Situationen zusammengefasst, in denen weder gebremst noch eine Warnung ausgelöst wurde, obwohl ein Hindernis im Weg war. Die Ergebnisse dieser Auswertung werden zusammengefasst in Tabelle 20 dargestellt.

## Auswertung Probandenstudie SIFAFE Sommer 2018

Erhebungstag	1			2	3		4	5
	Fehlwarnung = fälschlicherweise Warnung wegen			Warnung ohne Bremsen	Warnung mit Bremsen		Bremsen ohne Warnung	kein Bremsen, keine Warnung
	großer Gegenstand	Neigung	Pfosten	= Ausweichen	Warnung früher	Warnung später	bei Hindernis	trotz Hindernis
04.06.2018	3	3	5	13	3	8	23	1
05.06.2018	1	1	1	2		2	5	9
06.06.2018	5		4	2	5	7	19	9
08.06.2018	2	2	1	37	14	23	50	51
11.06.2018	1	4	1	15	11	10	8	6
13.06.2018				3	6	9	12	
14.06.2018	4	1	1	15	1		2	12
18.06.2018	1			3	2	4	5	4
20.06.2018	2	3		14	5	11	15	4
22.06.2018	1	1		12	2	4	5	2
28.06.2018		4		14	6	1	3	5
<b>Summe</b>	<b>20</b>	<b>19</b>	<b>13</b>	<b>130</b>	<b>55</b>	<b>79</b>	<b>147</b>	<b>103</b>
	<b>3,53%</b>	<b>3,36%</b>	<b>2,30%</b>	<b>22,97%</b>	<b>9,72%</b>	<b>13,96%</b>	<b>25,97%</b>	<b>18,20%</b>

Tabelle 20: Ergebnisse des Datalogging zur Frontalkollisionswarnung

Insgesamt wurden 566 Situationen ausgewertet. In über 40% der Fälle sind die Radfahrenden vor dem Hindernis ausgewichen, ungefähr jeweils zur Hälfte mit (130, ca. 23%) und ohne (103, ca. 18%) Warnung. Ungefähr ein Viertel (147) der aufgezeichneten Situationen wurden durch den vierten Fall „Bremsen ohne Warnung“ repräsentiert. Ebenfalls knapp ein Viertel (134) der Situationen konnte dem dritten Fall „Warnung mit Bremsen“ zugeordnet werden. Dabei kam in ca. 40% die Warnung rechtzeitig, also vor dem Einleiten des Verzögerungsvorgangs, in 60% erst während des Bremsens. Eine Fehlwarnung wurde in unter zehn Prozent ausgelöst.

Für den dritten Fall „Warnung mit Bremsen“ wurden ebenfalls die aufgezeichneten Zeitwerte ausgewertet, um festzustellen, wieviele Sekunden zwischen der Warnung und dem Beginn des Bremsvorgangs lagen. Wenn die Warnung vor der Verzögerung des Fahrrades ausgelöst wurde, lag die zeitliche Differenz bei null (gleichzeitiges Warnen und Bremsen) bis maximal sechs Sekunden. Im Mittel wurde mindestens ein Bremshebel 0,7 Sekunden nach der Warnung betätigt. Wenn die Warnung erst nach Bremsbeginn ausgelöst wurde, lag die zeitliche Differenz ebenfalls zwischen null und maximal fünf Sekunden. Im Durchschnitt ist die Warnung jedoch 1,3 Sekunden zu spät ausgelöst worden. Eine Betrachtung über alle Situationen des dritten Falls ergibt, dass die Warnsignale der Frontalkollisionswarnung im Mittel ca. 0,5 Sekunden zu spät ausgegeben werden. Die Nutzerinnen und Nutzer des Systems haben hier bereits vor der Warnung gebremst.

Aus diesen Ergebnissen wurden bis zum Abschluss des Projekts Verbesserungspotenziale abgeleitet. Die Gründe für die Verzögerungen wurden erörtert, die Frontalkollisionswarnung entsprechend weiterentwickelt und mit dem Projektbeirat diskutiert (vgl. Kapitel 2.6).

## Ergebnisse der Spurverlassenswarnung

Zum Test und zur Bewertung der Spurverlassenswarnung führen die Testerinnen und Tester auf der um den Sportplatz umlaufenden Bahn. Sobald sie sich einer Bahnbegrenzungslinie näherten oder darüber fuhren, wurde eine Warnung ausgegeben. Eine objektive Auswertung dieses Assistenzsystems analog zu der der Frontalkollisionswarnung konnte hier jedoch nicht angewendet werden. Anhand der aufgezeichneten Daten war nicht zu erkennen, wann ein „Überquerungsvorgang“ einer Linie eingeleitet wurde und wann eine entsprechende Reaktion des Radfahrenden eingesetzt hat. In vielen Fällen wurde eine Linie zum Testen des Systems absichtlich überfahren. Daher wird in dieser Auswertung von Zeitwerten abgesehen.

Da im Algorithmus des Assistenzsystems eine Sicherheitszeit programmiert ist, die frühestens alle fünf Sekunden eine Warnung erlaubt, wurde nicht vor jeder Querung einer Linie eine Warnung ausgegeben. Daher kann nur bedingt eine Aussage zu Fehlwarnungen getroffen werden. Es wird daher auf die Auswertung der subjektiven Einschätzungen aus der Befragung „Fahrerassistenzsysteme - Spezielle Bewertung aktive Systeme“ ab Seite 88 verwiesen.

Zur Ableitung von Weiterentwicklungsbedarfen des Systems wird auf die subjektive Bewertung im Rahmen des Fragebogens zurückgegriffen.

### **2.5.4. Zusammenfassung**

Für die Durchführung der Probandenstudie konnte hinsichtlich des Alters und der Nutzungsgewohnheiten eine Gruppe von 47 Teilnehmerinnen und Teilnehmern gefunden werden. Lediglich in Bezug auf das Geschlecht haben die männlichen Teilnehmer überwogen. Knapp 40% der Teilnehmenden hatte schon Alleinunfälle mit dem Fahrrad oder Pedelec erlitten. Ein sehr großer Anteil von 97% kennt Fahrerassistenzsysteme bereits aus dem Automobilssektor.

Während der Testfahrten kamen die meisten Teilnehmerinnen und Teilnehmer mit den Versuchspedelegs gleich gut oder besser als mit dem eigenen Fahrrad oder Pedelec zurecht. Es wurden aktive Assistenzsysteme, wie die Frontalkollisionswarnung, die Spurverlassenswarnung und die rückwärtige Annäherungswarnung, getestet. Ebenso wurden unterschiedliche passive Systeme bewertet, wie Fahrtrichtungsanzeiger (ugs. „Blinker“), ein Bremslicht und Markierungslichter. Alle Fahrerassistenzsysteme wurden nacheinander und separat getestet. Dabei wurden die aktiven Systeme im Durchschnitt von zwei Dritteln als zuverlässig und von einem Drittel als nicht zuverlässig bewertet. Die Bewertung der Zuverlässigkeit wurde bei den passiven Systemen ausgelassen. In puncto Sicherheit und Stresslevel können aktive und passive Systeme jedoch verglichen werden. Während über die Hälfte (Sicherheit) und knapp 40% der Teilnehmenden (Stress) angegeben hat, sich neutral durch die Nutzung aktiver Systeme zu fühlen, fühlten sich über die Hälfte durch die passiven Lichtsysteme sicherer, mehr als 30% auch entspannter als ohne.

Die detaillierte Auswertung hat Unterschiede zwischen den einzelnen aktiven Systemen gezeigt. Über die Hälfte der Teilnehmerinnen und Teilnehmer hat angegeben, dass die Warnung bei der Frontalkollisionswarnung zu spät kommt, 45% finden den Zeitpunkt genau richtig. Die objektive Auswertung des Data Loggings hat hier ähnliche Ergebnisse hervorgebracht. Demnach wird die Warnung im Mittel ungefähr eine halbe Sekunde zu spät ausgegeben. Bei der Spurverlassenswarnung sagen 54%, dass der Warnzeitpunkt richtig ist, bei der rückwärtigen Annäherungswarnung liegt der Anteil sogar bei 75%. Beim Auslösen einer Warnung wird der Nutzer über optische, akustische und haptische Weise darüber informiert. Die optische Warnung wurde bei

der Frontalkollisions- bzw. Spurverlassenswarnung zu 53 bzw. 36% nicht wahrgenommen. Im Gegensatz dazu wurden die akustische und haptische Warnung von jeweils über 70% der Probanden als genau richtig beurteilt. Die rückwärtige Annäherungswarnung warnt ausschließlich über ein Display, bedient den akustischen und haptischen Kanal also nicht. Diese optische Anzeige wurde von über 70% als gut bewertet. Als weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf hat sich die Zuverlässigkeit der Detektion von Hindernissen sowie der Bedarf an Einstellungsmöglichkeiten herausgestellt, sodass die Systeme auf unterschiedliche Nutzeransprüche hinsichtlich Warnzeitpunkt, Lautstärke und Intensität angepasst werden können.

Die passiven Systeme wurden im Hinblick auf ihre Größe, Leuchtkraft und Lage am Fahrrad bzw. Pedelec bewertet. Bei der Lage der Fahrtrichtungsanzeiger wird das hintere Ende des Gepäckträgers besser bewertet als eine Anbringung an der Sattelstange. Auch die Leuchtkraft, Größe und Bedienung durch die zwei eigenen Taster wurde beim Eigenbauprodukt als besser beurteilt als beim Kaufprodukt. Das Bremslicht hat positive Bewertungen bezüglich der Größe und Lage erhalten. Es ersetzt den normalen Rückstrahler und entspricht somit dessen gewohnter Größe und Lage. Die Leuchtkraft wurde aufgrund der sonnigen Umgebung nicht getestet. Bei den zwei Ausführungen von Markierungslichtern war eine starke Subjektivität zwischen kreis- und linienförmigen Projektionen in der Bewertung festzustellen. Im Mittel haben beide Systeme jedoch gute Bewertungen hinsichtlich Größe, Leuchtkraft und Lage an der Sattelstange erhalten.

Die Frage der Kaufentscheidung zeigt in der Auswertung ein klares Bild. Aktive Systeme würden von mehr Teilnehmerinnen und Teilnehmern nicht gekauft werden, wenn sie auf dem Markt verfügbar wären. Allerdings liegen die Anteile positiver Stimmen oft auf nur leicht niedrigerem Niveau bei nahezu 50%. Die passiven Lichtsysteme hingegen würden mehrheitlich eher gekauft als nicht gekauft werden.

## 2.6. Weiterentwicklung und Optimierung der sicherheitsorientierten FAS (AP 3.3)

Im Zuge der Probandenstudie von AP3.2 wurde aufgrund der mitgeloggtten Fahrdaten sowie dem Nutzerfeedback eine Vielzahl an Verbesserungs- und Weiterentwicklungsmöglichkeiten erkannt. Diese befinden sich in der Umsetzung oder wurden bereits zum Teil umgesetzt. Weiterentwicklungen wurden insbesondere bei den folgenden Systemen vorgenommen:

- Benutzeroberfläche
- Sensorkonzept
- Trajektorienprädiktion

### 2.6.1. Benutzeroberfläche

Für die Warnzeitpunkte der selbst realisierten Assistenzsysteme wurde basierend auf den Erkenntnissen im Automobilbereich sowie Erfahrungen durch interne Tests feste Werte ermittelt und während der Nutzerstudie eingesetzt. Wie aus dem Feedback der Nutzer hervorgeht, wurden diese gewählten Warnzeitpunkte der Frontkollisionswarnung sowie der Spurverlassenswarnung lediglich in knapp der Hälfte aller Fälle als genau richtig eingestuft die andere Hälfte verteilt sich auf eine zu frühe oder zu späte Warnung. Dies zeigt die Notwendigkeit, dass der Fahrer diese Werte selbst einstellen können sollte, um seinem Fahrstil zu entsprechen (defensiver Fahrer -> frühere Warnung, sicherer Fahrer -> späte Warnung). Dementsprechend wurde die Smartphone App sowie die Software der Assistenzsysteme weiterentwickelt und die Warnzeitpunkte durch Eingabe über die Smartphone Benutzeroberfläche einstellbar gemacht (siehe Abbildung 41).



Abbildung 41: Einstelloberfläche Spurverlassenswarnung (Quelle: eigene Darstellung)

Ebenfalls wurde die Benutzeroberfläche erweitert, um die Art der Warnung nach den Fahrerwünschen einzustellen (optisch, akustisch, haptisch), diese können hierbei beliebig kombiniert oder sogar gänzlich deaktiviert werden (siehe Abbildung 42).



Abbildung 42: Einstelloberfläche Warnelemente (Quelle: eigene Darstellung)

Weiterhin wurde die Möglichkeit implementiert, sich die aktuelle GPS-Position in der App anzeigen zu lassen, wodurch bei Notrufen eine genaue Ortsangabe übermittelt werden kann.

### 2.6.2. Sensorkonzept

Das Sensorkonzept wurde erweitert durch Einbeziehen neuer Sensordaten wie Roll- und Gierwinkel sowie Nutzung von RTK zur Verbesserung der Genauigkeit der GPS-Position. Diese wiederum werden eingesetzt, um die Detektionsgenauigkeit der Frontkollisionswarnung zu verbessern und Fehlwarnungen zu reduzieren. Zusätzlich konnte durch eine Sensorfusion von GPS, Gierwinkel und Geschwindigkeit ein Dead-Reckoning Algorithmus auf dem Fahrrad implementiert werden, welcher es erlaubt auch bei zeitweise abgerissener Satellitenverbindung (beispielsweise in Tunneln, dicht bebautem Gebiet oder in bewaldetem Gebiet) eine gute Genauigkeit der GPS-Position zu erhalten. Zusätzlich wurde eine Stereokamera angeschafft und wird derzeit untersucht, um eine Frontkollisionswarnung auf Basis dieses Sensors anstatt des Lidars zu realisieren.

### 2.6.3. Trajektorienprädiktion

Durch die Probandenstudie sowie die internen Testfahrten hat sich gezeigt, dass durch die deutlich höhere Dynamik des Pedelecs im Straßenverkehr eine neue Herangehensweise notwendig ist, um die Anzahl an Fehlwarnungen der Systeme zu reduzieren. Eine dieser Möglichkeiten ist die bereits genannte Option der Einstellung der Warnzeitpunkte. Eine weitere Methode ist die Trajektorienprädiktion, welche die Fahrersabsicht vorhersagt und so weitere Informationen für Frontkollisions- und Spurverlassenswarnung bereitstellt. Mit Trajektorienprädiktion ist hierbei gemeint, das basierend auf dem Kamerabild und den aktuellen Sensormessungen prädiziert wird, wie sich der Radfahrer in den nächsten fünf Sekunden verhalten wird, durch vorhersagen von Geschwindigkeit und Gierwinkel. Ein konkretes Szenario, das den Nutzen dieser Methode aufzeigt, wäre der Überholvorgang eines am Straßenrand geparkten Fahrzeuges. Bei der Annäherung an das Fahrzeug entspricht dieses Fahrerverhalten zunächst einem direkten Auffahren, bis kurz vor dem Hindernis das Überholmanöver durch Ausscheren eingeleitet wird (vgl. Abbildung 43).

