

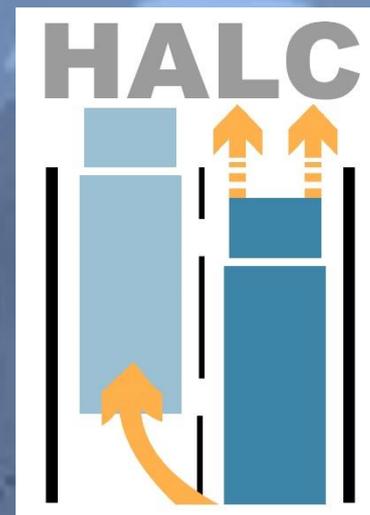
Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN: keine	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel: HALC – Highway Assist Lane Change	
4. Autor(en) Name(n), Vorname(n) Glavinic, Andelko Löper, Christian Käthner, David Jänsch, Michael Manke, Andreas Hofmann, Helfried	5. Abschlussdatum des Vorhabens: 31.10.2023
	6. Veröffentlichungsdatum: 06.05.2024
	7. Form der Publikation: Digital
8. Durchführende Institution(en):	9. Ber. Nr. Durchführende Institution: ---
	10. Förderkennzeichen: 19A 20015
	11. Seitenzahl: 82
12. Fördernde Institution: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 11019 Berlin	13. Literaturangaben: ---
	14. Tabellen: ---
	15. Abbildungen: ---
16. Zusätzliche Angaben: ---	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum): Projektträger Mobilität und Verkehrstechnologien, Am Grauen Stein 51, 51105 Köln	
18. Kurzfassung: Der Schlussbericht beschreibt die durchgeführten Arbeiten des Konsortiums in dem Verbundprojekt HALC – Highway Assist Lane Change. Das Ziel des Forschungsprojekts HALC war die Entwicklung von sicherheitsrelevanten Fahrerassistenzfunktionen für Fahrten auf Autobahnen oder Schnellwegen mit meist mehreren Fahrstreifen in gleicher Richtung, speziell für schwere und mittlere Nutzfahrzeuge.	
19. Schlagwörter ZF, Automatisiertes Fahren, Fahrerassistenzfunktionen, Fahrstreifenwechsel, Spurhalteassistent	
20. Verlag ---	21. Preis kostenfrei

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN:	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title: HALC – Highway Assist Lane Change	
4. author(s) (family name, first names) Glavinic, Andelko Löper, Christian Käthner, David Jänsch, Michael Manke, Andreas Hofmann, Helfried	5. end of project: 2023/10/31
	6. publication date: 2024/05/06
	7. form of publication: Digital
8. performing organization(s):	9. originator's report no.: ---
	10. reference no.: 19A 20015
	11. no. of pages: 82
12. sponsoring agency (name, address): Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) 11019 Berlin	13. no. of references: ---
	14. no. of tables: ---
	15. no. of figures: ---
16. supplementary notes: ---	
17. presented at (title, place, date): Projektträger Mobilität und Verkehrstechnologien, Am Grauen Stein 51, 51105 Köln	
18. abstract: The final report describes the work of the Consortium in the joint project HALC - Highway Assist Lane Change. The aim of the HALC research project was the development of safety-relevant driver assistance functions for driving on motorways or expressways, usually with several lanes in the same lanes in the same direction, especially for heavy and medium-sized commercial vehicles.	
19. keywords ZF, automated driving, driver assistance functions, lane change assistance, lane keep assistance	
20. publisher ---	21. price free of charge

HALC Highway Assist Lane Change



Gesamt-Schlussbericht



Förderkennzeichen: 19A 20015

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Dokumenten Information

Autoren

Name	Organisation
Andelko Glavinic	ZF CVS Hannover GmbH
Christian Löper	ZF CVS Hannover GmbH
David Käthner	DLR Braunschweig
Michael Jaensch	MHH-Unfallforschung
Andreas Manke	Spedition Bartkowiak GmbH
Helfried Hofmann	Spedition Bartkowiak GmbH

Versionen

Datum	Version	Bemerkungen
02.05.2024	00-01-00_rev	1.te Finale Version für review
06.05.2024	00-01-01_rev	2.te Finale Version für review
07.05.2024	01-00-00	Freigegebene Version zur Veröffentlichung

Hinweis zur Dokumenten Versionierung:

Format der Dokumenten Versionierung	Drei zweistellige Zahlen am Ende des Dateinamens, getrennt durch Bindestriche	00-00-00
In Bearbeitung	In der Bearbeitungsphase wird das letzte Ziffern paar hochgezählt	00-00-01
Intern freigegeben	Nach interner Qualitätssicherung wird die mittlere Zahl gesetzt	00-01-00
	Das Dokument wird den Partnern zur Kommentierung/Prüfung vorgelegt	00-01-00_rev
	Bei Änderungen oder Ergänzungen wird die letzte Ziffer erhöht und ggf. die Initialen des Bearbeiters angehängt	00-01-01_XY
Im Projekt freigegeben	Das Dokument wird im Projekt durch die Partner (z.B. zur Veröffentlichung) freigegeben. Die vordere Zahl wird erhöht.	01-00-00

Inhaltsverzeichnis

Dokumenten Information	3
Inhaltsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	6
Terminologie	8
I. Kurzdarstellung - Überblick und Einführung in den Bericht.....	9
1. Aufgabenstellung	9
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde.....	9
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	10
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand.....	13
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	13
II. Eingehende Darstellung	14
1. Ausgangslage	14
1.1. Versuchsfahrzeuge.....	14
1.2. Einsatz- und Testumgebung.....	15
2. Arbeitsschritte und Ergebnisse	17
2.1. AP 1 – Projektmanagement.....	17
2.1.1. Organisation.....	17
2.1.2. Durchführung	17
2.1.3. Öffentlichkeitsarbeit	17
2.1.4. Qualitätsmanagement.....	18
2.2. AP 2 – Use-Cases und Anforderungen	19
2.2.1. Analyse Unfallszenarien	19
2.2.2. Festlegung Use Cases	30
2.2.3. High-Level Anforderungen.....	31
2.3. AP 3 – Fahrermodell.....	32
2.3.1. Eye-Tracking Konzept	32
2.3.2. Aufgabenanalyse Fahrzeug.....	33
2.3.3. Erweiterung des Fahrsimulators zur Untersuchung der Use Cases	33
2.3.4. Einfahren Datenkorpus im DLR-Simulator	34
2.3.5. Erstellung des On- und Offline Fahrermodells	36
2.3.6. Erprobung des Fahrermodells im Realfahrzeug.....	37
2.4. AP 4 – Umfeldmodell	38
2.4.1. Fahrstreifen-/Vorderfahrzeug Erkennung zum Fahrstreifen folgen	38
2.4.2. Fahrstreifen- und Objekterkennung zum Fahrstreifen wechseln.....	39
2.4.3. Fusion Umfeldmodell	40
2.5. AP 5 – Längsführung	41
2.5.1. Längsführung 0-89 km/h auf einem Fahrstreifen.....	41

2.5.2.	Längsführung zum Fahrstreifen wechseln.....	42
2.5.3.	Längsführungsfunktionalitäten zur koordinierten Längs- und Querführung	43
2.5.4.	Safety Konzept Längsführung und Umsetzung	44
2.6.	AP 6 – Querführung.....	44
2.6.1.	Querführung zum Fahrstreifen folgen.....	44
2.6.2.	Querführung zum Fahrstreifen wechseln.....	46
2.6.3.	Querführungsfunktionalitäten zur koordinierten Längs- und Querführung	52
2.6.4.	Safety Konzept Querführung und Umsetzung.....	52
2.7.	AP 7 – Fahrstreifenwechsel.....	53
2.7.1.	Erkennung Fahrstreifenwechsellmöglichkeit	53
2.7.2.	Ablaufsteuerung Fahrstreifenwechsel	53
2.7.3.	Safety Konzept Fahrstreifenwechsel und Umsetzung.....	54
2.8.	AP 8 – Integration Fahrer und Funktion	55
2.8.1.	Koordination Längs- und Querführung	55
2.8.2.	Interaktionsgestaltung Fahrer und Funktion	56
2.8.3.	Umsetzung Mensch-Maschine Schnittstelle.....	58
2.8.4.	Gesamtintegration aller Teilkomponenten.....	59
2.8.5.	Safety Konzept Gesamtsystem und Umsetzung	60
2.8.6.	Integration Eyetracking ins Realfahrzeug.....	61
2.9.	AP 9 – Demonstratoraufbau, Evaluation und Test	62
2.9.1.	Integration in Test-/Demonstrator LKW	62
2.9.2.	Evaluation und Test auf ZF Testbahn	62
2.9.3.	Evaluation auf öffentlichen Straßen mit geschulten Testfahrern	62
2.9.4.	Evaluation auf öffentlichen Straßen mit Berufskraftfahrern.....	62
2.9.5.	Auswertung der gesammelten Daten	74
2.9.6.	Analyse des potenziellen Nutzens für Unfallsituationen.....	74
3.	Notwendige Änderungen in der Zielsetzung.....	78
3.1.1.	Aktives HALC-System nur in ZF-Fahrzeugen mit besonderen Sicherungsmaßnahmen	78
3.1.2.	Erweitertes Sammeln von realen Messdaten durch Einbau von Sensorik im Bartkowiak Fahrzeug sowie Nutzung existierender Systeme zur Erkennung von Fahrstreifenwechsellmöglichkeiten	79
3.1.3.	Durchführung ausgewählter Use-Cases für den Fahrspurwechsel ausschließlich auf der ZF Testbahn 79	
4.	Im Zeitraum des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	80
5.	Zusammenfassung und Ausblick.....	81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung I-1: HALC-Arbeitspakete.....	11
Abbildung I-2: HALC-Unterarbeitspakete	12
Abbildung II-1: Bartkowiak Versuchsfahrzeug HI-KB 6039 (IVECO S-Way LNG).....	14
Abbildung II-2: ZF Versuchsfahrzeug K068 (IVECO S-Way).....	14
Abbildung II-3: feierliche Eröffnung des neuen Ovals auf der ZF-Teststrecke 2020	15
Abbildung II-4: Östlicher Teilabschnitt mit mehrstreifiger, autobahnähnlicher Struktur	15
Abbildung II-5: Luftbild der ZF Testbahn in Jeveresen (inneres und äußeres Oval).....	16
Abbildung II-6: Typische Strecke einer Tagesstour des Partners Bartkowiak GmbH.....	16
Abbildung II-7: Kategorien von Unfalltypen von 393 an Unfällen auf Autobahnen beteiligten Lkw über 3,5t	20
Abbildung II-8: 10 häufigste Unfalltypen (2-stellig) von Lkw auf Autobahnen	21
Abbildung II-9: Histogramm der Verteilung der Ausgangsgeschwindigkeit der Lkw bei Unfallentstehung.....	23
Abbildung II-10: Windverhalten bei verschiedenen Unfalltypen von Lkw-Unfällen auf Autobahnen.....	23
Abbildung II-11: Straßenoberfläche bei verschiedenen Unfalltypen von Lkw-Unfällen auf Autobahnen.....	24
Abbildung II-12: Vergleich der Unfalltypverteilung von Lkw-Unfällen auf Autobahnen zwischen der Bundesstatistik und GIDAS.	25
Abbildung II-13: Altersverteilung der Fahrer von Lkw mit Unfallbeteiligung auf Autobahnen.	25
Abbildung II-14: Verteilung der Unfalltypen bei verschiedenen Altersgruppen von Fahrern von Lkw mit Unfallbeteiligung auf Autobahnen.....	26
Abbildung II-15: Struktur der menschlichen Unfallursachen bei ACAS.....	28
Abbildung II-16: Verteilung der Lkw mit Ursachenfaktoren auf die Kategorien von menschlichen Ursachen. ...	29
Abbildung II-17: Beispielhafter Use Case.....	30
Abbildung II-18: Übersicht über die ausgewählten Use Cases zum Fahrstreifenwechsel.....	31
Abbildung II-19: Zustandsdiagramm HALC.....	31
Abbildung II-20: Eye- und Headtrackingkonzept.	33
Abbildung II-21: LKW-Mockup im DLR-Fahrsimulator	34
Abbildung II-22: Vermessung im LKW und Vorbereitung des Headtracking.....	34
Abbildung II-23: Silent Fail während einer sicherheitskritischen Situation.	35
Abbildung II-24: Architektur des Online-Klassifikators.	37
Abbildung II-26: Fahrstreifenenerkennung bei schlechter Sicht.....	38
Abbildung II-27: "Single Line Support" bei kurzzeitig unterbrochener Fahrstreifenmarkierung	39
Abbildung II-28: "Single Line Support" bei längerfristig unterbrochener Fahrstreifenmarkierung.....	39
Abbildung II-29: Stop & Go Manöver.....	41
Abbildung II-30: Zielfahrzeugumschaltung für den Längsregelalgorithmus während des Fahrstreifenwechsels	43
Abbildung II-30: Querführung auf einem Fahrstreifen	45
Abbildung II-32: Veranschaulichung Krummliniges Koordinatensystem (Quelle https://fjp.at/posts/optimal-frenet/).....	47
Abbildung II-33: Fahrstreifenwechsel auf Gerade	48
Abbildung II-34: Fahrstreifenwechsel Gerade, Krummliniges Koordinatensystem	48
Abbildung II-35: Querbeschleunigung Fahrstreifenwechsel Gerade.....	49
Abbildung II-36: Fahrstreifenwechsel Kurve.....	49
Abbildung II-37: Fahrstreifenwechsel Kurve, Krummliniges Koordinatensystem.....	50
Abbildung II-38: Erprobung Fahrstreifenwechsel auf Teststrecke.....	51
Abbildung II-39: Ablaufsteuerung Fahrstreifenwechsel.....	54
Abbildung II-40: Übersicht der übergeordneten HALC-Systemzustände.....	55
Abbildung II-41: Koordination Längs- und Querführung.....	56
Abbildung II-42: Darstellung der vier Designvarianten in der Simulation.	57
Abbildung II-43: Darstellung der Warnstufen auf dem OPUS A3 HMI Display.	58
Abbildung II-44: Einbauort im Bartkowiak Fahrzeug	58
Abbildung II-45: HALC-Hardwarekomponenten	59
Abbildung II-46: HALC-Funktionsmodule	60
Abbildung II-47: Screenshot Transics – alle 2 Minuten gibt es einen Datensatz	63

Abbildung II-48: erster Testmonat – gefahrene Strecken –	64
Abbildung II-49: zweiter Testmonat – gefahrene Strecken –	65
Abbildung II-50: dritter Testmonat – gefahrene Strecken –	66
Abbildung II-51: Standard-Telematik Tagestour	68
Abbildung II-52: Projekt-Telematik-OKIT Tagestour	68
Abbildung II-53: Standard-Telematik Rangierbetrieb	69
Abbildung II-54: Projekt-Telematik OKIT Rangierbetrieb	69
Abbildung II-55: Standard-Telematik Ortsdurchfahrt	70
Abbildung II-56: Projekt-Telematik OKIT Ortsdurchfahrt	70
Abbildung II-57: Standard-Telematik BAB-Auffahrt	71
Abbildung II-58: Projekt-Telematik OKIT BAB-Auffahrt	71
Abbildung II-59: Standard-Telematik BAB-Abfahrt	72
Abbildung II-60: Projekt-Telematik OKIT BAB-Abfahrt	72
Abbildung II-61: Standard-Telematik Längere Ortsdurchfahrt	73
Abbildung II-62: Projekt-Telematik OKIT Längere Ortsdurchfahrt	73
Abbildung II-63: Vorgehen bei der Bewertung des Sicherheitsnutzens des HALC im deutschen Unfallgeschehen	74
Abbildung II-64: Bisherige Schäden, die durch HALC hätten verhindert werden können - betrifft 19,8 % aller jährlichen Schäden	76
Abbildung II-65: Rangierschäden (bei 18 von 44 Schäden konnte man die Position am Fahrzeug zuordnen)	77
Abbildung II-66: UN ECE R79 Regularie für ACSF	81

Tabellenverzeichnis

Tabelle 0-1: Terminologie	8
Tabelle I-1: Gliederung der Arbeitspakete	11
Tabelle II-1: Verkehrsstufe auf der Autobahn bei Unfällen mit Lkw-Beteiligung	21
Tabelle II-2: Unfallgegner gemäß Unfalltyp der beteiligten Lkw	22
Tabelle II-3: Amtliche Unfallursachen bei Unfällen mit Beteiligung von Lkw	22
Tabelle II-4: Aufbauform der beteiligten Lkw	22
Tabelle II-5: Zustandsbeschreibung HALC	54
Tabelle II-6: Beschreibung der detaillierten HALC-Systemzustände	56
Tabelle II-7: Verweis auf detaillierte Beschreibungen der Funktionsmodule	60
Tabelle II-8: Kraftstoffverbrauch und andere relevante Größen zur Fahrerbeurteilung	67
Tabelle II-9: Hochrechnung der adressierten Unfälle mit Lkw in Deutschland in den Jahren 2014-2020	76
Tabelle II-10: Spurwechselassistenten Bezeichnungen unterschiedlicher Hersteller	80

Literaturverzeichnis

- [1] Otte, D., Pund, B., Jänsch, M. (2009): Unfallursachen-Analyse ACASS für Erhebungen am Unfallort. In: Zeitschrift für Verkehrssicherheit 3, 122-128.
- [2] DESTATIS 2021, Statistisches Bundesamt, Fachserie 8 Reihe 7, 2021
- [3] Johannsen, H.; Krettek, C.; Hannawald, L.; Schaser, K.D. Consideration of Accident-Avoidance Technology within Gidas. In Proceedings of the 25th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles (ESV), Detroit, USA, 5–8 June 2017.

Terminologie

In diesem Abschnitt werden alle relevanten (Fach-) Begriffe erläutert, bzw. definiert.

Begriff	Abkürzung	Erläuterung	Hinweis
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz	BMWK	Fördergebendes Bundesministerium	
Continuous Lane Keep Assist	CLKA	Dauerhaft aktive Spurhalteassistentenfunktion	Greift dauerhaft in den Lenkvorgang ein.
General Safety Regulation	GSR	EU-Regulierungen zur Fahrzeugsicherheit	EU erarbeitet Gesetze und Vorgaben für Sicherheitfunktionen
Highway Assist - Lane Change	HALC	Highway Assist beschreibt die Funktion zur Fahrstreifenverfolgung und Lane Change beschreibt die Funktion zum Fahrstreifenwechsel	HALC ist der Name für das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz geförderte Projekt
Lane Change Decision Aid System	LCDAS	passives Spurwechsel-Assistenzsystem, welches die Anforderungen der ISO-Norm 17387 erfüllt	
Lane Keep Assist	LKA	Spurhalteassistentenfunktion	Funktion kann anzeigend oder pulsweise eingreifend agieren
OKIT Cooperative Accounting System	OKIT CAS	Projektplanungssoftware des unterbeauftragten Partners OKIT	Wurde für das Projektmanagement eingesetzt.
Technology Readiness Level	TRL	Einstufung von Serientauglichkeit von Komponenten	
TÜV Rheinland Consulting GmbH	TÜV	Projekträger	

Tabelle 0-1: Terminologie

I. Kurzdarstellung - Überblick und Einführung in den Bericht

1. Aufgabenstellung

Das Projekt „HALC – Highway Assist - Lane Change“ hatte die Untersuchung, Entwicklung und Einführung von Funktionen zur integrierten Längs- und Querführung für automatisiertes Fahren speziell für schwere und mittlere Nutzfahrzeugen zum Ziel. HALC adressiert sämtliche Szenarien auf Autobahnen und autobahnähnlichen Straßen mit baulich getrennten Fahrbahnen im Geschwindigkeitsbereich von 0 bis 89 km/h.

Basierend auf der Analyse aktueller Unfallsituationen sowie einer Aufgabenanalyse sollten Fahrermodelle konzipiert und entwickelt werden, die das Fahrverhalten der Fahrer und die Interaktion mit den Fahrzeugsystemen auf die Bediensituation in Nutzfahrzeugen angepasst abbilden und die Entwicklung eines an Nutzfahrzeuge angepassten Highway Assist Systems ermöglichen, das aufbauend auf bisher entwickelten Funktionen wie z.B. dem Lane Keeping Assistent (LKA) alle erforderlichen Fahraufgaben von Spurhaltung über Bestimmung von Fahrstreifenwechsellmöglichkeiten bis hin zur sicheren Durchführung von Fahrstreifenwechseln beinhaltet.

Der Automatisierungsgrad des HALC-Systems gemäß SAE J3016 Definition ist „Partial Driving Automation“ (Level 2). Damit hat der Fahrer die Aufgabe, das System und die Umwelt jederzeit zu überwachen und jederzeit bereit zu sein, die Fahraufgabe vollständig übernehmen zu können.

Der Technology Readiness Level (TRL) für das entwickelte HALC-System ist 6 von 9 (Prototyp in Einsatzumgebung).

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Im Projekt sollten zwei Versuchsfahrzeuge aufgebaut werden, welche die Fahrerassistenzfunktion HALC in einem realen Umfeld demonstrieren und erfahrbar machen sollte. Besonderer Fokus, und Neuerung in dem Projekt, war die Funktion zum automatisiertem Fahrstreifenwechsel, da die Grundannahme bestand, dass der Fahrstreifenwechsel ein besonderes Risiko im Straßenverkehr darstellt. Um eine größtmögliche Akzeptanz und Sicherheit der Funktion im Betrieb sicherzustellen, hat sich das Projekt intensiv mit der Beobachtung und Einschätzung des Fahrers beschäftigt.

Das Projekt startete am 01.11.2020 und wurde nach 36 Monaten am 31.10.2023 offiziell beendet.

Die im Projekt beteiligten Partner waren:

- **ZF CVS Hannover GmbH** (Konsortialführer)
- **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)**
- **Medizinische Hochschule Hannover** – Unfallforschung

- **Interactive Minds Dresden GmbH**
- **Spedition Bartkowiak GmbH**

Unterbeauftragt war:

- **OKIT GmbH** (durch ZF CVS Hannover GmbH)

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt wurde in insgesamt 9 Arbeitspakete (AP) und 39 Unterarbeitspunkte (UAP) gegliedert, die in der folgenden Tabelle aufgelistet sind. Die Arbeitspakete wurden von jeweils einem Partner geleitet. Die Gesamtleitung oblag dem Konsortialführer ZF CVS Hannover GmbH.

Arbeitspaket	Titel	Verantwortlicher Partner
AP 1	Projektmanagement 1.1. Organisation 1.2. Durchführung 1.3. Öffentlichkeitsarbeit 1.4. Qualitätsmanagement	ZF
AP 2	Use cases und Anforderungen 2.1. Analyse Unfallszenarien 2.2. Festlegung Use-cases 2.3. High-Level Anforderungen	ZF
AP 3	Fahrermodell 3.1. Eye-Tracking Konzept 3.2. Aufgabenanalyse Fahrzeug 3.3. Erweiterung Fahrsimulator 3.4. Einfahren Datenkorpus im Simulator 3.5. Erstellung On-/Offline-Fahrermodell 3.6. Erprobung Fahrermodell im Fahrzeug	DLR
AP 4	Umfeldmodell 4.1. Fahrstreifen-/Vorderfahrzeug Erkennung zum Fahrstreifen folgen 4.2. Fahrstreifen- und Objekterkennung zum wechseln 4.3. Fusion Umfeldmodell	ZF
AP 5	Längsführung 5.1. Längsführung 0-89 km/h auf einem Fahrstreifen 5.2. Längsführung zum Fahrstreifen wechseln 5.3. Längsführungsfunktionalitäten zur koordinierten Längs- und Querführung 5.4. Safety Konzept Längsführung und Umsetzung	ZF
AP 6	Querführung 6.1. Querführung zum Fahrstreifen folgen 6.2. Querführung zum Fahrstreifen wechseln 6.3. Querführungsfunktionalitäten zur koordinierten Längs- und Querführung 6.4. Safety Konzept Querführung und Umsetzung	ZF

AP 7	Fahrstreifenwechsel (Lane Change) 7.1. Erkennung Fahrstreifenwechsellmöglichkeit 7.2. Ablaufsteuerung Fahrstreifenwechsel 7.3. Safety Konzept Fahrstreifenwechsel und Umsetzung	ZF
AP 8	Integration Fahrer und Funktion 8.1. Koordination Längs- und Querführung 8.2. Interaktionsgestaltung Fahrer und Funktion 8.3. Umsetzung Mensch-Maschine Schnittstelle 8.4. Gesamtintegration aller Teilkomponenten 8.5. Safety Konzept Gesamtsystem und Umsetzung 8.6. Integration Eyetracking ins Realfahrzeug	ZF
AP 9	Demonstratoraufbau, Evaluation und Test 9.1. Integration in Test-/Demonstrator LKW 9.2. Evaluation und Test auf ZF Testbahn 9.3. Evaluation auf öffentlichen Straßen mit geschulten Testfahrern 9.4. Evaluation auf öffentlichen Straßen mit Berufskraftfahrern 9.5. Auswertung der gesammelten Daten 9.6. Analyse des potenziellen Nutzens für Unfallsituationen	ZF

Tabelle I-1: Gliederung der Arbeitspakete

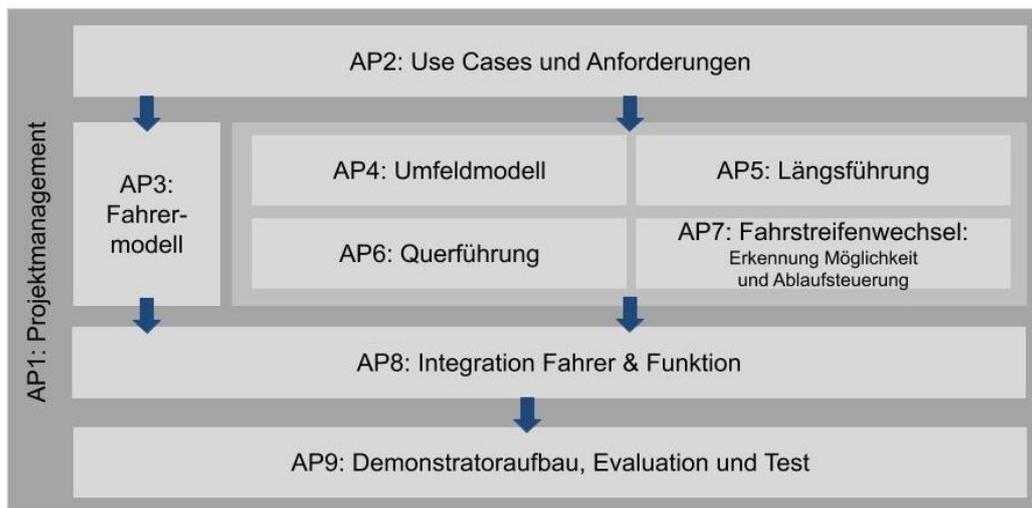


Abbildung I-1: HALC-Arbeitspakete

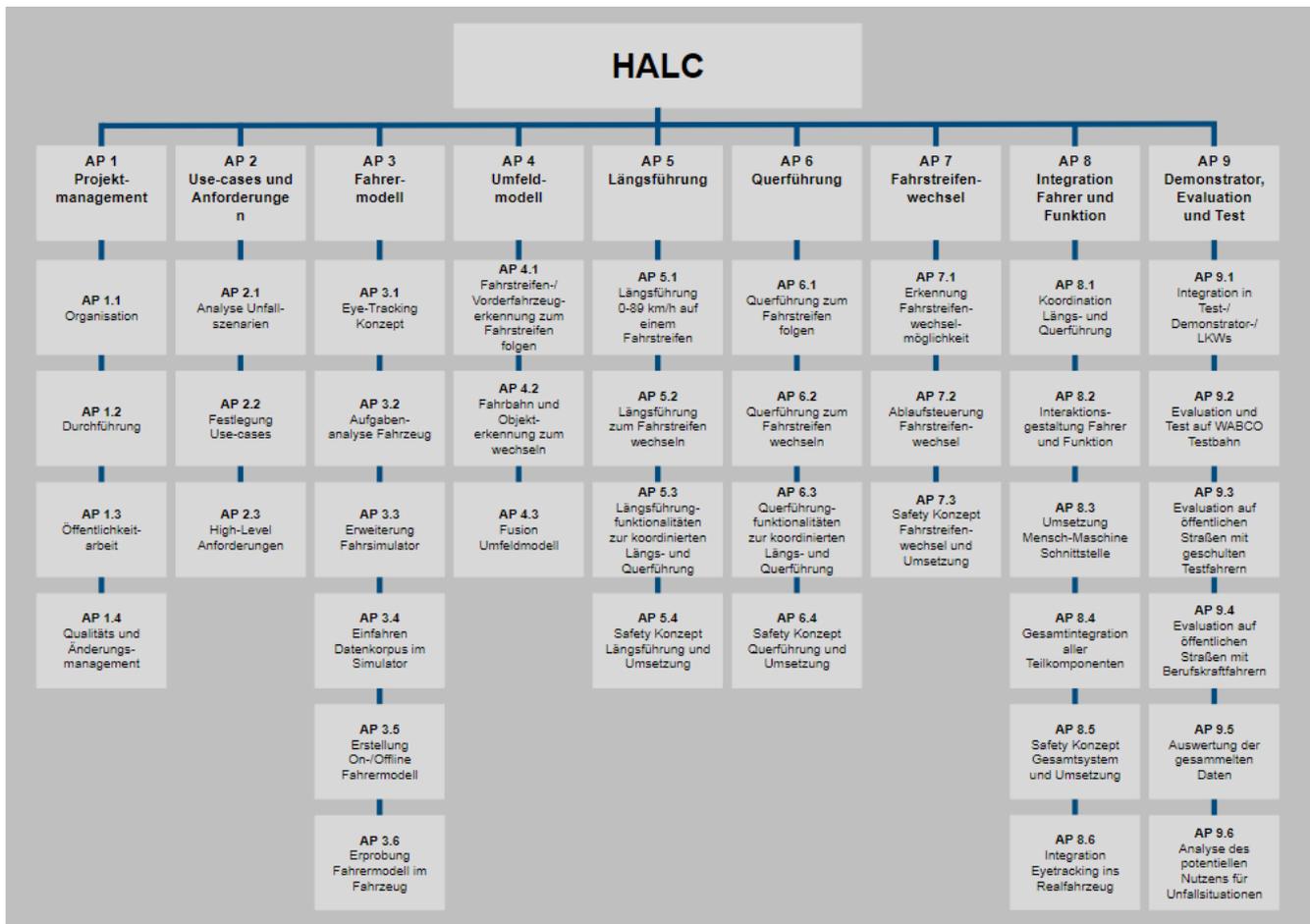


Abbildung I-2: HALC-Unterarbeitspakete

AP 1 umfasste das Projektmanagement als übergeordnetes Aufgabengebiet. Hier fanden Planung, Koordination und Qualitäts- sowie Anforderungsmanagement statt, um das eigentliche Projektziel zu erreichen und um auf unvorhergesehene Ereignisse entsprechend reagieren zu können.

Des Weiteren bestand die Aufgabe, die Wahrnehmung des öffentlichen Projektes HALC sicherzustellen. Dies geschah unter anderem mittels einer Projekthomepage (www.halc-project.de).

In AP 2 ging es darum, Unfallstatistiken auszuwerten, um die Häufigkeiten spezifischer Unfallsituationen auf deutschen Autobahnen festzustellen. Diese Informationen bilden eine Grundlage, um Methodiken zu entwickeln, diesen Unfallsituationen zu einem frühen Zeitpunkt entgegenzuwirken. Durch die Festlegung von relevanten Szenarien konnte im nächsten Schritt ein Konzept erstellt werden, welche die zu entwickelnden Funktionen umfasst.

AP 3 konzentrierte sich darauf, den Faktor Mensch als Teil der Fahraufgabe besser kennenzulernen und das Verhalten in riskanten Fahrsituationen voraussagen zu können. Darauf aufbauend konnte das System HALC entsprechend gestaltet werden, um eine größtmögliche Symbiose mit den und Akzeptanz bei den Fahrer*Innen zu erlangen.

AP 4-7 kümmerten sich um die Entwicklung der HALC-Teilfunktionen inklusive Umfelderkennung und Fahrregelauflagen, welche in AP 8 zu dem Gesamtsystem integriert wurden.

In AP 9 konnte das System HALC auf die Versuchsfahrzeuge in mehreren Teilschritten optimiert werden. Abschließend wurde der mögliche Einfluss auf Unfallszenarien ergründet.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die momentane Dynamik des Themas „Autonomes Fahren“, mitsamt den radikalen Implikationen für das Gesamtsystem Verkehr, bei dem die Fahrer*Innen möglichst aus der Verantwortung genommen werden sollen, bedingt sehr hohe Anforderungen an die Sicherheit.

Dies erfordert jedoch zum heutigen Zeitpunkt noch jahrelange Forschung und Validierung, so dass mit vollständig autonom fahrenden Nutzfahrzeugen in naher Zukunft nicht gerechnet werden kann. Da jedoch der Güterverkehr auf deutschen Straßen, nicht zuletzt durch den Onlinehandel, rasant zunimmt, muss eine Lösung mit einem kürzeren Zeithorizont verfügbar gemacht werden.

