

## Document Control Sheet

|   |  |
|---|--|
| 1. ISBN or ISSN<br>planned  | 2. type of document (e.g. report, publication)<br>Final report |
| 3. title<br>Ko-HAF– Cooperative Highly Automated Driving<br>Final Report BMW AG   |  |
| 4. author(s) (family name, first name(s))<br>Paradies, Svenja<br>Panhuber, Christian<br>Zahn, Peter<br>Fahrenkrog, Felix<br>Schaermann, Alexander<br>Rauch, Andreas | 5. end of project<br>November 2018                             |
|   | 6. publication date<br>planned                                 |
|   | 7. form of publication<br>Document                             |
| 8. performing organization(s) (name, address)<br><br>Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft<br>Petuelring 130<br>80788 München                                 | 9. originator's report no.<br>-                                |
|   | 10. reference no.<br>19S14002D                                 |
|   | 11. no. of pages<br>97   |
| 12. sponsoring agency (name, address)<br><br>Bundesministerium für<br>Wirtschaft und Energie (BMWi)<br>11019 Berlin   | 13. no. of references<br>15                                    |
|   | 14. no. of tables<br>6   |
|   | 15. no. of figures<br>97                                       |
| 16. supplementary notes<br>-  |  |
| 17. presented at (title, place, date)<br>Projektträger Mobilität und Verkehrstechnologien, Am Grauen Stein, 51105 Köln<br>24.05.2019                                |  |

### 1. State-of-the-Art of Science and Technology

Autonomous driving functions have been demonstrated in several research cars (e.G. LEONI, CyberCars, Google) and the general feasibility could be proved. When vehicles are operated in public traffic, there will always be situations which autonomous systems will not be able to master independently, therefore the use of driverless cars in mixed public traffic is still unrealistic for the near future. Highly automated driving (with driver involvement) has hardly ever been demonstrated in research projects. Even for the partly automated functions demonstrated in the previous projects, the evaluation was mostly conducted in selected scenarios on restricted road sections. The HAF functionalities that had been presented by several Ko-HAF project partners before the project, mostly fall under generation 1. Moreover, it must be noted that the cars rode along pre-defined sections of road and scenarios in a reproducible way (with a single test vehicle) that had previously been digitalized manually in a high-precision manner.

### 2. Motivation and Goals

The associated project Ko-HAF (the German abbreviation stands for co-operative, highly automated driving) aims at the next essential step towards autonomous driving, which is highly automated driving. High automation is characterized by the fact that the vehicle takes over the longitudinal and transversal control, and the driver does not need to monitor the vehicle continuously anymore but must be able to take over after a certain time margin. The first generation of highly automated driving (HAD) addresses the lowest and the low speed range in simple traffic situations like traffic jams on highways on the basis of autonomous on-board sensors. The second generation that is being applied for with this project aims at controlling the higher speed ranges on well-developed traffic infrastructure in order to attain increases in safety, traffic efficiency and comfort in these situations. A considerable technical innovation boost as compared to the first generation will be required to achieve this. The special challenges for Ko-HAF arise from the

- required high level of foresight of the environment perception (the Ko-HAF approach of the so-called collective perception is based on the communication of the vehicles with the so-called safety server);
- the required precise self-localization in the vehicle for the fusion of the data collected by the vehicle's own sensors with the information provided by the safety server;
- the integration of the driver into the highly automated system;
- the extended functions for highly automated driving including emergency mode; and from
- testing and validating the complete system.

### 3. Approach

In order to meet these challenges, five technical work packages ("APs") are introduced:

#### *AP1 environment perception and representation in the backend (safety server)*

The range of the vehicle sensors is generally limited to their visual horizon. Shading due to the course of the road or other vehicles additionally reduces the foresight. In order to compensate for the limited range of the vehicle's sensors and occlusions due to the road course and other vehicles, the environment perception and modelling is to be extended by the focus of the project, collective perception. It is to be carried out in form of a back-end solution by means of a so-called safety server, which considers the data of HAD vehicles (such as on-board sensor data like the quality of road markings or objects on the road) and traffic information that is already available and represents them in a digital map, precise by lane, so that an up-to-date, precise image of the traffic situation is created. The aggregation of all the data provided by Ko-HAF vehicles in the server and the evaluation of the result are tasks that must be fulfilled centrally. Only consolidated data will be sent back to the individual cars. These data will qualify lanes for highly-automated driving or indicate spaces for possible avoiding maneuvers, etc.

#### *AP2 Localization and static environment model (vehicle)*

*Exact vehicle localization:* In addition to the environment information, the server sends the geo coordinates of various landmarks to the vehicles, which the vehicle can use for a more accurate self-localization. This allows for an accurate association of all the relevant information in the vehicle to the map.

*Fusion of the environment representation (learning digital map):* In the vehicle, the data arriving via mobile communication systems are to be merged with data from the vehicle's own environment sensors to form an overall image. The reliability of the individual sources and the age of the data must be considered. In case of differences between the environment perception in the vehicle and that data from the server, there must be a feedback of these differences to the server so that the layered map can be continuously updated.

#### *AP3 Cooperative driving and controllable automation*

Due to technical improvements, second generation HAD functions will allow for substantial longer usage periods of the automation. Moreover, these systems will be able to handle increasingly complex driving situations. Nevertheless, it is still the driver who is the fallback level for SAE level 3 systems, which means the driver still needs to take-over control in case the system reaches its limits. The driver's availability is a crucial factor for successful transitions from the system back to the driver. The driver's availability is affected by several known effects of automation such as hypo vigilance or mode confusion. Also non-driving-related tasks (e.g. infotainment features) may cause driver distraction and may influence the availability of the driver.

BMW will conduct several studies to examine the impact of passive task related fatigue as well as certain non-driving-related tasks during prolonged HAD. As a prerequisite, a common methodology for the evaluation of take-over situations needs to be defined. This includes developing systematics and metrics and refining new and existing evaluation methods. On the basis of the previous results we design and evaluate ideas for an optimized HMI concept for take-over situations.

#### *AP4 Function development for normal and emergency operation*

The collective perception allows the vehicles to move in an anticipating and comfortable way. The highly automated functions can be carried out earlier and safer due to a larger foresight. Hasty take-over maneuvers or emergency braking interventions will only occur very rarely. Accidents in automation mode or transition mode will become less likely and the automation will become safer.

Especially the following functions for the second generation HAD are to be developed and evaluated: The anticipatory handling of dangerous situations, automated merging, crossing highway interchanges, considering known roadworks and emergency mode for transferring the vehicle into a safe state.

#### *AP5 Test and validation*

For the test and validation of second generation HAD functions appropriate system structures and system tests must be specified and carried out. Up to now, there are no pertinent experiences. Therefore, setting up a general method for the test and validation of HAD systems, including possible special situations and consideration of different evaluation tools (simulation, hardware tests etc.) are important.

## 4. Results

In the above-mentioned work packages, the following results were achieved:

#### *AP1 environment perception and representation in the backend (safety server)*

In Ko-HAF, a safety server has been realized which connects to the test vehicles via communication units. Among other aspects, the communication interfaces have been defined on the basis of the SENSORIS standard under participation of BMW. Thus, information about hazard spots, changes of the map, etc. could be aggregated on the server using data from the test vehicles and broadcasted back to vehicles again in a consolidated form. Additionally, BMW developed an algorithm for automated map generation in this work package.

#### *AP2 Localization and static environment model (vehicle)*

Within this work package, BMW has developed a high-precision self-localization on the basis of GNSS and on-board sensors, as well as an estimation of the static vehicle environment. Among other aspects, the evaluation of the accuracy and integrity of the self-localization and map data were in focus. For this reason, suitable algorithms were developed, prototypically implemented and tested.

#### *AP3 Cooperative driving and controllable automation*

In cooperation with the project partners BMW has established the methodological basis for the evaluation of system initiated transitions by defining and categorizing testing scenarios and metrics. Furthermore we defined a transition model which incorporates the concept of driver availability. We developed a new expert-based rating method (Take-Over-Controllability-Rating "TOC") and adopted existing methods like the so-called Wizard-of-Oz approach for the HAD context to enlarge the range of methods for controllability evaluation.

In total, BMW conducted eight studies and derived conclusions about the impact of passive task related fatigue and non-driving-related tasks during prolonged HAD. We designed optimized transition concepts and evaluated them in a simulator study. The results and conclusions of the empirical work were consolidated within the project and summarized as key findings.

#### *AP4 Function development for normal and emergency operation*

A 360° environment model aggregating all relevant static and dynamic information of all sensors was developed, implemented, filled, verified and evaluated.

An enhanced, centrally optimizing trajectory planning method supporting higher dynamics was designed, implemented and evaluated in simulation and test vehicles. It allows for normal driving trajectory planning as well as seamless emergency trajectory planning using parametrizable higher dynamics e.g. in evasion situations. Predictive lane selection was implemented for traversing driveways and motorway junctions.

A new method for safeguarding any trajectories was designed, implemented and evaluated in simulation and test vehicles. This is performed by computing additional fail-safe trajectories ending within a safe state for all planned trajectory candidates. A method for rating trajectories and selecting regulation compliant trajectory sets was developed. For the sake of safety, such an existing fail-safe trajectory is a prerequisite for further following any current trajectory. Whenever sudden unexpected events or even sensor failures arise, a precomputed fail-safe trajectory will be followed instead.

Test vehicles were built up. The performance of those new algorithms and methods in normal and emergency situations like swerving and braking was tested and evaluated in numerous test drives and demonstrated at the Ko-HAF final event.

#### *AP5 Test and validation*

A concept for the efficient test and validation of highly automated driving functions has been developed under participation of BMW. For this purpose, scenario and test case catalogues have been defined for the highly automated driving functions developed in AP4. For the system tests, BMW focused on virtual testing, developing a method for sensor model validation and performing an extensive effectiveness analysis. In addition to that, BMW participated in the planned real-world tests in Ko-HAF.

### 5. Conclusion and Applications

Summing up, Ko-HAF brought the development of highly automated driving a big step forward. Important improvements were the advancements in essential components like

- A cross-partner backend solution for highly automated driving for the consolidation and aggregation of the data from the highly automated vehicles into a precise and up-to-date layered map,
- A precise, robust and highly available vehicle self-localization on the basis of a learning digital map as necessary prerequisite for highly automated driving,

- Concepts for controllable automation and efficient hand-over of the driving task to the human driver,
- A cooperative highly automated driving function including the ability to handle corner cases and critical situations and the test of this driving function on test grounds and in real-world traffic,
- A holistic concept for the test of highly automated driving functions in real-world and virtual environments.

These results from Ko-HAF can contribute to the following pre-development and series development processes in the near future and thus to a faster introduction of new partially and highly automated systems.

19. keywords

Highly Automated Driving, Safety Server, HMI, Driver Take-Over, Test, Validation

20. publisher

-

21. price

-

## Berichtsblatt

|  |   |
|--|---|
| 1. ISBN oder ISSN<br>geplant   | 2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)<br>Schlussbericht |
| 3. Titel<br>Ko-HAF – Kooperatives Hochautomatisiertes Fahren<br>Schlussbericht BMW AG  |   |
| 4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]<br>Paradies, Svenja<br>Panhuber, Christian<br>Zahn, Peter<br>Fahrenkrog, Felix<br>Schaermann, Alexander<br>Rauch, Andreas | 5. Abschlussdatum des Vorhabens<br>November 2018                        |
|  | 6. Veröffentlichungsdatum<br>geplant                                    |
|  | 7. Form der Publikation<br>Dokument                                     |
| 8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)<br><br>Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft<br>Petuelring 130<br>80788 München                       | 9. Ber. Nr. Durchführende Institution<br>-                              |
|  | 10. Förderkennzeichen<br>19S14002D                                      |
|  | 11. Seitenzahl<br>97  |
| 12. Fördernde Institution (Name, Adresse)<br><br>Bundesministerium für<br>Wirtschaft und Energie (BMWi)<br>11019 Berlin                                      | 13. Literaturangaben<br>15  |
|  | 14. Tabellen<br>6   |
|  | 15. Abbildungen<br>97   |
| 16. Zusätzliche Angaben<br>-   |   |
| 17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)<br>Projekträger Mobilität und Verkehrstechnologien, Am Grauen Stein, 51105 Köln<br>24.05.2019                          |   |

1. Derzeitiger Stand von Wissenschaft und Technik

Autonomes (d.h. fahrerloses) Fahren wurde in mehreren Forschungsfahrzeugen dargestellt (z.B. LEONI, CyberCars, Google). Mit ihnen konnte die generelle Machbarkeit gezeigt werden. Beim Betrieb von Fahrzeugen im öffentlichen Verkehr wird es immer wieder Situationen geben, die vom autonomen System nicht selbstständig durchfahren werden können, weswegen der Einsatz von fahrerlosen Fahrzeugen im gemischten öffentlichen Verkehr auch in naher Zukunft als unrealistisch einzuschätzen ist. Hochautomatisiertes Fahren (mit Fahrereinbindung) wurde bisher auch in Forschungsprojekten kaum gezeigt. Selbst bei den in Vorgängerprojekten gezeigten teilautomatisierten Funktionen erfolgte die Evaluierung überwiegend in ausgewählten Szenarien auf abgesperrten Streckenabschnitten. Die von mehreren Ko-HAF Projektpartnern vor Ko-HAF gezeigten HAF-Funktionalitäten entsprechen überwiegend der Generation 1. Weiterhin ist zu beachten, dass dabei vorab definierte Streckenabschnitte und Szenarien reproduzierbar (mit einem einzigen Testfahrzeug) durchfahren wurden, die zuvor hochpräzise digitalisiert und händisch verarbeitet wurden.

2. Begründung und Zielsetzung der Untersuchung

Das Verbundprojekt Ko-HAF – kooperatives hochautomatisiertes Fahren – zielt auf den nächsten wesentlichen Schritt in Richtung autonomes Fahren, das hochautomatisierte Fahren. Hochautomatisierung ist dadurch charakterisiert, dass das Fahrzeug Längs- und Querführung übernimmt und der Fahrer das System nicht mehr dauerhaft überwachen, jedoch in der Lage sein muss, die Steuerung des Fahrzeugs nach Aufforderung mit einer gewissen Zeitreserve zu übernehmen. Die erste Generation des hochautomatisierten Fahrens (HAF) adressiert den niedrigsten und niedrigen Geschwindigkeitsbereich in einfachen Verkehrssituationen wie dem Autobahnstau auf Basis bordautonomer Sensorik. Die zweite, in diesem Vorhaben beantragte Generation soll den höheren Geschwindigkeitsbereich auf gut ausgebauter Verkehrsinfrastruktur beherrschen, um für diesen geläufigen Verkehrszustand Steigerungen von Sicherheit, Verkehrseffizienz und Komfort zu erreichen. Dafür ist gegenüber der ersten Generation ein deutlicher technischer Innovationschub erforderlich. Die besonderen Herausforderungen von Ko-HAF ergeben sich aus

- der benötigten hohen Vorausschaureichweite der Umfeldwahrnehmung (der Ko-HAF Lösungsansatz so genannter kollektiver Perzeption basiert auf der Kommunikation der Fahrzeuge mit dem so genannten Safety Server),
- der erforderlichen präzisen Eigenlokalisierung im Fahrzeug zur Fusion der über die eigene Fahrzeugsensorik ermittelten Daten mit den über den Safety Server bereit gestellten Informationen,
- der Einbindung des Fahrers in das hochautomatisierte System (der Lösungsansatz besteht in einer Mensch-Maschine-Schnittstelle, die für Mode Awareness beim Fahrer und für eine vorausschauende und sicherere Fahrweise sorgt),
- den Funktionserweiterungen für hochautomatisiertes Fahren einschließlich des Notbetriebs sowie aus
- der Absicherung und Erprobung des Gesamtsystems.

3. Methode

Um die genannten Zielsetzungen zu erfüllen, werden fünf technische Arbeitspakete eingeführt:

*AP1 Umfelderkennung und -repräsentation im Backend (Safety Server)*

Um die begrenzte Reichweite der Fahrzeugsensorik und Abschattungen durch Straßenverlauf und andere Fahrzeuge zu kompensieren, soll die Umfelderkennung und -modellierung um den Schwerpunkt des Projekts, eine kollektive Wahrnehmung, erweitert werden. Sie soll in Form einer Backend-Lösung mittels eines sogenannten Safety Servers erfolgen, der die Daten von HAF-Fahrzeugen (etwa Onboard-Sensordaten wie Präsenz und Qualität von Spurmarkierungen oder Objekte auf der Fahrbahn) sowie bereits heute verfügbare Verkehrsinformationen berücksichtigt und in die fahrspurgenaue digitale Karte abbildet, so dass ein aktuelles, präzises Bild der Verkehrssituation entsteht. Die Aggregation der von allen Ko-HAF Fahrzeugen bereitgestellten Daten im Server und die Bewertung des Ergebnisses sind die zentralen zu erfüllenden Aufgaben. An die einzelnen Fahrzeuge werden anschließend konsolidierte Daten zurückgeliefert, die Fahrspuren für hochautomatisiertes Fahren qualifizieren oder z.B. Freiräume für mögliche Ausweichmanöver ausweisen.

#### *AP2 Lokalisierung und statisches Umfeldmodell (Fahrzeug)*

*Genaue Fahrzeuglokalisierung:* Neben den Umfeldinformationen sendet der Server zusätzlich die Geokoordinaten verschiedener Landmarken an die Fahrzeuge, welche dann im Fahrzeug zur genaueren Eigenlokalisierung genutzt werden können. Dies ermöglicht eine genaue Zuordnung aller relevanten Informationen im Fahrzeug zur Karte.

*Fusion der Umfeldrepräsentation (lernende digitale Karte):* Im Fahrzeug sind die über Mobilfunk eintreffenden Daten mit den Daten der eigenen Umfeldsensorik zu einem Gesamtbild zu verschmelzen. Dabei sind die Zuverlässigkeit der einzelnen Quellen sowie die Aktualität der Daten zu berücksichtigen. Bei Abweichungen zwischen Umfelderkennung im Fahrzeug und den Daten vom Server muss eine Rückkopplung dieser Abweichungen an den Server gesendet werden, damit die geschichtete Karte kontinuierlich aktualisiert werden kann.

#### *AP3 Kooperative Fahrzeugführung und kontrollierbare Automation*

Durch technische Verbesserungen sind für die HAF-Systeme der zweiten Generation erheblich längere Dauern im hochautomatisierten Modus zu erwarten. Ebenso werden diese Systeme deutlich komplexere automatisierte Fahrmanöver bewältigen. Dennoch ist der Fahrer bei SAE Level 3 nach wie vor die Rückfallebene und muss im Falle des Erreichens von Systemgrenzen die Kontrolle wieder übernehmen. Die sogenannte Fahrer Verfügbarkeit ist für eine erfolgreiche Transition vom System hin zum Fahrer von zentraler Bedeutung. Sowohl bekannte Automationseffekte (Hypovigilanz, Mode Confusion), die durch monotone Aufgaben verstärkt werden, als auch Ablenkungsphänomene durch die Bearbeitung von bisher tertiären Tätigkeiten (z.B. Infotainment-Applikationen) verändern die Verfügbarkeit des Fahrers.

In Studien sollen die Einflüsse von passiver aufgabenbezogene Müdigkeit sowie von fahrfremder Tätigkeiten im Zusammenhang mit längeren Automatisierungsdauern untersucht werden. Voraussetzung dazu ist die vorherige Systematisierung und Erweiterung der methodischen Grundlagen für die Kontrollierbarkeitsbewertung von Übernahme-situationen. Aufgrund der Ergebnisse wird ein optimiertes HMI-Konzept für Transitionen erstellt und bewertet.

#### *AP4 Funktionsentwicklung für Normal- und Notbetrieb*

Die kollektive Perzeption erlaubt den Fahrzeugen eine vorausschauende und komfortable Fahrweise. Die automatisierten Funktionen können durch die weitere Vorausschau frühzeitiger und sicherer eingreifen. Hastige Übergabemanöver oder Notbremsen werden nur noch sehr selten vorkommen. Unfälle im Automations- oder Transitionsbetrieb werden unwahrscheinlicher und die Automation sicherer.

Im Projekt sollen insbesondere folgende Funktionen für HAF Generation 2 entwickelt und evaluiert werden: Der vorausschauende Umgang mit Gefahrenstellen, automatisiertes Einfädeln, das Durchfahren von Autobahnkreuzen, die Berücksichtigung bekannter Baustellen sowie der Notbetrieb zum Überführen des Fahrzeugs in den sicheren Zustand.

#### *AP5 Absicherung und Erprobung*

Für die Absicherung von HAF-Funktionen der zweiten Generation sind geeignete Systemstrukturen und Systemtests zu spezifizieren und durchzuführen. Bisher liegen hierfür keine Erfahrungen vor. Wichtig sind daher die Erarbeitung einer generellen Methode zur Absicherung von HAF einschließlich möglicher Sondersituationen sowie die Betrachtung unterschiedlicher Bewertungstools (Simulation, Hardwaretests etc.).

#### 4. Ergebnis

In den genannten Arbeitspaketen wurden folgende Ergebnisse erreicht:

##### *AP1 Umfelderkennung und -repräsentation im Backend (Safety Server)*

In Ko-HAF wurde ein Safety Server realisiert, der über Kommunikationseinheiten in den Versuchsträgern mit den hochautomatisierten Systemen in Verbindung steht. Unter Beteiligung von BMW wurden im Projekt insbesondere die Kommunikationsschnittstellen auf Basis des SENSORIS

Standards definiert. Auf dem Server konnten so mit Hilfe der Daten aus den Fahrzeugen Informationen über Gefahrenstellen, Änderungen in der Karte, etc. aggregiert und den Fahrzeugen in aufbereiteter Form zur Verfügung gestellt werden. BMW hat darüber hinaus im Rahmen des Arbeitspaketes einen Algorithmus zur automatisierten Kartenerstellung entwickelt.

#### *AP2 Lokalisierung und statisches Umfeldmodell (Fahrzeug)*

BMW hat im Rahmen dieses Arbeitspaketes eine hochgenaue Eigenlokalisierung auf Basis von GNSS und fahrzeuglokalen Sensoren sowie eine Schätzung der statischen Fahrzeugumgebung entwickelt. Im Fokus dabei standen insbesondere die Bewertung von Genauigkeit und Integrität der Eigenlokalisierung und der Kartendaten. Hierfür wurden entsprechende Algorithmen entwickelt, prototypisch implementiert und erprobt.

#### *AP3 Kooperative Fahrzeugführung und kontrollierbare Automation*

BMW hat zunächst in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern die methodischen Grundlagen für die Bewertung der Kontrollierbarkeit von systeminitiierten Transitionen geschaffen: Es wurden u.a. Prüfscenarien und Messmetriken spezifiziert und systematisiert und ein Übernahmmodell definiert unter Berücksichtigung der Fahrer Verfügbarkeit. Neue entwickelte methodische Ansätze (z.B. TOC-Rating) bzw. die Weiterentwicklung existierender Methoden (z.B. Wizard-of-Oz-Ansatz) erweitern zukünftig die Möglichkeiten der Kontrollierbarkeitsbewertung.

In insgesamt 8 Studien konnten wichtige Erkenntnisse zu den Einflüssen von passiver aufgabenbezogene Müdigkeit sowie von fahrfremder Tätigkeiten im Zusammenhang mit längeren Automatisierungsdauern untersucht werden. Es wurden optimierte Transitionskonzepte entwickelt und experimentell getestet. Die Erkenntnisse wurden im Projektkonsortium konsolidiert und in key messages überführt.

#### *AP4 Funktionsentwicklung für Normal- und Notbetrieb*

Ein 360° Umfeldmodell, das alle relevante statische Information aller Sensoren aggregiert, wurde entwickelt, umgesetzt, befüllt, verifiziert und evaluiert.

Ein erweitertes Verfahren zur Trajektorienplanung, das höhere Fahrdynamik unterstützt, wurde konzipiert, implementiert und in Simulation und Versuchsträgern evaluiert. Es ermöglicht die Planung normaler Fahrtrajektorien ebenso wie die nahtlos anschließende Planung von Notfalltrajektorien mit parametrisierbar höherer Dynamik, beispielsweise in Ausweichsituationen. Eine vorausschauende Fahrstreifenwahl für die Befahrung von Autobahn Auf- und Abfahrten sowie Autobahnkreuzen wurde realisiert.

Eine neue Methode zur Absicherung aller Trajektorien wurde konzipiert, implementiert und in Simulation und Versuchsträgern evaluiert. Die Absicherung erfolgt durch die Berechnung zusätzlicher Rückfalltrajektorien, die in einem sicheren Zustand enden, für alle geplanten Trajektorien-Kandidaten. Auf diese Weise ist zur Gewährleistung der Sicherheit das Vorhandensein einer zusätzlichen Rückfalltrajektorie Voraussetzung für das Verfolgen jeder aktuell verfolgten Trajektorie. Für den Fall unvorhergesehener Ereignisse oder gar von Sensorausfällen wird die zuvor berechnete Absicherungstrajektorie in den sicheren Zustand verfolgt.

Es wurden Versuchsträger aufgebaut. Die Leistungsfähigkeit der neuen Algorithmen und Verfahren wurde in Normal- und Notfallsituationen wie Ausweichen und plötzliches Bremsen auf zahlreichen Testfahrten geprüft und auf der Ko-HAF Abschlussveranstaltung demonstriert.

#### *AP5 Absicherung und Erprobung*

Unter Beteiligung von BMW wurde eine Methodik zur bedarfsgerechten Erprobung hochautomatisierter Fahrfunktionen entwickelt. Zu diesem Zweck wurden u.a. Szenarien- und Testfallkataloge für die in AP4 entwickelten hochautomatisierten Fahrfunktionen entwickelt. Bei der Systemerprobung lag der Fokus von BMW auf der virtuellen Erprobung. Hier wurde u.a. eine Methode zur Sensormodellvalidierung entwickelt und umfangreiche Wirksamkeitsanalysen durchgeführt. Darüber hinaus hat sich BMW an den im Rahmen des Projekts geplanten Realerprobungen beteiligt.

## 5. Schlussfolgerung und Anwendungsmöglichkeiten

Insgesamt hat Ko-HAF die Entwicklung zum hochautomatisierten Fahren einen entscheidenden Schritt näher gebracht. Wichtige Bausteine dafür waren die Weiterentwicklungen von essentiellen Komponenten, wie z.B.

- einer partnerübergreifenden Backend-Lösung für hochautomatisiertes Fahren zur Konsolidierung und Aggregation der Daten der HAF-Fahrzeuge in einer präzisen, aktuellen und geschichteten Karte,
- einer genauen, robusten und hochverfügbaren Fahrzeugeigenlokalisierung auf Basis einer lernenden digitalen Karte als notwendige Basistechnologie zum hochautomatisierten Fahren,
- von Konzepten zur kontrollierbaren Automation und effizienten Übergabe der Fahraufgabe an den Fahrer,
- einer kooperativen hochautomatisierten Fahrerassistenzfunktion inkl. Behandlung von Sonder- und Notsituationen und Erprobung dieser Funktion auf Testgeländen und im Realverkehr,
- eines ganzheitlichen Konzepts zur Erprobung hochautomatisierter Fahrerassistenzfunktionen im Realversuch und der virtuellen Erprobung.

Diese Forschungsergebnisse aus Ko-HAF können zeitnah in die nachgeordneten Vorentwicklungs- und Entwicklungsprozesse eingesteuert werden und so zur frühzeitigen Umsetzung neuer teil- und hochautomatisierter Assistenzfunktionen beitragen.

19. Schlagwörter

Hochautomatisiertes Fahren, Safety Server, HMI, Fahrerübernahme, Test, Erprobung

20. Verlag

-

21. Preis

-

**Ko-HAF – Kooperatives, hochautomatisiertes Fahren**

---

## Schlussbericht

Förderkennzeichen

19S14002

Laufzeit des Vorhabens

01.06.2015 bis 30.11.2018

Garching-Hochbrück, 24.05.2019

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

Michael Meurer

Dr. Andreas Rauch

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



## Ko-HAF – Kooperatives, hochautomatisiertes Fahren

---

# Schlussbericht

Förderkennzeichen 19S14002  
Laufzeit des Vorhabens 01.06.2015 bis 30.11.2018

Garching-Hochbrück, 24.05.2019

Gefördert durch:



Michael Meurer

Dr. Andreas Rauch

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Autoren

|                       |        |
|-----------------------|--------|
| Paradies, Svenja      | BMW AG |
| Panhuber, Christian   | BMW AG |
| Zahn, Peter           | BMW AG |
| Fahrenkrog, Felix     | BMW AG |
| Schaermann, Alexander | BMW AG |
| Rauch, Andreas        | BMW AG |

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>Ergebnisverbreitung</b> | <input checked="" type="checkbox"/> Öffentlich     |
|                            | <input checked="" type="checkbox"/> BMWi           |
|                            | <input checked="" type="checkbox"/> Projektträger  |
|                            | <input checked="" type="checkbox"/> Projektpartner |

|                  |                                       |
|------------------|---------------------------------------|
| <b>Dateiname</b> | FKZ_Ko-HAF_BMW_AG_Schlussbericht.docx |
|------------------|---------------------------------------|

|                   |    |
|-------------------|----|
| <b>Seitenzahl</b> | 97 |
|-------------------|----|

# Inhaltsverzeichnis

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Zusammenfassung .....  | 20 |
| 2     | Projektidee, Zielsetzungen, Aufgabenstellung.....  | 21 |
| 2.1   | AP1 Safety Server (Umfelderfassung und -repräsentation im Backend).....  | 21 |
| 2.1.1 | UAP1.1 Spezifikation und Realisierung des Safety Servers .....   | 21 |
| 2.1.2 | UAP1.2 Kommunikation zwischen Backend und Frontend.....  | 21 |
| 2.1.3 | UAP1.3 Datenmodellierung im Safety Server.....   | 21 |
| 2.2   | AP2 Frontend (Umfelderfassung und -repräsentation im Fahrzeug).....  | 22 |
| 2.2.1 | UAP2.1 Gewinnung und Kommunikation von Backend-Daten .....   | 22 |
| 2.2.2 | UAP2.2 Fahrzeuglokalisierung.....  | 22 |
| 2.2.3 | UAP2.3 Statisches Umfeldmodell, Kartenbewertung und Georeferenzierung der Backend-Daten im Fahrzeug .....          | 22 |
| 2.3   | AP3 Kooperative Fahrzeugführung und kontrollierbare Automation .....   | 23 |
| 2.3.1 | UAP3.1 Spezifikationen der Prüfscenarien und Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion.....                          | 23 |
| 2.3.2 | UAP3.2 Untersuchung von Automationseffekten und Implementierung eines Moduls Fahrerverfügbarkeit und Vigilanz..... | 24 |
| 2.3.3 | UAP3.3 Integration der Transitionskonzepte für HAF und deren Bewertung ....  | 24 |
| 2.3.4 | UAP3.4 Empfehlungen zu Methoden und Interaktionskonzepten.....   | 25 |
| 2.4   | AP4 Funktionsentwicklung für Normal- und Notbetrieb .....  | 25 |
| 2.4.1 | UAP4.1 Kooperative Umfeldmodellierung im Fahrzeug .....  | 25 |
| 2.4.2 | UAP4.2 HAF Normalfunktion .....  | 25 |
| 2.4.3 | UAP4.3 Gefahrenstellen .....   | 26 |
| 2.4.4 | UAP4.4 Fahrzeug und Architektur.....   | 26 |
| 2.5   | AP5 Absicherung - Erprobung und Validierung .....  | 27 |
| 2.5.1 | UAP5.1 Methodik .....  | 27 |
| 2.5.2 | UAP5.2 Testprozedur .....  | 27 |
| 2.5.3 | UAP5.3 Virtuelle Erprobung .....   | 28 |
| 2.5.4 | UAP5.4 Erprobung auf Testgelände .....   | 28 |
| 2.5.5 | UAP5.5 Erprobung im öffentlichen Straßenverkehr.....   | 28 |
| 2.5.6 | UAP5.6 Ergebnisaufbereitung.....   | 28 |
| 3     | Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse.....   | 29 |
| 3.1   | AP1 Safety Server (Umfelderfassung und -repräsentation im Backend).....  | 29 |
| 3.1.1 | UAP1.1 Spezifikation und Realisierung des Safety Servers .....   | 29 |
| 3.1.2 | UAP1.2 Kommunikation zwischen Backend und Frontend.....  | 29 |
| 3.1.3 | UAP1.3 Datenmodellierung im Safety Server.....   | 31 |
| 3.2   | AP2 Frontend (Umfelderfassung und -repräsentation im Fahrzeug).....  | 33 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.2.1 | UAP2.1 Gewinnung und Kommunikation von Backend-Daten .....   | 33 |
| 3.2.2 | UAP2.2 Fahrzeuglokalisierung .....   | 35 |
| 3.2.3 | UAP2.3 Statisches Umfeldmodell, Kartenbewertung und Georeferenzierung der Backend-Daten im Fahrzeug .....            | 38 |
| 3.3   | AP3 Kooperative Fahrzeugführung und kontrollierbare Automation .....   | 40 |
| 3.3.1 | UAP3.1 Spezifikationen der Prüfszenarien und Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion.....                            | 40 |
| 3.3.2 | UAP3.2 Untersuchung von Automationseffekten und Implementierung eines Moduls Fahrer Verfügbarkeit und Vigilanz ..... | 51 |
| 3.3.3 | UAP3.3 Integration der Transitionskonzepte für HAF und deren Bewertung ....  | 68 |
| 3.3.4 | UAP3.4 Empfehlungen zu Methoden und Interaktionskonzepten.....   | 76 |
| 3.4   | AP4 Funktionsentwicklung für Normal- und Notbetrieb .....  | 78 |
| 3.4.1 | UAP4.1 Kooperative Umfeldmodellierung im Fahrzeug .....  | 78 |
| 3.4.2 | UAP4.2 HAF Normalfunktion .....  | 78 |
| 3.4.3 | UAP4.3 Gefahrenstellen .....   | 79 |
| 3.4.4 | UAP4.4 Fahrzeug und Architektur.....   | 81 |
| 3.5   | AP5 Absicherung - Erprobung und Validierung .....  | 83 |
| 3.5.1 | UAP5.1 Methodik.....   | 83 |
| 3.5.2 | UAP5.2 Testprozedur .....  | 84 |
| 3.5.3 | UAP5.3 Virtuelle Erprobung .....   | 85 |
| 3.5.4 | UAP5.4 Erprobung auf Testgelände .....   | 94 |
| 3.5.5 | UAP5.5 Erprobung im öffentlichen Straßenverkehr .....  | 95 |
| 3.5.6 | UAP5.6 Ergebnisaufbereitung.....   | 96 |
| 4     | Ergebnisverbreitung.....   | 96 |
| 4.1   | Konferenzbeiträge und Publikationen.....   | 96 |
| 4.2   | Dissertationen.....  | 97 |
| 5     | Planung und Ablauf des Projektes .....   | 97 |
| 6     | Änderungen in der Zielsetzung .....  | 97 |

# Abbildungsverzeichnis

|               |   |    |
|---------------|---|----|
| Abbildung 1:  | Hardwareintegration Kommunikationseinheit.....  | 30 |
| Abbildung 2:  | Beispiel einer von einem BMW Versuchsträger hochgeladenen Sensoris-Kachel mit Spurmarkierungen und Ausschnitt der zugehörigen Realdaten..                         | 30 |
| Abbildung 3:  | Visualisierung von Kartendaten in den unterschiedlichen Formaten: Grunddatenformat (oben), Safety Server (mitte), fahrbare Bereiche in der Funktion (unten) ..... | 31 |
| Abbildung 4:  | Korrektur von erfassten Kartendaten.....  | 32 |
| Abbildung 5:  | Beispiel einer 2D-Belegungsgridkarte von der Steilkurve in Dudenhofen ....  | 32 |
| Abbildung 6:  | Erfassung von Spurmarkierungen .....  | 33 |
| Abbildung 7:  | Erfassung von Verkehrszeichen .....   | 33 |
| Abbildung 8:  | Schematischer Ablauf: Ausweichen auf Skibox .....   | 34 |
| Abbildung 9:  | Darstellung der statischen Umfeldmodelldaten inklusive des Hindernisses, dazu Außenansicht und Visualisierung für den Fahrer .....                                | 35 |
| Abbildung 10: | Schema Verwendung Karte und Lokalisierung .....   | 36 |
| Abbildung 11: | Laserscanner-Hypothese bei der Abfahrt von der langen Geraden in Dudenhofen.....  | 37 |
| Abbildung 12: | Verlauf der Lokalisierungsvarianz bei Sensorausfall.....  | 37 |
| Abbildung 13: | Lokalisierungs-Integrität in 3 Zuständen .....  | 38 |
| Abbildung 14: | Beispiel Straßenmodellfusion .....  | 39 |
| Abbildung 15: | Kartenbewertung der Roadmodel-Fusion .....  | 40 |
| Abbildung 16: | Begriffsdefinitionen in AP3 .....   | 41 |
| Abbildung 17: | Modell des Übernahmeprozesses nach Marberger et al.....   | 44 |
| Abbildung 18: | Bewertung des Szenarios in den Kategorien Prädizierbarkeit, Dringlichkeit der Übernahme, Kritikalität und Komplexität der Fahrerreaktion .....                    | 45 |
| Abbildung 19: | Bewertungsbogen für Übernahmesituationen.....   | 46 |
| Abbildung 20: | Kurs.....   | 48 |
| Abbildung 21: | Aufbau des Wizard-of-Oz-Fahrzeugs .....   | 48 |
| Abbildung 22: | Innenraumansicht.....   | 48 |
| Abbildung 23: | Überblick Reaktionszeiten .....   | 49 |
| Abbildung 24: | Überblick der Längs-/Querbeschleunigung.....  | 50 |

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 25: Kombi HAF aktiv.....   | 52 |
| Abbildung 26: Übernahmeaufforderung .....  | 52 |
| Abbildung 27: monotone FFT "Pqpd" .....  | 52 |
| Abbildung 28: aktivierende FFT "Quiz" .....                                      | 52 |
| Abbildung 29: Fahrzeuginnenraum .....  | 52 |
| Abbildung 30: G.Tec Sensorik, physiologische Messung .....                       | 52 |
| Abbildung 31: Ergebnisse in Abhängigkeit der unterschiedlichen Tätigkeiten ..... | 54 |
| Abbildung 32: Kombi HAF aktiv.....   | 55 |
| Abbildung 33: Übernahmeaufforderung .....  | 55 |
| Abbildung 34: monotone FFT "Pqpd" .....  | 55 |
| Abbildung 35: aktivierende FFT "Quiz".....                                       | 55 |
| Abbildung 36: Fahrzeuginnenraum .....  | 55 |
| Abbildung 37: G.Tec Sensorik, physiologische Messung .....                       | 55 |
| Abbildung 38: Verlauf PERCLOS für beide Tätigkeiten.....                         | 57 |
| Abbildung 39: Verlauf KSS für beide Tätigkeiten.....                             | 58 |
| Abbildung 40: Reaktionszeiten in Abhängigkeit der Tätigkeiten .....              | 58 |
| Abbildung 41: TOC Ratings in Abhängigkeit der FFT.....                           | 59 |
| Abbildung 42: Fahrzeuginnenraum .....  | 60 |
| Abbildung 43: Kombi.....   | 60 |
| Abbildung 44: Übernahmeaufforderung .....  | 60 |
| Abbildung 45: Messequipment, physiologische Messung.....                         | 60 |
| Abbildung 46: Nebenaufgabe Auswahl Lesen.....                                    | 60 |
| Abbildung 47: Nebenaufgabe Auswahl Spielen.....                                  | 60 |
| Abbildung 48: Fahrzeuginnenraum .....  | 63 |
| Abbildung 49: Strecke.....   | 63 |
| Abbildung 50: Wizard of Oz Fahrzeug.....   | 65 |
| Abbildung 51: Fahrzeuginnenraum .....  | 65 |
| Abbildung 52: Kombi HAF aktiv.....   | 65 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 53: Übernahmeaufforderung .....   | 65 |
| Abbildung 54: monotone FFT „Pqpd“ .....   | 65 |
| Abbildung 55: Fahrstrecke .....   | 65 |
| Abbildung 56: Verlauf PERCLOS für beide Tätigkeiten.....  | 67 |
| Abbildung 57: Verlauf KSS für beide Tätigkeiten.....  | 67 |
| Abbildung 58: Statischer Simulator der BMW AG .....   | 68 |
| Abbildung 59: Blick vom Fahrerplatz auf die Fahrscene im statischen Simulator .....   | 69 |
| Abbildung 60: Mock-Up mit Plasmabildschirmen als Rückkanäle.....  | 69 |
| Abbildung 61: Sensoren für die Messung physiologischer Parameter (EKG, EDA, EOG) ..   | 69 |
| Abbildung 62: Eyetracker Dikablis.....  | 69 |
| Abbildung 63: Verlauf der subjektiven Müdigkeitsbewertung.....  | 71 |
| Abbildung 64: Reaktionszeiten bis Herstellung Fahrbereitschaft (Hands-on oder<br>Bremspedalberührung) und Ausführen des 1. Fahrmanövers<br>(Bremspedalstellung >10% oder Lenkwinkeländerung >2°)..... | 72 |
| Abbildung 65: Dynamischer Simulator der BMW AG.....   | 73 |
| Abbildung 66: Innenraumansicht mit "pqpd"-Aufgabe .....   | 73 |
| Abbildung 67: Übernahmesituation "Ausweichen" .....   | 73 |
| Abbildung 68: Übernahmesituation "Bremsen".....   | 73 |
| Abbildung 69: ABK-Varianten (Rtl).....  | 73 |
| Abbildung 70: Reaktionszeit Hands-On.....   | 75 |
| Abbildung 71: Reaktionszeit erstes Fahrmanöver .....  | 76 |
| Abbildung 72: Darstellung der Art der Bewältigung (Ausweichen vs. Stehen bleiben) in den<br>beiden Übernahmesituationen.....  | 76 |
| Abbildung 73: Dauer des ersten Blicks ins Kombi-Instrument .....  | 76 |
| Abbildung 74: Geplante Trajektorie bei Zielbremsung auf Hindernis .....   | 80 |
| Abbildung 75: Ausweichtrajektorie nach dem Wiederaanfahren bei freigewordener<br>Nachbarspur.....   | 81 |
| Abbildung 76: Testbetrieb in Dudenhofen .....   | 82 |
| Abbildung 77: Automatisierter Spurwechsel mit Visualisierung .....  | 83 |
| Abbildung 78: Testmethodik zur Erprobung des hochautomatisierten Fahrens .....  | 83 |

|               |  |    |
|---------------|--|----|
| Abbildung 79: | Ausschnitt aus dem Szenarienkatalog.....   | 84 |
| Abbildung 80: | Ausschnitt aus dem Testkatalog.....  | 85 |
| Abbildung 81: | Mockup als Grundlage der virtuellen Erprobung.....   | 86 |
| Abbildung 82: | Visualisierung der Methode zur Validierung umfelderfassender Sensormodelle .....   | 86 |
| Abbildung 83: | Schematische Darstellung notwendiger Komponenten zur Validierung umfelderfassender Sensormodelle .....   | 87 |
| Abbildung 84: | Ausschnitt der hochgenau nachmodellierten Umgebung für die Validierung umfelderfassender Rohdatenmodelle und Vergleich einer realen und virtuellen Fahrt.....          | 87 |
| Abbildung 85: | Visualisierung einer realen und virtuell nachgestellten Fahrt mit entsprechenden Sensor- und Fusionsergebnissen.....   | 89 |
| Abbildung 86: | Ergebnisse der Validierung umfelderfassender Sensormodelle am Beispiel von Lidarpunktwolken.....   | 89 |
| Abbildung 87: | Reale (links) und virtuelle Erprobung (rechts) eines beispielhaften Szenarios .....  | 90 |
| Abbildung 88: | Im Rahmen der Wirksamkeit untersuchte Verkehrsszenarien.....   | 90 |
| Abbildung 89: | Exemplarische Darstellung des Auffahrt- (links) und Fahrstreifenende-Szenarios (rechts) für die Simulation in der Wirksamkeitsanalyse .....                            | 91 |
| Abbildung 90: | Exemplarische Darstellung des „Auffahren auf Stauende“- (links) und des „Objekt im Fahrstreifen“-Szenarios (rechts) für die Simulation in der Wirksamkeitsanalyse..... | 91 |
| Abbildung 91: | Ergebnisse des Verkehrsszenarios „Auffahrt“ .....  | 92 |
| Abbildung 92: | Ergebnisse des Verkehrsszenarios „Fahrstreifenende“ .....  | 92 |
| Abbildung 93: | Ergebnisse des Verkehrsszenarios „Objekt im Fahrstreifen“ .....  | 93 |
| Abbildung 94: | Ergebnisse des Verkehrsszenarios „Stauende“ .....  | 93 |
| Abbildung 95: | Ergebnisse des Verkehrsszenarios „Nothaltemanöver“ .....   | 94 |
| Abbildung 96: | Erprobung auf dem Testgelände .....  | 95 |
| Abbildung 97: | Erprobung im öffentlichen Straßenverkehr .....   | 95 |

## Tabellenverzeichnis

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Tabelle 1: | Klassifikation der Faktoren Dringlichkeit, Prädizierbarkeit, Kritikalität und Komplexität der Fahrerreaktion ..... | 42 |
| Tabelle 2: | Klassifikation der Übernahmeszenarien .....  | 42 |
| Tabelle 3: | Empfehlung geeigneter Testszenarien in Abhängigkeit des Untersuchungsgegenstands.....                              | 43 |
| Tabelle 4: | Übersicht der erhobenen Daten.....   | 69 |
| Tabelle 5: | Ergebnisse der Parameterauswahl für die laterale Positionsbestimmung eines Lidars .....                            | 88 |
| Tabelle 6: | Übersicht innerhalb für die Wirksamkeitsanalyse durchgeführten Simulation variierten Parameter.....                | 90 |

# 1 Zusammenfassung

Die BMW AG trug in Ko-HAF zu allen Arbeitspaketen bei. Ausgeprägte Schwerpunkte wurden auf die Arbeitspakete „Kooperative Fahrzeugführung und kontrollierbare Automation“, erweiterte „Funktionsentwicklungen für Normal- und Notbetrieb“ sowie eine stark virtuell unterstützte Absicherung gesetzt.