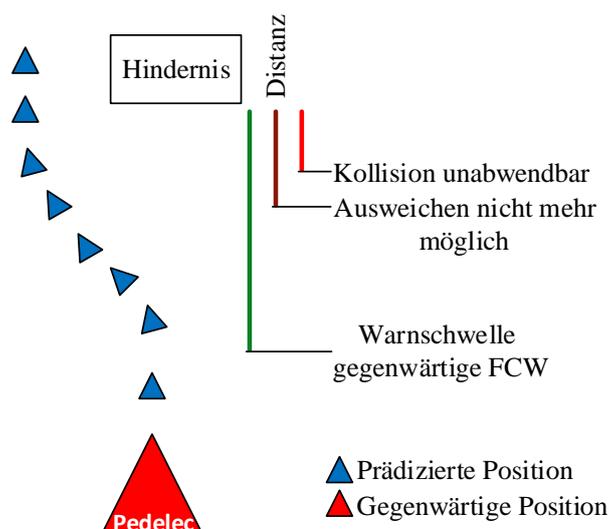


Abbildung 43: Szenario Frontkollisionswarnung (Quelle: eigene Darstellung)

Das Einleiten des Überholvorgangs kann, je nach Radfahrer, früher oder später geschehen und somit eine unerwünschte Kollisionswarnung provozieren, obwohl dies eine kontrollierte Situation darstellt. Durch nutzen einer Trajektorienprädiktion würde während der Annäherung an das Fahrzeug bereits die Erwartung des Systems sein, dass eine Ausweichbewegung eintreten muss ab einem gewissen Zeitpunkt. Über die Sensorik kann während der Annäherung, das erwartete Manöver mit dem durchgeführten abgeglichen werden und sollte hier eine ausreichend große Abweichung auftreten, so wird die Warnung ausgegeben. Dieses Szenario ist beispielhaft in Abbildung 44 dargestellt. In Teilbild (a), auf der linken Seite, wird die Warnung aktiv, da das erwartete Ausweichmanöver durch den Fahrer nicht eintritt, während in Teilbild (b) das Ausweichmanöver eingeleitet wird und somit für das System erkennbar ist, dass der Fahrer bereits auf die potenzielle Gefahrensituation aufmerksam geworden ist und darauf reagiert.

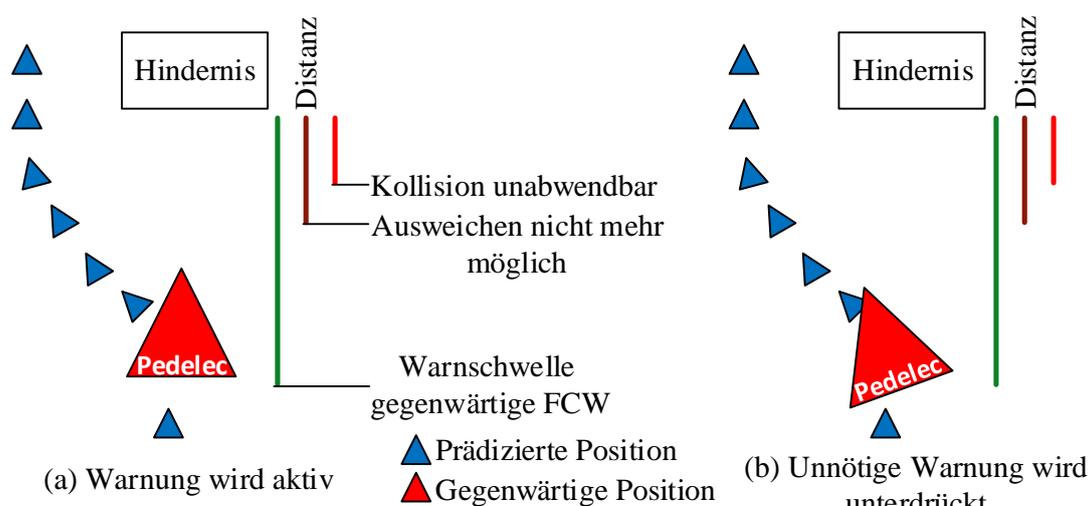


Abbildung 44: Szenario erweiterte Frontkollisionswarnung (Quelle: eigene Darstellung)

Um diese Trajektorienprädiktion umzusetzen, wurde ein Ansatz über neurale Netzwerke gewählt, um die Positionen zu prädizieren, da diese den Vorteil besitzen, dass ein trainiertes Netzwerk häufig fähig ist, auch in unbekanntem Umgebungen gute Resultate zu liefern. Hierfür wurde bisher eine Netzwerk Architektur implementiert, erste Trainingsdatensätze durch Messfahrten generiert sowie erste simulative Tests mit trainierten Netzwerken durchgeführt.

## 2.7. Wesentliche Erkenntnisse und weiterer Forschungsbedarf

### 2.7.1. Wesentliche Erkenntnisse zum Potenzial und zur Akzeptanz von Fahrerassistenzsystemen für Elektrofahrräder

#### Unfallzahlen von Pedelecs

Der Anteil an Pedelecs am Gesamt-Fahrradmarkt liegt in Deutschland derzeit bei ca. 4,8%, was einem Bestand von 3,5 Millionen Pedelecs entspricht [ZIV18]. Dieser Bestand wächst jedoch weiter an. Im Jahr 2016 wurden laut statistischem Bundesamt 600.000 Räder mit Elektromotor verkauft. Im Folgejahr 2017 lagen die Verkaufszahlen von Pedelecs bereits bei über 720.000 Stück pro Jahr, was einer Steigerung von 19% entspricht. Einhergehend mit dem steigenden Anteil am Markt steigt auch die Zahl der Unfälle mit beteiligten Pedelecs [bfu15] [Sch13a]. Ereigneten sich 2015 noch 2313 Unfälle mit Zweiradbeteiligung, so waren es laut statistischem Bundesamt im Folgejahr 2016 bereits 3214 [Sol17]. Dies bedeutet eine Steigerung von fast 40%. Um einen ähnlichen Prozentsatz ist auch die Zahl der Unfälle mit Personenschaden (2016: 628) sowie mit Schwerverletzten (2016: 274) gestiegen. Noch höher liegen die Zahlen getöteter Rad- und Pedelecfahrer: Die Zahl ist von 26 im Jahr 2015 auf 46 im Jahr 2016 gestiegen. Laut amtlicher Straßenverkehrsunfallstatistik DESTATIS liegt der Anteil an schwerverletzten Pedelecfahrern im Jahr 2016 bei 4%, der Anteil getöteter bei 10% [Sch16].

Amtliche Unfallstatistiken beruhen auf der Auswertung polizeilich erfasster Unfälle. Gerade für Radunfälle ist der Erfassungsgrad jedoch sehr gering [PPK16] [Sch16]. Eine hohe Dunkelziffer besteht vor allem bei Alleinunfällen. Die im Jahr 2015 national sowie international übereinstimmende Aussage zahlreicher Studien aus Deutschland, der Schweiz, den Niederlanden, den USA und aus China, dass Pedelecfahrer generell keinem erhöhten oder anders gelagerten Unfallrisiko unterliegen als Radfahrer mit konventionellen Fahrrädern [Zwe17] [GDV14b] [LB13] [The14] [Che07] [SFH<sup>+</sup>14], wird von Experten der Unfallforschung der Versicherer inzwischen revidiert. Laut neueren Studien ist die Zahl der Unfälle mit Verletzten stärker gestiegen (30%), als die Verkaufszahl an Elektrofahrrädern (ca. 20%) [GDV18]. Durch die Unterstützung des Elektromotors ergeben sich für Pedelecs andere Nutzergruppen im Vergleich zum konventionellen Fahrrad. Vor allem Senioren [GDV18] und bewegungseingeschränkte Menschen sowie auch Wiedereinsteiger nutzen den unterstützenden Elektromotor. Durch die im Vergleich zu den körperlichen Fähigkeiten erhöhten Geschwindigkeiten und die höhere Verletzlichkeit steigt die Zahl der Unfälle mit Verletzten an.

#### Potenzialanalyse

Im Hinblick auf die Sicherheit des Radverkehrs hat die im Projekt durchgeführte Pedelec-Unfall- und System-Wirkungs-Analyse ergeben, dass ein theoretisches Potenzial besteht, bis zu 52% der Unfälle mit Pedelecs durch Assistenzsysteme zu vermeiden. Ebenso hat sich ein großes Marktpotenzial ergeben, da viele Systeme, wie beispielsweise Lichtsysteme, Spurwechselassistenten und Hinderniswarnung von Nutzern gewünscht, aber noch nicht verfügbar sind. In einer Nutzerbefragung haben 66% der Teilnehmer zudem angegeben, dass sie bis zu 300 Euro für Assistenzsysteme am Elektrofahrrad ausgeben würden.

## Nutzerakzeptanz, Zuverlässigkeit und Sicherheit

Im Projekt konnte festgestellt werden, dass Fahrerassistenzsysteme eine hohe Akzeptanz in der Bevölkerung erfahren. Dies unterstreichen Ergebnisse einer Online-Nutzerbefragung. Fast 300 Fahrrad- und Pedelecfahrer haben daran teilgenommen. Dabei haben mehr als 80% angegeben, dass sie Fahrerassistenzsystemen positiv gegenüberstehen. Die meistgenannten und noch nicht auf dem Markt verfügbaren Systeme wurden im Projekt umgesetzt, am Versuchsfahrrad installiert und in einem Praxistest mit Probanden evaluiert. Auch hier hat sich ein sehr hoher Bekanntheitsgrad von Assistenzsystemen unter den Probanden herausgestellt.

Während der Testfahrten wurden aktive Assistenzsysteme, wie die Frontalkollisionswarnung, die Spurverlassenswarnung und die rückwärtige Annäherungswarnung, getestet. Ebenso wurden unterschiedliche passive Systeme bewertet, wie Fahrtrichtungsanzeiger (ugs. „Blinker“), ein Bremslicht und Markierunglichter. Dabei wurden die aktiven Systeme von zwei Dritteln als zuverlässig und von einem Drittel als nicht zuverlässig bewertet. Die Bewertung der Zuverlässigkeit wurde bei den passiven Systemen ausgelassen. In puncto Sicherheit und Stresslevel fühlten sich über die Hälfte durch die passiven Lichtsysteme sicherer, mehr als 30% auch entspannter als ohne.

Die wesentlichen Erkenntnisse zur Funktionsweise der aktiven Systeme und deren Warnstrategien aus technischer Sicht wird im folgenden Unterkapitel erläutert. Die passiven Systeme wurden im Hinblick auf ihre Größe, Leuchtkraft und Lage am Fahrrad bzw. Pedelec bewertet. Allgemein war hier eine starke Subjektivität in der Bewertung festzustellen. Im Durchschnitt haben die Lichtsysteme jedoch gute Bewertungen erhalten. Es zeichnet sich der generelle Bedarf und Nutzerwunsch nach Assistenzsystemen für Fahrräder (mit und ohne Elektromotor) ab. Vor allem die Lichtsysteme konnten hier überzeugen. Sie wurden durchgehend besser bewertet als die aktiven und warnenden Systeme und würden laut durchgeführter Probandenstudie mehrheitlich gekauft werden, sofern sie auf dem Markt verfügbar und rechtlich zugelassen wären.

### 2.7.2. Wesentliche Erkenntnisse zur technischen Realisierung von Assistenzsystemen für Elektrofahräder

Die über die Projektlaufzeit gesammelten Erfahrungen und Erkenntnisse aus der technischen Realisierung wurden bereits zum Teil in Kapitel 2.2.3 dargestellt. An dieser Stelle sollen insbesondere die technischen Herausforderungen dargestellt werden, welche sich über eine Vielzahl von Assistenzsystemen erstrecken. Diese beziehen sich hauptsächlich auf die folgenden Themengebiete:

1. Warnstrategie
2. Umfelderkennung
3. Fahrerabsichtserkennung

Diese Themengebiete sind eng miteinander verknüpft und bilden die Basis für die Realisierung von warnenden Assistenzfunktionen, welche über Umfelderkennung verfügen.

#### Warnstrategie

Während der Testfahrten wurde durch das Nutzerfeedback zu den realisierten Anzeigeelementen deutlich, dass Warnzeitpunkte stark vom Radfahrer abhängig sind und somit durch den Radfahrer selbst nach eigenem Ermessen konfiguriert werden sollten, um dem jeweiligen Fahrstil zu entsprechen. Bei den Warneinrichtungen wurde besonders die haptische Warnung (Vibrationsmotoren) positiv hervorgehoben, während die optische und akustische Warnung via Smartphone zumeist als überflüssig empfunden wurde. Dies gilt besonders, wenn beide Systeme, optisch-akustische und haptische Warnung, an einem Fahrrad/Pedelec verbaut sind. Ebenso wurde die Ausführung des Displays des Garmin Varia Radars im Vergleich besser beurteilt als die optische Anzeige via Smartphone. Dies zeigt auf, dass hier weiterer vertiefender Forschungsbedarf besteht, um die Wirksamkeit unterschiedlicher Ausführungsformen gegeneinander abzuwägen.

Neben dem Nutzerfeedback wurde während der Testfahrten im Straßenverkehr weitere Probleme offenkundig. So wurden häufig Warnungen der Frontkollisionswarnung ausgegeben, ohne dass für den Fahrer ein erkennbares Gefahrenpotenzial bestand und somit dessen Akzeptanz für das System gemindert wird ("Warndilemma"). Dies Warndilemma resultiert aus der Problematik, dass Ausweichen/Umfahren ein häufiges Manöver im Radverkehr ist und die realisierte Warnschwelle der Frontkollisionswarnung ein Anhalten vorsieht, welches deutlich vor einem Ausweichzeitpunkt liegt. Um eine bessere Akzeptanz des Systems zu erreichen, muss das System zwischen der Fahrerabsicht Anhalten und Ausweichen unterscheiden können und anschließend entsprechende Warnzeitpunkte anwenden. Um Ausweichzeitpunkte zu ermitteln, spielen jedoch die Umfelderkennung sowie die individuelle Reaktion des Radfahrers auf das Hindernis eine sehr große Rolle. Hier wurden bereits erste vielversprechende Ansätze zur Handhabung der Problematik entwickelt, es besteht hier jedoch noch weiterer vertiefender Forschungsbedarf.

#### Umfelderfassung

Die Problematik der Umfelderkennung ergibt sich in erster Linie aus der vielseitigen Nutzungsumgebung des Pedelecs, in welcher zuverlässig Objekte und Fahrspuren erkannt werden müssen, um Gefahrensituationen frühzeitig zu erkennen und eine sinnvolle Warnung zu generieren. Hierzu sind in Abbildung 45 einige gängige Beispiele für Radführungsformen dargestellt.