Aus diesem Grund zielte das Projekt HALC darauf ab, die Fahrer*Innen bei der Bewältigung der Fahraufgaben aktiv zu unterstützen und menschliche Schwächen durch Technologien auszugleichen.

Die besondere Herausforderung bestand darin, den Fahrer*Innen stets die Gewissheit zu geben, die volle Kontrolle des Fahrzeuges inne zu haben, indem sie automatisierte Funktionen in der Weise ausführt, die den Fahrer*Innen nachvollziehbar, verständlich und angemessen erscheint.

Um das zu gewährleisten ist ein stetiger Austausch mittels einer Mensch-Maschine Schnittstelle notwendig, welche bei den Fahrer*Innen zum richtigen Zeitpunkt eine natürliche und angemessene Reaktion hervorruft.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass diese in einer möglichst kurzen Zeitspanne nur notwendige Informationen in Form von akustischen, optischen oder haptischen Signalen (wie Lenkeinschlägen) ausgibt, welche nicht vom eigentlichen Geschehen auf der Straße ablenken dürfen.

Fahrerassistenzfunktionen wie die Spurhalteassistenten ¹ LDWS (Lane Departure Warning System) oder ELKS (Emergency Lane Keeping System), als auch der Abstandsregeltempomat ² (ACC: Adaptive Cruise Control), sind bereits im Markt verfügbar und etabliert. HALC ging den nächsten Schritt und verbessert zum einen die Teilfunktionen und fügte zum anderen Funktionen, wie den automatisierten Fahrstreifenwechsel, hinzu, um das System in der Kombination zu verbessern. Am Ende stand ein Gesamtsystem zur Verfügung, welches optimal mit den Fahrer*Innen interagiert und als hilfreiche Fahrerassistenzfunktion akzeptiert wird.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Das Vorhaben wurde im Rahmen des Forschungsprojektes HALC – Highway Assist Lane Change umgesetzt.

Die Firma OKIT wurde von ZF CVS Hannover GmbH unterbeauftragt, um bei der technischen Umsetzung einer cloudbasierten Datenbank, der Bereitstellung von Speicherplatz für Projektdokumente und eines Projektmanagementtoolkits (OKIT CAS, insbesondere das Tool AgilAS) zu unterstützen. Des Weiteren wurde durch OKIT die Abschlussveranstaltung von HALC mittels eines Live-Onlinestreamings öffentlich übertragen sowie die Erstellung der Projekthomepage unterstützt.

¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Spurhalteassistent>

² <https://de.wikipedia.org/wiki/Abstandsregeltempomat>

II. Eingehende Darstellung

1. Ausgangslage

1.1. Versuchsfahrzeuge

Für den Versuchsaufbau standen dem Projekt 2 Fahrzeuge zur Verfügung.

Eines davon stellte der Verbundpartner Spedition Bartkowiak GmbH bereit. Es handelte sich dabei um einen IVECO S-Way mit LNG-Gasantrieb (interne Bezeichnung KB 6039).



Abbildung II-1: Bartkowiak Versuchsfahrzeug HI-KB 6039 (IVECO S-Way LNG)

Als zweites Versuchsfahrzeug stellte ZF einen IVECO S-Way mit Dieselantrieb zur Verfügung (interne Bezeichnung K068).



Abbildung II-2: ZF Versuchsfahrzeug K068 (IVECO S-Way)

1.2. Einsatz- und Testumgebung

Als Versuchsumgebungen kamen zum einen die ZF-Testbahn in Jeveresen (Ortsteil von Wietze) als auch öffentliche Straßen zum Einsatz.

Die Erprobung der HALC-Komponenten fand im ersten Schritt ausschließlich auf der ZF-Testbahn statt, um die gewünschten Funktionalitäten ohne Gefährdung anderer Verkehrsteilnehmer evaluieren zu können. Da die ZF-Testbahn über autobahnähnliche Streckenabschnitte verfügt, eignete sich diese optimal für die Erprobung der HALC-Komponenten.

Dieser 2020 neu eröffnete Streckenteil der ZF-Testbahn besteht aus einem neuen 3,6 Kilometer langen Rundkurs mit Kurven unterschiedlicher Radien und geraden Abschnitten. Damit lassen sich eine Vielzahl von Verkehrssituationen abbilden und reale Fahrbedingungen auf der Autobahn simulieren. Die ausgebaute und modernisierte Teststrecke unterstützt die Entwicklung fortschrittlicher Technologien, darunter Spurhaltesystemen, Stauassistenten, Autobahn-Piloten bis hin zu vollautomatisierten Systemen.



Abbildung II-3: feierliche Eröffnung des neuen Ovals auf der ZF-Teststrecke 2020



Abbildung II-4: Östlicher Teilabschnitt mit mehrstreifiger, autobahnähnlicher Struktur



Abbildung II-5: Luftbild der ZF Testbahn in Jevern (inneres und äußeres Oval)

Für die Erprobung auf öffentlichen Straßen wurden typische Transferstrecken des Partners Bartkowiak ausgewählt. Diese bestanden aus Autobahnabschnitten mit unterschiedlichen Fahrbahnsituationen (z.B. verschiedene Fahrstreifenanzahl, Baustellen, etc.).



Abbildung II-6: Typische Strecke einer Tagestour des Partners Bartkowiak GmbH

2. Arbeitsschritte und Ergebnisse

Im Abschnitt „[Planung und Ablauf des Vorhabens](#)“ wurde der Aufbau des Projektes ausgiebig beschrieben.

2.1. AP 1 – Projektmanagement

2.1.1. Organisation

Das Projekt wurde mit einem Kickoff Meeting im November 2020 offiziell gestartet. Während dieser Veranstaltung haben sich die Partner auf das Vorgehen im Projekt und auf regelmäßige Abstimmungstermine geeinigt.

- Konsortialführung und Koordination des Projekts liegt bei ZF CVS Hannover
- Regelmäßige (2-wöchentliche) Abstimmungsmeetings
 - Diese erfolgten aufgrund der Pandemielage fast ausschließlich online.
- Protokollierung der Meetings in der OKIT Projektcloud mittels des AgilAS Tools (Kanban, Gantt Charts)
- Sämtliche technische Unterlagen werden auf dem HALC-Projektordner in der OKIT Nextcloud hinterlegt.
- Erstellung einer informativen Projekthomepage (beim Unterauftragnehmer OKIT gehostet)

Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass es zu keinerlei unerwarteten Entwicklungen oder Missverständnissen kommen konnte. Mögliche Risiken oder Probleme wurden im Team offen besprochen, bewertet und Risiken entsprechend mitigiert.

2.1.2. Durchführung

ZF lud als Konsortialführer zu den regelmäßigen Abstimmungsmeetings ein und pflegte auch die dafür vorgesehenen Planungstools. Dafür wurde seitens ZF ein Manager bestimmt. Alle Partner berichteten an diesen in den vereinbarten Abständen.

Sämtliche Partner, denen Arbeitspakete zugewiesen wurde, behandelten diese selbstständig und in erster Linie eigenverantwortlich. Sollten Abstimmungen notwendig sein, so wurden diese durch die Arbeitspaketleiter organisiert und im OKIT Projekttool AgilAS dokumentiert.

2.1.3. Öffentlichkeitsarbeit

Im Konsortium wurde abgestimmt eine Projektwebseite zum Vorhaben zu erstellen, um Interessierte über den aktuellen Entwicklungsstand von HALC zu informieren sowie eine Kontaktmöglichkeit zu schaffen. Hierfür wurde die Domain „halc-project.de“ reserviert und ein WordPress CMS (Content Management System) auf einem lokalen Server bei OKIT (Host) eingerichtet. Das Design der Homepage wurde dem Projektdesign angepasst und ist seit Juli 2022 online. Als initialer Inhalt wurden Texte aus der Vorhabenbeschreibung verwendet.

Begleitend zum Projekt wurde ein etwa 5-minütiger Projektfilm erstellt. Dieser fasst die Aufgaben des Projektes, das Vorgehen sowie das finale Ergebnis anschaulich zusammen. Erstmals gezeigt wurde er einem breiten Publikum während der Abschlussveranstaltung auf der ZF-Testbahn in Jeverßen. Im Anschluss wurde der Film bei YouTube hochgeladen und von den Partnern über branchentypische Social-Media-Kanäle wie z.B. LinkedIn verbreitet.

Es ist im Weiteren geplant, das Projekt an entsprechende Fachpresse heranzutragen und ggfs. auf Fachtagungen vorzustellen.

2.1.4. Qualitätsmanagement

Im Projektkonsortium wurde vereinbart, die von OKIT bereitgestellten cloudbasierten Dienste OKIT CAS AgilAS und Nextcloud zu nutzen, um partnerübergreifende Dokumente bearbeiten zu können. OKIT stellte diese Dienste im Auftrag von ZF zur Verfügung. Anforderungen an HALC wurden in Dokumentenform erstellt und konnten versioniert eingestellt werden. Zur Nachverfolgbarkeit von Aufgaben wurden dedizierte Listen geführt und Aufgaben in der AgilAS Kanban Darstellung erstellt. ZF pflegte diese Dokumente unter anderem während den regelmäßigen Abstimmungsmeetings. Intern verwendete jeder Partner seine hauseigenen Werkzeuge zur Qualitätssicherung und Anforderungsverfolgung.

2.2. AP 2 – Use-Cases und Anforderungen

2.2.1. Analyse Unfallszenarien

Analyse der GIDAS Unfalldaten

Als Grundlage der Analysen und Auslegungen in HALC sollte die Auswertung und Klassifizierung aktueller Unfallszenarien mit schweren LKW dienen.

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes des Projekts werden in einem ersten Schritt die Realunfalldaten der GIDAS-Datenbank [Johannsen et al., 2017] ausgewertet, um das Unfallgeschehen und die Unfallrandbedingungen zu beschreiben. Diese Informationen dienen im Folgenden als eine der Grundlagen für die Erstellung der Use Cases welche als Basis der Entwicklung für HALC dienen. Die GIDAS-Datenbank eignet sich für diese Analyse gut, da detaillierte Informationen u.a. zu den Beteiligten, den Insassen, den beteiligten Fahrzeugen zum Unfallablauf und den Unfallursachen vorhanden sind. Durch die Auswahl der Erhebungsgebiete und das Stichprobenverfahren bei der Fallauswahl zeichnet das GIDAS-Fallkollektiv eine gute Repräsentativität zum Unfallgeschehen in Deutschland aus. Für die Unfallanalyse wurden die Daten der Jahre 2010 bis 2019 aus GIDAS genutzt, um mit dieser 10 Jahresspanne einerseits ausreichende Fallzahlen zur Verfügung zu haben und andererseits recht aktuelle Unfälle zu berücksichtigen. In diesem Zeitraum standen 1.146 beteiligte LKW über 3,5t für zur Verfügung.

Aufgrund der Funktionsweise des HALC-Systems in einer autobahnähnlichen Umgebung kamen für die Analyse der Unfalldaten einerseits Unfälle auf Autobahnen und andererseits Unfälle außerorts auf Bundes- oder Landesstraßen mit mindestens 2 Fahrsteifen in Frage. Bei diesen Unfällen waren:

- 393 Lkw über 3,5t auf Autobahnen, bei denen der Lkw am initialen Konflikt beteiligt, der zum Unfall führte.
- 25 Lkw über 3,5t auf Bundes- oder Landesstraßen mit mindestens 2 Fahrsteifen am initialen Konflikt beteiligt, der zum Unfall führte.

Aufgrund der geringen Fallzahlen in der GIDAS-Datenbank und der leicht abweichenden Unfallkonstellationen wurde auf die Unfälle außerhalb von Autobahnen in der weiteren Analyse verzichtet.

Zunächst wurde der Unfalltyp der Unfälle ausgewertet, an denen die 393 Lkw beteiligt waren. Der Unfalltyp beschreibt die Konfliktsituation, die zum Unfall führte. Die Verteilung der 7 Kategorien des Unfalltyps ist in Abbildung II-7 dargestellt.

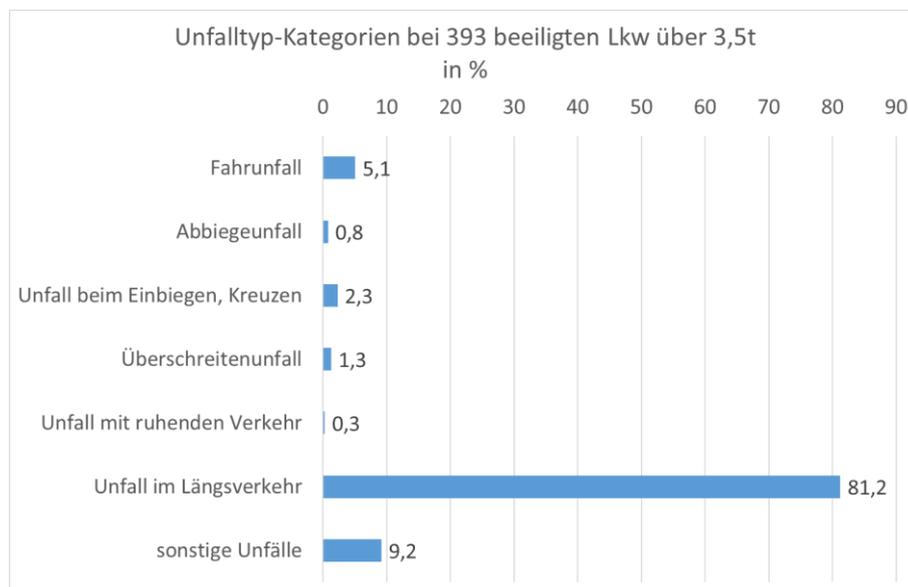


Abbildung II-7: Kategorien von Unfalltypen von 393 an Unfällen auf Autobahnen beteiligten Lkw über 3,5t

Unfälle im Längsverkehr (häufig Unfälle beim Spurwechsel und Auffahrunfälle) stellen die größte Gruppe von Unfällen bei Lkw auf Autobahnen mit über 81 Prozent. Fahr Unfälle, die häufig einen Kontrollverlust über den Lkw oder ein Abkommen von der Fahrspur bedingen mit 5,1% und sonstige Unfälle (hier häufig ein plötzliches körperliches Unvermögen oder ein plötzlicher Schaden am Fahrzeug) mit 9,1% sind weitere relevante Kategorien. Aufgrund der Fahrumgebung auf Autobahnen spielen Unfälle beim Abbiegen, Unfälle mit ruhendem Verkehr oder Unfälle mit Fußgängern beim Überschreiten der Fahrbahn eine sehr untergeordnete Rolle.

Für eine detailliertere Beurteilung der Konflikte wurden die Unterkategorien des Unfalltyps (Unfalltyp 2-stellig) ausgewertet. Die 10 häufigsten Unfalltypen sind in *Abbildung II-8* dargestellt, sie beschreiben den Konflikt bei 95% der beteiligten Lkw. Mit nahezu 61% waren Konflikte eines Verkehrsteilnehmers mit einem vorausfahrenden Fahrzeug (Unfalltypen 60 und 61) am häufigsten bei Lkw auf Autobahnen. Konflikte beim Spurwechsel (nach links mit 7,9%, nach rechts mit 5,3%) und Konflikte beim Nebeneinanderfahren (mit 4,6%) zeigten sich bei 18% der Lkw. Ebenfalls erwähnenswert scheint der relativ hohe Anteil von Unfällen aufgrund von plötzlichem körperlichem Unvermögen (häufig Einschlafen oder ein Schwächeanfall) mit 5,9% und Unfälle aufgrund eines plötzlichen Schadens am Fahrzeug (häufig am Reifen) mit 2,3% der Unfälle an denen Lkw beteiligt waren.

Was die Tageszeit der Unfälle betrifft, waren

- 308 Lkw (78%) an Unfällen am Tag,
- 66 Lkw (17%) an Unfällen in der Nacht sowie
- 21 Lkw (5%) an Unfällen in der Dämmerung

beteiligt.

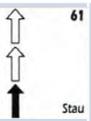
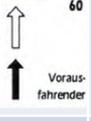
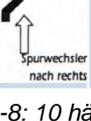
Utyp Unter- typen		Häufig- keit Beteiligte LKW	Utyp Unter- typen		Häufig- keit Beteiligte LKW
61		157 (39,9%)	65		18 (4,6%)
60		82 (20,9%)	14		16 (4,1%)
63		31 (7,9%)	30		9 (2,3%)
76		23 (5,9%)	77		9 (2,3%)
64		21 (5,3%)	69	Sonstige Unfälle im Längs- verkehr	8 (2,0%)

Abbildung II-8: 10 häufigste Unfalltypen (2-stellig) von Lkw auf Autobahnen

Die Auswertung der Verkehrsstufe zeigt, dass bei über 40% der beteiligten Lkw dichter Verkehr herrschte als sich der Unfall ereignete (Tabelle II-1). Ein Stau bzw. eine Staubildung oder zähflüssiger Verkehr waren bei 35% der beteiligten Lkw vorherrschend.

Verkehrsstufe	Häufigkeit	Anteil
vereinzelt fahrende Fahrzeuge	20	5%
leichter Verkehr - deutliche Lückenbildung	67	18%
dichter Verkehr - zulässige Geschwindigkeit möglich	158	42%
zähflüssig - zulässige Geschwindigkeit nicht möglich	39	10%
Stau, Staubildung	96	25%

Tabelle II-1: Verkehrsstufe auf der Autobahn bei Unfällen mit Lkw-Beteiligung

Der Unfallgegner der Lkw, der gemäß dem Unfalltyp an dem unfallauslösenden Konflikt beteiligt war, war mit jeweils 41% Lkw und Pkw zu gleichen Anteilen (Tabelle II-2 Tabelle II-2: Unfallgegner gemäß Unfalltyp der beteiligten Lkw.). Andere Arten der Verkehrsteilnahme spielen eine nur untergeordnete Rolle als Unfallgegner. In 15% der Fälle war der Lkw alleinbeteiligt am Unfall oder es waren noch Verkehrsteilnehmer beteiligt, die nicht am unfallauslösenden Konflikt beteiligt waren (z.B. durch das Überfahren von Trümmerteilen).

Unfallgegner	Häufigkeit	Anteil
PKW (M1/N1)	162	41,2%
Lkw (N2/N3)	161	41,0%
Bus (M2/M3)	1	0,3%
motorisiertes Zweirad	6	1,5%
Fußgänger	4	1,0%
Alleinbeteiligt oder nicht im UTYP	59	15,0%

Tabelle II-2: Unfallgegner gemäß Unfalltyp der beteiligten Lkw.

Die amtliche Unfallursache wurde durch die zuständigen Polizeibeamten kodiert und umfasst einen Katalog von Unfallursachen aus verschiedenen Kategorien, die in erster Linie der Darstellung des juristischen Fehlverhaltens dienen. Die 8 häufigsten Ursachen bei Unfällen an denen Lkw-Fahrer beteiligt waren sind in *Tabelle II-3: Amtliche Unfallursachen bei Unfällen mit Beteiligung von Lkw* dargestellt. Auch spiegelt sich das Unfallgeschehen von Lkw auf Autobahnen wieder: Die Ursachen 14 und 13 werden häufig bei Auffahrunfällen kodiert, die Ursachen 26, 20 und 29 deuten auf einen Spurwechselunfall hin. Auch hier erscheinen Übermüdung bzw. sonstige körperliche oder geistige Mängel unter den häufigsten Ursachen.

Unfallursache amtlich	Häufigkeit	Anteil
14 (Ungenügender Sicherheitsabstand)	99	25,2%
13 (Nicht angepasste Geschwindigkeit - in anderen Fällen, d.h. ohne Überschreitung der zulässigen Höchstgeschwindigkeit)	87	22,1%
49 (Andere Fehler beim Fahrzeugführer)	56	14,2%
3 (Übermüdung)	23	5,9%
26 (Fehlerhaftes Wechseln des Fahrstreifens)	14	3,6%
20 (Überholen ohne Beachtung des nachfolgenden Verkehrs)	12	3,1%
29 (Nichtbeachten der Vorfahrt des durchgehenden Verkehrs)	11	2,8%
4 (sonstige körperliche oder geistige Mängel)	8	2%

Tabelle II-3: Amtliche Unfallursachen bei Unfällen mit Beteiligung von Lkw

Die häufigste Aufbauform der Lkw waren in über 63% der Fälle Sattelzugmaschinen, gefolgt von Lkw mit offenem bzw. geschlossenem Kasten in über 20% der Fälle (Tabelle II-4). Spezialaufbauten waren eher selten.

Aufbauform des Lkw	Häufigkeit	Anteil
Sattelzugmaschine	250	63,6
geschlossener Kasten	45	11,5
offener Kasten mit Plane	35	8,9
Lkw Spezialaufbau	22	5,6
Lkw o.n.A.	14	3,6
Tank	9	2,3
offener Kasten	8	2

Tabelle II-4: Aufbauform der beteiligten Lkw.

Die rekonstruierte Ausgangsgeschwindigkeit der Lkw, d.h. die Fahrgeschwindigkeit im Moment der Unfallentstehung wurde in Abbildung II-9 als Histogramm dargestellt, um die Verteilung der Fahrgeschwindigkeiten zu zeigen. Die meisten Lkw fuhren in einem Geschwindigkeitsbereich um oder leicht über 80 km/h. Zu erkennen ist aber auch, dass ein nicht unerheblicher Teil der Lkw bei der Unfallentstehung stand oder sehr langsam fuhr.

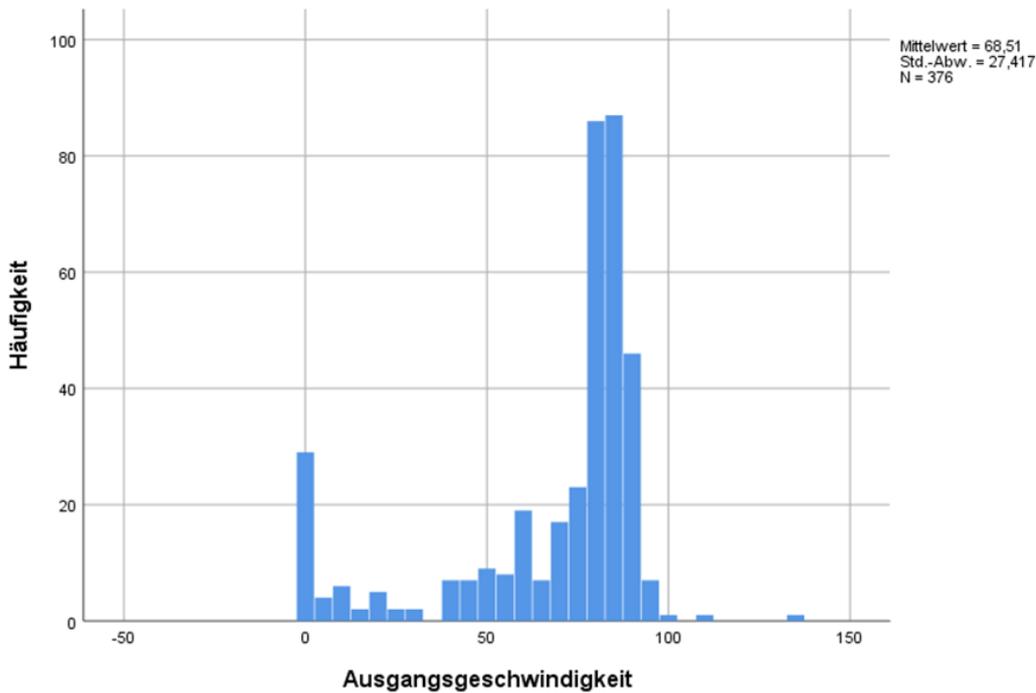


Abbildung II-9: Histogramm der Verteilung der Ausgangsgeschwindigkeit der Lkw bei Unfallentstehung

Neben den unfallspezifischen Faktoren wurden auch Randbedingungen wie wetterspezifische Faktoren analysiert. Um einen möglichen Einfluss durch das Wetter zu erkennen, wurden die Auswertungen einerseits für alle beteiligten Lkw durchgeführt und andererseits für die beiden häufigsten Unfalltypen: Auffahrunfälle (Unfalltypen 60, 61) und Spurwechselunfälle inklusive Unfälle beim Nebeneinanderfahren (Unfalltypen 63, 64, 65).

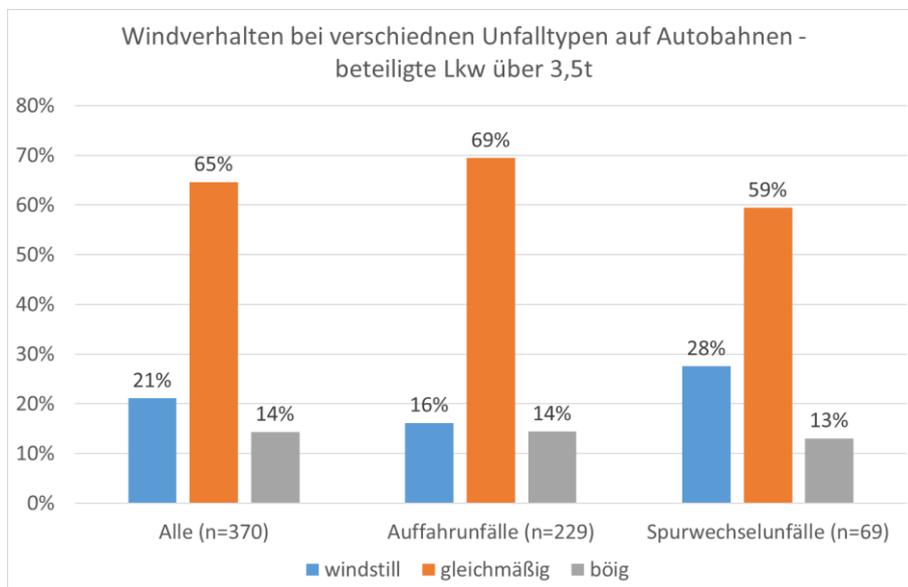


Abbildung II-10: Windverhalten bei verschiedenen Unfalltypen von Lkw-Unfällen auf Autobahnen.

Das Windverhalten (Abbildung II-10) war in den meisten Fällen gleichmäßig oder windstill. Böiges Windverhalten scheint keinen großen Einfluss auf das Unfallgeschehen mit Lkw zu haben. Auch bei den Unfalltypen der Spurwechselunfälle und beim Nebeneinanderfahren sind keine höheren Anteile von böigem Wind zu erkennen.

Was den Zustand der Straßenoberfläche betrifft, scheint es eine Häufung von Spurwechselunfällen bei Nässe zu geben (Abbildung II-11). Im Allgemeinen ereigneten sich die Unfälle überwiegend bei trockener Straßenoberfläche in 81% der Fälle und in 19% der Fälle war die Fahrbahn nass oder glatt.

Weitere Auswertungen zu den Wetterbedingungen, die für die HALC-Entwicklung weniger relevant waren, befinden sich im Anhang.

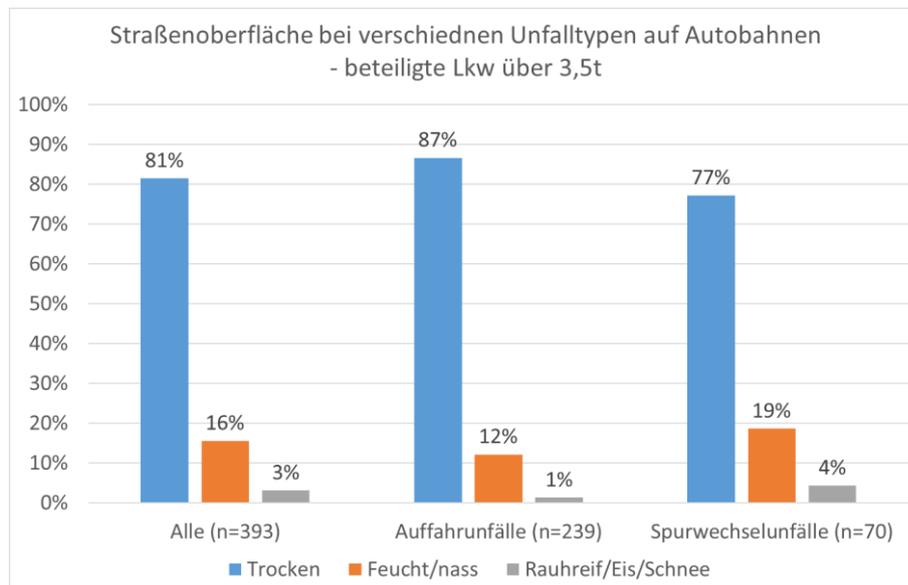


Abbildung II-11: Straßenoberfläche bei verschiedenen Unfalltypen von Lkw-Unfällen auf Autobahnen.

Analyse der der Daten der amtlichen Statistik

Neben der Analyse der Unfalldaten der GIDAS-Datenbank wurde auch eine Analyse der Unfalldaten der nationalen Statistik (DESTATIS) der Jahre 2014-2020 angestrebt, mit 11.308 Lkw-Unfällen in diesem Zeitraum auf Autobahnen. Aufgrund des extremen Verzugs bei der Lieferung der bestellten Daten durch das Statistische Bundesamt wurden diese Daten erst im weiteren Verlauf des Projekts ausgewertet. Ein Verständigungsfehler bei der Beauftragung führte dazu, dass nur Daten zu beteiligten Lkw (über 3,5t zul. Gesamtgewicht) auf Autobahnen geliefert wurden, ohne Sattelzugmaschinen. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass das Unfallgeschehen von Lkw über 3,5t dem der Sattelzugmaschinen sehr ähnlich ist.

Der Vergleich der Verteilung der Gruppen von Unfalltypen bei der nationalen Statistik mit den GIDAS-Daten zeigt, dass erwartungsgemäß Unfälle im Längsverkehr in der Bundesstatistik wie in GIDAS deutlich häufiger als andere Unfalltypen vorkommen (Abbildung II-12). Allerdings gibt es im Vergleich leichte Abweichungen. So wurden in DESTATIS mit 11,8% mehr Fahrnunfälle kodiert als in GIDAS mit 5,1%, hingegen wurden in GIDAS mehr Unfälle im Längsverkehr kodiert (GIDAS: 81,2%; DESTATIS: 72,9%). Aufgrund der dichten Verkehrslage in den Erhebungsgebieten Region Hannover und Landkreis Dresden kann vermutet werden, dass es hier häufiger zu Staus kommt, welche zu mehr Auffahrunfällen und damit zu mehr Unfällen im Längsverkehr führen.

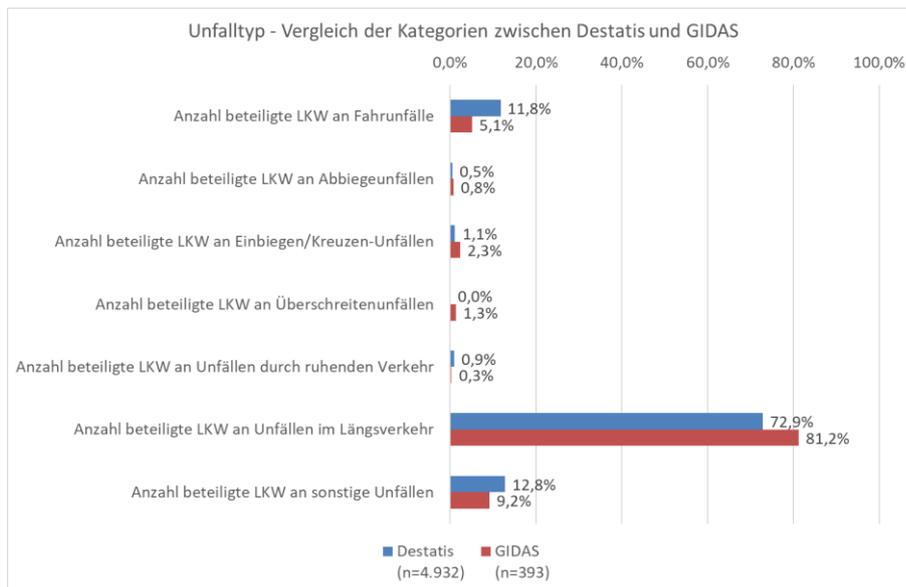


Abbildung II-12: Vergleich der Unfalltypverteilung von Lkw-Unfällen auf Autobahnen zwischen der Bundesstatistik und GIDAS.