Für eine reale Einführung im Massenmarkt sind neben der anforderungsgerechten hohen technischen Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit des Systems vor allem die Aspekte der Übernahme und Rückübergabe der Fahrzeugführungsverantwortung zwischen System und Fahrer von größter Bedeutung. Gemeinsam mit wissenschaftlichen Instituten und MMI-Experten hat BMW den Stand der Forschung deutlich vorangetrieben und konsolidiert. Ein Teil des Beitrags war, zu erarbeiten, welche neuen Fragestellungen sich für die Kontrollierbarkeit hochautomatisierter Systeme ergeben. Dabei wurde auch die Thematik von Nebentätigkeiten berücksichtigt, um Aufmerksamkeitsprozesse der Fahrer und deren Folgen für die Übernahmefähigkeit zu untersuchen. Ziel war es, eine systematische Methodik zu generieren, mit der die Kontrollierbarkeit von hochautomatisierten Funktionen untersucht werden kann und die künftig Entwicklern zur Verfügung steht.

Ein weiterer speziell adressierter Punkt war die zuverlässige Eigenlokalisierung des HAF-Fahrzeuges auf einer hochgenauen Karte – unabhängig von der Verfügbarkeit von GNSS-Systemen (z.B. GPS, GLONASS). Dieses Thema wurde von BMW mit besonderer Intensität betrachtet und stellt eine Schlüsseltechnologie für HAF dar.

Im Allgemeinen können gewisse HAF-Sondersituationen (z.B. Baustellen, Hindernisse, Unfälle, komplizierte Autobahnkreuzungen, etc.) bordautonom nur schwer bzw. mit großem sensorischen Aufwand sicher beherrscht werden. In diesen Fällen wird dem kooperativen Ansatz, wie er im Projekt mittels des Safety Servers beschrieben wurde, ein entscheidender Mehrwert beigemessen. BMW wirkte an der Umsetzung dieser revolutionären Idee mit. In Ko-HAF baute BMW ein neues Versuchsfahrzeug auf und brachte ein weiteres Versuchsfahrzeug ein. Dieses wurde ebenfalls mit Ko-HAF Kommunikationstechnologie ausgerüstet. Beide Fahrzeuge waren somit in der Lage, Daten an den Server zu liefern sowie Daten vom Server zu beziehen und zu verarbeiten. BMW konnte dabei auf einen reichen Erfahrungsschatz aus Vorprojekten wie Ko-FAS und UR:BAN zurückgreifen und brachte seine erworbene Expertise in den Verbund aktiv ein.

Die Funktionsentwicklung in Ko-HAF umfasste eine erweiterte Umfeldmodellierung unter Integration der von der Ko-HAF Kommunikationstechnologie gelieferten Informationen, die Entwicklung und Darstellung eines weiter vorausschauenden „HAF-2“ Normalbetriebes in Längs- und Querrichtung unter Einbeziehung von Auf- und Abfahrten an Autobahnen sowie Autobahnkreuzen, sowie als BMW Schwerpunkt die Funktionsentwicklung zur Handhabung von Gefahrenstellen. Eine neue Trajektorienplanung für dynamische Ausweichmanöver und Gefahrenbremsungen wurde konzipiert, entwickelt und mit bis zu ca.  $4 \text{ m/s}^2$  Querbeschleunigung in Versuchsträgern umgesetzt und demonstriert. Die Trajektorienplanung wurde mit einem neuen Verfahren zur Ermittlung von „Rückfalltrajektorien“ abgesichert: eine Trajektorie wird nur dann begonnen oder weiter verfolgt, wenn unter Berücksichtigung der relevanten statischen und dynamischen Objekte sowie der relevanten Verkehrsregeln auch eine Rückfalltrajektorie in einen sicheren Zustand existiert (z.B. sicheres Anhalten). Ein Ausweichmanöver in einen Nachbarfahrstreifen erfolgt nur kompatibel zu den dortigen anderen Fahrzeugen.

Weiterhin hat BMW ein Konzept zur Bewertung der Sicherheitseffekte mittels eines virtuellen Prüffelds erarbeitet. Neben der Konzeption war vor allem die Aufbereitung von Verhaltensmodellen – sowohl des Menschen wie auch ausgewählter hochautomatisierter Systeme – zur Verwendung in einer virtuellen Testumgebung ein wichtiger Baustein. Ziel war es, für ausgewählte Funktionen des hochautomatisierten Fahrens einen Weg zur Generierung von Aussagen zur Sicherheit im Verkehr in einer virtuellen Testumgebung aufzuzeigen und für exemplarische Systeme Ergebnisse zu erarbeiten. Für die entwicklungsbegleitende virtuelle Erprobung wurden virtuelle Sensormodelle näher betrachtet. Hier stand insbesondere deren Validierung und Integration in die Gesamtsystemerprobung im Fokus.

## **2 Projektidee, Zielsetzungen, Aufgabenstellung**

### **2.1 AP1 Safety Server (Umfelderfassung und -repräsentation im Backend)**

Zentraler Bestandteil des Förderprojekts Ko-HAF und eine wichtige Komponente im Gesamtkonzept ist der Safety Server. Dieser Server dient der Erfassung, Aggregation und Bereitstellung von Sensor- und Kartendaten, die über das Grunddatenmodell und die einzelnen Projektpartner gesammelt werden und auf deren Basis in den einzelnen Fahrzeugen vorausschauende und sichere Manöver geplant werden können.

Die BMW AG hat sich im Rahmen des Arbeitspakets 1 dazu verpflichtet, in den jeweiligen Unterarbeitspaketen bei der Spezifikation der Straßenmodelle mitzuwirken, die Kommunikationslösung hard- und softwaretechnisch im Fahrzeug anzubinden und eine prototypische Lösung für das Erlernen von Kartendaten auf einem begrenzten Streckenabschnitt zu demonstrieren.

#### **2.1.1 UAP1.1 Spezifikation und Realisierung des Safety Servers**

Aufgrund der bei der BMW AG schon seit 2009 durchgeführten Erprobungen von automatisierten Fahrsystemen gibt es im Unternehmen bereits einen Erfahrungsschatz an möglichen Modellierungen eines Straßenmodells im Safety Server. Die BMW AG hat sich im Rahmen des Unterarbeitspakets 1.1 dazu verpflichtet, an der gemeinschaftlichen Erarbeitung einer Modellierung für ein Straßenmodell im Safety Server mitzuwirken und gemachte Erfahrungen beizusteuern.

#### **2.1.2 UAP1.2 Kommunikation zwischen Backend und Frontend**

Die OTH Amberg-Weiden stellt im Projekt die Kommunikationseinheiten, die die Kommunikation vom Fahrzeug zum Safety-Server regeln. Diese Kommunikationseinheiten mussten hard- und softwareseitig in die Ko-HAF Versuchsträger integriert werden. Hardwareseitig hat sich die BMW AG dazu verpflichtet, die Kommunikationsboxen fest in den Versuchsträgern für Ko-HAF zu verbauen. Auf Softwareseite musste sowohl die Schnittstelle zum Upload der lokalen Umfelderfassung sowie die Schnittstelle zum Download der aggregierten Kartendaten geschaffen werden.

#### **2.1.3 UAP1.3 Datenmodellierung im Safety Server**

Um eine automatisierte Fahrfunktion anbieten zu können, benötigt das entscheidende System zwingend Informationen über die statische Umgebung, d.h. den Verlauf von Fahrspuren, Geschwindigkeitsregelung, Vorfahrtsregelungen und das Vorhandensein von temporären Hindernissen auf der Strecke. Diese Information kann aus der Sensorik zwar gewonnen werden, unterliegt dabei aber Einschränkungen hinsichtlich der Reichweite und der Messunsicherheit.

Eine Karte als Abbildung der statischen Umgebung bietet den Vorteil einer Reichweitenerhöhung weit über den Sichtbereich der Sensorik hinaus. Spezielle Vermessungsfahrzeuge in Verbindung mit einer teilautomatisierten Auswertung können genutzt werden um eine initiale Karte in der erforderlichen hohen Genauigkeit und Vollständigkeit zu erstellen.

Aufgrund auftretender Änderungen an der statischen Umgebung, zum Beispiel durch Baustellen, veraltet eine solche Karte jedoch. Eine hochfrequente Aktualisierung der Inhalte ist daher unerlässlich. Eine ständige Neuerfassung durch spezielle Vermessungsfahrzeuge zusammen mit dem teilweise manuellen Nachbearbeitungsaufwand wie er heute anfällt scheint für eine skalierbare und flächendeckende Lösung unwirtschaftlich und kaum realistisch.

Der in Ko-HAF vorgeschlagene Lösungsansatz ist das Aktualisieren von Karteninhalten mit Daten, die von automatisierten Flotten mit der für die Fahrfunktion ohnehin notwendigen Sensorik aufgezeichnet wurden. Die BMW AG demonstriert im Rahmen des UAP 1.3 ein System zur Erfassung und Auswertung von Flottendaten zum Erlernen eines begrenzten Streckenabschnitts mit einer prototypischen Anwendung zur manuellen Korrektur oder Ergänzung von Flottendaten.

## **2.2 AP2 Frontend (Umfelderfassung und -repräsentation im Fahrzeug)**

Um Manöver und Trajektorien innerhalb der automatisierten Fahrfunktion planen zu können, benötigt das Fahrzeug die Kartendaten aus dem Arbeitspaket 1, kann aber auf eine zusätzliche Verarbeitung von Sensordaten nicht verzichten. So muss das Fahrzeug sich innerhalb der Karte hochgenau positionieren, um die Kartendaten für die Funktion nutzen zu können. Dies ist Inhalt der Beteiligung der BMW AG am Unterarbeitspaket 2.2. Im Unterarbeitspaket 2.3 wird eine Erstellung einer statischen lokalen Karte aus Sensordaten, eine Bewertung der Karte und eine Fusion mit Kartendaten aus dem Backend implementiert. Im Unterarbeitspaket 2.1 hat sich die BMW AG verpflichtet, Daten für die Verarbeitung im Backend zu sammeln und durch die Kommunikationseinheiten aus dem Unterarbeitspaket 1.2 auf den Safety Server hochzuladen.

### **2.2.1 UAP2.1 Gewinnung und Kommunikation von Backend-Daten**

Der Safety Server als zentrale kommunale Schnittstelle muss notwendigerweise verwaltete Kartendaten aktuell halten. Die von mehreren Projektpartnern entwickelte Aggregation von Messdaten benötigt Daten aus den Versuchsträgern der einzelnen Projektpartner in einem einheitlichen Format.

Im Rahmen des Unterarbeitspakets 2.1 nimmt die BMW AG an der Spezifikation des Formats und Inhalts der zu sammelnden Daten teil. Die BMW AG implementiert zudem eine Komponente, die diese Daten aus dem in den automatisierten Fahrzeugen vorliegenden statischen Umfeldmodell extrahiert und über die in UAP1.2 entwickelte Kommunikationslösung an den Safety Server überträgt.

Die BMW AG wird ferner regelmäßig Daten im Ko-HAF Versuchsgebiet sammeln und den Projektpartnern zur Entwicklung und Durchführung der Aggregation zur Verfügung stellen.

### **2.2.2 UAP2.2 Fahrzeuglokalisierung**

Die vom Ko-HAF Safety-Server empfangene Karte enthält notwendige Informationen über das statische Umfeld mit einer weit über die Sensordaten hinausgehenden Vorausschau. Um diese Karte nutzen zu können, ist es erforderlich, die genaue Position eines automatisierten Fahrzeugs relativ zu dieser Karte zu kennen.

Um eine verlässliche Funktion auch ohne ständige Überwachung durch den Fahrer zu gewährleisten, ist es notwendig, hohe Anforderung an Verfügbarkeit, Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Lokalisierung zu stellen. Ungenauigkeiten oder gar Ausfälle in der Lokalisierung haben direkten Einfluss auf die Fahrfunktion und müssen daher im UAP2.2 zuerst vermieden oder zumindest erkannt werden, um entsprechend im UAP2.3 berücksichtigt zu werden.

Im Projekt Ko-HAF entwickelt die BMW AG daher ein Lokalisierungsverfahren, welches auf einer Fusion von Sensordaten wie Kamera und Lidar, absoluten Positionsmessungen aus GPS, Fahrzeugeigenbewegungsmessungen über Odometrie und den Informationen aus dem hochgenauen, über den Safety Server bereitgestellten Straßenmodell beruht.

Die einzelnen, aus einem Vergleich von Sensordaten und Kartendaten generierten Positionshypothesen müssen anschließend probabilistisch fusioniert werden, um eine ausfallsichere, auf redundanten Daten basierende Lokalisierungslösung zur Verfügung zu stellen.

Für die einzelnen Sensormessungen müssen entsprechende Verfahren entwickelt werden, um diese Beobachtungen entsprechenden Datensätzen in der Karte zuzuordnen. Dieses Verfahren wird im weiteren Scanmatching-Verfahren genannt. Aus den einzelnen Scanmatches kann in der Fusion dann die wahrscheinlichste Pose inklusive einer Schätzung der Unsicherheit ermittelt werden. Neben der Unsicherheitsschätzung ist als zweites Gütemaß die Abschätzung der Integrität notwendig.

Die BMW AG wird ein entsprechendes Lokalisierungsverfahren inklusive Unsicherheits- und Integritätsbewertung entwickeln, erproben und im Rahmen von Ko-HAF auf dem Testgelände und öffentlichen Straßen einsetzen.

### **2.2.3 UAP2.3 Statisches Umfeldmodell, Kartenbewertung und Georeferenzierung der Backend-Daten im Fahrzeug**

Eine hochgenaue Karte bietet eine vollständige Sicht mit beliebig weiter Vorausschau auf das statische

Umfeld. Diese Daten können in der automatisierten Fahrfunktion aber nicht vorbehaltlos genutzt werden, da diese Karten, auch bei regelmäßigen Updates, in einzelnen Situationen veraltet sein können. Auch die Lokalisierung kann durch Messunsicherheit, unzureichende Landmarkendichte oder Sensorausfällen vereinzelt ungenaue oder ungültige Hypothesen generieren. Es ist daher unumgänglich, eine Lösung aus Karte und Lokalisierung mit der direkten Erfassung des statischen Umfelds zu fusionieren. Die BMW AG entwickelt im Unterarbeitspaket 2.3 ein Verfahren, das aus Sensordaten ein statisches Modell der Umgebung schätzt und dabei verfügbare Kartendaten in die Fusion miteinbezieht. Diese Fusion mit der Karte ist dabei optional, sodass die Sensorbeobachtungen alleine als Grundlage für die Straßenmodellsschätzung herangezogen werden können, um im Falle eines Karten- oder Lokalisierungsfehlers eine Rückfallebene zu bieten.

Mit den Sensorbeobachtungen wird so zunächst eine lokale Karte rund um das Fahrzeug aufgebaut. Diese kann Informationen über den Verlauf der umgebenden Fahrspuren direkt aus Kamerabeobachtungen und weiter aus Beobachtungen von Randbebauungen und anderen Fahrzeugen schließen. Diese lokale Karte soll genügend Information bieten, um zumindest eine abgesicherte Spurhaltefunktion zu ermöglichen, wenn keine weitreichenderen Informationen aus der Karte verfügbar sind.

Wenn die Karte verfügbar ist, wird innerhalb des Schätzprozesses auch relevante Information aus der Karte genutzt. Diese kann die lokale Karte mit einer erweiterten Vorausschau und einer verbesserten Schätzung der Topologie anreichern und somit auch komplexere Fahrmanöver sicher durchführbar machen.

Während Güte und Integrität der Lokalisierung bereits ersten Aufschluss über die Verwendbarkeit der Karte geben, bleiben semantische Kartenfehler in der Lokalisierung zumeist nicht detektierbar. Diese können aber direkt zu ungewollten Gesamtsystemfehlern führen, wenn sie in der Fusion verwendet werden. Daher ist es notwendig, die Karte auch innerhalb der Fusion noch einmal zu validieren. So erkannte Fehler führen dann zur Verwendung der Rückfallebene ohne Karte, können aber auch genutzt werden, um die Datenverarbeitung am Safety-Server auf eventuell veraltete Kartenausschnitte hinzuweisen.

Die BMW AG wird ein solches Verfahren zur Bewertung der Karte und Fusion mit Sensordaten implementieren, erproben und bei den Erprobungsfahrten einsetzen. Darüber hinaus wird die BMW AG sich auch an der Spezifikation der Georeferenzierung von Kartenattributen beteiligen und diese innerhalb des Unterarbeitspakets 2.3 implementieren.

## **2.3 AP3 Kooperative Fahrzeugführung und kontrollierbare Automation**

### **2.3.1 UAP3.1 Spezifikationen der Prüfscenarien und Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion**

Das UAP 3.1. beinhaltet die Sammlung, Definition und Systematisierung grundlegender methodischer Aspekte und wichtiger inhaltlicher Konstrukte als Grundlage für ein gemeinsames Verständnis im Teilprojekt und die Vergleichbarkeit der inhaltlichen Arbeiten der folgenden Arbeitspakete. Die BMW AG steuert hier zu allen Themen Know-How bei.

Für die Kontrollierbarkeits-Bewertung von Übernahme-situationen (hochautomatisiertes Fahren zu Driver Only) werden partnerübergreifende Prüfscenarien benötigt. Der Fokus liegt hierbei auf Übernahme-situationen, in denen eine systemseitig initiierte Transition (z.B. aufgrund einer Systemunsicherheit oder -grenze) von der hochautomatisierten zurück in die manuelle Fahrt erfolgt. Die Prüfscenarien können sich u.a. hinsichtlich verschiedener Aspekte wie Verkehrsaufkommen, Dynamik der Verkehrssituation während der Übernahmeaufforderung, Zeitbudget/Dringlichkeit etc. unterscheiden. Die Sammlung, Systematisierung und Spezifikation von Nutzungs- und Fahrscenarien ist ein Schwerpunkt der BMW AG in diesem Unterarbeitspaket. Dies ist Voraussetzung, um ein abgestimmtes projektübergreifendes Arbeiten an (HMI-)Konzepten und deren Bewertung anhand konkreter Testszenarien in AP3 zu ermöglichen. Es wird eine enge Vernetzung mit den APs 4 und 5 angestrebt, da Testszenarien hier ebenfalls eine Rolle spielen und um zum anderen die Funktionssicht zu berücksichtigen.

Darüber hinaus sollen in diesem Unterarbeitspaket weitere relevante methodische Aspekte der Kontrollierbarkeit von hochautomatisierten Fahrfunktionen zusammengestellt werden. Das beinhaltet beispielsweise die Definition der zu betrachtenden Fahrerzustände (Nebentätigkeit, Vigilanz, ...) und die Auseinandersetzung mit Messmethoden und Metriken zur Erfassung von Kontrollierbarkeit. Es werden einheitliche Metriken für die Kontrollierbarkeits-Bewertung von Übernahme-situationen (HAF zu Driver Only)

entwickelt. Eine Metrik kann z.B. die Messung der Übernahmezeit und -qualität sein. Ziel ist die Erstellung einer Liste, in der alle relevanten abhängigen Variablen zur Bewertung der Kontrollierbarkeit definiert sind. Die Variablen können auf Blick-, Fahrdaten oder z.B. einer subjektiven Bewertung basieren. Weitere Messmethoden (EEG etc.) sind auf ihre Eignung zu prüfen. Z.T. sollen neue methodische Ansätze entwickelt bzw. existierende Methoden für den Einsatz zur Untersuchung hochautomatisierter Systeme weiterentwickelt werden (z.B. Wizard-of-Oz-Ansatz).

Die Projektpartner müssen sich zudem auf einen Vorschlag für generische MMI-Übernahmekonzepte einigen bzw. auf ein Set an Minimalanforderungen. Dies umfasst die Erarbeitung optischer (im Head-up-Display sowie Kombiinstrument) und akustischer Rückmeldungen. Die in der BMW AG schon vorhandenen Teil-Anforderungen an Übernahmekonzepte werden in diese Definitionen generischer Übernahmekonzepte eingearbeitet.

Als letzter grundlegender methodischer Punkt ist das Thema Nebentätigkeiten zu nennen. Ziel der partnerübergreifenden Arbeit ist die Recherche und der Vorschlag einer Systematik fahrfremder Tätigkeiten, welche für Kontrollierbarkeitsstudien verwendet werden können. Hierbei werden sowohl die Erweiterung/Anpassung bereits etablierter Tätigkeiten aus der Driver Distraction Forschung als auch die Konzeptionierung neuer Tätigkeiten geprüft. Ziel ist die Erstellung eines standardisierten Tätigkeitskatalogs, der partnerübergreifend für Kontrollierbarkeitsstudien bzgl. Übernahmefähigkeit verwendet wird. Das in der BMW AG vorhandene Know-how bezüglich einer Systematik von Nebentätigkeiten wird unterstützend zur Verfügung gestellt.

### **2.3.2 UAP3.2 Untersuchung von Automationseffekten und Implementierung eines Moduls Fahrer Verfügbarkeit und Vigilanz**

Im UAP 3.2. werden die im UAP3.1 erarbeiteten Grundlagen und Definitionen nun angewendet auf die empirische Forschung. BMW plant eine ganze Reihe von Studien zu unterschiedlichen mgl. Einflussgrößen auf die Übernahmeleistung. Basierend auf den in T3.1.1 definierten Prüfscenarien werden Übernahmeszenarien im Fahrsimulator implementiert

Es werden zwei Simulatorstudien zur Fahrer Verfügbarkeit durchgeführt, die Vigilanz, Arousal, Übernahmezeit und Übernahmequalität des Fahrers bestimmen. Dabei kommen verschiedene Messmethoden wie physiologische Signale (z.B. Herzfrequenz, Hautleitfähigkeit...), Eyetrackingdaten (z.B. Percentage of Eyelid Closure - Perclos) und Fragebögen zum Einsatz und werden hinsichtlich ihrer Eignung und Korrelation überprüft.

Es werden ausgewählte fahrfremde Tätigkeiten aus dem erarbeiteten Tätigkeitskatalog in den Fahrsimulator integriert. In einer Probandenstudie wird der Einfluss der fahrfremden Tätigkeit auf die Übernahmezeit und -qualität bewertet. Die Bewertung erfolgt durch die in T3.1.2 definierten Metriken.

Da abzusehen ist, dass Langzeit-HAF einen Einfluss auf den Zustand des Fahrers haben wird, muss untersucht werden, wie sich längere Automationsdauern auf die Übernahmezeit und -qualität auswirken. Im Rahmen einer Studie im dynamischen Fahrsimulator wird insbesondere der Einfluss des Wohlbefindens auf die Übernahmeleistung untersucht. Mit Hilfe der Wizard-of-Oz Methodik wird außerdem ein Versuch in einem Realfahrzeug durchgeführt, in dem unter realen Bedingungen längere Automationsdauern untersucht werden können.

Basierend auf den Studienergebnissen wird ein Modul zur Bewertung der Übernahmefähigkeit entwickelt und implementiert. In diesem Modul ist der kognitive Zustand des Fahrers abgebildet, wodurch u.a. die prädizierte Übernahmezeit des Fahrers online berechnet werden soll. Es werden Fahrsimulationsdaten aus den bisherigen Versuchen (aus den Studien von T3.2.1 und T3.2.3) zum Aufbau und zur Validierung (erfolgt in T3.2.5) des Moduls herangezogen. Die resultierenden Modelle werden mit einem validierten Übernahmeschätzer verglichen. Die Entscheidung, welcher Übernahmeschätzer im Fahrsimulator umgesetzt wird, erfolgt anhand der Güte der beiden Prädiktionsansätze.

### **2.3.3 UAP3.3 Integration der Transitionskonzepte für HAF und deren Bewertung**

Als Vorarbeit zu den optimierten Transitionskonzepten adressiert eine weitere Simulatorstudie die Fragestellung, inwieweit der Fahrerzustand positiv beeinflusst werden kann durch zwischengeschaltete Perioden der Aktivität (z.B. kurzzeitiges manuelles Fahren).

Basierend auf den Vorschlägen aus UAP 3.1 und den Ergebnissen aus UAP3.2 soll außerdem in diesem Task ein exemplarisches und optimiertes Übernahmekonzept erstellt und umgesetzt werden. Die in T3.1.1. definierten Fahr- und Nutzungsszenarien werden dazu im Fahrsimulator implementiert. Ausgewählte fahrfremde Tätigkeiten aus T3.1.4 werden in den Fahrsimulator integriert. In einer Fahrsimulatorstudie werden die Übernahmekonzepte hinsichtlich der in T3.1.2 definierten Metriken bewertet.

Es wird eine Probandenstudie im Realfahrzeug (Wizard-of-Oz-Fahrzeug) durchgeführt, in der die Fragestellungen aus dem UAP 3.2 (Fahreraufmerksamkeit, Langzeit HAF, fahrfremde Tätigkeiten) nochmals unter realen Bedingungen adressiert werden. Kritische Übernahmeszenarien werden aufgrund der Sicherheitsanforderungen des Wizard-of-Oz-Fahrzeugs kein Schwerpunkt der Studie sein.

### **2.3.4 UAP3.4 Empfehlungen zu Methoden und Interaktionskonzepten**

Abschließend legen alle Projektpartner ihre Ergebnisse nochmals nebeneinander und konsolidieren diese. Aus den in UAP3.2 und 3.2 gewonnenen Erkenntnissen der Probandenstudien werden sowohl methodische als auch konzeptionelle Empfehlungen gegeben. Die gewonnenen Erkenntnisse und Empfehlungen speziell im Hinblick auf Metriken der Kontrollierbarkeit und Interaktionskonzepte werden gemeinsam in Form von Key Messages formuliert.

## **2.4 AP4 Funktionsentwicklung für Normal- und Notbetrieb**

Zielsetzung des Arbeitspakets ist die Funktionsentwicklung für hochautomatisierte Fahrzeuge zweiter Generation einschließlich der Funktionsdarstellung in Versuchsträgern.

### **2.4.1 UAP4.1 Kooperative Umfeldmodellierung im Fahrzeug**

Zielsetzung dieses Unterarbeitspakets ist die Bereitstellung aller für HAF-Fahrzeuge zweiter Generation benötigten Umfeldinformationen einschließlich der kommunizierten Ko-HAF Informationen in einem geeigneten zentralen Umfeldmodell. Zielsetzung von BMW ist insbesondere die Bereitstellung der Umfeldinformationen, die für die automatisierte Überquerung von Autobahnkreuzen mit großer Vorausschau und für den kurzfristigen taktischen Umgang mit Gefahrenstellen mit geringer Latenz benötigt werden.

Aufgabe dafür ist, die Vorausschau von Karten und Sensorik, die Sensor-Erfassungsbereiche innerhalb einer 360° Rundumerfassung, die Erkennungssicherheit und die Gütebewertung zu erweitern. Querführungsrelevante Fahrstreifeninformationen sind zuverlässig bereitzustellen und damit Umgebungsfahrzeuge unter Zuordnung zu ihren Fahrstreifen zu verfolgen.

Eine weitere Zielsetzung ist die Entwicklung neuer kognitiver Ansätze zur frühzeitigen Prädiktion des Fahrverhaltens anderer Verkehrsteilnehmer. Dazu soll menschliches Fahrverhalten auf Basis von Beobachtungen und erlerntem Wissen auf Basis von Messdaten aus Fahrsimulation oder Versuchsträgern modelliert werden.

### **2.4.2 UAP4.2 HAF Normalfunktion**

Die Zielsetzung dieses Unterarbeitspakets für BMW ist, eine für die Autobahnfahrt einschließlich Fahrstreifenwechseln und Überqueren von Autobahnkreuzen geeignete Handlungsstrategie darzustellen. Die Handlungsstrategie im Normalbetrieb entscheidet, wie sich das Fahrzeug im automatisierten Modus bewegen soll. Sie bewertet und entscheidet auch anhand des aktuellen Systemzustands und der Situation, welchen Automatisierungsgrad das Fahrzeug bereitstellen kann.

Dazu stellt sich die Aufgabe, die Inputs des Umfeldmodells und der Situationsanalyse geeignet so auszuwerten, dass sich das Fahrzeug im alltäglichen Fahrbetrieb für verkehrsgemessene und sichere Fahrmanöver, wie z. B. einen Fahrstreifenwechsel, entscheidet und diese sicher steuert. Autobahnkreuze sollen vom HAF-System im Normalbetrieb vorausschauend, d.h. möglichst vergleichbar zu einem menschlichen Fahrer überquert werden.

Dazu sind Algorithmen zur frühzeitigen Bewertung von Fahrstreifen hinsichtlich der Navigationsebene zu entwickeln bzw. zu integrieren und zu bewerten. Im Anschluss ist ein Verfahren zur vorausschauenden Fahrstreifenwahl darzustellen. Die navigationsbedingte Fahrstreifenbewertung ist mit der taktischen

Fahrstreifenbewertung zu integrieren. Vorausschauendes Durchfahren von Autobahnkreuzen ist zu verifizieren, zu erproben und zu optimieren. Die Trajektorienplanung ist zu erweitern, um nach Möglichkeit auch komplexere Szenarien und Sonderszenarien mit berücksichtigen zu können.

Anforderungen an den Erprobungskatalog (T5.2.1) und die Erprobungsspezifikation (T5.2.2) sind in Zusammenarbeit mit den anderen Projektpartnern einzusteuern. Die virtuelle Erprobung in UAP5.3 ist für den Aufbau virtueller Szenarien bei BMW zu unterstützen.

Für den Fall, dass eine HAF-Durchfahrt eines Streckenabschnitts oder einer Baustelle nicht möglich ist, ist eine Übernahmeaufforderung an den Fahrer zu entwickeln und erforderlichenfalls eine Bremsung in einen sicheren Zustand einzuleiten.

### **2.4.3 UAP4.3 Gefahrenstellen**

Gemeinsame Zielsetzung der Projektpartner in diesem Unterauftragspaket ist die Entwicklung eines partnerübergreifenden Konzepts zum Eintrag und Löschen von Gefahrenstellen gemeinsam mit UAP2.1. Diese soll über den Ko-HAF Server anderen Fahrzeugen über Mobilfunk zugänglich gemacht werden.

Spezifische Zielsetzung von BMW ist die Konzeption und Umsetzung von Sicherheitsmanövern vor Gefahrenstellen. Schwerpunkt ist die Planung und Umsetzung von Brems- und Ausweichreaktionen in Richtung höherer Dynamik. Bei Bedarf soll eine Trajektorienplanung bis zum Nothalt erfolgen. (vgl. UAP4.4).

Aufgabe ist zunächst die Erstellung eines Konzepts zur Situationserkennung und Identifikation von überraschenden Gefahrenstellen als mögliche Auslöser für Sicherheitsmanöver. Aus dem Assistenzbereich verfügbare Verfahren zur Situationserkennung und Risikobewertung von Gefahrenstellen sind zu integrieren, applizieren und für das hochautomatisierte Fahren weiter zu entwickeln.

Des Weiteren sind Algorithmen zur hochdynamischen Verfolgung (Tracking) vorausliegender Fahrzeuge zu applizieren.

Algorithmen zur Planung der Systemreaktion (Bremsen und/oder Ausweichen, keine Systemreaktion) sind zu entwickeln und Sicherheitsaspekte wie die Übersteuerung durch Sicherheitsfahrer zu berücksichtigen.

Eine hochdynamische Trajektorienplanung ist zu erarbeiten, welche die Durchführung kombinierter Brems- und Ausweich-Manöver bis in den fahrdynamischen Grenzbereich erlaubt. Die Aufgabe umfasst konzeptionelle Arbeiten, die Spezifikation, die Implementierung und die Entwicklung und Durchführung entwicklerseitiger Funktionstests in Simulation und Realfahrzeug.

Fahrstreifen, die beispielsweise infolge von Liegenbleibern oder Fahrstreifensperrungen nicht befahrbar sind, sind für die Fahrstrategie zu berücksichtigen.

Ein Sicherheitskonzept für Demonstrationen von HAF-Reaktionen auf Gefahrenstellen auf Testgeländen ist gemeinsam mit UAP4.4 und AP5 zu entwickeln, umzusetzen und zu verifizieren.

Umsetzungen und Ergebnisse sind in Zusammenarbeit mit AP5 zu evaluieren und darzustellen.

### **2.4.4 UAP4.4 Fahrzeug und Architektur**

Zielsetzung des Arbeitspakets ist die Konzeption und Bereitstellung der für HAF-Funktionen zweiter Generation geeigneten Fahrzeug-Versuchsträger.

Ein Sicherheitskonzept für den Versuchsbetrieb ist zu entwerfen und umzusetzen. Neben Normalfunktionen auf der Autobahn soll es die Demonstration von Sicherheitsfunktionen an Gefahrenstellen auf dem Testgelände unterstützen. Aufgabe ist es, ausreichende technische und organisatorische Maßnahmen zu treffen, um Systemreaktionen in sicherheitsrelevanten Fahrsituationen einerseits möglichst realitätsnah und andererseits risikominimiert evaluieren und demonstrieren zu können.

Zentrale Aufgabe ist der Aufbau von BMW Ko-HAF Versuchsträgern, welche alle BMW Anwendungsfälle aus UAP4.2 und 4.3 darstellen konnten. Dies beinhaltet die Ausrüstung mit Sensorik, Aktorik, Kommunikation, Positionierungs- und Absicherungssystemen.

Ein MMI Konzept, welches die Bedienung der HAF-Funktionalität ermöglicht und dem Fahrer den Zustand der Automatisierung im Kombiinstrument und gegebenenfalls Head-up-Display anzeigt, ist zu konzipieren und in BMW Versuchsfahrzeuge zu integrieren.

Die Abschlusspräsentation mit den Versuchsträgern ist vorzubereiten und durchzuführen.

## 2.5 AP5 Absicherung - Erprobung und Validierung

### 2.5.1 UAP5.1 Methodik

Ziel von UAP5.1 ist die Entwicklung einer Methodik für den Test und die Erprobung hochautomatisierter Fahrfunktionen. Die Methodik soll dabei die reale und virtuelle Erprobung in einen Gesamtzusammenhang integrieren, der eine bedarfsoptimierte Erprobung der Assistenzfunktion sicherstellt. Ziel von BMW ist dabei insbesondere, den Entwicklungsschwerpunkt der virtuellen Erprobung in den Gesamtzusammenhang der Methodik zu integrieren.

Eine konkrete Maßnahme ist die Definition eines Katalogs von Fahrscenarien zur Erprobung und Absicherung hochautomatisierter Fahrfunktionen auf Autobahnen. Er stellt die Grundlage der Erprobungsspezifikation in UAP5.2 dar. Die darin definierten Use Cases werden in den Realversuchen für die Erprobung eingefahren. In der virtuellen Absicherung werden auf dieser Basis insbesondere die sicherheitskritischen Use Cases nachmodelliert und so der virtuellen Erprobung der Fahrerassistenzfunktion zugänglich gemacht. Die definierten Use Cases werden insbesondere mit den Ergebnissen aus AP3 und AP4 abgeglichen.

### 2.5.2 UAP5.2 Testprozedur

Die BMW AG beteiligt sich an der Erstellung eines Testkatalogs mit Testfällen für ausgewählte hochautomatisierte Fahrerassistenzfunktionen. Grundlage hierfür bildet der Katalog abzusichernder Fahrscenarien aus UAP5.1. Dabei werden die Use Cases aus UAP5.1 soweit spezifiziert, dass eine Vorbereitung der Erprobungs- und Testmittel, eine Festlegung der Teststrecken sowie ein Einfahren bzw. Nachstellen der Szenarien im Realversuch bzw. der virtuellen Erprobung ohne weiteres möglich sind. Der Testkatalog bildet die Grundlage für die reale und virtuelle Absicherung der ausgewählten Funktionen. Die ausgewählten Fahrerassistenzfunktionen orientieren sich dabei an den von BMW in AP4 entwickelten Funktionen.

Die BMW AG wird neben den Realversuchen in UAP5.4 und 5.5 mittels einer Fahrsimulationsumgebung in UAP5.3 ausgewählte im Ko-HAF Projekt entwickelte automatisierte Fahrfunktionen analysieren. Verschiedene bereits in der BMW AG verwendete Tools werden dafür für die Anforderungen, welche Ko-HAF mit sich bringt, erweitert und so befähigt, eine Closed-Loop Simulation der ausgewählten Fahrfunktionen darzustellen. Dazu sind u.a. folgende Teilumfänge umzusetzen:

#### Anbindung einer Verkehrssimulation zur Use Case basierten Analyse

Die BMW AG analysiert auf Basis der entwickelten Erprobungsspezifikationen verschiedene Ausprägungen der Fahrfunktion. Eine Simulationsumgebung inklusive Verkehrssimulation stellt hier die Grundlage für eine Use Case basierte, virtuelle Erprobung dar. Die Verkehrssimulation erlaubt die Darstellung möglichst reproduzierbarer Szenarien.

#### Anbindung eines virtuellen Fahrers

Die BMW AG integriert ein virtuelles Fahrermodell, um die Fahrfunktion in einem realistischen Umfeld zu analysieren. Zur Modellierung des menschlichen Verhaltens werden entweder Ergebnisse aus AP3 genutzt oder generische Annahmen darüber getroffen, wie sich ein Fahrer in bestimmten Fahrsituationen verhält. Im Zusammenspiel mit dem virtuellen Fahrer wird so die Gesamtwirkung hochautomatisierter Fahrerassistenzfunktionen bezüglich Sicherheit im Verkehr ermittelt. Grundlage dafür ist u.a. eine stochastische Verkehrssimulation.

#### Modellierung, Integration, und Anbindung von Sensormodellen

Die BMW AG wird im Rahmen dieses Projektes die Anbindung verschiedener Sensortypen in einer Simulationsumgebung untersuchen. Diese Modellierung der Sensoren kann bis hin zu physikalischen Modellen von einzelnen Sensoren gehen. Dieser Schritt ist notwendig, um eine ganzheitliche Analyse des Systems bezüglich der Robustheit im Feld durchzuführen. Ein Schwerpunkt soll hier auf der Definition von Schnittstellen zwischen den Modulen der Simulation liegen, um eine Durchgängigkeit zwischen verschiedenen technischen Umsetzungen bzw. Simulationsumgebungen zu schaffen.

### **2.5.3 UAP5.3 Virtuelle Erprobung**

In Zusammenarbeit mit allen Partnern dieses UAPs beteiligt sich BMW an der virtuellen Erprobung von ausgewählten HAF-Funktionen bzw. deren Komponenten mit dem Fokus auf deren Bewertung und Unterstützung der Entwicklung. Hierzu definiert die BMW AG mit den Projektpartnern eine einheitliche Beschreibung der virtuellen Szenarien, um die Mehrfachnutzung der Szenarien über Simulationsgrenzen hinweg zu unterstützen. Die Szenarienbeschreibungen werden für die beiden Hauptumfänge der BMW AG in diesem UAP genutzt.

Zum einem integriert die BMW AG ausgewählte hochautomatisierte Fahrfunktionen in die in UAP5.2 entwickelte Simulationsumgebung. Die Fahrfunktionen orientieren sich dabei an den in AP2 & AP4 entwickelten Funktionen. Eine ganzheitliche und repräsentative Systemanalyse kann durch die direkte Anbindung und Integration von hier entwickelten Modulen stattfinden. Ein Abbild des Umfeldes, wie es in der Simulationsumgebung vorliegt, wird aus Sicht verschiedener Sensoren generiert und dieses (gemäß der im Fahrzeug definierten Schnittstellen) den nötigen Abnehmern zur Verfügung gestellt. Die entsprechenden Fahrfunktionen werden in eine Closed-Loop Simulation integriert, um eine virtuelle Testfahrt zu erlauben.

Daneben soll die Gesamtwirkung der kooperativen hochautomatisierten Fahrfunktion bezüglich Sicherheit im Verkehr ermittelt werden. Grundlage dafür stellt u.a. eine stochastische Verkehrssimulation dar, mit Hilfe derer Szenarien in großer Zahl simuliert werden sollen. Die stochastische Variation wird gewählt, um statistisch belastbare Aussagen über das Verhalten der automatisierten Fahrfunktion treffen zu können. Für die Simulationen des Verkehrs und des Verhaltens in Übernahmesituationen müssen entsprechende Fahrerhaltensmodelle zur Verfügung stehen. Die Entwicklung des Fahrerhaltensmodells sowie die Parametrierung der virtuellen Module (Umwelt, Verkehr und Fahrverhalten) innerhalb der Testszenarien ist ein wichtiger Umfang der Arbeit der BMW AG in diesem UAP.

Für die Sicherheitsbewertung der hochautomatisierten Fahrerassistenzfunktionen sind entsprechende Gütemaße zu definieren. Diese Gütemaße können sich beispielsweise an der Zahl der auftretenden kritischen Zwischenfälle orientieren. Die Gütemaße werden anschließend für eine Sicherheitsbewertung der hochautomatisierten Fahrerassistenzfunktionen verwendet.

### **2.5.4 UAP5.4 Erprobung auf Testgelände**

Die BMW AG beteiligt sich an der Erprobung ausgewählter hochautomatisierter Fahrerassistenzfunktionen auf einem Testgelände. Der Fokus liegt hierbei auf sicherheitskritischen Use Cases, die nicht ohne weiteres auf öffentlichen Straßen durchgeführt werden können (z.B. Reaktion auf Gefahrenstellen). Das Einfahren der entsprechenden Test-Cases geschieht nach der in UAP5.2 festgelegten Erprobungsspezifikation. Alle laut Erprobungsspezifikation erforderlichen Daten werden in einem partnerspezifischen Format geloggt und der Auswertung und Dokumentation in UAP5.6 zur Verfügung gestellt.