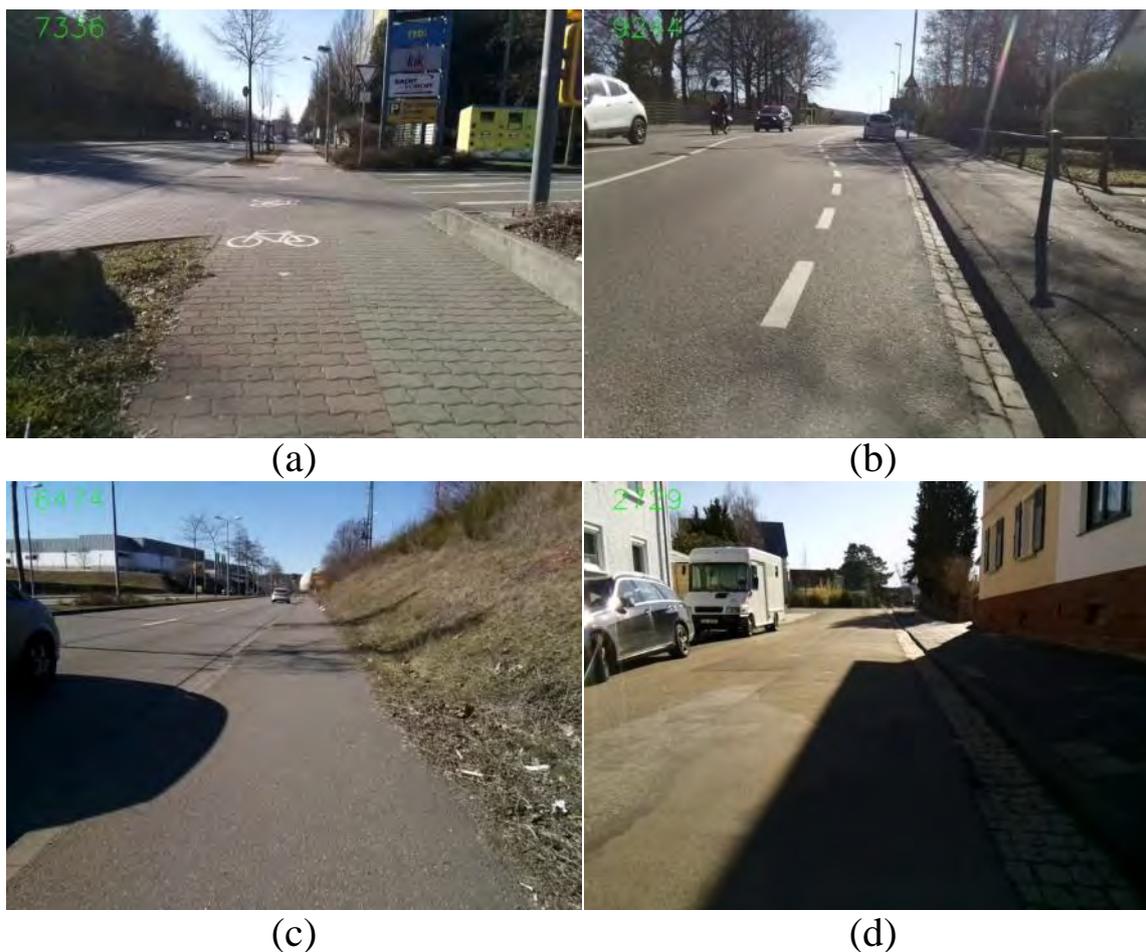


Abbildung 45: Typische Nutzungsumgebungen (a) farblich getrennter Rad und Fußweg (b) Radfahrstreifen (c) Radweg (d) unstrukturierte Straße (Quelle: eigene Darstellung)

Es ist ersichtlich, dass bereits bei der Fahrspurerkennung deutliche Unterschiede bei den Merkmalen der verschiedenen Verkehrsführungsformen bestehen (Breite, Begrenzung oder farbliche Markierung) und somit einen hohen Anspruch an die Auswertung stellt. Der in Kapitel 2.4.1 vorgestellte Algorithmus wurde in erster Linie für strukturierte Umgebungen entworfen, konnte jedoch auch teilweise bei unstrukturierten Straßen akzeptable Ergebnisse liefern, dennoch konnten aufgrund der limitierten Rechenleistung des verwendeten Raspberry Pi nur eine begrenzte Menge an Szenarien abgedeckt werden. Neben der Fahrspur ist die Objekterkennung gleichermaßen wichtig, um potenzielle Kollisionsgefahren frühzeitig zu erkennen. Hierbei war der eingesetzte Lidar Sensor ausreichend, um statische oder dynamische Objekte, welche sich in direkter Fahrtrichtung befinden zuverlässig zu erkennen und zu verfolgen. Jedoch ist das horizontale Sichtfeld des eingesetzten Sensors von  $20^\circ$  zu gering für die hohe Anzahl an Szenarien im Straßenverkehr, wodurch gerade bei Kurvenfahrten oder bei seitlich annähernden Objekten (z.B. Personen bei geteilten Rad/Fußwegen) eine Detektion teilweise nicht möglich war oder zu spät erfolgte. Unter Betrachtung der Problematik bezüglich des Ausweichzeitpunktes ist auch das Erfassen der Objektbreite von großer Bedeutung, um zu ermitteln, wie ein Ausweichmanöver ausgeführt werden muss, hierfür wird eine gewisse Winkelauflösung benötigt. Dabei ist das schmalere Sichtfeld des eingesetzten Lidar Sensors von Vorteil, da dieser dadurch eine hö-

here Winkelauflösung erreichen kann. Da hier mehrere komplementäre Anforderungen bestehen, erscheint ein Mehrsensorkonzept aus technischer Sicht sinnvoll. Dies gilt ebenso, um Systemgrenzen einzelner Sensoren zu überwinden, z. B. kamerabasierte Funktionen können bei Nacht oder schlechten Sichtverhältnissen nicht oder nur eingeschränkt genutzt werden, während die Detektion bei Radar und Lidar stark von der Reflexionseigenschaften des Zieles abhängen (klassisches Problem: Detektion von dunkel gekleideten Passanten). Allerdings bringt ein Mehrsensorkonzept einen deutlich höheren Kostenaufwand sowie erhöhten Platzbedarf mit sich und ist dadurch möglicherweise nicht mehr mit den Nutzerwünschen vereinbar. Für ein Einzelsensorkonzept ist nach derzeitigem Stand eine Stereokamera der vielversprechendste Sensor. Die Stereokamera hat den Vorteil, dass neben den Funktionen einer normalen Kamera (Objekterkennung, Fahrspurerkennung, ...) zusätzlich eine Abstandsmessung über die Bildpunkte möglich ist. Dadurch sind detailreichere Umfeldrepräsentationen möglich und ermöglichen es beispielsweise auch die Breite von Objekten direkt abzuschätzen. Die generellen Nachteile einer Kamera wurden bereits erwähnt, für die Stereokamera besteht zusätzlich die Problematik, dass diese eine deutlich geringere Reichweite im Vergleich zu Radar und Lidar haben. Jedoch ist auch aufgrund der geringeren relativ Geschwindigkeiten und der Nutzungsumgebung des Pedelecs, nach den Erfahrungen aus den durchgeführten Versuchsfahrten, eine geringe Reichweite nötig von ca. 30m um eine Vielzahl an Systemen zu realisieren, wobei hier noch weitere Detailuntersuchungen von Pedelec/Radunfällen notwendig sind, um eine belastbare Mindestreichweite zu ermitteln. Es muss jedoch bedacht werden, dass mit einer Reichweite von 30m Funktionen, welche auf einer frühzeitigen Detektion des Gegenverkehrs basiert (z.B. Linksabbiegeassistent) schwer realisierbar sind, da hier das Reaktionsfenster bei einer Warnung zu gering wäre. Berücksichtigt man die Ergebnisse der Nutzerbefragung, so ist die Nutzung des Rades bei schlechtem Wetter (Regen, Schnee, Eisglätte,...) deutlich eingeschränkter, wodurch die Hauptprobleme von kamerabasierten Systemen vermieden werden und diese Systeme besonders für Fahrer, welche nur bei schönem Wetter unterwegs sind, attraktiv sein dürften. Jedoch ist im Zuge des automatisierten Fahrens und den generellen technischen Fortschritten in den Bereichen von Sensorik und Sensorauswertung in Zukunft mit vielen Verbesserungen zu rechnen, von welchen auch in besonderem Maße der Radverkehr profitieren wird, wodurch dies ein aktives Forschungsfeld bleiben dürfte.

## Fahrerabsichtserkennung

Die Problematik der Fahrerabsichtserkennung ist für die Pedelecfahrer sehr stark von der Interaktion des Fahrers mit anderen Objekten/ Verkehrsteilnehmern abhängig. Hierbei spielt besonders die Frage, ob auf ein Hindernis durch Anhalten oder durch Ausweichen reagiert wird, eine große Rolle. Ein Anhaltzeitpunkt und damit verbunden ein Warnzeitpunkt lässt sich vergleichsweise leicht auf Grundlage der Bremsbeschleunigung des Pedelecs ermitteln. Die fahrerbezogenen Einflüsse (z. B. zögerliches Bremsen, Reaktionszeit, Erfahrungsschatz, ...) können fahrerabhängig, wie in Kapitel 2.6 genannt, einstellbar gemacht werden, um die Akzeptanz zu verbessern. Ein Ausweichmanöver hingegen ist bei einem Pedelec deutlich komplexer und insbesondere der Einfluss des Fahrers ist hier signifikant und schwer zu bestimmen, so wird ein erfahrener Fahrer beispielsweise je nach Verkehrslage das Ausweichmanöver später (näher am Objekt) einleiten, während ein defensiver Fahrer früher ausscheren wird. An diesem Beispiel kann bereits erkannt werden, dass in solchen Fällen ein von allen Nutzern gleichermaßen akzeptierter Warnzeitpunkt schwierig einzuschätzen ist, neben der eigentlichen Fragestellung, ob in der jeweiligen Situation der Warnzeitpunkt für ein Ausweichmanöver oder ein Anhaltemanöver gewählt werden sollte. Um die Signifikanz dieser Problematik und einige Details hervorzuheben sowie die Verbindung zur Umfelderkennung herzustellen, sind im Folgenden mehrere Situationen aus Testfahrten dargestellt.



Abbildung 46: Interaktion mit Passanten (Quelle: eigene Darstellung)

In Abbildung 46 ist ein Szenario mit einem Passanten auf einem farblich getrennten Rad- und Fußweg dargestellt. Hierbei muss das System ermitteln, ob eine Gefahrensituation besteht und falls dem so ist, welcher Warnzeitpunkt genutzt wird. Das System kann durch die Umfelderkennung das Objekt erfassen und dessen Bewegung verfolgen und bis zu einem gewissen Grad auch

vorhersagen, um unnötige Warnungen zu unterdrücken. Dabei ist die Bewegungsprädiktion für Passanten bereits seit langem ein sehr großes Forschungsfeld für Assistenzsysteme und autonomes Fahren. Durch die große Nähe und häufige Interaktion mit Passanten spielt dies eine besonders große Rolle für Pedelecs. Eine der häufigsten und alltäglichsten Formen der Interaktion ist dabei die Fahrradklingel, eine Komponente, welcher in der Regel nicht durch das Assistenzsystem abgedeckt wird. Durch die Fahrradklingel soll die Aufmerksamkeit des Passanten auf das herannahende Fahrrad gelenkt werden, sodass dieser die Spur freigibt. Sollte der Passant reagieren und die Fahrspur verlassen, so wäre eine Warnung unangebracht, während eine Warnung notwendig wird, wenn der Passant nicht reagiert (z. B. Klingel nicht wahrgenommen wird). Zusätzlich besteht hier die Frage, ob diese Situation bereits als kritisch durch den Pedelec-fahrer empfunden wird oder dieser bereits ein Umfahren geplant hat und somit eine Warnung als unnötig oder störend empfindet. An diesem alltäglichen Beispiel wird bereits ersichtlich, dass hier durch das System eine Vielzahl an Absichten, sowohl des Pedelec-fahrers als auch des Objekts im Vorfeld erkannt und abgewägt werden müssen, um eine akzeptable Warnstrategie implementieren zu können.

Abbildung 47 zeigt eine weitere Situation, in welcher ein Hindernis die Fahrspur des Radweges blockiert, wobei ein Umfahren unumgänglich ist, während jedoch gleichzeitig auf dem Fußweg ein Passant als potenzielles Hindernis unterwegs ist. Als Fahrer ist es einfach zu erkennen, dass ein Umfahren gefahrlos möglich ist, da der Passant sich weiter geradeaus bewegt und somit genug Platz vorhanden ist für das Manöver. In solch einem Fall muss die Umfelderfassung das statische Objekt als solches erkennen und auch die Bewegung des Passanten präzisieren, sodass die Fahrerabsichtserkennung auf das zu erwartende Ausweichmanöver schließen kann und mögliche unerwünschte Kollisionswarnungen im Vorfeld unterdrückt.

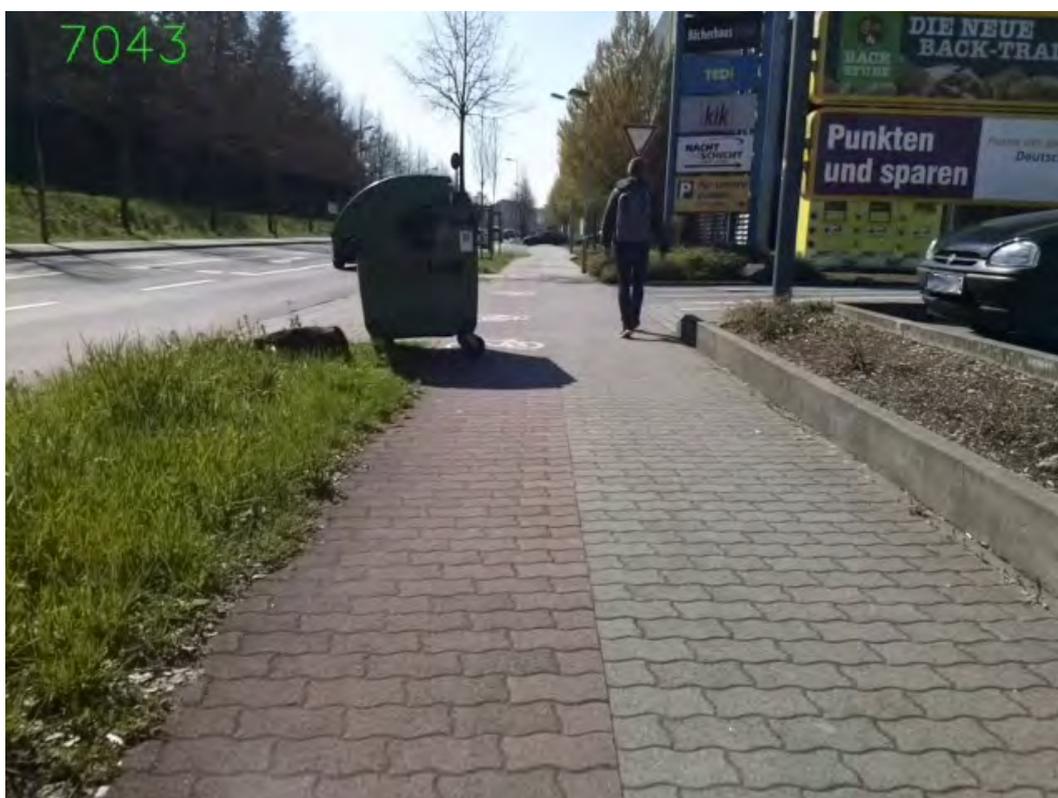


Abbildung 47: Interaktion Hindernisse (Quelle: eigene Darstellung)

In Abbildung 48 ist eine andere Situation mit einem entgegenkommenden Fahrzeug dargestellt. Dieses konkrete Szenario stellt eine sehr große Herausforderung für die Umfelderkennung dar. Um die zulässige Fahrspur zu ermitteln, muss das System die unterschiedlichen auftretenden Straßenbeläge erkennen und korrekt einordnen und gleichzeitig die Fahrbahnbegrenzung von dem parallel verlaufenden Gebäudeschatten unterscheiden. Bei korrekter Umfelderkennung kann nun erkannt werden, dass genug Platz bleibt, um an dem Fahrzeug vorbei zu fahren und die Fahrerabsicht anhand dessen Verhalten ermittelt werden z. B. verringern der Geschwindigkeit um PKW vorbei zu lassen oder weiterfahren. Hierdurch lässt sich auch erkennen, dass die im Vergleich zum PKW deutlich geringere Breite des Pedelecs im Straßenverkehr eigene Verhaltensmuster für diese mit sich bringen, welche für die Entwicklung von Assistenzsystemen sehr relevant sind, jedoch bisher nur selten betrachtet wurden.