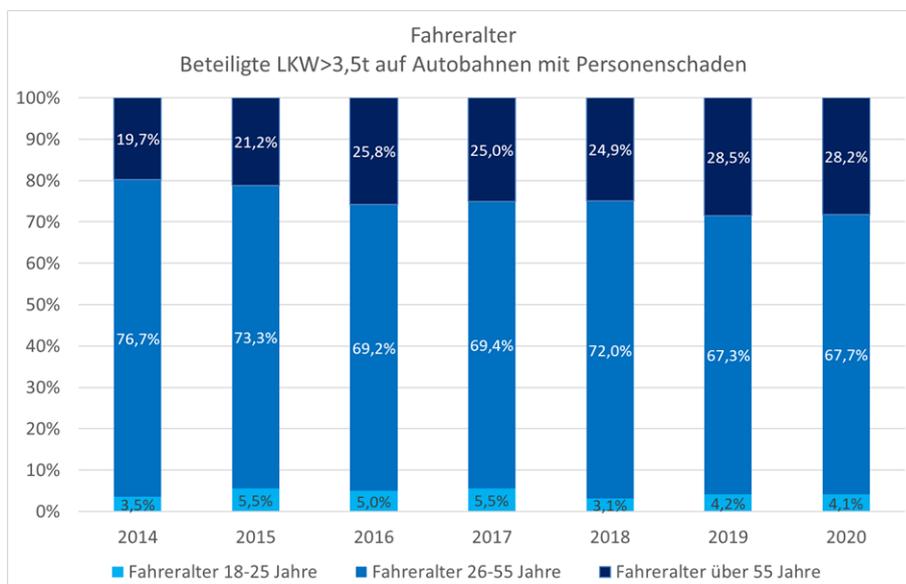


Abbildung II-13: Altersverteilung der Fahrer von Lkw mit Unfallbeteiligung auf Autobahnen.

Die Darstellung der Altersverteilung von Lkw-Fahrern, die auf Autobahnen an Unfällen beteiligt waren (Abbildung II-13) zeigt seit 2014 eine Tendenz zu steigenden Anteilen von Fahrern mit einem Alter über 55 Jahre. Daher kann davon ausgegangen werden, dass Unfälle, die auf körperliches Unvermögen zurückzuführen sind, auch zukünftig häufiger in Erscheinung treten. Der Grund des zunehmenden Anteils von älteren Lkw-Fahrern wird in den Problemen bei der Rekrutierung von Nachwuchs vermutet.

Der Einfluss des Alters des Fahrers auf die stattgehabten Unfälle ist in Abbildung II-14 zu sehen. Bei allen Altersgruppen ist Anteil von Unfällen im Längsverkehr mit über 70% am höchsten. Der Einfluss des Alters ist bei den sonstigen Unfällen (u.a. körperliches Unvermögen) erkennbar, die bei den Fahrern mit einem Alter von über 55 Jahren mit 14,3% höher sind als bei den anderen Altersklassen (12,8% bzw. 12,3%). Hier ist davon auszugehen, dass körperliches Unvermögen wie

Einschlafen (Unfalltyp 761) oder Schwächeanfall (Unfalltyp 762) bei älteren Fahrern häufiger vorkommt.

Bei der jungen Altersgruppe 18-25 Jahre häufen sich Fahrurfälle mit 13,7% gegenüber den erfahreneren Fahrern der Altersgruppe 26-55 Jahre erfahrenen mit nur 11,2%.

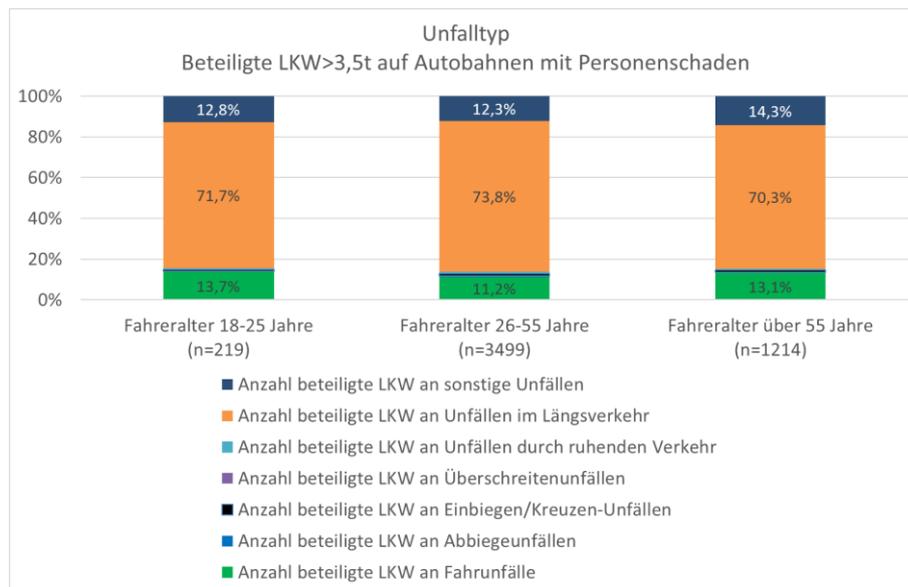


Abbildung II-14: Verteilung der Unfalltypen bei verschiedenen Altersgruppen von Fahrern von Lkw mit Unfallbeteiligung auf Autobahnen.

Ferner wurden die Daten von DESTATIS zum Zustand der Straßenoberfläche bei Unfallbeteiligten Lkw ausgewertet:

- Bei 79,5% der beteiligten Lkw war die Straße trocken,
- bei 19,1% der beteiligten Lkw war die Straße nass oder feucht,
- bei 1,4% der beteiligten Lkw war die Straße glatt oder schlüpfrig.

Damit liegen die Daten der Bundesstatistik mit knapp 80% trockener Straße auf einem ähnlichen Niveau wie die Daten aus GIDAS mit 81%.

Auch wenn es im Allgemeinen geringe Abweichungen der Daten der Bundesstatistik zu den Auswertungen der GIDAS-Daten gibt, bestätigen die Statistikdaten doch, dass die Analyse der GIDAS-Daten ausreichend repräsentativ, um die Unfallsituation in Deutschland darzustellen und somit geeignet ist als Basis für die Entwicklung des HALC-Systems zu dienen.

Analyse der Unfallursachen

Neben den amtlichen Unfallursachen wurde eine Auswertung der Ursachen gemäß der ACAS-Codes der Lkw-Fahrer durchgeführt, die die Unfallforschung Hannover seit 2008 erhebt. Diese Daten sind eine Teilmenge der GIDAS Daten aus den entsprechenden Jahren des Erhebungsstandortes Hannover.

Bei der ACAS-Methodik werden die Unfallursachen durch ein strukturiertes Interview mit den Unfallteilnehmern oder Zeugen vor Ort oder im Krankenhaus ermittelt. Neben den **menschlichen Faktoren** werden bei den ACAS-Unfallursachen auch Ursachenfaktoren berücksichtigt, die auf der

Fahrzeugtechnik und der **Umwelt bzw. Infrastruktur** basieren. Der Fokus dieses Systems und der nachfolgenden Ergebnisdarstellung liegt allerdings auf der Analyse der menschlichen Ursachen [OTTE et al., 2009]. Diese menschlichen Ursachen werden in fünf Kategorien menschlicher Fehler eingestuft (Abbildung II-15):

1. Fehler beim Informationszugang (Informationen waren aufgrund von Sichteinschränkung, Erkrankungen wie Sehstörungen, Dunkelheit usw. nicht wahrnehmbar)
2. Fehler bei der Informationsaufnahme (Informationen waren im Prinzip wahrnehmbar, wurden jedoch nicht erfasst aufgrund von Ablenkung, reduzierter Aktivierung aufgrund von Schläfrigkeit, Medikamenten o.ä. oder falscher Aufmerksamkeit wie fehlender Kontrollblick)
3. Fehler bei der Informationsverarbeitung (Informationen wurden erfasst, aber falsch interpretiert, z. B. wurde das Verhalten anderer Verkehrsteilnehmer oder deren Geschwindigkeit falsch eingeschätzt)
4. Fehler bei der Zielsetzung/Planung (Die erforderlichen Informationen wurden erfasst und richtig eingeschätzt, jedoch wurde ein falsches Manöver geplant oder ein vorsätzlicher Regelverstoß wurde festgestellt)
5. Fehler bei der Ausführung der Handlung (beim Ausführen des korrekt geplanten Manövers ist ein Problem aufgetreten, z. B. Gas geben anstatt Bremsen oder Verreißen des Lenkrades)

Mit Ausnahme der ersten Kategorie (Informationszugang) beziehen sich die folgenden vier Kategorien auf eine zeitliche Abfolge menschlicher Grundfunktionen, die in der Pre-Crash-Phase aktiv sind und in denen Fehler der Verkehrsteilnehmer zur Unfallentstehung beitragen. Die Kategorien werden jeweils in verschiedene Einflusskriterien operationalisiert (z. B. „Ablenkung im Verkehrsraum“ als eines der Kriterien der Kategorie 2 „Informationsaufnahme“). Um die Ursachen noch detaillierter kodieren zu können, werden bei ACAS die Kriterien weiter in Indikatoren der jeweiligen Kriterien aufgeteilt (z. B. „Plakate“ als ein Indikator des Kriteriums „Ablenkung im Verkehrsraum“). Es ist zu beachten, dass einem Unfallteilnehmer ggf. mehrere Ursachencodes zugeordnet werden können. Zudem erhalten Unfallbeteiligte, die nicht ursächlich zur Unfallentstehung beigetragen haben, keinen Ursachencode gemäß ACAS.

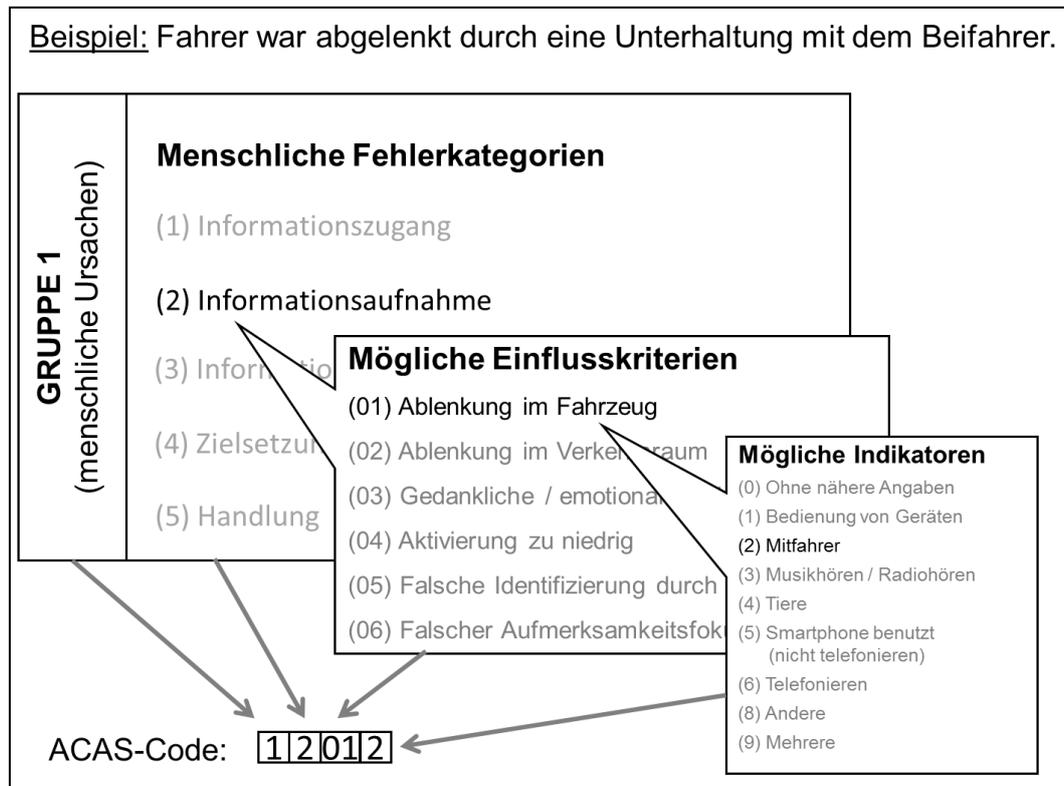


Abbildung II-15: Struktur der menschlichen Unfallursachen bei ACAS.

Für die Ursachenanalyse gemäß ACAS standen 298 Fälle mit Lkw auf Autobahnen von der Unfallforschung der MHH aus den Jahren 2010-2019 zur Verfügung. Hiervon hatten 135 Lkw mindestens einen ACAS-Code. Dabei hatten:

- 130 Beteiligte Lkw mindestens einen **menschlichen** Ursachenfaktor,
- 8 Beteiligte Lkw mindestens einen Ursachenfaktor aus dem Bereich der **Fahrzeugtechnik**,
- 4 Beteiligte Lkw mindestens einen Ursachenfaktor aus dem Bereich **Infrastruktur/Umwelt**.

Die Verteilung der Lkw mit menschlichen Ursachenfaktoren auf die Kategorien ist in Abbildung II-16 dargestellt. Da jeder Beteiligte Lkw mehrere Ursachenfaktoren haben kann, kann ein Beteiligter bei mehreren Kategorien gezählt werden. Bei 19% der Lkw wurde eine unbekannte menschliche Ursache kodiert, die mangels Detailwissen nicht auf die 5 Kategorien von menschlichen verteilt werden konnten.

Bei 8% der Beteiligten Lkw wurden Ursachen aus der Kategorie **Informationszugang** erkannt. Die häufigsten Einflusskriterien der Kategorie **Informationszugang** waren:

- 1-mal unbekanntes Kriterium (aus Mangel an Detailkenntnis),
- 1-mal Information verdeckt durch Fahrzeugexterne Objekte,
- 6-mal Information verdeckt durch Fahrzeuginterne Objekte – in diesen Fällen durch Fahrzeugsäulen oder andere Baugruppen des Fahrzeugs.
- 3-mal eine Informationsmaskierung z.B. durch Blendung oder staken Regen

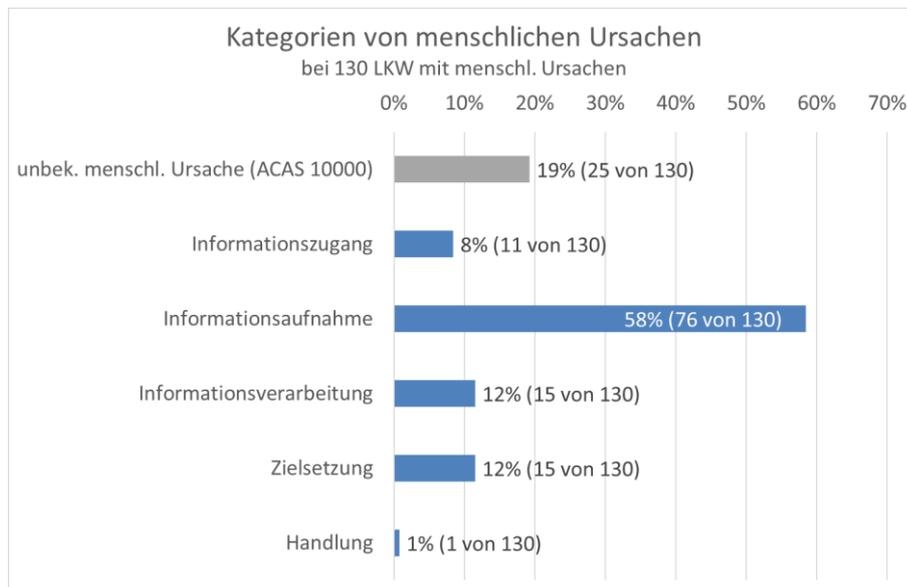


Abbildung II-16: Verteilung der Lkw mit Ursachenfaktoren auf die Kategorien von menschlichen Ursachen.

Am häufigsten waren menschliche Unfallursachenfaktoren aus der Kategorie der **Informationsaufnahme** bei 58% der beteiligten Lkw. Innerhalb dieser Kategorie waren die häufigsten Einflusskriterien:

- 42-mal ein unbekanntes Kriterium,
- 6-mal eine Ablenkung im Fahrzeug – hier wurde unter anderem die Bedienung von Geräten genannt,
- 1-mal eine Ablenkung im Verkehrsraum,
- 2-mal eine interne Ablenkung – gedanklich oder durch Stress.
- 11-mal eine zu niedrige Aktivierung (8-mal Beanspruchung/Müdigkeit, 3-mal ein Blackout oder Infarkt; 1-mal Drogen)
- 0-mal eine falsche Identifizierung oder eine Überforderung durch die Verkehrssituation.
- 15-mal ein falscher Aufmerksamkeitsfokus (6-mal Falsche Beobachtungsstrategie; 3-mal Fokus auf den falschen Verkehrsteilnehmer; 6-mal ohne nähere Angabe).

Von den Ursachenfaktoren aus der Kategorie **Informationsverarbeitung**, die bei 12% der Lkw-Fahrer mit Ursachencodes vergeben wurde, waren:

- 2-mal eine falsche Erwartung bezüglich des Verhaltens anderer Verkehrsteilnehmer
- 11-mal eine Fehleinschätzung der Geschwindigkeit oder Distanz anderer Verkehrsteilnehmer.
- 2-mal eine Fehleinschätzung des eigenen Fahrzeugs

Ebenfalls 12% der Lkw-Fahrer mit Ursachencodes hatten einen Code aus der Kategorie der **Zielsetzungsfehler**. Diese waren:

1-mal ein nicht näher definierter Zielsetzungsfehler,
 2-mal ein Entscheidungsfehler wie ein falsch geplantes Manöver,
 12-mal ein bewusster Regelverstoß – welche in den meisten Fällen überhöhte Geschwindigkeit z.B. in Baustellen oder Abstandsunterschreitungen waren.

Eher selten wurden Ursachenfaktoren aus der Kategorie der **Handlung** kodiert bei nur 1% der Fahrer. Diese waren:

- 1-mal eine Überreaktion beim Lenkmanöver

Das zu entwickelnde HALC-System sollte entsprechend das Potential haben, vor allem Fehler bei der Informationsaufnahme zu adressieren. Diese Fehler sind darauf zurückzuführen, dass der Beteiligte z.B. aufgrund von Aufmerksamkeitsdefiziten die vorhandene Information wie ein bremsender Vordermann nicht erfassen konnte oder sie zu spät erfasst hat. Aber auch Informationszugangsfehler beispielsweise ausgelöst durch „tote Winkel“ aus der Perspektive des Lkw-Fahrers oder Informationsverarbeitungsfehler wie das falsche Einschätzen von Entfernungen oder Geschwindigkeiten von anderen Verkehrsteilnehmern sollten durch ein Assistenzsystem wie HALC adressiert werden.

Um den Einfluss eines Notbremssystems AEB auf das Unfallgeschehen zu analysieren, wurde die HALC-Auswertung für Lkw bei denen bekannt war, dass ein AEB vorhanden war, wiederholt. Aufgrund der geringen Fallzahlen von nur 9 Lkw mit AEB, die einen ACAS-Code hatten, lassen sich allerdings keine signifikanten Unterschiede darstellen. Auch hier waren die meisten Ursachenfaktoren aus dem Bereich der Informationsaufnahme.

2.2.2. Festlegung Use Cases

Mit der Festlegung der Use Cases wurde der erste Meilenstein des Projektes erfolgreich abgeschlossen. Durch ZF wurden sowohl die Erstellung der Use Cases koordiniert als auch die für die Erstellung der Use Cases notwendigen Tätigkeiten hauptsächlich übernommen.

Durch ZF wurden Workshops im Konsortium organisiert und moderiert, um die ersten Ideen zu sammeln. Die von den Partnern erstellten Use Cases wurden dann in weiteren Workshops diskutiert und ein gemeinsames Bild aus diesen erarbeitet. Im Weiteren bildeten diese Use Cases die Grundlage für die Erarbeitung des vollständigen Use Case Kataloges mit insgesamt 106 Use Cases durch ZF. In verschiedenen internen Review Runden wurden die Use Cases gesichtet und entsprechend überarbeitet, so dass eine optimale Grundlage für die weiteren Projektschritte bereitgestellt werden konnte. Aufgrund der technischen Perspektive von ZF wurde insbesondere auf die technisch detaillierte Ausarbeitung der Use Cases fokussiert.

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft einen Use Case aus dem Katalog:



Abbildung II-17: Beispielhafter Use Case

Aufgrund in Kapitel 3.1.3 beschriebenen Änderungen der Projektziele wurde in diesem Arbeitspaket auch die notwendige Auswahl der Use Cases für die Fahrstreifenwechselfunktion getroffen. Es wurden typische Use Cases ausgewählt, die ausschließlich auf der ZF-Testbahn umgesetzt wurden. Die folgende Grafik gibt eine Übersicht über diese Use Cases:

HALC – Lane Change Use Cases – Übersicht

- Allgemeiner Ablauf
 - Fahrer triggert automatischen Fahrstreifenwechsel durch Betätigen des Blinkers und leichtes Einlenken in Richtung des Zielfahrstreifens an
 - HALC System prüft ob Manöverraum auf Zielfahrstreifen frei ist und ob Fahrer aufmerksam ist
 - Wenn ja: HALC System führt Fahrstreifenwechsel aus
 - Wenn nein: HALC System informiert Fahrer, dass Fahrstreifenwechsel nicht möglich ist
- Relevante Situationsmerkmale / -objekte
 - Fahrstreifenwechsel nach links / nach rechts
 - Vorderfahrzeug auf Startfahrstreifen vorhanden / nicht vorhanden
 - Vorderfahrzeug auf Zielfahrstreifen vorhanden / nicht vorhanden
 - Fahrzeugbelegung auf Zielfahrstreifen ermöglicht Fahrstreifenwechsel / ermöglicht Fahrstreifenwechsel nicht
 - Fahrer ist aufmerksam / nicht aufmerksam

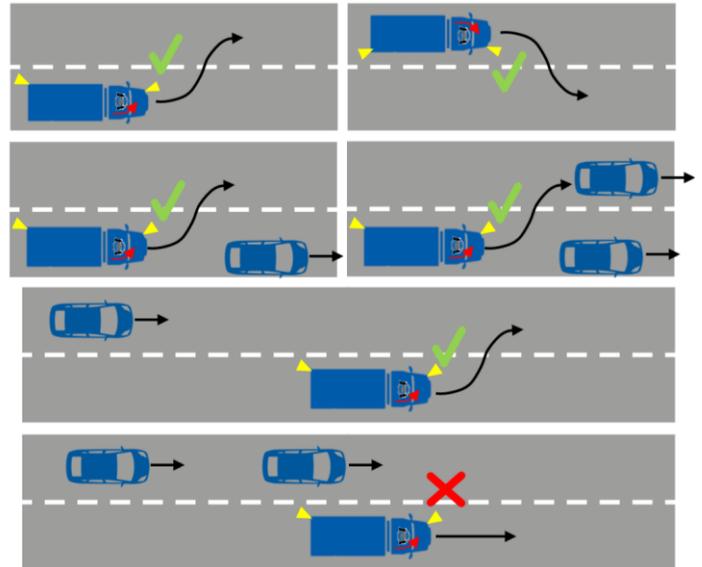


Abbildung II-18: Übersicht über die ausgewählten Use Cases zum Fahrstreifenwechsel

2.2.3. High-Level Anforderungen

Auf der Grundlage der in AP 2.2 definierten Use Cases wurden auf oberster Ebene Anforderungen für den Highway Assist abgeleitet. Dies umfasst auch eine Übersicht der möglichen Systemzustände im Allgemeinen und eine detaillierte Betrachtung der Systemzustände beim Fahrstreifenwechsel. Die folgende Abbildung II-19 zeigt ein Beispiel:

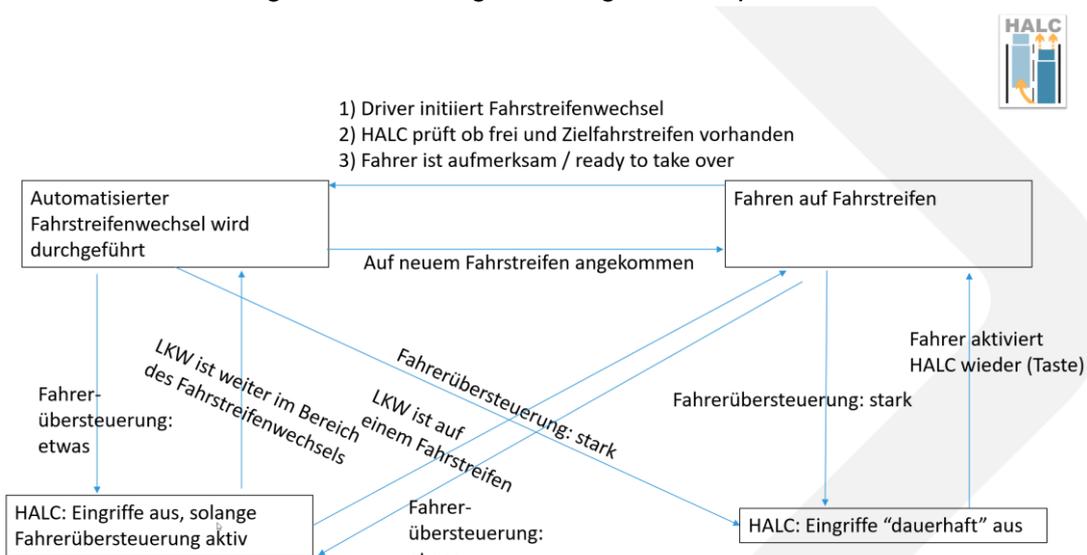


Abbildung II-19: Zustandsdiagramm HALC

Die ermittelten Anforderungen wurden mit aufgenommenen Messdaten verglichen und entsprechend detaillierter umschrieben. Es ergab sich ein Anforderungskatalog als Grundlage der folgenden technischen Entwicklung.

2.3. AP 3 – Fahrermodell

Das HALC-System ist eine Fahrzeugautomation für LKW auf SAE-2-Niveau und ermöglicht es, auf Autobahnen und autobahnähnlichen Straßen die Längs- und Querverführung sowie Fahrstreifenwechsel automatisiert durchführen zu lassen.

Als Assistenzsystem auf SAE-2-Niveau stellt das HALC-System jedoch an Fahrzeugführende die Anforderung, jederzeit und ohne Vorwarnung die Kontrolle zu übernehmen. Im Fall einer technischen Fehlfunktion stellt der Mensch somit die Rückfallebene dar.

Vor diesem Hintergrund untersuchte AP3 Möglichkeiten, die Übernahmebereitschaft durch Fahrzeugführende während der Systemnutzung zu erfassen, zu klassifizieren und diese Klassifikation dem HALC-System zur Verfügung zu stellen. Im Fall einer mangelnden Bereitschaft hat das System damit die Möglichkeit, eine audiovisuelle Warnung auszugeben oder auch Einzelfunktionen wie den Fahrstreifenwechsel zu deaktivieren.

Im Folgenden wird die Funktionsentwicklung von der Konzeption über die Erprobung im Labor bis zum Einsatz im LKW dargestellt.

2.3.1. Eye-Tracking Konzept

Anhand der Use Cases aus AP2, der Aufgabenanalyse aus AP3.2 legten die Projektpartner zunächst die Anforderungen an das Konzept fest. Um die Übernahmebereitschaft klassifizieren zu können ist sensorische Information über die fahrzeugführenden Personen notwendig. Beim manuellen Fahren können dafür Lenkradeingaben genutzt werden, etwa für eine Müdigkeitsklassifikation. Beim assistierten Fahren mit automatischer Querverführung ist das jedoch nicht möglich, weil hier die Lenkradstellung vom System eingestellt wird. Daher konzentrierten sich die Arbeiten in AP3 auf die Erfassung der visuellen Aufmerksamkeit. Die Konzeptionierung sowie die technische Architektur des Klassifikators sind jedoch für beliebige sensorische Informationen offen.

Als Erfassungsmethoden der visuellen Aufmerksamkeit stehen Eye- und Headtracking zur Verfügung. Während Eyetracking den Blickstrahl auf Areas of Interest (AOI; virtuelle oder echte Objekte in der Umgebung) messen kann, erfasst Headtracking lediglich die Kopfausrichtung. Sofern kein kopfgestütztes System genutzt werden soll, ist allerdings Eyetracking über einen so großen Bereich wie einer LKW-Kabine aufwändig und sehr anfällig für Störeinflüsse. Sonnenbrillen, Kopfbedeckungen und Veränderungen der Beleuchtung können die Qualität der Erfassung bis hin zum Totalausfall verschlechtern. Headtracking hingegen ermöglicht die Erfassung von Kopfposition und -ausrichtung schon anhand weniger Gesichtsmarkierungen, erfordert keine Kalibrierung der Person im Bild und hat insgesamt geringe technische Voraussetzungen. Um die Vorteile beider Systeme zu kombinieren, entschieden sich die Projektpartner daher, Eyetracking für den frontalen Bereich und Headtracking für das angrenzende Umfeld zu verwenden (Abbildung 1). Die Erfassung der Kopfdrehungen zur linken und zur rechten Seite sind insbesondere für die Bereitschaft zum Fahrstreifenwechsel notwendig, so dass Headtracking genügt. Nach vorne jedoch ist es wünschenswert, dass der Blick tatsächlich auf die Straße gerichtet wird und nicht etwa auf Multimedia-Geräte. Das kann über das Eyetracking erfasst

werden. Die grundsätzliche Überprüfung des Konzeptes erfolgte im Simulatorexperiment (AP3.4) sowie bei der Implementierung und Integration im Realfahrzeug (AP3.5, AP8.4, AP9.2).

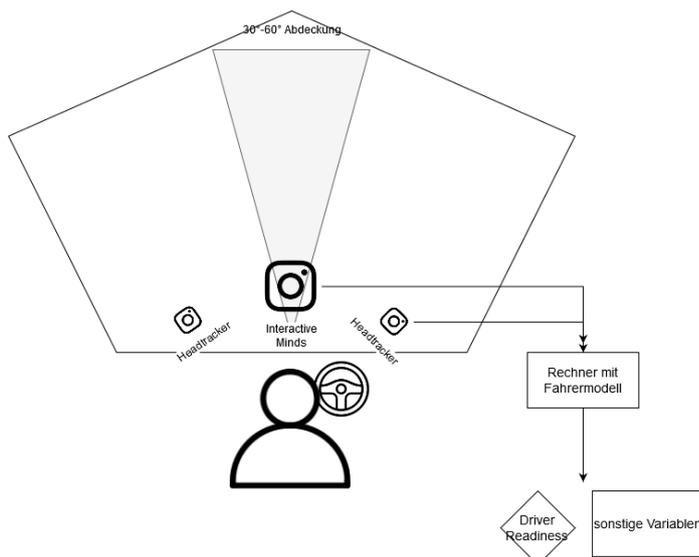


Abbildung II-20: Eye- und Headtrackingkonzept.

2.3.2. Aufgabenanalyse Fahrzeug

Ziel von AP3.2 war die Analyse der Aufgabenausführung in relevanten Use Cases aus AP2. Dafür wurde zunächst die Fachliteratur sowie eigene Ergebnisse zu Fahrverhalten in verschiedenen Situationen und mit verschiedenen Automationsstufen herangezogen.

Insbesondere wurde dabei das Blickverhalten zur Beobachtung des Front- und rückwärtigen Verkehrs untersucht. Der übergroße Teil der Literatur berichtet jedoch Ergebnisse zur Aufgabenausführung im PKW. Diese Erkenntnisse können wegen unterschiedlichen Fahrzeuggrößen und Sichtverhältnissen nur eingeschränkt auf das Verhalten im LKW übertragen werden, so dass zusätzlich qualitative Befragungen und Beobachtungen in Bezug auf reguläres LKW-Fahrverhalten durchgeführt wurden.

Zusätzlich wurde eine Headtracking-basierte Fahrerbeobachtung konzeptioniert und in die Projekt-Telematik von OKIT eingebunden. Durch die qualitative Analyse der gewonnenen Daten konnten wertvolle Einblicke in die Ausführung der Aufgabe LKW-Fahren gewonnen werden, die für alle folgenden Schritte in AP3 von zentraler Bedeutung waren.

2.3.3. Erweiterung des Fahrsimulators zur Untersuchung der Use Cases

Die grundlegende Überprüfung zur sensorischen Erfassung fahrzeugführender Personen erforderte eine Beobachtung entsprechenden Verhaltens in sicherheitskritischen Situationen. Aus methodischen und ethischen Gründen muss das jedenfalls zunächst in einem entsprechend ausgestatteten Simulator erfolgen. Dafür wurde am DLR-Standort in Braunschweig ein Mockup zu einer LKW-Kabine umgerüstet.

Der Aufbau erfolgte in enger Abstimmung und mit großer Unterstützung des Projektpartners Spedition Bartkowiak. Besonders wichtig war eine Nachbildung der für das Blickverhalten entscheidenden Geometrie in der Kabine, etwa im Hinblick auf die Außenspiegel. Dafür wurden Innenräume von LKWs genau vermessen, um die verhaltensrelevanten Eigenschaften in der Kabine und in der Simulation nachzustellen.

Gespräche mit Fachpersonal der Projektpartner sowie Literaturrecherche ergänzten die Erkenntnisse aus den Realfahrzeugen und sicherten die Validität des Aufbaus ab.