### **2.5.5 UAP5.5 Erprobung im öffentlichen Straßenverkehr**

Die BMW AG beteiligt sich an der Erprobung ausgewählter hochautomatisierter Fahrerassistenzfunktionen im öffentlichen Straßenverkehr. Der Fokus liegt hierbei auf den nicht sicherheitskritischen Use Cases im alltäglichen Verkehr (z.B. das Durchfahren von Autobahnkreuzen). Die Erprobungsfahrten werden von ausgebildeten Testfahrern absolviert, um mögliche Auswirkungen von Fehlfunktion der erprobten Fahrerassistenzfunktionen abzufangen. Das Einfahren dieser Use Cases geschieht nach der in UAP5.2 festgelegten Erprobungsspezifikation. Alle laut Erprobungsspezifikation erforderlichen Daten werden in einem partnerspezifischen Format geloggt und der Auswertung und Dokumentation in UAP5.6 zur Verfügung gestellt.

### **2.5.6 UAP5.6 Ergebnisaufbereitung**

Die BMW AG plant keine Inhalte in diesem Arbeitspaket.

## **3 Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse**

### **3.1 AP1 Safety Server (Umfelderfassung und -repräsentation im Backend)**

Das Hauptaugenmerk der Beteiligung der BMW AG im Arbeitspaket 1 war die Entwicklung einer prototypischen Lösung zum Erlernen von Kartendaten auf einer abgegrenzten Teststrecke im Unterarbeitspaket 1.3. In den Unterarbeitspaketen 1.1 und 1.2 beteiligte sich die BMW AG an den Abstimmungen zu einheitlichen Austauschformaten und der Anbindung der Kommunikationseinheiten und Bereitstellung entsprechender Daten.

#### **3.1.1 UAP1.1 Spezifikation und Realisierung des Safety Servers**

Die BMW AG befand sich in Abstimmung mit anderen Projektpartnern über die Realisierung des Safety Servers, der in der Hessen Mobil Infrastruktur gehostet wurde. Im Rahmen der Abstimmung bestand eine besondere Herausforderung in der abgestimmten Nutzung von Open-Source Software, die den unterschiedlichen Anforderungen der beteiligten Partner genügen musste. Ergebnis war eine White-List von Softwarepaketen und Lizenzen, deren Nutzung über alle Partner hinweg abgestimmt werden konnte.

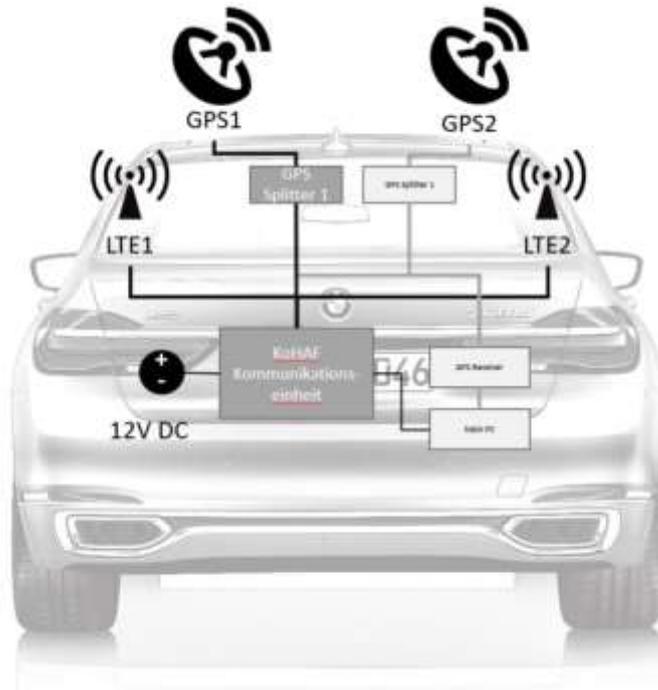
Der Safety Server war zur Zwischenergebnispräsentation im Mai 2017 einsatzbereit und stand für die Entwicklung der Backendapplikationen und Up- und Downloadschnittstellen zur Verfügung.

#### **3.1.2 UAP1.2 Kommunikation zwischen Backend und Frontend**

Ergebnis der Abstimmung über die zu verwendende Hardware war ein Fahrzeugrechner der über Ethernet mit dem restlichen automatisierten System kommuniziert. Die Box stand ab Q1 2017 zur Verfügung, wurde erst prototypisch im vorhandenen Versuchsträger verbaut und stand ab Q3 2017 fest verbaut in den dedizierten Ko-HAF Versuchsträgern zur Verfügung.

Die Hardware wird über Ethernet von einem dedizierten Port aus angesprochen, ohne dass zusätzliche Netzwerkstruktur dazwischengeschaltet ist. Die Stromversorgung wird zentral gesteuert, die Box kann so über ein Tablet im Innenraum des Versuchsträgers neu gestartet werden. Zusätzliche Anschlüsse der Box sind ein GPS Eingang und Eingänge für 2 LTE Antennen. Die LTE Antennen sind versteckt im Innenraum über der Hutablage angebracht. Von den im Versuchsträger vorhandenen zwei GPS Antennen wird eine gesplittet und versorgt sowohl das für die Fahrfunktion benutzte GPS System und die Ko-HAF Kommunikationseinheit. Um die Kabellängen zwischen dem 2-Antennensystem der Fahrfunktion gleich zu halten, wurde auch für die zweite Antenne ein Splitter verbaut (siehe Abbildung 1).

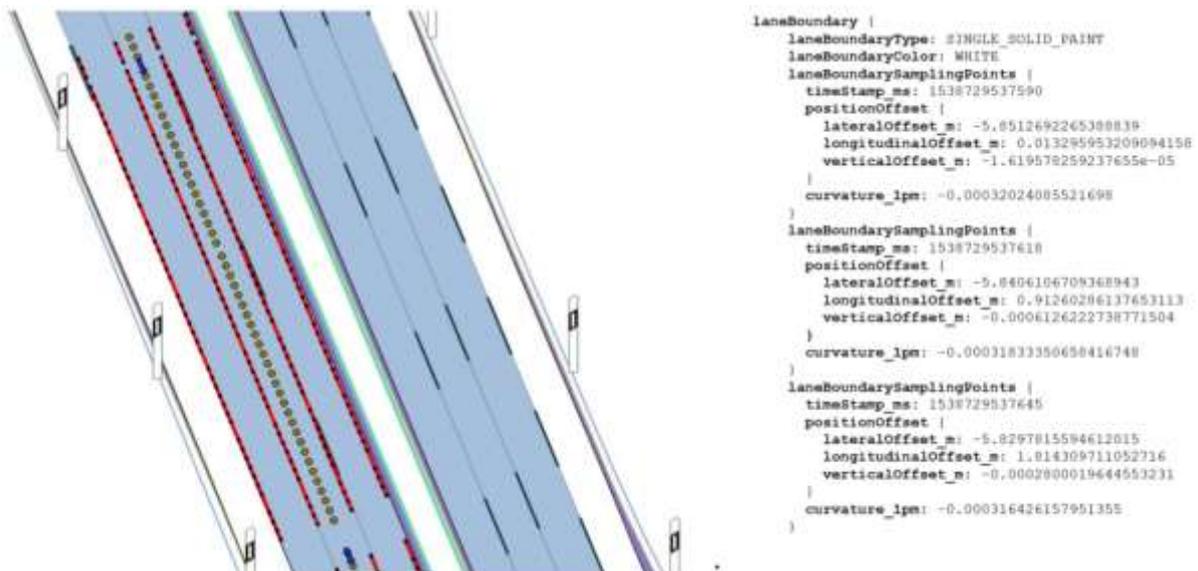
Die Kommunikationseinheit befindet sich im Kofferraum zusammen mit anderen Steuergeräten auf einem Rack montiert.



**Abbildung 1:** Hardwareintegration Kommunikationseinheit

Beim Datenformat für den Upload wurde auf dem SENSORIS Standard aufgebaut. Dieser Car-2-Cloud Standard wurde während der Projektlaufzeit von HERE an ERTICO übergeben mit dem Ziel, eine breite Akzeptanz des Standards in der Automobilindustrie zu erreichen. Innerhalb von Ko-HAF wurde SENSORIS um Definitionen erweitert, um die entsprechenden Use-Cases in Ko-HAF erfüllen zu können. Ein Beispiel eines Datenpakets ist in Abbildung 2 dargestellt.

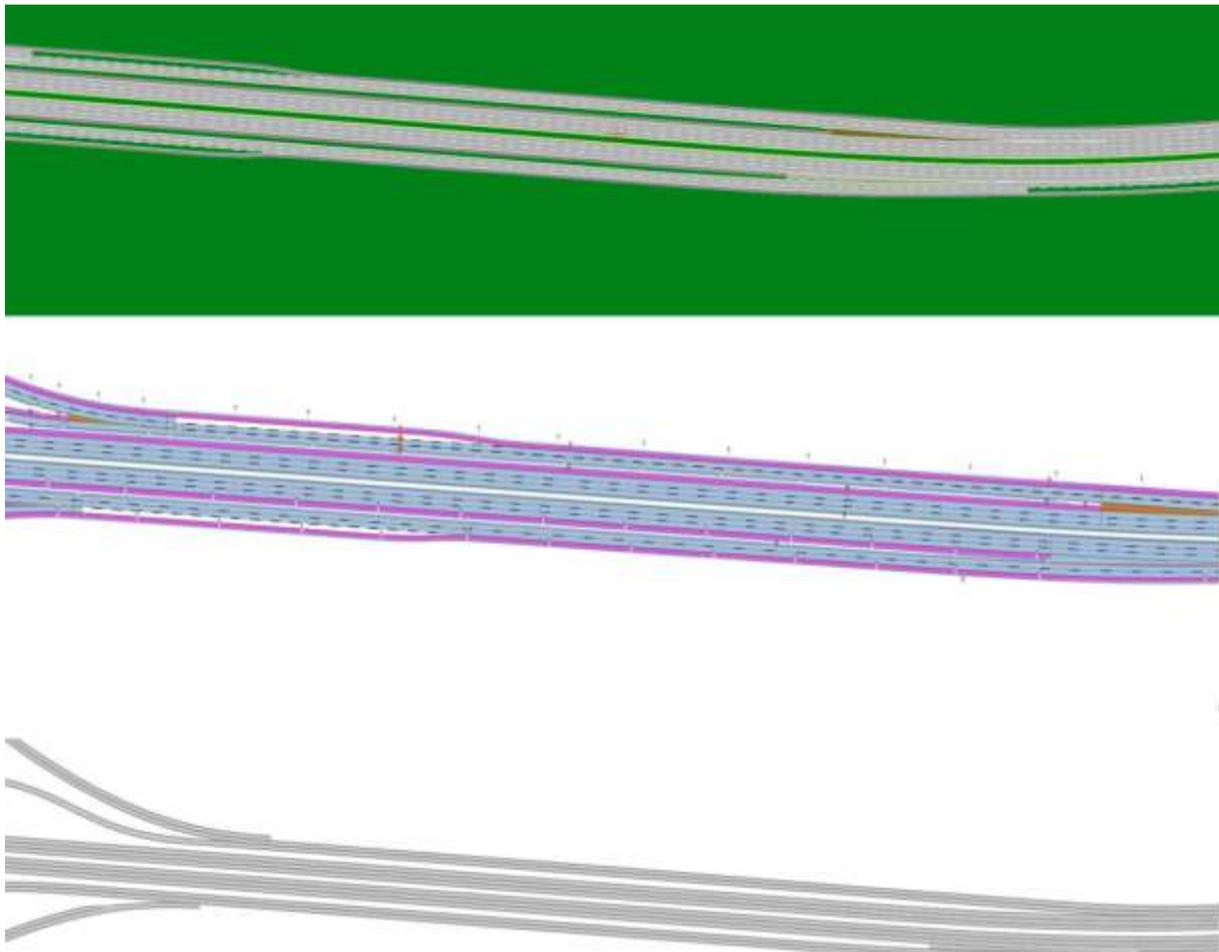
Dieser Standard wurde von der OTH Amberg-Weiden im Protobuf-Format implementiert. Seitens BMW wurden die Definitionen im Protobuf-Format in einem C++ Modul benutzt, um binäre Datenpakete mit den SENSORIS-Inhalten zu erstellen. Weitere Informationen zur Befüllung werden im Punkt 3.2.1 zusammen mit Ergebnissen aus dem UAP 2.1 „Gewinnung von Kommunikation von Backend-Daten“ vorgestellt.



**Abbildung 2:** Beispiel einer von einem BMW Versuchsträger hochgeladenen Sensoris-Kachel mit Spurmarkierungen und Ausschnitt der zugehörigen Realdaten

Die Abstimmungen zum Datenformat für den Download der Kartenkacheln und Informationen über Gefahrenstellen resultierten in der Implementierung eines Formats der Universität FORWISS Passau. Da unterschiedliche Fahrzeughersteller für die Funktion unterschiedliche Formate wie NDS oder OpenDrive heranziehen, bietet die Nutzung des FORWISS Austauschformats den Vorteil der Datenagnostik. Die Informationen liegen im Protobuf-Format vor und können im Fahrzeug einfach geparkt und im internen statischen Umfeldmodell verwendet werden.

Das FORWISS Kartenformat wurde ebenfalls in Protobuf umgesetzt und so über die Kommunikationseinheit zur Verfügung gestellt. Abbildung 3 zeigt das eingemessene Grunddatenformat im OpenDrive-Format, das am Safety-Server vorliegende Kartendatenformat und die daraus extrahierten fahrbaren Bereiche im partnerspezifischen automatisierten System.



**Abbildung 3:** Visualisierung von Kartendaten in den unterschiedlichen Formaten: Grunddatenformat (oben), Safety Server (mitte), fahrbare Bereiche in der Funktion (unten)

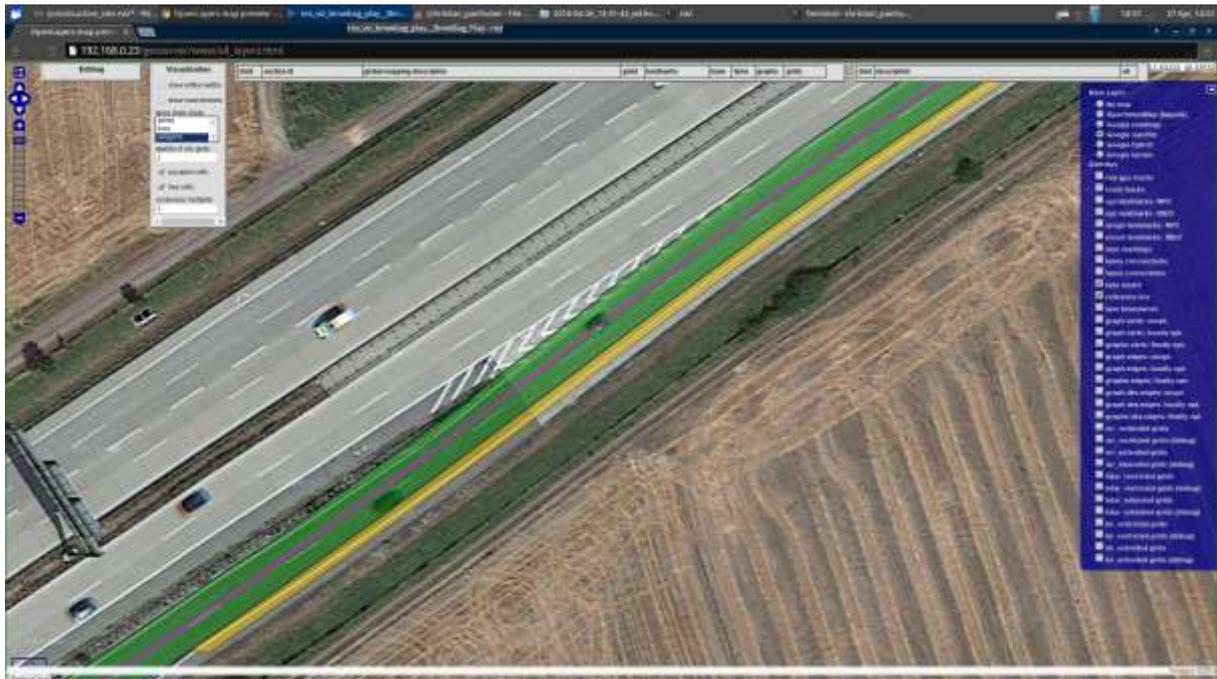
### 3.1.3 UAP1.3 Datenmodellierung im Safety Server

Die BMW AG hat sich im UAP 1.3 das Ziel gesetzt, anhand eines Streckenabschnitts aus Fahrzeugdaten eine in der Funktion nutzbare Karte zu erstellen. Dies inkludiert die Erstellung einer Server-seitigen Applikation, die die Kartenerstellung weitgehend automatisiert, aber die Möglichkeit zur manuellen Nachbearbeitung bietet.

Der zu betrachtende Streckenabschnitt wurde mehrmals durchfahren. Aufgezeichnete Sensordaten inkludieren Spurmarkierungen und Verkehrszeichen aus der Kamera, Punktwolken aus abstandsgebender Sensorik sowie Odometrie und GPS Positionen. Daraus wird serverseitig eine Homogenisierung errechnet, die die Gesamtdaten räumlich in Bezug setzt und optimiert. Zum Einsatz kam dabei eine Graph-SLAM Implementierung.

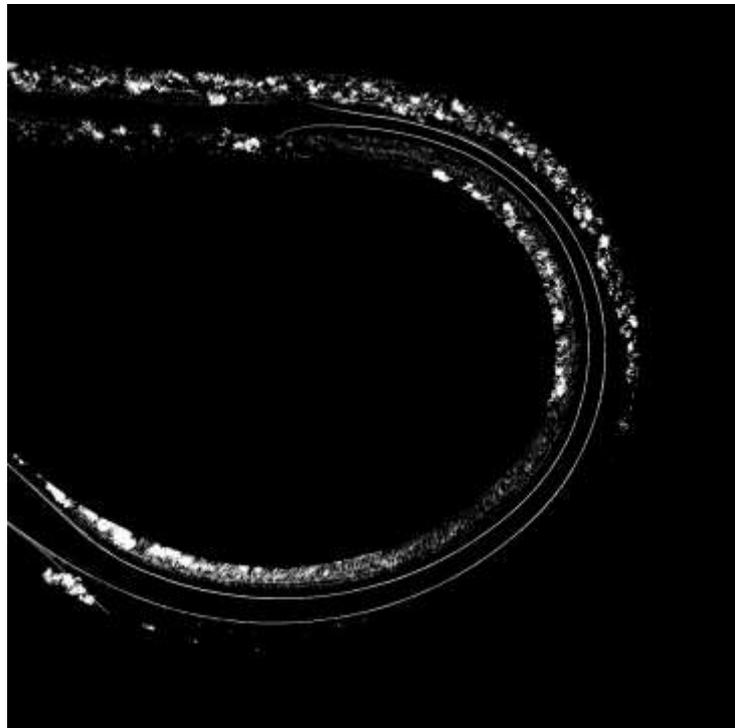
Aus den so erhaltenen konsistenten Aufzeichnungen von Kamera-Spurmarkierungen wird ein erstes Spurmodell erzeugt. Dieses Modell kann anschließend Server-seitig korrigiert werden und liegt anschließend in einer PostGIS Datenbank vor.

Abbildung 4 zeigt das Nachbearbeitungs-Tool mit einem Teil einer kartierten Strecke.



**Abbildung 4:** Korrektur von erfassten Kartendaten

Außerdem liegen 2D Belegungsgrids aus den Lidar- und Radardaten vor (siehe Abbildung 5). Diese können für einen Scanmatch Ansatz genutzt werden, bei dem Lidar- und Radarrohdaten zur Lokalisierung verwendet werden. Durch die Verwendung der Rohdaten geht wenig Information verloren, die daraus errechneten Hypothesen haben sich als robust erwiesen.



**Abbildung 5:** Beispiel einer 2D-Belegungsgridkarte von der Steilkurve in Dudenhofen

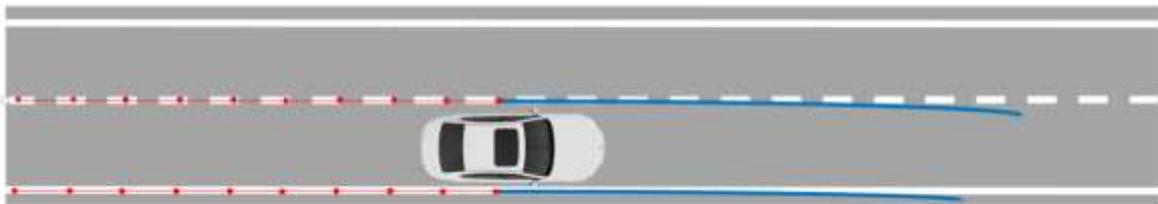
## 3.2 AP2 Frontend (Umfelderfassung und -repräsentation im Fahrzeug)

Die in AP2 entwickelten Komponenten sind die Konverter zwischen Ko-HAF-Daten und statischem Umfeldmodell in UAP 2.1, eine hochgenaue, kartenrelative Lokalisierung im UAP2.2 und die statische Umfeldfusion in UAP 2.3.

### 3.2.1 UAP2.1 Gewinnung und Kommunikation von Backend-Daten

Bei Messfahrten auf dem Testgelände und auf dem Autobahnring A3 – A5 – A661 wurden Spurmarkierungen und Schilder gesammelt und zur Aggregation an den Safety-Server über die dafür vorgesehene SENSORIS Schnittstelle hochgeladen. Das System ist dabei in der Lage die Daten im Fahrzeug zu aggregieren und nach Durchfahrt eines Abschnitts an den Safety-Server zu senden.

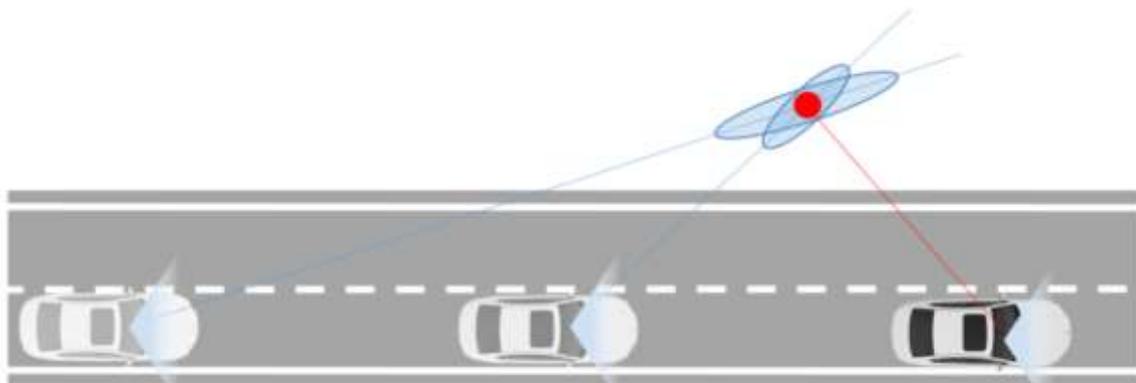
Spurmarkierungen werden bereits im Kamerabild vorfusioniert. Der Punkt auf Fahrzeughöhe ist somit der Punkt über den die längstmögliche Zeit Informationen gesammelt und fusioniert wurden. Diese Punkte werden bei Durchfahrt eines Abschnitts aufgezeichnet und dann an den Safety-Server übertragen. Die Erfassung der Messpunkte auf Fahrzeughöhe ist in Abbildung 6 schematisch dargestellt.



**Abbildung 6:** Erfassung von Spurmarkierungen

Die in Abbildung 6 blau eingezeichneten Kameradetektionen können in der Distanz abweichen. Durch das Sampeln der fusionierten Markierung am Fußpunkt auf Fahrzeughöhe wird dieser Fehler beim Hochsenden vermieden. Die einzelnen gesampelten Punkte haben jeweils die maximal verfügbare Information über den Linienverlauf.

Schilder werden dagegen fusioniert solange sie sich im Sichtbereich der Kamerasensorik befinden. Sobald sie diesen verlassen werden sie in der lokalen Karte platziert und mit dem nächsten Upload an den Safety-Server übertragen (siehe Abbildung 7).

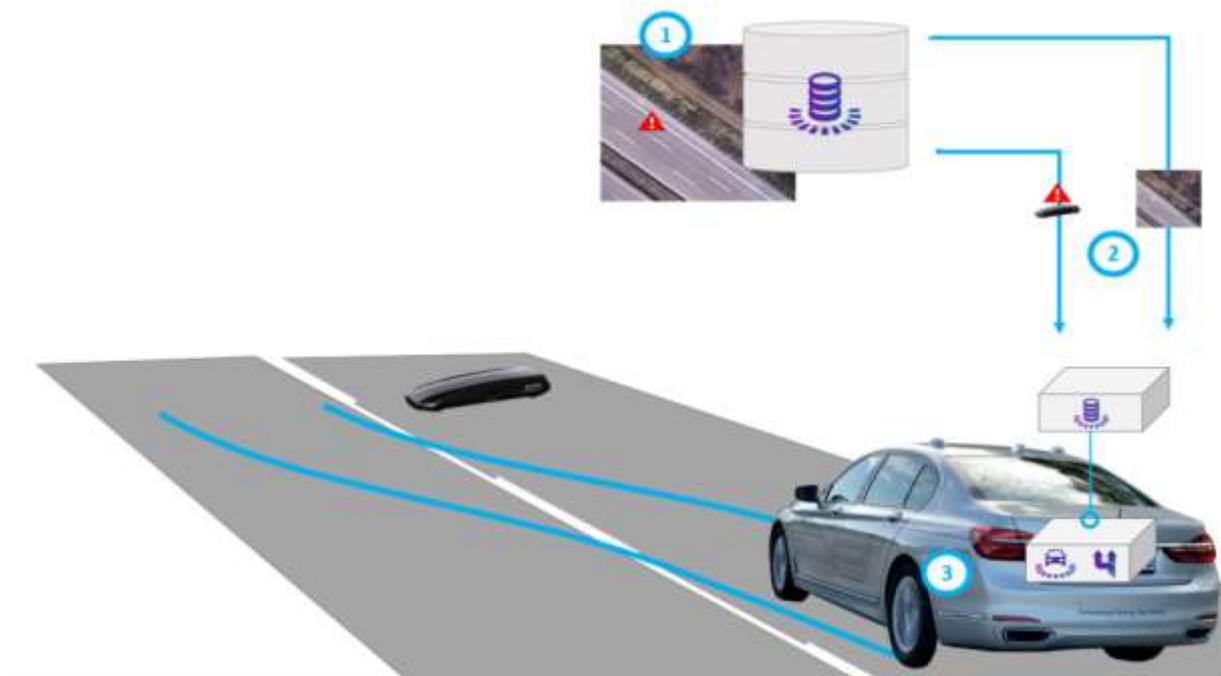


**Abbildung 7:** Erfassung von Verkehrszeichen

Abbildung 7 zeigt beispielhaft 3 Zeitschritte bei der Erfassung eines Verkehrszeichens. In Schritt 1 und Schritt 2 wird das Verkehrszeichen durch die Kamera erkannt, die Beobachtungen werden fusioniert. In Schritt 3 hat das Verkehrszeichen den Sichtbereich verlassen. Das Verkehrszeichen kann mit dem nächsten Upload mit der fusionierten Position an den Safety Server gesendet werden.

Neben dem Austausch von aktuellem Kartenmaterial und der damit verbundenen Gewährleistung einer genügend weiten Vorausschau statischer Umfelddaten bietet der im Ko-HAF AP1 entwickelte Safety-Server die Möglichkeit, Warnungen über Gefahrenstellen auszugeben.

Das automatisierte Fahrzeug fragt dazu vorliegende Gefahrenstellen über den Safety Server ab und verarbeitet diese im Umfeldmodell, um eine entsprechende Reaktion planen zu können. Abbildung 8 verdeutlicht das Vorgehen schematisch.



**Abbildung 8:** Schematischer Ablauf: Ausweichen auf Skibox

1. Im Safety-Server liegt eine Information über eine Gefahrenstelle vor. Informationen beinhalten die Position, Spurzuordnung, Alter, Größe und Typ des Hindernisses bzw. der Gefahrenstelle. Quelle solcher Informationen sind andere automatisierte Fahrzeuge, die bei vorangegangenen Durchfahrten die Gefahrenstelle klassifiziert und hochgeladen haben. Auf dem Testgelände in Dudenhofen wurde beispielsweise eine auf der Strecke liegende Skibox vom Projektpartner Audi erfasst und eine entsprechende Information an den Safety-Server übermittelt.
2. Das automatisierte Fahrzeug fragt regelmäßig neue Kartendaten und Events ab, um eine genügend weite Vorausschau zu gewährleisten. Die Kommunikation wird dabei von der in AP1 entwickelten und im Fahrzeug verbauten AP1-Box abgewickelt. Die AP1-Box leitet vom AP2-System generierte Anfragen für Karten-Daten und Event-Daten über eine LTE-Verbindung an den Safety-Server und erhält die entsprechenden Antworten. Im Fahrzeug können diese Daten über das AP2-System abgerufen werden.
3. Innerhalb des AP2-Systems werden die vorliegenden Event-Daten in das fusionierte Straßenmodell eingefügt. Diese komplette Sicht über die statische Umgebung wird dem-AP4 System, welches die Fahrfunktion kontrolliert, zur Verfügung gestellt. Das AP4-System kann so frühzeitig auf Gefahrenstellen reagieren und, wie im auch bei der Abschluss-Demonstration gezeigten Beispiel der Skibox, auf eine nicht gefährdete Spur wechseln.

Auf dem Testgelände konnte so dargestellt werden, dass über die von Kooperationspartnern bereitgestellte Information über Gefahrenstellen sowohl Sicherheit als auch Komfort erhöht werden kann. Durch die frühe Information über zum Beispiel einen notwendigen Spurwechsel kann ein solches Manöver früher geplant werden als dies der Fall wäre, wenn nur die Sensorinformation zur Verfügung stünde. Es erhöht sich die Chance, dass ein solcher Spurwechsel auch in dichtem Verkehr gelingt, bevor das Fahrzeug zum Anhalten gezwungen wird.



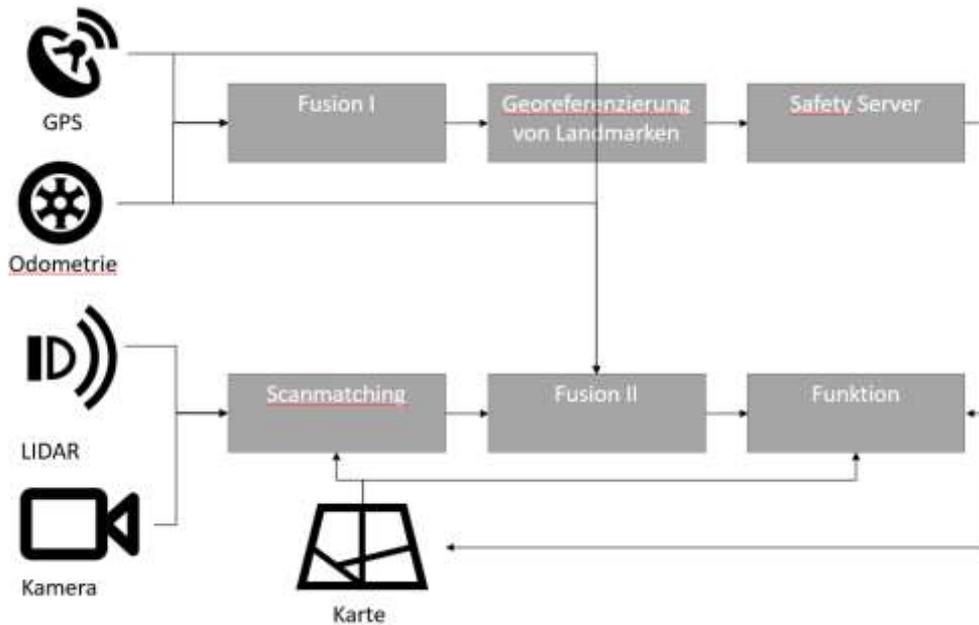
**Abbildung 9:** Darstellung der statischen Umfeldmodelldaten inklusive des Hindernisses, dazu Außenansicht und Visualisierung für den Fahrer

Abbildung 9 zeigt beispielhaft eine Szene, bei der ein Spurwechsel aufgrund einer Gefahrenmeldung vom Safety-Server geplant wird. Zu sehen ist das statische Umfeldmodell inklusive des Hindernisses dargestellt als orange Box. Die von AP4 geplante Trajektorie in grün wird auf die Nachbarspur geplant. Die beiden kleineren Abbildungen zeigen eine Außenansicht und eine Innenansicht mit der Visualisierung für den Fahrer während einer solchen Reaktion auf die Skibox.

### 3.2.2 UAP2.2 Fahrzeuglokalisierung

Um Kartendaten in der Fahrfunktion nutzen zu können, ist es erforderlich, die Position des automatisierten Fahrzeugs innerhalb der hochgenauen Karte verlässlich und genau zu bestimmen. Die BMW AG implementierte dazu im Rahmen des Unterarbeitspakets 2.2 eine hochgenaue Lokalisierungslösung nach gemeinschaftlich definierten Vorgaben.

Eine erste, grundlegende Design-Entscheidung war es, zwei Lokalisierungshypothesen zu bestimmen. Eine von der hochgenauen Karte unabhängige, auf Odometrie und GPS basierende für den Upload der SENSORIS Daten, und eine von der Karte abhängige, genauere und robustere Hypothese für die Funktion. Würde für den Upload eine von der Karte abhängige Lokalisierungslösung verwendet werden, würde eine unerwünschte Regelschleife entstehen, mit der sich unter Umständen eine fehlerhafte Karte selbst bestätigt. Durch diese Architektur mit unabhängigen Hypothesen kann dies ausgeschlossen werden.

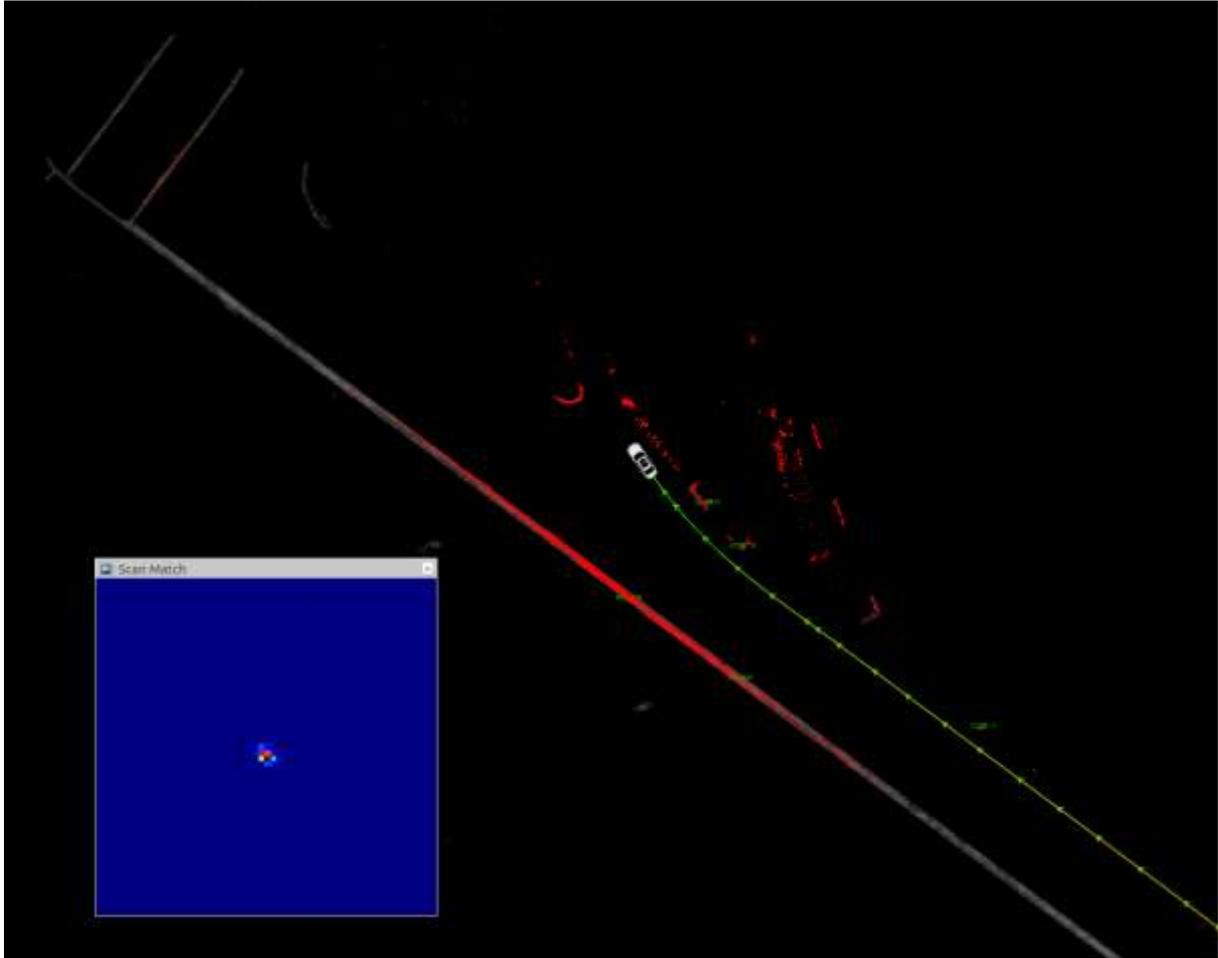


**Abbildung 10:** Schema Verwendung Karte und Lokalisierung

Für die Funktion erfolgt eine Fusion von GPS, einem Scanmatch aus Laserscannerpunkten gegen eine Belegungskarte, einem Scanmatch von Kamera-Landmarken wie Pfosten, Schilder und Spurmarkierungen gegen die Ko-HAF Landmarkenkarte und Odometrie. Abbildung 10 visualisiert die Verwendung von Karte und Lokalisierung schematisch.

Abbildung 11 zeigt beispielhaft eine Visualisierung des Scanmatches der Laserscannerpunkte gegen die Belegungskarte auf dem Testgelände in Dudenhofen. Die links unten dargestellte Heatmap zeigt die Wahrscheinlichkeit, dass sich das Fahrzeug in einer bestimmten Zelle des Suchbereichs befindet. Dieser erstreckt sich 10x10 Meter um die vorhergehende Positionsschätzung des Fahrzeugs.

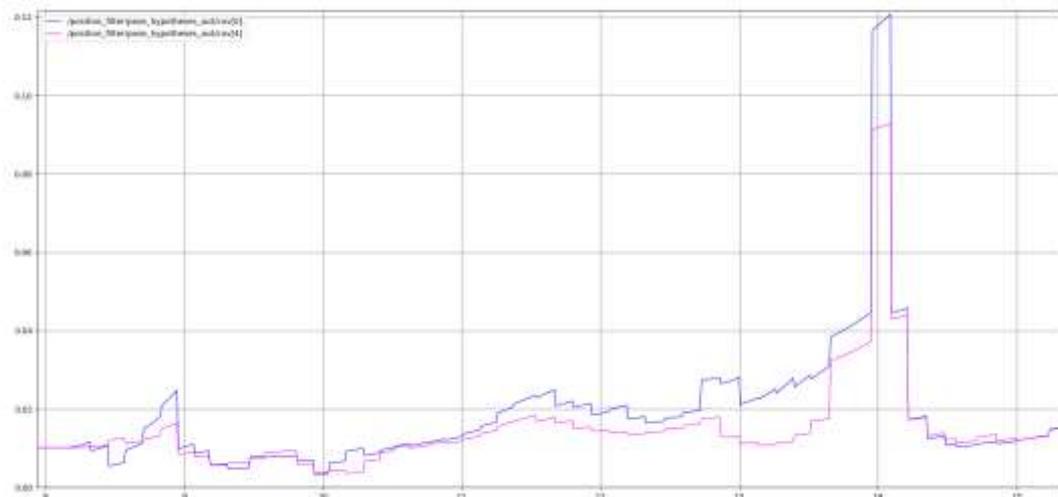
Aufgrund des räumlich beschränkten Suchbereichs ist eine erste Schätzung der Position durch GPS erforderlich. Wenn innerhalb der GPS Position eine klare Position aus dem Laserscanner geschätzt werden kann, dann ist die Initialisierung abgeschlossen. Andernfalls werden weitere GPS Messungen abgewartet.



**Abbildung 11:** Laserscanner-Hypothese bei der Abfahrt von der langen Geraden in Dudenhofen

Die nächsten Abnehmer der Lokalisierungshypothese sind die Straßenmodellfusion und die Georeferenzierung von Kartenattributen. Beide Komponenten profitieren von einer Integritätsbewertung und einer Schätzung der Genauigkeit.

Innerhalb der Fusion der Lokalisierung wird eine Positionshypothese als Normalverteilung gehalten. Der 3-dimensionale Zustand ist somit durch einen 3-dimensionalen Vektor der Mittelwerte über  $x$ ,  $y$  und Fahrzeugorientierung sowie einer dazugehörigen  $3 \times 3$  Kovarianzmatrix gegeben. Mithilfe der Kovarianzmatrix lässt sich eine Aussage über die Positionsgenauigkeit treffen.

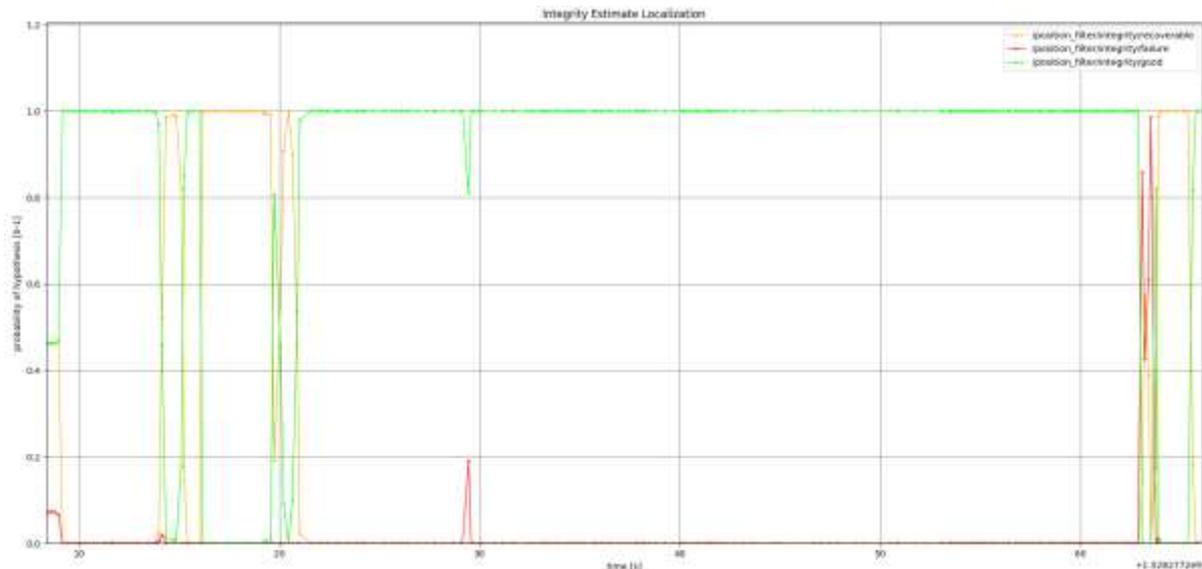


**Abbildung 12:** Verlauf der Lokalisierungsvarianz bei Sensorausfall

Die Abbildung oben zeigt dabei den Anstieg in der Varianz der Position bei einem simulierten Ausfall eines GPS-Sensors in einer Umgebung bei der durch geringe Landmarkendichte die Fusion nur wenig Gewissheit über die tatsächliche Position besitzt.

Eine weitere Absicherung der Korrektheit der Positionshypothese geschieht über eine Integritätsbewertung. Diese bewertet im Wesentlichen, wie gut die aus den unterschiedlichen Sensoren generierten Hypothesen übereinstimmen und hilft systematisch, fehlerhafte Messungen einzelner Sensoren zu erkennen.