Abbildung 48: Interaktion andere Verkehrsteilnehmer (Quelle: eigene Darstellung)

### Weiterer Forschungsbedarf für technische Systeme

Neben den bereits genannten Themengebieten Warnstrategie (Ausführungsformen von Warneinrichtungen, welche Warnung wann,...), Umfelderkennung (Sensorreichweiten, Mehrsensor- vs Einzelsensorkonzept,...) und Fahrerabsichtserkennung in welchen vertiefender Forschungsbedarf besteht, sind besonders auf Funktionsebene viele Fragen offen. Hier wäre insbesondere die Einbindung des Radverkehrs in V2x Kommunikation ein wichtiges Forschungsfeld, welches eine Vielzahl an neuen oder verbesserten Funktionen ermöglichen würde und gleichzeitig aufgrund der Kommunikationsfähigkeit die Umfelderkennung sowie Fahrerabsichtserkennung verbessern könnte. Ebenso wäre eine Detailanalyse der existierenden in-depth Unfalldatenbanken wünschenswert, um ggf. komplett neue Assistenzfunktionen entwickeln zu können, die auf die kritischsten bzw. häufigsten Unfallursachen, welche nicht durch die hier betrachteten Systeme abgedeckt werden, reagieren.

### 3. Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen des Projektes wurde ein Versuchsträger mit umfangreicher Sensorik und Messtechnik konstruiert und evaluiert. Dieser verfügt ebenfalls über Warneinrichtungen und eine auf einem Smartphone basierende Bedienoberfläche. Dieser Versuchsträger wird auch in Zukunft genutzt, um weitere an das Projekt anknüpfende Ergebnisse zu generieren, wie beispielsweise neue und verbesserte Assistenzfunktionen oder Weiterentwicklung der Benutzeroberfläche mit Hinblick auf Bedienerfreundlichkeit.

Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich Potenzial, Konzipierung und Realisierung von Assistenzsystemen für Pedelecs können direkt durch entsprechende Stellen in der Wirtschaft und Industrie zurate gezogen werden und in die jeweiligen Aktivitäten einfließen.

Durch die Analyse der mit dem Versuchsträger durchgeführten Messfahrten konnten wichtige Erkenntnisse zu den Themen Umfelderkennung und Fahrerabsichtserkennung für den Einsatz im Pedelec gewonnen werden und durch konkrete Beispiele veranschaulicht werden, was insbesondere für die Entwicklung weiterer Systeme einen erheblichen Nutzen bringt. Im Zuge dessen, wurde auch auf bestehende Herausforderungen in diesen Themen hingewiesen sowie weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

In der Lehre wurde der Versuchsträger im Rahmen von interdisziplinären studentischen Arbeiten eingesetzt. Hierbei wurden die folgenden studentischen Arbeiten im Rahmen des Projekts durchgeführt:

1. Konzeption und Realisierung einer Hardwareplattform für Fahrerassistenzsysteme, Bachelorarbeit
2. Development of a LIDAR-based Forward Collision Warning System for Electric Bicycles, Masterarbeit
3. Entwicklung eines Systems zur Warnung vor Fahrbahnunebenheiten für Elektrofahrräder basierend auf Beschleunigungs- und Positionssensorik, Masterprojekt

### 4. Fortschritte anderer Stellen während der Projektlaufzeit

Es sind keine Fortschritte an anderer Stelle innerhalb der Projektlaufzeit bekannt geworden.

## 5. Erfolgte und geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

### 5.1. Veröffentlichungen im Berichtszeitraum

#### Fachkonferenzen

5. Nationaler Radverkehrskongress am 03./04.04.2017 in Mannheim (mit Beitrag).  
 Fachtagung „Neue Mobilität für Bürger und Wirtschaft“ am 06.04.2017 in Dortmund (ohne Beitrag).  
 Startup Cycling Conference am 09.11.2017 in Berlin (mit Beitrag)  
 Eurobike Academy am 01.09.2017 in Friedrichshafen (mit Beitrag)  
 Eurobike Academy am 09.07.2018 in Friedrichshafen (mit Beitrag)  
 International Cycling Safety Conference am 10. und 11.10.2019 in Barcelona (mit Beitrag)  
 Fachtagung „Pedelects - Elektrisierende Wiederentdeckung des Fahrrads“ am 14.11.2018 (mit Beitrag)

#### Pressemitteilungen und Medienberichte

Pressemitteilung zum Vorhaben vom 20.07.2016, verfügbar unter <https://idw-online.de/de/news656593>, von verschiedenen Pressediensten übernommen.  
 Interview in der Berliner Zeitung vom 08./09.04.2017 auf Seite B11.  
 Interview in der taz vom 05.04.2017 auf Seite 3.  
 Beitrag im kraftfahrt-berichter vom 12.12.2016.  
 Beitrag im SWR Fernsehen (SWR Aktuell) am 03.04.2017.  
 Beitrag im SWR Fernsehen (zur Sache Rheinland-Pfalz!) am 24.04.2017.  
 "Mehr Sicherheit für Fahrer von E-Bikes", in: SWR Aktuell Rheinland-Pfalz vom 14.11.2018.  
 "Pedelects boomen - Radfahren mit Strom", in: Landesschau Rheinland-Pfalz vom 13.09.2018.  
 "Tödliche Gefahr für Radfahrer", in: „Zur Sache Rheinland-Pfalz“, SWR Rheinland-Pfalz vom 14.06.2018.  
 "Weniger Fahrrad-Unfälle durch Warnsysteme", Interview in: "velobiz.de Magazin 03|2018", S.76-81.  
 "Radfahren sicherer machen", Rheinpfalz Nr. 120 vom 26.05.2018.

#### Vorführungen

Teilnahme an der „Nacht, die Wissenschaft“ in Kaiserslautern am 13.04.2018  
 Fortbildung „Fit-For-eBike“ in Ruit am 5.05.2018  
 Fachtagung „Pedelects - Elektrisierende Wiederentdeckung des Fahrrads“ am 14.11.2018

## 5.2. Ereignisse während des Berichtszeitraums

### Treffen

Auftakttreffen beim BMVI am 05.07.2016 in Berlin.

Treffen beim BMVI am 29.08.2016 in Berlin (Videokonferenz mit BAST).

Forschungsbegleitkreistreffen am 2.11.2016 in Berlin.

Projektbeiratstreffen am 28.04.2017 in Mannheim.

Forschungsbegleitkreistreffen am 11.06.2017 in Berlin

Projektbeiratstreffen am 20.04.2018 in Kaiserslautern

Projektbeiratstreffen am 24.05.2019 in Kaiserslautern

### Messebesuche

Besuch der Eurobike in Friedrichshafen am 02/03.09.2016.

Besuch der Eurobike in Friedrichshafen am 01.09.2017

Besuch der Internationalen Automobilausstellung in Frankfurt am 15.09.2017

Besuch der Spezialradmesse in Germersheim am 28.04.2018

Besuch der iMobility in Stuttgart am 06.04.2018

Besuch der Eurobike in Friedrichshafen am 09.07.2018

## 6. Literatur

- [Aut13] AUTO CLUB EUROPA (ACE): Verkehrsunfalllage bei Verkehrsunfällen mit Elektrofahrzeugen. (2013)
- [BD15] BRUDER, Ralph ; DIDIER, Muriel: Gestaltung von Mensch-Maschine-Schnittstellen. In: WINNER, Hermann (Hrsg.) ; HAKULI, Stephan (Hrsg.) ; LOTZ, Felix (Hrsg.) ; SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015
- [Bel16] BELOW, Ariane von ; BUNDESANSTALT FÜR STRASSENWESEN BAST (Hrsg.): *Verkehrssicherheit von Radfahrern - Analyse sicherheitsrelevanter Motive, Einstellungen und Verhaltensweisen*. Bd. 264. Bergisch Gladbach, 2016
- [bfu15] BFU - BERATUNGSSTELLE FÜR UNFALLVERHÜTUNG: SINUS-Report 2015 - Sicherheitsniveau und Unfallgeschehen im Strassenverkehr 2014. Bern, 2015. – Forschungsbericht
- [Bun15] BUNDESZENTRALE FÜR POLITISCHE BILDUNG: *Bevölkerungsentwicklung und Alterstruktur*. <http://www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/soziale-situation-in-deutschland/61541/altersstruktur>. Version: 2015
- [Che07] CHERRY, Chrispoher: Electric Bike Use in China and Their Impacts on the Environment, Safety, Mobility and Accessibility / UC Berkeley Center for Future Urban Transport. 2007. – Forschungsbericht
- [Deu14] DEUTSCHE TELEKOM AG: *Weltpremiere auf der Eurobike: Canyon und Telekom entwickeln intelligentes Fahrrad*. <https://www.telekom.com/medien/konzern/246944>. Version: 2014
- [Ehr13] EHRENFRIED, Felix: *Schnelles Vergnügen mit hoher Unfallgefahr - Das brummen-de Geschäft mit dem E-Bike-Hype*. <http://www.wiwo.de/technologie/umwelt/>. Version: 2013
- [FAZ16a] FAZ: *Immer mehr Leute fahren E-Bikes*. <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/immer-mehr-leute-fahren-e-bikes-14413949.html>. Version: 2016
- [FAZ16b] FAZ: Vom Elektromotor überfordert? In: *Frankfurter Allgemeine Zeitung FAZ* (2016), Juni
- [FAZ17] FAZ: *So wenige Verkehrstote wie zuletzt vor 60 Jahren*. <http://www.faz.net/aktuell/gesellschaft/ungluecke/autounfaelle-im-verkehr-2016-mit-weniger-todesopfern-14893266.html>. Version: 2017
- [Gar15] GARMIN DEUTSCHLAND GMBH: *Garmin Varia*. <http://explore.garmin.com/de-DE/edge/>. Version: 2015

- [GDV11] GDV - GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V.: Unfallforschung kompakt - Sicherheitstechnische Aspekte schneller Pedelecs. Berlin, 2011 (30). – Forschungsbericht
- [GDV13a] GDV - GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V.: Fahrradunfälle sind häufig, schwer und oft vermeidbar. Berlin, 2013. – Forschungsbericht
- [GDV13b] GDV - GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V.: Unfallforschung kompakt - Unfälle zwischen Kfz und Radfahrern beim Abbiegen. Berlin, 2013 (37). – Forschungsbericht
- [GDV14a] GDV - GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V.: Pedelec-Naturalistic Cycling Study. Berlin, 2014 (27). – Forschungsbericht
- [GDV14b] GDV - GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V.: Unfallforschung kompakt - Neues Risiko Pedelec? Berlin, 2014 (46). – Forschungsbericht
- [GDV15a] GDV - GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V.: Bewertung des Risiko von Pedelecs im Straßenverkehr. Berlin, 2015. – Forschungsbericht
- [GDV15b] GDV - GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V.: Geschwindigkeitswahrnehmung von einspurigen Fahrzeugen. Berlin, 2015 (33). – Forschungsbericht
- [GDV16a] GDV - GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V.: Unfallforschung kompakt - Typische Unfälle zwischen Pkw und Radfahrern. Berlin, 2016 (55). – Forschungsbericht
- [GDV16b] GDV - GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V.: *Unfalltypen-Katalog, Leitfaden zur Bestimmung des Unfalltyps*. Januar 2016
- [GDV18] GDV - GESAMTVERBAND DER DEUTSCHEN VERSICHERUNGSWIRTSCHAFT E.V.: Unfallforschung der Versicherer - Pedelecs: Schnell (und) gefährlich. Version: 2018. <https://m.udv.de/de/blog/pedelecs-schnell-und-gefaehrlich>. Berlin, 2018. – Forschungsbericht
- [HEL16] HUEMER ; ECKHARDT-LIEBERAM: Regelkenntnisse bei deutschen RadfahrerInnen: Onlinebefragung unter Erwachsenen und SchülerInnen. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 5.2016 (2016)
- [HKBL11] HUMMEL, Thomas ; KÜHN, Matthias ; BENDE, Jenö ; LANG, Antje: Fahrerassistenzsysteme: Ermittlung des Sicherheitspotentials auf Basis des Schadensgeschehens der Deutschen Versicherer / Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V., Unfallforschung der Versicherer. Berlin, 2011. – Forschungsbericht
- [Hör15] HÖRTKORN: *Das Unfallrisiko von Pedelecs*. <https://www.drhoertkorn.de/newsmeldung/dasunfallrisikovonpedelecs.html?type=98>. Version: 2015
- [KYKY11] KEO, Lychee ; YOSHINO, Kiyoshi ; KAWAGUCHI, Masahiro ; YAMAKITA, Masaki: Experimental results for stabilizing of a bicycle with a flywheel balancer. In: *Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2011