Abbildung II-21: LKW-Mockup im DLR-Fahrsimulator



Abbildung II-22: Vermessung im LKW und Vorbereitung des Headtracking

2.3.4. Einfahren Datenkorpus im DLR-Simulator

Das Fahrsimulatorexperiment hatte drei Ziele:

- (a) Erprobung des geplanten Vorgehens zur Erfassung der visuellen Aufmerksamkeit,
- (b) Erhebung von Daten zum Blickverhalten sowie der Kopfausrichtung,
- (c) Untersuchung des Verhaltens von LKW-Fahrern und -Fahrerinnen in sicherheitskritischen Situationen.

Besonders wichtig waren dabei sicherheitskritische Situationen mit unvorhergesehenen Automationsausfällen, sogenannten "Silent Fails". Zahlreiche Untersuchungen zum Übernahmeverhalten variieren die Zeit zwischen einer Warnung durch das Assistenzsystem und der Reaktion des Menschen. Hintergrund ist die Annahme, dass ab SAE-3 in jedem Fall eine Warnung ausgegeben wird oder sich das Fahrzeug selbständig in einen minimalkritischen Zustand begeben kann. Verhalten ohne eine solche Warnung wurde bisher allerdings kaum untersucht. Insbesondere für den LKW fehlen veröffentlichte Daten und Erkenntnisse.

Am Experiment nahmen über 30 Personen teil, wobei einige Datensätze aus technischen oder anderen Gründen ausgeschlossen werden mussten. Insgesamt konnten 27 auswertbare Datensätze erhoben werden. Ein Großteil dieser Personen waren Berufskraftfahrerinnen und -

fahrer; alle verfügten über einen CE-Führerschein. Sie durchfuhren jeweils vier sicherheitskritische Situationen, jede davon in einer unterschiedlichen Kombination von Automationsstufe und Warnung. Die Automationsstufe bestand entweder im manuellen Fahren oder im automatisierten Fahren. Bei der automatisierten Fahrt wurde in jedem Fall um das sicherheitskritische Ereignis herum ein Ausfall simuliert. Die Warnstufe bestand entweder aus einer audiovisuellen Warnung einige Sekunden vor den sicherheitskritischen Ereignissen oder dem Fehlen eines solchen Hinweises.

Aus Gründen der Untersuchungsökonomie beschränkte sich das Untersuchungsdesign auf Automationsausprägungen und Situationen mit Relevanz für das HALC-System. Daher wurde die manuelle Fahrt ohne ablenkende Nebenaufgabe durchgeführt, und nur während der automatisierten Fahrt kam diese Nebenaufgabe zum Einsatz. Dieses Untersuchungsdesign ermöglichte einen Vergleich von Best und Worst Case. Best Case war die manuelle Fahrt ohne Ablenkung und mit einer Warnung, Worst Case war die automatisierte Fahrt ohne Warnung, den Silent Fails. Im Training vor Beginn der eigentlichen Durchgänge wurden die Probandinnen und Probanden ausdrücklich darauf hingewiesen, dass Automationsfehler ohne Warnung auftreten können und erlebten auch entsprechende Situationen.

Der Fall eines Silent Fails ist in *Abbildung II-23* zu sehen. Der Fahrer war bis eben auf die Nebenaufgabe auf dem Tablet konzentriert und schaut nun nur zufällig hoch (gelber Blickpunkt nach vorn).

Die Automation erkennt den havarierten LKW am Straßenrand nicht und fährt mit der erlaubten Geschwindigkeit von 80 km/h weiter. Die verbleibenden 0,9 Sekunden bis zum Aufprall würden nicht für eine manuelle Notbremsung genügen. Ein Ausweichen würde in diesem Fall ebenso zur Kollision führen da sich auf der Mittelspur von hinten ein Fahrzeug nähert (blauer Rand im linken Außenspiegel über dem Fahrerkopf).



Abbildung II-23: Silent Fail während einer sicherheitskritischen Situation.

Wir möchten an dieser Stelle betonen, dass die Fahrerinnen und Fahrer im Experiment durch die Vergabe von Gutscheinen für Höchstplatzierte besonders für die Bearbeitung der Nebenaufgabe motiviert wurden. Weiterhin kam es nur bei einer mittleren Anzahl der Silent Fails zum Abdriften in

die Nachbarspur oder gar zu Kollisionen. Mithin dürfen die Ergebnisse des Experiments nicht ohne weiteres auf Realverhalten übertragen werden. Entscheidend ist jedoch der Beleg, dass auch erfahrene Fahrerinnen und Fahrer nicht jeden Automationsfehler rechtzeitig bemerken und korrigieren, besonders wenn der Fehler ohne vorhergehende Anzeichen auftritt.

Die Häufigkeit und Auswirkung von nicht oder spät korrigierten Automationsfehlern würde stark von der technischen Konfiguration und der genauen Verkehrssituation abhängen. Das Experiment eignet sich daher nicht für die Vorhersage entsprechender Parameter. Ob solche Fehler korrigiert werden können, wird jedoch erheblich vom Zeitbudget zwischen dem ersten Anzeichen und einer möglichen Kollision bestimmt. Zeigt der Kopf zumindest nach vorn oder, im Fall des automatisierten Fahrstreifenwechsels, zur Seite, steigt das Zeitbudget erheblich.

Im nächsten Schritt wurde daher ein Online-Klassifikator erstellt, welche diese Ausrichtung in Echtzeit prüft und ans Realfahrzeug sendet.

2.3.5. Erstellung des On- und Offline Fahrermodells

Auf Grundlage der Use Cases, der Konzeptionierung der Erfassung der Übernahmebereitschaft sowie der Experimentalergebnisse wurde ein Online-Klassifikator entworfen, welcher den jeweiligen Zustand einer erfassten Person an den LKW zurückmeldet. Die Software wie auch die Peripherie wurden für einen Forschungskontext ausgeführt. Sowohl bei der Architektur als auch bei der verwendeten Programmiersprache lag der Schwerpunkt daher auf Anpassbarkeit und Offenheit für neue Anforderungen. Dennoch legten die Projektpartner großen Wert darauf, dass die Implementierung sowohl in Bezug auf Hardware als auch Software als Spezifikation der Anforderungen an ein tatsächlich existierendes Produkt dienen kann.

Die Architektur der Anwendung ist in Abbildung II-24 dargestellt. Der Programmablauf gruppiert sich um die quelloffene und hoch performante Datenbank Redis, die als Schnittstelle für alle Dateneingänge und -ausgänge verstanden werden kann. Der grundsätzliche Ablauf erfolgt in den folgenden Schritten:

1. Aus dem Videostream der Kameras (links im Bild) extrahiert eine Headtracking-Software (Visage) Kopfposition und -ausrichtung sowie weitere Merkmale. Eine weitere Verarbeitung oder gar Speicherung des Videostreams ist nicht nötig und erfolgt auch nicht.
2. Da der Headtracker mehrere Personen im Bild erfassen könnte wird im nächsten Schritt die fahrzeugführende Person ausgewählt.
3. Danach wird anhand definierter AOI-Grenzen bestimmt, ob und wie lange die Person den Kopf auf die jeweilige AOI ausrichtet. Für verschiedene Aufgaben wie die Überwachung nach vorn oder zu den Seiten können unterschiedliche Zeitfenster konfiguriert werden.
4. Analog werden Mindestauern der Kopfausrichtung in die jeweiligen AOI festgelegt. Nach vorn kann das z.B. bedeuten, dass eine Übernahmebereitschaft angenommen wird, wenn der Kopf in den letzten 12 Sekunden mindestens 7 Sekunden nach vorn gezeigt hat. Für einen Fahrstreifenwechsel könnte gleichermaßen gefordert werden, innerhalb der letzten 5 Sekunden für mindestens 3 Sekunden den Kopf zur jeweiligen Seite ausgerichtet zu haben.
5. Das aktuelle Klassifikationsergebnis wird an den LKW mit ca. 10 Hz gesendet.

6. Über einen Rückkanal kann der LKW-Informationen über den Zustand des HALC-Systems senden.
7. Eine Auswahl der verarbeiteten Daten sowie Diagnoseinformationen können dauerhaft gespeichert werden.

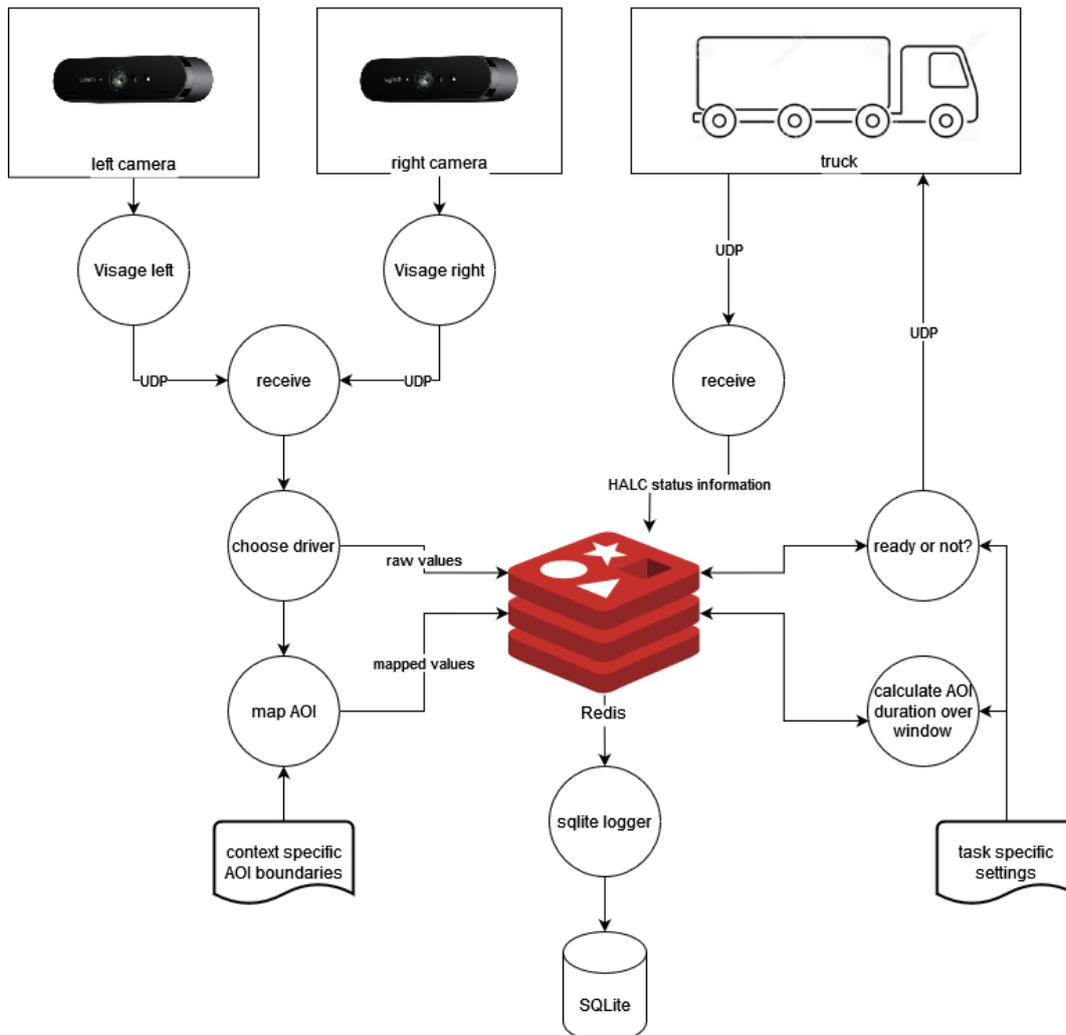


Abbildung II-24: Architektur des Online-Klassifikators.

2.3.6. Erprobung des Fahrermodells im Realfahrzeug

Die Schnittstellen zwischen Fahrermodell und Fahrzeug wurden sorgfältig mit ZF abgestimmt, um eine nahtlose Integration zu gewährleisten. Bei der Positionierung der Kameras wurde besonders darauf geachtet, Positionen zu wählen, die einen möglichst störungsfreien Blick auf den Fahrer ermöglichen. Ein wichtiges Ziel war, das System vollständig ohne Kalibrierung nutzen zu können, sodass es sofort nach dem Einsteigen und dem Starten des Fahrzeugs einsatzbereit ist. Im Zusammenspiel mit der in dem ZF-Fahrzeug implementierten Fahrerassistenz verhindert das HALC-System etwa, dass die Funktion "Fahrstreifen wechseln" ohne ausreichende Zuwendung des Kopfes in die jeweilige Richtung genutzt werden kann. Diese innovativen Funktionen wurden erfolgreich in das ZF-Testfahrzeug integriert und demonstriert.

2.4. AP 4 – Umfeldmodell

2.4.1. Fahrstreifen-/Vorderfahrzeug Erkennung zum Fahrstreifen folgen

Das Unterarbeitspaket umfasste die Erkennung von Fahrstreifen und Vorderfahrzeug, um die HALC Use Cases zum Fahrstreifen folgen zu realisieren. Zur Objekterkennung vor dem Fahrzeug wurde ein Frontradar ausgewählt. Eine Frontkamera diente zur Fahrstreifen- und Objekterkennung vor dem Fahrzeug.

Bei zahlreichen Messfahrten auf öffentlichen Straßen wurde die Objekt- und Fahrstreifenenerkennung bei verschiedenen Situationen und Wetterverhältnissen aufgezeichnet.

Die aufgezeichneten Daten zeigten, dass die korrekte Fahrstreifenenerkennung aufgrund der vielfältigen Freiheitsgrade der Störfaktoren einen größeren Aufwand einfordert. So ist insbesondere das Spurhalten bei plötzlich fehlenden, bzw. verdeckten, Fahrstreifen (z.B. durch Schnee, Hagel oder Nässe) eine große Herausforderung.



Abbildung II-25: Fahrstreifenenerkennung bei schlechter Sicht

Funktionsunterstützend könnte sich das HALC-System beispielsweise an nur einer Linie, links oder rechts, orientieren. Bei gänzlich fehlenden Fahrstreifen kann sich das System vorübergehend virtuelle Linien errechnen, um dem Fahrer eine Überbrückungszeit zur Übernahme zu geben oder eine Reduktion von kurzfristigen Ausfallzeiten zu ermöglichen.

Dazu wurde die Funktion „Single Line Support“ entwickelt. Die folgenden Abbildungen erläutern diese Funktionalität. Ist die Fahrstreifenmarkierung für kurze Zeit unterbrochen, so wird eine virtuelle Linie eingefügt, die die beiden erkannten Fahrstreifenmarkierungssegmente verbindet (siehe Abbildung II-26). Ist die Unterbrechung der Fahrstreifenmarkierung längerfristig, so erfolgt nach einiger Zeit ein sanfter Übergang zu einer voreingestellten Standardfahrstreifenbreite (siehe Abbildung II-27).

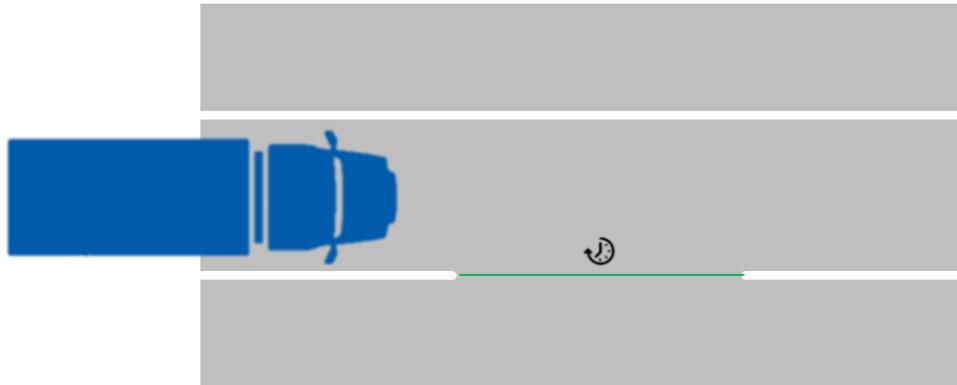


Abbildung II-26: "Single Line Support" bei kurzzeitig unterbrochener Fahrstreifenmarkierung

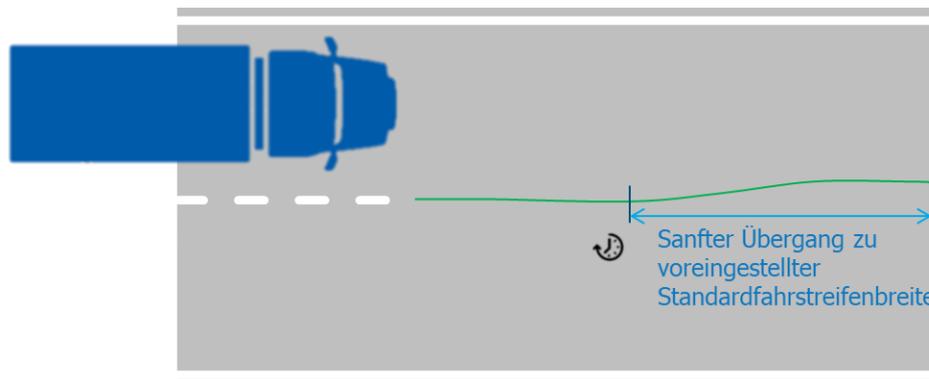


Abbildung II-27: "Single Line Support" bei längerfristig unterbrochener Fahrstreifenmarkierung

Die Funktion wurde sowohl mit aufgezeichneten Sensordaten als auch im Versuchsfahrzeug getestet und parametrisiert. In den Tests konnte nachgewiesen werden, dass die Funktion erfolgreich mit den avisierten Situationen umgehen kann. Außerdem wurden die Parameter erfolgreich optimiert, so dass das ein anforderungsgerechtes Verhalten im Fahrzeug erreicht werden konnte.

Eine weitere herauszuhebende Aufgabe war die Optimierung der Fahrstreifenerkennung in verschiedenen herausfordernden Szenarien im Realverkehr, in denen es zuvor zu Sprüngen bei der Erkennung einzelner Linien gekommen war. Die Arbeiten zielten darauf ab, eine stabile Erkennung der relevanten Linien für den eigenen Fahrstreifen in jeglicher Situation zu erreichen und so Sprünge zu vermeiden. Dies konnte durch Änderungen an der Auswahl, der für den eigenen Fahrstreifen relevanten Linien, erreicht werden. Dadurch wird auch die Wahrscheinlichkeit von Sprüngen im Lenkbefehl an den Aktuator signifikant reduziert und somit der Fahrkomfort erhöht.

2.4.2. Fahrstreifen- und Objekterkennung zum Fahrstreifen wechseln

Die ursprüngliche Zielsetzung dieses Unterarbeitspaketes war die Auswahl der Sensorik zur Objekterkennung zum Fahrstreifenwechsel sowie die Entwicklung der notwendigen Auswertungssoftware. Nach dem Projektstart wurde die Zielsetzung dahingehend geändert (siehe Kapitel 3.1.2), dass ein bereits im ZF-Konzern vorentwickeltes, passives

Spurwechselassistenzsystem welches die Anforderungen der ISO-Norm 17387 - Lane Change Decision Aid Systems (LCDAS) erfüllt, für HALC verwendet werden sollte. Das System wurde daher zuerst auf Eignung untersucht und schließlich entschieden, dieses in den Versuchsfahrzeugen für das HALC-Projekt zu applizieren.

Das verfügbare LCDA-System besteht aus zwei Radarsensoren auf jeder Seite des Fahrzeugs, die es ermöglichen die Objekte im für den Fahrstreifenwechsel relevanten Bereich zu erfassen. Das System bietet nicht nur eine Objekterkennung auf den Nachbarfahrstreifen, sondern direkt auch die Bestimmung, ob der Fahrstreifenwechsel möglich ist. Daher wurden die Arbeitspakete 4.2 und 7.1 zusammen bearbeitet. Das vorhandene LCDA-System wurde daher sowohl aus der Perspektive der Objekterkennung und als auch aus der Perspektive der Erkennung, ob der Fahrstreifenwechsel möglich ist, analysiert. Beim Abgleich der Anforderungen von HALC mit dem LCDA-System ergab sich das Ergebnis, dass sich das System zur Erfüllung der Anforderungen aus HALC eignet.

Zur Fahrbahnerkennung zum Fahrstreifenwechsel wurde die Frontkamera eingesetzt, aus der auch Informationen zur Existenz der Nachbarfahrstreifen gewonnen werden konnten.

2.4.3. Fusion Umfeldmodell

Das Ziel dieses Unterarbeitspaketes war die Entwicklung des Fusionsmodul für das Umfeldmodell entwickelt. Es sollte die die von den in den Unterarbeitspaketen 4.1 und 4.2 entwickelten Softwaremodulen gelieferten aufbereiteten Sensordaten zu einem konsistenten Umfeldmodell fusionieren.

Aufgrund der Änderung, dass das im Hause ZF vorhandene LCDAS zur Objekterkennung beim Fahrstreifenwechsel genutzt wird, musste die Gewährleistung eines konsistenten Umfeldmodells und den daraus folgenden konsistenten Handlungen in Quer- und Längsführung neu überdacht werden. Die Fusion beim Fahrstreifenwechsel wurde daher auf die Verhaltensebene verschoben.

Die Fusion von erkannten Objekten der Kamera und der Radarsensoren findet auf der Objektebene statt. Hierzu werden zunächst die zueinander passenden erkannten Objekte von Radar und Kamera ermittelt. Im nächsten Schritt werden die von den Sensoren erkannten Eigenschaften unter Berücksichtigung der Stärken und Schwächen der Sensoren fusioniert. In Testfahrten lieferte die Fusion adäquate Ergebnisse, um die darauf aufbauenden HALC-Funktionen zu ermöglichen.

Die Fahrstreifenerkennung wird nur durch die Kamera geleistet. Daher erfolgt keine Verbesserung der erkannten Fahrstreifen durch die Fusion.

2.5. AP 5 – Längsführung

2.5.1. Längsführung 0-89 km/h auf einem Fahrstreifen

Im Unterarbeitspaket wurden die Funktionen zur automatisierten Längsführung auf einem Fahrstreifen entwickelt. Das Ziel war es, dem HALC die automatisierte Längsführung in diesen Use Cases derart zu ermöglichen, dass sich ein komfortables Fahrverhalten für den Fahrer ergibt

Die Herausforderung bestand im Umgang mit der Vielfalt der im ermittelten Use Case Katalog enthaltenen Situationen (z.B. Einscherer, Ausscherer, Stau, etc.) und der Gewährleistung eines natürlichen und sicheren Systemverhaltens in jeder dieser Situationen. Als Regelziele sind das Erreichen der eingestellten Geschwindigkeit, das Einhalten des gewünschten Abstandes zum Vorderfahrzeug, ein sicheres & für den Fahrer komfortables Fahrverhalten sowie die Effiziente Nutzung von Bremse und Retardern zu nennen. Abbildung II-28 zeigt exemplarisch ein Stop & Go Manöver. Das Fahrzeug zeigte hierbei das gewünschte Verhalten bei Annäherung an ein langsames vorausfahrendes Fahrzeug und beschleunigte entsprechend bei erweitertem Abstand zu diesem Fahrzeug.



Abbildung II-28: Stop & Go Manöver

Ein besonderer Fokus im Projektzeitraum lag auf der Optimierung des Verhaltens beim Anhalten in den Stillstand und bei kleinen Geschwindigkeiten (z.B. in Stausituationen). Um ein möglichst sanftes Anhalten in den Stillstand zu erreichen, wurde das Zusammenwirken mit dem Bremssystem beim Übergang in den Stillstand signifikant verbessert.

Durch ein Handshake - Verfahren wird eine optimale Abstimmung zwischen Bremssystem und Regelalgorithmus erreicht. Somit ergibt sich ein sehr komfortables Übergehen von langsamer Bewegung in den Stillstand.

Um ein komfortables Verhalten in Situationen zu erreichen, die sich durch kleine Geschwindigkeiten und geringe Abstände zu vorausfahrenden Fahrzeugen auszeichnen, wurde die Regelung für diese Situationen besonders agil eingestellt. Damit ergibt sich in derartigen Situationen eine schnelle Reaktion auf Änderungen im Verhalten des Vorderfahrzeugs und damit ein geringes Eintauchen unter den avisierten Abstand. Diese Verhaltensoptimierung wurden von verschiedenen Stakeholdern getestet und als sehr komfortabel bewertet.

Die Längsführung auf einem Fahrstreifen wurde auf einer Rapid Prototype Umgebung umgesetzt und im Testfahrzeug erprobt. Dabei wurde das Verhalten in den HALC Use Cases zur Längsführung gezielt optimiert und verschiedene Probleme beseitigt. Zur Einstellung des Verhaltens existieren ca. 500 Parameter, mit denen das Verhalten der Längsführung im Detail eingestellt wird. Diese wurden derart eingestellt, dass sich ein komfortables Fahrverhalten ergibt.

2.5.2. Längsführung zum Fahrstreifen wechseln

Als grundlegende Funktionalität zur Ermöglichung der Fahrstreifenwechsel Use Cases muss es der Längsführungsalgorithmus ermöglichen im Verlauf des Fahrstreifenwechsels das Zielfahrzeug für den Regelalgorithmus sanft umzuschalten. Abbildung II-29 verdeutlicht dies.

Zunächst (Schritt 1) befindet sich das Eigenfahrzeug auf dem Startfahrstreifen, als Zielfahrzeug für den Regelalgorithmus wird das Vorderfahrzeug auf dem Startfahrstreifen genutzt. Im 2. Schritt beginnt das Eigenfahrzeug den Fahrstreifenwechsel auszuführen. Da es sich noch vollständig auf dem Startfahrstreifen befindet, wird weiterhin das Vorderfahrzeug auf dem Startfahrstreifen als Zielfahrzeug genutzt. In Schritt 3 hat die Mitte des Eigenfahrzeuges die Fahrstreifenmarkierung überschritten. Daher wird jetzt das Vorderfahrzeug auf dem Zielfahrstreifen als Zielfahrzeug genutzt. Bei dieser Umschaltung des Zielfahrzeugs wird besonders darauf geachtet, dass es keine Sprünge im Beschleunigungsverlauf gibt und sich das Fahrverhalten für den Fahrer des Eigenfahrzeuges komfortabel und sanft anfühlt. In Schritt 4 ist der Fahrstreifenwechsel vollständig abgeschlossen, als Zielfahrzeug für den Regelalgorithmus wird weiterhin das Vorderfahrzeug auf dem Zielfahrstreifen verwendet.

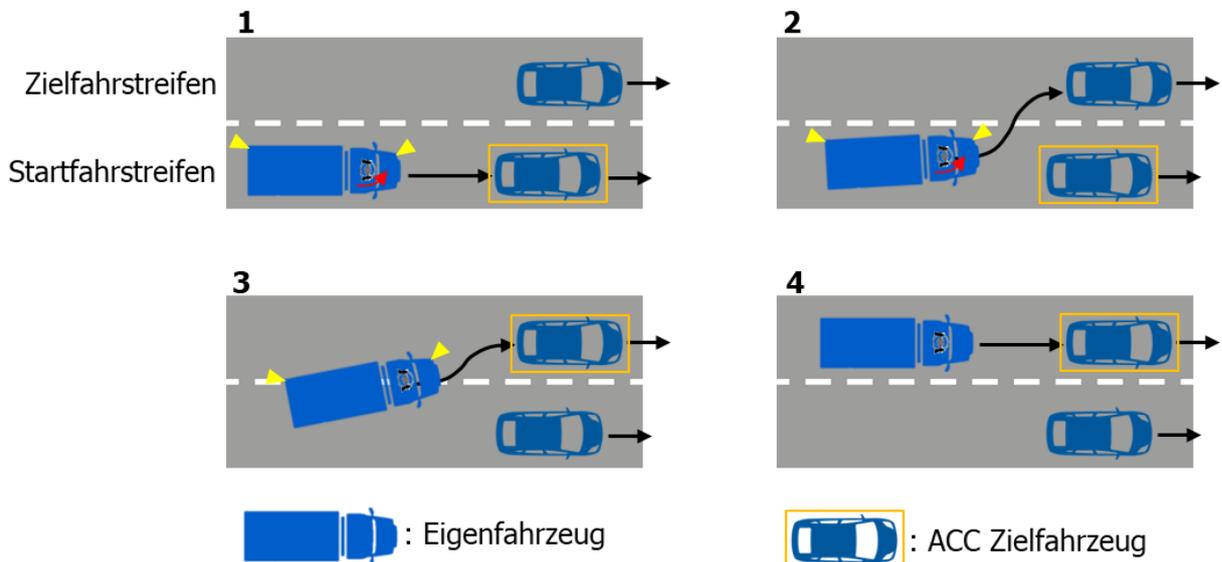


Abbildung II-29: Zielfahrzeugumschaltung für den Längsregelalgorithmus während des Fahrstreifenwechsels

Das beschriebene Verfahren wurde implementiert und parametrierung, so dass sich ein angenehmes Fahrverhalten ergab

2.5.3. Längsführungsfunktionalitäten zur koordinierten Längs- und Querführung

Um ein für den Fahrer konsistentes und komfortables Verhalten des HALC-Systems zu realisieren, ist die Koordination der Längs- und Querführung von großer Bedeutung. In diesem Unterarbeitspaket wurde die Integration der Längs- und Querführung aus der Perspektive der Längsführung bearbeitet.

Der Ansatz zur Erreichung eines konsistenten und komfortablen Fahrverhaltens in diesem Kontext ist es bei der Entwicklung der Längsführungsalgorithmen fortwährend zu berücksichtigen, dass es im System noch eine andere Entität gibt, die einen Einfluss auf die zukünftige Trajektorie des Eigenfahrzeuges hat. Für die Längsführung ist dies insbesondere relevant bei der Auswahl des richtigen Zielfahrzeugs vor dem Eigenfahrzeug für die Regelung. Eine falsche Auswahl des Zielfahrzeugs führt zu einem für den Fahrer unangenehmen und nicht nachvollziehbaren Fahrverhalten. Beispiele dafür sind der Wechsel des Zielfahrzeugs beim Fahrstreifenwechsel (siehe Kapitel 0) sowie die richtige Auswahl des Zielfahrzeugs bei Kurvenfahrt.

Für die allgemeine Koordination wurden darüber hinaus Schnittstellen implementiert, die es erlauben die Längsführungsfunktionalitäten an die übergeordnete Gesamtkoordination der Längs- und Querführung anzuschließen. Somit konnte die Längsführung optimal in das Gesamtsystem eingepasst werden (siehe Kapitel 2.8.1).

2.5.4. Safety Konzept Längsführung und Umsetzung

Der Kern des Sicherheitskonzeptes ist die Begrenzung der maximalen Bremsbeschleunigung, die durch die automatisierte Längsführung induziert werden kann. Der Hintergrund ist hier die Gewährleistung, dass im Falle einer falschen Bremsung garantiert werden soll, dass der nachfolgende Verkehr rechtzeitig abbremst und somit keine Kollision stattfindet. Aufgrund dieser Überlegungen ist zunächst eine maximale Bremsbeschleunigung von -3 m/s^2 vorgesehen worden, um die Auswirkung einer unbegründeten Bremsung zu minimieren.

Im Projektzeitraum wurde weiter an der Überarbeitung des Sicherheitskonzeptes zur Erreichung einer maximalen Bremsbeschleunigung für Stop & Go Szenarien gearbeitet. Ziel war es die maximalen Bremsbeschleunigung zu erhöhen, um einen größeren Szenarioumfang abdecken zu können.

Der Ausgangspunkt war die Überlegung, dass wenn die Objekterkennung einen höheren Sicherheitsintegritätslevel erreichen kann, auch eine höhere Bremsbeschleunigung induziert werden kann, da die Wahrscheinlichkeit einer Fehlbremmung stark abnimmt.

Der Sicherheitsintegritätslevel der von Kamera erkannten Objekte vor dem Eigenfahrzeug ist nicht ausreichend hoch. Im initialen Fusionsansatz zur Fusion der vom Radar erkannten Objekte mit denen der Kamera ergab sich als gemeinsamer Sicherheitsintegritätslevel derjenige der Kamera. Der Radar selbst bietet einen höheren Sicherheitsintegritätslevel.

Um dieses Problem zu beheben, wurde im Projektzeitraum ein „Dynamic Scene Interpretation“ Block für die Fusion entwickelt. In diesem Block werden die Objektdaten von Kamera und Radar, die Daten des Eigenfahrzeugzustandes und Daten der Fahrstreifenerkennung verwendet, um zu entscheiden, ob ein von der Kamera erkanntes Objekt vom Radar bestätigt wurde. In diesem Fall kann eine höhere Bremsbeschleunigung von -5 m/s^2 zugelassen werden. Dadurch wurde erreicht, dass die Systemgrenzen erweitert werden und somit ein größerer Szenarioumfang im Bereich der Stopp & Go Szenarien abgedeckt werden kann.

2.6. AP 6 – Querführung

2.6.1. Querführung zum Fahrstreifen folgen

Im Unterarbeitspaket wurden die Funktionen zur automatisierten Querführung auf einem Fahrstreifen auf der Autobahn entwickelt. Das Hauptziel war es dabei, dass sich ein komfortables Fahrverhalten für den Fahrer ergibt.