Bei Tests auf dem Testgelände in Dudenhofen wurde durch Aufschaltung von GPS-Fehlern und der Falschpositionierung von Landmarken die Wirksamkeit der Schätzung überprüft.



**Abbildung 13: Lokalisierungs-Integrität in 3 Zuständen**

Die grüne Linie in Abbildung 13 gibt die Wahrscheinlichkeit an, sich in einem Zustand zu befinden, an dem alle Hypothesen übereinstimmen. Gelb gibt Zustände an in denen einzelne korrigierbare Abweichungen auftreten. Dies wurde durch Verschiebung von Landmarken provoziert. Die rote Linie gibt die Wahrscheinlichkeit an, sich in einem Zustand zu befinden in dem die Hypothesen nicht übereinstimmen und die fusionierte Lösung falsch ist. Dies wurde durch Verfälschen des GPS-Signals an einer Stelle ohne beobachtbare Landmarken und wenig strukturierter Umgebung provoziert (ab ca. 63s).

### 3.2.3 UAP2.3 Statisches Umfeldmodell, Kartenbewertung und Georeferenzierung der Backend-Daten im Fahrzeug

Um mit von den Karteninformationen abweichenden Umgebungen oder auch mit Lokalisierungsfehlern umgehen zu können, ist eine Fusion aus Karten und/oder Sensordaten im Fahrzeug notwendig. Die Fusion reichert das Wissen über die statische Umgebung mit zusätzlichen Sensordaten an. Die Karte wird zudem innerhalb der Fusion bewertet. Ergibt eine Bewertung der Karte, dass deren Informationen nicht zur beobachteten Umgebung passen, dann kann die Fusion auf die ausschließliche Verwendung von Sensordaten zurückfallen.

Die Fusion des statischen Umfeldmodells bildet eine Hypothese über den geometrischen Verlauf der Spur sowie der Nachbarspuren als Klothoidenspline in folgender Form:

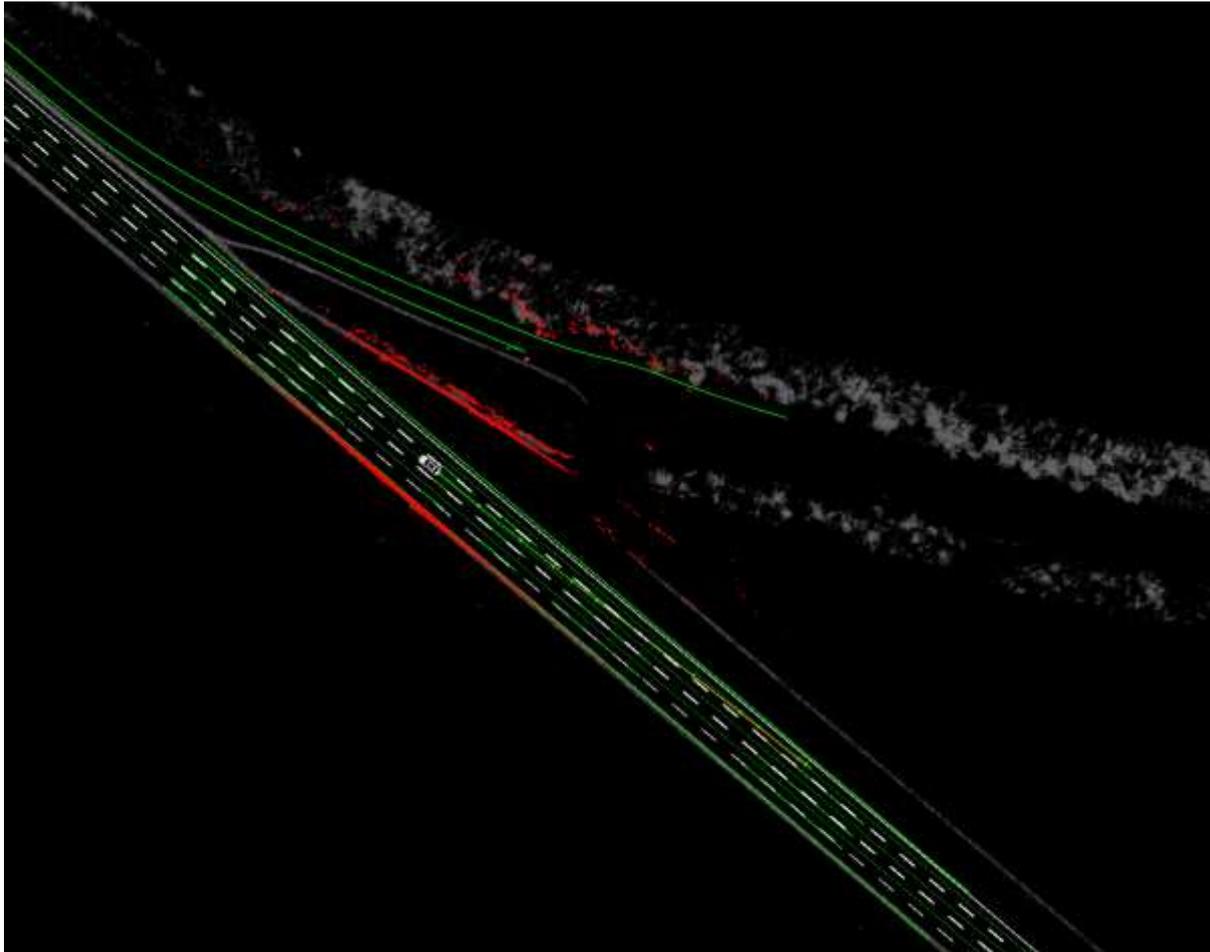
- x x-Position des Fußpunkts in Fahrzeugkoordinaten
- y y-Position des Fußpunkts in Fahrzeugkoordinaten
- b Spurbreite
- $\theta$  Winkel im ersten Punkt der ersten Klothoide
- $\dot{\theta}_1$  Krümmung im ersten Punkt der ersten Klothoide

$\hat{\theta}_{1...n}$  n Krümmungsänderungen, entsprechend der Anzahl der Klothoiden im Spline

Dieser Zustandsvektor wird durch Messungen aus der Kamera über den Fahrspurverlauf, Messungen von Fremdobjekttrajektorien und Randbebauungen sowie Informationen aus der Karte periodisch korrigiert.

Ein Zustand wird dabei als multivariate Normalverteilung mit entsprechender Kovarianzmatrix gehalten. Updates des Zustands mit neuen Beobachtungen, also Kartenupdates und Kameraupdates, werden über einen Unscented Kalman-Filter (UKF) errechnet.

Abbildung 14 zeigt das Ergebnis der Fusion auf der langen Geraden auf dem Testgelände in Dudenhofen.



**Abbildung 14:** Beispiel Straßenmodellfusion

Die Abbildung zeigt die Spurbegrenzungen laut Kartendaten in Grün. Die weiß eingezzeichneten Spurmarmarkierungen zeigen das leicht von der Karte abweichende Ergebnis der Straßenmodellfusion. Die hier vorliegende Abweichung stammt von einer geringen Ungenauigkeit im Lokalisierungsergebnis.

Die Straßenmodellsschätzung behält dabei immer zwei Hypothesen über die statische Umwelt. Eine basiert rein auf den Sensordaten, eine zweite wird mit den Beobachtungen aus Sensorik und Karte generiert. Geht eine Beobachtung aus der Karte ein, so lässt sich die Wahrscheinlichkeit dieser Beobachtung gegeben dem fusionierten Zustand und dem auf Sensorik basierenden Zustand berechnen. Sofern die Karte und Sensorbeobachtungen übereinstimmen ist der Unterschied in diesen beiden Wahrscheinlichkeiten gering. Sollte die Karte jedoch abweichen, dann passt die Beobachtung signifikant schlechter zu einem Zustand, der nur aus Sensorbeobachtungen generiert wurde als zu einem Zustand der die abweichenden Karteninformationen benutzt.

Das in Abbildung 15 dargestellte Signal gibt an, wie weit die Kartengeometrie der aufgrund der Kameraschätzung erwarteten Geometrie entspricht. Ab Sekunde 51 bis Sekunde 57 wurde ein fehlerhafter Kurvenverlauf dargestellt, der eine starke Abweichung der Kartengeometrie von der Kamerageometrie bewirkt.

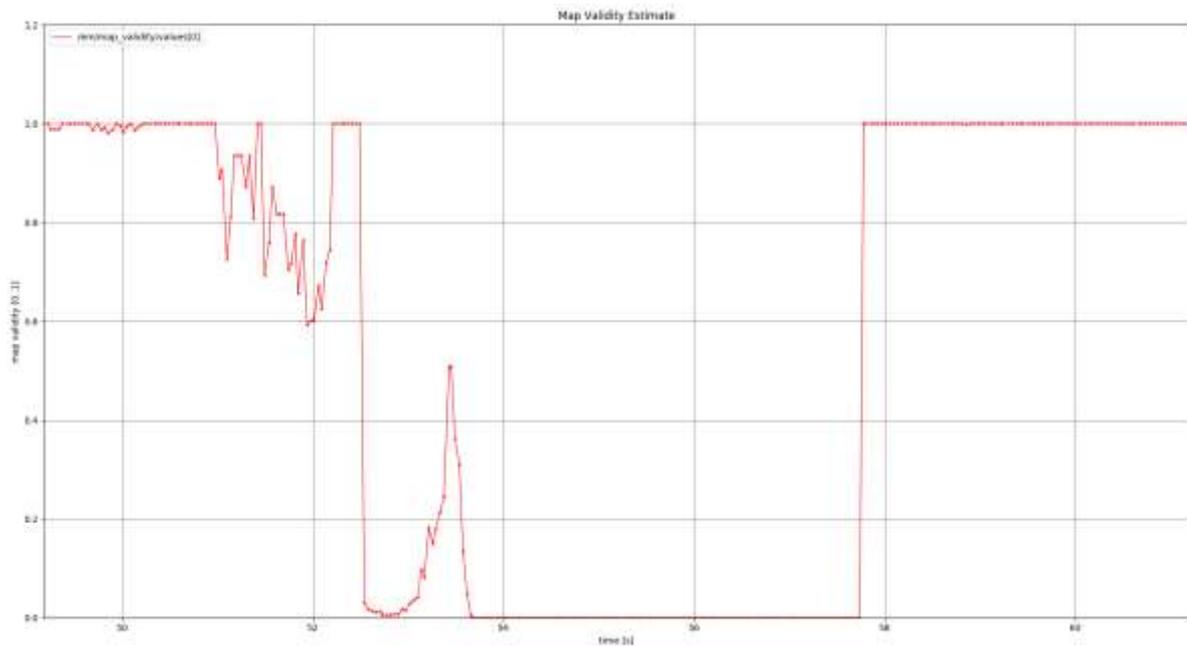


Abbildung 15: Kartenbewertung der Roadmodel-Fusion

### 3.3 AP3 Kooperative Fahrzeugführung und kontrollierbare Automation

#### 3.3.1 UAP3.1 Spezifikationen der Prüfscenarien und Aspekte der Mensch-Maschine-Interaktion

Das UAP 3.1. beinhaltet die Sammlung, Definition und Systematisierung grundlegender methodischer Aspekte und wichtiger inhaltlicher Konstrukte als Grundlage für ein gemeinsames Verständnis im Teilprojekt und die Vergleichbarkeit der inhaltlichen Arbeiten der folgenden Arbeitspakete. Z.T. wurden daraus neue methodische Ansätze entwickelt (z.B. TOC-Rating) bzw. existierende Methoden für den Einsatz zur Untersuchung hochautomatisierter Systeme weiterentwickelt (z.B. Wizard-of-Oz-Ansatz). Die BMW AG hat zu allen Themen Know-How beisteuern können, einige Themen wie die Spezifikation der Prüfscenarien wurden maßgeblich von der BMW AG erarbeitet. Im Rahmen der UAP-Leitung nahm BMW für das UAP3.1 außerdem eine steuernde Rolle ein.

#### Systematik von Nutzungs- und Fahrscenarien

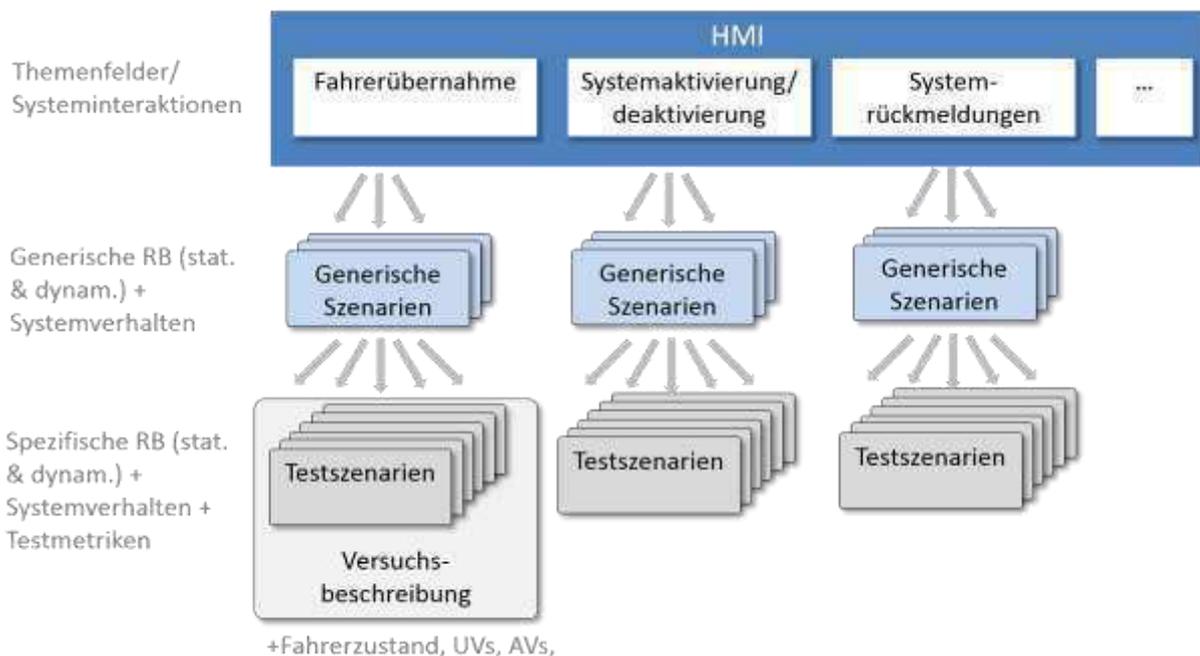
##### Zielsetzung

Ziel des Teilarbeitspakets T3.1.1 war die Sammlung und Systematisierung von Nutzungs- und Fahrscenarien hochautomatisierter Fahrzeugführung. Die Analyse und Sammlung der Nutzungs- und Fahrscenarien erfolgte dabei aus dem AP3-Blickwinkel heraus und beschäftigt sich v.a. mit der Rolle des Fahrers in Übernahmeszenarien. Ziel war es, ein abgestimmtes projektübergreifendes Arbeiten an (HMI-) Konzepten und deren Bewertung anhand konkreter Testszenarien in AP3 zu ermöglichen. Dabei wurde eine enge Vernetzung mit AP4 und AP5 angestrebt. Die wesentlichen Arbeiten und Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt:

##### Begriffsklärung

Das Thema Nutzungs- und Fahrscenarien wurde von Beginn an in engem Austausch mit den APs 4 und 5 diskutiert, in denen Use Cases und verschiedene Formen von Szenarien ebenfalls eine Rolle spielen. Dabei wurde schnell klar, dass es zwar Gemeinsamkeiten gibt, die verschiedenen APs jedoch einen stark unterschiedlichen inhaltlichen Fokus haben, der sich auch in Auswahl und Inhalt der Szenarien widerspiegelt. Im Folgenden sollen einige Begrifflichkeiten wie sie im AP3 verstanden und verwendet werden, erläutert werden (vgl. Abbildung 16). Bei der Definition der Begriffe wurden existierende Nomenklaturen berücksichtigt, insgesamt stand jedoch im Vordergrund, die Begriffsdefinitionen möglichst einfach und zweckgebunden zu gestalten:

- Das übergeordnete Themenfeld HMI beinhaltet unterschiedliche Kategorien von **Systeminteraktionen** (z.B. Fahrerübernahme, Systemrückmeldungen im Umgang mit strategischen Situationen oder während der Normalfahrt), die aus AP3-Sicht relevant sind.
- **Generisches Szenario:** Generische Szenarien enthalten bereits die wesentlichen Bestandteile, allerdings in grober Form. Für das generische Szenario relevante Aspekte sind sowohl die statischen und dynamischen Rahmenbedingungen (z.B. gerade Strecke, dichter Verkehr...) als auch Aspekte des Systemverhaltens (z.B. Take-Over-Request (TOR),...). (Beispiel: „Abfahren von der Autobahn -> Fahrstreifenwechsel nicht möglich wegen zu dichtem Verkehr. TOR wird ausgegeben.“)
- **Testszenario:** Im Testszenario werden alle Komponenten des generischen Szenarios detailliert. Neben der Konkretisierung der Rahmenbedingungen und des Systemverhaltens kommen szenariospezifische Ausprägungen dazu. (Beispiel: Rechter Fahrstreifen, 100 km/h, Fahrstreifenbreite 4,5 m, Verkehrsdichte 20 Fahrzeuge / km, ...; Relevante Metriken wären hier z.B. durchgeführter Fahrstreifenwechsel ohne Kollision, Rückführung Hände/Füße: min t(Hands-On & Füße auf Pedalerie & Taste/Schalter, Zeit bis der Fahrstreifenwechsel abgeschlossen ist,...)
- Die Beschreibung der Testszenarien ist ein Bestandteil der **Versuchsbeschreibung**<sup>1</sup>. Die Versuchsbeschreibung enthält darüber hinaus jedoch weitere für die Dokumentation des Versuchs relevante Informationen wie Stichprobenbeschreibung, Versuchsdesign, unabhängige Variablen (UVs) und abhängige Variablen (AVs), Beschreibung des Fahrerzustands usw.



**Abbildung 16:** Begriffsdefinitionen in AP3

### Sammlung, Bewertung und Systematisierung relevanter Übernahme-szenarien

Als Ausgangsbasis für die Erarbeitung und Ableitung relevanter Übernahme-szenarien diente eine vom AP4 erarbeitete Funktionsliste, in der die in Ko-HAF umzusetzenden Use Cases beschrieben werden. Der Fokus in diesem AP4 Dokument liegt auf den Funktionen bzw. Use Cases sowie dem korrespondierenden Systemverhalten. Systemgrenzen sowie Übernahme-szenarien kommen nicht vor. Im engen Austausch mit dem AP4 wurden daher basierend auf dieser Funktionsliste AP3-relevante Kriterien ergänzt und diskutiert. Hauptziele waren es dabei, (1) mögliche Übernahme-szenarien zu erarbeiten, (2) die Rolle des Fahrers zu definieren und (3) ein Verständnis für die zeitlichen Anforderungen der Szenarien zu entwickeln um erste Informationen über das Systemverhalten in diesen Szenarien zu erhalten. Auf Basis dieses Inputs konnte eine Liste genereller Übernahme-szenarien abgeleitet werden.

<sup>1</sup> Das im AP durchgehend verwendete Template für die Versuchsbeschreibung wird im Folgenden für den Bericht aller im Rahmen des AP3 durchgeführten Studien verwendet.

Es wurden unterschiedliche Ansätze für eine Systematisierung der Übernahmeszenarien in Workshops diskutiert. Folgende Bewertungskriterien wurden schlussendlich als Schlüsselfaktoren identifiziert und der Bewertung der Szenarien zugrunde gelegt (vgl. Tabelle 1):

- Dringlichkeit der Übernahme
- Prädizierbarkeit der Übernahme
- Kritikalität der Übernahme
- Komplexität der Fahrerreaktion

**Tabelle 1:** Klassifikation der Faktoren Dringlichkeit, Prädizierbarkeit, Kritikalität und Komplexität der Fahrerreaktion

| Factors         | Low (1)                                 | Medium (2)  | High (3)                                    |
|-----------------|---|---|---|
| Urgency         | High time budget                        | Medium time budget                                    | Small time budget                           |
| Predictability  | Near-term detection of the system limit | Predictable, but dependent on situational conditions. | Known from backend, map, V2V-communication. |
| Criticality     | Low safety risk                         | Increased safety risk                                 | High safety risk                            |
| Driver Response | Low complexity (e.g. stabilizing)       | Medium complexity (e.g. steering)                     | High complexity (e.g. lane change)          |

Die Liste der Übernahmeszenarien wurde daraufhin anhand der geschilderten Kriterien bewertet (vgl. Tabelle 2). Einige Szenarien können in der Übersicht nicht eindeutig bewertet werden, hier gibt es Abhängigkeiten von der konkreten Ausprägung der Situation (Bsp.: Befindet sich die Gefahrenstelle auf dem eigenen Fahrstreifen oder einem benachbarten Fahrstreifen?) bzw. z.T. auch mit Aspekten der Systemgestaltung (Bsp.: Wie weit reicht die HAF-Funktion im Übernahme-Szenario „Abfahren von der Autobahn: Übernahme wegen Autobahnende“: Muss der Fahrer noch auf dem Verzögerungstreifen vor der Abfahrtsrampe übernehmen oder kann die Funktion auch auf der Abfahrtsrampe noch erhalten werden z.B. bis zur nächsten Kreuzung/Einmündung?).

**Tabelle 2:** Klassifikation der Übernahmeszenarien

| No. | Name   | Urgency | Predictability | Criticality | Driver Response |
|-----|--|---------|----------------|-------------|-----------------|
| 1   | Sensor Failure (Subsystem)   | 1       | 1              | 1           | 1               |
| 2   | Sensor Failure (Total)   | 3       | 1              | 2-3         | 1-2             |
| 3   | End of Highway   | 1       | 3              | 1-2         | 1-2             |
| 4   | Lane change to deceleration lane not possible (e.g. because of traffic on target lane) | 2       | 2              | 1           | 3               |
| 5   | Lane change from entrance ramp not possible  | 3       | 2              | 2           | 3               |
| 6   | Road narrows (known from backend)  | 1       | 3              | 2           | 2               |
| 7   | Road narrows (detected by on-board sensors)  | 3       | 1              | 2           | 2               |
| 8   | Danger zone / obstacle ahead (known from backend)                                      | 1       | 3              | 1-3         | 1-3             |
| 9   | Danger zone / obstacle ahead (detected by on-board sensors)                            | 3       | 1              | 1-3         | 1-3             |
| 10  | Loss of reference signals (e.g. lane markings missing)                                 | 3       | 1              | 2-3         | 1               |
| 11  | Predictable loss of reference signals (known from backend)                             | 1       | 3              | 2-3         | 1               |

### Auswahl geeigneter Szenarien

Mit Hilfe dieser Klassifizierung können nun je nach Untersuchungsgegenstand geeignete Testszenarien abgeleitet werden.

**Tabelle 3:** Empfehlung geeigneter Testszenarien in Abhängigkeit des Untersuchungsgegenstands.

|  | Urgency | Predictability | Criticality | Driver Response |
|--|---------|----------------|-------------|-----------------|
| Human performance limits               | High    | Low            | High        | Medium-high     |
| Time demand for unplanned transitions  | Medium  | Low            | Low         | Low-high        |
| Driver comfort for planned transitions | Low     | High           | Low         | Low             |

Die erarbeiteten Szenarien stellten auch die Grundlage für die experimentelle Planung der empirischen Arbeiten in den Teilprojekten 3.2 (Untersuchung von Automationseffekten und Implementierung eines Moduls Fahrerverfügbarkeit und Vigilanz) und 3.3 (Integration der Transitionskonzepte für HAF und deren Bewertung) dar. Für die Studien zum Thema „Fahrerverfügbarkeit“ wurden beispielsweise Szenarien gewählt, die eine mittlere oder hohe Dringlichkeit beinhalten, eine gewisse Komplexität der Fahrreaktion erfordern und natürlich eine experimentelle Variation des Fahrerzustands im Vorfeld zulassen.

Die vorgestellte Systematik wurde in einem Paper veröffentlicht<sup>2</sup>. Des Weiteren werden die Ergebnisse im Rahmen der ISO 21959 Part 2 weiterverwendet.

### Definition der Bewertung der Kontrollierbarkeit (Metriken) (T3.1.2)

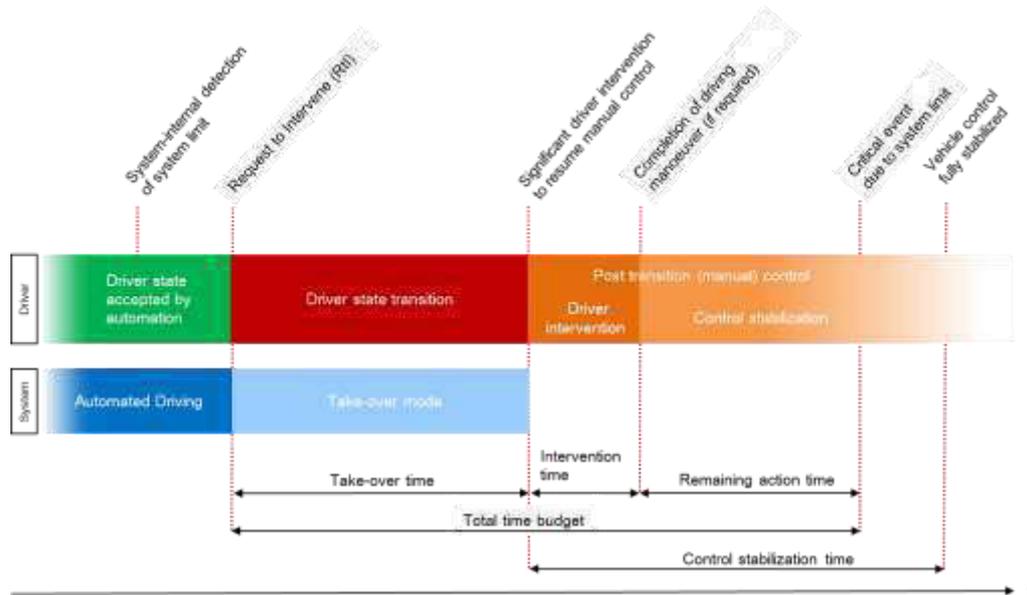
#### Zielsetzung

Ziel des Teilarbeitspakets T3.1.2 war die Definition von notwendigen Metriken zur Prüfung und Messung von Kontrollierbarkeit. Alle Projektpartner gaben hier ihren Input, die TU München konsolidierte und koordinierte die Sammlung und Systematisierung der Metriken. Diese wurden bei den Versuchen und Experimenten der Partner verwendet und erlauben einen partnerübergreifenden Vergleich der Ergebnisse. Nachdem diese Metriken als abhängige Variablen in den einzelnen Versuchen definiert werden, bilden sie die Grundlage der Empirie in AP3. Eng damit verknüpft ist die Frage geeigneter Methoden für die Bewertung der Kontrollierbarkeit. Mit dem sog. TOC-Rating und den Wizard-Of-Oz-Versuchen konnte BMW hier einen entscheidenden Beitrag leisten.

#### Übernahmeprozess und Sammlung geeigneter Metriken

Zunächst galt es, sich innerhalb des Projekts partnerübergreifend auf ein gemeinsames Modell zu einigen, das chronologisch den Ablauf einer Übernahme für Fahrer und System beschreibt (vgl. Abbildung 17).

<sup>2</sup> Gold, Christian & Naujoks, Frederik & Radlmayr, Jonas & Bellem, Hanna & Jarosch, Oliver. (2017). Testing Scenarios for Human Factors Research in Level 3 Automated Vehicles. 551-559. 10.1007/978-3-319-60441-1\_54.



**Abbildung 17:** Modell des Übernahmeprozesses nach Marberger et al.<sup>3</sup>

Daran anschließend wurden in einem ersten Schritt eine Vielzahl relevanter empirischer Vorarbeiten im Rahmen einer Literaturrecherche gesammelt und die verwendeten Metriken aufgelistet. Vor allem die Eignung der verwendeten Metriken zur differenzierten Beschreibung von Übernahmeleistung nach einer Übernahmeaufforderung und möglichen Metriken, die vor einer Übernahmeaufforderung den Fahrerzustand und dessen Änderung beschreiben, standen im Fokus der Recherche. In enger Abstimmung zu den Arbeiten für einen gemeinsamen Testszenarienkatalog (vgl. UAP3.1.1) wurden die gesammelten Metriken auf deren Eignung pro Szenario unterteilt.

Zudem wurden die gefundenen Metriken in einer Vorauswahl geclustert, um neben einer besseren Übersichtlichkeit auch potenzielle Alternativen pro Cluster anbieten zu können, sofern gewisse Metriken in ausgewählten Szenarien kaum Aussagekraft haben. Folgende Cluster wurden festgelegt:

- Zeit (Reaktionszeiten, Übernahmezeit)
- Qualität (TTC, Beschleunigung (long., lat.), Trajektorien)
- Fahrerverhalten, Informationsaufnahme (Spiegel-, Schulterblicke)
- Subjektive Daten (Trust, subjektive Kritikalität, Komplexität)

Der Vorschlag der Metriken auf Basis des entwickelten Szenarien-Katalogs zielt auf Übernahmesituationen und die Bewertung des Fahrerzustands vor einer Übernahme. Nachdem der Fahrer als Rückfallebene in Übernahmesituationen die Fahraufgabe übernehmen muss, bewerten die Metriken einerseits den Fahrerzustand bzw. die Verfügbarkeit der Fahrer für eine Übernahme vor dieser und die Dynamik der Übernahmesituation, also das Fahrerverhalten in der Übernahme.

Die szenarienbasierte Sammlung geeigneter Metriken soll an folgendem Beispielszenario verdeutlicht werden:

### **Beispiel: Szenario 1 – Sensorausfall „Total/Komplett“**

Das Szenario wird als Komplettausfall der Sensorik, bzw. der Automation vor einer Kurve, allerdings noch auf einer Geraden, beschrieben. Der Radius fällt eher gering aus, soll aber zwischen den Partnern, die dieses Szenario verwenden, gleich gehalten werden.

<sup>3</sup> Marberger, C., Mielenz, H., Naujoks, F., Radlmayr, J., Bengler, K., & Wandtner, B. (2017). Understanding and Applying the Concept of “Driver Availability” in Automated Driving. In N. A. Stanton (Ed.), *Advances in Human Aspects of Transportation: Proceedings of the AHFE 2017 International Conference on Human Factors in Transportation*

Die Time to Lane Crossing (TLC) beträgt zum Zeitpunkt der Übernahmeaufforderung 5 Sekunden. Das Ego-Fahrzeug befindet sich auf dem linken Fahrstreifen vor einer Rechtskurve. Dies führt bei einer ausbleibenden Reaktion der Fahrer zu einem Verlassen der Fahrbahn.



**Abbildung 18:** Bewertung des Szenarios in den Kategorien Prädizierbarkeit, Dringlichkeit der Übernahme, Kritikalität und Komplexität der Fahrerreaktion

Zusätzlich zur oben vorgestellten Clusterung der Metriken wird hier zudem ein Allgemeines Pass/Fail Kriterium verwendet, um eine Übernahme grundsätzlich als erfolgreich oder nicht erfolgreich bewerten zu können.

Die gelisteten Metriken sind farbig markiert, sofern eine starke Empfehlung zur Verwendung dieser Metrik ausgesprochen werden soll. Es handelt sich also um einen Vorschlag für einen Mindestumfang an Metriken, die pro Szenario die Übernahmeleistung beschreiben. Die weiteren Metriken sollen als Vorschlag für eine weitere Dokumentation des Versuchs dienen.

Wie oben aufgeführt, ist der umfassenden Dokumentation der Versuchsergebnisse hohe Wichtigkeit beizumessen.

- **Allgemeines Pass/Fail-Kriterium**
  - Vorschlag: Durchfahrt der Kurve ohne Verlassen des eigenen Fahrstreifens
- Reaktionszeit Fahrer
  - **Blickzuwendung Szenerie**, Road Center Fixation
  - Rückführung Hände/Füße: min t(Hands-On & Füße auf Pedalerie & Taste/Schalter)
  - **Zeit bis erster bewusster Eingriff**, min t(Lenkradwinkel & Bremspedalwinkel & Taste/Schalter)
- Qualität des Eingriffs
  - Longitudinale, laterale Beschleunigung
  - Ableitung der lateralen Beschleunigung: Lenkruck
  - SD of
    - **Lateral Position**, Steering Wheel Angle, **Yaw Rate Error** (Efficiency of lateral Control)
    - **Max. Lane Exceedance**, **Verlassen des Fahrstreifens**
- Subjektive Daten
  - Einschätzung der Kritikalität
  - Beanspruchung

## TOC Rating

Das sogenannte Take-Over Controllability (TOC)-Rating ist eine im Rahmen des Projektes Ko-HAF von der BMW AG in Kooperation mit dem WiVV neu entwickelte Methode der Kontrollierbarkeitsbewertung, die die existierenden Metriken sinnvoll ergänzt. Der Vorteil der Methode ist der integrative Ansatz, der es ermöglicht, mehrere Kriterien (z.B. Quer- und Längsführung) gleichzeitig zu berücksichtigen und zu einem Gesamturteil bzgl. der Kontrollierbarkeit zu kommen. Das TOC-Rating stellt ein wissenschaftlich fundiertes Experten-Verfahren zur Bewertung der Kontrollierbarkeit von Übernahme-situationen in Probandenversuchen beim hochautomatisierten Fahren dar. Geschulte Rater schätzen dabei die Kontrollierbarkeit anhand von Videomaterial der experimentellen Studie auf Basis eines Kriterienkatalogs ein und geben anschließend ein Gesamtrating der Kontrollierbarkeit ab.

Die Beurteilung der Kontrollierbarkeit von Übernahmesituationen durch geschulte Rater stellt einen komplexen Entscheidungsprozess dar. Unterschiedliche Verhaltensweisen wie die Güte der Längs- und Querführung, das Sicherungsverhalten (z.B. Spiegel-/Schulterblicke) oder das Einhalten von Sicherheitsabständen müssen einzeln beurteilt und zu einem Gesamt-Rating integriert werden. Um reliable und valide Ergebnisse zu erlangen, wurde das TOC-Rating in Anlehnung an bestehende Fahrbeobachtungs-Kataloge zur Beurteilung des manuellen und assistierten Fahrens konzipiert. Dies ermöglicht Vorteile subjektiver Bewertung bei gleichzeitiger Sicherstellung von Reliabilität und Validität. Insbesondere wird durch den Aufbau des Verfahrens der Entscheidungsprozess des Raters unterstützt und durch ein ausführliches, videogestütztes Training der Ablauf geschult. Prinzipiell werden die folgenden Bewertungskriterien unterschieden, anhand derer die Übernahmequalität eingeteilt werden kann:

- Nicht-kontrollierbare Ereignisse (z.B. Abkommen von der Fahrbahn)
- Gefährdungen (z.B. Beinahe-Unfall mit anderem Verkehrsteilnehmer)
- Fahrfehler (z.B. fehlendes Sichern): Eingeschränkte Übernahmequalität
- Ungenauigkeiten in der Fahrzeugführung (z.B. ungenaue Spurhaltung): Gute Übernahmequalität mit leichten Einschränkungen

Der Bewertungsbogen (vgl. Abbildung 19) beinhaltet alle relevanten Beobachtungs-Kategorien und unterteilt diese in Bereiche der Fahrzeugführung:

- Bremsung
- Längsregelung
- Querregelung
- Spurwechsel/-wahl
- Sichern/Kommunikation
- Fahrzeugbedienung
- Fahrerausdruck

|                        | Fehlerfrei | Unsicherheit  | Fehler   | Gefährdung  | Unkontrollierbar  |
|------------------------|------------|---|--|---|---|
| Bremsung               |            |   | <input type="checkbox"/> Zu stark<br><input type="checkbox"/> Zu schwach<br><input type="checkbox"/> Zu spät<br><input type="checkbox"/> Fehlend               |   |   |
| Längsregelung          |            |   | <input type="checkbox"/> Sicherheitsabstand unterschritten<br><input type="checkbox"/> Geschwindigkeit unangepasst   |   |   |
| Querregelung           |            | <input type="checkbox"/> Ruckartiges Lenken<br><input type="checkbox"/> Ungenau | <input type="checkbox"/> Sicherheitsabstand unterschritten<br><input type="checkbox"/> Starke Schwankung<br><input type="checkbox"/> Spurabweichung            | <input type="checkbox"/> Gefährdung anderer<br><input type="checkbox"/> Eigengefährdung | <input type="checkbox"/> Kollision<br><input type="checkbox"/> Fahrbahnabkommen<br><input type="checkbox"/> Kontrollverlust |
| Spurwechsel/-wahl      |            |   | <input type="checkbox"/> Zögerlich/abgebrochen<br><input type="checkbox"/> Zu spät<br><input type="checkbox"/> Fehlend<br><input type="checkbox"/> Spur falsch |   |   |
| Sichern/ Kommunikation |            | <input type="checkbox"/> Unnötig gewinkt/ falsche Richtung                      | <input type="checkbox"/> Fehlend/ verspätet gewinkt<br><input type="checkbox"/> Fehlend/ verspätet geschrien   |   |   |
| Fahrzeugbedienung      |            | <input type="checkbox"/> Unsicherheit   | <input type="checkbox"/> Probleme  |   |   |
| Fahrerausdruck         |            | <input type="checkbox"/> Sichtbare Emotion                                      |  |   |   |
|                        | 1          | 2 3   | 4 5 6  | 7 8 9   | 10  |

Abbildung 19: Bewertungsbogen für Übernahmesituationen

Der Aufbau des Bogens unterstützt durch die visuelle Gliederung der Rating-Bereiche den Entscheidungsprozess. Auf Basis der aufgetretenen Ereignisse geben die geschulten Rater ein integriertes Urteil der Kontrollierbarkeit der Situation von 1-10 ab. Ein Kommentarfeld ermöglicht zusätzlich die Ursachenbeschreibungen von besonderem Fahrverhalten.

Die Methode wurde den Projektpartnern in Form einer Schulung zugänglich gemacht. Um diese auch im wissenschaftlichen Umfeld zu festigen, wurde eine Homepage mit ausführlichen Informationen inkl.

Schulungsmaterialien erstellt: <http://toc-rating.de/de/>. Die Methode ist außerdem Gegenstand zweier Veröffentlichungen<sup>45</sup>.

### **Wizard-of-Oz Methodik**

Im Projekt haben mehrere Partner, u.a. auch die BMW AG den sog. Wizard-of-Oz-Ansatz für die Untersuchung hochautomatisierter Systeme eingesetzt. Die Realisierungen reichten dabei von der Verwendung von Rechtslenker-Fahrzeugen bis hin zu komplett umgebauten Fahrzeugen in denen der Wizard beispielsweise im abgetrennten Frontbereich sitzt und von dort aus das Fahrzeug steuert. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Ansätze wurden im Rahmen des AP3 auch in einem eigenen Workshop thematisiert. Im Rahmen von Ko-HAF hat die BMW AG das Fahrzeug erstmals für die Untersuchung eines hochautomatisierten Systems eingesetzt und konnte so kritische Übernahme-situationen unter realen Bedingungen auf der Teststrecke untersuchen. Wie für alle Studien wird das im AP3 vereinbarte Template (Steckbrief) zur Dokumentation genutzt. Die Ergebnisse hat BMW auf einer Konferenz vorgestellt<sup>6</sup>.

---

<sup>4</sup> Jarosch O., Bengler K. (2019) Rating of Take-Over Performance in Conditionally Automated Driving Using an Expert-Rating System. In: Stanton N. (eds) Advances in Human Aspects of Transportation. AHFE 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 786. Springer, Cham

<sup>5</sup> Naujoks, F., Wiedemann, K., Schömig, N., Jarosch, O., & Gold, C. (2018). Expert-based controllability assessment of control transitions from automated to manual driving. *MethodsX*, 5, 579-592.