- [LB13] LAWINGER ; BASTIAN: Neue Formen der Zweiradmobilität. Eine empirische Tiefenanalyse von Pedelec-Unfällen in Baden-Württemberg. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 4.2013 (2013), S. 99–106
- [Mob14] MOBYCON: Electric Bicycle Report / Cykel Super Stier. 2014. – Forschungsbericht
- [n-t15] N-TV: *Unfallzahlen steigen: Wie gefährlich sind E-Bikes?* <http://www.n-tv.de/ratgeber/Wie-gefaehrlich-sind-E-Bikes-article14995521.html>. Version: 2015
- [OFM14] OTTE ; FACIUS ; MÜLLER: Pedelecs im Unfallgeschehen und Vergleich zu konventionellen nicht motorisierten Zweirädern. In: *VKU Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 2.2014 (2014), S. 48–60
- [Par17] PARDEY, Hans-Heinrich: Pech mit Pedelec. In: *Frankfurter Allgemeine Zeitung FAZ* (2017), Juni
- [PPK16] PLATHO, Christina ; PAULRENTZ, Andrea ; KOLREP, Harald ; BUNDESANSTALT FÜR STRASSENWESEN BAST (Hrsg.): *Wahrnehmungspsychologische Analyse der Radfahraufgabe*. Bd. 267. Bergisch Gladbach, 2016
- [RHK09] ROLL, Georg ; HOFFMANN, Oliver ; KÖNIG, Jens: Effectiveness evaluation of antilock brake systems (ABS) for motorcycles in real-world accident scenarios. In: *Proceedings of the 21st International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV)*, 2009
- [Roh16] ROHWETTER, Marcus: E-Bikes - Läuft bei uns. In: *Zeit Online* (2016)
- [RUU<sup>+</sup>16] RUG ; UNIBO ; UNIVLEEDS ; VOLVO ; VTI: XCYCLE - Present state of affairs. 2016. – Forschungsbericht
- [Sch13a] SCHEPERS, Paul: *A safer road environment for cyclists*, TU Delft, Diss., 2013
- [Sch13b] SCHWAIBOLD, Frank: *Schneller als Autofahrer denken - Zahl der Unfälle mit E-Bikes nimmt stark zu*. <http://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.schneller-als-autofahrer-denken-zahl-der-unfaelle-mit-e-bikes-nimmt-stark-zu.d9eaf6a1-674e-4ba1-bde3-2e69d59d52bc.html>. Version: 2013
- [Sch16] SCHRECK, Benjamin: Radverkehr - Unfallgeschehen und Stand der Forschung. In: *Zeitschrift für Verkehrssicherheit* 2.2016 (2016)
- [SFH<sup>+</sup>14] SCHEPERS ; FISHMAN ; HERTOEG ; KLEIN WOLT ; SCHWAB: Accident Analysis and Prevention - The safety of electrically assisted bicycles compared to classic bicycles. In: *Elsevier* (2014)
- [Sol17] SOLDT, Rüdiger: *Gefährliche E-Bikes? - Boom mit Nebenwirkungen*. <http://www.faz.net/aktuell/gesellschaft/gefahrlche-e-bikes-unfaelle-mit-pedelecs-nehmen-zu-14631046.html>. Version: 2017
- [Spi15] SPIEGELONLINE: *Unfälle mit Pedelecs - Wie gefährlich sind Elektrofahrräder?* <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/>. Version: 2015
- [Sta16] STATISTISCHES BUNDESAMT: Verkehrsunfälle 2015 Fachserie 8 Reihe 7. (2016)

- [Sta17] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Ausstattung privater Haushalte mit ausgewählten Gebrauchsgütern - Fachserie 15 Reihe 2 - 2017*. 2017
- [SUN15] SCARAMUZZA, Gianantonio ; UHR, Andrea ; NIEMANN, Steffen ; BFU - BERATUNGSSTELLE FÜR UNFALLVERHÜTUNG (Hrsg.): *E-Bikes im Straßenverkehr - Sicherheitsanalyse*. Bd. 72. Bern, 215
- [SW12] SCHEPERS, Paul ; WOLT, Karin K.: Single-bicycle crash types and characteristics. In: *Cycling Research International 2* (2012), S. 119–135
- [The14] THE LEAGUE OF AMERICAN BICYCLISTS: Every bicyclist counts - Bicyclists safety must be a priority - Findings from a year of fatality tracking and the urgent need for better data. 2014. – Forschungsbericht
- [TL15] THIEMANN-LINDEN, Jörg: Brauchen wir für Pedelecs eine andere Infrastruktur? In: *Verkehrszeichen* (2015), Nr. 3, S. 9–13
- [TNO15] TNO: *Ouderen veilig op weg met eerste intelligente fiets*. <https://www.tno.nl/nl/over-tno/nieuws/2014/12/ouderen-veilig-op-weg-met-eerste-intelligente-fiets/>. Version: 2015
- [vd06] VAN HASSEL ; DE LANGE: Bicyclist safety in bicycle to car accidents: an inventory study / TNO Report. 2006. – Forschungsbericht
- [WDR15] WDR: *Verkehr: Mehr Unfälle mit Elektrorädern - Unterschätzte Gefahr auf unseren Straßen*. URL:<http://www1.wdr.de/fernsehen/ratgeber/markt/sendungen/ebikes102.html>. Version: 2015
- [WER12] WUNRAM, Karsten ; ECKSTEIN, Lutz ; RETTWEILER, Peter: *Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe F: Fahrzeugtechnik*. Bd. 81: *Potenzial aktiver Fahrwerke zur Erhöhung der Fahrsicherheit von Motorrädern*. Bremerhaven : Wirtschaftsverlag N. W. Verlag für neue Wissenschaft, 2012
- [WHLS15] WINNER, Hermann (Hrsg.) ; HAKULI, Stephan (Hrsg.) ; LOTZ, Felix (Hrsg.) ; SINGER, Christina (Hrsg.): *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3. Aufl. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015
- [WHW15] WINNER, Hermann ; HAKULI, Stephan ; WOLF, Gabriele: Verkehrssicherheit und Potenziale von Fahrerassistenzsystemen. In: *Handbuch Fahrerassistenzsysteme: Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015
- [ZIV18] ZIV, Zweirad-Industrie-Verband: *Deutscher Fahrradmarkt 2017*. <https://nationaler-radverkehrsplan.de/de/aktuell/nachrichten/marktanteil-von-elektrofahrraedern-waechst-auf-19>. Version: 2018
- [Zwe17] ZWEIRAD-INDUSTRIE-VERBAND ZIV: Kein höheres Unfallrisiko - Der Zweirad-Industrie-Verband erklärt Anstieg der Unfallzahlen mit E-Bikes. (2017)

## A. Anhang

### A.1. Online-Fragebogen (AP 1.3)

Im Folgenden wird der Fragebogen der Online-Nutzerumfrage aus AP 1.3 dargestellt.



## Nutzerumfrage: Fahrerassistenzsysteme für Pedelecs

Sicherlich waren Sie während Ihrer Fahrten mit einem Fahrrad oder Pedelec (Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten unterstützend antreibt) schon einmal in brenzlige Situationen verwickelt oder haben sogar einen Unfall erlitten. Im Rahmen des Nationalen Radverkehrsplans 2020 untersucht das *Institut für Mobilität und Verkehr (imove) Sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme für Elektrofahräder (SIFAFE)*, da sich gezeigt hat, dass die Zahl der Pedelecunfälle in den vergangenen Jahren stark zugenommen hat.

Im Projekt geht es um die Konzeption von Fahrerassistenzsystemen für Elektrofahräder, die helfen sollen Konfliktsituationen zu entschärfen und Unfälle zu vermeiden. Jede technische Entwicklung sollte jedoch immer auch auf den potentiellen Nutzer abgestimmt sein. Daher möchten wir in einem ersten Schritt Ihre Erwartungen, Wünsche und Hemmnisse in Bezug auf diese technischen Systeme abschätzen. Ihre anonymisierten Berichte und Erfahrungen fließen in die weitere Forschungsarbeit ein und helfen uns beispielsweise beim Aufbau eines Versuchsfahrrades.

Wir würden uns freuen, wenn Sie an dieser ca. 10 minütigen Umfrage teilnehmen und uns mit Ihren Erfahrungen und Eindrücken als regelmäßiger Fahrradfahrer unterstützen würden.

### Vielen Dank für Ihre Hilfe!

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) aus Mitteln zur Umsetzung des Nationalen Radverkehrsplans gefördert.

#### Kontakt für Rückfragen:

Technische Universität Kaiserslautern

Dipl.-Ing. Nicolas Mellinger  
 Institut für Mobilität & Verkehr  
 Fachbereich Bauingenieurwesen  
 Paul-Ehrlich-Straße 14  
 D-67663 Kaiserslautern  
 Tel.: +49 (0)631 / 205-4261  
 E-Mail: [nicolas.mellinger@bauing.uni-kl.de](mailto:nicolas.mellinger@bauing.uni-kl.de)  
 Homepage: [www.imove-kl.de](http://www.imove-kl.de)

#### Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Verkehr und  
digitale Infrastruktur

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Diese Umfrage enthält 36 Fragen.

### Allgemein

**Besitzen Sie zur Zeit ein Fahrrad? Dazu zählen auch Fahrräder im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten.**

**Hinweis: hier sind lediglich Fahrräder ohne Elektromotor gemeint!**

\*

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- Ja  
 Nein

**An welchen Wochentagen nutzen Sie das Fahrrad in der Regel?**

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Antwort war 'Ja' bei Frage '1 [allrad]' ( Besitzen Sie zur Zeit ein Fahrrad? Dazu zählen auch Fahrräder im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Hinweis: hier sind lediglich Fahrräder ohne Elektromotor gemeint! )

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- eher nur an Werktagen
- eher nur am Wochenende
- sowohl an Werktagen als auch am Wochenende
- unregelmäßig an unterschiedlichen Tagen
- nie
- Sonstiges:

**Wie häufig wird das Fahrrad genutzt?**

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Antwort war 'Ja' bei Frage '1 [allrad]' ( Besitzen Sie zur Zeit ein Fahrrad? Dazu zählen auch Fahrräder im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Hinweis: hier sind lediglich Fahrräder ohne Elektromotor gemeint! ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '2 [allradwann]' (An welchen Wochentagen nutzen Sie das Fahrrad in der Regel?)

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- täglich
- ca. 4-5x pro Woche
- ca. 2-3x pro Woche
- ca. 1x pro Woche
- selten, unregelmäßig
- Sonstiges:

**Bei welcher Witterung nutzen Sie das Fahrrad?**

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Antwort war 'Ja' bei Frage '1 [allrad]' ( Besitzen Sie zur Zeit ein Fahrrad? Dazu zählen auch Fahrräder im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Hinweis: hier sind lediglich Fahrräder ohne Elektromotor gemeint! ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '2 [allradwann]' (An welchen Wochentagen nutzen Sie das Fahrrad in der Regel?)

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- bei trockenem Wetter
- bei Regen
- bei Schnee
- bei niedrigen Temperaturen (gefühlte Kälte)
- bei mittleren Temperaturen (gefühlte angenehme Temperatur)
- bei hohen Temperaturen (gefühlte Wärme)
- Sonstiges:

Es sind mehrere Antworten möglich. Bitte kreuzen Sie alles an, das auf Ihre Situation zutrifft.

**Zu welchem Zweck nutzen Sie das Fahrrad üblicherweise?****Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:**

Antwort war 'Ja' bei Frage '1 [allrad]' ( Besitzen Sie zur Zeit ein Fahrrad? Dazu zählen auch Fahrräder im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten.  
Hinweis: hier sind lediglich Fahrräder ohne Elektromotor gemeint! ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '2 [allradwann]' (An welchen Wochentagen nutzen Sie das Fahrrad in der Regel?)

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- für Fahrten zur Arbeit / Ausbildung / Fortbildung
- zum Einkaufen
- in der Freizeit
- im Urlaub
- als Sportgerät
- Sonstiges:

Gemeint sind hier regelmäßige Fahrten mit dem Fahrrad.

**Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten.**

**Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt.**

\*

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- Ja
- Nein

**Welche zwei Faktoren waren Ihnen bei der Anschaffung des Pedelecs besonders wichtig?****Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:**

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten.  
Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. )

Bitte wählen Sie maximal 2 Antworten.

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Sicherheit
- Preis
- Ausstattung an Komponenten und Bauteilen
- Wertigkeit der verbauten Komponenten und Bauteile
- Fahrkomfort
- Reichweite
- Antriebsart (Front-, Mittel- oder Heckmotor)
- Sonstiges:

**Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?****Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:**

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. )

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- eher nur an Werktagen
- eher nur am Wochenende
- sowohl an Werktagen als auch am Wochenende
- unregelmäßig an unterschiedlichen Tagen
- nie
- Sonstiges:

**Seit wann nutzen Sie das Pedelec regelmäßig? \*****Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:**

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '8 [allpedwann]' (Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?)

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Sie können einen Zeitraum oder ein Datum angeben.

**Wie häufig wird das Pedelec genutzt? \*****Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:**

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '8 [allpedwann]' (Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?)

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- täglich
- ca. 4-5x pro Woche
- ca. 2-3x pro Woche
- ca. 1x pro Woche
- selten, unregelmäßig
- Sonstiges

**Bei welcher Witterung nutzen Sie das Pedelec?****Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:**

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '8 [allpedwann]' (Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?)

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- bei trockenem Wetter
- bei Regen
- bei Schnee
- bei niedrigen Temperaturen (gefühlte Kälte)
- bei mittleren Temperaturen (gefühlte angenehme Temperatur)
- bei hohen Temperaturen (gefühlte Wärme)
- Sonstiges:

Es sind mehrere Antworten möglich. Bitte kreuzen Sie alles an, was auf Ihre Situation zutrifft.

**Zu welchem Zweck nutzen Sie das Pedelec üblicherweise ?****Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:**

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten.  
 Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '8 [allpedwann]' (Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?)

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

 für die Fahrt zur Arbeit / Ausbildung /Fortbildung zum Einkaufen in der Freizeit im Urlaub als Sportgerät Sonstiges: 

Gemeint sind hier regelmäßige Fahrten mit dem Pedelec.

**Mit welcher Geschwindigkeit sind Sie im Durchschnitt mit dem Pedelec unterwegs?****Sie können die Durchschnittsgeschwindigkeit an Ihrem Tacho ablesen. Wenn Sie diese nicht wissen, lassen Sie das Feld bitte frei.****Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:**

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten.  
 Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '8 [allpedwann]' (Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?)

Bitte geben Sie Ihre Antwort(en) hier ein:

Durchschnittsgeschwindigkeit [km/h] **Wie weit sind Sie in der Regel mit dem Pedelec unterwegs?****Bitte geben Sie die Gesamtkilometer pro Tag [km/Tag] an, die Sie gewöhnlich zurücklegen.****Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:**

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten.  
 Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '8 [allpedwann]' (Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?)

Bitte geben Sie Ihre Antwort(en) hier ein:

Werktag [km/Tag] Wochenende [km/Tag] **Die Gesamtkilometer an einem Tag setzen sich oft aus mehreren Teilstrecken (z.B. Hin- und Rückweg) zusammen.****Bitte geben Sie die Länge der häufigsten Teilstrecke [km/Teilstrecke] an, die Sie gewöhnlich zurücklegen.****Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:**

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten.  
 Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '8 [allpedwann]' (Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?)