Abbildung II-30: Querführung auf einem Fahrstreifen

Der folgende Regelansatz wurde dazu gewählt:

Basierend auf den erkannten Fahrstreifenmarkierungen wird zunächst die Mitte des Fahrstreifens als Regelziel bestimmt. Im Anschluss wird die voraussichtliche Abweichung der Mitte des Eigenfahrzeuges von der Fahrstreifenmitte an einem Vorausschaupunkt vor dem Fahrzeug ermittelt. Der Solllenkwinkel berechnet sich daraufhin auf der Grundlage dieser Abweichung, mit dem Ziel dieselbe zu eliminieren. Zur Umsetzung des Solllenkwinkels wird auf das Lenkrad in Abhängigkeit der Abweichung von Soll- und Ist-Lenkwinkel ein Drehmoment eingespielt. Durch dieses Drehmoment wird eine Bewegung des Lenkrades in Richtung des Solllenkwinkels bewirkt.

Im Verlaufe der Entwicklung der Querführung wurden einige Aspekte besonders betrachtet. Auf diese wird im Folgenden eingegangen.

In Kapitel 2.4.1 wurde die „Single Line Support“ Funktion als Teil der Umfelderkennung zum Umgang mit fehlenden oder unterbrochenen Linien beschrieben. Da die Funktion darauf abzielt die Querregelung in derartigen Situationen weiter aufrecht zu erhalten, wurde sie im Verbund mit dem Querregelungsalgorithmus getestet und parametrisiert. Dabei konnte eine erfolgreiche und komfortable Funktion der Querregelung in den avisierten Szenarien mit einer fehlenden Fahrstreifenmarkierung erreicht werden.

Ein weiterer Fokus war die Gewährleistung der Robustheit der Querführungsregelfunktion. Es wurde die Parametrierung derartig ausgearbeitet, so dass eine gute Performance der Regelung im relevanten Geschwindigkeitsbereich erreicht wird. Zur weiteren Erhöhung der Robustheit wurde die Regelung in verschiedenen Versuchsfahrzeugen integriert, um durch die so erlangten Erkenntnisse die Robustheit weiter zu steigern.

Ein weiterer Themenbereich war die Gestaltung des Zusammenwirkens der kontinuierlichen Querregelung mit dem parallel auf die Lenkung einwirkenden Lane Keep Assist (LKA). Dieser greift in die Lenkung ein, falls das Fahrzeug den eigenen Fahrstreifen zu verlassen droht. Im Fall des aktiven HALC kann dies vorkommen, wenn der Fahrer seiner Aufgabe des Mitlenkens nicht nachkommt und das Fahrzeug gleichzeitig in eine enge Kurve einfährt. Der LKA kann in diesem Fall eingreifen und ein Verlassen des Fahrstreifens verhindern. Die Herausforderungen sind hier, dass

Zusammenwirken konsistent zu gestalten und die Lenkanforderungen beider Systeme derart zusammenzuführen, dass der Aktuator innerhalb der durch seine Spezifikation gegebenen Grenzen betrieben wird und sich ein komfortabler Fahrindruck ergibt. Hierzu konnte eine adäquate Lösung entwickelt werden.

Die Tests der Querführung zum Fahrstreifen folgen wurden mit Sattelzugmaschinen ohne Anhänger, mit nicht beladenem Anhänger und mit einem voll beladenen Anhänger durchgeführt. Diese Tests dienten neben der Parametrierung des Reglers auch dazu das maximale notwendige Drehmoment zu bestimmen, das zur Realisierung der relevanten Szenarien auf das Lenkrad aufgebracht werden muss. Die Begrenzung des Drehmoments auf einen für den Fahrer zu jeder Zeit übersteuerbaren Wert ist der Kernpunkt des Sicherheitskonzepts. Daher legt das Sicherheitskonzept 10 Nm als absoluten Maximalwert fest.

Bei den Tests stellte sich heraus, dass es mit Sattelzugmaschinen ohne Anhänger und mit nicht beladenem Anhänger mit einer eingestellten Drehmomentbegrenzung von 5 Nm für den HALC möglich war, ausreichend Drehmoment auf das Lenkrad aufzubringen, um die avisierten Use Cases umzusetzen. Mit einer Drehmomentbegrenzung von 5 Nm war es allerdings für die Regelung nicht möglich einen LKW mit einem voll beladenen Anhänger in engen Kurven in der Mitte des Fahrstreifens zu halten. Daher wurde der Drehmomentbegrenzer auf die im Sicherheitskonzept als Maximalwert definierten 10 Nm eingestellt. Mit dieser Einstellung kann der HALC sämtliche relevante Use Cases mit jeglichen Beladungszuständen umsetzen und zugleich ist die Übersteuerbarkeit durch den Fahrer fortwährend gegeben.

2.6.2. Querführung zum Fahrstreifen wechseln

Für die Querführung zum Fahrstreifen wechseln wurde im Projekt zunächst ein Algorithmus erarbeitet, der in der Simulation und im Fahrzeug umgesetzt wurde.

Der Algorithmus basiert auf der Manipulation der Sollquerposition des Eigenfahrzeuges im Fahrstreifen. Diese wird derart verändert, dass sich ein sanfter Fahrstreifenwechsel ergibt. Um einen Übergang sowohl auf geraden als auch auf gekrümmten Fahrbahnabschnitten zu ermöglichen wurde für die Planung des Fahrstreifenwechsels ein sogenanntes krummliniges Koordinatensystem gewählt, wie es in Abbildung II-31 dargestellt ist. Im Gegensatz zu einem kartesischen Koordinatensystem wird die s-Achse entlang der gekrümmten Fahrbahnmitte gewählt und die d-Achse als Lateralabstand zur Fahrbahnmitte. Dies führt dazu, dass die Planung des Fahrstreifenwechsels in dem krummlinigen Koordinatensystem unabhängig vom Fahrbahnverlauf wird.

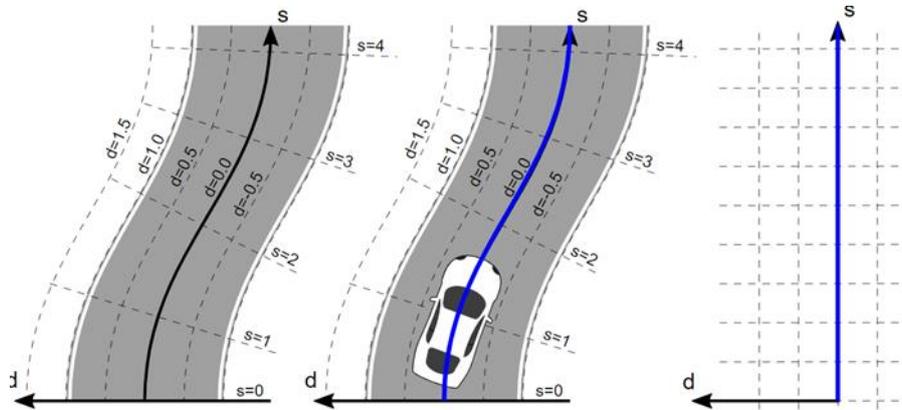


Abbildung II-31: Veranschaulichung Krummliniges Koordinatensystem (Quelle <https://fjp.at/posts/optimal-frenet/>)

Für den Übergang zwischen Start- und Zielfahrstreifen kommt ein Polynom 5. Ordnung zum Einsatz, welches wie nachfolgend beschrieben ist:

$$d(s) = \Delta d \left(10 \left(\frac{s}{\Delta s} \right)^3 - 15 \left(\frac{s}{\Delta s} \right)^4 + 6 \left(\frac{s}{\Delta s} \right)^5 \right).$$

Dabei bezeichnet Δd den Versatz zwischen der Start- und Zielfahrstreifenmitte in Metern und Δs die Strecke entlang der Fahrbahnmitte in Metern, welche während des Fahrstreifenwechsels zurückgelegt wird. Die Polynomordnung und -koeffizienten ergeben sich dabei aus den insgesamt 6 Randbedingungen für Lateralabstand, Kurswinkel und Krümmung jeweils am Anfang und am Ende des Fahrstreifenwechsels.

Sowohl für die Sicherheit als auch für den Komfort eines Fahrstreifenwechsels ist die Berücksichtigung einer Limitierung für die Lateralbeschleunigung ein entscheidender Faktor. Da der Lateralversatz Δd in dem Fahrstreifenwechsel-Polynom durch den Fahrstreifenabstand vorgegeben ist, ist die einzige verbleibende Einflussgröße auf die Lateralbeschleunigung des Fahrzeugs über die Länge des Fahrstreifenwechsels Δs gegeben. Eine Extremwert-Betrachtung in Bezug auf das Fahrstreifenwechsel -Polynom ergibt den folgenden Zusammenhang zwischen der maximalen Lateralbeschleunigung $a_{d,max}$, dem Fahrstreifenmittenabstand Δd , der Geschwindigkeit v und der Länge des Fahrstreifenwechsels gemäß

$$\Delta s = v \sqrt{\frac{|\Delta d|}{a_{d,max}} 5.7735}$$

Eine weitere Herausforderung ergibt sich beim Übertreten der Fahrstreifenmarkierung: In diesem Moment wird der Fahrstreifen, auf dem sich das Eigenfahrzeug befindet vom Startfahrstreifen auf den Zielfahrstreifen umgeschaltet. Damit geht ein Sprung im Verlauf der Messgrößen einher. Um einen sanften Verlauf bei Übertreten der Fahrstreifenmarkierung zu gewährleisten, wird in diesem Moment ein Offset zur Sollquerposition addiert werden, der diesen Sprung ausgleicht. Ist das Eigenfahrzeug auf dem Zielfahrstreifen positioniert, ist der Fahrstreifenwechsel abgeschlossen und die Manipulation der Sollquerposition beendet.

Der Algorithmus wurde zunächst in der Simulation implementiert und evaluiert. Für die Modellierung des Fahrzeugs wurde dabei ein kinematisches Einspurmodell verwendet, welches um ein Lenkungsmodell erweitert wurde. Die Liniendaten der Kamera werden in der

Simulationsumgebung entsprechend der Fahrzeugposition, Einbauposition der Kamera und des Umgebungsmodells zur Verfügung gestellt.

Nachfolgend sollen diese Ergebnisse in der Simulation exemplarisch diskutiert werden. Abbildung II-32, Abbildung II-33 und Abbildung II-34 zeigen die Simulationsergebnisse eines Fahrstreifenwechsels auf gerader Strecke. In Abbildung II-32 ist dabei eine 3-streifige Straße zu erkennen, deren Fahrstreifenmitten durch grün gestrichelte Linien und deren Fahrbahnbegrenzungen durch blaue Linien dargestellt werden. Das Fahrzeug ist mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h unterwegs und die eingezeichnete Truck/Trailer-Kombination zeigt die Position, an welcher der Fahrer den Fahrstreifenwechsel initiiert hat. Es ist zu erkennen, dass der Planungsalgorithmus eine sanfte Übergangsbahn zwischen dem mittleren und dem linken Fahrstreifen plant. Des Weiteren ist zu erkennen, dass der nachgelagerte Querregler es schafft der geplanten Bahn gut zu folgen. Im Detail ist dies auch nochmal in Abbildung II-33 im krummlinigen Koordinatensystem dargestellt. Die maximale Lateralbeschleunigung wurde für den Fahrstreifenwechsel auf 0,5 m/s² begrenzt, woraus sich eine Länge von ca. 150m für den Fahrstreifenwechsel ergibt. Dass dieser Wert eingehalten wird, zeigt Abbildung II-34, welche den Verlauf der Querbeschleunigung während des Fahrstreifenwechsels zeigt.

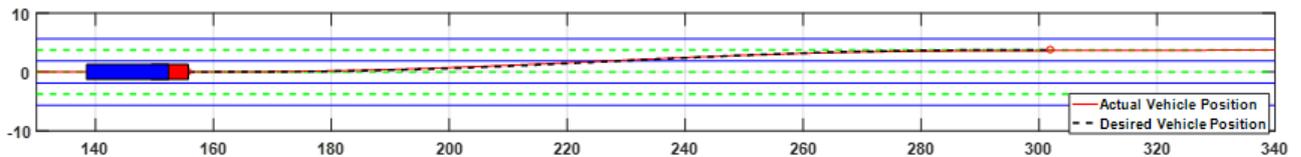


Abbildung II-32: Fahrstreifenwechsel auf Gerade

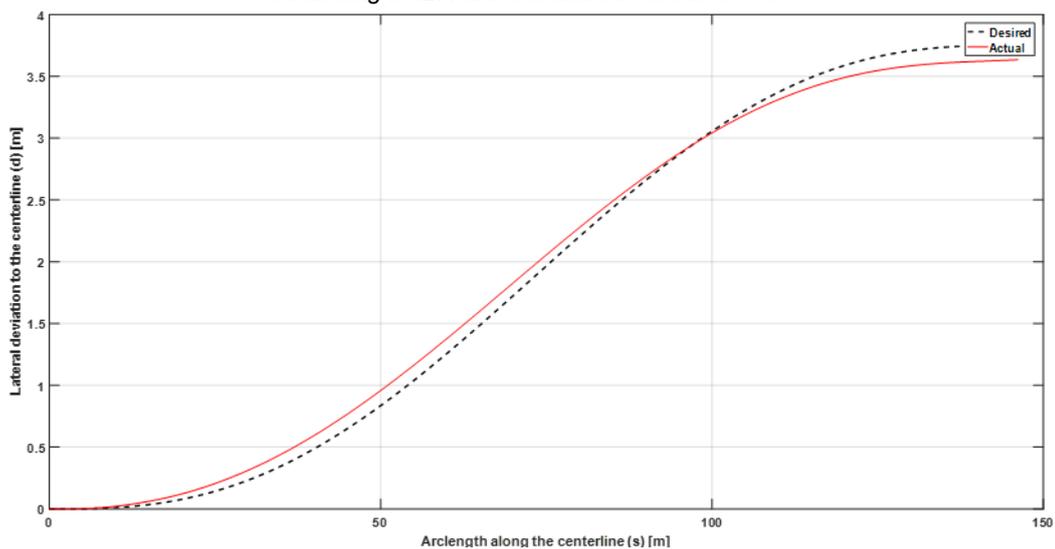


Abbildung II-33: Fahrstreifenwechsel Gerade, Krummliniges Koordinatensystem

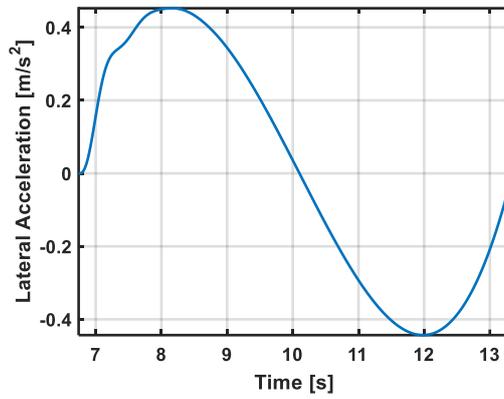


Abbildung II-34: Querbeschleunigung Fahrstreifenwechsel Gerade

Abbildung II-35 und Abbildung II-36 zeigen die Simulationsergebnisse eines Fahrstreifenwechsels im Kurvenbereich. Dabei gelten in Abbildung II-35 die gleichen Konventionen für die Fahrbahnmarkierung etc. wie zuvor für Abbildung II-32 beschrieben. Auch hier ist zu erkennen, dass sowohl der Planungs- als auch der nachgelagerte Regelalgorithmus den Fahrstreifenwechsel erfolgreich abbilden können. Abbildung II-36 zeigt dies nochmals im Detail für das krummlinige Koordinatensystem. Dabei ist zu bemerken, dass Abbildung II-33 und Abbildung II-36 sich aufgrund des krummlinigen Koordinatensystems kaum unterscheiden, was auch das Ziel der Planung in diesem Koordinatensystem war.

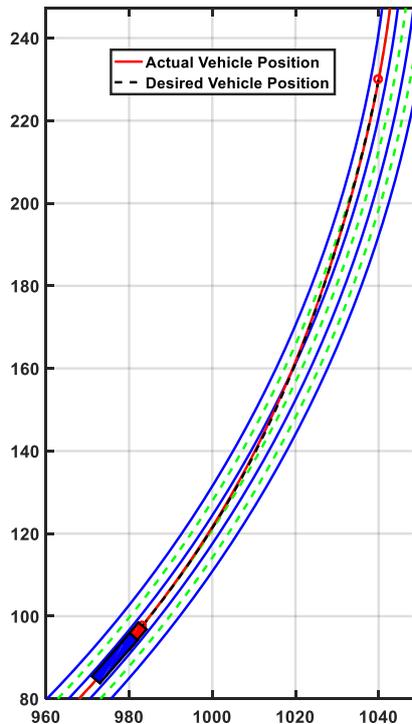


Abbildung II-35: Fahrstreifenwechsel Kurve

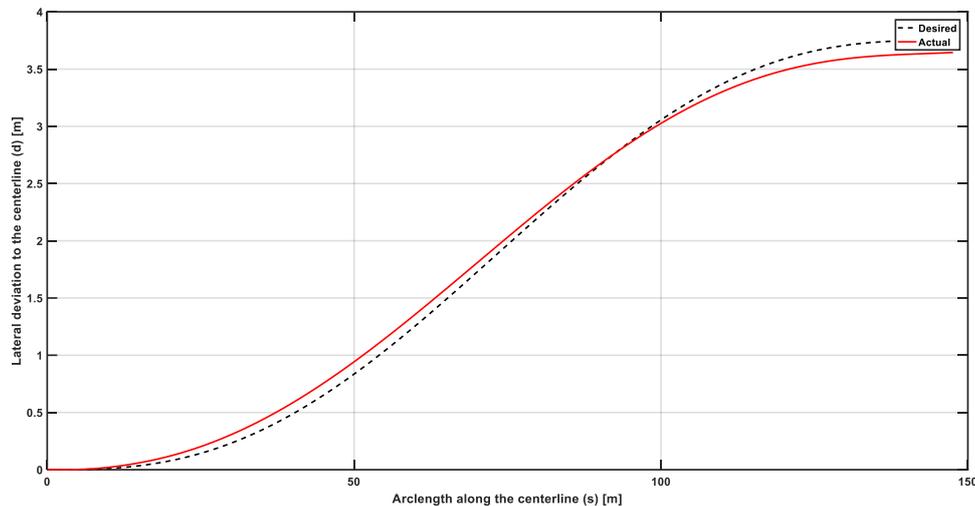


Abbildung II-36: Fahrstreifenwechsel Kurve, Krummliniges Koordinatensystem

In beiden Simulationen wurde der Sprung in den Kameradaten bei Überschreitung der Fahrstreifenmarkierungen berücksichtigt. Anhand des Verlaufs der Querbeschleunigung und auch anhand der sich ergebenden Lenkungsanforderungen konnte gezeigt werden, dass die Zuschaltung eines geeigneten Offsets zum Zeitpunkt des Fahrstreifenwechsels einen stetigen Verlauf der Regel- und Stellgrößen ermöglicht.

Das vorgestellte Verfahren zum Fahrstreifenwechsel wurde nach der Erprobung in der Simulation in einem Versuchsfahrzeug implementiert. Dazu wurde eine geeignete MicroAutoBox III Umgebung aufgesetzt, welche es erlaubt die entsprechenden Algorithmen zur Längs- und Querführung, sowie zum Fahrstreifenwechsel in die bestehende Fahrzeugarchitektur des Fahrzeugs zu integrieren. Eine Erprobung des automatisierten Fahrstreifenwechsels wurde erfolgreich auf der ZF-Teststrecke in Jeversen durchgeführt. Die Ergebnisse sind exemplarisch für zwei Fahrstreifenwechsel auf gerader Strecke in Abbildung II-37 gezeigt. In der Abbildung werden die Fahrstreifenmarkierungen für die Ego-Fahrstreifen, der Lenkradwinkel und die Blinkerbetätigung des Fahrers gezeigt. Es ist zu erkennen, dass bei entsprechender Blinkerbetätigung des Fahrers der Algorithmus zum Fahrstreifenwechsel eine geeignete Lenkbewegung initiiert, um den Fahrer auf den angeforderten Nachbarfahrstreifen zu führen. Die entsprechenden Sprünge in den Fahrstreifenmarkierungen von der Kamera bei etwa der Hälfte der Fahrstreifenwechseldauer sind darauf zurückzuführen, dass die Kamera die Fahrstreifenmarkierungen in einem Kamerakoordinatensystem bereitstellt und somit der vorherige linke oder rechte Nachbarfahrstreifen beim Überfahren der Fahrstreifenmarkierung zum neuen Ego-Fahrstreifen wird. Insgesamt kann festgehalten werden, dass der Algorithmus zum Fahrstreifenwechsel erfolgreich im Fahrzeug getestet wurde und dieser dabei ein gleichwertiges Verhalten wie in den zuvor durchgeführten Simulationstests aufweist.

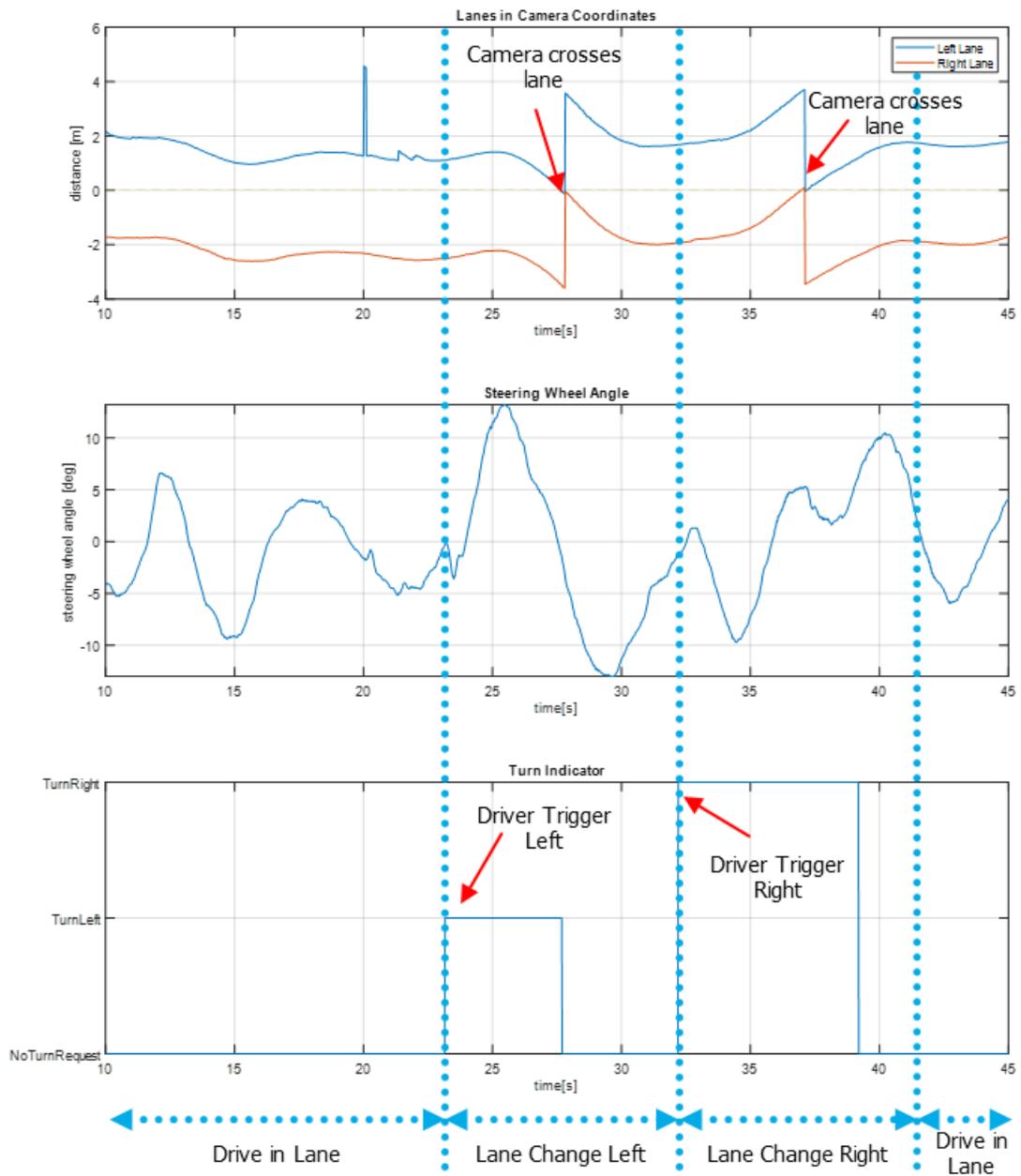


Abbildung II-37: Erprobung Fahrstreifenwechsel auf Teststrecke

2.6.3. Querführungsfunktionalitäten zur koordinierten Längs- und Querführung

Für die Koordination zwischen Längs- und Querführung während des Fahrstreifenwechsels wurde wie in Kapitel 2.6.2 beschrieben eine Limitierung der Querbeschleunigung eingeführt. Dabei gibt der Längsregler die Geschwindigkeit vor und der Querregler passt sich gemäß der Querbeschleunigungslimits bei der Länge des Fahrstreifenwechsels darauf an. Somit wird jederzeit ein sicherer und komfortabler Fahrstreifenwechsel sichergestellt. Die Koordinierung der Längs- und Querführung beim Fahrstreifenwechsel wurde in der in Kapitel 2.6.2 beschriebenen Testkampagne ebenfalls erfolgreich getestet.

Für die allgemeine Koordination wurden Schnittstellen implementiert, die es erlauben die Querführungsfunktionalitäten an die übergeordnete Gesamtkoordination der Längs- und Querführung anzuschließen. Somit konnte die Querführung optimal in das Gesamtsystem eingepasst werden (siehe Kapitel 2.8.1 und 0).

2.6.4. Safety Konzept Querführung und Umsetzung

Der Kern des Konzeptes ist die ständige Gewährleistung der Übersteuerbarkeit der Lenkeingriffe durch den Fahrer. Dazu wird das Drehmoment, das durch das HALC-System auf das Lenkrad aufgebracht wird, so begrenzt, dass es sicher vom Fahrer zu übersteuern ist. Zur Ermittlung von Grenzwerten wurden auf der Testbahn Testfahrten durchgeführt, in denen ein Fahrer einen plötzlichen Lenkeingriff beherrschen musste. Aus den Ergebnissen dieser Testfahrten wurden 10 Nm als absoluten Maximalwert zur Einstellung der Drehmomentbegrenzung festgelegt. Die sichere Umsetzung der Drehmomentbegrenzung erfolgt durch den Lenkaktuator.

Aufgrund der Einbeziehung des durch den Projektpartner DLR gelieferten Fahrermodells konnte auch die Fahrerbereitschaft einbezogen werden, womit die Gewährleistung der Erfüllung der Rolle des Fahrers nach SAE Automatisierungsgrad 2 erfolgen kann. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass der Fahrer stetig die ihm zugeteilte Überwachungsaufgabe erfüllt.

2.7. AP 7 – Fahrstreifenwechsel

2.7.1. Erkennung Fahrstreifenwechsellmöglichkeit

Aufgrund der Nutzung des im Hause ZF vorhandenen LCDA-Systems wurden die Arbeitspakete 4.2 (siehe Kapitel 2.4.2) und 7.1 zusammen bearbeitet. Das vorhandene LCDA-System wurde daher sowohl aus der Perspektive der Objekterkennung und als auch aus der Perspektive der Erkennung, ob der Fahrstreifenwechsel möglich ist, analysiert. Beim Abgleich der Anforderungen von HALC mit dem LCDA-System ergab sich, dass sich das System zur Erfüllung der Anforderungen aus HALC eignet. Daher wurde es für die Erkennung der Möglichkeit eines Fahrstreifenwechsels durch Analyse der Verkehrssituation auf den Nachbarfahrstreifen ausgewählt.

Im Projekt wurde eine Anbindung der Ablaufsteuerung für den Fahrstreifenwechsel (AP 7.2, siehe Kapitel 2.7.2) an das vorhandene LCDA-System entwickelt. Die vom LCDA-System ausgegebenen Daten hinsichtlich der Belegung des Zielfahrstreifens werden von der Ablaufsteuerung verwendet. Sie dienen dort als eine Bedingung für den Beginn des automatisierten Fahrstreifenwechsels.

In Tests konnte die Eignung des LCDA-Systems zur Erfüllung der HALC-Anforderungen bestätigt werden.

2.7.2. Ablaufsteuerung Fahrstreifenwechsel

Das Unterarbeitspaket hatte die Entwicklung eines Softwaremoduls zum Ziel, das für die Steuerung des Ablaufs des automatisierten Fahrstreifenwechsels verantwortlich ist und die dafür benötigten weiteren Funktionsmodule koordiniert. Dies umfasst sowohl die Vorbereitungsphase als auch die Durchführungsphase des Fahrstreifenwechsels.

Der Ablauf beim Fahrstreifenwechsel wurde in HALC folgendermaßen definiert:

1. Der Fahrer triggert den automatischen Fahrstreifenwechsel durch Betätigen des Blinkers und leichtes Einlenken in Richtung des Zielfahrstreifens an.
2. Das HALC-System prüft gleichzeitig, ob der Manöverraum auf dem Zielfahrstreifen frei ist und ob der Fahrer bereit für den Fahrstreifenwechsel ist.
3. a) Wenn ja: Das HALC-System führt den Fahrstreifenwechsel aus.
b) Wenn nein: Das HALC-System informiert den Fahrer, dass der Fahrstreifenwechsel nicht möglich ist und verbleibt im aktuellen Fahrstreifen.

Die Prüfung in Schritt 2, ob der Manöverraum auf dem Zielfahrstreifen frei ist, wird durch das vorhandene LCDA-System durchgeführt. Dieses liefert direkte Informationen, ob der Manöverraum frei ist. Die Prüfung der Fahrerbereitschaft erfolgt durch das vom DLR im Projekt entwickelte Fahrermodell. Dazu wurde das Fahrermodell an die Ablaufsteuerung angebunden.

Das Konzept zur Steuerung des Ablaufs ist in einen Zustandsautomaten überführt worden, welcher in Abbildung II-38 gezeigt wird. Der Fahrstreifenwechsel ist dabei nur möglich, wenn sich der HALC in dem aktiven Zustand befindet und somit eine geeignete Koordination zwischen Längs- und Querführung sichergestellt ist. Andernfalls ist die Fahrstreifenwechselfunktionalität ausgeschaltet.

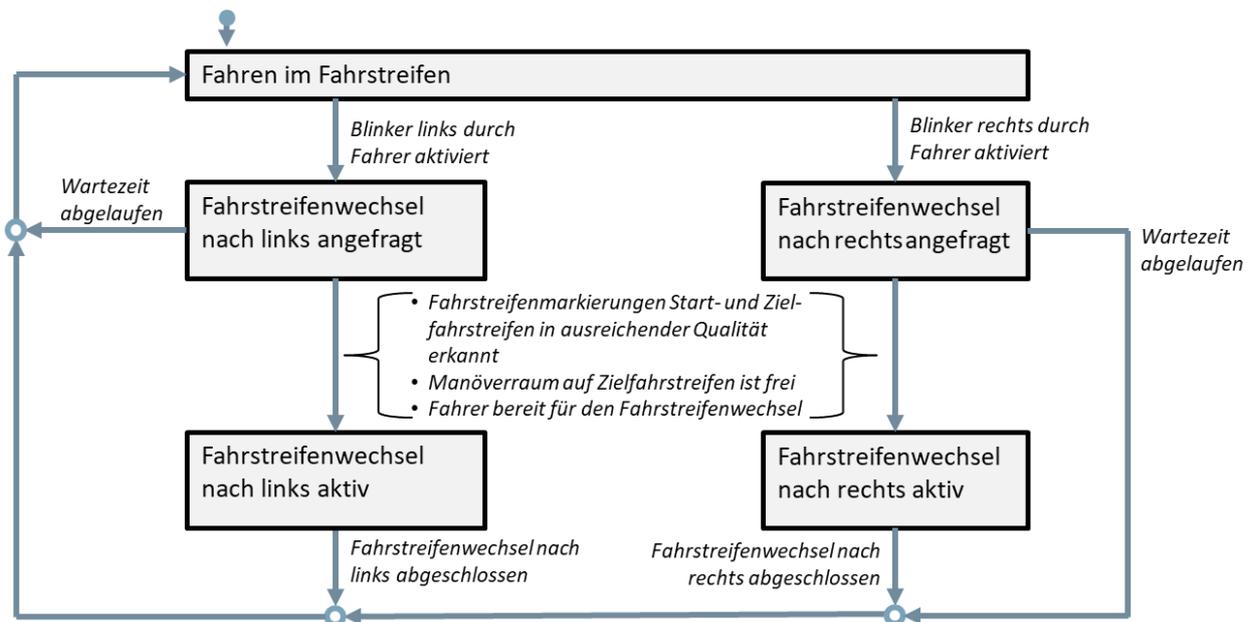


Abbildung II-38:: Ablaufsteuerung Fahrstreifenwechsel

Die folgende Tabelle erläutert die Zustände im Detail:

Zustand	Beschreibung
Fahren im Fahrstreifen	Die Fahrstreifenwechselfunktion hat einen validen Eigenfahrstreifen erkannt und ist prinzipiell bereit auf Anfragen des Fahrers für einen Fahrstreifenwechsel zu reagieren.
Fahrstreifenwechsel nach links angefragt	Der Fahrer hat durch Betätigung des Blinkers einen Fahrstreifenwechsel nach links angefragt.
Fahrstreifenwechsel nach rechts angefragt	Der Fahrer hat durch Betätigung des Blinkers einen Fahrstreifenwechsel nach rechts angefragt.
Fahrstreifenwechsel nach links aktiv	Die Fahrstreifenwechselfunktion führt einen Fahrstreifenwechsel auf den linken Nachbarfahrstreifen aus.
Fahrstreifenwechsel nach rechts aktiv	Die Fahrstreifenwechselfunktion führt einen Fahrstreifenwechsel auf den rechten Nachbarfahrstreifen aus.