<sup>6</sup> Christian Gold, Marie-Lene Meyer, Florian Fischer (BMW), "Übernahmeleistung in einem Wizard of Oz Versuchsträger beim hochautomatisierten Fahren", 3. Interdisziplinärer Expertendialog Aktive Sicherheit und automatisiertes Fahren, 25. bis 26. Oktober 2017

# Übernahmeleistung in einem Wizard of Oz Versuchsträger beim hochautomatisierten Fahren

## 1 Fotodokumentation

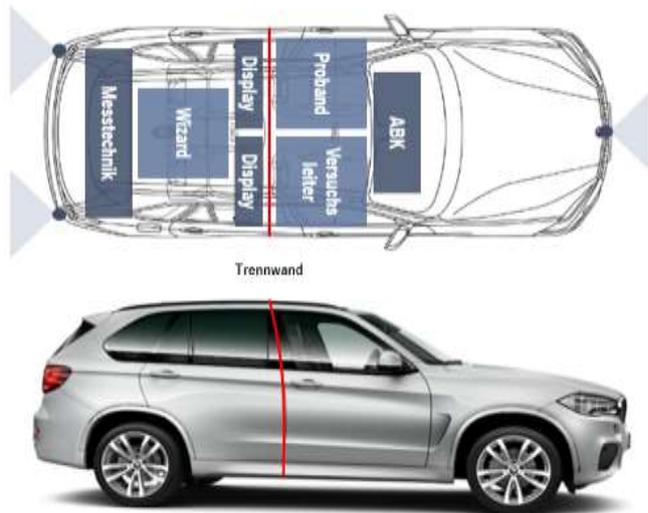


Abbildung 21: Aufbau des Wizard-of-Oz-Fahrzeugs

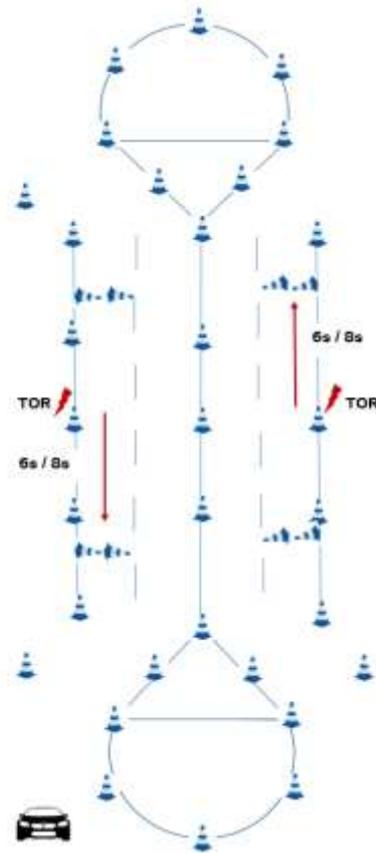


Abbildung 20: Kurs



Abbildung 22: Innenraumansicht

## 2 Studien-/Systemdesign

|  |   |
|--|---|
| Zeitraum der Studiendurchführung:  | Februar / März 2017   |
| Methode (Fahrsim. vs. Realfahrzeug (Testgelände /öffentl. Gelände))                        | WoOz Realfahrzeug auf Testgelände   |
| Stichprobengröße:  | 20  |
| Charakterisierung Versuchsteilnehmer:  | Fachfremde BMW Mitarbeiter  |
| Beschreibung der Versuchsstrecke (Anzahl der Spuren, Geschwindigkeit, Verkehrsdichte etc.) | Start- und Landebahn Flugplatz Maisach. 2 Spuren durch Markierung mit Farbe und/oder Pylonen. 80 km/h, kein Fremdverkehr.   |
| Beschreibung Übernahmeszenario:  | TOR 6 und 8 (Between Subject) Sekunden vor Pylonenhindernis. Ausweichen/Fahrstreifenwechsel oder Zielbremsung erforderlich. Zwei (identische) Übernahmen pro Proband. |

|   |  |
|---|--|
| Einstufung Übernahmeszenario (gering/mittel/hoch):              | Präzizierbarkeit: Mittel (Fahrer erlebt automatisches Umfahren des Hindernisses im Vorfeld, Übernahme kommt überraschend aber Hindernis ist bekannt) |
| Zeitbudget:   | 6 bzw. 8 Sekunden (2 Gruppen)  |
| Art/Umfang der HAF-Instruktion:                                 | Erklärung der HAF Funktionalität und des ABK. Testweises Erleben aller Transitionen während der Eingewöhnungsfahrt.                                  |
| Anzahl der erlebten Übernahmeaufforderungen vor Versuchsbeginn: | Eine.  |
| Dauer der automatisierten Fahrt vor TOR:                        | Ca. 10 Minuten.  |
| TOR Design (akustisch, visuell) und Charakterisierung           | Akustisch & Visuell (Warnton + rotes Lenkrad Symbol)   |
| Methode zur HAF-Deaktivierung:                                  | Hände an das Lenkrad nehmen und Taste am Lenkrad (auf Speiche) drücken.  |
| Systemverhalten nach TOR:                                       | Ausrollen.   |

### 3 Fragestellungen und Ergebnisse

|                        |  |
|------------------------|--|
| Fragestellung 1:       | Unterscheidet sich Übernahmequalität in Abhängigkeit vom Zeitbudget?                                       |
| Unabhängige Variablen: | Zeitbudget vor Übernahmesituation  |
| Abhängige Variablen:   | Blickdaten, Hands-On, Bremsreaktionszeit, Fahrerbestätigung, Übergabe, Querbefleunigung, Längsbefleunigung |
| Hauptergebnisse:       | Haupteffekte für Messwiederholung und Zeitbudget nicht signifikant.  |

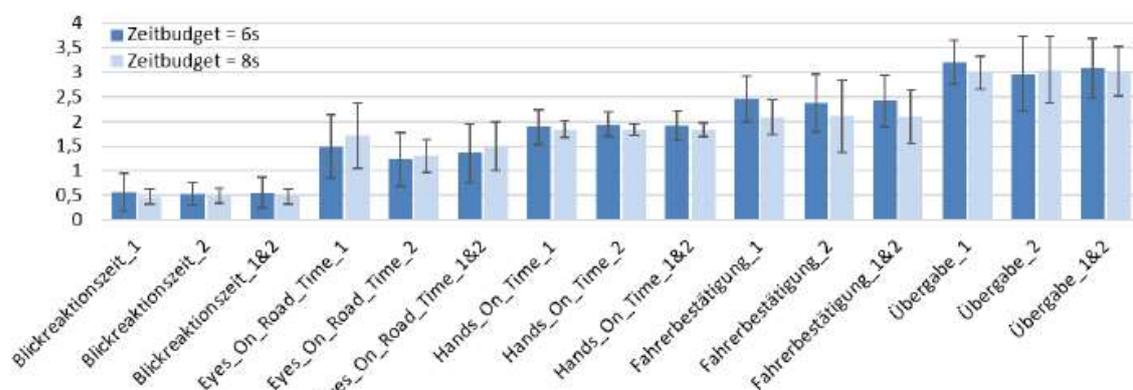


Abbildung 23: Überblick Reaktionszeiten

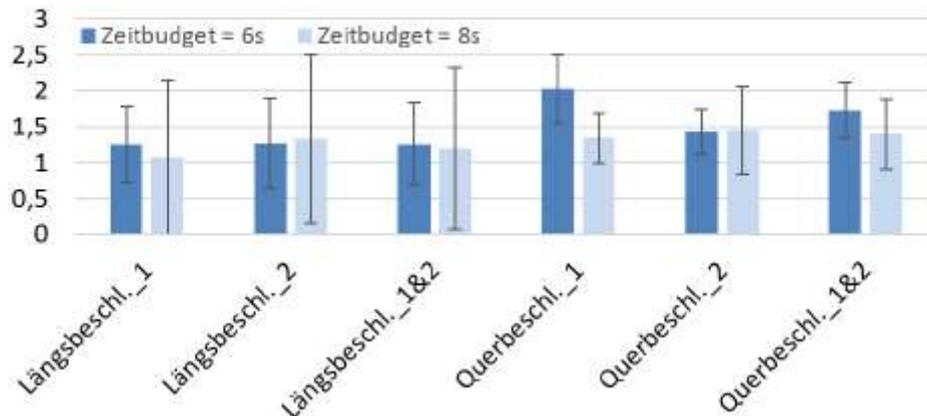


Abbildung 24: Überblick der Längs-/Querbeschleunigung

### Definition der Anforderungen an generische Übernahmekonzepte (T3.1.3)

Es wurden gemeinsam von allen Partnern Mindestanforderungen abgestimmt und festgelegt. Dabei stand neben einer praxistauglichen Umsetzung für alle Partner eine sinnvolle Reduzierung auf die wichtigsten Merkmale eines HMI, dass die systeminitiierte Übernahme auslöst, im Vordergrund. Da die Transition von hochautomatisierter Fahrt zu manueller Fahrt vor allem eine Änderung des Automationslevel beinhaltet, wurde die Rückmeldung folgender Systemzustände der Automation festgelegt:

- System nicht verfügbar (optional, die Anzeige dieses Zustands ist ggf. nur bei „Aktivierungsversuchen“ sinnvoll und nicht dauerhaft notwendig)
- System verfügbar
- System aktiv
- Übernahmeaufforderung

Die Rückmeldung dieser Systemzustände soll Mode-Awareness Probleme mindern und einen notwendigen Eingriff des Fahrers in einer Übernahme klar kommunizieren.

Zudem wurde beschlossen, dringliche, zeitkritische und/oder kurzfristige Übernahmeaufforderung und sicherheitskritische Anzeigen für eine bessere Wahrnehmung multimodal auszulegen. Neben einer visuellen Anzeige soll ein akustisches Signal oder eine Sprachausgabe z.B. die Übernahmeaufforderung verdeutlichen. Weitere Modalitäten, z.B. die Untermalung der Übernahmeaufforderung durch ein haptisches Signal im Sitz sind optional, werden aber für sicherheitskritische Modalitäten nicht ausgeschlossen.

Ein weiterer Teil der Mindestanforderungen betrifft den Anzeigort von Systemzuständen oder Übernahmeaufforderungen. Mindestens im Kombi-Display oder im Head-Up Display sollen derartige Anzeigen visuell dargestellt werden. Eine weitere Implementierung, z.B. auf ein Display das primär für fahrfremde Tätigkeiten in das Fahrzeug integriert wurde, wird ebenfalls nicht ausgeschlossen. Zudem haben auf den Hauptanzeigeflächen die Übernahmeaufforderung und sicherheitskritische Anzeigen Vorrang und werden vor anderen etwaigen Anzeigen priorisiert. Dies gilt auch für die akustischen Signale der Übernahmeaufforderung.

Darüber hinaus wurden für das empirische Vorgehen in AP3 bewusst keine weiteren Mindestanforderungen festgelegt, um eine typischerweise wichtige Abgrenzung zwischen Konsortialpartnern bzgl. der HMI Auslegung zu ermöglichen. Entscheidend für den wichtigen Vergleich von Studienergebnissen und Versuchsmethodik ist damit eine lückenlose und saubere Dokumentation der Versuche.

### Festlegung eines Nebentätigkeitskatalogs, Systematik von Nebentätigkeiten (fahrfremden Tätigkeiten) (T3.1.4)

Das letzte Teilarbeitspaket im UAP3.1 beschäftigte sich mit einer Systematisierung der fahrfremden Tätigkeiten. Das WIVW hat die Erstellung eines Katalogs fahrfremder Tätigkeiten vorangetrieben. Die

BMW AG hat ihr vorhandenes Know-how bezüglich einer Systematik von Nebentätigkeiten unterstützend zur Verfügung gestellt.

Das Ergebnis ist ein Katalog fahrfremder Tätigkeiten, der die Generierung von Hypothesen hinsichtlich zu erwartender spezifischer Einschränkungen des Übernahmeprozesses durch unterschiedliche Aspekte fahrfremder Tätigkeiten zulässt.

### **3.3.2 UAP3.2 Untersuchung von Automationseffekten und Implementierung eines Moduls Fahrer Verfügbarkeit und Vigilanz**

Nach der Erarbeitung der methodischen Grundlagen in UAP3.1 folgt im UAP3.2 die Empirie. BMW hat zahlreiche Studien durchgeführt, die meisten davon im statischen oder dynamischen Fahrsimulator. Alle Studien werden mit Hilfe des AP3-Studiensteckbrief-Formats beschrieben.

#### **Empirische Untersuchungen und Bewertung zu Einflussfaktoren der Fahreraufmerksamkeit auf die Fahrer Verfügbarkeit (T3.2.1)**

Es wurden zwei Simulatorstudien zur Fahrer Verfügbarkeit durchgeführt, die sich mit dem Thema Vigilanzminderung durch passive aufgabenbezogene Müdigkeit auseinandersetzen. Dabei werden jeweils zwei Gruppen verglichen: Eine Gruppe, die sich mit einer potentiell ermüdenden reizarmen monotonen Überwachungsaufgabe auseinandersetzen muss und eine, die eine aktiv haltende Aufgabe (Quiz) macht. Es wurde für beide Gruppen Übernahmezeit und Übernahmequalität des Fahrers bestimmt. Zur Messung des Fahrerzustands kamen verschiedene Methoden zum Einsatz (u.a. physiologische Signale und Eyetracking).

# Studie Ko-HAF 1: Erzeugung, Messung und Auswirkung von passiver aufgabenbezogener Müdigkeit

## 1 Fotodokumentation



Abbildung 25: Kombi HAF aktiv

Abbildung 26: Übernahmeaufforderung

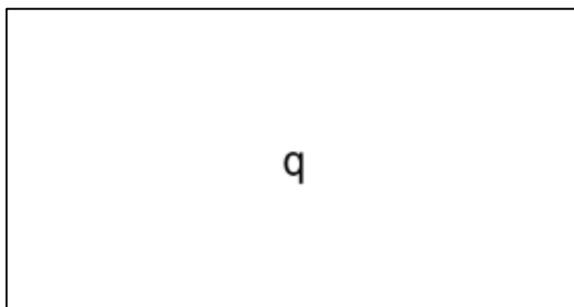


Abbildung 27: monotone FFT "Pqpd"

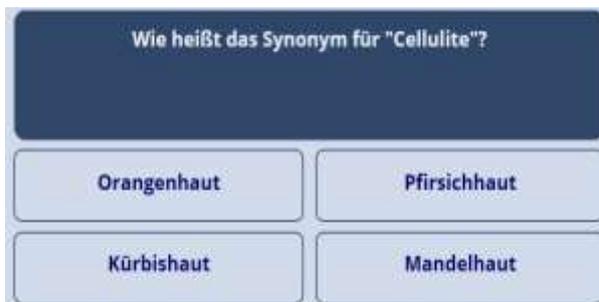


Abbildung 28: aktivierende FFT "Quiz"

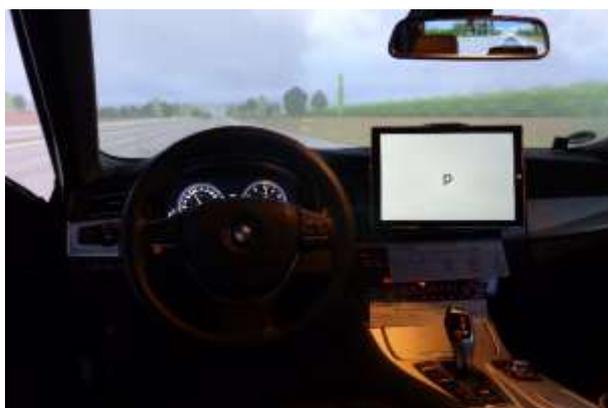


Abbildung 29: Fahrzeuginnenraum



Abbildung 30: G.Tec Sensorik, physiologische Messung

## 2 Studien-/Systemdesign

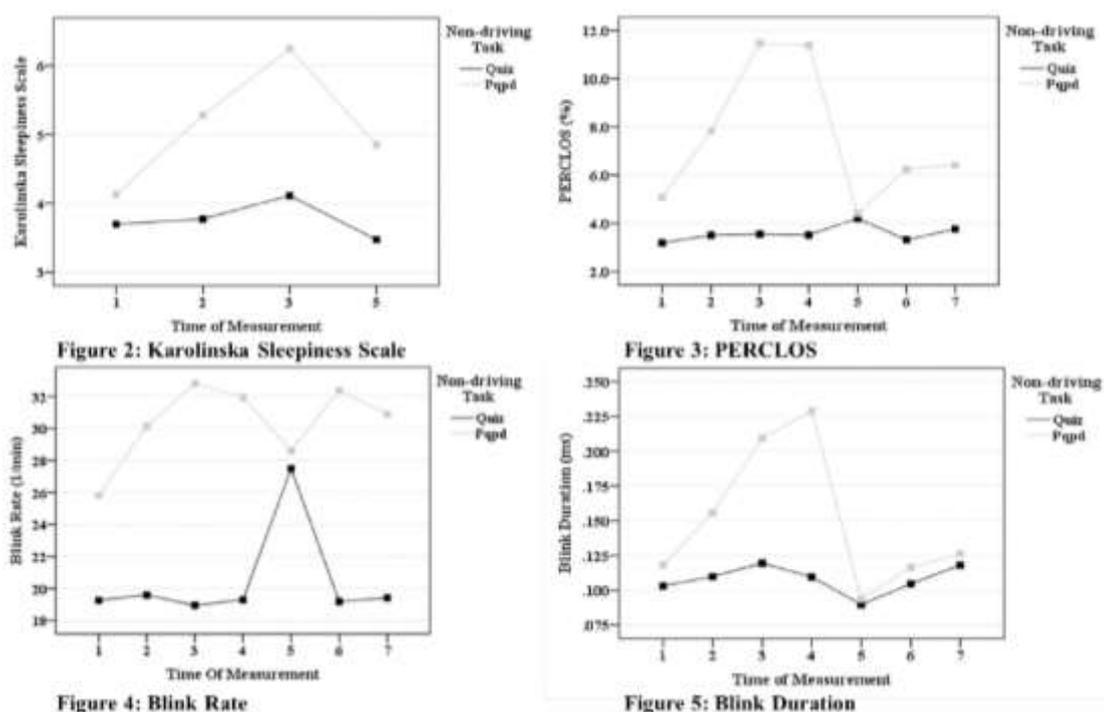
|  |   |
|--|---|
| Zeitraum der Studiendurchführung:  | Juni 2016   |
| Methode (Fahrsim. vs. Realfahrzeug (Testgelände /öffentl. Gelände))                              | Dynamischer Fahrsimulator BMW   |
| Stichprobengröße:  | 58 Probanden  |
| Charakterisierung<br>suchsteilnehmer:  | Ver-<br>BMW Mitarbeiter   |
| Beschreibung der Versuchsstrecke<br>(Anzahl der Spuren, Geschwindigkeit,<br>Verkehrsdichte etc.) | Fahrt auf einer dreispurigen Autobahn mit Standstreifen,<br>v = 130 km/h, geringe – mittlere Verkehrsdichte |

|  |  |
|--|--|
| Beschreibung Übernahmeszenario:                                | Zwei unterschiedliche Szenarios (within-Design):<br>- Unfall auf Ego-Spur<br>- Sensorausfall vor Rechtskurve   |
| Einstufung Übernahmeszenario (gering/mittel/hoch):             | - Unfall auf Ego-Spur -> dringlich, nicht präzifizierbar, kritisch, komplex<br>- Sensorausfall -> dringlich, nicht präzifizierbar, kritisch, wenig komplex |
| Zeitbudget:  | 7 Sekunden   |
| Art/Umfang der HAF-Instruktion:                                | Erklärung HAF inkl. Systemgrenzen, Eingewöhnungsfahrt inkl. Übernahmen (Lenken, Bremsen Knopfdruck)  |
| Anzahl der erlebten Übernahmeauforderungen vor Versuchsbeginn: | drei   |
| Dauer der automatisierten Fahrt vor TOR:                       | Zwei Fahrten, jeweils 25 min   |
| TOR Design (akustisch, visuell) und Charakterisierung          | Akustisches Warnsignal, Einblendung rotes Lenkradsymbol im Kombidisplay, Fahrzeug verzögert mit Schleppmoment  |
| Methode zur HAF-Deaktivierung:                                 | Bremsung, Lenkung, Knopf am Lenkrad  |
| Systemverhalten nach TOR:                                      | Verzögerung mit Schleppmoment  |

### 3 Fragestellungen und Ergebnisse

|                        |  |
|------------------------|--|
| Fragestellung 1:       | Einfluss unterschiedlicher FFT's auf den Fahrertzustand Müdigkeit  |
| Unabhängige Variablen: | FFT  |
| Abhängige Variablen:   | KSS, PERCLOS, physiolog. Parameter   |
| Hauptergebnisse:       | Starke Veränderung von KSS & PERCLOS in Abhängigkeit der FFT, Korrelation PERCLOS mit KSS, keine signifikanten Änderungen der physiolog. Parameter, höhere Müdigkeit bei monotoner Tätigkeit während HAF |
| Fazit aus Studie       | Monotone FFT's eignen sich um Müdigkeit bei HAF zu provozieren   |
| Fragestellung 2:       | Einfluss von passiver aufgabenbezogener Müdigkeit (durch Pqpd-Aufgabe) verglichen mit einer Quiz-Aufgabe, die Müdigkeit verhindern sollte auf die Übernahmeleistung                                      |
| Unabhängige Variablen: | Within: NDRT (Quiz, Pqpd)  |
| Abhängige Variablen:   | Fahrparameter, Reaktionszeiten (handsOn, erste Bremsreaktion, Lenkwinkel < 2°, Bremspedalbetätigung < 10 %)  |

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Hauptergebnisse:      | Keine Unterschiede bei der Übernahme. Keine Unterschiede der Fahrparameter und auch keine Unterschiede bei den Reaktionszeiten  |
| Fazit aus Studie      | Nach 25 min und der Beschäftigung mit fahrfremden Tätigkeiten zeigen sich zwar Unterschiede in der Müdigkeit des Fahrers. Allerdings hat dieser Unterschied keine Auswirkungen auf die Fahrzeugübernahme. |
| Fragestellung 3:      | Einfluss unterschiedlich komplexer Übernahme-situationen  |
| Unabhängige Variable: | Übernahmeszenario   |
| Abhängige Variablen:  | Fahrparameter, Empfundene Kritikalität  |
| Hauptergebnisse:      | Keine Unterschiede zwischen den Szenarien, tendenziell wird das weniger kritische Szenario als kritischer empfunden (Probanden wissen nicht wieso Fahrzeug abwirft)                                       |
| Fazit aus Studie      | Keine Unterschiede hinsichtlich unterschiedlicher Übernahmeszenarien  |



**Abbildung 31:** Ergebnisse in Abhängigkeit der unterschiedlichen Tätigkeiten

Die Ergebnisse dieser Studie wurden auf einer Konferenz vorgestellt<sup>7</sup>.

<sup>7</sup> Jarosch, O., Kuhnt, M., Paradies, S., & Bengler, K. (2017). It's Out of Our Hands Now! Effects of Non-Driving Related Tasks During Highly Automated Driving on Drivers' Fatigue. In *Proceedings of the Ninth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle*

## Studie Ko-HAF 3: Einfluss von Müdigkeit auf die Übernahmeleistung bei längeren Automationsdauern

### 1 Fotodokumentation



Abbildung 32: Kombi HAF aktiv



Abbildung 33: Übernahmeaufforderung

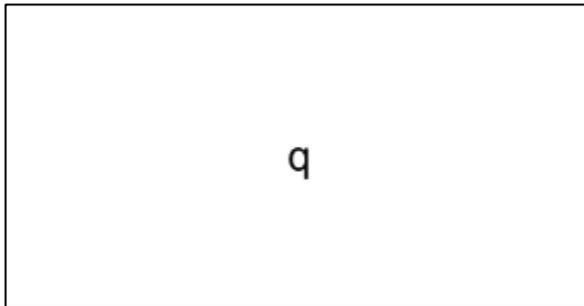


Abbildung 34: monotone FFT "Pqpd"

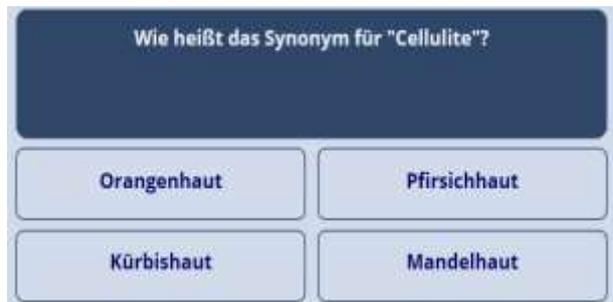


Abbildung 35: aktivierende FFT "Quiz"



Abbildung 36: Fahrzeuginnenraum



Abbildung 37: G.Tec Sensorik, physiologische Messung

### 2 Studien-/Systemdesign

|   |                               |
|---|-------------------------------|
| Zeitraum der Studiendurchführung:                                   | Februar 2017                  |
| Methode (Fahrsim. vs. Realfahrzeug (Testgelände /öffentl. Gelände)) | Dynamischer Fahrsimulator BMW |
| Stichprobengröße:   | 72 Probanden                  |

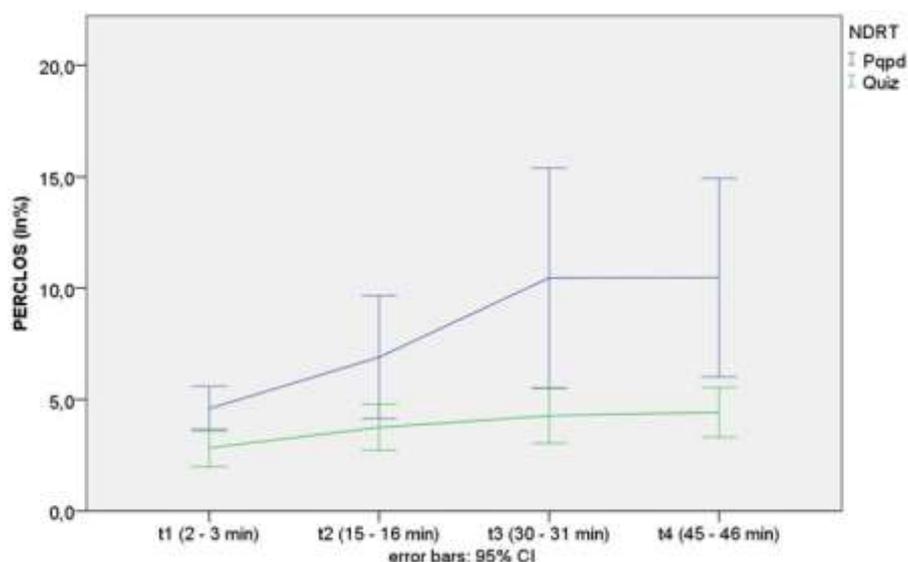
*Design*, June 26-29, 2017, Manchester Village, Vermont. Iowa City, IA: Public Policy Center, University of Iowa, 2017: 319-325.

|  |      |  |
|--|------|--|
| Charakterisierung suchsteilnehmer:   | Ver- | BMW Mitarbeiter  |
| Beschreibung der Versuchsstrecke (Anzahl der Spuren, Geschwindigkeit, Verkehrsdichte etc.) |      | Fahrt auf einer dreispurigen Autobahn mit Standstreifen, $v = 130 \text{ km/h}$ , geringe – mittlere Verkehrsdichte, identisch zu Ko-HAF 1 allerdings die doppelte HAF-Dauer |
| Beschreibung Übernahmeszenario:  |      | Unfall auf Ego-Spur  |
| Einstufung Übernahmeszenario (gering/mittel/hoch):   |      | - Unfall auf Ego-Spur -> dringlich, nicht prädzierbar, kritisch, komplex   |
| Zeitbudget:  |      | 7 Sekunden   |
| Art/Umfang der HAF-Instruktion:  |      | Erklärung HAF inkl. Systemgrenzen, Eingewöhnungsfahrt inkl. Übernahmen (Lenken, Bremsen Knopfdruck)  |
| Anzahl der erlebten Übernahmeaufforderungen vor Versuchsbeginn:                            |      | drei   |
| Dauer der automatisierten Fahrt vor TOR:   |      | 50 min   |
| TOR Design (akustisch, visuell) und Charakterisierung                                      |      | Akustisches Warnsignal, Einblendung rotes Lenkradsymbol im Kombidisplay, Fahrzeug verzögert mit Schleppmoment  |
| Methode zur HAF-Deaktivierung:   |      | Bremung, Lenkung, Knopf am Lenkrad   |
| Systemverhalten nach TOR:  |      | Verzögerung mit Schleppmoment  |

### 3 Fragestellungen und Ergebnisse

|                        |   |
|------------------------|---|
| Fragestellung 1:       | Einfluss unterschiedlicher FFT's auf den Fahrerzustand Müdigkeit  |
| Unabhängige Variablen: | FFT   |
| Abhängige Variablen:   | KSS, PERCLOS, physiolog. Parameter  |
| Hauptergebnisse:       | <p>signifikante Änderung des KSS-ratings bei beiden FFT's in Abhängigkeit der Versuchsdauer, signifikante Veränderung PERCLOS in Abhängigkeit der FFT, Verändertes Übernahmeverhalten hinsichtlich gezeigter Reaktion:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bei monotoner Tätigkeit -&gt; deutlich mehr Stehenbleiber</li> <li>- Bei Quiz -&gt; deutlich mehr Vorbeifahrer</li> </ul> <p>Deutlich beeinträchtigte Übernahmen nach längeren automatisierter Fahrt.</p> |
| Fazit aus Studie       | Nach 50 min hochautomatisierter Fahrt Müdigkeitserscheinungen bei beiden FFT's, kein höherer Anstieg des PERCLOS im Vergleich zu KoHAF1   |
| Fragestellung 2:       | Einfluss der Müdigkeit auf das Übernahmeverhalten   |

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Unabhängige Variable: | FFT   |
| Abhängige Variablen:  | Reaktionszeiten, Verhalten der Fahrer nach TOR  |
| Hauptergebnisse:      | Beeinträchtigtetes Übernahmeverhalten nach ermüdender Tätigkeit, schlechtere Reaktionszeiten (Blickreaktion und erste Bremsreaktion) nach ermüdender FFT  |
| Fazit aus Studie      | Nach längeren automatisierten Fahren und dem Bearbeiten von monotonen Überwachungsaufgaben, kann das Übernahmeverhalten negativ beeinträchtigt sein. Im Vergleich zu Ko-HAF 1 kam es zu beeinträchtigten Übernahmeleistungen.   |
| Fragestellung 3:      | Einfluss der Müdigkeit auf eine subjektive videobasierte Expertenbewertung der Übernahme (take-over controllability rating – TOC rating)  |
| Unabhängige Variable: | FFT   |
| Abhängige Variablen:  | TOC score   |
| Hauptergebnisse:      | Keine Unterschiede im TOC rating in Abhängigkeit der FFTs   |
| Fazit aus Studie      | Das TOC Rating ist nur bedingt für die Bewertung von kritischen Übernahmen geeignet, die durch mehrere Strategien gelöst werden können (z.B. Anhalten oder Ausweichen). Probanden die Anhalten können deutlich weniger „Fehlerpunkte“ erhalten also Probanden die ein komplexeres Ausweichmanöver fahren (z.B Aspekte der Querführung, des Lenkverhaltens, der Spur). |



**Abbildung 38:** Verlauf PERCLOS für beide Tätigkeiten

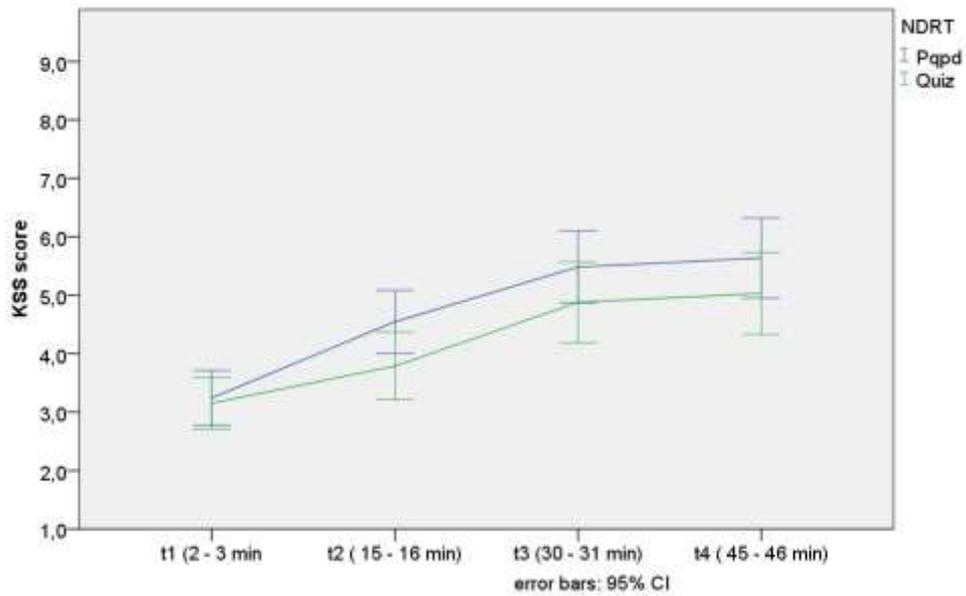


Abbildung 39: Verlauf KSS für beide Tätigkeiten

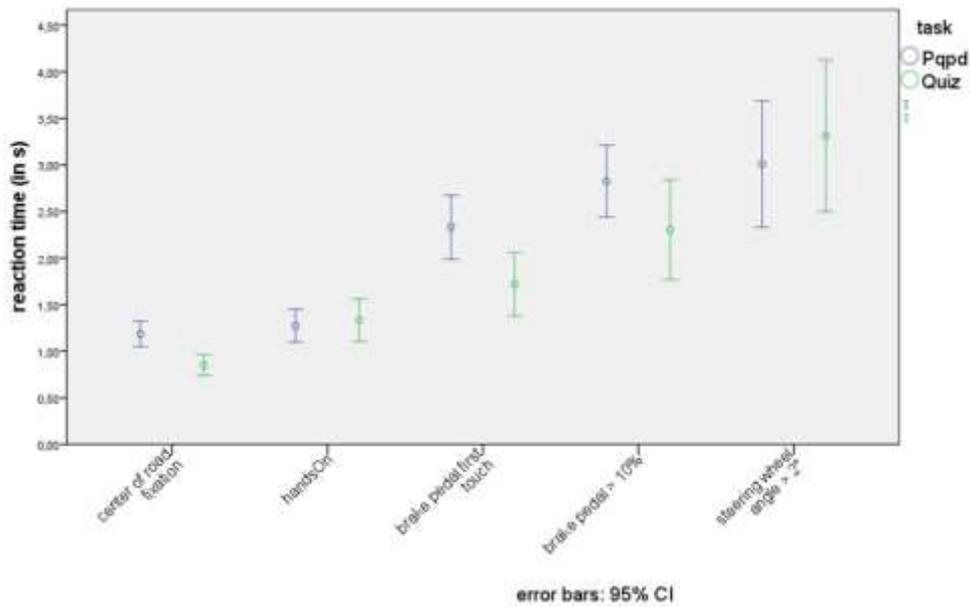


Abbildung 40: Reaktionszeiten in Abhängigkeit der Tätigkeiten

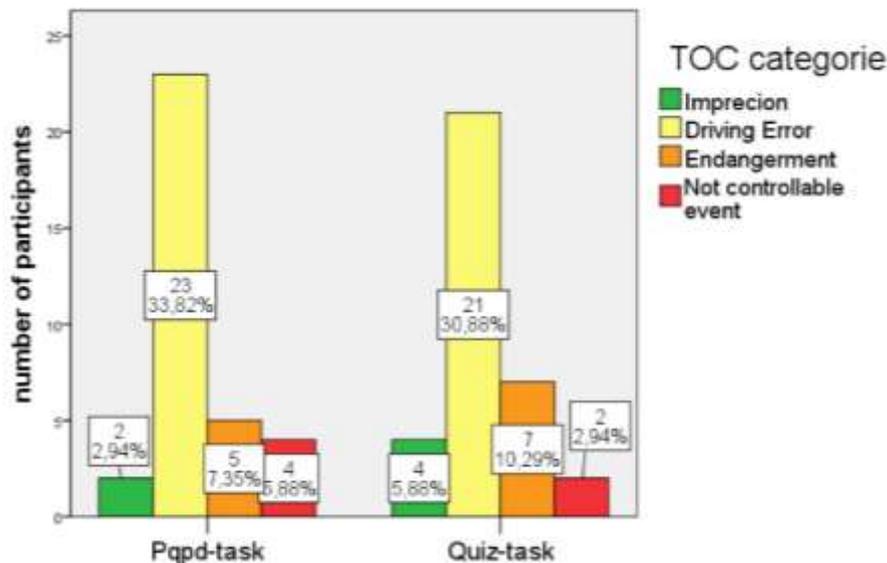


Abbildung 41: TOC Ratings in Abhängigkeit der FFT

Die Ergebnisse dieser Studie wurden in einem Journal Beitrag<sup>8</sup> (Verlauf Fahrerzustand, Übernahmequalität & Reaktionszeiten in Abhängigkeit der FFT) und auf einer Konferenz<sup>9</sup> (TOC-Rating) veröffentlicht. In einer weiteren Veröffentlichung wurden die Übernahmeleistungen (Reaktion der Fahrer & TOC) aus Ko-HAF 1 und Ko-HAF 3 miteinander verglichen, um den Einfluss der Fahrdauer und der FFT zu betrachten<sup>10</sup>.

### Empirische Untersuchungen und Bewertung zu Einflussfaktoren von Nebentätigkeiten (fahrfremde Tätigkeiten) bei verschiedenen Verkehrsszenarien auf die Übernahmezeiten und die Übernahmequalität. (T3.2.2)

Es wurden ausgewählte fahrfremde Tätigkeiten aus dem erarbeiteten Tätigkeitskatalog in den Fahrsimulator integriert. In einer weiteren Simulatorstudie wurde der Einfluss von ausgewählten realitätsnahen fachfremden Tätigkeiten auf die Übernahmeleistung untersucht. Hierfür erlebten 55 Probanden je eine Fahrt mit und eine Fahrt ohne fahrfremde Tätigkeit. Die Tätigkeit bestand entweder aus dem Lesen von Texten aus einer Auswahl oder dem Spielen von Spielen aus einer Auswahl an Spielen auf einem montierten Tablet. Die Spiele waren so gewählt, dass sie schwer unterbrechbar waren und kontinuierliche Aufmerksamkeit erforderten. Der Studienaufbau sowie die Ergebnisse werden in folgendem Steckbrief im Detail berichtet:

<sup>8</sup> Jarosch, O., Bellem, H., Bengler, K. (in press) Effects of Task-Induced Fatigue in Prolonged Conditional Automated Driving. *Human Factors*.

<sup>9</sup> Jarosch, O., & Bengler, K. (2018, July). Rating of Take-Over Performance in Conditionally Automated Driving Using an Expert-Rating System. In International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (pp. 283-294). Springer, Cham.

<sup>10</sup> Jarosch, O., & Bengler, K. (2018, August). Is It the Duration of the Ride or the Non-driving Related Task? What Affects Take-Over Performance in Conditional Automated Driving?. In *Congress of the International Ergonomics Association* (pp. 512-523). Springer, Cham.

## Studie Ko-HAF 2: Auswirkungen natürlicher FFTs auf die Übernahmeleistung

### 1 Fotodokumentation



Abbildung 42: Fahrzeuginnenraum



Abbildung 43: Kombi



Abbildung 44: Übernahmeaufforderung



Abbildung 45: Messequipment, physiologische Messung



Abbildung 46: Nebenaufgabe Auswahl Lesen

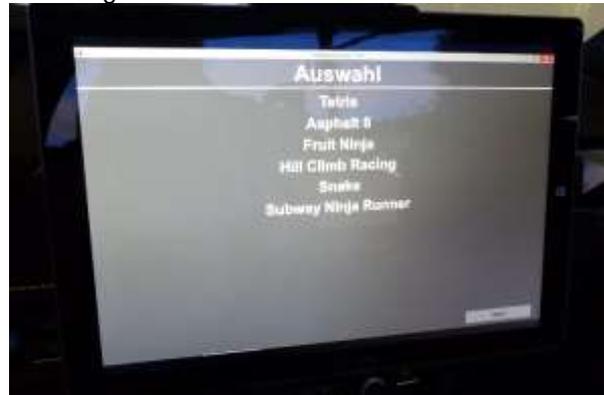


Abbildung 47: Nebenaufgabe Auswahl Spielen

### 2 Studien-/Systemdesign

|   |  |
|---|--|
| Zeitraum der Studiendurchführung:                                   | Dezember 2016  |
| Methode (Fahrsim. vs. Realfahrzeug (Testgelände /öffentl. Gelände)) | Statischer Fahrsimulator BMW                             |
| Stichprobengröße:   | 64 Probanden (55 Probanden in Auswertung eingeschlossen) |
| Charakterisierung suchsteilnehmer:                                  | Ver- Interne und externe BMW Mitarbeiter                 |

|  |  |
|--|--|
| Beschreibung der Versuchsstrecke (Anzahl der Spuren, Geschwindigkeit, Verkehrsdichte etc.) | Fahrt auf einer dreispurigen Autobahn mit Standstreifen, geringe-mittlere Verkehrsdichte, $v = 130 \text{ km/h}$<br>Fahrt 1 und Fahrt 2 waren identisch (59 km, 27-30 min)   |
| Beschreibung Übernahmeszenario:  | Unfall auf Ego-Spur in beiden Fahrten  |
| Einstufung Übernahmeszenario (gering/mittel/hoch):   | Dringlich, nicht prädizierbar, komplex, kritisch   |
| Zeitbudget:  | 7 Sekunden   |
| Art/Umfang der HAF-Instruktion:  | Erklärung HAF inkl. Systemgrenzen, Einführungsfahrt inkl. Übernahmemöglichkeiten (Bremsen, Lenken, Knopfdruck)   |
| Anzahl der erlebten Übernahmeaufforderungen vor Versuchsbeginn:                            | 2  |
| Dauer der automatisierten Fahrt vor TOR:   | Fahrt 1: 24 min (50 km), Fahrt 2: 24 min (50 km)   |
| TOR Design (akustisch, visuell) und Charakterisierung                                      | Kombi: rotes Lenkradsymbol mit Händen<br>Tablet: Lesen aktueller Text, Spielen aktuelles Spiel oder Spielen (mit Unterbrechung) rotes Lenkradsymbol mit Händen<br>Akustisches Warnsignal<br>Fahrzeug verzögert mit Schleppmoment |
| Methode zur HAF-Deaktivierung:   | Bremsen, Lenken, Knopfdruck am Lenkrad   |
| Systemverhalten nach TOR:  | Verzögerung mit Schleppmoment  |

### 3 Fragestellungen und Ergebnisse

|                        |  |
|------------------------|--|
| Fragestellung 1:       | Haben natürliche FFT einen Einfluss auf die Übernahmeleistung der Fahrer?  |
| Unabhängige Variablen: | Mit FFT, keine FFT   |
| Abhängige Variablen:   | Kritikalität der Situation, Bewältigung der Situation, Reaktionszeiten, Fahrverhalten  |
| Hauptergebnisse:       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ohne FFT schnellere Bremsbereitschaft und –betätigung (&gt; 10 %)</li> <li>- Ohne FFT geringere minimale Geschwindigkeit</li> <li>- Ohne FFT Höhere Längsverzögerung und max. Bremspedalbetätigung</li> </ul> |
| Fazit aus Studie       | Ohne FFT wird schneller und stärker gebremst, weißt aber nicht zwingend auf eine bessere Übernahme hin   |
| Fragestellung 2:       | Welches Verhalten zeigen die Fahrer in der kritischen Situation in Abhängigkeit der FFT?   |

|                        |   |
|------------------------|---|
| Unabhängige Variablen: | Spielen, Spielen mit Unterbrechung, Lesen   |
| Abhängige Variablen:   | Kritikalität der Situation, Bewältigung der Situation, Reaktionszeiten, Fahrverhalten   |
| Hauptergebnisse:       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Signifikant längere Zeit bis Lenkwinkel <math>&gt;2^\circ</math> bei FFT Lesen vs. Spielen mit Unterbrechung</li> <li>- Tendenziell kürzere Reaktionszeit bis Bremspedal <math>&gt;10\%</math> bei FFT Lesen vs. Spielen mit Unterbrechung</li> <li>- Kein signifikanter Effekt bzgl. Reaktionsgüte</li> </ul> |
| Fazit aus Studie       | Hinweis, dass verschiedene Tätigkeiten unterschiedliches Übernahmeverhalten fördern   |
| Fragestellung 3:       | Welchen Einfluss hat die Einbindung des TOR in die FFT?   |
| Unabhängige Variablen: | Spielen, Spielen mit Überblendung   |
| Abhängige Variablen:   | Kritikalität der Situation, Bewältigung der Situation, Reaktionszeiten, Fahrverhalten   |
| Hauptergebnisse:       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Bei Spielen mit Unterbrechung tendenziell größere subjektive Kritikalität und geringere Bewältigungsgüte</li> <li>- Keine signifikanten Unterschiede in Übernahmezeit oder -qualität</li> </ul>  |
| Fazit aus Studie       | Überblendung von FFT durch Übernahmeaufforderung führt dazu, dass Situation subjektiv kritischer wahrgenommen wird, aber nicht zu Unterschieden in der Übernahmeleistung  |

### **Empirische Untersuchungen und Bewertung von Langzeitauswirkungen auf Fahrerzustand, Fahr- und Verhaltensstrategien und Fahrerleistung (T3.2.3)**

Die BMW AG hat zwei Studien durchgeführt, deren Fokus auf dem Thema längere Automationsdauern und den Auswirkungen auf den Zustand des Fahrers lag. In der Simulatorstudie sollten physiologische Indikatoren für Motion Sickness und deren Einfluss auf die Übernahmeleistung untersucht werden. Dazu wurden Strecke und Trajektorien derart gestaltet, dass zunehmend Motion Sickness provoziert wurde.

