

UNIVERSITÄT ŽILINA  
INSTITUT FÜR GERICHTSINGENIEURWESEN UND -BILDUNG

**METHODEN ZUR EXTRAKTION UND VERWENDUNG VON  
SYSTEMKAMERA- UND SENSOR(FUSIONS)-DATEN FÜR  
DIE VERKEHRSUNFALLREKONSTRUKTION**

DISSERTATION

**Dipl.-Ing. (FH) Klaus Johann Böhm**

ŽILINA 2021

UNIVERSITÄT ŽILINA  
INSTITUT FÜR GERICHTSINGENIEURWESEN UND -BILDUNG

**METHODEN ZUR EXTRAKTION UND VERWENDUNG VON  
SYSTEMKAMERA- UND SENSOR(FUSIONS)-DATEN FÜR  
DIE VERKEHRSUNFALLREKONSTRUKTION**

DISSERTATION

**Dipl.-Ing. (FH) Klaus Johann Böhm**

**28290020213005  
700013**

Studiengang:	Gerichtsingenieurwesen
Studienrichtung:	2. Sicherheitswissenschaften
Abteilung:	Institut für Gerichtsingenieurwesen und -Bildung UNIZA
Betreuer:	Dr. Dipl.-Ing. Manfred Becke
Abschluss:	Philosophiae Doctor (PhD.)

ŽILINA 2021

Genderdisclaimer:

Zur besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Es wird das generische Maskulinum verwendet, wobei alle Geschlechter gleichermaßen gemeint sind.

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, die vorliegende Ausarbeitung eigenständig und ausschließlich unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt zu haben. Alle öffentlichen Quellen sind als solche kenntlich gemacht. Die vorliegende Ausarbeitung ist in dieser oder anderer Form zuvor nicht als Prüfungsarbeit zur Begutachtung vorgelegt worden.

Žilina, den 30.11.2021



## Abstract

This thesis shows practicable methods for accident analysts to enable the extraction and use of system camera and sensor (fusion) data. The dissertation is structured as follows. After the introduction and motivation, there is given in chapter 0 an overview of the state of the art regarding standardized and non-standardized digital traces in vehicles. Only those traces are considered that also offer significant relevance for traffic accident analysis. Moreover the most recent changes in the legal framework are discussed. After the presentation of the problem setting, the goals and theses of the dissertation in chapter 4 the developed methods are presented in detail in chapter 5. On the basis of three very elaborately and profoundly analyzed real accidents, supplemented by precisely designed laboratory tests, the enormous range of accident relevant digital traces in modern vehicles and their extraction possibilities and limitations are explained in a practical manner. It can be shown that due to the fact that these digital traces were usually not originally designed for the reconstruction of traffic accidents a reliable statement on the error tolerances is very difficult or not possible at all. System camera data are in particular identified in this work as valuable digital traces that contribute to a significant increase in the quality and accuracy of forensic accident reconstruction and should therefore be considered in more advanced Event Data Recorder (EDR) concepts. The method of visual correlation between sensor fusion data and 3D accident scene measurement explained in this dissertation offers the possibility of a comparison between what the vehicle *saw* and the 3D evidence situation including temporal resolution. Upon that manifold application examples for an advanced forensic accident analysis are elaborated on. Up to now, this method has been very time-consuming. In this dissertation hints are given of how the use of artificial intelligence can significantly accelerate the process. In principle, the method can also be applied to video footage from dash cams and CCTV. Based on such an enhanced accident analysis, an overall concept for a Forensic EDR (FEDR) with considerable added value for society as a whole and additionally for the safeguarding of automated driving functions is presented. Finally, chapter 6 summarizes and discusses all the results and gives an outlook at the resulting open research questions.

**Keywords:** sensor fusion, sensor data, system camera data, EDR, FEDR, SLAM, mixed reality, digital forensics, data trustee, trust center, PTI, ePTI, GIDAS 4.0