Tabelle II-5: Zustandsbeschreibung HALC

Die Ablaufsteuerung für den Fahrstreifenwechsel wurde in das ZF-Versuchsfahrzeug integriert und erfolgreich auf der Teststrecke getestet. Die Ergebnisse einer Testfahrt werden in diesem Bericht in Kapitel 2.6.2 vorgestellt.

2.7.3. Safety Konzept Fahrstreifenwechsel und Umsetzung

Der Kern des Sicherheitskonzeptes für den Fahrstreifenwechsel ist der im vorherigen Abschnitt beschriebene Ablauf. Da davon auszugehen ist, dass die Ermittlung des LCDA-Systems, ob sich keine Fahrzeuge im kritischen Abstand auf dem Zielfahrstreifen befinden, fehleranfällig ist, ist der Fahrer zu jeder Zeit derjenige, der die automatisierte Ausführung des Fahrstreifenwechsel startet und ggf. vorzeitig beendet. Der Fahrer hat dazu jederzeit die volle Verantwortung und Kontrolle (siehe auch Definition von SAE Automatisierungsgrad 2, dem für HALC gewählten

Automatisierungsgrad). Dazu ist zu gewährleisten, dass er aufmerksam ist. Daher wurde die entsprechende Prüfung in die Ablaufsteuerung implementiert.

2.8. AP 8 – Integration Fahrer und Funktion

2.8.1. Koordination Längs- und Querführung

Zur Koordination der Längs- und Querführungsfunktionen wurde der Highway Assist State Manager entwickelt. Dieser Zustandsautomat sorgt einerseits für die einheitliche Interaktion des Fahrers mit dem System und andererseits für ein konsistentes Systemverhalten in sämtlichen möglichen Systemzuständen.

Übergeordnet gibt es die in der folgenden Abbildung II-39 gezeigten Zustände:

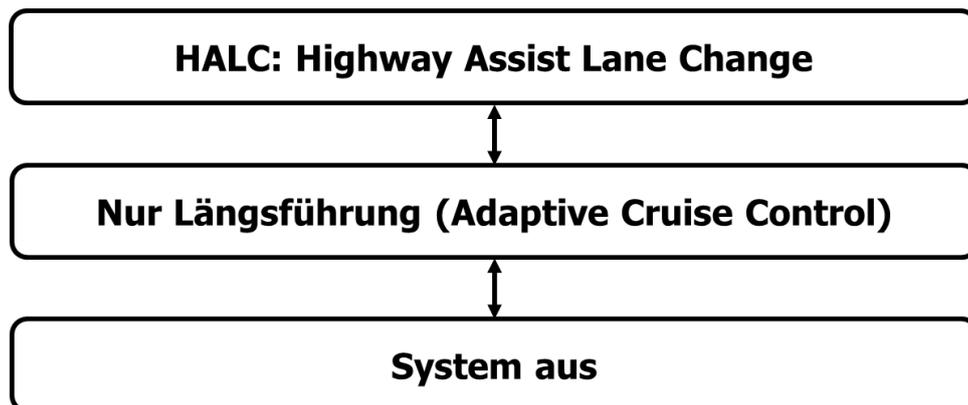


Abbildung II-39: Übersicht der übergeordneten HALC-Systemzustände

Die einzelnen übergeordneten Systemzustände sind wie folgt definiert:

- HALC:
Der Highway Assist Lane Change ist eingeschaltet: Die automatisierte Längsführung wird ausgeführt, die automatisierte Querführung ist eingeschaltet.
- Nur Längsführung (Adaptive Cruise Control):
In diesem Zustand wird nur die automatisierte Längsführung ausgeführt. Der Funktionsumfang ist damit mit dem bekannten Adaptive Cruise Control System (ACC, Abstandsregeltempomat) gleichzusetzen.
- System aus:
Das System ist ausgeschaltet. Es werden keine automatisierten Fahrfunktionen ausgeführt. Die übrigen im Fahrzeug verfügbaren Assistenzsysteme (z.B. AEBS, LDWS) sind unabhängig von diesem Zustand und verfügen über einen eigenen separaten Systemzustand.

Auf der Basis der übergeordneten Systemzustände wurde der detaillierte Zustandsautomat für HALC entwickelt (siehe Abbildung II-40).

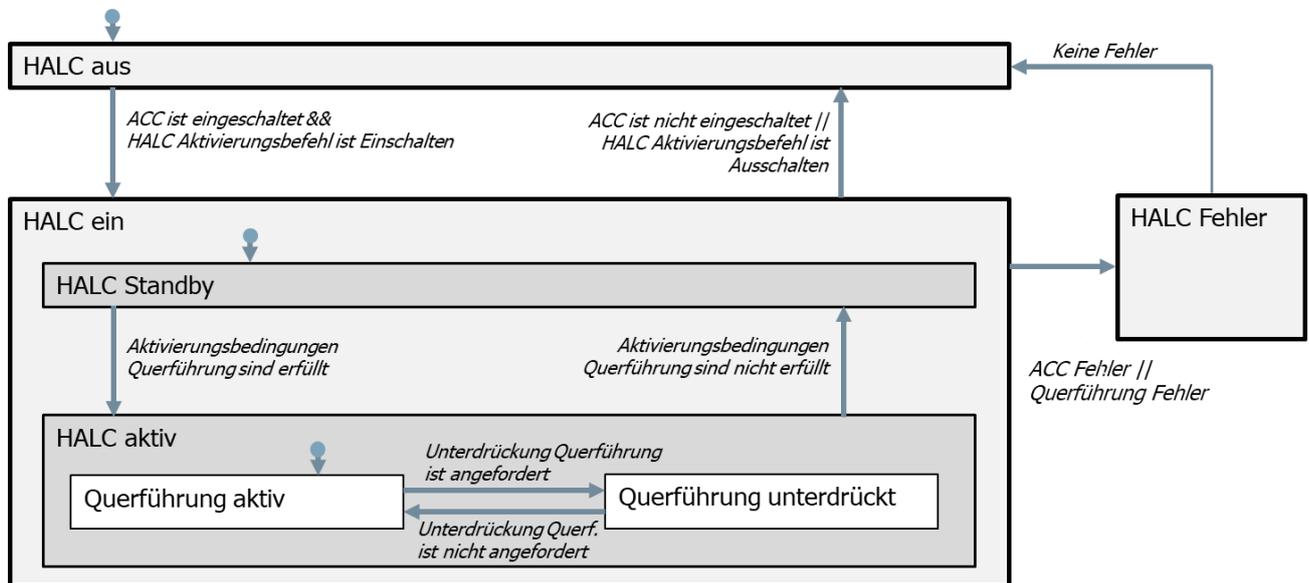


Abbildung II-40: Koordination Längs- und Querführung

Die Systemzustände werden in der folgenden Tabelle beschrieben:

Zustand	Beschreibung
HALC aus	Der Highway Assist ist ausgeschaltet.
HALC ein - Standby	Der Highway Assist wurde aktiviert. Die Aktivierung kann nur erfolgen, wenn das ACC (automatisierte Längsführung) zuvor eingeschaltet wurde (siehe Transitionsbedingung in Abbildung II-38). Es wird versucht die Querführung zu aktivieren. Da die Querführung nicht aktiviert werden konnte, verbleibt der Highway Assist im Standby. Dies ist z.B. der Fall, wenn Fahrstreifenmarkierungen nicht vorliegen oder das Fahrzeug nicht im entsprechenden Geschwindigkeitsbereich unterwegs ist. Die automatisierte Längsführung ist aktiv.
HALC ein – aktiv	Der Highway Assist ist aktiv. Die automatisierte Längsführung wird ausgeführt, die automatisierte Querführung ist eingeschaltet, da die Aktivierungsbedingungen für die Querführung erfüllt sind (z.B. Fahrstreifenmarkierungen sind vorhanden). Im Unterzustand Querführung aktiv wird die Querführung automatisiert ausgeführt. Im Unterzustand Querführung unterdrückt wird die automatisierte Querführung unterdrückt. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn der Fahrer ein hohes Drehmoment auf das Lenkrad aufgebracht hat.
HALC Fehler	Ein Fehler im Highway Assist liegt vor. Die Funktion ist abgeschaltet.

Tabelle II-6: Beschreibung der detaillierten HALC-Systemzustände

2.8.2. Interaktionsgestaltung Fahrer und Funktion

Das Unterarbeitspaket 8.2 umfasste die Gestaltung der Interaktion zwischen Fahrer und Funktion und deren Umsetzung in einem Softwaremodul. Der Anteil der ZF CVS Hannover GmbH an diesem Unterarbeitspaket belief sich auf dem Einbringen der technischen Sicht bei der Erarbeitung des Interaktionskonzeptes und der Entwicklung der Umsetzung des Interaktionskonzeptes im HALC-Gesamtsystem. Der maßgebliche Anteil bei der Erarbeitung des Interaktionskonzeptes lag beim Partner DLR. Durch die ZF CVS Hannover GmbH wurde die technische Sicht in die Entwicklung eingebracht. So wurden zum Beispiel gemeinsam mit dem DLR die bei der Use Case Definition getätigten Überlegungen zur Interaktion des Fahrers mit dem System verfeinert. Für

detaillierte Informationen zum Interaktionskonzept verweisen wir auf den Gesamtbericht des Projektes.

Die Umsetzung des Interaktionskonzeptes erfolgte mittels der in den Kapiteln 2.8.1 (Koordination Längs- und Querführung) und 2.7.2 (Ablaufsteuerung Fahrstreifenwechsel) erläuterten Zustandsautomaten. Außerdem wurde das Interaktionskonzept bei der Parametrierung der Funktionen hinsichtlich des Fahrverhaltens berücksichtigt.

In einem vom DLR durchgeführten Expertenworkshop untersuchten die Projektpartner die Gestaltung der Interaktion mit dem HALC-System. Auf Grundlage der Use Cases aus AP2, der Ergebnisse zur Übernahmebereitschaft und -klassifikation aus AP3 sowie den technischen Entwicklungen aus AP5-7 wurde dafür ein initiales Interaktionskonzept erstellt und als prototypisches Human-Machine-Interface (HMI) umgesetzt. Ziel des Workshops war, mit Hilfe von erfahrenen Berufskraftfahrerinnen und -fahrern (BKF) das initiale Konzept in mehreren Durchgängen zu verbessern.

Dafür wurde zunächst den sechs am Workshop teilnehmenden BKF das Projekt sowie das HALC-System vorgestellt. Anschließend erfolgte eine iterative Bewertung, Diskussion und Verbesserung des initialen Konzeptes in der Gruppe. Dafür wurde die jeweilige Designvariante in einer Bildschirmsimulation gezeigt, die HALC-Use Cases aus Sicht der LKW-Innenkabine mit der jeweiligen HMI-Variante darstellte. Änderungsvorschläge der BKF wurden in drei Runden sofort in verbesserte Designvarianten umgesetzt, in der Simulation gezeigt und dann erneut bewertet. Die Bewertung der finalen Version zeigte deutliche Verbesserungen der User Experience im Vergleich zur initialen Version in den Bereichen Funktionalität, Nachvollziehbarkeit sowie Verständlichkeit.

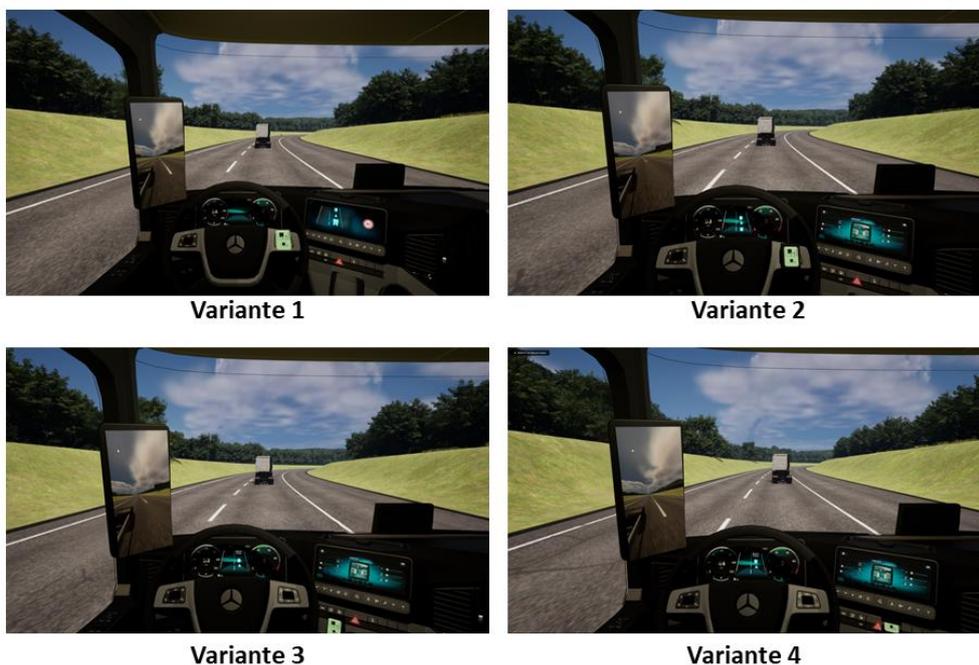


Abbildung II-41: Darstellung der vier Designvarianten in der Simulation.

2.8.3. Umsetzung Mensch-Maschine Schnittstelle

Im Projekt wurde zwei verschiedene Mensch-Maschine Schnittstellen umgesetzt. Aufgrund der in Kapitel 3.1.2 beschriebenen Änderung wurde für das Bartkowiak Versuchsfahrzeug eine Mensch-Maschine Schnittstelle für das passive Spurwechselassistenzsystem implementiert. Für das ZF-Versuchsfahrzeug wurde eine Mensch-Maschine Schnittstelle für das gesamte HALC-System umgesetzt. Im Folgenden werden beide Umsetzungen beschrieben.

Bartkowiak Versuchsfahrzeug

Um die Umfelderkennung durch die LCDAS Sensoren für den Fahrer im Bartkowiak Fahrzeug sichtbar zu machen, wurde ein zusätzliches HMI-Display von der Firma OPUS A3 in der Fahrerkabine zu montiert. Dieses zeigt die jeweiligen Warnstufen optisch und akustisch an (siehe Abbildung II-42).



Abbildung II-42: Darstellung der Warnstufen auf dem OPUS A3 HMI Display.

Das Design erstellte der Partner Bartkowiak in Zusammenarbeit mit den eigenen Berufskraftfahrern. So konnte neben der Anzeige der Sensordaten auch ein Zeitstempel für die Messdatenaufnahme generiert werden, welches der Bartkowiak Fahrer nach eigenem Ermessen setzen können, um auf besondere Situationen während des Betriebs in den Messdaten aufmerksam zu machen. Abbildung II-43 zeigt den Einbautort des Displays im Bartkowiak Fahrzeug.



Abbildung II-43: Einbautort im Bartkowiak Fahrzeug

ZF-Versuchsfahrzeug

Die im ZF-Versuchsfahrzeug umgesetzte Mensch-Maschine Schnittstelle diente der Umsetzung der in den Kapiteln 2.8.1 (Koordination Längs- und Querführung) und 2.7.2 (Ablaufsteuerung Fahrstreifenwechsel) beschriebenen Zustandsautomaten. Als Eingabeelemente dienten Tasten zum Ein- und Ausschalten des ACC und des HALC sowie der Blinker zum Aktivieren des Fahrstreifenwechsels. Angezeigt wurden der Systemzustand sowie der Zustand für den Fahrstreifenwechsel, so dass es zum Beispiel für den Fahrer ersichtlich war, aus welchem Grund eine Fahrstreifenwechselanforderung abgelehnt wurde. Diese Anzeige wurde mittels dSpace ControlDesk umgesetzt.

2.8.4. Gesamtintegration aller Teilkomponenten

Unterarbeitspaket 8.4 umfasste die Integration aller Software- und Hardwarekomponenten zum lauffähigen HALC-System im Fahrzeug. Abbildung II-44 zeigt die für HALC verwendeten Hardwarekomponenten. Auf der linken Seite sind die verwendeten Sensoren und Bedienelemente gezeigt. Zentral befinden sich die HALC-Recheneinheiten, die für die Umsetzung der Softwarekomponenten zuständig sind. Auf der rechten Seite der Abbildung finden sich die Ausgabelemente. Diese umfassen das Fahrerdisplay zur Kommunikation mit dem Fahrer und die Aktorik zum Einwirken auf die Fahrdynamik.

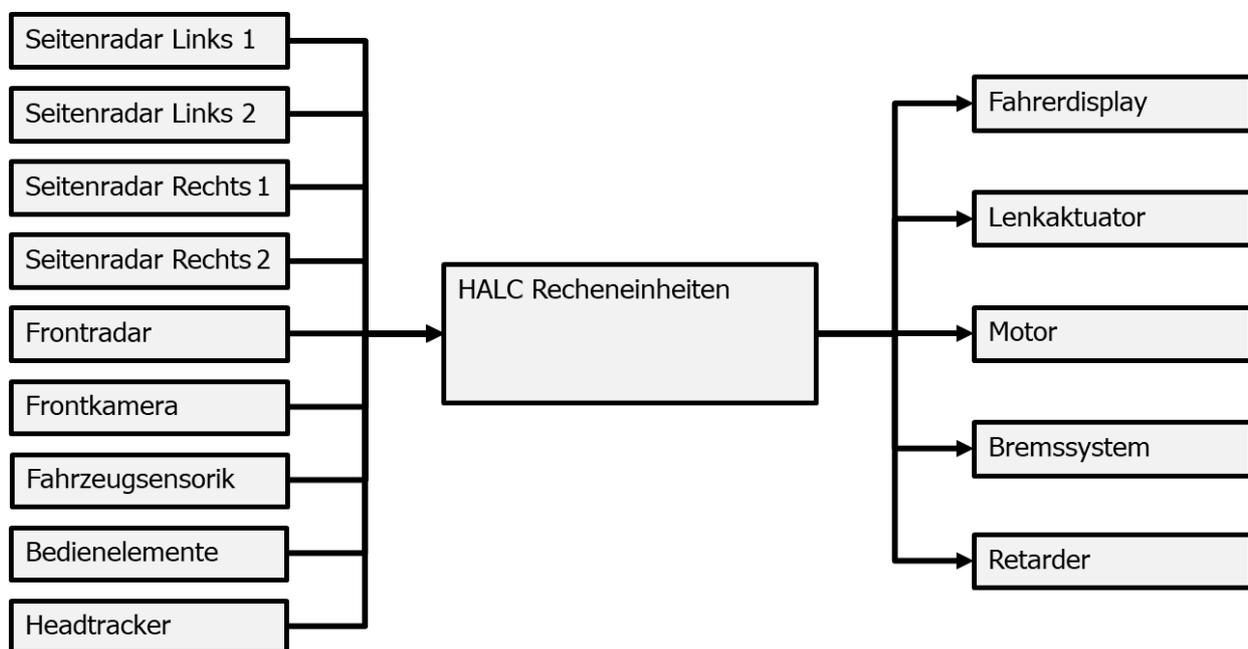


Abbildung II-44: HALC-Hardwarekomponenten

Abbildung II-45 zeigt die auf den HALC-Recheneinheiten umgesetzten Funktionsmodule. Für Details zu den Funktionsmodulen wird auf die Kapitel 2.3 bis 0 sowie 2.8.1 verwiesen.

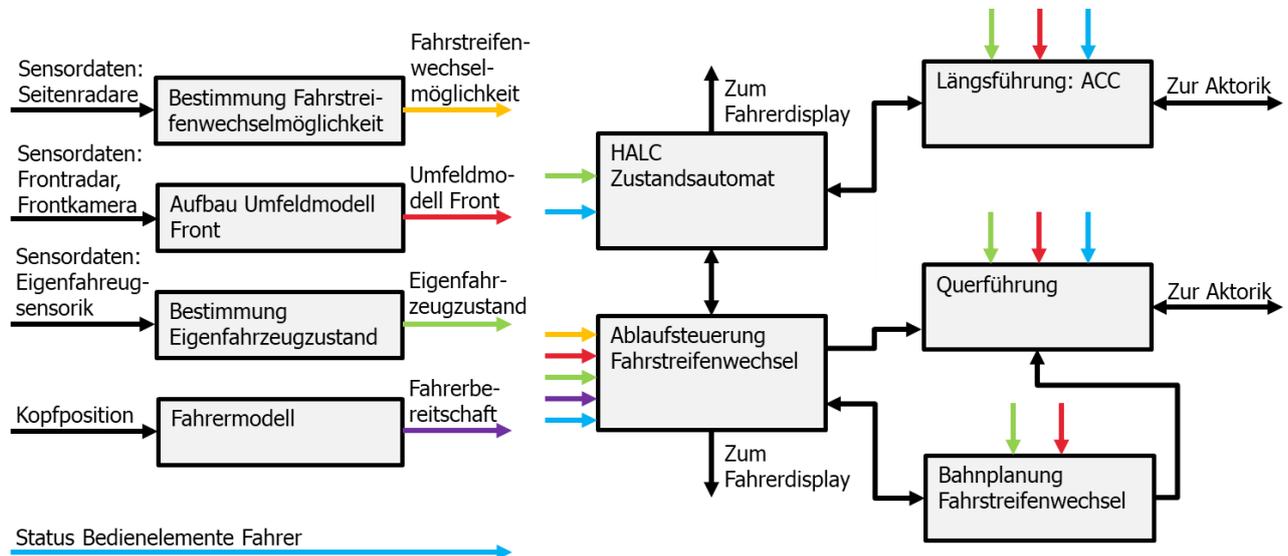


Abbildung II-45: HALC-Funktionsmodule

Funktionsmodul	Erläuterung in Kapitel
Bestimmung Fahrstreifenwechsellmöglichkeit	2.7.1
Aufbau Umfeldmodell Front	2.4.1
Bestimmung Eigenfahrzeugzustand (außerhalb von HALC entwickeltes Modul wurde genutzt)	-
Fahrermodell (durch Projektpartner DLR entwickelt)	2.3
HALC Zustandsautomat	2.8.1
Ablaufsteuerung Fahrstreifenwechsel	2.7.2
Längsführung: ACC	-
Querführung	2.6.1
Bahnplanung Fahrstreifenwechsel	2.6.2

Tabelle II-7: Verweis auf detaillierte Beschreibungen der Funktionsmodule

Als Hauptrecheneinheit zur Umsetzung der HALC-Funktionsmodule wurde die Rapid-Prototyping Plattform dSpace MicroAutoBox III ausgewählt. Es wurde dazu zunächst ein Gesamtframework für die Integration der Teilkomponenten vorbereitet. In dieses Framework wurden die dargestellten Funktionsmodule integriert, so dass sie im Verbund die avisierte HALC-Funktionalität erbringen können.

2.8.5. Safety Konzept Gesamtsystem und Umsetzung

Die definierten Use Cases wurden in diesem Unterarbeitspaket zunächst hinsichtlich der Sicherheit analysiert. Dabei wurden die Use Cases und Teilfunktionen einer Hazard and Risk Analyse (HaRA) gemäß ISO 26262 unterzogen, welches die Grundlage für das Safety Konzept bildet. Auf dieser Grundlage wurde die Erstellung der Teilsafetykonzepte in den Arbeitspaketen 5, 6 und 7 koordiniert und so gewährleistet, dass eine hohe Passung der Konzepte erreicht wurde. Als zentraler Aspekt wurde die Gewährleistung der Fahrerbereitschaft in das Konzept einbezogen (siehe auch Kapitel 2.6.4).

Aufgrund der Durchführung der Use Cases für den Fahrstreifenwechsel ausschließlich auf der Testbahn konnten die folgenden Maßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit umgesetzt werden: Durchführung der Testfahrten nur durch geschulte Testfahrer, großer Abstand zu an den Use Cases unbeteiligten Verkehrsteilnehmern, für den Testfahrer gut zu erreichender Notausschalter. Außerdem erfolgte durch schrittweises Testen eine inkrementelle Erhöhung des Reifegrades, um sichergehen zu können, dass eventuelle Fehler frühzeitig und risikoarm erkannt werden konnten.

Die in der Software umgesetzten Sicherheitsmaßnahmen wurde sämtlich auf für die Umsetzung von Sicherheitsalgorithmen geeigneter Rechenhardware umgesetzt, so dass von einer zuverlässigen Funktion dieser Maßnahmen ausgegangen werden kann.

2.8.6. Integration Eyetracking ins Realfahrzeug

Dieses Arbeitspaket umfasste die Integration des Eyetrackings in ein Realfahrzeug. Der Anteil von ZF CVS war die Unterstützung der Integration der Eyetracking Hardware mittels Nutzfahrzeugexpertise. Die Hauptarbeit in diesem Unterarbeitspaket wurde vom Partner Interactive Minds geleistet. Für detaillierte Informationen zu diesem Unterarbeitspaket verweisen wir daher auf den Gesamtbericht des Projektes.

Interactive Minds wurde von ZF CVS daher bei Konzeptarbeiten zur Integration des Eyetracking in das Realfahrzeug unterstützt. Dabei wurde als besondere Herausforderung gemeinsam die Lichtabhängigkeit der Erfassung der Augenbewegungen bearbeitet, da die korrekte Erfassung der Bewegungen stark lichtabhängig ist. Insbesondere die Infrarotstrahlung im Sonnenlicht ist ein relevanter Faktor. Für den Einsatz einer Eyetracking Kamera in das Realfahrzeug wäre die Anbringung eine Sonnenschutzfolie notwendig gewesen.

Die Anbringung von Sonnenschutzfolien auf Autoscheiben ist nur mit einigen Einschränkungen zulässig. Laut Straßenverkehrs-Zulassungs-Verordnung³ (StVZO) müssen die vorderen Autoscheiben „klar, lichtdurchlässig und verzerrungsfrei“ bleiben. Die Windschutzscheibe darf daher nur kleinflächig mit Sonnenschutzfolien beklebt werden. An den vorderen Seitenfenstern sind tönende Sonnenschutzfolien in der Regel nicht erlaubt. Unter der Bedingung, dass ein zweiter Außenspiegel montiert wird, ist das Anbringen von Sonnenschutzfolien an der Heckscheibe und den hinteren Seitenscheiben erlaubt.

Aus Projektsicht war die Verwendung der Head Tracking Kamera ausreichend, um die Fahreraufmerksamkeitsinformationen für HALC zu generieren, da in Tests bewiesen wurde, dass im Bereich der schweren Nutzfahrzeuge, bedingt durch die Größe der Kabine, jeder Betrachtung des Spiegels oder Seitenstreifens auch einer erkennbaren Kopfbewegung einhergeht. Somit kam die Eye-Tracking Kamera im ZF-Versuchsfahrzeug nicht zum Einsatz.

³ Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) § 22a Bauartgenehmigung für Fahrzeugteile – Absatz 3: Scheiben aus Sicherheitsglas (§ 40) und Folien für Scheiben aus Sicherheitsglas

2.9. AP 9 – Demonstratoraufbau, Evaluation und Test

2.9.1. Integration in Test-/Demonstrator LKW

Die in Kapitel 2.8.4 beschriebenen Teilkomponenten wurden in diesem Unterarbeitspaket in das ZF-Versuchsfahrzeug erfolgreich integriert. Somit wurde die Grundlage für die in den folgenden Kapiteln beschriebenen Tests gelegt.

Wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben wird, wurde neben dem ZF-Versuchsfahrzeug ein weiteres Fahrzeug des Partners Bartkowiak GmbH als reines Messdatenerfassungsfahrzeug eingesetzt. In diesem Unterarbeitspaket wurde daher auch das Bartkowiak Fahrzeug ausgerüstet. Es wurden die HALC-Sensoren sowie Messtechnik integriert, um die Messdaten auf Speicherkarten aufzunehmen.

2.9.2. Evaluation und Test auf ZF Testbahn

In diesem Arbeitspaket wurden verschiedene Testfahrten sowohl mit dem gesamten HALC-System als auch mit Teilkomponenten auf der ZF Testbahn durchgeführt. Die Ergebnisse sind fortwährend in die Entwicklung eingeflossen. Einige Ergebnisse von Testfällen zum Fahrstreifenwechsel werden in diesem Bericht in Kapitel 2.6.2 dargestellt.

2.9.3. Evaluation auf öffentlichen Straßen mit geschulten Testfahrern

Die Use Case zum automatisierten Fahrstreifenwechsel wurde ausschließlich auf der ZF Testbahn evaluiert, daher wurde dieses Unterarbeitspaket entsprechend geändert (zur Änderung siehe Kapitel 3.1.3). Auf öffentlichen Straßen wurden Teilkomponenten von HALC evaluiert. So wurde zum Beispiel die automatisierte Längsführung (ACC) ausführlich evaluiert und anhand der gewonnenen Erkenntnisse parametrisiert.

2.9.4. Evaluation auf öffentlichen Straßen mit Berufskraftfahrern

Die Berufskraftfahrer der Firma Bartkowiak haben Testfahrten auf öffentlichen Straßen mit dem vorbereiteten Bartkowiak Versuchsfahrzeug durchgeführt und kontinuierlich Messdaten aufgezeichnet. Sie wurden dabei von ZF CVS aus technischer Sicht unterstützt.

Ausgangslage

Telematik Systeme können Daten in verschiedenen Intervallen übertragen, je nach den Anforderungen des Systems und der Art der gesammelten Daten. Einige Telematik-Systeme übertragen kontinuierlich Daten in Echtzeit, insbesondere wenn es sich um Anwendungen wie Flottenmanagement oder Fahrzeugüberwachung handelt, bei denen Echtzeitinformationen wichtig sind. Andere Systeme übertragen Daten in regelmäßigen Zeitintervallen, zum Beispiel alle paar Minuten oder Stunden. Die Übertragungshäufigkeit hängt oft von der Art der gesammelten Daten

ab und davon, wie schnell oder häufig diese Informationen aktualisiert werden müssen, um ihre Funktion zu erfüllen.

Telematik Daten bieten eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten in verschiedenen Branchen und Bereichen.

Hier einige Beispiele:

Flottenmanagement:

Telematik-Daten können verwendet werden, um den Standort von Fahrzeugen in Echtzeit zu verfolgen, Routen zu optimieren, den Treibstoffverbrauch zu überwachen und die Fahrzeugwartung zu planen.

Logistik und Lieferkette:

Telematik Daten können helfen, die Effizienz von Lieferketten zu verbessern, indem sie Echtzeitinformationen über den Standort von Fracht senden, Lieferungen verfolgen und vorausschauende Analysen für Lagerbestände ermöglichen.

Fahrzeugdiagnose:

Telematik-Daten können dazu genutzt werden, den Zustand von Fahrzeugen zu überwachen und frühzeitig potenzielle Probleme zu erkennen, indem sie Daten wie Motorleistung, Kraftstoffverbrauch, Ölstand und Batteriestatus erfassen.

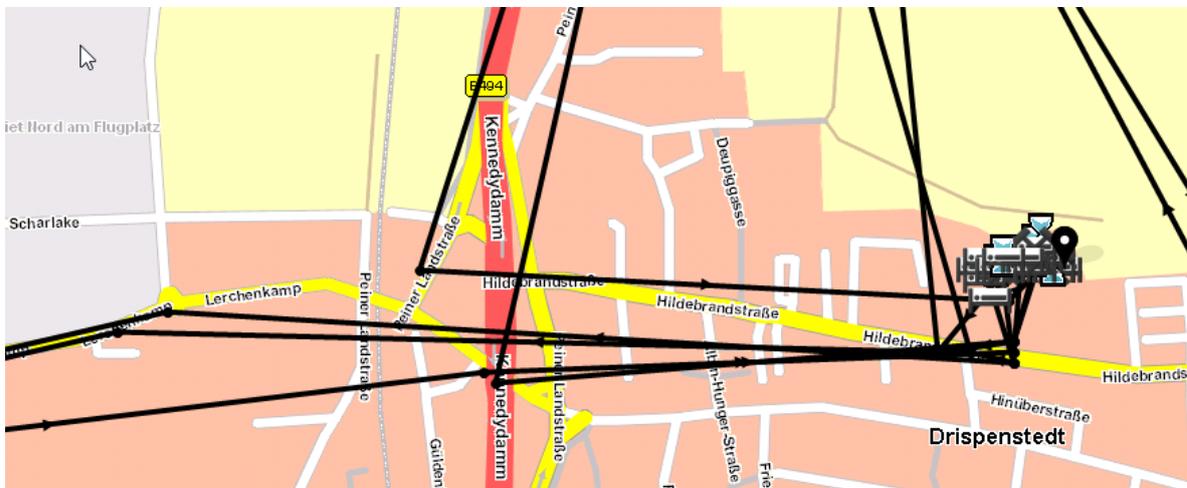


Abbildung II-46: Screenshot Transics – alle 2 Minuten gibt es einen Datensatz

Versuchsfahrzeuge

HI KB 6039 Sattelzugmaschine IVECO S-WAY; AS440S46T/P 2LNG

FIN: WJMMG2ATZ0C446014, Baujahr: 09-2021

Einsatz- und Testumgebung

Jede Spedition hat unterschiedliche Tagesgeschäfte. Ein sich täglich wiederholender Werksverkehr (Rundlauf) und Zufallsverkehr (Spontanaufträge).