# Studie Ko-HAF 4: Einfluss des Wohlbefindens auf die Übernahmeleistung

## 1 Fotodokumentation



Abbildung 48: Fahrzeuginnenraum

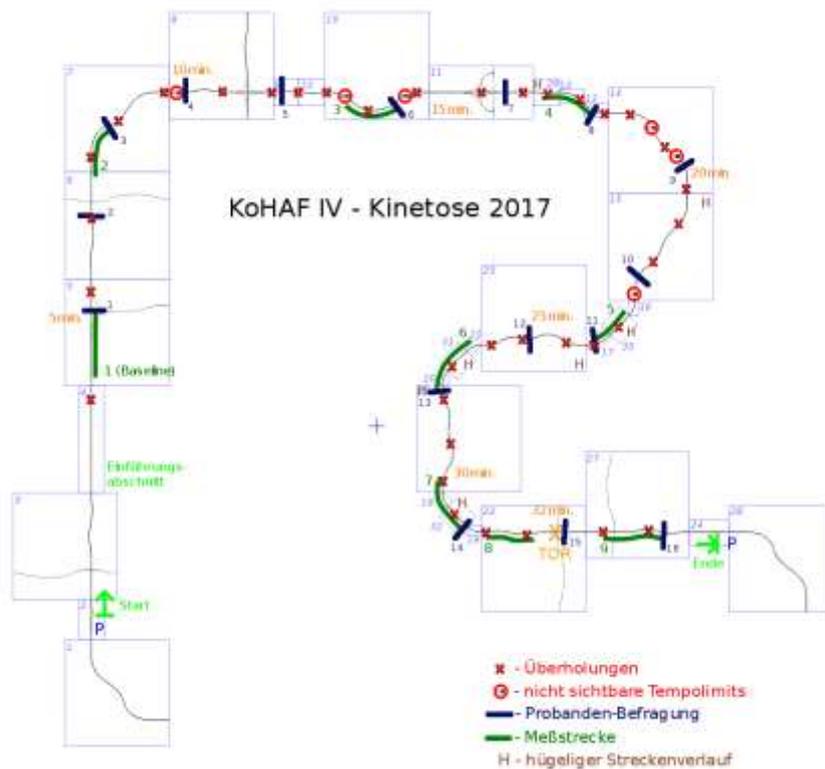


Abbildung 49: Strecke

## 2 Studien-/Systemdesign

|   |  |
|---|--|
| Zeitraum der Studiendurchführung:                                   | Ende April/Anfang Mai 2017                               |
| Methode (Fahrsim. vs. Realfahrzeug (Testgelände /öffentl. Gelände)) | Driver in Motion Simulator BMW Garching                  |
| Stichprobengröße:   | 63 Probanden (57 Probanden in Auswertung eingeschlossen) |
| Charakterisierung suchsteilnehmer:                                  | Ver- Interne und externe BMW Mitarbeiter                 |

|  |   |
|--|---|
| Beschreibung der Versuchsstrecke (Anzahl der Spuren, Geschwindigkeit, Verkehrsdichte etc.) | Fahrt auf einer dreispurigen Autobahn mit Standstreifen, hohe Verkehrsdichte, $v = 130 \text{ km/h}$<br>Spurwechselfdauer 7 auf 3 s verkürzt<br>Abstand zum Vorderfahrzeug von 120 auf 60 m vor Spurwechseln verringert<br>Anzahl der Spurwechsel stieg (insg. 36) sowie die Geschwindigkeit dabei<br>6 unsichtbare Geschwindigkeitsänderungen<br>Seitenwind und Pendeln in der Spur<br>hügelige Strecken |
| Beschreibung Übernahmeszenario:  | Unfall auf Ego-Spur   |
| Einstufung Übernahmeszenario (gering/mittel/hoch):   | Dringlich, nicht präzifizierbar, komplex, kritisch  |
| Zeitbudget:  | 7 Sekunden  |
| Art/Umfang der HAF-Instruktion:  | Erklärung HAF inkl. Systemgrenzen, Einführungsfahrt inkl. Übernahmemöglichkeiten (Bremsen, Lenken, Knopfdruck)  |
| Anzahl der erlebten Übernahmauforderungen vor Versuchsbeginn:                              | 1   |
| Dauer der automatisierten Fahrt vor TOR:   | 32 min  |
| TOR Design (akustisch, visuell) und Charakterisierung                                      | Kombi: rotes Lenkradsymbol mit Händen<br>Akustisches Warnsignal<br>Fahrzeug verzögert mit Schleppmoment   |
| Methode zur HAF-Deaktivierung:   | Bremsen, Lenken, Knopfdruck am Lenkrad  |
| Systemverhalten nach TOR:  | Verzögerung mit Schleppmoment   |

### 3 Fragestellungen und Ergebnisse

|                        |   |
|------------------------|---|
| Fragestellung 1:       | Welches Verhalten zeigen die FahrerInnen nach der kritischen Situation in Abhängigkeit des Wohlbefindens?   |
| Unabhängige Variablen: | Wohlbefinden  |
| Abhängige Variablen:   | Kritikalität der Situation, Bewältigung der Situation, Reaktionszeiten, Fahrverhalten   |
| Hauptergebnisse:       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- 33 % der Probanden schätzen die Situation als gefährlich ein</li> <li>- 25 % der Probanden bewältigten die Übernahme ihrer Ansicht nach gut</li> <li>- Kein Unterschied in der Lenkreaktionszeit- und Lenkwinkel, Bremspedalbetätigung sowie Quer- und Längsbeschleunigung zwischen Übelkeit und keine Symptome</li> <li>- Probanden mit Symptomen bauen tendenziell höheren Bremsdruck auf und haben tendenziell einen geringeren Abstand zum Unfall</li> </ul> |
| Fazit aus Studie für   | Motion Sickness Symptome ohne Übelkeit haben keinen Einfluss auf die Übernahmeleistung  |

## Studie Ko-HAF 6: Wizard-of-Oz-Studie zum Einfluss unterschiedlicher FFT's auf den Fahrerzustand Müdigkeit

Nachdem bis dato fast alle Studien, die den Verlauf der Fahrer Verfügbarkeit zum Ziel hatten, in Fahrsimulatoren stattgefunden hatten, konnte mit Hilfe der Wizard-of-Oz Methodik auch ein Versuch in einem Realfahrzeug durchgeführt werden, in dem unter realen Bedingungen längere Automationsdauern im Zusammenhang mit der Entstehung von Müdigkeit untersucht werden konnten.

### 1 Fotodokumentation

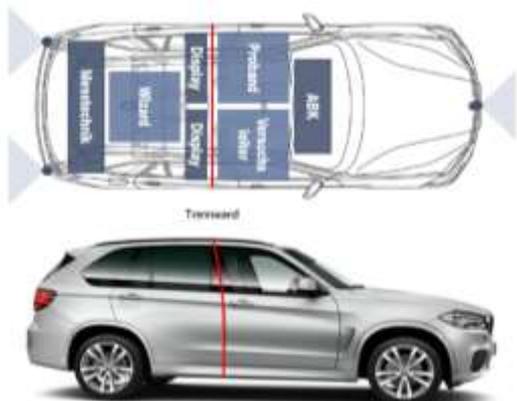


Abbildung 50: Wizard of Oz Fahrzeug



Abbildung 51: Fahrzeuginnenraum



Abbildung 52: Kombi HAF aktiv

Abbildung 53: Übernahmeaufforderung



Abbildung 54: monotone FFT „Pqpd“



Abbildung 55: Fahrstrecke

### 2 Studien-/Systemdesign

|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| Zeitraum der Studiendurchführung:                                   | April (KW 16) - Mai (KW 22) 2018 |
| Methode (Fahrsim. vs. Realfahrzeug (Testgelände /öffentl. Gelände)) | WoOZ Realfahrzeug auf A92        |
| Stichprobengröße:   | 43                               |
| Charakterisierung Versuchsteilnehmer:                               | Fachfremde BMW Mitarbeiter       |

|  |  |
|--|--|
| Beschreibung der Versuchsstrecke (Anzahl der Spuren, Geschwindigkeit, Verkehrsdichte etc.) | Autobahn A92, Flughafen München – Pilsting und zurück. Mittlere Verkehrsdichte.<br>v = 110km/h   |
| Beschreibung Übernahmeszenario:  | Wanderbaustellen, Autobahnabfahrt und stationäre Baustellen  |
| Einstufung Übernahmeszenario (gering/mittel/hoch):   | Gering, nicht kritisch, eingeschränkt prädzierbar, simpel  |
| Zeitbudget:  | 45 Sekunden  |
| Art/Umfang der HAF-Instruktion:  | Erklärung HAF inkl. Systemgrenzen, Übung im Stand und Schrittgeschwindigkeit sowie auf der Autobahn inkl. Übernahmen (Knopfdruck)                      |
| Anzahl der erlebten Übernahmeaufforderungen vor Versuchsbeginn:                            | Drei (Im Stand, Schrittgeschwindigkeit, Autobahn)  |
| Dauer der automatisierten Fahrt vor TOR:   | Bei unvorhersehbaren Wanderbaustellen unterschiedlich. Ohne Wanderbaustellen ca. 30 Minuten.   |
| TOR Design (akustisch, visuell) und Charakterisierung                                      | Akustisches Warnsignal, Einblendung blaues Lenkradsymbol im Kombidisplay mit 45 Sekunden Timer, Wizard Fahrer steuert weiter, drosselt aber das Tempo. |
| Methode zur HAF-Deaktivierung:   | Hände an das Lenkrad nehmen und Taste am Lenkrad (auf Speiche) drücken.  |
| Systemverhalten nach TOR:  | Fährt automatisiert weiter, lässt aber Ausrollen   |

### 3 Fragestellungen und Ergebnisse

|                        |   |
|------------------------|---|
| Fragestellung 1:       | Einfluss unterschiedlicher FFT's auf den Fahrerzustand Müdigkeit im Realverkehr   |
| Unabhängige Variablen: | FFT (monotone vs. aktivierende / freie Tätigkeit)   |
| Abhängige Variablen:   | KSS, PERCLOS  |
| Hauptergebnisse:       | <p>KSS: Signifikante Änderung des KSS-Ratings in Abhängigkeit der FFT und in Abhängigkeit der Versuchsdauer. Höchste KSS: Ende Fahrt nach 60 Minuten bei Probanden mit monotoner Aufgabe. Niedrigste KSS: Beginn der Fahrt nach 3 Minuten bei Probanden mit freier Tätigkeit. KSS steigt bei beiden Gruppen mit zunehmender Fahrdauer an, allerdings bei der Gruppe mit monotoner Tätigkeit stärker.</p> <p>PERCLOS: Signifikante Veränderung des PERCLOS in Abhängigkeit der FFT und in Abhängigkeit der Versuchsdauer. Höchster PERCLOS: Ende der Fahrt nach 60 Minuten bei Probanden mit monotoner Aufgabe. Niedrigster PERCLOS: Ende der Fahrt nach 60 Minuten bei Probanden mit freier Tätigkeit. PERCLOS steigt nur bei der Gruppe mit monotoner Tätigkeit im Laufe der Zeit an und nicht bei Probanden mit freier Tätigkeit.</p> |

Fazit aus Studie für

Müdigkeit beim automatisierten Fahren entsteht im Realverkehr ähnlich schnell wie im Simulator (Ko-HAF 1 und Ko-HAF-3). Vor allem bei Bearbeitung einer monotonen Tätigkeit. Eine freie Auswahl der Ausgeführten Tätigkeit kann dazu beitragen die Müdigkeit gering zu halten.

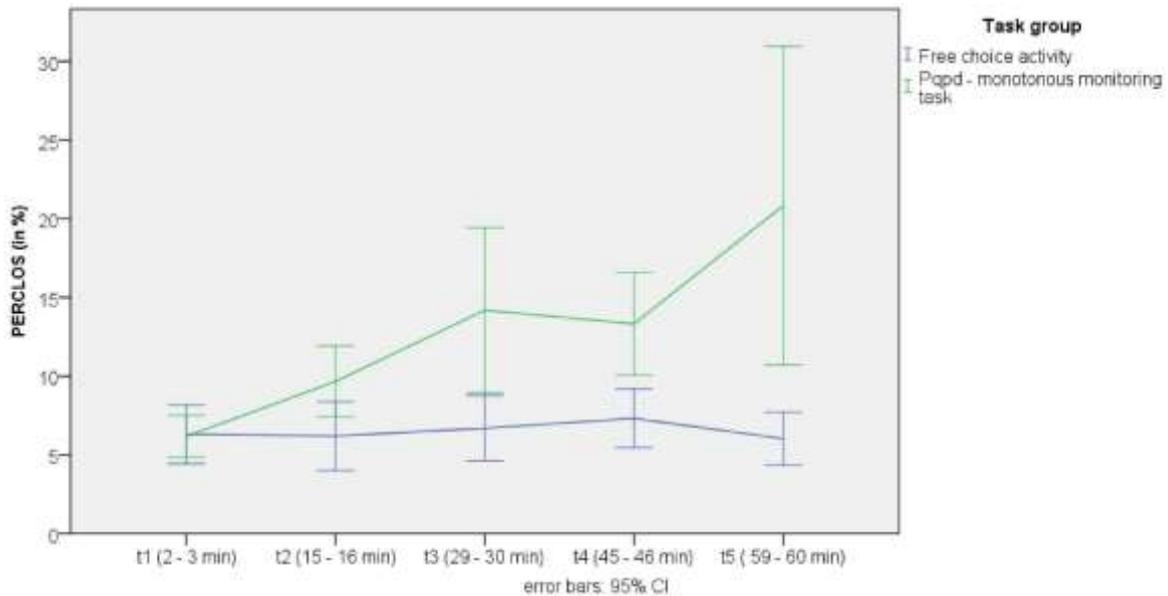


Abbildung 56: Verlauf PERCLOS für beide Tätigkeiten

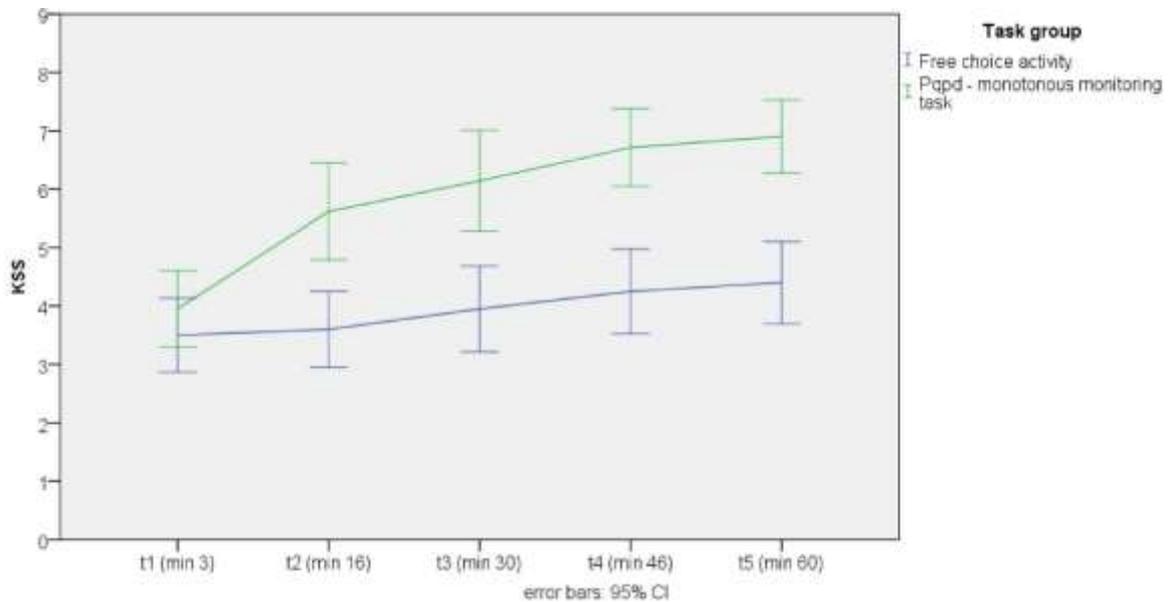


Abbildung 57: Verlauf KSS für beide Tätigkeiten

Die Ergebnisse der Wizard-of-Oz Studie wurden in einem Journal zur Veröffentlichung eingereicht<sup>11</sup>.

<sup>11</sup> Jarosch, O., Paradies, S., Feiner, D. & Bengler, K. (2018) *Effects of non-driving related tasks in Prolonged Conditional Automated Driving – A Wizard-of-Oz on-road approach in real traffic environment*. Manuscript submitted for publication.

### **Implementierung eines Moduls Fahrer Verfügbarkeit (T3.2.4)**

Ziel des UAP 3.2.4 war es, ein Modul zur Bewertung der Übernahmefähigkeit zu erstellen. Auch die BMW AG hat an einem solchen Fahrer Verfügbarkeitsmodell zur Modellierung der Übernahmeleistungsparameter des Fahrers (Blickreaktionszeit, Übernahmezeit, Übernahmequalität) gearbeitet. Als Datengrundlage dienten Daten von 367 Übernahmen aus 5 Fahrsimulatorstudien, die hauptsächlich zum Thema Müdigkeit, aber auch unter Berücksichtigung unterschiedlicher fahrfremder Tätigkeiten von BMW durchgeführt wurden. Insgesamt gingen 26 verschiedene Features in die Modellierung ein, mit denen entsprechende Machine Learning Modelle (Lineare Regression, Random Forest, XGBoost) trainiert wurden. Die erzielten Modelle leisteten jedoch nur wenig Beitrag zur Erklärung der auftretenden Varianz der genannten Parameter: Während sich zumindest ein geringer Einfluss des Fahrerzustands auf die Übernahmezeit sowie die Blickreaktionszeit zeigt (es kann jeweils 17% der Varianz erklärt werden), kann für die Übernahmequalität keinerlei Zusammenhang zum Fahrerzustand gefunden werden. Die Vorerfahrung der Fahrer mit Übernahmen oder Assistenzsystemen im Allgemeinen spielte hierbei die größte Rolle für die Erklärung der Übernahme- und Blickreaktionszeiten. Abschließend muss man jedoch konstatieren, dass keines der Modelle einen befriedigenden Anteil der Varianz erklären und bedeutsame Zusammenhänge zwischen dem Fahrerzustand und der Übernahme herstellen konnte. Dies deckt sich durchaus mit den Ergebnissen der bisherigen Untersuchungen, in denen die erwarteten Zusammenhänge zwischen manchen Fahrerzuständen (speziell Müdigkeit) auf die Übernahmeleistung Konsortium-übergreifend häufig ausblieben. Vergleichbare Modellierungsansätze der Partner kamen dabei zu ähnlichen Ergebnissen.

### **Validierung des Moduls durch Simulatortests und Realfahrzeugtests (T3.2.5)**

Aufgrund des insgesamt geringen Erklärungswertes der Modelle wurde in Absprache mit dem Projektträger auf die Umsetzung im Realfahrzeug und die anschließende Validierung verzichtet. In der Fahrsimulation wurde nach erfolgreichem Benchmark der beiden Ansätze ein validierter Schätzer nach Gold<sup>12</sup> umgesetzt, der jedoch nicht explizit im Fokus der noch folgenden Versuche stand.

## **3.3.3 UAP3.3 Integration der Transitionskonzepte für HAF und deren Bewertung**

Als Vorarbeit zu den optimierten Transitionskonzepten adressiert eine weitere Simulatorstudie (vgl. Studiensteckbrief zu Ko-HAF 5) die Fragestellung inwieweit der Fahrerzustand positiv beeinflusst werden kann durch zwischengeschaltete Perioden der Aktivität (z.B. kurzzeitiges manuelles Fahren).

### **Studie Ko-HAF 5: Gezielte Unterbrechung der hochautomatisierten Fahrt durch aktive / passive Aktivitäten**

#### **1 Fotodokumentation**



**Abbildung 58:** Statischer Simulator der BMW AG

<sup>12</sup> Gold, C. (2016). Modeling of Take-Over Performance in Highly Automated Vehicle Guidance. Dissertation, TU München.



**Abbildung 59:** Blick vom Fahrerplatz auf die Fahrscene im statischen Simulator



**Abbildung 60:** Mock-Up mit Plasmabildschirmen als Rückkanäle



**Abbildung 61:** Sensoren für die Messung physiologischer Parameter (EKG, EDA, EOG)



**Abbildung 62:** Eyetracker Dikablis

**Tabelle 4:** Übersicht der erhobenen Daten

| Subjektive Daten   |  |  | Objektive Daten        |
|--|--|--|------------------------|
| VORBEFRAGUNG   | WÄHREND DER FAHRT IN ~ 15' INTERVALL               | NACHBEFRAGUNG                                  | WÄHREND DER FAHRT      |
| Soziodemographische Daten                                      | KSS  | KSS  | Fahrdaten              |
| Gesundheit & Fitness   | NACH TOR   | Wahrnehmung des TOR                            | Herzfrequenz           |
| Schlafgewohnheiten   | KSS  | Erleben des TOR                                | Galvanic Skin Response |
| Karolinska Sleepiness Scale (KSS; Åkerstedt and Gillberg 1990) | Kritikalität der Situation (Neukum & Krüger, 2003) | Schwierigkeiten beim TOR                       | „PERCLOS“              |
| Erfahrung mit FAS & Fahrstil- und Fahrkönnen                   | Eigeneinschätzung der Situationsbewältigung        | Bewertung der Intervention/ Nicht-Intervention | Elektrookulografie     |

## 2 Studien-/Systemdesign

|  |  |
|--|--|
| Zeitraum der Studiendurchführung:  | 06.12. – 21.12.2017  |
| Methode (Fahrsim. vs. Realfahrzeug (Testgelände /öffentl. Gelände))                        | Statischer Fahrsimulator   |
| Stichprobengröße:  | N = 66   |
| Charakterisierung Versuchsteilnehmer:  | Mitarbeiter BMW (intern und extern; z.B Bertrand etc.)   |
| Beschreibung der Versuchsstrecke (Anzahl der Spuren, Geschwindigkeit, Verkehrsdichte etc.) | Vgl. Ko-HAF 3, 50 min HAF-Fahrt, nach 50 min kritische Übernahme; 3 spurige AB; max. 130 km/h, wenige Verkehr. Nach 17 bzw. 32 Minuten wurden Probanden aufgefordert für 5 Minuten eine bestimmte Aktivität (sog. „Intervention“) durchzuführen. |
| Beschreibung Übernahmeszenario:  | Vgl. Ko-HAF 3, Unfall auf eigener Spur ganz rechts, zwei Fzg. auf mittlerer (Ausweich-)Spur im Abstand von 100m zueinander   |
| Einstufung Übernahmeszenario (gering/mittel/hoch):   | hochkritisch   |
| Zeitbudget:  | TTC = 7 s  |
| Art/Umfang der HAF-Instruktion:  | Eingewöhnungsfahrt mit kritischer Übernahme, drei Übernahmen in Eingewöhnung (Knopf, Lenken, Bremsen)  |
| Anzahl der erlebten Übernahmeaufforderungen vor Versuchsbeginn:                            | 1  |
| Dauer der automatisierten Fahrt vor TOR:   | 50 min   |
| TOR Design (akustisch, visuell) und Charakterisierung                                      | Rotes Lenkradsymbol, Warnton   |
| Methode zur HAF-Deaktivierung:   | Bremsen, Lenken, Knopfdruck  |
| Systemverhalten nach TOR:  | Verzögerung mit Schleppmoment, keine Querregelung  |

## 3 Fragestellungen und Ergebnisse

|                        |   |
|------------------------|---|
| Fragestellung 1:       | Kann das Unterbrechen der hochautomatisierten Fahrt die Müdigkeitsentwicklung des Fahrers reduzieren?<br>Läßt sich der Fahrerezustand während einer längeren hochautomatisierten Fahrt durch gezielte Unterbrechung durch aktive oder passive Aktivitäten (sog. Interventionen) positiv beeinflussen? |
| Unabhängige Variablen: | Art der Intervention (Between): 4 Gruppen: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Baseline ohne Intervention</li> <li>- Manuelles Fahren (2 x 5 min)</li> <li>- Quiz ( 2 x 5 min)</li> <li>- Podcast (2 x 5 min)</li> </ul>   |

|                        |   |
|------------------------|---|
| Abhängige Variablen:   | Fahrerzustand: PERCLOS, physiolog. Daten, subjektive Müdigkeit (KSS)  |
| Hauptergebnisse:       | Tendenziell höchste Müdigkeitswerte vor TOR in der Baseline-Bedingung, aber kein signifikanter Effekt der Intervention.<br>In allen Bedingungen nimmt die Müdigkeit bis vor dem TOR zu. Erst der TOR zeigt eine müdigkeitsreduzierende Wirkung. Diese zeigt sich jedoch unabhängig von den erlebten Interventionen. |
| Fazit aus Studie für   | Keine längerfristige müdigkeitsreduzierende Wirkung durch Interventionen.   |
| Fragestellung 2:       | Welchen Einfluss haben gezielte Unterbrechungen der hochautomatisierten Fahrt durch aktive oder passive Aktivitäten (sog. Interventionen) auf die Übernahmeleistung (Reaktionszeiten, Qualität)?  |
| Unabhängige Variablen: | Art der Intervention (Between): 4 Gruppen:<br>- Baseline ohne Intervention<br>- Manuelles Fahren (2 x 5 min)<br>- Quiz (2 x 5 min)<br>- Podcast (2 x 5 min)   |
| Abhängige Variablen:   | Übernahme: Reaktionszeiten, Qualitätsmaße   |
| Hauptergebnisse:       | Die Interventionen haben keinen längerfristigen Einfluss auf die Reaktionszeiten und Übernahmeleistung der Fahrer.  |
| Fazit aus Studie für   | Die Interventionen haben keinen langfristigen Einfluss auf die Übernahmeleistung und tragen somit nicht zusätzlich zur Sicherheit während einer kritischen Übernahmesituation bei.  |

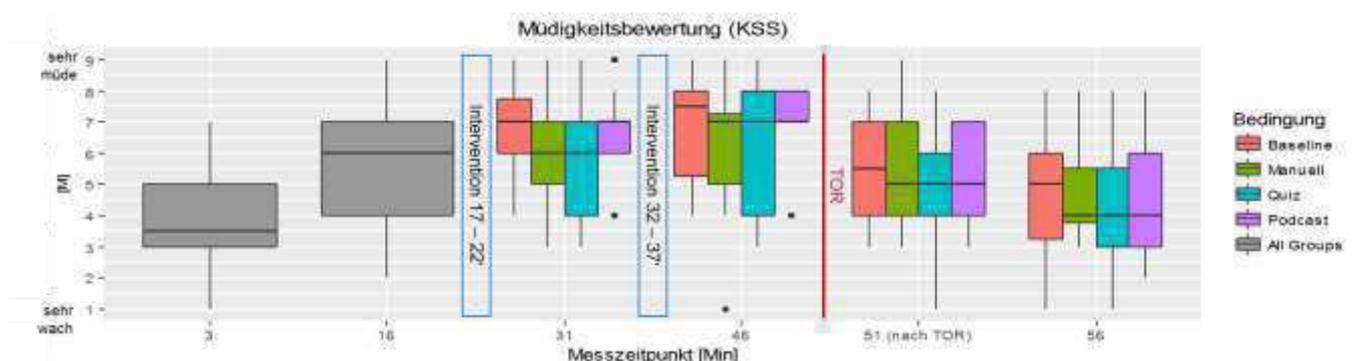
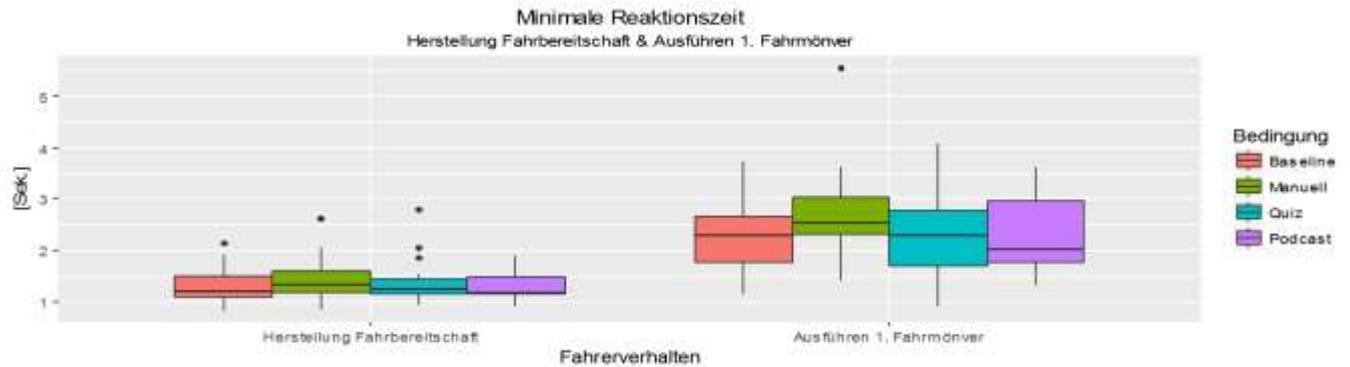


Abbildung 63: Verlauf der subjektiven Müdigkeitsbewertung



**Abbildung 64:** Reaktionszeiten bis Herstellung Fahrbereitschaft (Hands-on oder Bremspedalberührung) und Ausführen des 1. Fahrmanövers (Bremspedalstellung >10% oder Lenkwinkeländerung >2°)

In UAP 3.3 beinhaltete die Zielsetzung außerdem, ein optimiertes Übernahmekonzept zu gestalten, zu implementieren und zu testen. Aufgrund der Ergebnisse der Studien aus dem UAP 3.2 zum Einfluss von passiver aufgabenbezogener Müdigkeit bei längeren Automationsdauern wurden daher zwei optimierte Anzeige-Konzepte entwickelt. Diese sollen die Fahrer dabei unterstützen, in dringlichen und kritischen Übernahmesituationen die relevanten Aspekte der Situation möglichst schnell wahrnehmen und verstehen, um dann angemessen reagieren zu können. Dazu wurde zwei Konzepte für den Rtl (Request to Intervene) entworfen, die jeweils für unterschiedliche Modalitäten optimiert waren:

- **Auditiv:** Der Rtl wurde in Form einer Sprachausgabe („Selbst fahren – Gefahr voraus“) ausgegeben, die auch den Grund der Übernahme beinhaltet. Zusätzlich war ein Earcon als Warnton vorgeschaltet.
- **Visuell:** Der Rtl war mittels einer LED Leiste umgesetzt, die vor dem Fahrer an der Scheibenwurzel verlief. In der Übernahmesituation blinkte diese rot. Der beleuchtete Abschnitt markierte dabei den Ort der Ursache für die Übernahme und sollte helfen, den Blick in die Richtung der Gefahrenstelle zu lenken. Zusätzlich war ein Earcon als Warnton vorgeschaltet.

Im Juni 2018 wurden diese beiden optimierten Konzepte in einem Versuch im dynamischen Fahrsimulator getestet (N=69) und mit einer Baseline Bedingung (Earcon + Anzeige im Kombidisplay „Selbst Fahren – Gefahr voraus“) verglichen. Studienaufbau und Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt:

# Studie Ko-HAF 7: Übernahmesituationen mit ermüdeten Fahrern. Ein Vergleich dreier Varianten für den Rtl

## 1 Fotodokumentation



Abbildung 65: Dynamischer Simulator der BMW AG



Abbildung 66: Innenraumansicht mit "pqpd"-Aufgabe



Abbildung 67: Übernahmesituation "Ausweichen"



Abbildung 68: Übernahmesituation "Bremsen"

| <p>TOR mit Sprache (N=22):</p>  | <p>TOR mit LED-Blitzlicht (N=21):</p>   | <p>TOR mit Text (N=21):</p>   |
|---|---|---|
| <p><b>Akustik</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Earcon.</li> <li>• Sprachausgabe „Selbst fahren! Gefahr voraus!“</li> </ul> <p><b>Anzeige im Kombi</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Roter Text „Gefahr voraus“.</li> <li>• Rotes Lenkrad-Icon mit Händen.</li> </ul> | <p><b>Akustik</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Earcon.</li> </ul> <p><b>Anzeige untere Kante Frontscheibe</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rote LED-Leiste.</li> <li>• Relevanter Bereich blitzt auf (bis zu 7x).</li> </ul> <p><b>Anzeige im Kombi</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Roter Text „Gefahr voraus“.</li> <li>• Rotes Lenkrad-Icon mit Händen.</li> </ul> | <p><b>Akustik</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Earcon.</li> </ul> <p><b>Anzeige im Kombi</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Roter Text „Selbst fahren!“</li> <li>• Roter Text „Gefahr voraus!“</li> <li>• Rotes Lenkrad-Icon mit Händen.</li> </ul> |

Abbildung 69: ABK-Varianten (Rtl)

## 2 Studien-/Systemdesign

|  |                                |
|--|--------------------------------|
| Zeitraum der Studiendurchführung:                                    | Juni 2018                      |
| Methode (Fahrstim. vs. Realfahrzeug (Testgelände /öffentl. Gelände)) | Dynamischer Fahr Simulator BMW |
| Stichprobengröße:  | 64 Probanden                   |

|   |      |  |
|---|------|--|
| Charakterisierung<br>suchsteilnehmer:   | Ver- | BMW Mitarbeiter  |
| Beschreibung der<br>Versuchsstrecke<br>(Anzahl der Spuren, Geschwindigkeit,<br>Verkehrsdichte etc.) |      | Fahrt auf einer dreispurigen Autobahn mit Standstreifen,<br>v = 130 km/h, geringe – mittlere Verkehrsdichte (vgl. Ko-<br>HAF 3). Insgesamt 60 min HAF-Fahrt, nach 40 min und<br>58 Minuten jeweils kritische Übernahme-situation   |
| Beschreibung Übernahme-szenario:  |      | 1. Situation: Unfall auf Egospur. Ein Transporter fährt<br>dicht auf das Fahrzeug des Probanden auf. Kein<br>Fremdverkehr auf der mittleren Spur. In dieser Situa-<br>tion ist <b>Ausweichen</b> die naheliegende Strategie.<br><br>2. Situation: Unfall auf Egospur. Hinter dem Probanden<br>befindet sich kein weiterer Verkehrsteilnehmer. Fahr-<br>zeugkolonne auf der mittleren Spur. In dieser Situa-<br>tion ist <b>Stehenbleiben</b> die naheliegende Strategie.             |
| Einstufung Übernahme-szenario (ge-<br>ring/mittel/hoch):  |      | Unfall auf Ego-Spur -> dringlich, nicht präzifizierbar, kri-<br>tisch, komplex   |
| Zeitbudget:   |      | 7 Sekunden (ttc)   |
| Art/Umfang der HAF-Instruktion:   |      | Erklärung HAF inkl. Systemgrenzen, Eingewöhnungs-<br>fahrt inkl. Übernahmen (Lenken, Bremsen Knopfdruck)   |
| Anzahl der erlebten Übernahmeauffor-<br>derungen vor Versuchsbeginn:                                |      | 1  |
| Dauer der automatisierten Fahrt vor<br>TOR:   |      | Ca. 60 min   |
| TOR Design (akustisch, visuell) und<br>Charakterisierung  |      | 3 Varianten (siehe Abbildung 5):<br>Bei allen Varianten: Akustisches Warnsignal, Anzeige im<br>Kombi (rotes Lenkradsymbol + Text „Gefahr voraus“)<br><br>Variante „Sprache“: zusätzlich Sprachausgabe „Selbst<br>fahren! Gefahr voraus!“<br>Variante „LED-Leiste“: LED-Leiste an der unteren Kante<br>der Frontscheibe. Relevanter Bereich der LED Leiste<br>blitzt rot auf (bis zu 7x ).<br><br>Variante „Text“: Baseline-Bedingung, zusätzlicher Text<br>im Kombi „Selbst Fahren!“ |
| Methode zur HAF-Deaktivierung:  |      | Bremsung, Lenkung, Knopf am Lenkrad  |
| Systemverhalten nach TOR:   |      | Verzögerung mit Schleppmoment, keine Querregelung  |

### 3 Fragestellungen und Ergebnisse

|                        |   |
|------------------------|---|
| Fragestellung 1:       | Einfluss unterschiedlicher Anzeige-Bedien-Konzepte auf die<br>Übernahmeleistung bei ermüdeten Fahrern |
| Unabhängige Variablen: | ABK Variante (Sprache, LED, Text)   |
| Abhängige Variablen:   | Reaktionszeiten, Übernahmequalität, qualitatives Feedback<br>zu den HMI-Konzepten                     |

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Hauptergebnisse:      | Die Variante LED schneidet am besten ab und zieht fast durchgehend die schnellsten Reaktionszeiten nach sich. Die Variante Sprache zieht dagegen die langsamsten Reaktionszeiten nach sich   |
| Fazit aus Studie      | Mit Hilfe einer LED-Leiste können ermüdete Fahrer die Situation sehr schnell erfassen und schnell reagieren. Die Sprachausgabe war evtl. zu lang   |
| Fragestellung 2:      | Einfluss unterschiedlicher Anzeige-Bedien-Konzepte auf das Blickverhalten in der Übernahme-situation bei ermüdeten Fahrern   |
| Unabhängige Variable: | ABK Variante (Sprache, LED, Text)  |
| Abhängige Variablen:  | Blickverhalten   |
| Hauptergebnisse:      | In der ersten Übernahme-situation ist der häufigste Ort des ersten Blickes das Kombiinstrument. Nur wenige Probanden blicken nach der Übernahmeaufforderung als erstes auf die Straße. In der zweiten Übernahme-situation geht der erste Blick – sowohl bei der LED- als auch bei der Text-Variante bei deutlich mehr Probanden auf die Straße. Es fällt auf, dass Personen mit der LED-Variante deutlich kürzer in das Kombiinstrument blicken als die anderen Teilnehmer. Die Unterschiede der LED-Variante zu den anderen Varianten sind statistisch signifikant. |
| Fazit aus Studie      | Auch bei der LED-Variante blicken die Teilnehmer in das Kombiinstrument, allerdings sind diese Blicke deutlich kürzer als bei den andere Konzepten. Die LED-Leiste kann dazu genutzt werden, um den Blick des Fahrers schnell auf eine Gefahrensituation zu lenken.  |

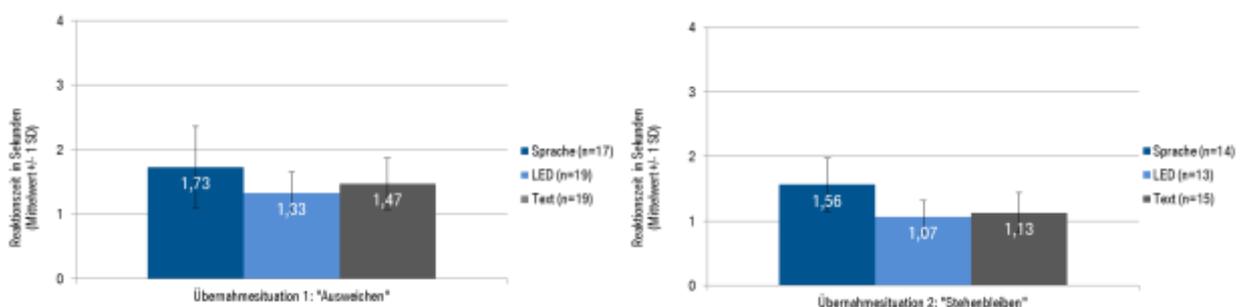


Abbildung 70: Reaktionszeit Hands-On

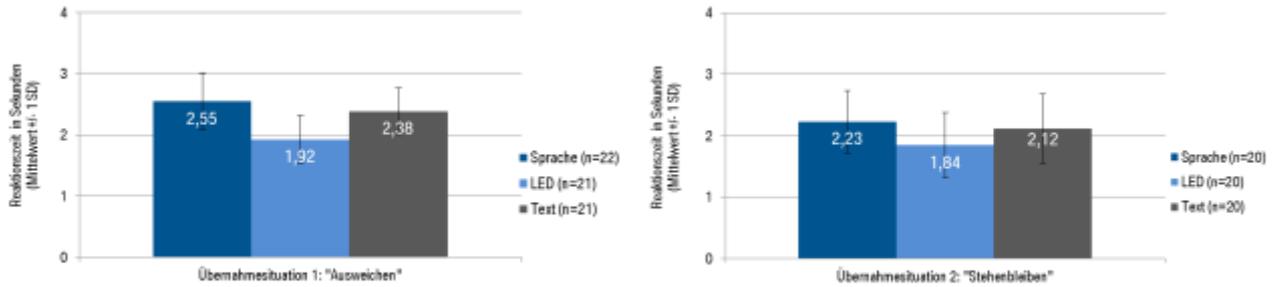


Abbildung 71: Reaktionszeit erstes Fahrmanöver

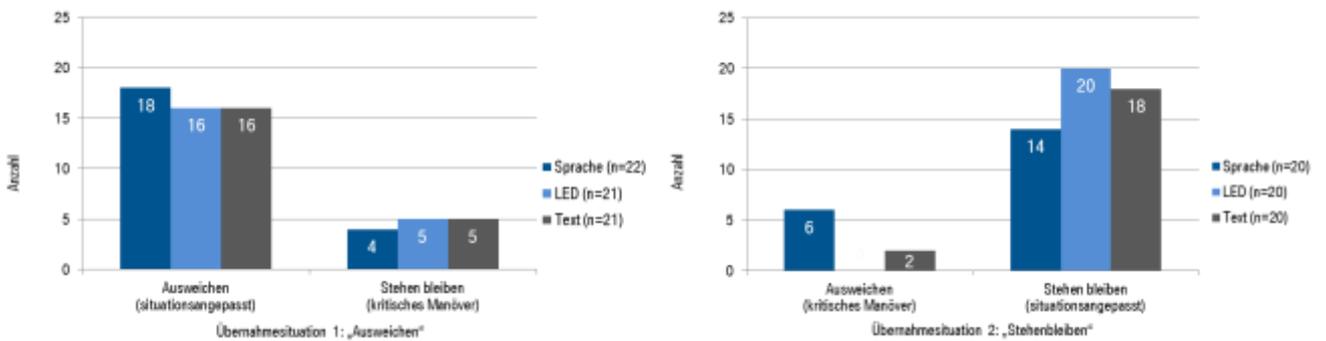


Abbildung 72: Darstellung der Art der Bewältigung (Ausweichen vs. Stehen bleiben) in den beiden Übernahmesituationen

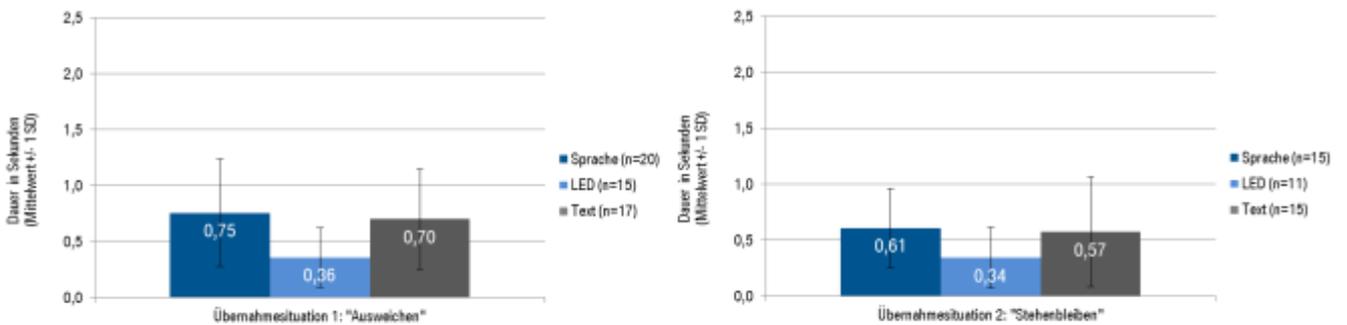


Abbildung 73: Dauer des ersten Blicks ins Kombi-Instrument

Es wurde außerdem eine Probandenstudie im Realfahrzeug (Wizard-of-Oz-Fahrzeug) durchgeführt, in der die Fragestellungen aus dem UAP 3.2 (Fahreraufmerksamkeit, Langzeit HAF, fahrfremde Tätigkeiten) nochmals unter realen Bedingungen adressiert wurden. Aufbau und Ergebnisse wurden bereits im Rahmen von UAP 3.2 berichtet.

### 3.3.4 UAP3.4 Empfehlungen zu Methoden und Interaktionskonzepten

Im Unterarbeitspaket 3.4 „Empfehlungen zu Methoden und Interaktionskonzepten“ wurden die Aktivitäten und Erkenntnisse des AP3 im Projekt Ko-HAF konsolidiert. Neben einer Zusammenstellung der Ergebnisse der im Rahmen von Ko-HAF im AP3 durchgeführten Studien, wurden Analogien und Unterschiede identifiziert und diskutiert. Diese partnerübergreifende Auseinandersetzung mit den Ergebnissen des Förderprojekts stellte die Basis für die spätere Ableitung von Kernaussagen des AP3 und die Ableitung von Empfehlungen als kondensierte Form der Ergebnisverwertung dar.

Hierbei wurden neben den in der Vorhabensbeschreibung fokussierten Feldern der Methodik und der Interaktionskonzepte, auch die Bereiche der fahrfremden Tätigkeiten (Non-Driving Related Tasks; NDRT) und Müdigkeit (Drowsiness and Fatigue) betrachtet.

## Methodik

In Bezug auf die Methodenentwicklung für die Beleuchtung der Rolle des Fahrers im hochautomatisierten Fahrzeug wurden Kernergebnisse der UAP3.1-3.4 wieder aufgegriffen und neu aufbereitet. Insbesondere die partnerübergreifenden Veröffentlichungen zu Testszenarien<sup>13</sup> sowie zum Konzept „Fahrerverfügbarkeit“<sup>14</sup> stellen wichtige Bausteine zur Weiterentwicklung der Methodik im Bereich der Untersuchung der Mensch-Maschine-Interaktion beim hochautomatisierten Fahren dar. Die Inhalte beider Veröffentlichungen flossen zudem in das ISO Projekt TR21959 „Human State and Performance in the Context of Automated Driving“ ein.