## Kurzfassung

Diese Arbeit zeigt für Unfallanalytiker praktikable Methoden für die Extraktion und Verwendung von Systemkamera- und Sensor(fusions)-Daten auf. Die Dissertation ist so strukturiert, dass nach Einleitung und Motivation zunächst in Kapitel 0 ein Überblick über den Stand der Technik bezüglich standardisierter und nicht standardisierter digitaler Spuren in Fahrzeugen gegeben wird. Dabei werden nur solche Spuren betrachtet, die auch eine signifikante Relevanz für die Verkehrsunfallanalyse haben und es wird auf aktuellste Änderungen gesetzlicher Rahmenbedingungen eingegangen. Nach der Darlegung der Ziele und Thesen der Dissertation in Kapitel 4 werden in Kapitel 5 die erarbeiteten Methoden detailliert ausgeführt. Anhand von drei sehr aufwendig und tiefgreifend analysierten realen Unfällen, ergänzt durch passgenau designte Laborversuche, wird die enorme Bandbreite unfallrelevanter digitaler Spuren in modernen Fahrzeugen und deren Extraktionsmöglichkeiten und -grenzen praxisnah erläutert. Dabei zeigt sich, dass aufgrund der Tatsache, wonach in der Regel diese digitalen Spuren nicht originär für die Rekonstruktion von Verkehrsunfällen konzipiert wurden, eine belastbare Angabe der Fehlertoleranzen nur erschwert bzw. gar nicht möglich ist. Insbesondere Systemkameradaten werden in der Arbeit als wertvolle digitale Spuren identifiziert, die zu einer signifikanten Erhöhung der Qualität und Genauigkeit der forensischen Unfallrekonstruktion beitragen und deshalb in weiterentwickelten Konzepten eines Event Data Recorder (EDR) berücksichtigt werden sollten. Die in der Arbeit erläuterte Methode zur visuellen Korrelation zwischen Sensorfusionsdaten und 3D-Unfallstellenvermessung bietet die Möglichkeit einer Gegenüberstellung zwischen dem, was das Fahrzeug *gesehen* hat und der 3D-Spurenlage inklusive zeitlicher Auflösung und es werden mannigfaltige Anwendungsbeispiele dazu ausgeführt. Bis dato ist diese Methode sehr zeitaufwendig, wobei in der Dissertation perspektivisch Wege mithilfe von künstlicher Intelligenz aufgezeigt werden, die eine deutliche Verfahrensbeschleunigung erwarten lassen. Das Verfahren kann prinzipiell auch auf Videomaterial von Dash-Cams oder CCTV angewendet werden. Aufbauend auf einer so aufgewerteten Unfallanalyse wird ein Gesamtkonzept für einen Forensic EDR (FEDR) mit erheblichem gesamtgesellschaftlichen Mehrwert und zusätzlich auch für die Absicherung automatisierter Fahrfunktionen dargelegt.

Abschließend werden in Kapitel 6 alle Ergebnisse zusammengefasst und diskutiert sowie auf sich daraus ergebende offene Forschungsfragen ausgeblickt.

**Schlüsselwörter:** Sensorfusion, Sensordaten, Systemkameradaten, EDR, FEDR, SLAM, Mixed Reality, digitale Forensik, Datentreuhänder, Trust-Center, PTI, ePTI, GIDAS 4.0

## Danksagung

Mein ganz persönlicher und herzlicher Dank richtet sich zunächst an Herrn Prof. Dr. Gustav Kasanický, Herrn Dr. Manfred Becke sowie Herrn Dr. Tibor Kubjatko als Betreuer vonseiten der Universität Žilina, die mir die Möglichkeit eröffnet haben, ein Promotionsstudium absolvieren zu können. Insbesondere sind bei Dr. Kubjatko die unzähligen Hilfestellungen bei organisatorischen Themen sowie die zeitintensiven Diskussionen und wertvollen Anregungen in Bezug auf die Bearbeitung der Aufgabenstellung hervorzuheben. Ein weiterer entscheidender Baustein, ohne den diese Dissertation nicht möglich gewesen wäre, sind die Randbedingungen, die mir Prof. Dr. Hans-Georg Schweiger durch die Anstellung in dem von ihm geleiteten Institut C-ECOS an der TH Ingolstadt als wissenschaftlicher Mitarbeiter ermöglicht hat. Ohne seine unermüdlichen Hilfestellungen speziell bei der Durchführung und Konzeption von Forschungsanträgen und der Anhebung meines Niveaus bei wissenschaftlichen Veröffentlichungen ist diese Arbeit nicht denkbar. Weiterhin gilt mein besonderer Dank meinem langjährigen Arbeitgeber, der DEKRA Automobil GmbH, der ich meine fundierte Ausbildung zum Unfallanalytiker und Prüfenieur verdanke und ohne deren finanzielles Engagement auch in wirtschaftlich herausfordernden Zeiten meine Forschungstätigkeit nicht umsetzbar gewesen wäre. Danke deshalb an Clemens Klinke, Wolfgang Linsenmeier, Guido Kutschera, Jann Fehlauer und Bernd Grüninger. Herauszuheben ist mein Niederlassungsleiter, Herr Erich Daubmeier, der mit seinem Einsatz und auch seinem fachlichen Weitblick entscheidend zum Erfolg der Kooperation zwischen DEKRA und der TH Ingolstadt und damit meiner Arbeit beigetragen hat. Ich möchte mich bei meinen Fachabteilungsleitern, Herrn Josef Kiermeier und Herrn Klaus Schiebel, dafür bedanken, dass sie mir bei der täglichen Arbeit immer den Rücken freigehalten und so meine Forschungstätigkeit ermöglicht haben. Im Weiteren möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Dr. Michael Weyde für die Anregungen und regelmäßigen Fachgespräche bedanken und dafür, dass er die für alle Unfallanalytiker und das Gemeinwohl so wichtigen Themen EDR und DSSAD auf internationaler Ebene in einzigartiger Weise eloquent und kompetent vertritt. Weiterhin gilt ein ganz besonderer Dank meinen Doktorranden-Kollegen Herrn Daniel Paula und Herrn Dominik Bayerl sowie allen weiteren THI-Kolleg:innen und den von mir betreuten Abschlussarbeiter:innen für die inspirierenden Diskussionen und die jederzeitige Unterstützung. In den zurückliegenden Jahren meiner Forschungsaktivitäten habe ich aus der familiären Community der Unfallforscher und -Analytiker in Europa/der Welt, aus dem gesamten DEKRA-Konzern sowie von der FSD