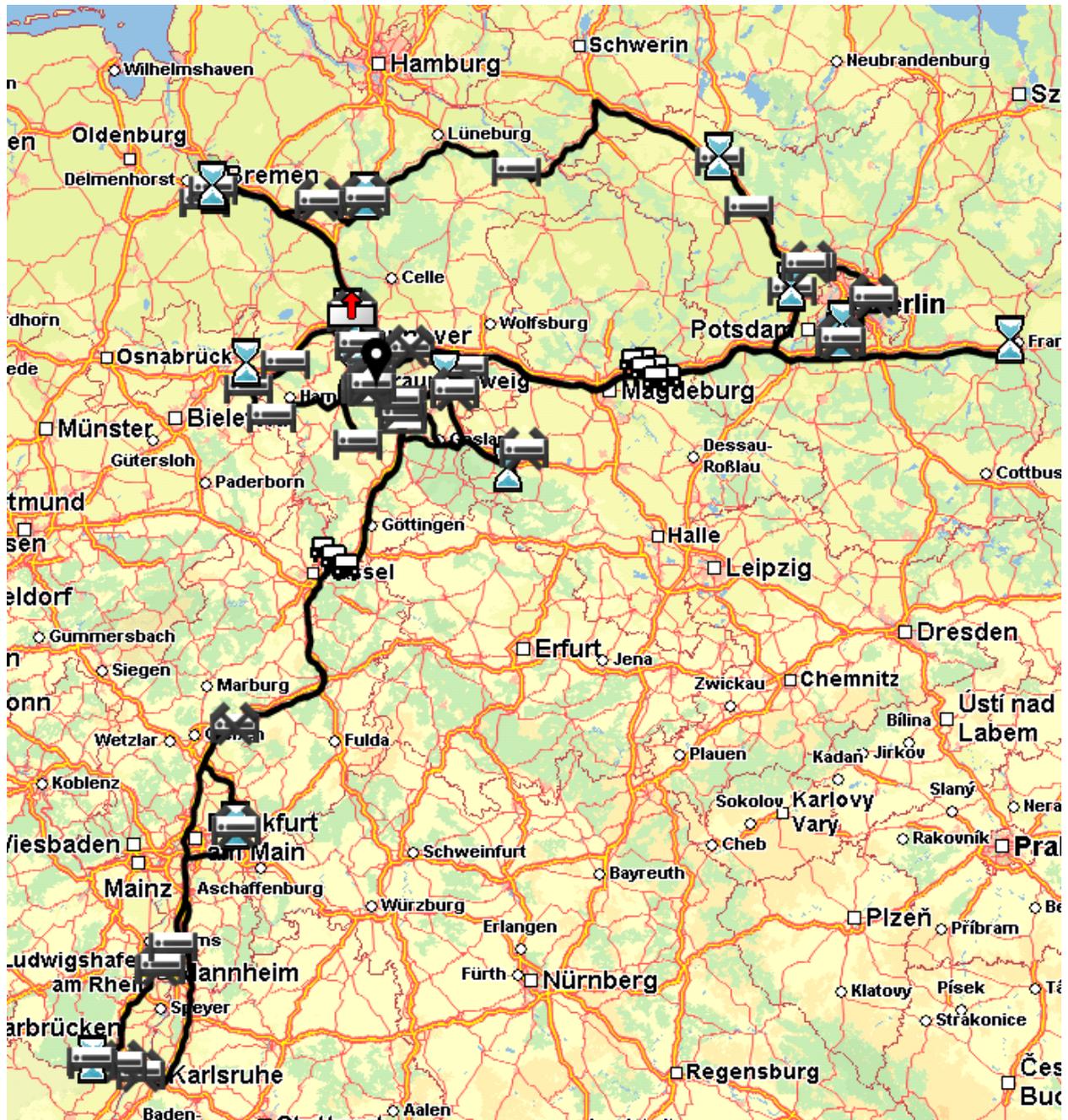


Abbildung II-47: erster Testmonat – gefahrene Strecken –

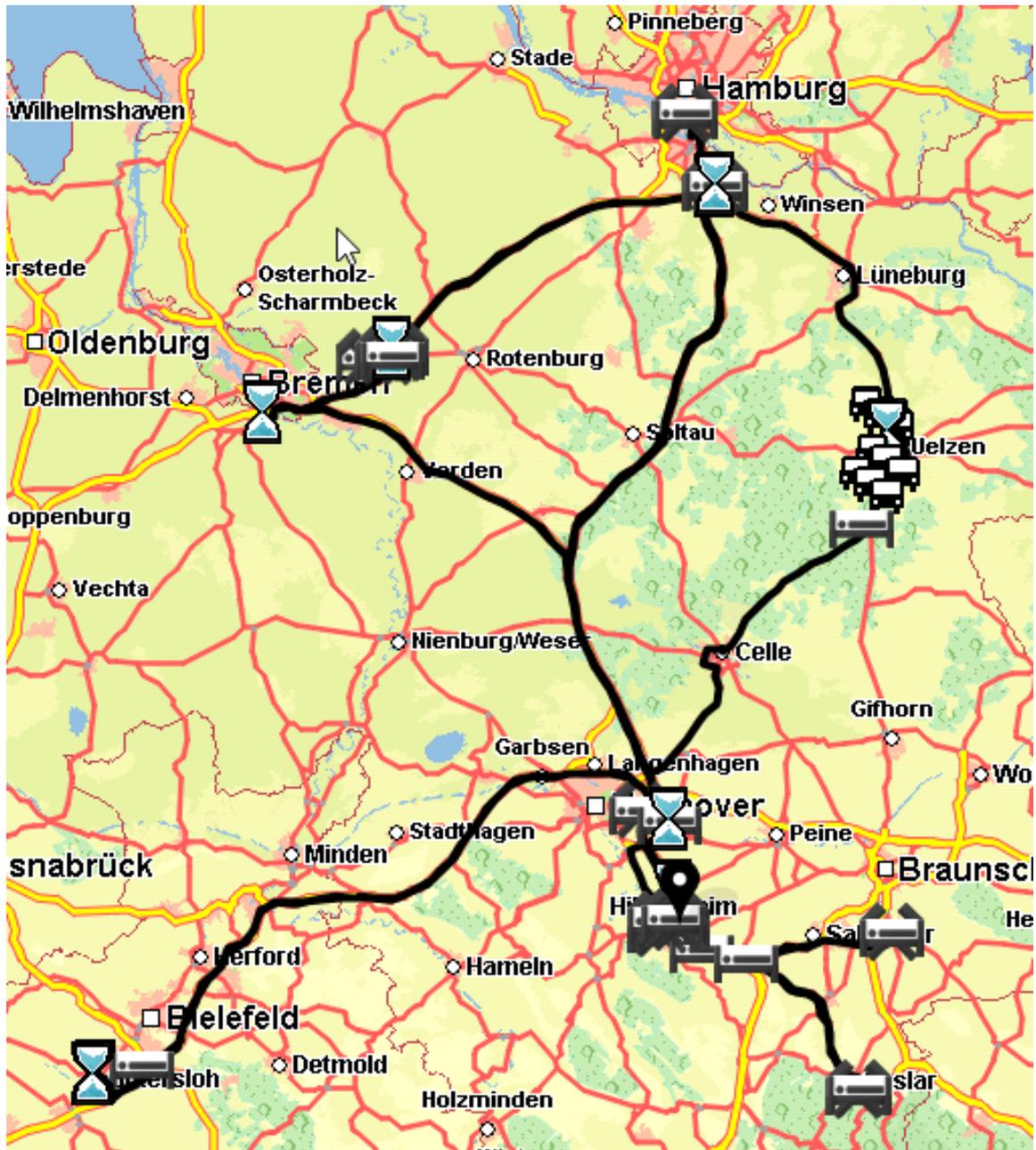


Abbildung II-48: zweiter Testmonat – gefahrene Strecken –

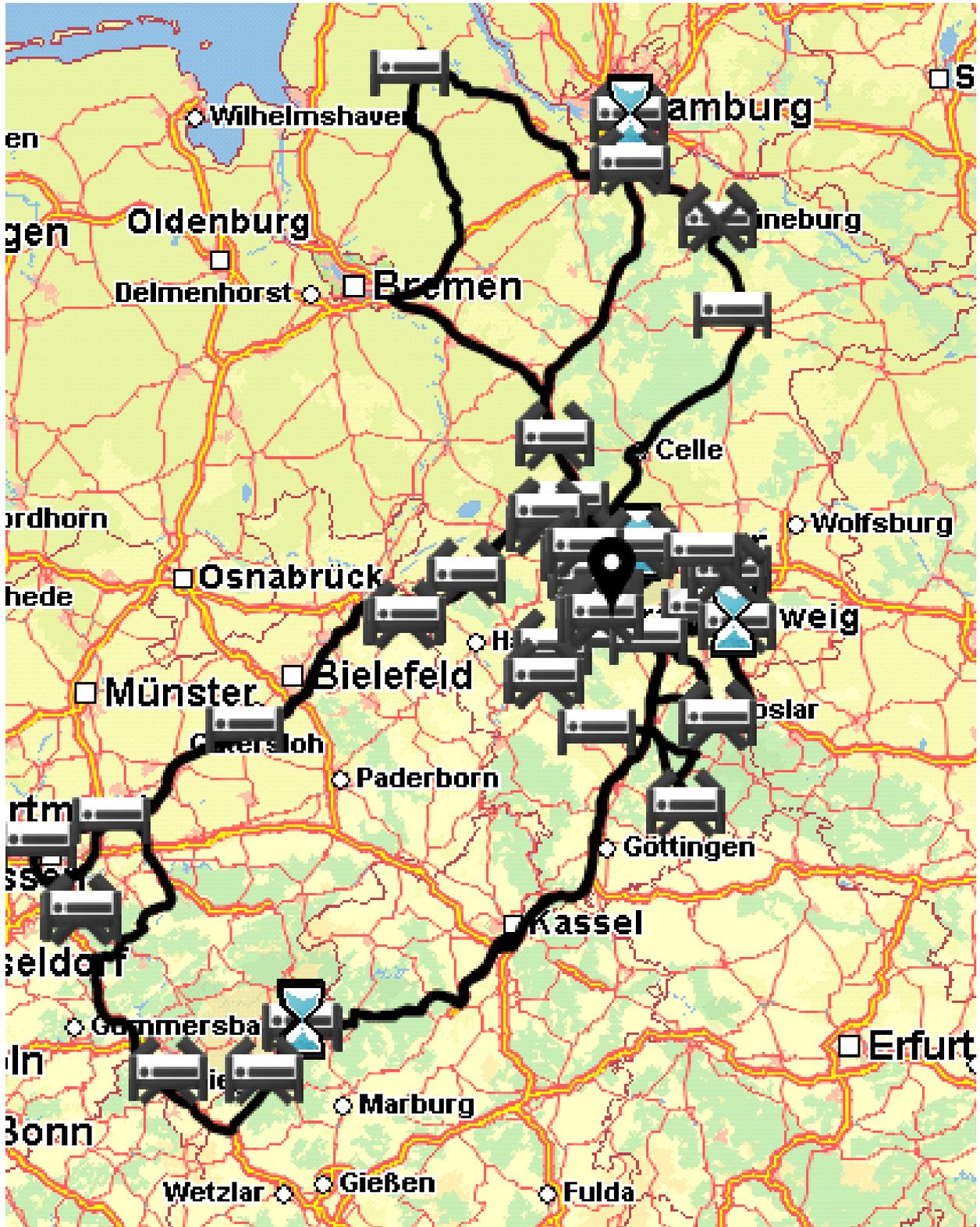


Abbildung II-49: dritter Testmonat – gefahrene Strecken –

Test mon at	Durchschnittliche Kraftstoffverbrauch beim Fahren (Liter/100 km)	Durchschnittlicher Kraftstoffverbrauch - Tempomat (l/100 km)	% Entfernung - Tempomat (%)	% Entfernung - Fahren im Schubetrieb (%)	% Anteil Fahrstrecke mit Eco-Roll (%)	Bremsungen / 100 km (#/100 km)	Panikbremsungen / 100 km (#/100 km)
1	23,87	21,21	82,25 %	7,75%	5,45%	63,11	3,52
2	22,95	20,07	80,57 %	6,68%	6,09%	64,10	4,44
3	26,40	23,71	77,81 %	10,20%	6,84%	65,34	4,83

Tabelle II-8: Kraftstoffverbrauch und andere relevante Größen zur Fahrerbeurteilung

Vergleich der Telematik-Systeme (gefahrne Strecke)