Die im Projekt Ko-HAF weiterentwickelte Wizard-of-Oz Methodik (Automation wird durch einen menschlichen Fahrer simuliert) wurde in verschiedenen Ausprägungen von mehreren Projektpartnern im Rahmen von Pilotversuchen erfolgreich eingesetzt. Die Erfahrungen zu den Varianten „Rechtslenker mit nicht-funktionalen Bedienelementen auf Fahrerseite“, „Linkslenker mit verdeckt agierendem Fahrer im abgeschirmten Font“ sowie „Linkslenker mit verdeckt agierendem Fahrer auf Beifahrerplatz“ konnten in einem spezifischen Wizard-of-Oz Workshop am 24. Oktober 2017 an der TU München ausgetauscht und diskutiert werden. Die Wizard-of-Oz Methodik wurde im Rahmen des UAP3.4 hinsichtlich der Ergebniskonformität mit der etablierten Methodik der Fahrsimulation verglichen. Für dringliche Übernahme-situationen zeigten sich bzgl. der Übernahmezeit nur geringfügige Unterschiede. Die Qualität der Fahrzeugstabilisierungsphase lässt sich im Realfahrzeug im Vergleich zu vielen (statischen) Fahrsimulatoren deutlich valider bewerten.

## Interaktionskonzepte

Für das Projekt Ko-HAF wurden generische Interaktionskonzepte (MMI) vereinbart, welche eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei gleichzeitiger Wahrung der Interessen hinsichtlich einer Wettbewerbsdifferenzierung der Partner zulassen. Im UAP3.4 wurden hieraus die Empfehlungen zu mehrstufigen MMI-Konzepten formuliert, welche eine multimodale Übernahmeaufforderung vorsehen. Insbesondere das Abschalten des NDRT durch das Fahrzeug im Moment der Übernahmeaufforderung („NDRT lock-out“) verkürzte tendenziell die Übernahmezeit des Fahrers. Außerdem wurde eine Routenvorausschau als für den Fahrer zur Selbstregulierung des Verhaltens hilfreich identifiziert.

## Non-Driving Related Tasks

Bei der Untersuchung des Menschen im Kontext der Interaktion mit hochautomatisierten Fahrzeugen wurden unterschiedliche NDRTs eingesetzt. Das UAP3.4 hat die Erkenntnisse hinsichtlich der Einflüsse der untersuchten Modalitäten der Aufgaben konsolidiert und daraus Handlungsempfehlungen abgeleitet. Die Ergebnisse der Experimente der Partner waren nicht immer konsistent, z.B. hinsichtlich des Einflusses von visuellen, visuell-motorischen oder rein kognitiven Aufgaben. Dennoch konnte vor allem der Handbelegung durch einen NDRT sowie einer starken physischen Abwendung eine Übernahmezeitverlängernde Wirkung nachgewiesen werden. Eine Übersicht über die Erkenntnisse zu den Effekten von NDRTs wurde in einer partnerübergreifenden Veröffentlichung<sup>15</sup> publiziert.

## Müdigkeit

---

<sup>13</sup> Gold et al. (2017) Testing-Scenarios for Human Factors Research in Highly Automated Vehicles.

<sup>14</sup> Marberger, C., Mielenz, H., Naujoks, F., Radlmayr, J., Bengler, K., & Wandtner, B. (2017). Understanding and Applying the Concept of “Driver Availability” in Automated Driving. In N. A. Stanton (Ed.), *Advances in Human Aspects of Transportation: Proceedings of the AHFE 2017 International Conference on Human Factors in Transportation*.

<sup>15</sup> Jarosch, O. (BMW), Wandtner, B. (Opel), Marberger, C. (Robert Bosch GmbH), Gold, C. (BMW), Naujoks, F. (BMW), Weidl, G. (Daimler), Schrauf, M. (Daimler). (2018) *The Impact of Non-Driving Related Tasks on Take-over Performance in Conditionally Auto-mated Driving – A Review of the Empirical Evidence*. Submitted for publication.

Die Arbeiten unterschiedlicher Partner befassten sich mit der Untersuchung der Auswirkung von Müdigkeit/Ermüdung auf den Fahrer im hochautomatisierten Fahrzeug. Beim Abgleich der Ergebnisse im Rahmen des UAP3.4 konnten partnerübergreifend starke inter- und intraindividuelle Unterschiede festgestellt werden. Außerdem zeigte sich ein deutlicher Anstieg der Fahrermüdigkeit nach bereits 20-30 Minuten hochautomatisierter Fahrt, welcher allerdings in diesen Szenarien keinen signifikanten Einfluss auf die Übernahme hatte. Auch bei längeren automatisierten Fahrten (bis 90 min) zeigten sich keine eindeutigen Ergebnisse hinsichtlich des Übernahmeverhaltens.

## **3.4 AP4 Funktionsentwicklung für Normal- und Notbetrieb**

### **3.4.1 UAP4.1 Kooperative Umfeldmodellierung im Fahrzeug**

Zur „kooperativen Umfeldmodellierung“ wurde ein Konzept zur Befüllung eines 360° Umfeldmodells unter Aggregation der relevanten statischen und dynamischen Informationen aller Sensoren des Ko-HAF Versuchsträgers entwickelt. Es wurde implementiert und mit allen Sensordaten befüllt. Eine dynamische Objekterfassung wurde zunächst in den Zwischenversuchsträger „Z1“ (s.u.) integriert.

Das Umfeldmodell wurde an eine ROS<sup>16</sup>-basierte Softwareumgebung angepasst und die Umfeldmodellierung wurde für die Repräsentation von Auf- und Abfahrten von Autobahnen und für das Tracking dynamischer Objekte ergänzt. Abstimmungen zum Zugriff auf die digitale Karte erfolgten mit AP1 und AP2. Die digitale Straßenkarte wurde mit konfigurierbarer Vorausschau von Kartenkacheln dynamisch im Versuchsträger eingelesen und um kommunizierte Ko-HAF Informationen ergänzt.

Das Umfeldmodell wurde zusammen mit angeschlossenen Normalfunktionen (vgl. AP4.2) im Simulator sowie in Dudenhofen auf Daten von AP2 erprobt. Anschließend wurde es in den für Ko-HAF endgültig vorgesehenen Versuchsträger „E“ (s.u. 3.4.4) integriert.

Schließlich wurde die Umfeldmodellierung im Versuchsträger auf Autobahn-Testfahrten und auf Testgeländen, insbesondere dem Testgelände Dudenhofen für die Abschlusspräsentation erprobt. Umfelddaten wurden im Versuchsträger auf Testfahrten als „ROS-Bags“ aufgezeichnet. Relevante Abschnitte wurden ausgewertet und für die Simulation von Ko-HAF Funktionen zu Verfügung gestellt.

Mit Hilfe einer 3D-Visualisierung konnten die Umfelddaten in Echtzeit dargestellt werden.

Zu „kognitiven Ansätzen“ erfolgten Bewertungen der Leistungsfähigkeit maschineller Lernverfahren vorwiegend für die Erkennung von Einscherern bei variierenden Situationsbedingungen unter Mitarbeit von Doktoranden. Dafür wurde auf Messdaten aus der BMW Simulation und sowie aus BMW Realfahrten aufgesetzt. Die erarbeiteten Ergebnisse wurden im Projekt an eine Fachstelle zum Themenfeld Kognition und „Machine Learning“ für automatisiertes Fahren übergeben.

### **3.4.2 UAP4.2 HAF Normalfunktion**

Zu Projektbeginn wurden Konzepte zu Trajektorienplanung und Fahrstrategie bewertet und der Erweiterungsbedarf für die in Ko-HAF zu realisierenden „HAF-2“ Normalfunktionen identifiziert. Das im Projekt verfolgte Systemkonzept und die Handhabung von Übernahme-situationen wurde intensiv mit AP3 abgestimmt.

Anforderungen für die Fahrstrategie wurden ermittelt und eine als Aufsetzpunkt für die weitere Entwicklung geeignete „HAF-2“ Fahrstrategie entworfen. Sie wurde in Simulation bezüglich der Ko-HAF relevanten Eigenschaften (v.a. Auf- und Abfahrten auf Autobahnen) evaluiert und für die Integration in die BMW Ko-HAF Versuchsträger vorbereitet.

Im Rahmen mehrerer Unteraufträge wurde eine neue zentrale Trajektorienplanung implementiert. Sie wurde über eine neue Schnittstelle in die Fahrstrategie integriert und in Simulation verifiziert. Die Trajektorienplanung ermöglicht eine auf Basis von Güteparametern optimierte Trajektorienfindung für die Normalfunktion ebenso wie eine nahtlose Bewältigung von Gefahrenstellen mit situationsgerecht adaptierten Parametern.

---

<sup>16</sup> ROS: Robot Operating System, siehe <http://www.ros.org/>

Ein Softwaremodell zur vorausschauenden Bewertung der in Fahrtrichtung verfügbaren Fahrstreifen und zur Generierung von Wechselwünschen wurde in den Versuchsträger integriert und angepasst.

Die Fahrstrategie wurde für „HAF-2“ um Parametrierungsmöglichkeiten erweitert und in eine erweiterte, einheitlich ROS-basierte Architektur integriert. Die Integration wurde auf Versuchsfahrten im Versuchsträger „Z1“ (s. 3.4.4) auf dem BMW Messgelände verifiziert.

Die „HAF-2“ Fahrstrategie wurde auf weiteren Versuchsfahrten im Umfeld des BMW Standorts Garching verifiziert. Ein automatisierter „closed-loop“ Betrieb wurde zunächst bei niedrigen Geschwindigkeiten (< 60 km/h) erfolgreich dargestellt.

Eine „continuous integration“ Simulationsumgebung wurde aufgebaut, welche auch die Untersuchung von Autobahnscenarien ermöglichte. Anforderungen an Erprobungskatalog und Erprobungsspezifikation sowie den Aufbau von Testscenarien wurden mit AP5 entwickelt und abgestimmt.

Die vorausschauende Fahrstreifenwahl wurde zunächst in Simulation erfolgreich dargestellt. Anschließend wurden die BMW Ko-HAF Normalfunktionen wie automatisierte Längsführung bei Fahrgasse, Querführung bei Fahrstreifenwechseln, Autobahn Auf- und Abfahrten und Überholvorgänge auf der Autobahn auf Fahrten im Versuchsträger „E“ parametrisiert und erfolgreich erprobt. Logging-Daten aus den Testfahrten wurden aufgezeichnet und ausgewertet.

Die großräumigen Normalfunktionen wie das Überholen auf der Autobahn und das Befahren eines Autobahnkreuzes wurden bei der Abschlussdemonstration über aufgezeichnete Video- und Logging-Daten demonstriert. Die BMW Fahrdemonstration erfolgte auf dem Testgelände (vgl. UAP4.3).

Die BMW AG war an der Erstellung der Meilensteinberichte beteiligt und hat federführend das Kapitel „Konzepte zur Überführung in einen sicheren Zustand“ bearbeitet.

### **3.4.3 UAP4.3 Gefahrenstellen**

Ein Konzept für die Trajektorienplanung vor und um Gefahrenstellen wurde erarbeitet und in mehreren Unterbeauftragungen implementiert. Das Thema „Situationsbewertung und Trajektorienplanung an Gefahrenstellen“ und die Entwicklung von Verfahren zur Sicherheitsbewertung von Trajektorien wurden im Rahmen einer Dissertation erfolgreich bearbeitet.

Zum „Erkennen und Melden von Gefahrenstellen“ wurde beispielhaft die Identifikation liegengebliebener Fahrzeuge adressiert, welche anschließend an den Safety-Server gemeldet werden können.

In Gegenrichtung wurde die Umsetzung der über Mobilfunk erhaltenen Nachrichten des Ko-HAF Safety-Servers in ROS-Nachrichten des Fahrzeugnetzes implementiert. Damit konnten vom Safety-Server gemeldete Gefahrenstellen in das Umfeldmodell übernommen und bei der Manöverplanung berücksichtigt werden.

Zum „taktischen Umgang mit der Gefahrensituation“ wurden unter Nutzung der aus UAP 4.2 vorliegenden integrierten Trajektorienplanung (s.o.) Simulationen an Testscenarien durchgeführt. Aufgrund des rechenintensiven Ansatzes erfolgten umfangreiche Performancemessungen und eine anschließende Laufzeit-Optimierung der Implementierung. Ziel war es, für den Umgang mit Gefahrenstellen alternative optimale Trajektorien (z.B. Bremsen, Ausweichen in beide Richtungen) in Echtzeit berechnen, bewerten und vergleichen zu können.

Die Trajektorienplanung wurde an Hand der Testscenarien für Gefahrenstellen zunächst in Simulation parametrisiert und evaluiert. Anschließend wurde sie in den Versuchsträger integriert.

Ein Konzept zur systematischen integralen Berücksichtigung von Verkehrsregeln im normalen Verkehr und in Gefahrensituationen wurde erstellt und um ein Konzept zur Erreichbarkeitsanalyse in Längsrichtung ergänzt. Ein Verfahren zur Berücksichtigung formaler Verkehrsregeln wurde entwickelt und auf die Sicherheitsbewertung von Fahrstreifenwechseln angewendet. Methoden zur formalen Verifikation des „korrekten“ Verhaltens automatisierter Fahrzeuge wurden betrachtet. Ansätze zur Identifikation von „unvermeidbaren Kollisionszuständen“ (ICS – inevitable collision states) wurden mit dem komplementären Ansatz, die Existenz einer weiterführenden sicheren Trajektorie (CIS - Control Invariant Set) nachzuweisen, verglichen.

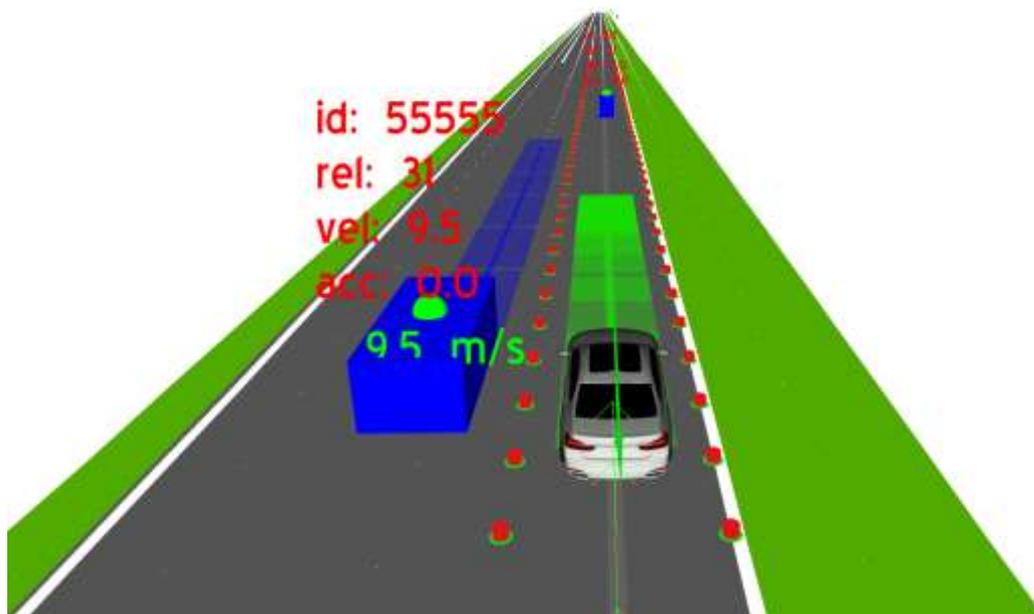
Um die Sicherheit des automatisierten Fahrzeuges zu jedem Zeitpunkt zu gewährleisten, wurde die Bewegungsplanung für ein automatisiertes Fahrzeug um eine Fail-safe Komponente erweitert. Diese berechnet bei jeder Neuplanung der optimalen Trajektorie ein passendes Minimal-Risk-Manöver (MRM) welches im Notfall vom Fahrzeug abgefahren werden kann und dieses dann in einen sicheren Zustand überführt. Das Sicherheitsmodul startet dieses Manöver, sobald keine Lösung für die Anpassung der

Trajektorienplanung gefunden werden kann oder sich das Umfeld drastisch ändert. Um unnötige Fehl- auslösungen (z.B. durch Sensorrauschen) zu vermeiden, zweigt das MRM dabei nicht am aktuellen Zustand des Fahrzeuges sondern an einem späteren Punkt der geplanten Trajektorie ab. Dieser Zeitpunkt wird durch eine mengenbasierte Prädiktion der anderen Verkehrsteilnehmer berechnet. Die Fahrbarkeit des MRM wird durch eine optimierungsbasierte Trajektorienplanung und eine nachgelagerte Optimalsteuerung realisiert.

Als Zielszenario für die Demonstration des Verhaltens in Gefahrenstellen wurde ein Ausweichmanöver auf mehrspurigen Straßen definiert, das durch ein Hindernis, welches die Ego-Spur blockiert, ausgelöst wird.

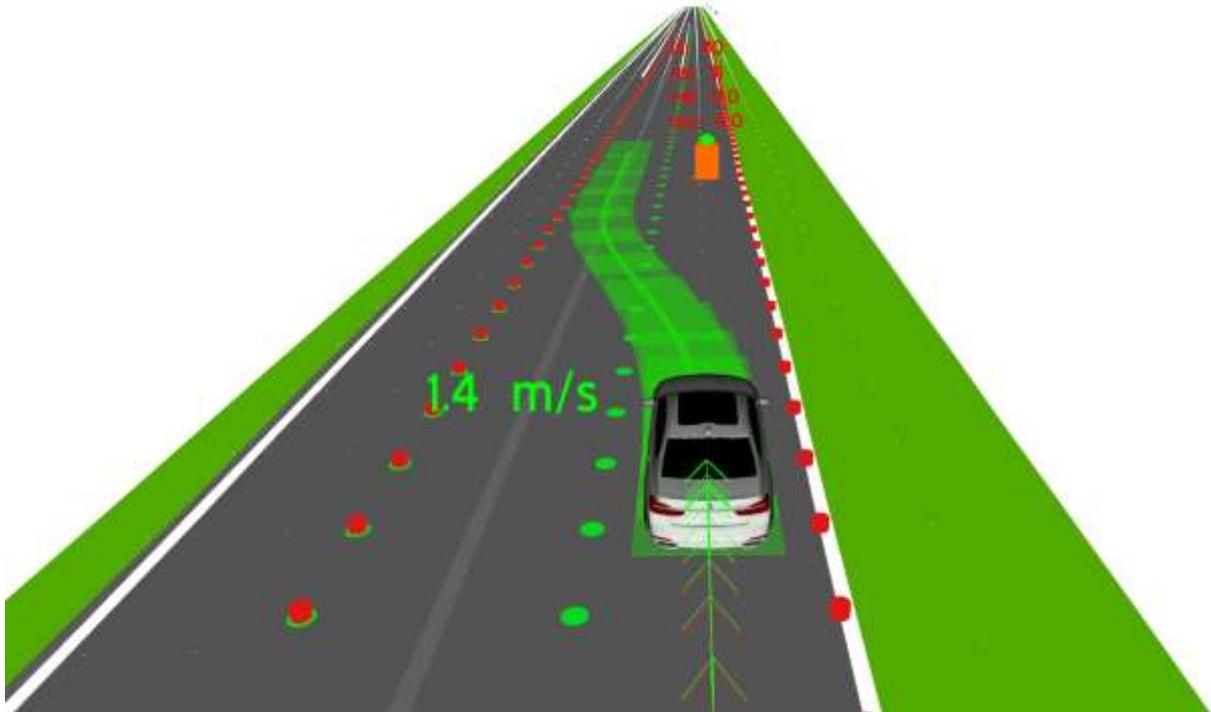
Das implementierte Ausweichmanöver erfolgte bis zu einer Querbewegung von 4-5 m/s<sup>2</sup> und wenn möglich bis zu 200 m vor dem erkannten Hindernis. Das Manöver erfolgte später, wenn die linke Spur nicht frei war oder wenn das Hindernis später erkannt oder empfangen wurde. Das Manöver wurde nur gefahren, wenn der Spurwechsel innerhalb der Querbewegungsgrenzen durchführbar war. Andernfalls wurde eine Ziel- oder Notbremsung durchgeführt.

Des Weiteren wurde ein Nothalt vor einem Hindernis im eigenen Fahrstreifen implementiert dann, wenn der benachbarte Fahrstreifen durch ein Fahrzeug belegt und ein Ausweichen nicht möglich war (siehe Abbildung 74).



**Abbildung 74:** Geplante Trajektorie bei Zielbremsung auf Hindernis

Schließlich wurde ein automatisches Wiederanfahren realisiert dann, wenn der benachbarte Fahrstreifen wieder frei geworden war. Damit kann ein Nothalt bzw. eine Gefahrenbremsung ohne eine damit verbundene Übernahmeaufforderung realisiert werden. Es kann auch in diesem Fall nach Bewältigung der Gefahrensituation automatisiert weitergefahren werden (siehe Abbildung 75).



**Abbildung 75:** Ausweichtrajektorie nach dem Wiederaanfahren bei freigewordener Nachbarspur

Das Zielszenario wurde im Versuchsträger mit einem Hasenfahrzeug auf dem Nachbarfahrstreifen in unterschiedlichen Szenario-Parametrierungen erprobt und die Parametrierung der Funktion an Hand dieser Daten optimiert.

Eine Fahrerübernahme-Anforderung am Ende einer HAF-gereichten Strecke, wie z.B. der Abfahrt des Demonstrations-Streckenabschnitts Dudenhofen, wurde ebenfalls implementiert.

Das Verhalten in Gefahrenstellen konnte sowohl von der Onboard-Sensorik wie von den kommunizierten Daten von AP2 ausgelöst werden. So konnte bei der Abschlusspräsentation auf ein von einem anderen Projektpartner über den Ko-HAF Safety-Server übermitteltes Hindernis ausgewichen werden.

Das Zielszenario „Ausweichen vor einem Hindernis im eigenen Fahrstreifen“ wurde im Versuchsträger auf zahlreichen Testfahrten auf Testgeländen in München und Dudenhofen im closed-loop Betrieb mit zwei Fahrzeugen erprobt. Die Demonstration für die Abschlusspräsentation wurde vorbereitet und erfolgreich durchgeführt.

Für die „Strategische Reaktion auf Serverdaten“ wurde eine frühzeitige strategische Reaktion auf „Spursubtraktionen“ (endende Fahrstreifen, z.B. Fahrstreifensperrung) realisiert, indem die Fahrstrategie auf die vorausschauende Fahrstreifenbewertung (vgl. UAP 4.2) aufsetzte. Hindernisse wie z.B. Liegenbleiber reduzieren während der Annäherung die Zufriedenheit auf dem jeweiligen Fahrstreifen im Vergleich zu Nachbarfahrstreifen. Sie lösen dadurch Fahrstreifenwechsel in geeignete Lücken aus. Fahrstreifenbewertung und zugehörige Fahrstrategie wurden erfolgreich in das ROS-basierte Framework und die Ko-HAF Versuchsträger integriert. Damit konnte der Versuchsträger sich grundsätzlich frühzeitig auf weiterführende Fahrstreifen „einfädeln“ auch dann, wenn in dichterem Verkehr dafür eine aktive Lückensteuerung erforderlich war.

### 3.4.4 UAP4.4 Fahrzeug und Architektur

Es wurden geeignete Sensoren nach aktuellem Stand der Technik bewertet und ein Sensorkonzept erarbeitet. Zwei verschiedene Fahrzeugtypen wurden auf ihre Eignung als Ko-HAF Versuchsträger evaluiert, die notwendigen Schnittstellen zum jeweiligen Bordnetz identifiziert und die Aufwände abgeschätzt. Eine Konfiguration für den für die Abschlusspräsentation entwickelten Ko-HAF Versuchsträger „E“, ein aktuelles, in der ersten Projekthälfte noch nicht als Serienfahrzeug verfügbares 7er Modell, wurde erstellt. Die Sensorik wurde beschafft und evaluiert und das Fahrzeugkonzept erstellt. Ein Sicherheitskonzept für den sicheren Betrieb der Versuchsträger wurde entworfen und umgesetzt. Die Lenkung konnte vom Fahrer immer übersteuert werden. Automatisierungsfunktionen und Aktorik konnten über „Notaus“ abgeschaltet werden.

Als Zwischenlösung für die laufende Entwicklung wurde ein verfügbarer Versuchsträger „Z1“ (3er Gran Turismo) mit aktuellem Softwarestand für automatisiertes Fahren ausgerüstet und mit aktueller Basis-Software in Betrieb genommen. Dieser Zwischen-Versuchsträger wurde für Messwerterfassung und für die entwicklungsbegleitenden Fahrzeugerprobungen in UAP 4.2 und UAP 4.3 erfolgreich eingesetzt.

Ferner wurde ab Ende 2017 ein zu „E“ weitgehend baugleicher, zeitweise für Ko-HAF verfügbarer Prototyp-Versuchsträger „P“ eingesetzt, das Bordnetz angebunden, das Sicherheitskonzept entwickelt und der erreichte Zwischenstand auf der Ko-HAF Zwischenpräsentation demonstriert. Die in UAP 4.3 entwickelten Software zur Trajektorienplanung wurde erfolgreich in die Versuchsträger integriert und Fahrterprobungen durchgeführt.

Der Versuchsträger „E“ wurde kompatibel zu einer neuen internen Versuchsträgerflotte für das automatisierte Fahren und spezifisch für Ko-HAF mit Kommunikationsboxen ausgerüstet. Da auf BMW-internen Vorarbeiten zum Aufbau der Flotte mit aufgesetzt werden konnte, konnte der Umfang des Arbeitspakets gegenüber der Ausgangsplanung reduziert werden.

Der Versuchsträger wurde von einem als Hasenfahrzeug eingesetzten zweiten Versuchsträger für Ko-HAF unterstützt und intensiv für die Funktionserprobung zu UAP 4.1 – UAP4.3 im Fahrbetrieb eingesetzt.



**Abbildung 76:** Testbetrieb in Dudenhofen

Messdaten wurden in „E“ aufgezeichnet. Eine Software zur Konvertierung aufgezeichneter Messdaten in das von den Projektpartnern definierte gemeinsame Format wurde implementiert und erprobt. Die Schnittstellen wurden an Hand der aufgezeichneten Messdaten überprüft und Teilfunktionen diagnostiziert und verifiziert. Zwischen Erprobungen wurden aktualisierte Softwarestände aufgespielt und geprüft.

In enger Zusammenarbeit mit AP3 wurden Konzepte für ein Mensch-Maschine-Interface im Ko-HAF Versuchsträger entwickelt und abgestimmt. Ein Konzept, das die Ausgabe von Übernahmeaufforderungen auf dem Kombi-Instrument und wahlweise auch auf dem Headup-Display ermöglicht, wurde implementiert und erprobt. Ein Übernahmekonzept mit dreistufiger Warnkaskade vor dem Ende einer für HAF freigegebenen Strecke wurde in enger Zusammenarbeit mit AP3 erarbeitet. So kann z.B. vor einer Autobahnabfahrt frühzeitig eine Übernahme ausgelöst werden. Die Parametrierung wurde erprobt und die MMI-Ausgaben angepasst. Der Versuchsträger wurde auf Testfahrten in München und mehrtägigen Testterminen in Dudenhofen erprobt. Technische Funktionen und Abläufe der Abschlusspräsentation wurden gemeinsam mit den Projektpartnern in Dudenhofen evaluiert und optimiert.



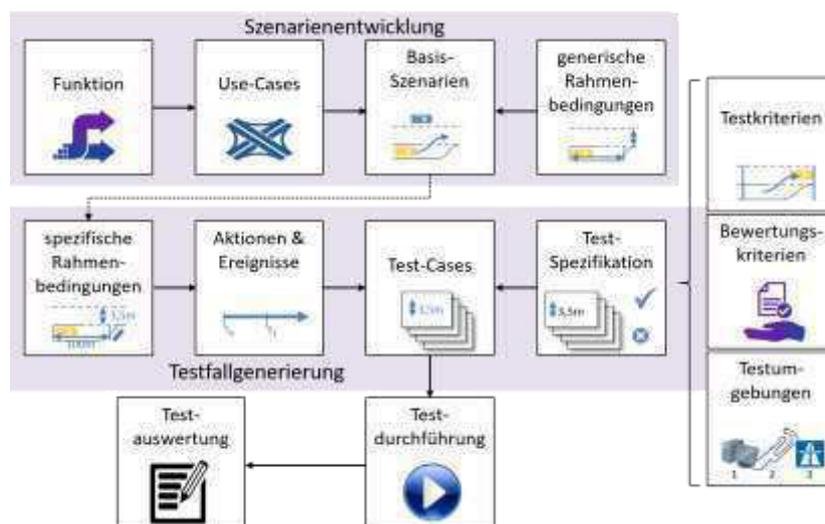
**Abbildung 77:** Automatisierter Spurwechsel mit Visualisierung

Die Funktionalitäten inklusive der Mensch-Maschine-Interaktion und Fahrerübernahme wurden auf der Abschlusspräsentation im September 2018 in Dudenhofen erfolgreich im Versuchsträger an Hand von zwei Ausweichszenarien mit und ohne Bremsung demonstriert. Die aufgebaute Entwicklungskette von der Echtzeit-Fahrsimulation zum Fahrzeug wurde in enger Abstimmung von AP5 (s.u.) dargestellt. Die erarbeiteten theoretischen Grundlagen zur sicheren Trajektorienplanung über die fortlaufende Ermittlung von Rückfalltrajektorien wurden passend zur Fahrzeugdemonstration auf Postern dargestellt.

### 3.5 AP5 Absicherung - Erprobung und Validierung

#### 3.5.1 UAP5.1 Methodik

Das in UAP5.1 partnerübergreifend entwickelte Konzept für den Test und die Erprobung hochautomatisierter Fahrfunktionen beinhaltet sowohl Realversuche auf öffentlichen Straßen sowie Testgeländen als auch die virtuelle Erprobung mittels Simulation (siehe Abbildung 78).



**Abbildung 78:** Testmethodik zur Erprobung des hochautomatisierten Fahrens

Die Methodik integriert dabei die reale und virtuelle Erprobung in einen Gesamtzusammenhang, der eine bedarfsoptimierte Erprobung der Assistenzfunktion sicherstellt. Konkret wurde dafür ein Katalog abzuschließender Fahrscenarien definiert, der die Grundlage für die Arbeiten in den weiteren UAPs in AP5 darstellt. Dieser Szenarien-katalog orientiert sich stark an den Funktionalitäten, welche im Rahmen von AP4 umgesetzt wurden. BMW konzentrierte sich hierbei auf die strategische Reaktion auf Gefahrenstellen und das Durchfahren von Autobahnkreuzen. Der entsprechende Ausschnitt aus dem Szenarien-katalog ist in Abbildung 79 dargestellt.

Abbildung 79: Ausschnitt aus dem Szenarien-katalog

Aus den Szenarien wurden in UAP5.2 durch Festlegung konkreter Rahmenbedingungen konkrete Testfälle spezifiziert, die dann den jeweiligen Testumgebungen (virtuelle Erprobung, Testgelände, Realversuch auf öffentlichen Straßen) zugeordnet und darin umgesetzt wurden. Konkret wurden dabei von BMW sicherheitskritische Fahrversuche im Bereich der Reaktion auf Gefahrenstellen durch Erprobungen auf Testgeländen und die virtuelle Erprobung bzw. Mischformen abgedeckt, um die Risiken und Kosten während der Entwicklungsphase und der Erprobung zu minimieren.

Seitens BMW wurde vorgeschlagen, als Spezifikationsformat der Test-Cases das OpenSCENARIO-Format zu verwenden, um so eine über alle Partner und Plattformen hinweg unabhängige Beschreibung anzustreben und auch zu Aktivitäten aus parallelen Projekten wie PEGASUS kompatibel zu sein. OpenScenario wurde seitens BMW zur Beschreibung der im Rahmen von AP5 definierten Szenarien eingesetzt und am Beispiel des Testfalls 1.3.B „Auffahrt in größer werdende Lücke“ aus dem Testkatalog des UAP5.2 zusammen mit dem Partner TU Braunschweig getestet. Basierend auf den Ergebnissen dieser Tests kann geschlussfolgert werden, dass die Beschreibung der in AP5 definierten Testszenarien automatisiert erstellt und zur virtuellen Erprobung eingesetzt werden kann. Aufgrund der verspäteten Einführung von OpenScenario konnte dieses Format leider nicht wie ursprünglich geplant im Rahmen von Ko-HAF zum Austausch der Simulationstestfälle unter den Projektpartner verwendet werden.

Des Weiteren wurde der Ansatz festgelegt, dass die Variation der zunächst statischen Rahmenbedingungen der Basisszenarien im Bereich der tatsächlich im kartierten Testfeld um Frankfurt herum auftretenden Ausprägungen vorgenommen wird. Hierfür wurden im Rahmen des UAP5.2 Häufigkeitsanalysen dieser Ausprägungen vorgenommen. Bei dynamischen Rahmenbedingungen sind neben den tatsächlich auftretenden Rahmenbedingungen Restriktionen wie rechtliche Einschränkungen oder Sicherheitskriterien zu berücksichtigen. Die BMW AG bezog diese Variationen in den Aufbau der Umgebung zur virtuellen Erprobung und Wirksamkeitsanalyse ein.

### 3.5.2 UAP5.2 Testprozedur

Um die generischen Szenarien aus dem in UAP5.1 erstellten Szenarien-katalog für die konkrete Erprobung zu detaillieren, hat sich BMW an der Parameterauslegung (beispielsweise für die Bestimmung der Baustellentypen und –längenverteilungen, etc.) beteiligt und den Projektpartnern entsprechende Informationen zur Verfügung gestellt. Ergebnis ist ein Testkatalog mit Testfällen, die in den jeweiligen Test-

umgebungen konkret umgesetzt und erprobt werden konnten. Abbildung 80 zeigt einen Ausschnitt des Testkatalogs für das Szenario „Gefahrenstellen“.

| TF-ID    | Typ       | Rahmenbedingung       | Beschreibung  | Wert                       | Einheit                     |
|----------|-----------|-----------------------|---|----------------------------|-----------------------------|
| TK_5.2.1 | 5.2       | Testfall              |  | Zieht auf Liegenbleiber    |                             |
| TK_5.2.1 | 5.2.1     | Szenario Element      | Durchgehender Fahrstreifen  |                            |                             |
| TK_5.2.1 | 5.2.1.1   | Stat. Rahmenbedingung | Durchgehender Fahrstreifen  | Anzahl der Fahrstreifen    | 2                           |
| TK_5.2.1 | 5.2.1.2   | Stat. Rahmenbedingung | Durchgehender Fahrstreifen  | Fahrstreifenbreite         | 3,5 m                       |
| TK_5.2.1 | 5.2.2     | Szenario Element      | Verkehrsregelung  |                            |                             |
| TK_5.2.1 | 5.2.2.1   | Stat. Rahmenbedingung | Verkehrsregelung  | Geschwindigkeitsbegrenzung | nein                        |
| TK_5.2.1 | 5.2.2.2   | Stat. Rahmenbedingung | Verkehrsregelung  | Überholverbot              | nein                        |
| TK_5.2.1 | 5.2.2.3   | Stat. Rahmenbedingung | Verkehrsregelung  | Saurfreigabe               | nein                        |
| TK_5.2.1 | 5.2.3     | Dynamisches Element   | Gefahrenstelle  |                            |                             |
| TK_5.2.1 | 5.2.3.1   | Dyn. Rahmenbedingung  | Gefahrenstelle  | Saur                       | 1                           |
| TK_5.2.1 | 5.2.3.2   | Dyn. Rahmenbedingung  | Gefahrenstelle  | Abstand zu Ego             | 100 m                       |
| TK_5.2.1 | 5.2.3.3   | Dyn. Rahmenbedingung  | Gefahrenstelle  | Art der Gefahrenstelle     | Liegenbleiber               |
| TK_5.2.1 | 5.2.4     | Dynamisches Element   | Verkehr   |                            |                             |
| TK_5.2.1 | 5.2.4.1   | Dyn. Rahmenbedingung  | Verkehr   | Anzahl Targets             | 1                           |
| TK_5.2.1 | 5.2.4.2   | Sequenz               | Verkehr   |                            |                             |
| TK_5.2.1 | 5.2.4.2.1 | Teilschritt           | Verkehr   | Egofahrzeug: Initialwert   | Startspur                   |
| TK_5.2.1 | 5.2.4.2.2 | Teilschritt           | Verkehr   | Egofahrzeug: Initialwert   | Startpunkt                  |
| TK_5.2.1 | 5.2.4.2.3 | Teilschritt           | Verkehr   | Egofahrzeug: Initialwert   | Funktion                    |
| TK_5.2.1 | 5.2.4.2.4 | Teilschritt           | Verkehr   | Egofahrzeug: Initialwert   | Geschwindigkeit             |
| TK_5.2.1 | 5.2.4.2.5 | Teilschritt           | Verkehr   | Egofahrzeug: Zielwert      | Startpunkt: Spurwechsel     |
| TK_5.2.1 | 5.2.4.2.6 | Teilschritt           | Verkehr   | Egofahrzeug: Initialwert   | Endpunkt                    |
| TK_5.2.1 | 5.2.4.3   | Sequenz               | Verkehr   | Target 1                   |                             |
| TK_5.2.1 | 5.2.4.3.1 | Teilschritt           | Verkehr   | Target 1: Initialwert      | Startspur                   |
| TK_5.2.1 | 5.2.4.3.2 | Teilschritt           | Verkehr   | Target 1: Initialwert      | Beschleunigung              |
| TK_5.2.1 | 5.2.4.3.3 | Teilschritt           | Verkehr   | Target 1: Initialwert      | Geschwindigkeit             |
| TK_5.2.1 | 5.2.4.3.4 | Teilschritt           | Verkehr   | Target 1: Zustand          | Startpunkt: Spurwechsel Ego |

Abbildung 80: Ausschnitt aus dem Testkatalog

Die Implementierungsaufgaben zur virtuellen Erprobung und Wirksamkeitsanalyse im Rahmen der Testprozedur umfassten neben der Anbindung der BMW-spezifischen Fahrerassistenzfunktion an die Simulation die Implementierung einer Toolkette zur Resimulation von real gefahrenen Trajektorien, die Anbindung virtueller Sensormodelle an Simulation und Funktion, die Implementierung einer Toolkette zur Bedatung und Validierung der virtuellen Sensormodelle, sowie die Anbindung einer Verkehrssimulation und von Fahrermodellen für die Wirksamkeitsanalyse. Die detaillierte Modellierung der Fahrzeugumgebung, wie sie für die Erprobung virtueller Sensormodelle erforderlich ist, wurde mit der Unterstützung eines externen Gewerks durchgeführt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und Konsistenz werden diese Arbeitsergebnisse in UAP5.3 detaillierter beschrieben.

### 3.5.3 UAP5.3 Virtuelle Erprobung

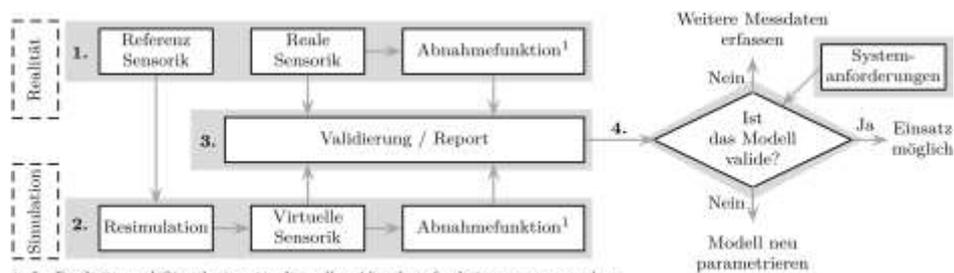
Die BMW AG hat im Rahmen von Ko-HAF die Leitung des UAP5.3 übernommen. Der inhaltliche Fokus der BMW AG lag hierbei auf der Sensorsimulation bzw. Sensormodellvalidierung, der Closed-Loop Erprobung der AP4 Funktionen in der Simulation und der Wirksamkeitsanalyse. Im Folgenden werden zunächst die Inhalte der Sensormodellvalidierung und Closed-Loop Simulation und anschließend die Resultate der Wirksamkeitsanalyse vorgestellt.

Als Grundlage für die Durchführung der virtuellen Erprobung automatisierter Fahrfunktionen wurde seitens BMW ein Mockup aufgebaut (siehe Abbildung 81). Dieses wurde unter anderem zur Vorstellung der Ergebnisse in der Zwischen- und Abschlusspräsentation verwendet.



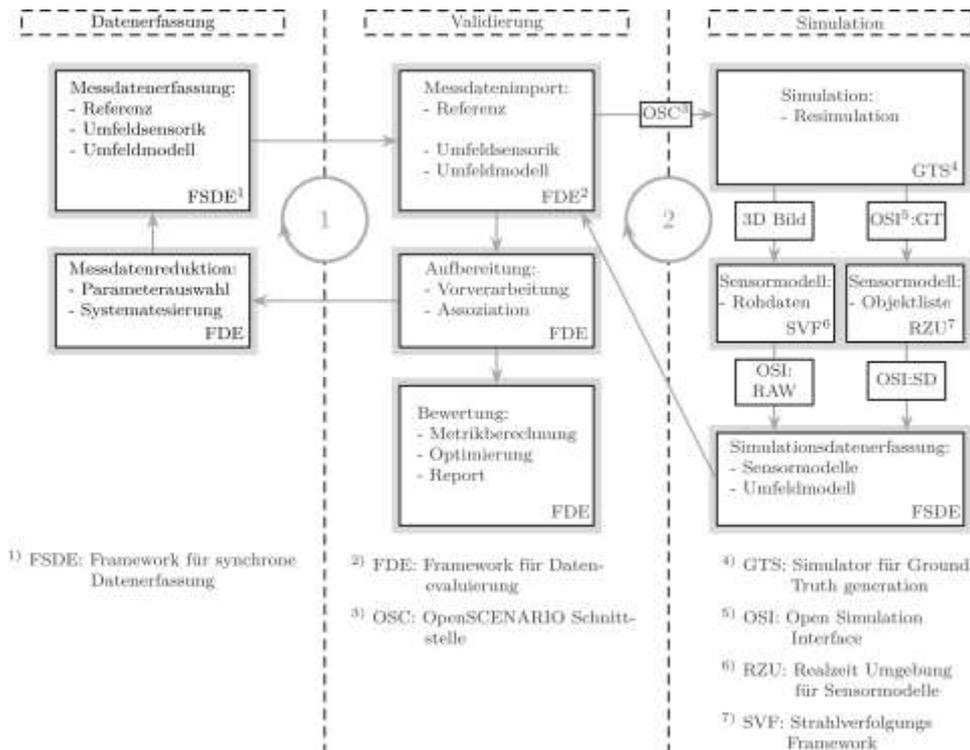
**Abbildung 81:** Mockup als Grundlage der virtuellen Erprobung

Auf dieser Basis wurde eine Methodik für die Validierung virtueller Sensormodelle entwickelt (siehe Abbildung 82). Die Methodik basiert auf dem Vergleich realer und virtueller Messdaten. Dazu werden die Referenzdaten und Messungen des zu evaluierenden Sensors sowie der Ausgang der Abnahmefunktion (z.B. Fusion) aufgezeichnet. Mit Hilfe dieser Daten wird das reale Szenario basierend auf den Referenzdaten resimuliert und die synthetischen Sensor- und Abnahmefunktionsdaten generiert. Die erfassten Wertepaare der realen und synthetischen Sensordaten sowie die Ergebnisse der Abnahmefunktion basierend auf realen und synthetischen Sensordaten werden im Validierungsschritt bewertet. Daraus kann die Entscheidung getroffen werden, ob das zugrundeliegende Modell valide ist.