Bitte geben Sie Ihre Antwort(en) hier ein:

Werktag [km/Teilstrecke] Wochenende [km/Teilstrecke]

**Wie weit sind Sie in der Regel mit dem Pedelec unterwegs?**

**Sie können alternativ auch Ihre regelmäßigen Wege angeben, die Sie mit dem Pedelec zurücklegen. Geben Sie dazu bitte Start- und Zielort sowie gegebenenfalls Zwischenhalte an.**

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

----- Scenario 1 -----

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '8 [allpedwann]' (Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?) und Antwort war " bei Frage '14 [allpedweg]' ( Wie weit sind Sie in der Regel mit dem Pedelec unterwegs? Bitte geben Sie die Gesamtkilometer pro Tag [km/Tag] an, die Sie gewöhnlich zurücklegen. (Werktag [km/Tag]))

----- oder Scenario 2 -----

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '8 [allpedwann]' (Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?) und Antwort war " bei Frage '14 [allpedweg]' ( Wie weit sind Sie in der Regel mit dem Pedelec unterwegs? Bitte geben Sie die Gesamtkilometer pro Tag [km/Tag] an, die Sie gewöhnlich zurücklegen. (Wochenende [km/Tag]))

----- oder Scenario 3 -----

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '8 [allpedwann]' (Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?) und Antwort war " bei Frage '15 [allpedweg1]' ( Die Gesamtkilometer an einem Tag setzen sich oft aus mehreren Teilstrecken (z.B. Hin- und Rückweg) zusammen. Bitte geben Sie die Länge der häufigsten Teilstrecke [km/Teilstrecke] an, die Sie gewöhnlich zurücklegen. (Werktag [km/Teilstrecke]))

----- oder Scenario 4 -----

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '8 [allpedwann]' (Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?) und Antwort war " bei Frage '15 [allpedweg1]' ( Die Gesamtkilometer an einem Tag setzen sich oft aus mehreren Teilstrecken (z.B. Hin- und Rückweg) zusammen. Bitte geben Sie die Länge der häufigsten Teilstrecke [km/Teilstrecke] an, die Sie gewöhnlich zurücklegen. (Wochenende [km/Teilstrecke]))

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

### Welche Wege nutzen Sie üblicherweise mit Ihrem Pedelec?

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '8 [allpedwann]' (Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?)

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:



baulicher Radweg



Radfahrstreifen



Schutzstreifen



Waldweg



Fahrbahn



Gehweg (nicht für Fahrräder freigegeben)



Gemeinsamer Rad- und Fußweg

Sonstiges:

Wege, die nur in Ausnahmesituationen oder nicht regelmäßig genutzt werden, sollten hier nicht aufgeführt werden.

### Besitzen Sie zur Zeit ein Auto? Dazu zählen auch KFZ in Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. \*

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

Ja

Nein

## Gefahrenpunkte

**Waren Sie mit einem Fahrrad oder Pedelec schon einmal in einen Unfall verwickelt?**

**Hinweis: Als Unfall gelten Stürze oder Kollisionen mit Gegenständen bzw. anderen Verkehrsteilnehmern.**

\*

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

----- Scenario 1 -----

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '8 [allpedwann]' (Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?)

----- oder Scenario 2 -----

Antwort war 'Ja' bei Frage '1 [allrad]' ( Besitzen Sie zur Zeit ein Fahrrad? Dazu zählen auch Fahrräder im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Hinweis: hier sind lediglich Fahrräder ohne Elektromotor gemeint! ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '2 [allradwann]' (An welchen Wochentagen nutzen Sie das Fahrrad in der Regel?)

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- Ja  
 Nein

**Unfälle können in verschiedene Unfallarten kategorisiert werden.**

**Bitte ordnen Sie Ihre Unfälle mit dem Fahrrad oder Pedelec folgenden Unfallarten zu. Tragen Sie bitte jeweils die Anzahl einer Unfallart seit Zweiradbesitz ein. Sie bekommen anschließend die Möglichkeit, die Unfallhergänge zu beschreiben.**

**Hinweis: Wenn Sie sich unsicher sind, lassen sie das Feld bitte leer (...), hatten Sie keinen Unfall, tragen Sie die Null ein (0).**

**Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:**

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '8 [allpedwann]' (Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?) und Antwort war 'Ja' bei Frage '19 [unfallallg]' ( Waren Sie mit einem Fahrrad oder Pedelec schon einmal in einen Unfall verwickelt? Hinweis: Als Unfall gelten Stürze oder Kollisionen mit Gegenständen bzw. anderen Verkehrsteilnehmern. )

	ohne Verletzung	mit leichter Verletzung (Schürfwunde, Prellung)	mit schwerer Verletzung (Bruch, Gehirnerschütterung, innere Verletzungen)
<p><b>Alleinunfall</b> (Unfall ohne Beteiligung eines weiteren Verkehrsteilnehmers)</p> <p>Beispiele: Kontrollverlust während der Fahrt mit Sturz, Wegrutschen eines Reifens auf nassem Untergrund mit Sturz, Übersehen einer Bordsteinkante mit Sturz, Kollision mit Gegenstand</p>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<p><b>Unfall in Längsrichtung</b> (in Fahrtrichtung, beim Fahren entlang einer Strecke)</p> <p>Beispiele: zu dichtes Überholen mit Sturz, Auffahren, starkes Abbremsen direkt vor Ihnen mit Sturz, "Schneiden" durch einen PKW, LKW oder anderen Radfahrer mit Sturz</p>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<p><b>Unfall beim Abbiegen</b> (an einer Kreuzung oder Einmündung)</p> <p>Beispiele: seitlicher, frontaler oder Hecktreffer durch einen PKW, LKW oder anderen Radfahrer, toter Winkel</p>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<p><b>Unfall beim Queren</b> (Geradeausfahren an einer Kreuzung oder Einmündung)</p> <p>Beispiele: seitlicher, frontaler oder Hecktreffer durch einen PKW, LKW oder anderen Radfahrer, toter Winkel</p>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<p><b>sonstiger Unfall</b></p>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Sie haben angegeben, dass Sie schon einmal in einen oder mehrere Unfälle verwickelt waren. Sie haben nun die Möglichkeit, ihre Erfahrungen und Eindrücke näher zu beschreiben.**

**Bitte geben Sie kurz die Ursachen bzw. Gründe, den jeweiligen Unfallhergang, den Zeitraum (Jahr) und eventuelle Unfallfolgen (Verletzungen, Schaden) an.**

**Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:**

Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. ) und Antwort war NICHT 'nie' bei Frage '8 [allpedwann]' (Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?) und Antwort war 'Ja' bei Frage '19 [unfallallg]' ( Waren Sie mit einem Fahrrad oder Pedelec schon einmal in einen Unfall verwickelt? Hinweis: Als Unfall gelten Stürze oder Kollisionen mit Gegenständen bzw. anderen Verkehrsteilnehmern. )

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Hinweis: Stichpunkte sind ausreichend.

## FAS Wünsche

**Sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme (FAS) sind elektronische oder technische Systeme, die den Fahrer während der Fahrt bei bestimmten Aufgaben unterstützen und somit die Sicherheit im Straßenverkehr steigern sollen.**

**Sind Ihnen bereits sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme, zum Beispiel aus der Automobilindustrie, bekannt?**

\*

Bitte wählen Sie mindestens eine Antwort.

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Anti-Blockier-System (ABS)
- Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP)
- automatische Lichtassistentz
- Abstandssensoren / Hinderniswarnung
- Schilderererkennung
- Notbremsassistent
- Lenkassistent
- Müdigkeitserkennung
- Spurwechselassistent (Toter Winkel)
- Spurhalteassistent
- ich kenne **keine** Fahrerassistenzsysteme
- Sonstiges:

**Welche sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme nutzen Sie bereits aktiv im Fahrzeug?**

\*

**Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:**

Antwort war bei Frage '22 [FASkennen]' ( Sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme (FAS) sind elektronische oder technische Systeme, die den Fahrer während der Fahrt bei bestimmten Aufgaben unterstützen und somit die Sicherheit im Straßenverkehr steigern sollen. Sind Ihnen bereits sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme, zum Beispiel aus der Automobilindustrie, bekannt? )

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- automatische Lichtassistentz
- Abstandssensoren / Hinderniswarnung
- Schilderererkennung
- Notbremsassistent
- Lenkassistent
- Müdigkeitserkennung
- Spurwechselassistent
- Spurhalteassistent
- ich nutze **keine** sicherheitsorientierten Fahrerassistenzsysteme

**Nutzen Sie bereits Fahrerassistenzsysteme am Pedelec oder Fahrrad?**

**Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:**  
 Antwort war 'Ja' bei Frage '6 [allped]' ( Besitzen Sie ein Pedelec? Dazu zählen auch Pedelecs im Familienbesitz, die Sie jederzeit nutzen könnten. Definition Pedelec: Fahrrad mit Elektromotor, der das Rad beim Treten bis zu einer Geschwindigkeit von 25km/h unterstützend antreibt. ) und Antwort war bei Frage '8 [allpedwann]' (Wann nutzen Sie das Pedelec in der Regel?) und Antwort war bei Frage '22 [FASKennen]' ( Sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme (FAS) sind elektronische oder technische Systeme, die den Fahrer während der Fahrt bei bestimmten Aufgaben unterstützen und somit die Sicherheit im Straßenverkehr steigern sollen. Sind Ihnen bereits sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme, zum Beispiel aus der Automobilindustrie, bekannt? )

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

ja (bitte geben Sie im rechten Feld an, welche)

nein, und das ist auch gut so

nein, aber ich könnte es mir vorstellen

Bitte schreiben Sie einen Kommentar zu Ihrer Auswahl

**Bitte beurteilen Sie die bisher von Ihnen genutzten Fahrerassistenzsysteme allgemein mithilfe folgender Tabelle.**

**Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:**  
 ----- Scenario 1 -----  
 Antwort war bei Frage '22 [FASKennen]' ( Sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme (FAS) sind elektronische oder technische Systeme, die den Fahrer während der Fahrt bei bestimmten Aufgaben unterstützen und somit die Sicherheit im Straßenverkehr steigern sollen. Sind Ihnen bereits sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme, zum Beispiel aus der Automobilindustrie, bekannt? ) und Antwort war bei Frage '23 [FASnutzungFahrzeug]' ( Welche sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme nutzen Sie bereits aktiv im Fahrzeug? )  
 ----- oder Scenario 2 -----  
 Antwort war 'ja (bitte geben Sie im rechten Feld an, welche)' bei Frage '24 [FASnutzungped]' (Nutzen Sie bereits Fahrerassistenzsysteme am Pedelec oder Fahrrad?)

Bitte wählen Sie die zutreffende Antwort für jeden Punkt aus:

	ja	eher ja	eher nein	nein
Beurteilen Sie die Wirksamkeit der FAS als gut?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Finden Sie FAS nützlich?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Empfinden Sie FAS als störend?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**Sie haben angegeben, dass Sie bereits sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme im Fahrzeug oder am Zweirad nutzen. Sie haben nun die Möglichkeit, kurz über Ihre Erfahrungen zu berichten.**

**Bitte geben Sie auch Ihre Beweggründe für die Nutzung sowie den Nutzungszeitraum an.**

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

----- Scenario 1 -----

Antwort war bei Frage '22 [FASkennen]' ( Sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme (FAS) sind elektronische oder technische Systeme, die den Fahrer während der Fahrt bei bestimmten Aufgaben unterstützen und somit die Sicherheit im Straßenverkehr steigern sollen. Sind Ihnen bereits sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme, zum Beispiel aus der Automobilindustrie, bekannt? ) und Antwort war bei Frage '23 [FASnutzungFahrzeug]' ( Welche sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme nutzen Sie bereits aktiv im Fahrzeug? )

----- oder Scenario 2 -----

Antwort war 'ja (bitte geben Sie im rechten Feld an, welche)' bei Frage '24 [FASnutzungped]' (Nutzen Sie bereits Fahrerassistenzsysteme am Pedelec oder Fahrrad?)

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

**Bitte schätzen Sie ab: Hätte ein sicherheitsorientiertes Fahrerassistenzsystem Ihren Unfall / Ihre Unfälle verhindern können?**

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Antwort war 'Ja' bei Frage '19 [unfallallg]' ( Waren Sie mit einem Fahrrad oder Pedelec schon einmal in einen Unfall verwickelt? Hinweis: Als Unfall gelten Stürze oder Kollisionen mit Gegenständen bzw. anderen Verkehrsteilnehmern. ) und Antwort war NICHT 'nein' bei Frage '25 [FASnutzungGS]' (Bitte beurteilen Sie die bisher von Ihnen genutzten Fahrerassistenzsysteme allgemein mithilfe folgender Tabelle. (Beurteilen Sie die Wirksamkeit der FAS als gut?)) und Antwort war NICHT 'ja (bitte geben Sie im rechten Feld an, welche)' bei Frage '24 [FASnutzungped]' (Nutzen Sie bereits Fahrerassistenzsysteme am Pedelec oder Fahrrad?)

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- Ja  
 Nein

**Welche sicherheitsorientierten Fahrerassistenzsysteme halten Sie speziell am Pedelec für sinnvoll bzw. wünschenswert?**

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Anti-Blockier-System (ABS)  
 Elektronisches Stabilitätsprogramm (ESP)  
 automatische Lichtassistentz  
 Abstandssensoren / Hinderniswarnung  
 Schilderererkennung  
 Notbremsassistent  
 Spurwechselassistent (Toter Winkel, Schutz vor Überholenden)  
 Spurhalteassistent  
 Lenkassistent  
 weitere / wünschenswerte:

Sie können hier auch noch nicht existierende Fahrerassistenzsysteme eintragen!

**Welche Warnelemente könnten aus Ihrer Sicht bei Fahrerassistenzsystemen für Pedelecs sinnvoll sein?**

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- optische Warnelemente am Pedelec (z.B. Signalleuchten)
- optische Warnelemente am Fahrer (z.B. Display in Fahrradbrille)
- akustische Warnelemente am Pedelec (z.B. Signaltongeber am Rahmen)
- akustische Warnelemente am Fahrer (z.B. Signaltongeber am Helm)
- haptische Warnelemente am Pedelec (z.B. Vibrationsgeber in den Griffen oder im Sattel)
- haptische Warnelemente am Fahrer (z.B. Vibrationsgeber per Klettverschluss am Handgelenk)
- Sonstiges:

**Wieviel wären Sie bereit in sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme für Pedelecs zu investieren?**

**Bitte geben Sie einen Betrag in Euro an.**

Bitte geben Sie Ihre Antwort(en) hier ein:

## FAS Hemmnisse

**Bitte geben Sie an, welche Hemmnisse oder Bedenken Sie im Hinblick auf die Nutzung von Fahrerassistenzsystemen haben.**

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Ablenkung während der Fahrt
- Bedenken vor Fehldetektionen oder technischen Fehlern
- Angst vor Systemausfall
- Fahrerassistenzsysteme behindern die eigene Fahrweise
- Gefahr des Erschreckens beim Eingriff des Fahrerassistenzsystems
- Datenschutzbedenken
- schlechte Erfahrungen gemacht
- ich habe **keine** Bedenken
- andere Gründe:

**Sie haben angegeben, dass Sie schlechte Erfahrungen mit FAS gemacht haben. Bitte erläutern Sie kurz, um welches System es sich dabei gehandelt hat und wo die Probleme lagen.**

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

Antwort war bei Frage '31 [FASnein]' (Bitte geben Sie an, welche Hemmnisse oder Bedenken Sie im Hinblick auf die Nutzung von Fahrerassistenzsystemen haben.)