- Tageseinsatz



Abbildung II-50: Standard-Telematik Tagestour

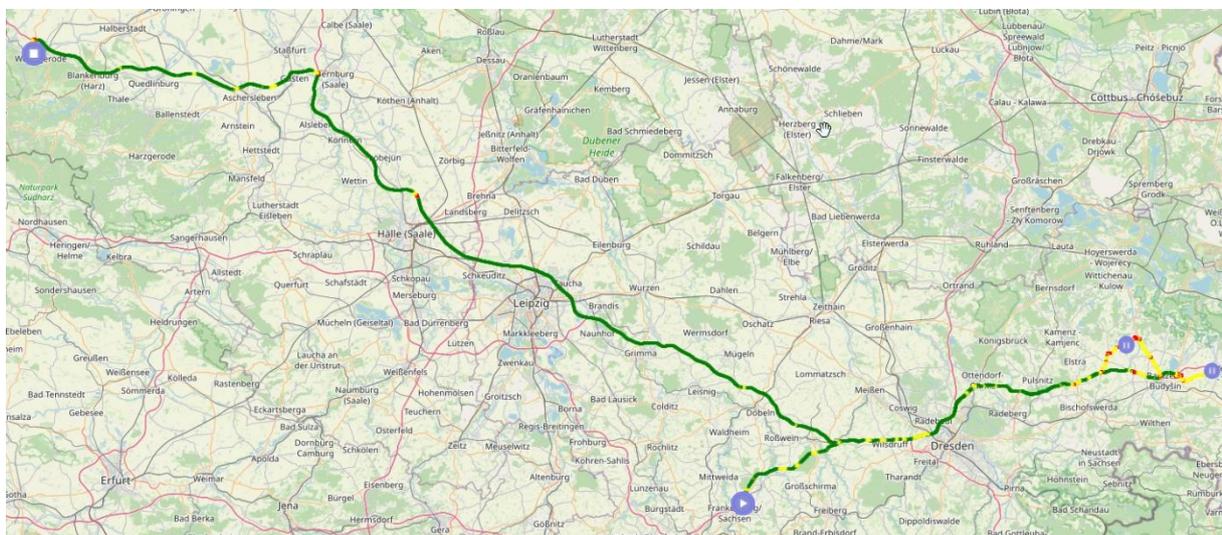


Abbildung II-51: Projekt-Telematik-OKIT Tagestour

- Rangierbetrieb beim Be- und Entladen

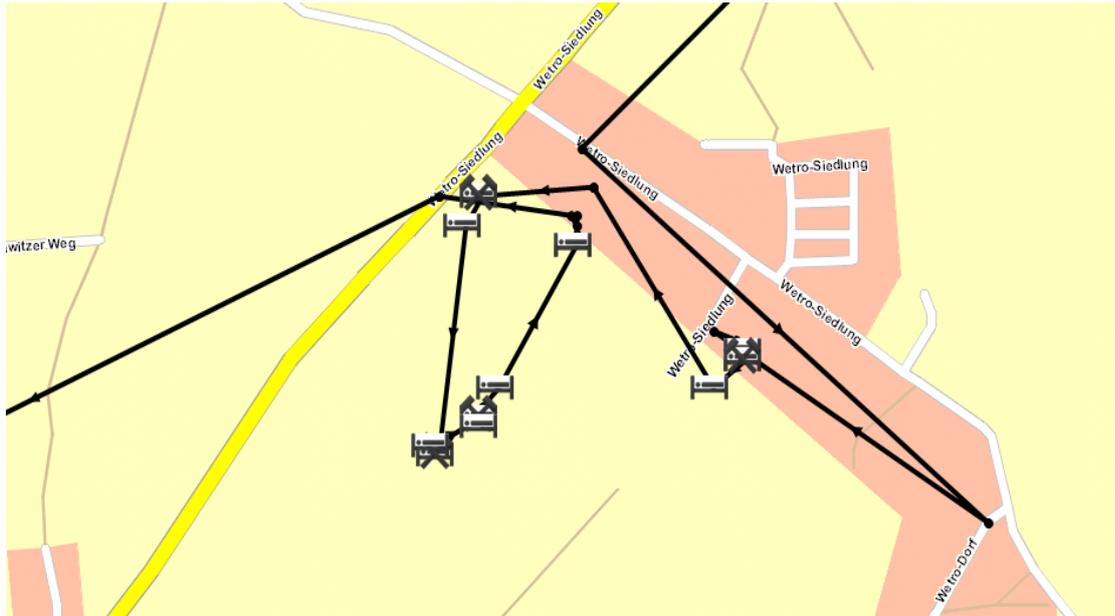


Abbildung II-52: Standard-Telematik Rangierbetrieb

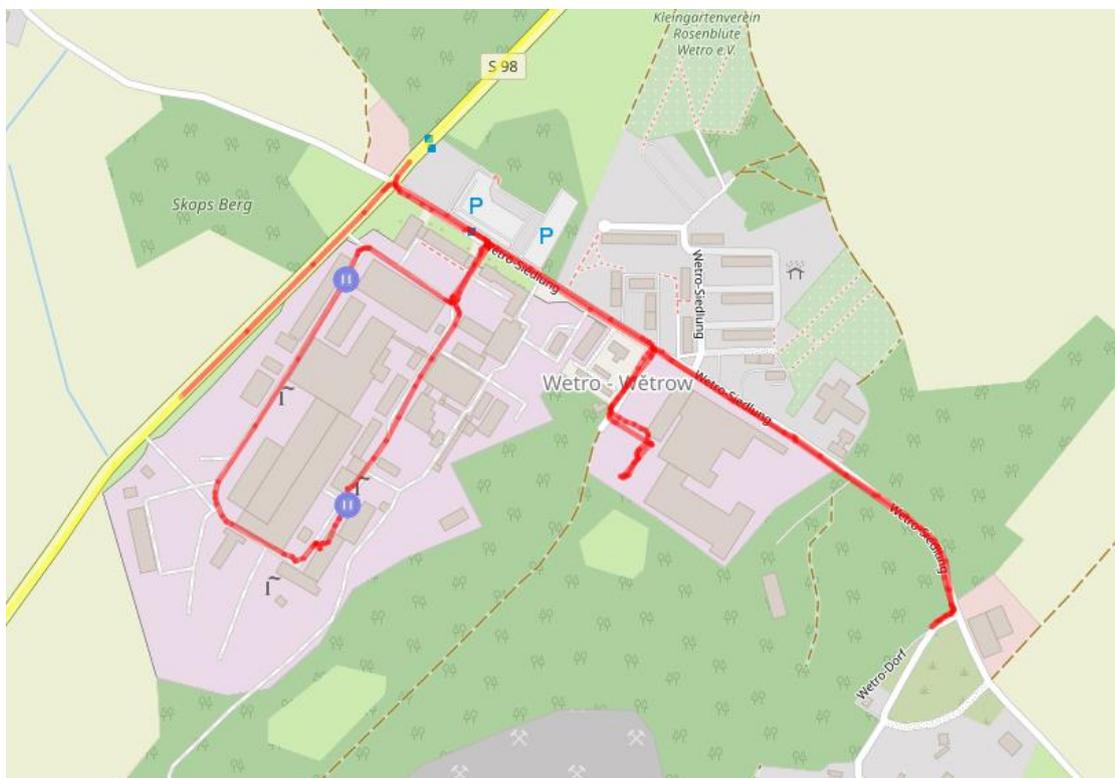


Abbildung II-53: Projekt-Telematik OKIT Rangierbetrieb

- **Ortsdurchfahrt**

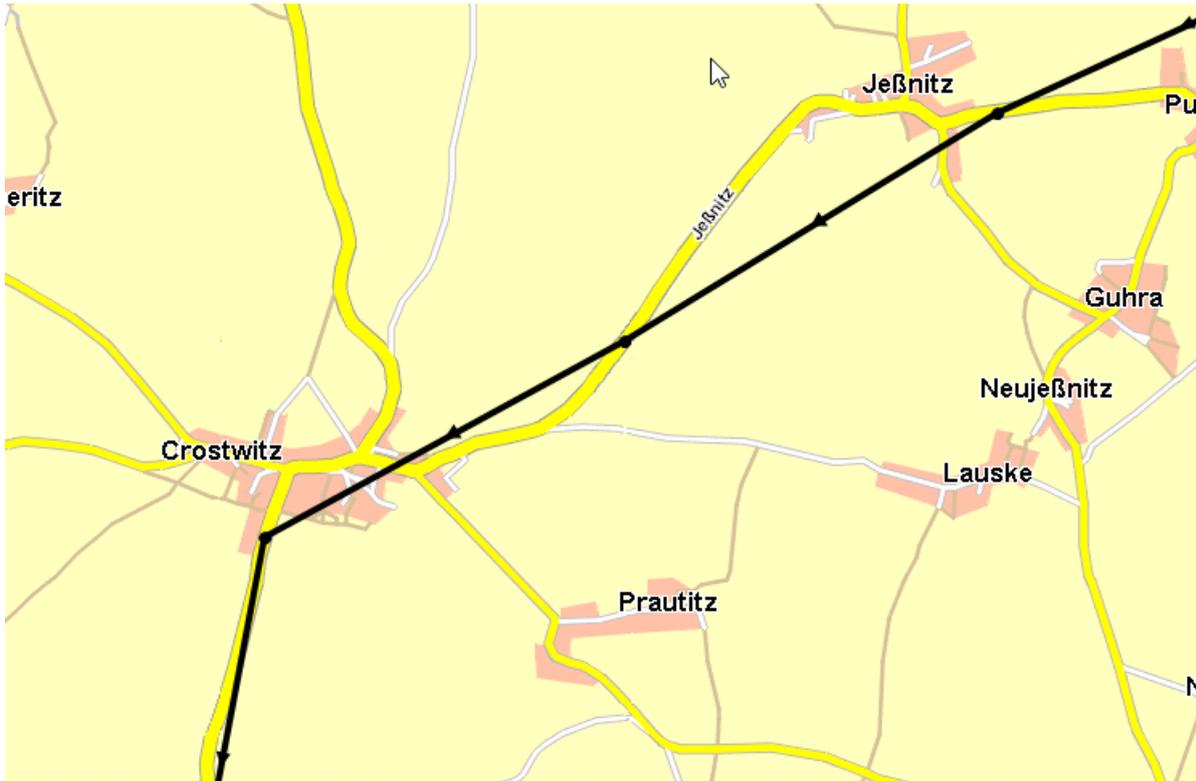


Abbildung II-54: Standard-Telematik Ortsdurchfahrt

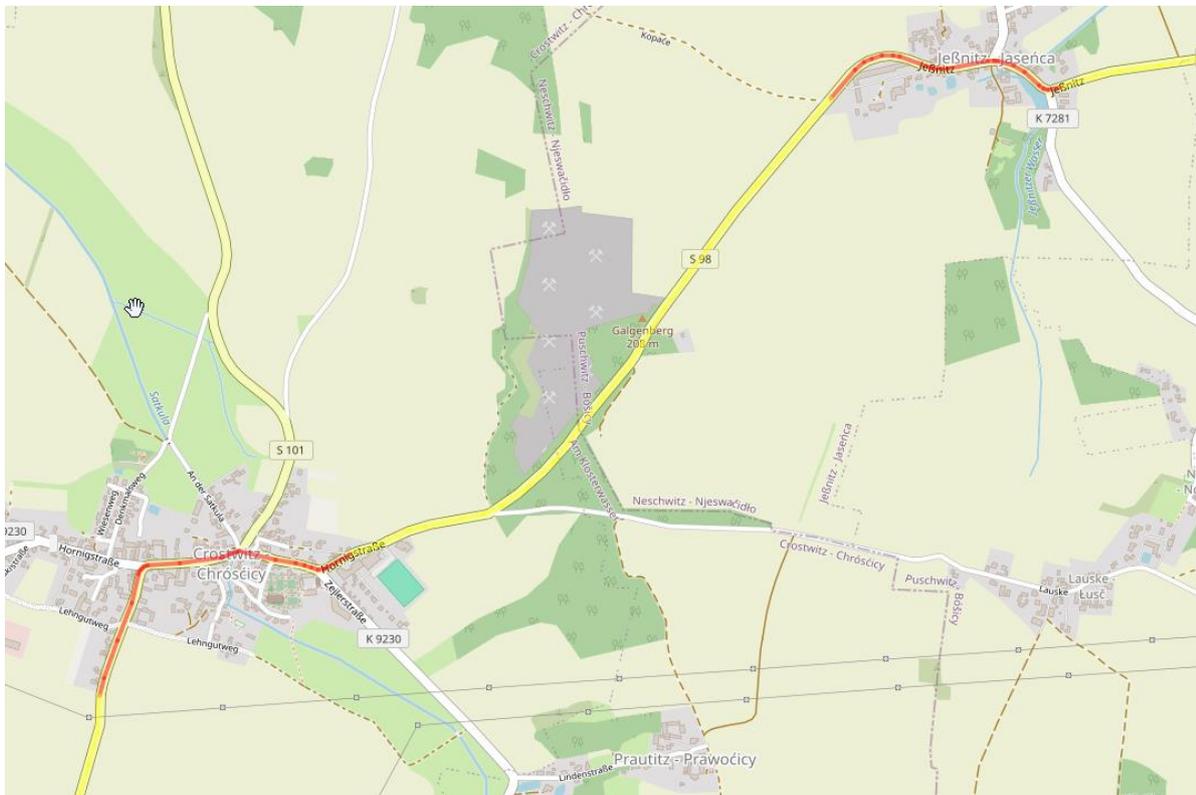


Abbildung II-55: Projekt-Telematik OKIT Ortsdurchfahrt

- Bundesautobahn Auffahrt

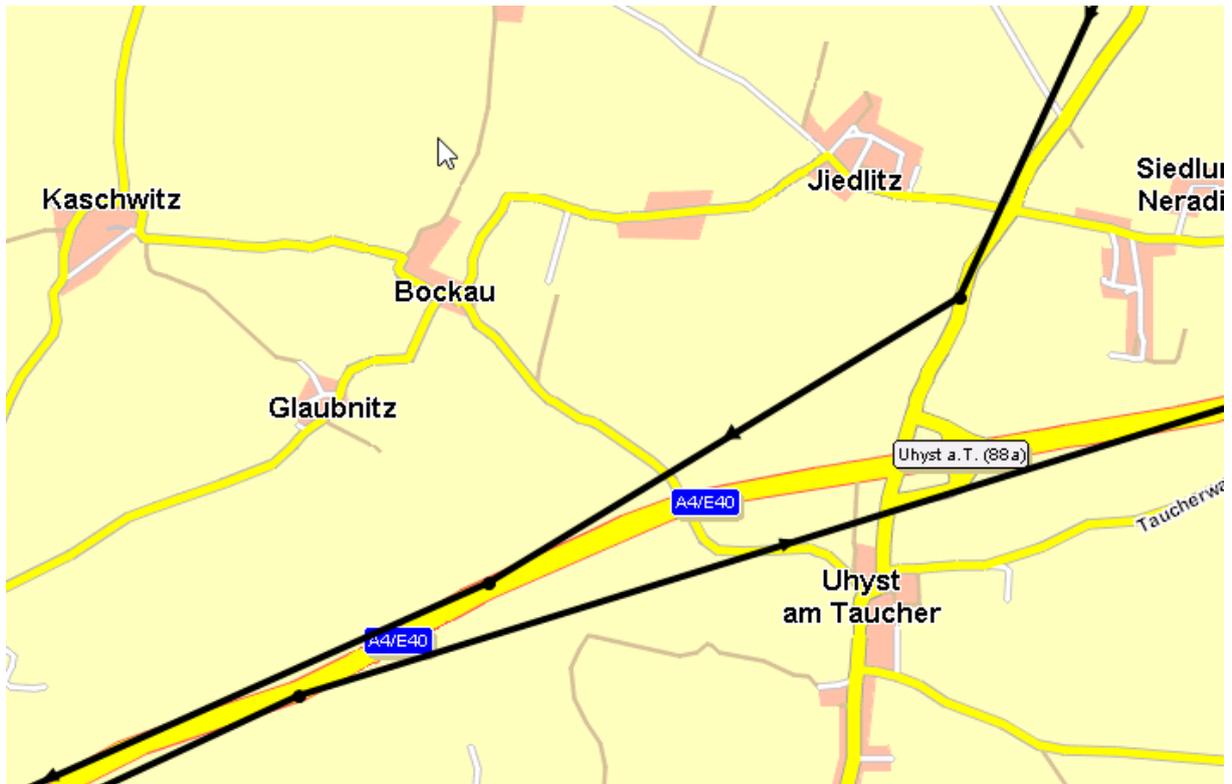


Abbildung II-56: Standard-Telematik BAB-Auffahrt

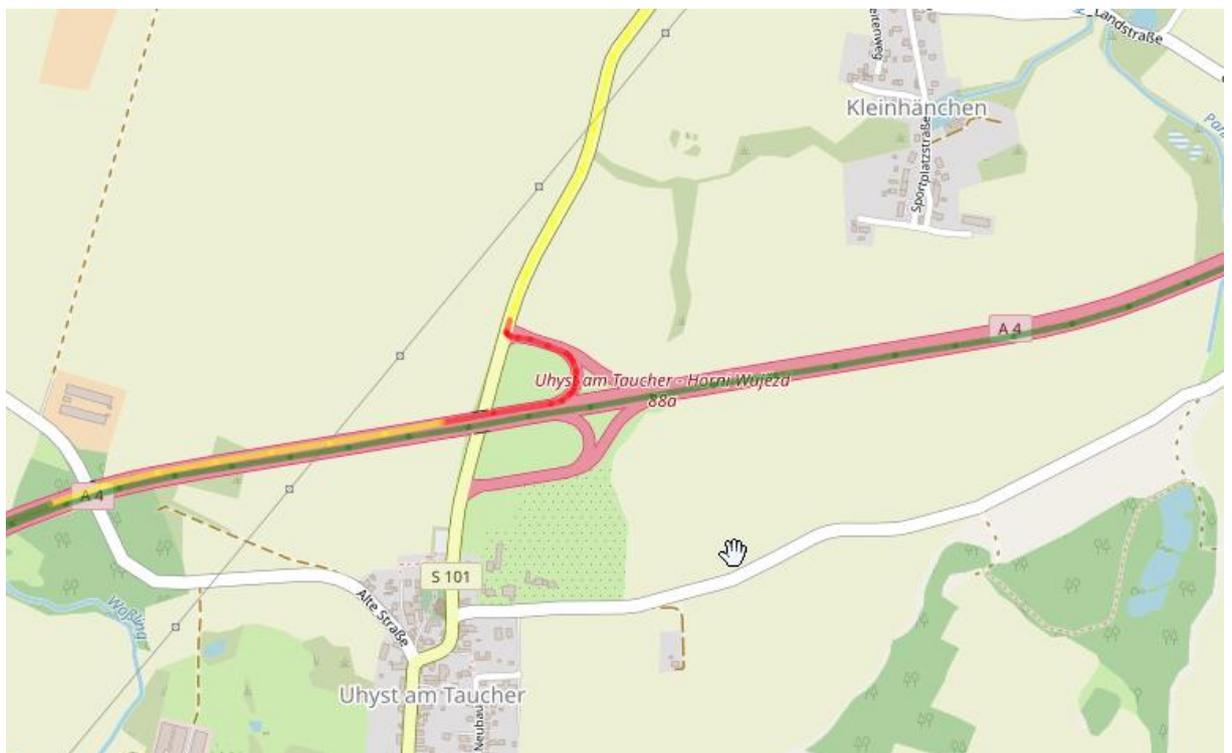


Abbildung II-57: Projekt-Telematik OKIT BAB-Auffahrt

- Bundesautobahn Abfahrt



Abbildung II-58: Standard-Telematik BAB-Abfahrt

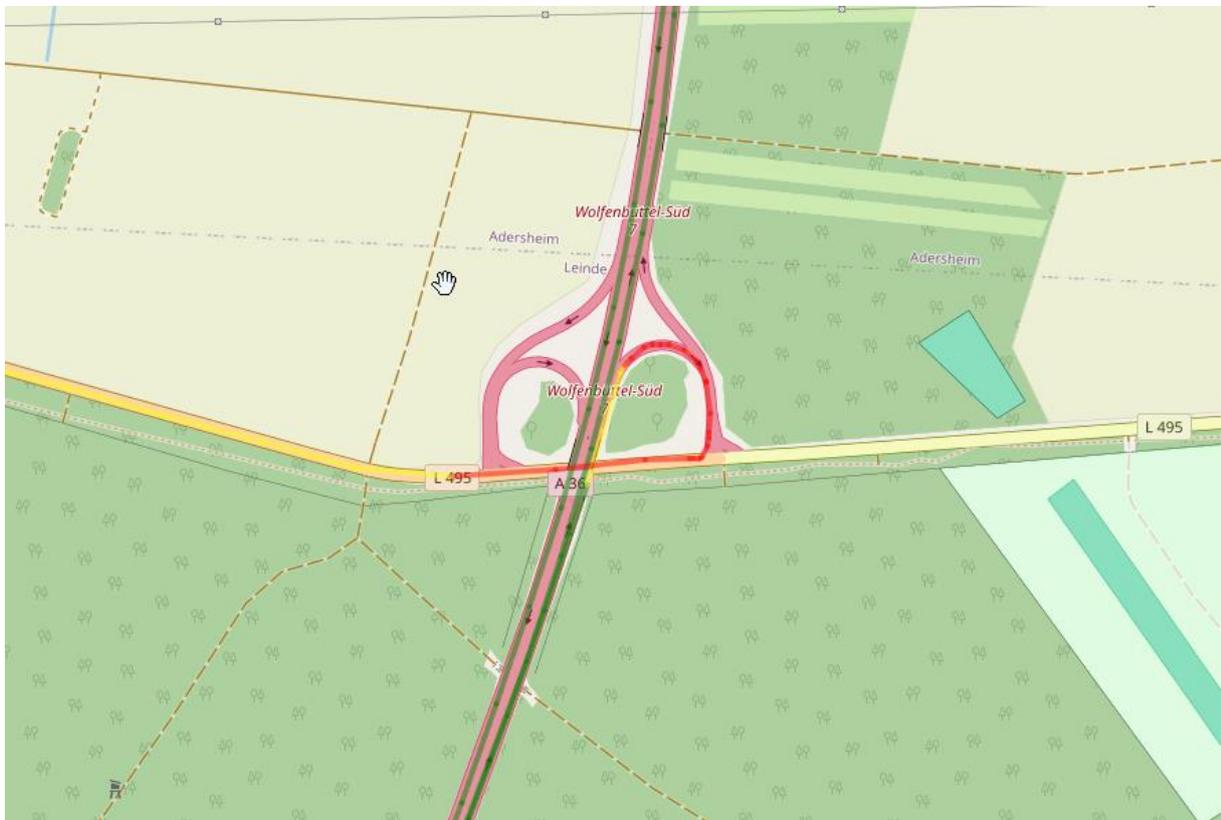


Abbildung II-59: Projekt-Telematik OKIT BAB-Abfahrt

- Längere Ortsdurchfahrt

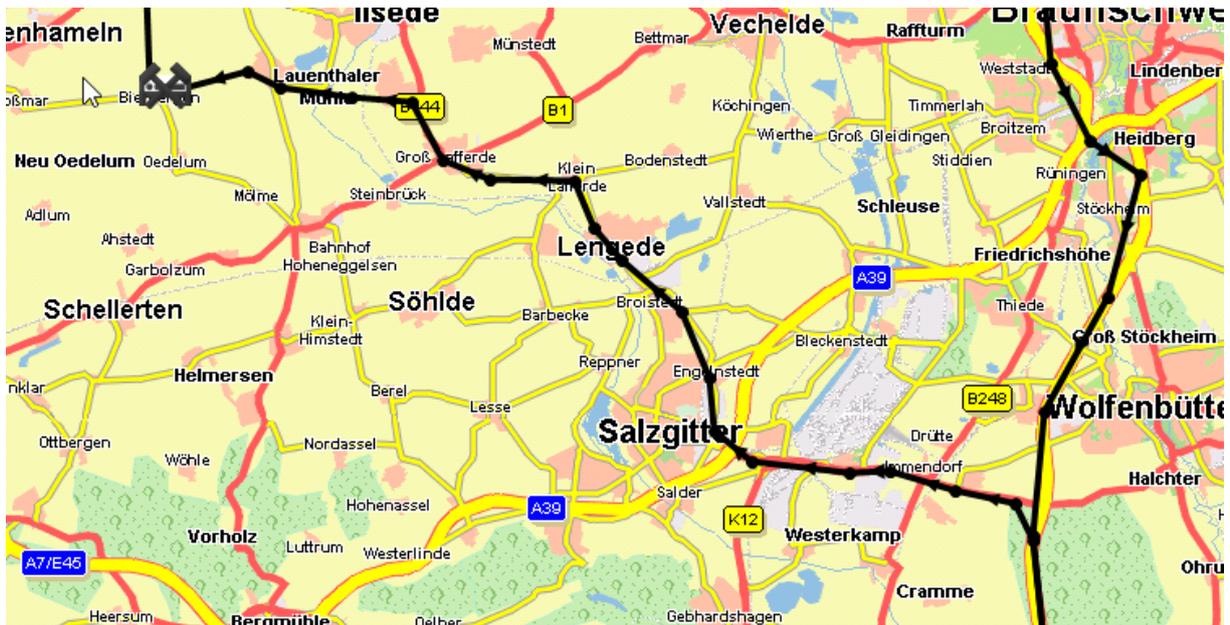


Abbildung II-60: Standard-Telematik Längere Ortsdurchfahrt

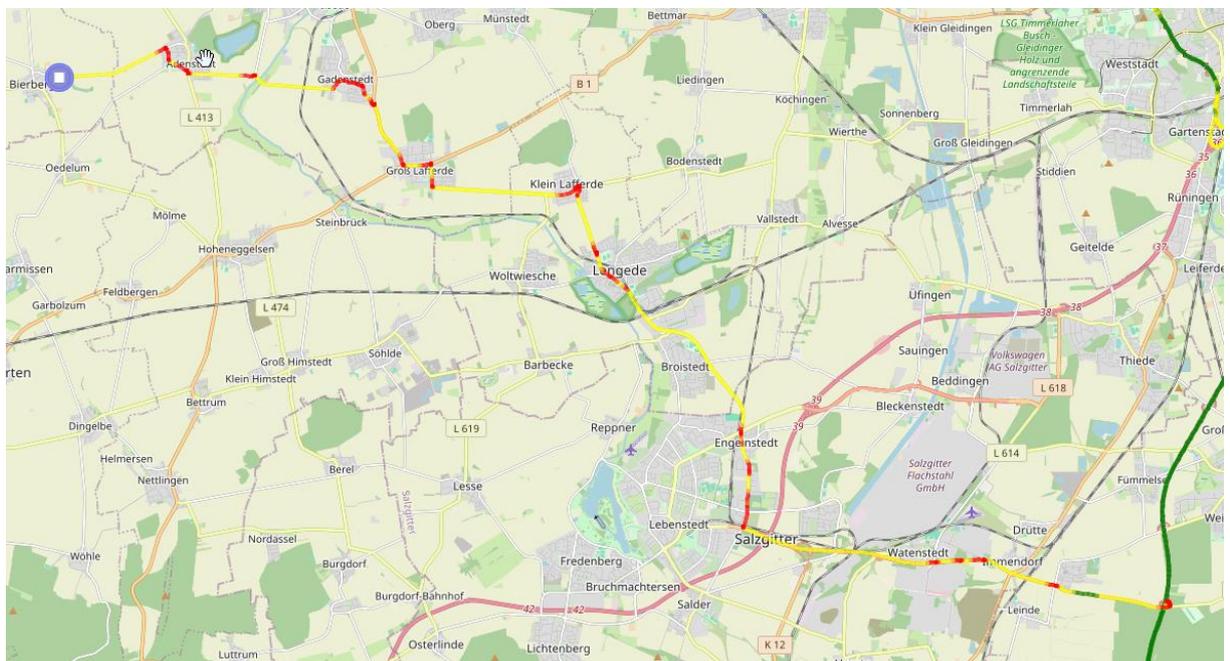


Abbildung II-61: Projekt-Telematik OKIT Längere Ortsdurchfahrt

2.9.5. Auswertung der gesammelten Daten

In diesem Unterarbeitspaket erfolgte durch ZF CVS die Auswertung der in Tests gesammelten Daten aus technischer Sicht der Funktionsentwicklung.

Parallel zur Entwicklung wurden stetig Testfahrten auf der Testbahn und der öffentlichen Straße durchgeführt. Es standen dabei jeweils verschiedene Aspekte sowie Komponenten des HALC-Systems im Fokus. Die in den Auswertungen der Tests gewonnenen Erkenntnisse sind fortwährend in die technische Entwicklung eingeflossen. Beispiele dafür werden in den Kapiteln 2.4.1, 2.4.2, 2.5.1, 2.6.1, 2.6.2, 2.7.1 und 2.7.2 genannt.

Durch die umfangreichen Tests und Auswertungen konnte das HALC-System während der Entwicklung stetig verbessert werden, so dass zum Projektabschluss ein positiv zu bewertender Stand erreicht werden konnte.

2.9.6. Analyse des potenziellen Nutzens für Unfallsituationen

Evaluation des Sicherheitsnutzens des HALC-Systems

Im Anschluss an die Entwicklung des HALC-Systems wurde mit Kenntnis des Funktionsumfangs des Systems eine Bewertung vorgenommen, in welchem Umfang ein Sicherheitsgewinn im Straßenverkehr (Wirkpotential) erzielt werden könnte. Hierbei konnte abgeschätzt werden welche Unfalltypen adressiert werden. Dabei ist zu bemerken, dass im Rahmen dieses Projekts lediglich die adressierten Unfalltypen bestimmt werden können - welche Wirkung das HALC-System bei den jeweiligen Unfällen tatsächlich hat – d.h. ob das HALC-System den Unfall verhindert hätte, oder nur die Unfallschwere vermindert hätte und in welchem Umfang ließ sich im Rahmen dieses Projektes nicht ermitteln. Das Ziel war es daher zu ermitteln, wie viele Unfälle durch das System in Deutschland adressiert werden könnten.

Die Projektion der adressierten Unfälle erfolgte durch Ermitteln der adressierten Unfälle in GIDAS. Durch die detaillierten Informationen aus dem Unfalltyp, den Unfallursachen und in einigen Fällen durch eine Einzelfallanalyse konnte das Wirkpotential des HALC in einem ersten Schritt bei verschiedenen Gruppen des Unfalltyps in GIDAS ermittelt werden.

Mit Kenntnis der Verteilung der Gruppen von Unfalltypen bei Lkw Unfällen in Deutschland (Unfalldaten von DESTATIS) erfolgte im nächsten Schritt die Hochrechnung des Wirkpotentials auf die adressierten Unfälle in Deutschland. Für die Analyse der Unfalldaten des Statistischen Bundesamtes DESTATIS wurden die Jahre 2014-2020 ausgewählt, da hierfür die Verteilungen von Unfalltypen bei beteiligten Lkw auf Autobahnen zur Verfügung standen.



Abbildung II-62: Vorgehen bei der Bewertung des Sicherheitsnutzens des HALC im deutschen Unfallgeschehen.

Im Rahmen eines online mit den Projektteilnehmern abgehaltenen Workshops wurde für die detaillierten Unfalltypen eine Abschätzung abgegeben, ob der jeweilige Unfalltyp adressiert wird. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Fahrerunfälle: Von den 11 an Fahrerunfällen beteiligten Lkw-Fahrern in GIDAS, hatten 9 den Unfall verursacht. Mit Bewertung der Unfallursachen der Fälle wurde ausgewertet, dass bei 7 dieser 9 Beteiligten die Unfälle durch das HALC-System zumindest adressiert worden wären.
Adressierte unfallverursachende Beteiligte durch HALC: 7 von 9 (78%).
- Abbiegeunfälle: Diese Art des Unfalltyps ist äußerst selten auf Autobahnen. Ein Beteiligter dieses Unfalltyps hatte einen Auffahrunfall verursacht mit einem abbiegenden (abfahrenden) Beteiligten. Dieser Fall wäre durch das HALC-System adressiert worden.
Adressierte unfallverursachende Beteiligte durch HALC: 1 von 1 (100%).
- Kreuzenunfälle: Da auf Autobahnen keine Kreuzenunfälle zu erwarten sind kann hier nicht davon ausgegangen werden, dass Unfälle durch das HALC-System adressiert werden.
Adressierte Beteiligte durch HALC: (0%).
- Überschreitenunfälle: Unfälle mit Fußgängern, die die Autobahn überschreiten kommen in seltenen Fällen vor (2 Beteiligte in GIDAS), werden allerdings nicht vom HALC-System adressiert, da hierbei keine Fußgänger erkannt werden.
Adressierte unfallverursachende Beteiligte durch HALC: 0 von 2 (0%).
- Unfälle mit ruhendem Verkehr: Unfälle mit ruhendem Verkehr sind auf der Autobahn nicht zu erwarten. In GIDAS ist kein Fall vorhanden, eine Adressierung dieser Unfälle durch HALC kann entsprechend nicht bewertet werden, so dass hier davon ausgegangen wurde, dass diese Unfälle nicht adressiert werden.
Adressierte unfallverursachende Beteiligte durch HALC: (0%).
- Unfälle im Längsverkehr: Unfälle im Längsverkehr sind mit Abstand die häufigsten Unfälle von Lkw auf Autobahnen. Diese Unfälle lassen sich prinzipiell in 3 Untertypen aufteilen: Auffahrunfälle (Unfalltypen 600 – 629); Unfälle beim Spurwechsel (Unfalltypen 630 – 649) und Andere Längsverkehrsunfälle, wie z.B. beim Nebeneinanderfahren (Unfalltypen 650 – 699). Die Bewertung der Beteiligten die den Unfall verursachten, bei denen HALC eine positive Beeinflussung des Unfalls hätte haben können, fiel wie folgt aus: Bei 78 Beteiligten, die einen Auffahrunfall verursachten, wäre der Unfall durch HALC in 60 Fällen adressiert worden; bei 22 Beteiligten, die einen Unfall beim Spurwechseln verursachten hätte das HALC System in allen 22 Fällen zumindest eine Warnung ausgegeben; bei den 7 Beteiligten die die verbliebenen Unfälle des Längsverkehrs verursachten, wurde nach Durchsicht der Fallinformationen erkannt, dass HALC 4 dieser Fälle adressiert hätte.
Adressierte unfallverursachende Beteiligte durch HALC: 86 von 107 (80%).
- Sonstige Unfälle: Diese Gruppe von Unfalltypen wird bei Lkw-Unfällen auf Autobahnen überwiegend durch plötzliches körperliches Unvermögen des Fahrers oder durch Schäden am Fahrzeug beschrieben. Nach Auswertung der Unfallursachen und der Unfallanalyse zeigte sich, dass 7 dieser 12 Unfälle durch HALC zumindest adressiert worden wären.
Adressierte unfallverursachende Beteiligte durch HALC: 7 von 12 (58%).

Als Basis der Bewertung der adressierten Unfälle durch das HALC-System wurden unfallverursachende beteiligte Lkw-Fahrer gewählt. Somit können die unfallverursachenden Beteiligten, bei denen HALC die Unfallentstehung hätte positiv beeinflussen können als adressierte Unfälle gelten.

Aus den Daten, die von DESTATIS zur Verfügung gestellt wurden ergibt sich, die in Tabelle II-9 dargestellte Verteilung von Unfalltypen bei Lkw über 3,5t als Hauptverursacher der Jahre 2014-2020. Hier zeigt sich, dass mit den Anteilen der adressierten Fälle bei den verschiedenen Unfalltypen (aus der GIDAS Analyse), ein hochgerechneter Wert 3.717 von Lkw verursachten Unfällen auf Autobahnen in den Jahren durch HALC adressiert worden wäre. Dies entspricht ca. 75% aller 4.932 von Lkw auf Autobahnen verursachten Unfälle in diesem Zeitraum.

Aufgrund eines Missverständnisses mit dem Statistischen Bundesamt bei der Datenbestellung wurden allerdings nur die Zahlen für Lkw ohne Sattelzugmaschinen bereitgestellt. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass die Unfalltypverteilung von Sattelzugmaschinen der der Lkw über 3,5t stark ähnelt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass ca. 75% der Unfälle die von Lkw über 3,5t inkl. Sattelzugmaschinen auf Autobahnen verursacht wurden durch HALC zumindest adressiert werden und damit zu einer Verringerung der Unfallzahlen oder der Unfallschwere führen könnte.

Anzahl von Beteiligten Lkw auf Autobahnen als Hauptverursacher...	In Deutschland mit Personenschaden 2014 bis 2020	Anteil adressierter Unfälle durch HALC gem. GIDAS	Adressierte Unfälle in Deutschland (Hochrechnung)
...an Fahrunfällen	581	78%	453
...an Abbiegeunfällen	24	100%	24
...an Einbiegen/Kreuzen-Unfällen	56	0%	0
...an Überschreitenunfällen	1	0%	0
...an Unf. durch ruhenden Verk.	46	0%	0
...an Unfällen im Längsverkehr	3.593	80%	2.874
...an sonstigen Unfällen	631	58%	366
Summe	4.932		3.717

Tabelle II-9: Hochrechnung der adressierten Unfälle mit Lkw in Deutschland in den Jahren 2014-2020

Im Jahr 2021 ereigneten sich auf Autobahnen, verursacht durch Lkw über 3,5t und Sattelzugmaschinen 1.498 Unfälle mit Personenschaden [DESTATIS, 2021]. Mit einem bei allen Lkw vorhandenen und eingeschalteten HALC-System wären somit ca. 1.100 durch das System adressiert worden.

Zu bemerken ist bei dieser Hochrechnung, dass es sich hierbei allenfalls um einen Näherungswert handeln kann. Aufgrund der geringen Fallzahlen vor allem auch im GIDAS Unfallkollektiv sind die Anteile der adressierten Unfälle nicht statistisch signifikant.

Der Partner Spedition Bartkowiak GmbH hat zusätzlich die Untersuchung der Unfall-/Versicherungsdaten der letzten 10 Jahre zur Darstellung bereitgestellt und analysiert, inwieweit ein HALC-System zur Vermeidung dieser Schäden hätte beitragen können.

Art des Schadens	Anzahl/ Jahr	Kilometer je 1 Schaden
Streifschäden	5	673.597
beim Abbiegen	3,6	935.552
gegen Leitplanke	0,8	4.209.983
Spurwechsel	0,4	8.419.966

Abbildung II-63: Bisherige Schäden, die durch HALC hätten verhindert werden können - betrifft 19,8 % aller jährlichen Schäden

251 gemeldete KFZ-Versicherungsschäden

Analyse aktueller Unfallstatistiken Spedition Bartkowiak GmbH Zeitraum 2016-2020

- 36 Sattelzugmaschinen
- 50 Auflieger (Trailer)
- 16.839.929 gefahrene Kilometer
- 202.079.148 Kilometer Reifenlaufleistung (bezogen auf einen Reifen)
- 58.169 Aufträge (entspricht min. 116.338 Be- und Entladungen)

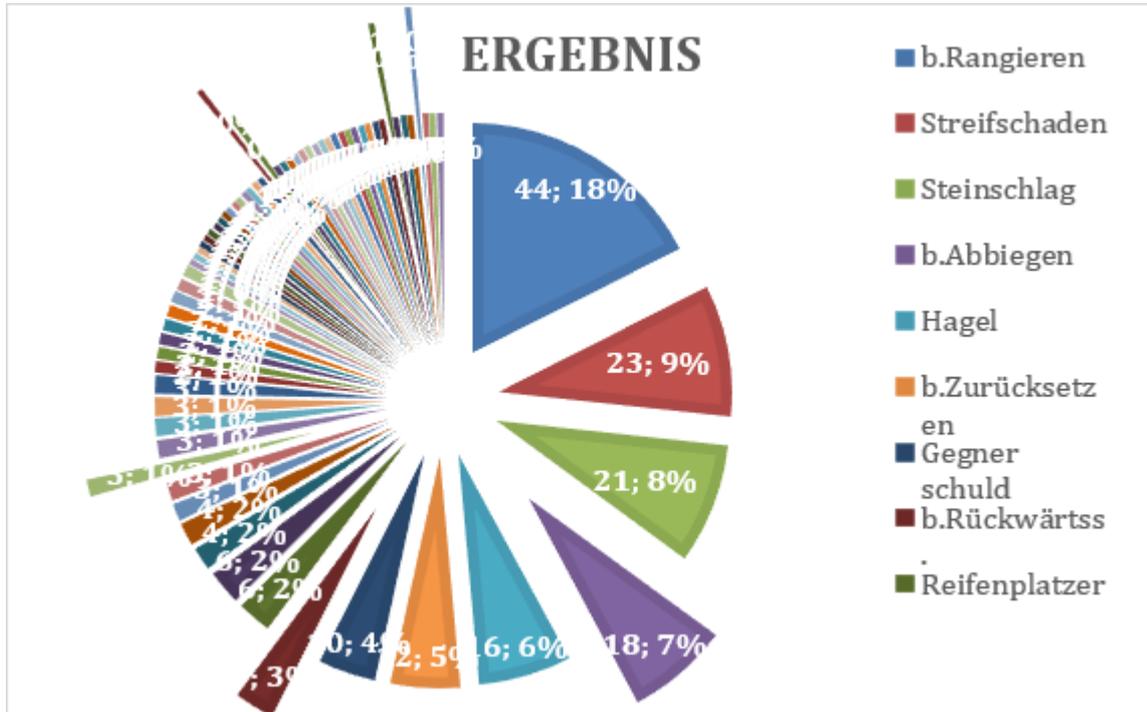


Abbildung II-64: Rangierschäden (bei 18 von 44 Schäden konnte man die Position am Fahrzeug zuordnen)

3. Notwendige Änderungen in der Zielsetzung

Nach planmäßigem Erreichen des Meilensteins M5 im Januar 2022, bei der die Teilfunktionalitäten zur Umfeldmodellierung, Längsführung, Querführung zur Vorbereitung für den geführten Fahrstreifenwechsel verfügbar und integrierbar für Testfahrten auf der ZF-Testbahn zur Verfügung stehen sollten, wurde ein Review der bisher erzielten Ergebnisse durchgeführt.

Dabei wurde festgestellt, dass die Umfelderkennung nicht die an sie gestellten Ansprüche erfüllt. So wurden z.B. Fahrstreifen bei nasser, beschädigter oder verschmutzter Fahrbahn nicht oder falsch vom verwendeten Algorithmus erkannt.

Die sichere Erkennung der Fahrstreifen, bzw. der Position des eigenen Fahrzeuges auf dieser, ist jedoch von essenzieller Bedeutung und wurde als unverzichtbar anzusehen. Ohne diese können die darauf aufbauenden Regelfunktionen zur Quer- und Längsführung zu einem falschen und unerwarteten Verhalten mit Gefährdung des eigenen Fahrzeuges sowie der anderen Verkehrsteilnehmer führen.

Die auf dem Highway Assist aufbauende Funktion, der geführten Fahrstreifenwechsel (Lane Change), erforderte sogar eine noch umfassendere Umfelderkennung inklusive der parallel verlaufenden Fahrspuren sowie den Bereichen um das eigene Fahrzeug, den darauf befindlichen Fahrzeugen und deren Referenzgeschwindigkeiten. Im Arbeitspaket 2 wurden etliche Use-Case Szenarien erarbeitet, die zwingend vom Lane Change System berücksichtigt werden sollten. Als Beispiele seien hier die Erkennung von Fahrbahnendungen, -zusammenschlüssen oder -erweiterungen, sowie die rechtzeitige Erkennung von Stausituationen aufgeführt. Somit hat sich die Komplexität dieser Funktion als höher als erwartet herausgestellt.

Nach interner Rücksprache hatte sich das HALC-Konsortium entschlossen, die Projektziele den Gegebenheiten wie nachfolgend erläutert anzupassen.

3.1.1. Aktives HALC-System nur in ZF-Fahrzeugen mit besonderen Sicherungsmaßnahmen

Das Konsortium sah die Gefahr von Fehlfunktionen eines aktiven HALC-Systems auf öffentlichen Straßen in Fahrzeugen des Partners Bartkowiak GmbH mit eigenen Fahrern aufgrund der bisher vorliegenden Ergebnisse als sehr hoch an. Deshalb sollten Fahrten mit aktivem HALC-System lediglich auf ZF-Testfahrzeugen mit speziellen Sicherungsmaßnahmen erfolgen.

Um dennoch Erfahrungen professioneller Berufskraftfahrer einzuholen, sollten diese begleitete Fahrten mit den ZF-Fahrzeugen durchführen. Dabei achtete der Begleiter von ZF auf die Reaktionen des Fahrers auf das HALC-System, die korrekte Ausführung der Regelfunktionen und konnte in kritischen Situationen entschärfend einschreiten.

3.1.2. Erweitertes Sammeln von realen Messdaten durch Einbau von Sensorik im Bartkowiak Fahrzeug sowie Nutzung existierender Systeme zur Erkennung von Fahrstreifenwechsellmöglichkeiten

Um Verbesserungen der Umfelderkennung und der Regelalgorithmen zu erreichen, sollten mehr Daten durch Messfahrten gesammelt, der Auswertesoftware im Labor zugeführt und somit sukzessive optimiert werden. Unterstützend wurde ein Fahrzeug des Partners Bartkowiak GmbH mit identischer Sensorik, Datenloggern und Referenzkameras versehen.

Des Weiteren wurde in diesem Fahrzeug das verfügbare passive Spurwechsel-Assistenzsystem von ZF installiert, welches auf Basis von SRR (Short Range Radar) gemäß ISO 17387 (Lane Change Decision Aid System) bei Eindringen von Objekten in den Überwachungsraum Warnmeldungen in 2 Stufen generiert, wobei die zweite Stufe an die Betätigung des Fahrstreifenwechselanzeigers gekoppelt ist. Das gleiche System wurde im ZF-Fahrzeug zur Erkennungsmöglichkeit des Fahrstreifenwechsels für den aktiven Spurwechsel genutzt. Somit war hier eine gemeinsame Basis gegeben.

3.1.3. Durchführung ausgewählter Use-Cases für den Fahrspurwechsel ausschließlich auf der ZF Testbahn

Es wurden ausgewählte typische Use-Cases des automatisierten aktiven Fahrspurwechsels unter Nutzung des existierenden LCDAS Systems auf der Testbahn mit ZF-Testfahrzeugen umgesetzt und die daraus gewonnen Erkenntnisse für die Weiterentwicklung nach Projektende weiter genutzt.

4. Im Zeitraum des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Spurwechselassistenten sind momentan vorwiegend im PKW-Bereich anzutreffen⁴.

2015 debütierte Mercedes-Benz in der E-Klasse als Funktionserweiterung mit dem sogenannten Aktiven Spurwechselassistent, der beim Überholen hilft. Dazu muss der Fahrer den Blinker zum Fahrspurwechsel länger als zwei Sekunden halten und schon lenkt die Business-Limousine selbstständig auf die Nachbarspur.

Zur Überwachung des Umfelds kommen ein Fernbereichsradar und eine Stereokamera zum Einsatz. Andere Premiumhersteller wie BMW bieten einen solchen Überholassistenten ebenfalls bereits an. Auch Tesla hat dem Model 3 eine vergleichbare Funktion spendiert.

Typische Funktionsbezeichnungen sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Mazda	Rear Vehicle Monitoring
VW	Side Assist
Volvo	BLIS (Blind Spot Information System)
Mercedes-Benz	Aktiver Totwinkel-Assistent / Aktiver Spurwechsel-Assistent
BMW	Spurwechselwarnung / Spurwechselassistent
Opel	Toter-Winkel-Warnung
Ford	Toter-Winkel-Assistent
Audi	Side Assist / Active Lane Assist
Lexus	Blind Spot Monitoring
Nissan	Blind Spot Intervention

Tabelle II-10: Spurwechselassistenten Bezeichnungen unterschiedlicher Hersteller

Im Nutzfahrzeugbereich ist eine automatische Spurwechselfunktion bisher nicht bekannt. So verfügen einige Hersteller wie z.B. Bosch oder MAN über Spurhaltefunktionen oder Spurwechselwarnsysteme, jedoch ohne aktive Lenkunterstützung beim Fahrspurwechsel.

Die UNECE⁵ Gruppe des ACSF (Automatically Commanded Steering Function) erarbeitet in der R79 Regularien für geführte Fahrspurhalte und -wechselfunktionen.

Für Kategorie C Funktionen (Lane Change Systems), schreibt die ECE R79 im derzeitigen Draft vor, den Bereich hinter dem Fahrzeug mit mind. 55m überwachen zu können.

Das kann mit anhängenlosen LKWs und entsprechender Sensorik erreicht werden, erweist sich jedoch als problematisch bei Aufbauten mit Hängern, die zudem bei Kurvenfahrten gewisse zu überwachende Bereiche überschatten können.

⁴ <https://www.mobile.de/magazin/artikel/so-funktioniert-der-spurwechselassistent-9532>

⁵ <https://unece.org>

Um diesem Problem entgegen zu können wird diskutiert am Anhänger befestigte Sensoren sollen über eine neuartige Schnittstelle diese Informationen zum Zugfahrzeug senden.

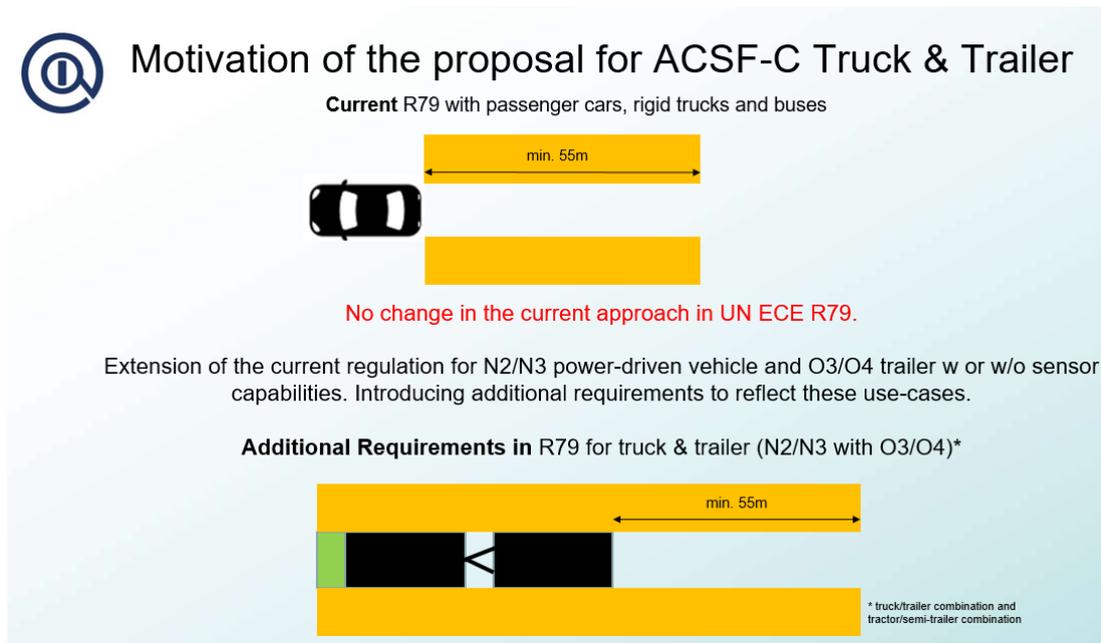


Abbildung II-65: UN ECE R79 Regularie für ACSF

5. Zusammenfassung und Ausblick

Das Verbundprojekt HALC kann als Ganzes als sehr erfolgreich bezeichnet werden. So gelang es dem Konsortium, ausgehend aus aktuellen Unfallstatistiken und -szenarien, prinzipiellen Basisfunktionen wie Abstandstempomat und Spurhalteassistenzen, in Zusammenarbeit mit Analysten und Berufskraftfahrern einen Systemvorschlag zu erarbeiten, der neben den reinen Regelfunktionen auch den Faktor Mensch einbezieht und die Zusammenarbeit bei der Ausführung der Fahraufgaben anbietet.

ZF als TIER-1 Zulieferer für namhafte Hersteller von Nutzfahrzeugen, wird dieses Thema weiterverfolgen und entsprechend optimieren. Dabei werden Teilaspekte der HALC-Funktion in das ADAS Programm OnGuardMaxx™ der nächsten Generationsstufen eingearbeitet.