**Abbildung 82:** Visualisierung der Methode zur Validierung umfelderfassender Sensormodelle

Zur Realisierung der beschriebenen Methode wurde die Toolkette aus Abbildung 83 aufgebaut. Diese beginnt mit der Erfassung realer Daten mittels eines Frameworks zur synchronen Datenerfassung (hier Robot Operating System, kurz: ROS) in einem Versuchsfahrzeug. Die Daten werden in ein Evaluierungsframework importiert (hier Matlab) und die relevanten Modellierungsparameter der Sensormodelle in der ersten Iterationsschleife definiert. Bei Bedarf können die Erfassungs- und Importvorgänge unter Berücksichtigung der relevanten Parameter wiederholt werden. In der zweiten Iterationsschleife werden die Referenzdaten dem Simulator zur Verfügung gestellt und basierend darauf die simulierten Objektlisten- und Rohdaten von den Sensormodellen generiert. Die so erzeugten synthetischen Daten werden ebenfalls ins Evaluierungsframework importiert und dort mit den experimentellen Daten verglichen, um eine Aussage über die Validität des jeweiligen Sensormodells und dessen Parametrierung treffen zu können. Sollte die gewünschte Performance noch nicht erreicht sein, werden die genannten Iterationsschleifen erneut angestoßen.



**Abbildung 83:** Schematische Darstellung notwendiger Komponenten zur Validierung umfelderfassender Sensormodelle

Um partnerübergreifende Inhalte mit dem Architekturvorschlag testen zu können, wurden als Schnittstellen zwischen den unterschiedlichen Komponenten etablierte Standards verwendet. Als digitale Karte wurde die in AP2 entstandene XODR Karte in die Toolkette integriert, um virtuelle Fahrten auf dem im Rahmen von Ko-HAF definierten Testfeld zu ermöglichen. Um kurzfristige Tests durchführen zu können wurde zusätzlich ein Areal im Münchener Raum in XODR vermessen. Zur Szenariodefinition wurde das Format OpenSCENARIO, zum Transfer von Sensordaten das Open Simulation Interface (OSI) eingesetzt. Aufgrund der Tatsache, dass die Sensormodelle auf unterschiedlichen Ebenen (Objektlisten und Rohdaten) modelliert werden können, sind unterschiedliche Referenzdaten notwendig. Als Technologie für die Referenz von Objektlisten wurde in Ko-HAF das weitverbreitete Differential Global Positioning System (DGPS) eingesetzt. Als Referenz für die Rohdatenmodelle, die auf Raytracing Verfahren basieren, wurde ein hochgenaues 3D Modell im OSGB Format erstellt (siehe Abbildung 84).



**Abbildung 84:** Ausschnitt der hochgenau nachmodellierten Umgebung für die Validierung umfelderfassender Rohdatenmodelle und Vergleich einer realen und virtuellen Fahrt

Wie bereits erwähnt, basiert die Evaluierung der Sensormodellierung auf zwei aufeinanderfolgenden Evaluierungsschleifen (siehe Abbildung 83). In der ersten Schleife soll die Frage beantwortet werden, wie die Anzahl der zu erfassenden Messdaten minimal gehalten werden kann, ohne dabei die Modellgüte maßgeblich negativ zu beeinflussen. Dieser Aspekt ist von hoher Bedeutung, denn die Datenerfassung zur Modellbedatung ist i.d.R. sehr zeit- und kostenaufwendig. Dazu wurde im Rahmen von Ko-HAF ein Ansatz zur Reduktion von Einflussparametern vorgeschlagen, denn mit jeder Dimension des

Modellierungsraumes steigt die Anzahl der notwendigen Messdaten exponentiell an. Es wurde ein hybrider Feature Selection Ansatz vorgeschlagen, bei dem aus allen aufgezeichneten und für die Modellierung potentiell in Frage kommenden Eingangsparameter wie z.B. Abstand, Geschwindigkeit oder Ausrichtung der zu erfassenden Objekte, die relevanten Eingangsparameter ausgewählt werden. Bei diesem Ansatz werden mit sog. Filtern die Eingangsparameter vorgefiltert und anschließend durch Tests mit einer prototypischen Version des Sensormodells selbst die Parameterauswahl weiter eingeschränkt. Bei einem Filter wird die Korrelation zwischen einer Gruppe von Eingangsparametern und der Modellierungsgröße gemessen und so die Parameter ohne relevanten Einfluss auf die Modellierungsgröße herausgefiltert. Die Ergebnisse für die Modellierung der lateralen Positionsmessung eines Lidars sind beispielhaft in Tabelle 5 zusammengefasst.

**Tabelle 5:** Ergebnisse der Parameterauswahl für die laterale Positionsbestimmung eines Lidars

|        | Ansatz                           | Parameter                                    | MQF          |
|--------|----------------------------------|--|--------------|
| Filter | Pearson Korrelation (PK)         | $x, v_y, v_x^{rel}, \gamma, \rho$            | 1,4841       |
|        | Gemeinsame Information (GI)      | $v_x, v_y, v_x^{rel}, \gamma, \rho$          | 1,53         |
|        | PK $\cup$ GI                     | $x, v_x, v_y, v_x^{rel}, \gamma, \rho$       | 1,4196       |
|        | Modelltest (Gaußsche Regression) | $x, y, v_x, v_x^{rel}, \gamma, \theta, \rho$ | 1,22         |
|        | Kombination Filter & Modelltest  | $v_x, v_x^{rel}, \gamma, \rho$               | <b>0,881</b> |

Als erstes werden bei den Filtern kombinatorisch unterschiedliche Parametersubsets untersucht und daraus das beste Set bezogen auf die damit erreichte Modellgüte bestimmt. Diese Subsets werden als Eingangsgrößen des prototypischen Sensormodells verwendet und die Modellgüte dabei mit Hilfe des mittleren quadratischen Fehlers (MQF) gemessen. Die Ergebnisse der Auswahl sind in der Spalte „Parameter“ zusammengefasst. Als Filter wurden die Pearson Korrelation (PK) und die gemeinsame Information (GI) sowie deren vereinte Menge untersucht. Zusätzlich wurde das prototypische Sensormodell (Gaußsches Regressionsmodell) ohne Vorfilterung für die Parameterauswahl verwendet. Hierbei wird aufgrund der Tatsache, dass aufgrund der Rechenzeit nicht alle Parametersubsets getestet werden können, nicht das globale Optimum gefunden. Bei der Kombination aus Filter und Optimierung der Eingangsparameter durch Modelltests wird als erstes mit Hilfe von PK und GI das ursprüngliche Set von aufgezeichneten Parametern vorgefiltert und anschließend mit Tests mit dem prototypischen Sensormodell weiter verfeinert. Vorteilhaft dabei ist, dass das Parametersubset meist kleiner ausfällt als bei allen anderen Alternativen mit vergleichsweise kleinem MQF.

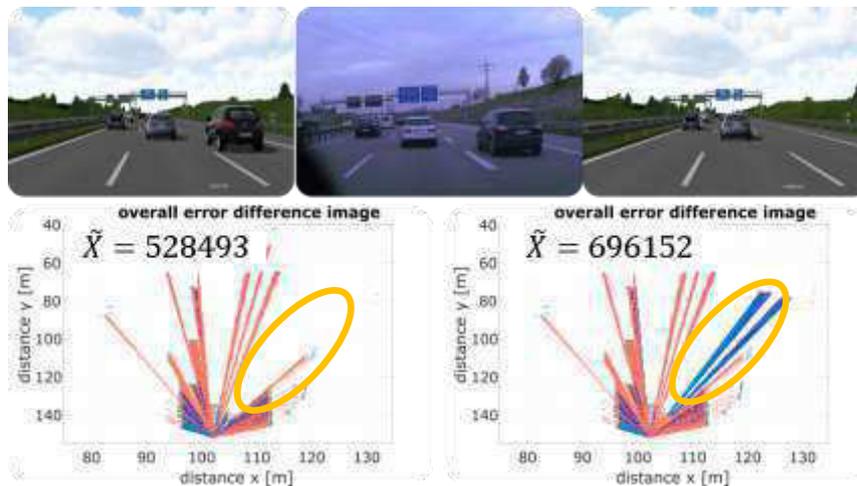
In der zweiten Evaluierungsschleife der Toolkette aus Abbildung 83 werden sowohl die Sichtbereiche verschiedener Sensoren als auch die Evaluierung einzelner Fahrtrajektorien vorgenommen. Wie zuvor bereits angemerkt, werden unterschiedliche Modellierungsebenen evaluiert (Objektlisten und Rohdaten). Im Folgenden werden beispielhaft nur die Ergebnisse für die Validierung eines Lidar Rohdatenmodells vorgestellt. Konzeptuell ähnelt die Validierung auf der Objektlistenebene des hier vorgestellten Vorgehens und wird detailliert in der Dissertation „*Systematische Bedatung und Bewertung umfelderfassender Sensormodelle*“ von A. Schaermann erläutert. Zum Zeitpunkt der Erfassung dieses Berichtes wird die Arbeit finalisiert und voraussichtlich im Jahr 2019 veröffentlicht.

Für die Bewertung von Sensormodellen werden reale und simulierte Fahrten verglichen. Eine Visualisierung einer exemplarischen Fahrt ist in Abbildung 85 zu sehen. Links oben sind eine Momentaufnahme aus einer realen Fahrt und darunter die Visualisierung der Messdaten des Lidar Sensors und einer daraus berechneten Belegungskarte abgebildet. Auf der rechten Seite ist die korrespondierende simulierte Fahrt auf Basis der hochgenau modellierten Umgebung und eines Raytracing Lidarmodells gezeigt.



**Abbildung 85:** Visualisierung einer realen und virtuell nachgestellten Fahrt mit entsprechenden Sensor- und Fusionsergebnissen

Realität und Simulation werden miteinander anhand von Metriken verglichen. Eine Metrik ist dabei ein mathematischer Operator, der ein formales Maß für Diskrepanz zwischen Experiment- und Modellergebnissen angibt. Beispielhaft wird im Folgenden erklärt, wie ein Sensorfehler mit Hilfe einer Metrik erkannt werden kann. In der oberen Hälfte der Abbildung 86 wird eine solche Situation dargestellt. In der Mitte ist die reale Fahrt abgebildet, links Simulation ohne Sensorfehler und rechts mit Sensorfehler. In diesem Fall wurde eines der Fahrzeuge entfernt und kann damit vom Sensor nicht detektiert werden. In der unteren Hälfte ist zu sehen, wie dieser Fehler mit Hilfe der Metrik des „Overall Error“ (siehe „Evaluation of RoboCup Maps“ von B. Balaguer) detektiert und quantifiziert werden kann. Links unten ist der Vergleich zwischen Realität und Simulation ohne Sensorfehler und unten rechts mit Sensorfehler in Differenzbildern visualisiert. Anhand des Metrikergebnisses  $\tilde{X}$  und der Differenzbilder ist zu erkennen, dass die Abweichung für den Fall ohne Sensorfehler deutlich kleiner ist als mit Fehler. Auf Basis dieser Metriken können verschiedene Modellausprägungen gegeneinander verglichen bzw. einzelne Modelle gegen bestimmte Anforderungen validiert werden.



**Abbildung 86:** Ergebnisse der Validierung umfelderfassender Sensormodelle am Beispiel von Lidar-punktwolken

Schließlich wurde die im Versuchsträger laufende Fahrfunktion aus AP4 inkl. des Umfeldmodells an die Simulation angebunden, um die Realerprobungen auf dem Testgelände in Dudenhofen und dem Testfeld um Frankfurt durch sog. Closed-Loop Simulationen vorzubereiten und abzusichern. Insbesondere die Reaktion auf Gefahrenstellen wurde in einer Vielzahl von Simulationsdurchläufen erprobt und optimiert, um die effiziente Variation von Szenarienparametern in der Simulation auszunutzen und das Risiko der realen Erprobung auf ein Minimum zu reduzieren. In Abbildung 87 sind beispielhafte Aus-

schnitte aus der realen und virtuellen Erprobung der Reaktion auf Gefahrenstellen dargestellt. Die Ergebnisse wurden zusammen mit dem Mock-up aus Abbildung 81 u.a. an der Ko-HAF Abschlusspräsentation in Dudenhofen vorgestellt.



**Abbildung 87:** Reale (links) und virtuelle Erprobung (rechts) eines beispielhaften Szenarios

Neben den Arbeiten an den Sensormodellen sowie deren Validierung hat BMW im Laufe des Projektes eine Wirksamkeitsanalyse einer kooperativen automatisierten Fahrfunktion im Rahmen der Arbeit in UAP 5.3 durchgeführt. Ziel der Wirksamkeitsanalyse ist die Untersuchung der Auswirkung einer Technologie – in diesem Fall des kooperativen automatisierten Fahrens – auf die Verkehrssicherheit.

Der in Ko-HAF gewählte Ansatz zur Wirksamkeitsanalyse einer kooperativen automatisierten Fahrfunktion nutzt das Verfahren der stochastischen Verkehrsszenarien. Hierbei werden Verkehrsszenarien simuliert, innerhalb derer bestimmte definierte Ereignisse auftreten. Diese Simulationen werden unter Variation der Anfangsbedingungen und der Parameter des Fahrerverhaltensmodells tausendfach durchgeführt. Die Simulationen werden sowohl ohne die zu untersuchende Funktion (im Folgenden als Baseline bezeichnet) als auch mit dieser (im Folgenden als Treatment bezeichnet) durchgeführt. Innerhalb der Treatment-Simulationen ist ferner die Penetrationsrate der kooperativen hochautomatisierten Fahrfunktion (HAF) variiert worden.

Die Wirkung einer kooperativen automatisierten Fahrfunktion hinsichtlich der Verkehrssicherheit ist in fünf Verkehrsszenarien untersucht worden (siehe Abbildung 88). Die betrachteten Verkehrsszenarien sind dabei dem in UAP5.1 definierten Szenarienkatalog entnommen: Nothaltemanöver, Objekt im Fahrstreifen, Stauende, Auffahrt und Fahrstreifenende.



**Abbildung 88:** Im Rahmen der Wirksamkeit untersuchte Verkehrsszenarien

Eine Übersicht über die variierten Parameter wird in Tabelle 6 gegeben.

**Tabelle 6:** Übersicht innerhalb für die Wirksamkeitsanalyse durchgeführten Simulation variierten Parameter

| Verkehrsszenario                    | Kategorie 1 „Parameter, die zwischen einzelnen Simulationssets variiert werden.“ | Kategorie 2 „Parameter, die innerhalb eines Simulationsset variiert werden“ |
|-------------------------------------|--|---|
| Art der Variation                   | Parameter werden vor der Simulation festgelegt                                   | Parameter werden stochastisch variiert                                      |
| 1. Auffahrt und 2. Fahrstreifenende | Verkehrsstärke, Geschwindigkeitslimit und Penetrationsrate kooperatives HAF      | Länge bis Ende Auffahrt / Fahrstreifen                                      |

|                           |  |   |
|---------------------------|--|---|
| 3. Objekt im Fahrstreifen | Verkehrsstärke, Geschwindigkeitslimit und Penetrationsrate kooperatives HAF                                | Fahrerparameter, Startposition & -geschwindigkeit, Fahrzeugtyp, Position des Objektes |
| 4. Stauende               | Verkehrsstärke, Geschwindigkeitslimit und Penetrationsrate kooperatives HAF, Geschwindigkeit des Stauendes | Fahrerparameter, Startposition & -geschwindigkeit, Fahrzeugtyp                        |
| 5. Nothaltemanöver        | Verkehrsstärke, Geschwindigkeitslimit und Penetrationsrate kooperatives HAF, Art des Nothaltemanövers      | Fahrerparameter, Startposition & -geschwindigkeit, Fahrzeugtyp                        |

Jedes der genannten Verkehrsszenarien ist in der Simulationsumgebung (openPASS) implementiert worden (siehe Abbildung 89 und Abbildung 90). Über die Projektlaufzeit hinweg ist die Implementierung der Szenarien verfeinert und optimiert worden, um sicher zu stellen, dass die Anforderungen der Wirksamkeitsanalyse und von Ko-HAF erfüllt werden.



**Abbildung 89:** Exemplarische Darstellung des Auffahrt- (links) und Fahrstreifenende-Szenarios (rechts) für die Simulation in der Wirksamkeitsanalyse



**Abbildung 90:** Exemplarische Darstellung des „Auffahren auf Stauende“- (links) und des „Objekt im Fahrstreifen“-Szenarios (rechts) für die Simulation in der Wirksamkeitsanalyse

Weiterhin ist eine kooperative automatisierte Fahrfunktion für die Wirksamkeitsanalyse in der Simulation implementiert worden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Funktion entsprechend dem Zweck der Wirksamkeitsanalyse eine vereinfachte Version einer realen kooperativen automatisierten Fahrfunktion ist. Die Vereinfachungen betreffen vor allem die Darstellung der Sensorik. Das für die Wirksamkeitsanalyse maßgebende Verhalten der Funktion im Verkehr entspricht dagegen dem einer realen automatisierten Fahrfunktion. Die Vereinfachungen werden nötig, da in der angestrebten Wirksamkeitsanalyse eine Vielzahl von Situationen (mehrere Tausend Simulationen) durchgeführt werden soll. Dies verlangt wiederum nach einer beschleunigten Simulation, die deutlich schneller als Echtzeit läuft.

Neben der Fahrfunktionen ist das verwendete Fahrerhaltensmodell im Projekt weiterentwickelt worden. Die Weiterentwicklungen zielen in erster Linie auf die Durchführbarkeit der Simulation in den einzelnen Verkehrsszenarien ab und betreffen zum einen die Parametrierung des Fahrerhaltensmodells und zum anderen das Thema Übernahme durch den Fahrer nach der automatisierten Fahrt. Hierbei wird dem Fahrer des Fahrzeuges, für das das Übernahmemanöver simuliert wird, eine Reaktionszeit auf Grundlage einer statistischen Verteilung zugewiesen. Die Verteilung der Reaktionszeit ist auf Basis von Studien bestimmt worden und wird durch eine Gammafunktion ( $p = 1.5$ ,  $b = 2$ ) beschrieben. Erst

nach Ablauf der Reaktionszeit übernimmt der virtuelle Fahrer wieder die Kontrolle über das Fahrzeug. In der Zwischenzeit wird das Fahrzeug in der Fahrspur abgebremst. Es sind dabei bewusst keine Fahrstreifenwechsel betrachtet worden, um die kritischere Form eines Nothaltemanövers zu untersuchen.

Insgesamt sind nahezu 44.000 Simulationsdurchläufe simuliert und ausgewertet worden. Die in diesen Simulationsdurchläufen von allen Fahrzeugen zurückgelegte Strecke beträgt ca. 4.03 Millionen km. Nachfolgend werden die Ergebnisse je Verkehrsszenario kurz zusammengefasst.

### Auffahrt

Insgesamt sind für dieses Verkehrsszenario 5.400 Simulationsruns durchgeführt worden. Die Ergebnisse (siehe Abbildung 91) zeigen, dass die Anzahl der erfolgreichen Fahrstreifenwechsel zum Auffahren auf die Autobahn mit zunehmender Penetrationsrate steigt. Gegenüber dem Szenario mit 30% Ausstattungsrate der PKW steigert sich die Anzahl erfolgreicher Fahrstreifenwechsel im Szenario mit 100% um 2.3%. Die Kollisionsrate dagegen fällt mit zunehmender Penetrationsrate. Im Szenario mit 30% Ausstattungsrate reduziert sich die Kollisionshäufigkeit um 22.5% gegenüber der Baseline. Im Szenario mit 100% Ausstattungsrate beträgt die relative Änderung 62.4%.

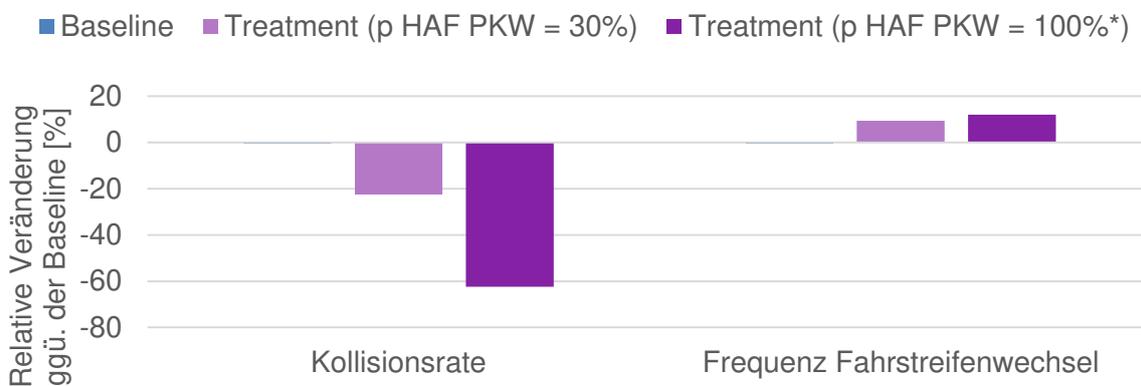


Abbildung 91: Ergebnisse des Verkehrsszenarios „Auffahrt“

### Fahrstreifenende

Für das Verkehrsszenario „Fahrstreifenende“ sind insgesamt 9.000 Simulationsdurchläufe simuliert worden. Die Ergebnisse der Simulationen mit verschiedenen Penetrationsraten sind in Abbildung 92 dargestellt. Hinsichtlich der Verkehrssicherheit zeigen die Simulationen für dieses simulierte kooperative HAF keine klare Tendenz über der Penetrationsrate. Gleiches gilt auch für die Frequenz der Fahrstreifenwechsel. Dagegen lässt sich bei der Durchschnittsgeschwindigkeit ein Anstieg über der Penetrationsrate feststellen. Gegenüber der Baseline steigert sich die Durchschnittsgeschwindigkeit um 6%.

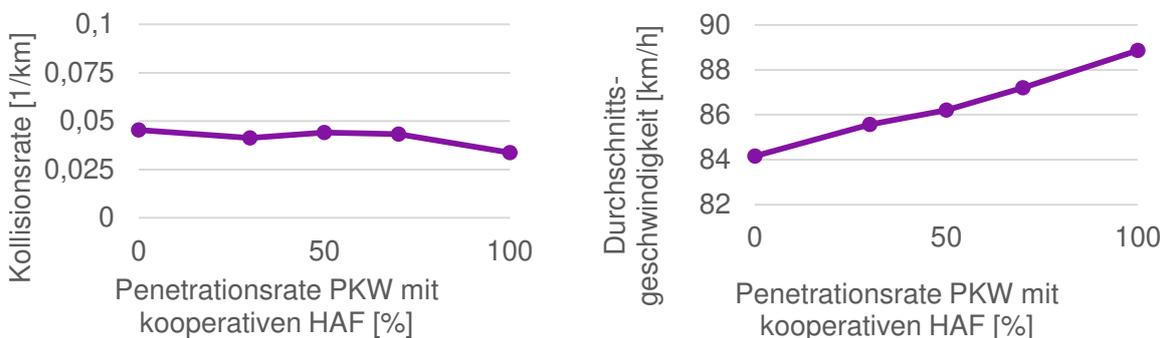
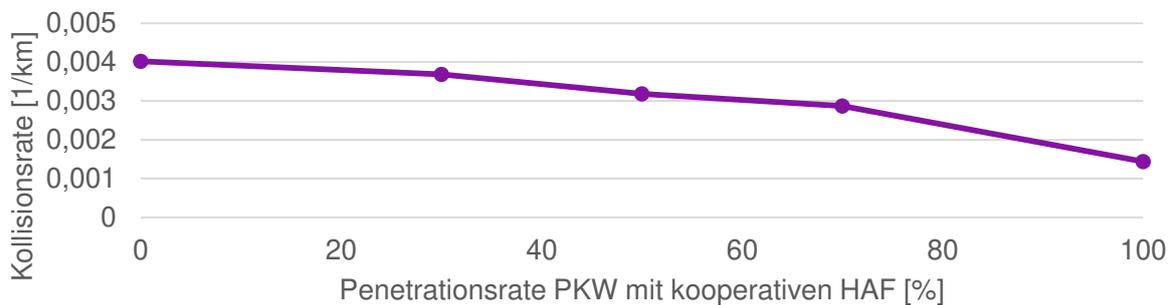


Abbildung 92: Ergebnisse des Verkehrsszenarios „Fahrstreifenende“

### Objekt im Fahrstreifen

Für das Verkehrsszenario „Objekt im Fahrstreifen“ sind 8.452 Simulationsdurchläufe mit einer gesamten Fahrstrecke von 889.000 FZG km simuliert worden. Hinsichtlich der Verkehrssicherheit kann eine

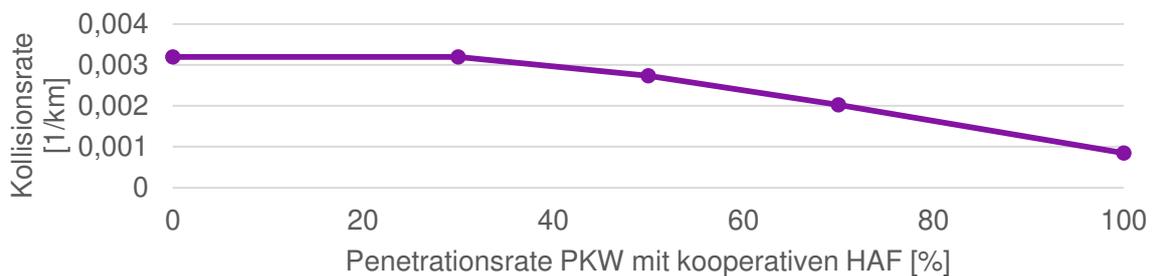
Reduktion der Kollisionsrate bei einer steigenden Penetrationsrate der untersuchten Funktion festgestellt werden (siehe Abbildung 93). So wird beim Szenario mit 100% Penetrationsrate die Kollisionshäufigkeit um 64.4% gegenüber der Baseline reduziert.



**Abbildung 93:** Ergebnisse des Verkehrsszenarios „Objekt im Fahrstreifen“

### Stauende

Im Szenario „Stauende“ sind 1.4 Millionen Fahrzeugkilometer in 14.407 Simulationsdurchläufen simuliert worden. Mit steigender Penetrationsrate sinkt analog zum vorherigen Szenario die Kollisionsrate (siehe Abbildung 94). Allerdings stellt sich eine erkennbare Reduktion der Kollisionsrate erst mit einer Penetrationsrate von 50% ein. Beim Szenario mit einer 100% Ausstattungsrate beträgt die Reduktion der Kollisionsrate gegenüber der Baseline 73.5%.

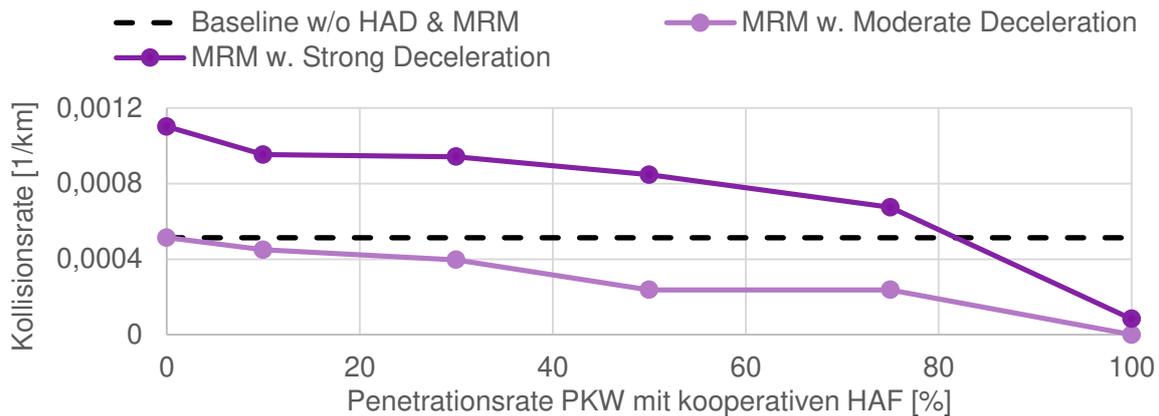


**Abbildung 94:** Ergebnisse des Verkehrsszenarios „Stauende“

### Nothaltemanöver

Bei Verkehrsszenario „Nothaltemanöver“ sind insgesamt 6.502 Simulationsdurchläufe simuliert und analysiert worden. In den 6.502 Simulationsdurchläufen ist insgesamt eine Fahrstrecke 1.005.957 FZG km zurückgelegt worden. Weiterhin sind für dieses Fahrzenario zwei verschiedene Arten von Nothaltemanöver simuliert worden (moderate und starke Verzögerung). Die beiden Nothaltemanöver unterscheiden sich in der Verzögerung mit dem das Fahrzeug bei nicht erfolgreicher Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer konstant verzögert wird.

Für beide Nothaltemanöver kann eine Reduktion der Kollisionsrate bei steigender Penetrationsrate festgestellt werden (siehe Abbildung 95). Das Nothaltemanöver mit der niedrigen Verzögerung stellt in Bezug auf die Verkehrssicherheit die bessere Option dar, da die Kollisionsrate nie höher als die Kollisionsrate im Baseline-Szenario liegt. Beim Nothaltemanöver mit der stärkeren Verzögerung wird die Referenz des Baseline-Szenarios erst bei Penetrationsraten von größer gleich 75% unterschritten. Allerdings muss hierbei berücksichtigt werden, dass eine geringe Verzögerung mit einem zeitlich längeren Manöver einhergeht. Dies resultiert unweigerlich in höheren technischen Anforderungen an das System.



**Abbildung 95:** Ergebnisse des Verkehrsszenarios „Nothaltemanöver“

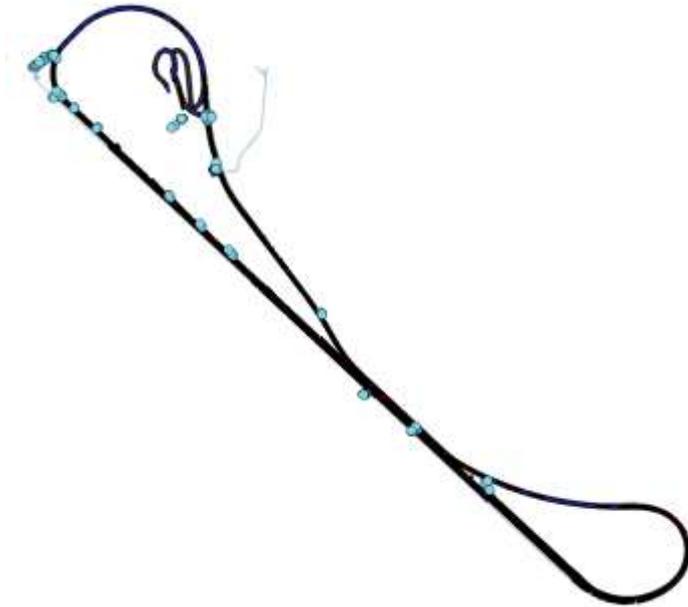
Die untersuchte kooperative automatisierte Fahrfunktion zeigt in nahezu allen Verkehrsszenarien ein deutliches Potential zur Steigerung der Verkehrssicherheit. Für die meisten Verkehrsszenarien steigt der potentielle Sicherheitsgewinn mit der Penetration. Somit stellen sich größere Potentiale erst bei hohen Penetrationsraten ein. Bei niedrigen Penetrationen werden dagegen keine oder nur geringe Steigerung der Verkehrssicherheit erreicht.

Es gelten für die durchgeführten Analysen und Simulationen die folgenden Anmerkungen und Einschränkungen:

- Die analysierten Verkehrsszenarien repräsentieren Szenarien mit kritischen Fahrmanövern, die mit einem höheren Kollisionsrisiko einhergehen als beim normalen Fahren.
- Höhere Penetrationsraten einer kooperativen automatisierten Fahrfunktion werden nicht kurzfristig erreicht. Ferner können die Simulationen mit einer Penetrationsrate von 100% als rein theoretischer Fall betrachtet werden, da ein Erreichen dieser Quote unter Berücksichtigung der Tatsache, dass es immer auch ältere Fahrzeuge geben wird, unrealistisch erscheint.
- Die untersuchte Funktion stellt, wie bereits beschrieben, eine vereinfachte Version einer realen kooperativen automatisierten Fahrfunktion dar. Daher sind sensorbezogene Probleme (z. B. False-Positive-Detektionen oder Verzögerungen in der Kommunikation) nicht berücksichtigt worden.
- Die simulierte kooperative automatisierte Fahrfunktion kann hinsichtlich der Verkehrssicherheit optimiert werden.
- Das genutzte Fahrerhaltensmodell des nicht automatisierten Verkehrs ist kritischer als reale Fahrer parametrisiert worden, um bereits mit einer geringeren Anzahl von Simulationsdurchläufen eine statistisch ausreichende Anzahl von Unfällen zu detektieren.
- Unfälle aufgrund funktionaler Unzulänglichkeiten sind in der Analyse nicht berücksichtigt worden.

### 3.5.4 UAP5.4 Erprobung auf Testgelände

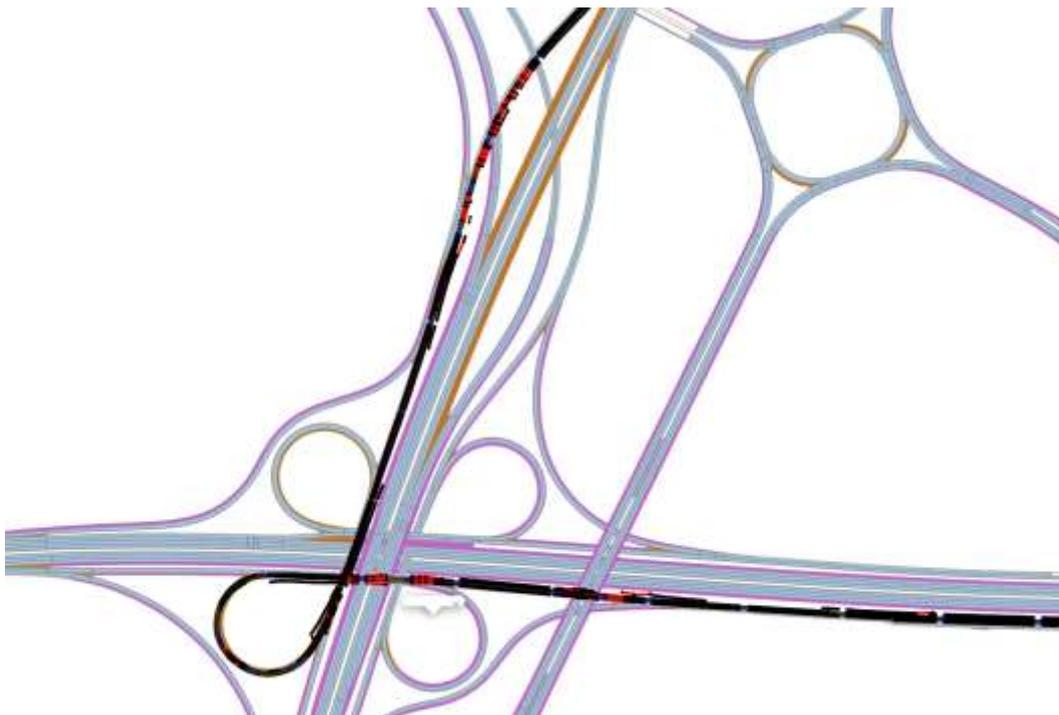
Im Rahmen des Unterarbeitspaketes „Erprobung auf Testgelände“ wurden die Vorbereitungen zur Inbetriebnahme des Opel Testcenters Dudenhofen als Ko-HAF Prüfgelände getroffen. Die BMW AG hat sich an den Abstimmungen beteiligt und insbesondere die BMW spezifischen Anforderungen an das Testgelände in die Diskussion eingebracht. Im Rahmen der gemeinsamen Testtermine in Dudenhofen wurden regelmäßig Daten im Onlinebetrieb an den Safety Server gesendet und weitere Messdaten für die Funktionsentwicklung gesammelt. Die Messfahrten wurden außerdem für die Funktionsentwicklung und Erprobung des Szenarios „Reaktion auf Gefahrenstelle“ genutzt, da das Szenario in UAP5.1 bzw. 5.2 dieser Testmodalität zugewiesen wurde. Abbildung 96 zeigt einen beispielhaften Datensatz der an den Safety Server gesendeten Daten aus einer Erprobung zur Reaktion auf Gefahrenstellen auf dem Testgelände in Dudenhofen. Weitere Details zur entwicklungsbegleitenden Funktionserprobung sind in AP4 dargestellt.



**Abbildung 96:** Erprobung auf dem Testgelände

### 3.5.5 UAP5.5 Erprobung im öffentlichen Straßenverkehr

BMW hat seine hochautomatisierte Fahrfunktion im Rahmen der Testkampagnen in Dudenhofen im öffentlichen Straßenverkehr im öffentlichen Testfeld um Frankfurt erprobt und dabei insbesondere das hochautomatisierte Durchfahren von Autobahnkreuzen getestet. Die aufgezeichneten Daten wurden in aggregierter Form den Partnern für deren Auswertungen zur Verfügung gestellt. Abbildung 97 zeigt einen beispielhaften Datensatz der an den Safety Server gesendeten Daten von einer Durchfahrt des Offenbacher Kreuzes (A3/A661). Weitere Details zur entwicklungsbegleitenden Funktionserprobung sind in AP4 dargestellt.



**Abbildung 97:** Erprobung im öffentlichen Straßenverkehr

### 3.5.6 UAP5.6 Ergebnisaufbereitung

Die Ergebnisaufbereitung wurde in Ko-HAF durch Hessen Mobil durchgeführt. Die BMW AG beteiligte sich an den Abstimmungen und Reviews zur Auswertungsspezifikation.

## 4 Ergebnisverbreitung

### 4.1 Konferenzbeiträge und Publikationen

Im Berichtszeitraum wurden folgende Publikationen von den Projektpartnern erstellt, eingereicht und angenommen:

- Gold, Christian & Naujoks, Frederik & Radlmayr, Jonas & Bellem, Hanna & Jarosch, Oliver (2017). Testing Scenarios for Human Factors Research in Level 3 Automated Vehicles. 551-559. 10.1007/978-3-319-60441-1\_54.
- Jarosch O., Bengler K. (2019). Rating of Take-Over Performance in Conditionally Automated Driving Using an Expert-Rating System. In: Stanton N. (eds) Advances in Human Aspects of Transportation. AHFE 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 786. Springer, Cham.
- Naujoks, F., Wiedemann, K., Schömig, N., Jarosch, O., & Gold, C. (2018). Expert-based controllability assessment of control transitions from automated to manual driving. *MethodsX*, 5, 579-592.
- Christian Gold, Marie-Lene Meyer, Florian Fischer (BMW). Übernahmeleistung in einem Wizard of Oz Versuchsträger beim hochautomatisierten Fahren. 3. Interdisziplinärer Expertendialog Aktive Sicherheit und automatisiertes Fahren, 25. bis 26. Oktober 2017.
- Jarosch, O., Kuhnt, M., Paradies, S., & Bengler, K. (2017). It's Out of Our Hands Now! Effects of Non-Driving Related Tasks During Highly Automated Driving on Drivers' Fatigue. In Proceedings of the Ninth International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design, June 26-29, 2017, Manchester Village, Vermont. Iowa City, IA: Public Policy Center, University of Iowa, 2017: 319-325.
- Jarosch, O., Bellem, H., Bengler, K. (in press). Effects of Task-Induced Fatigue in Prolonged Conditional Automated Driving. *Human Factors*.
- Jarosch, O., & Bengler, K. (2018, July). Rating of Take-Over Performance in Conditionally Automated Driving Using an Expert-Rating System. In International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics (pp. 283-294). Springer, Cham.
- Jarosch, O., & Bengler, K. (2018, August). Is It the Duration of the Ride or the Non-driving Related Task? What Affects Take-Over Performance in Conditional Automated Driving?. In Congress of the International Ergonomics Association (pp. 512-523). Springer, Cham.
- Jarosch, O., Paradies, S., Feiner, D. & Bengler, K. (2018) Effects of non-driving related tasks in Prolonged Conditional Automated Driving – A Wizard-of-Oz on-road approach in real traffic environment. Manuscript submitted for publication.
- Gold et al. (2017). Testing-Scenarios for Human Factors Research in Highly Automated Vehicles.
- Marberger, C., Mielenz, H., Naujoks, F., Radlmayr, J., Bengler, K., & Wandtner, B. (2017). Understanding and Applying the Concept of “Driver Availability” in Automated Driving. In N. A. Stanton (Ed.), *Advances in Human Aspects of Transportation: Proceedings of the AHFE 2017 International Conference on Human Factors in Transportation*.
- Jarosch, O. (BMW), Wandtner, B. (Opel), Marberger, C. (Robert Bosch GmbH), Gold, C. (BMW), Naujoks, F. (BMW), Weidl, G. (Daimler), Schrauf, M. (Daimler) (2018). The Impact of Non-Driving Related Tasks on Take-over Performance in Conditionally Auto-mated Driving – A Review of the Empirical Evidence. Submitted for publication.

- Pek, C.; Zahn, P.; Althoff, M. (2017): Verifying the Safety of Lane Change Maneuvers of Self-driving Vehicles Based on Formalized Traffic Rules. Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium.
- Pek, C.; Koschi, M.; Werling, M.; Althoff, M. (2017): Enhancing Motion Safety by Identifying Safety-critical Passageways. Proc. of the 56th IEEE Conference on Decision and Control.
- Miller, C.; Pek, C.; Althoff, M. (2018): Efficient Mixed-Integer Programming for Longitudinal and Lateral Motion Planning of Autonomous Vehicles. Proc. of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium.
- Koschi, M.; Pek, C. (2018); Beikirch, M.; Althoff, M. (2018): Set-Based Prediction of Pedestrians in Urban Environments Considering Formalized Traffic Rules. Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems.
- Pek, C.; Althoff, M. (2018): Computationally Efficient Fail-safe Trajectory Planning for Self-driving Vehicles Using Convex Optimization. Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems.
- Pek, C.; Althoff, M. (2018): Efficient Computation of Invariably Safe States for Motion Planning of Self-driving Vehicles. Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems.
- Mirchevska, B.; Pek, C.; Werling, M. (2018); Althoff, M.; Boedecker, J.: High-level Decision Making for Safe and Reasonable Autonomous Lane Changing using Reinforcement Learning. Proc. of the IEEE Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems.
- Pek, C.; Koschi, M.; Althoff, M. (2019): An Online Verification Framework for Motion Planning of Self-driving Vehicles with Safety Guarantees. AAET - Automatisiertes und vernetztes Fahren.

## 4.2 Dissertationen

Zu Themen des Ko-HAF Projekts werden bzw. wurden diverse, zum Zeitpunkt der Verfassung dieses Berichts bereits weitgehend abgeschlossene Doktorarbeiten an Universitäten, Hochschule und Industriebetrieben durchgeführt. Diese Arbeiten konstituieren einen ansehnlichen Beitrag zur Förderung des technisch-wissenschaftlichen Nachwuchses; darüber hinaus werden mit den zugeordneten, öffentlich verfügbaren Dissertationen die in Ko-HAF entwickelten Ergebnisse und Methoden in besonderer Tiefe und Ausführlichkeit dargestellt. Bei BMW wurden im Rahmen von Ko-HAF folgende Dissertationen bearbeitet:

Dissertation von Alexander Schaermann zum Thema „Systematische Bedatung und Bewertung umfeld-erfassender Sensormodelle“ (Publikation voraussichtlich 2019)

Dissertation von Oliver Jarosch zum Thema „Occurrence and effects of passive task-related fatigue on take-over performance in conditional driving automation“ (Publikation voraussichtlich 2019)

Dissertation von Christian Pek zum Thema „Computationally Efficient Fail-safe Trajectory Planning for Online Safety Verification of Autonomous Vehicles“ (Publikation voraussichtlich 2019)

## 5 Planung und Ablauf des Projektes

Das Projekt startete am 01.06.2015. Mit einer Laufzeit von 42 Monaten wurde das offizielle Projektende auf den 30.11.2018 festgelegt.

## 6 Änderungen in der Zielsetzung

Die Zielsetzung des Projekts aus wissenschaftlicher Sicht hat sich während der Laufzeit nicht gegenüber dem Projektantrag geändert. Der Projektumfang der BMW AG wurde im Projektverlauf etwas reduziert, das Befahren von Baustellen ist entfallen. Die verbleibenden Ziele wurden erreicht.