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

**Welche Voraussetzungen müssten erfüllt sein, dass Sie sich für die Nutzung eines FAS entscheiden würden?**

Beantworten Sie diese Frage nur, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

----- Szenario 1 -----

Antwort war bei Frage '23 [FASnutzungFahrzeug]' ( Welche sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme nutzen Sie bereits aktiv im Fahrzeug? )

----- oder Szenario 2 -----

Antwort war 'he in, und das ist auch gut so' bei Frage '24 [FASnutzungped]' (Nutzen Sie bereits Fahrerassistenzsysteme am Pedelec oder Fahrrad?)

Bitte wählen Sie alle zutreffenden Antworten aus:

- Das System muss vollständig abschaltbar sein
- Das System muss bei umfangreichen Feldtests fehlerfrei funktioniert haben
- Das System muss zuverlässig und in jeder Situation gleich gut reagieren
- Das System darf während der Fahrt nicht ablenken
- Das System muss für mich erschwinglich sein
- Sonstiges:

**Bitte geben Sie Ihr Geburtsjahr an.**

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- < 1936
- 1937
- 1938
- 1939
- 1940
- 1941
- 1942
- 1943
- 1944
- 1945
- 1946
- 1947
- 1948
- 1949
- 1950
- 1951
- 1952
- 1953
- 1954
- 1955
- 1956
- 1957
- 1958
- 1959
- 1960
- 1961
- 1962
- 1963
- 1964
- 1965
- 1966
- 1967
- 1968
- 1969
- 1970
- 1971
- 1972
- 1973
- 1974
- 1975
- 1976
- 1977
- 1978
- 1979
- 1980
- 1981
- 1982
- 1983

<input type="checkbox"/>	1984
<input type="checkbox"/>	1985
<input type="checkbox"/>	1986
<input type="checkbox"/>	1987
<input type="checkbox"/>	1988
<input type="checkbox"/>	1989
<input type="checkbox"/>	1990
<input type="checkbox"/>	1991
<input type="checkbox"/>	1992
<input type="checkbox"/>	1993
<input type="checkbox"/>	1994
<input type="checkbox"/>	1995
<input type="checkbox"/>	1996
<input type="checkbox"/>	1997
<input type="checkbox"/>	1998
<input type="checkbox"/>	1999
<input type="checkbox"/>	2000
<input type="checkbox"/>	2001
<input type="checkbox"/>	2002
<input type="checkbox"/>	2003
<input type="checkbox"/>	2004
<input type="checkbox"/>	2005
<input type="checkbox"/>	> 2006

**Bitte geben Sie Ihr Geschlecht an.**

Bitte wählen Sie nur eine der folgenden Antworten aus:

- weiblich  
 männlich

**Bitte geben Sie noch die Postleitzahl oder den Namen Ihres Wohnorts an. \***

Bitte geben Sie Ihre Antwort hier ein:

Institut für Mobilität & Verkehr - Umfragetool - Nutzerumfrage: Fahre... <https://transport.arubi.uni-kl.de/limesurvey2/index.php/admin/printabl...>

Ihre Antworten wurden gespeichert!

Die Ergebnisse der Auswertung werden auf unserer Homepage [www.imove-kl.de](http://www.imove-kl.de) veröffentlicht. Sie sind voraussichtlich ab Juni 2017 abrufbar. Auf der Homepage finden Sie auch Kontaktdaten, unter denen Sie uns bei Rückfragen erreichen können!

**Vielen Dank für Ihre Teilnahme.**

Ansprechpartner:

Dipl.-Ing. Nicolas Mellinger

Tel.: +49 (0)631 / 205-4261

E-Mail: [nicolas.mellinger@bauing.uni-kl.de](mailto:nicolas.mellinger@bauing.uni-kl.de)

Bitte faxen Sie den ausgefüllten Fragebogen an 0631 / 205-3905

Übermittlung Ihres ausgefüllten Fragebogens:

Vielen Dank für die Beantwortung des Fragebogens.



## A.2. Fragebogen zum Probandentest (AP 3.2)

Im Folgenden wird der Fragebogen des Probandentests zur Evaluation der Assistenzsysteme aus AP 3.2 dargestellt.

## Fahrerassistenzsysteme für Elektrofahrräder (1)

1. Bitte vervollständigen Sie folgende Angaben zu Ihrer Person:

Alter  Jahre      Geschlecht  männlich  weiblich

2. Wie häufig fahren Sie üblicherweise zu den folgenden Zwecken Fahrrad?

bei Überschneidungen bitte doppelt ankreuzen (Bsp. Weg zur Arbeit ist Ausdauertraining)

	nie	seltener als monatlich	1-3 Mal pro Monat	1-3 Mal pro Woche	4-5 Mal pro Woche	(fast) täglich	keines zutreffend
zu Ihrem Arbeitsplatz							
zu Ihrer Ausbildungsstelle							
als Freizeitaktivität (Bsp. Ausflüge)							
für Ihre Einkäufe / Erledigungen							
als Training / Sport (Bsp. Ausdauertraining)							
Sonstiges							

3. Unter welchen Bedingungen fahren Sie seltener als üblicherweise oder gar nicht Fahrrad?

	wie üblich	seltener	gar nicht	weiß nicht
bei schlechtem Wetter (Bsp. Kälte, Regen, Wind)				
bei großer Hitze				
bei Schnee und Eisglätte				
bei Dämmerung oder Dunkelheit				
bei großer körperlicher Anstrengung (Bsp. sehr steile Route)				
bei Sperrungen der üblichen Strecke				
Sonstiges				

4. Wie viele Kilometer legen Sie in etwa pro Jahr mit dem Fahrrad zurück?

0-100     101-500     501-1.500     1.501-2.500     2.501-5.000     > 5.000     k.A.

5. Wie lange dauert der Weg, den Sie am häufigsten mit dem Fahrrad zurücklegen (ohne Rückweg)?

bis 10min     bis 20min     bis 30min     bis 40min     mehr als 40min     weiß nicht

6. Welche Art von Fahrrad fahren Sie üblicherweise?

Bitte wählen Sie die Art aus, die Sie am häufigsten nutzen.

City Bike / Stadtfahrrad / Tourenbike       Mountainbike / Dirtbike  
 Rennrad / Singlespeed / Fixed Gear       Sonstiges  
 E-Bike / Pedelec (bis 25km/h)

↳ Art:  City Bike / Stadtfahrrad / Tourenbike     Mountainbike / Dirtbike     Sonstiges  
 ↳ Motorlage:  Frontmotor     Mittelmotor     Heckmotor

7. Wie viele Unfälle hatten Sie als RadfahrerIn in den letzten zwei Jahren?

	0	1-2	3-4	5-6	>6	weiß nicht
alleine (Bsp. Sturz wegen Hindernis, beim Sport)						
mit FußgängerInnen						
mit anderen RadfahrerInnen						
mit Autos oder Motorrädern/-rollern						

8. Sind Ihnen bereits sicherheitsorientierte Fahrerassistenzsysteme, zum Beispiel aus der Automobilindustrie, bekannt?

ABS, ESP       Notbremsassistentz       Sonstige: \_\_\_\_\_  
 automatische Lichtassistentz       Lenkassistentz      \_\_\_\_\_  
 Abstandssensoren / Hinderniswarnung       Müdigkeitserkennung      \_\_\_\_\_  
 Schildererkennung       Spurwechselassistentz       keine

**Fahrerassistenzsysteme für Elektrofahrräder (2)** 

9. Wie gut kamen Sie mit dem Versuchspedelec zurecht?

Bitte vergleichen Sie das Versuchspedelec hierzu mit Ihrem eigenen Fahrrad.

Handling	<input type="checkbox"/>	besser	<input type="checkbox"/>	gl. gut	<input type="checkbox"/>	schl.	Beschleunigung	<input type="checkbox"/>	besser	<input type="checkbox"/>	gl. gut	<input type="checkbox"/>	schl.
Komfort	<input type="checkbox"/>	besser	<input type="checkbox"/>	gl. gut	<input type="checkbox"/>	schl.	Gewicht	<input type="checkbox"/>	besser	<input type="checkbox"/>	gl. gut	<input type="checkbox"/>	schl.
Sitzposition	<input type="checkbox"/>	besser	<input type="checkbox"/>	gl. gut	<input type="checkbox"/>	schl.	Bedienung FAS	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> k.A.					
Bedienung Rad	<input type="checkbox"/>	besser	<input type="checkbox"/>	gl. gut	<input type="checkbox"/>	schl.							

10. Schätzen Sie ein: Wie viel Prozent Ihrer Unfälle könnten durch FAS verhindert werden?

Anteil verhinderbarer Unfälle  %  keinen Unfall erlitten  k.A.

**Frontkollisionswarnung**

11. Würden Sie das System als zuverlässig beschreiben?

sehr zuverlässig  zuverlässig  eher nicht zuverlässig  nicht zuverlässig  k.A.

12. Wie zuverlässig wurden Hindernisse erkannt?

Anzahl erkannter Hindernisse	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6	<input type="checkbox"/> k.A.	Wert	<input type="text"/>
Anzahl versäumter Messungen	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6	<input type="checkbox"/> k.A.		<input type="text"/>
Anzahl an Fehlmessungen	<input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 4	<input type="checkbox"/> 5	<input type="checkbox"/> 6	<input type="checkbox"/> k.A.		<input type="text"/>

13. Bitte beurteilen Sie die Art und Intensität der Warnung.

<b>Art</b>	<input type="checkbox"/> zu früh	<input type="checkbox"/> genau richtig	<input type="checkbox"/> zu spät	<b>Intensität</b>	<input type="checkbox"/> zu stark	<input type="checkbox"/> genau richtig	<input type="checkbox"/> zu schwach	<input type="checkbox"/> nicht beurteilbar	<b>optisch</b>	<input type="checkbox"/> zu stark	<input type="checkbox"/> genau richtig	<input type="checkbox"/> zu schwach	<input type="checkbox"/> nicht beurteilbar	<b>haptisch</b>	<input type="checkbox"/> zu stark	<input type="checkbox"/> genau richtig	<input type="checkbox"/> zu schwach	<input type="checkbox"/> nicht beurteilbar	<b>akustisch</b>
------------	----------------------------------	--	----------------------------------	-------------------	-----------------------------------	--	-------------------------------------	--	----------------	-----------------------------------	--	-------------------------------------	--	-----------------	-----------------------------------	--	-------------------------------------	--	------------------

14. Wie haben Sie sich während der Nutzung des Systems gefühlt?

sehr gestresst  leicht gestresst  neutral  entspannt  sehr entspannt  k.A.

15. Wie sicher haben Sie sich durch die Nutzung des Systems gefühlt?

sehr sicher  sicher  neutral  unsicher  sehr unsicher  k.A.

16. Wie groß war die Ablenkung durch das System?

sehr groß  groß  klein  sehr klein **Bemerkung:**   k.A.

17. Welche Probleme traten während der Fahrt auf? Gibt es Verbesserungsvorschläge?

18. Welche Eigenschaften des Systems würden Sie als positiv oder negativ hervorheben?

Warnung, Detektion, Integration ins Rad, Ablenkung, ...

19. Würden Sie das getestete System kaufen? Wie viel wären Sie bereit dafür auszugeben?

ja  nein **Voraussetzungen für den Kauf:**   
  
  
**Betrag**  €

## Fahrerassistenzsysteme für Elektrofahrräder (2)



### Spurverlassenswarnung

11. Würden Sie das System als zuverlässig beschreiben?  
 sehr zuverlässig     zuverlässig     eher nicht zuverlässig     nicht zuverlässig     k.A.

12. Wie zuverlässig wurden seitliche Markierungen / Fahrbahnbegrenzungen erkannt?

Anzahl erkannter "Linien"	1	2	3	4	5	6	k.A.	Wert	<input type="text"/>
Anzahl versäumter Messungen	1	2	3	4	5	6	k.A.		<input type="text"/>
Anzahl an Fehlmessungen	1	2	3	4	5	6	k.A.		<input type="text"/>

13. Bitte beurteilen Sie die Art und Intensität der Warnung.

<b>Art</b>	<input type="checkbox"/> zu früh	<input type="checkbox"/> genau richtig	<input type="checkbox"/> zu spät	<b>Intensität</b>	<input type="checkbox"/> zu stark	<input type="checkbox"/> genau richtig	<input type="checkbox"/> zu schwach	<input type="checkbox"/> nicht beurteilbar	<b>haptisch</b>	<input type="checkbox"/> zu stark	<input type="checkbox"/> genau richtig	<input type="checkbox"/> zu schwach	<input type="checkbox"/> nicht beurteilbar	<b>akustisch</b>	<input type="checkbox"/> zu stark	<input type="checkbox"/> genau richtig	<input type="checkbox"/> zu schwach	<input type="checkbox"/> nicht beurteilbar
------------	----------------------------------	--	----------------------------------	-------------------	-----------------------------------	--	-------------------------------------	--	-----------------	-----------------------------------	--	-------------------------------------	--	------------------	-----------------------------------	--	-------------------------------------	--

14. Wie haben Sie sich während der Nutzung des Systems gefühlt?  
 sehr gestresst     leicht gestresst     neutral     entspannt     sehr entspannt     k.A.

15. Wie sicher haben Sie sich durch die Nutzung des Systems gefühlt?  
 sehr sicher     sicher     neutral     unsicher     sehr unsicher     k.A.

16. Wie groß war die Ablenkung durch das System?  
 sehr groß     groß     klein     sehr klein    Bemerkung:      k.A.

17. Welche Probleme traten während der Fahrt auf? Gibt es Verbesserungsvorschläge?

18. Welche Eigenschaften des Systems würden Sie als positiv oder negativ hervorheben?  
 Warnung, Detektion, Integration ins Rad, Ablenkung, ...

19. Würden Sie das getestete System kaufen? Wie viel wären Sie bereit dafür auszugeben?  
 ja     nein    Voraussetzungen für den Kauf:   
  
 Betrag  €

## Fahrerassistenzsysteme für Elektrofahrräder (2)



### Annäherungswarnung für sich rückwärtig nähernde Fahrzeuge

11. Würden Sie das System als zuverlässig beschreiben?  
 sehr zuverlässig     zuverlässig     eher nicht zuverlässig     nicht zuverlässig     k.A.

12. Wie zuverlässig wurden Fahrzeuge erkannt?  
 Anzahl erkannter Fahrzeuge    

1	2	3	4	5	6	k.A.
---	---	---	---	---	---	------

    Wert   
 Anzahl versäumter Messungen    

1	2	3	4	5	6	k.A.
---	---	---	---	---	---	------

  
 Anzahl an Fehlmessungen    

1	2	3	4	5	6	k.A.
---	---	---	---	---	---	------

13. Bitte beurteilen Sie die Art und Intensität der Warnung.

Art <input type="checkbox"/> zu früh <input type="checkbox"/> genau richtig <input type="checkbox"/> zu spät	Intensität optisch <input type="checkbox"/> zu stark <input type="checkbox"/> genau richtig <input type="checkbox"/> zu schwach <input type="checkbox"/> nicht beurteilbar
---	---

14. Wie haben Sie sich während der Nutzung des Systems gefühlt?  
 sehr gestresst     leicht gestresst     neutral     entspannt     sehr entspannt     k.A.

15. Wie sicher haben Sie sich durch die Nutzung des Systems gefühlt?  
 sehr sicher     sicher     neutral     unsicher     sehr unsicher     k.A.

16. Wie groß war die Ablenkung durch das System?  
 sehr groß     groß     klein     sehr klein    Bemerkung:      k.A.

17. Welche Probleme traten während der Fahrt auf? Gibt es Verbesserungsvorschläge?

18. Welche Eigenschaften des Systems würden Sie als positiv oder negativ hervorheben?  
 Warnung, Detektion, Integration ins Rad, Ablenkung, ...

19. Würden Sie das getestete System kaufen? Wie viel wären Sie bereit dafür auszugeben?  
 ja    Voraussetzungen für den Kauf:   
 nein  
 Betrag  €

**Fahrerassistenzsysteme für Elektrofahrräder (2)**



**Antiblockiersystem (ABS)**

11. Würden Sie das System als zuverlässig beschreiben?  
 sehr zuverlässig     zuverlässig     eher nicht zuverlässig     nicht zuverlässig     k.A.

12. Wie zuverlässig hat das System funktioniert?  
 Anzahl korrekter Eingriffe    

1	2	3	4	5	6	k.A.
---	---	---	---	---	---	------

    Wert   
 Anzahl versäumter Eingriffe    

1	2	3	4	5	6	k.A.
---	---	---	---	---	---	------

  
 Anzahl an Fehleingriffen    

1	2	3	4	5	6	k.A.
---	---	---	---	---	---	------

13. Bitte beurteilen Sie die Art und Intensität des Eingriffs.  
 Art    Intensität  
 zu früh     viel zu stark     zu stark     richtig     zu schwach  
 genau richtig  
 zu spät     nicht beurteilbar

14. Bitte beurteilen Sie die Art und Intensität der Warnung.  
 Art    Intensität  
 zu früh     zu stark     zu stark  
 genau richtig    optisch  genau richtig    haptisch  genau richtig  
 zu spät     zu schwach     zu schwach  
 nicht beurteilbar     nicht beurteilbar

15. Wie haben Sie sich während der Nutzung des Systems gefühlt?  
 sehr gestresst     leicht gestresst     neutral     entspannt     sehr entspannt     k.A.

16. Wie sicher haben Sie sich durch die Nutzung des Systems gefühlt?  
 sehr sicher     sicher     neutral     unsicher     sehr unsicher     k.A.

17. Wie groß war die Ablenkung durch das System?  
 sehr groß     groß     klein     sehr klein    Bemerkung:      k.A.

18. Welche Probleme traten während der Fahrt auf? Gibt es Verbesserungsvorschläge?

19. Welche Eigenschaften des Systems würden Sie als positiv oder negativ hervorheben?  
 Warnung, Detektion, Integration ins Rad, Ablenkung, ...

20. Würden Sie das getestete System kaufen? Wie viel wären Sie bereit dafür auszugeben?  
 ja    Voraussetzungen für den Kauf:   
 nein      
 Betrag  €



## B. Erfolgskontrollbericht

### B.1. Beitrag der Ergebnisse des Vorhabens zum NRVP

Das Projekt trägt zu einer Förderung des Radverkehrs in Deutschland bei, denn es adressiert Sicherheitsaspekte im Fahrradverkehr, die bis dato als Hemmfaktor bei bestimmten Nutzergruppen vorhanden sind. Zudem ermöglicht es, die Sicherheit im Straßenverkehr auch für andere Verkehrsteilnehmer zu verbessern. Gleichzeitig lenkt es den Fokus der bis dato automobilfokussierten Entwicklung von FAS auf das hierfür neue Anwendungsfeld Elektrofahrräder. Die Ergebnisse adressieren insbesondere Potenziale und Herausforderungen bei Assistenzsystemen für Elektrofahrräder, liefern jedoch auch Konzepte für technische Lösungen und bieten Einblicke zur Erhöhung der Radverkehrssicherheit. Es entspricht damit voll dem Förderschwerpunkt „Elektromobilität“ des NRVP 2020.

### B.2. Wissenschaftlich technische Ergebnisse

Die wesentlichen technischen Ergebnisse sind in Teil II dargestellt. Das Potenzial von verschiedenen Assistenzsystemen aus Nutzersicht ist in Kapitel 2.2.1 dargestellt, zusammen mit weiteren nutzerbezogenen Informationen wie Nutzungsverhalten des Pedelecs, Unfalldaten sowie Hemmnisse und Investitionsbereitschaft bei Assistenzsystemen. Das Potenzial von verschiedenen Assistenzsystemen basierend auf der Systemausführung und des Unfallgeschehens sind in Kapitel 2.2.2 hergeleitet und dort als Übersicht in Tabelle 10 zusammengefasst. Eine Bewertung der Realisierbarkeit für verschiedene Komponenten anhand der Gesichtspunkte Kosten, Bauraum und Gewicht, Energiebedarf und Entwicklungsaufwand ist in Kapitel 2.2.3 dargestellt. Die Details zur Realisierung der Spurverlassenswarnung und Frontkollisionswarnung sowie der weiteren getesteten Assistenzsysteme sind in Kapitel 2.4 dargestellt. Der Aufbau der Probandentests ist in Kapitel 2.5.1 beschrieben, die Ergebnisse der Probandenbefragungen in Kapitel 2.5.2, die Ergebnisse der objektiven Auswertung in Kapitel 2.5.3 dargestellt sowie in zusammengefasster Form in Kapitel 2.5.4.

### B.3. Fortschreibung des Verwertungsplans

#### B.3.1. Angaben zu gemachten Erfindungen, vorgenommenen Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechten

Keine

#### B.3.2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Ergebnisse des Projekts können jederzeit von Unternehmen oder auch in Form von Start-ups in sämtlichen Phasen der Produktentwicklung eingesetzt werden. So können die Potenzialanalysen sowie die Ergebnisse der Nutzerbefragungen direkt eingesetzt werden, um potenzielle Produkte festzulegen. Durch die Realisierbarkeitsbewertung und den Ergebnissen zur Konzeption von FAS Komponenten könnte hieraus direkt ein Produktkonzept erstellt werden. Durch das Evaluationskonzept existiert bereits ein Beispiel wie Nutzerbefragungen und Probandenstudien für Produktprototypen aufgebaut und durchgeführt werden können.

Zudem ist die Gründung eines Start-ups für die Weiterentwicklung einzelner Systeme zu marktfähigen Produkten Projektlaufzeit denkbar, beispielsweise seitens in die Forschungsaktivitäten

einbezogener Studierender. Mit dem Gründungsbüro Technische Universität und Hochschule Kaiserslautern steht hierzu am Standort eine kompetente Unterstützung zur Verfügung.

Als indirekter wirtschaftlicher Erfolg ist der verbesserte berufliche Einstieg von Studierenden zu nennen, die im Projekt im Bereich der Unfallforschung und Assistenzsysteme mitgearbeitet haben und damit als qualifizierter Nachwuchs für Industrie und Wissenschaft praxisnah ausgebildet wurden.

### B.3.3. Wissenschaftliche und technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Der während des Projektverlaufs aufgebaute Versuchsträger ist konzipiert für weiterführende und aufbauende Untersuchungen zu der Thematik rund um Assistenzsysteme für Elektrofahrräder und wird somit auch weiterhin in aktive Forschungsaktivitäten eingebunden. Zusätzlich wurden und werden Studierende in Form von beispielsweise Bachelor und Masterarbeiten in Forschungsaktivitäten und Weiterentwicklung rund um den Versuchsträger eingebunden.

Ein Teil der wesentlichen Ergebnisse befasst sich mit den Herausforderungen sowie dem weiteren Forschungsbedarf rund um Assistenzsysteme für Elektrofahrräder. Diese könnte dazu genutzt werden weitere Forschungsbestrebungen anzustoßen, insbesondere aufgrund der hohen Praxisnähe der erzielten Ergebnisse können somit gezielt Akteure in der Industrie angesprochen werden. Weiterhin ist beabsichtigt, Forschungen und Untersuchungen in den Lehrbetrieb der Juniorprofessur für Elektromobilität und des Instituts für Mobilität und Verkehr der TU Kaiserslautern zu integrieren und damit die Studierenden – neben einer soliden Elektrotechnik- und Verkehrsingenieurausbildung – zu einer Beschäftigung mit sicherheitsrelevanten Forschungsthemen aus dem Verkehrswesen zu animieren.

### B.3.4. Wissenschaftliche Anschlussfähigkeit

Die Forschungen bezüglich sicherheitsorientierter FAS für Elektrofahrräder sollten nach erfolgreichem Verlauf ausgedehnt werden auf

- Kooperation: Sicherheitsorientierte FAS werden für PKW, LKW und Krafträder in der Zukunft eine Kommunikation zwischen den Fahrzeugen sowie zwischen den Fahrzeugen und der Infrastruktur verwenden. Hierdurch können beispielsweise die Bahnen der Fahrzeuge und die Schaltzeiten von Lichtsignalanlagen ausgetauscht und damit die Reaktionsgüte und -zeit verbessert werden. Solche kooperative sicherheitsorientierte FAS können – so die Erwartungen – die Unfallzahlen und -folgen erheblich weiter verringern. Diese aktuellen Entwicklungen für PKW, LKW und Krafträder können in zukünftigen Projekten auf Elektrofahrräder übertragen werden.
- Energie: Ein weiterer Forschungsansatz könnte in der Entwicklung energieorientierter FAS (möglicher Weise mit Energiepuffer) beispielsweise für Nabendynamos liegen. Vermutlich muss hier differenziert werden zwischen einfachen und preiswerten FAS für preissensible Kunden bzw. Kunden von Alltagsrädern (Abstellen im Straßenraum / B & R) und hochwertigen, etwas teureren FAS für Käufer hochwertiger Räder.

Bei einem erfolgreichen Pilotprojekt kann davon ausgegangen werden, dass die Fahrradindustrie sich an der Entwicklung dieser neuen FAS beteiligt. Bereits während der Projektlaufzeit, wurden Ergebnisse und Ansätze in Industrieworkshops (z. B. Eurobike Academy) und Messen vorgestellt, um Handlungsempfehlungen hinsichtlich geeigneter, aber auch ungeeigneter Forschungs- und Entwicklungspfade sowie detaillierte Kenntnisse zu Konflikt- und Unfallsituationen auszusprechen und Kooperationspartner zu gewinnen. In allen Fällen kann auf die erprobte Methodik

zurückgegriffen werden: Versuchsträger, Versuchsaufbau und die Evaluationsgrundlagen können als modulare, skalierbare Basis für gemeinsame weitergehende Entwicklungen genutzt werden.

#### B.4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Keine.

#### B.5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Die Untersuchungsergebnisse des Projekts werden in Form des Abschlussberichtes veröffentlicht und Resultate können somit in Industrie und Wissenschaft weiter verwendet werden.

#### B.6. Die Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Hinsichtlich der Zeitplanung waren keine Anpassungen während der Projektlaufzeit notwendig.

#### B.7. Vergleich des Standes des Vorhabens mit der ursprünglichen Arbeits-, Zeit- und Ausgabenplanung

Sämtliche Meilensteine sowie Arbeitspakete konnten innerhalb der festgelegten Zeitplanung erfolgreich abgeschlossen werden.

##### B.7.1. Status der Arbeitspakete

Arbeitspaket	Status	Bemerkungen
AP1.1 Systematisierung relevanter Unfallarten bei Elektrofahrrädern	100%	-
AP1.2 Systematisierung relevanter FAS für PKW, LKW und Krafträder	100%	-
AP1.3 Nutzerstudie zu sicherheitsorientierten FAS für Elektrofahrräder	100%	-
AP1.4 Eignungsprüfung & Potentialbestimmung relev. FAS f. Elektrofahrräder	100%	-
AP2.1 Konzeption von Anzeige- und Bedienelementen	100%	-
AP2.2 Konzeption von Sensoren und Aktoren	100%	-
AP2.3 Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Realisierung	100%	-
AP3.1 Realisierung von sicherheitsorientierten FAS	100%	-
AP3.2 Evaluation der sicherheitsorientierten FAS	100%	-
AP3.3 Weiterentwicklung und Optimierung der sicherheitsorientierten FAS	100%	-

Tabelle 21: Status Arbeitspakete

### B.7.2. Aktueller Status der Meilensteine

Meilenstein	Inhalt	Fälligkeit	Status
M1	Systematisierung relevanter Unfallarten bei Elektrofahrrädern abgeschlossen	Monat 2	100%
M2	Systematisierung relevanter FAS für PKW, LKW und Krafträder abgeschlossen	Monat 2	100%
M3	Nutzerstudie zu sicherheitsorientierten FAS für Elektrofahrräder konzipiert	Monat 5	100%
M4	Nutzerstudie zu sicherheitsorientierten FAS für Elektrofahrräder durchgeführt	Monat 8	100%
M5	Eignungsprüfung und Potentialbestimmung relevanter FAS für Elektrofahrräder durchgeführt	Monat 8	100%
M6	Konzeption der optischen Anzeigeelemente abgeschlossen	Monat 11	100%
M7	Konzeption der akustischen Anzeigeelemente abgeschlossen	Monat 12	100%
M8	Konzeption der haptischen Anzeigeelemente abgeschlossen	Monat 15	100%
M9	Konzeption der Sensoren abgeschlossen	Monat 15	100%
M10	Konzeption der Aktoren abgeschlossen	Monat 19	100%
M11	Untersuchung der technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit durchgeführt	Monat 19	100%
M12	Konzeption und Realisierung des Versuchsträgers abgeschlossen	Monat 15	100%
M13	Realisierung erster sicherheitsorientierter FAS abgeschlossen	Monat 24	100%
M14	Realisierung weiterer sicherheitsorientierter FAS abgeschlossen	Monat 34	100%
M15	Konzeption und Realisierung der Evaluationsumgebung abgeschlossen	Monat 15	100%
M16	Evaluation erster sicherheitsorientierter FAS abgeschlossen	Monat 26	100%
M17	Evaluation weiterer sicherheitsorientierter FAS abgeschlossen	Monat 36	100%
M18	Optimierung und Weiterentwicklung der sicherheitsorientierten FAS abgeschlossen	Monat 36	100%

Tabelle 22: Status der Meilensteine