Fahrzeugsystemdaten GmbH sehr viel Unterstützung für die vorliegende Arbeit erhalten. Stellvertretend möchte ich mich ganz herzlich bei Peter Rücker, Jürgen Bönninger, Dr. Philipp Schuricht, Mario Stephan, Wolfgang Aumer, Thomas König, Frank Leimbach, Stefan Schlosser, Dr. Kerim Galal, Dr. Samer Galal, Jens Lehmann, Fred Blüthner, Dr. Kristian Höpping, Jörg Ahlgrimm, Armin Kast, Prof. Dr. Hermann Stephan, Dr. Andreas Moser, Dr. Eduard Kolla, Bettina Zahnd, Stefan Liechti, Dr. Ingo Holtkötter, Dr. Christoph Lauterwasser, Melanie Kreutner, Dr. Johann Gwehenberger, Andreas Forster, Robert Resch, Dr. Oliver Brockmann, Hannes Sappl, Robin Langer und Marco Michl bedanken.

Zuletzt möchte ich mich bei den wichtigsten Menschen in meinem Leben bedanken, meiner Ehefrau Sandrine und meinen Kindern Lilly und Johanna. Ohne euer grenzenloses Verständnis, eure Liebe und euren Glauben an mich hätte ich es nicht geschafft - ich liebe euch.

# Thesen

## 1. These:

In modernen Fahrzeugen werden teilweise Videosequenzen/Fotos von Systemkameras als digitale Spuren gespeichert, die Szenen von Verkehrsunfällen enthalten und der Unfallanalyse zugänglich gemacht werden können.

## 2. These:

In modernen Fahrzeugen werden Sensor(fusions)-Daten als digitale Spuren gespeichert, die unfallrelevant sind und der forensischen Unfallrekonstruktion zugänglich gemacht werden können.

## 3. These:

Die Methode der visuellen Korrelation zwischen den extrahierten Systemkamera- und Sensor(fusions)-Daten und einer sehr genauen 3D-Unfallstellenaufnahme führt zu einer deutlichen Verbesserung der Genauigkeit und Aussagekraft einer wissenschaftlich fundierten Unfallrekonstruktion und zeigt die Notwendigkeit der standardisierten Aufzeichnung von Systemkameradaten im Rahmen eines zukünftig verpflichtenden EDR.

## 4. These:

Es lässt sich ein ganzheitliches Konzept entwickeln, das auf den Ergebnissen einer derart aufgewerteten Unfallanalyse fußt und einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung speziell automatisierter Fahrfunktionen bzw. zur Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur und Entschärfung von Unfallschwerpunkten leisten kann.

## 1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis .....	10
2	Einleitung und Motivation .....	12
3	Stand der Technik .....	15
3.1	Gesetzliche Regelungen zu EDR/DSSAD .....	15
3.1.1	Allgemeine Vorschriften und Arbeitsgruppen auf weltweiter Ebene (UNECE) 15	
3.1.2	Vorschriften auf europäischer Ebene .....	21
3.1.3	Spezielle Vorschriften in ausgewählten Ländern.....	22
3.2	Stand der Technik in der forensischen Unfallrekonstruktion bezüglich Fehlertoleranzen und digitaler Spuren.....	27
3.2.1	Allgemeiner Überblick über Quellen für digitale Spuren.....	29
3.2.2	Derzeitige Methoden zur Ermittlung von Positionen, Geschwindigkeiten und Trajektorien aus Fotos/Videos.....	32
4	Ziele und Thesen.....	38
5	Methoden zur Erreichung der Ziele .....	40
5.1	Analyse realer Unfälle mit Fokus auf der Extraktion digitaler Spuren.....	40
5.1.1	Hochgeschwindigkeitsunfall auf einer Autobahn mit einem leistungsmanipulierten BMW M4 .....	42
5.1.2	Gegenverkehrsunfall eines Tesla Model S auf einer Landstraße (keine Systemkameradaten verfügbar) .....	69
5.1.3	Kollision eines Tesla Model S mit einem Motorradfahrer innerorts an einer Einmündung (Systemkameradaten verfügbar) .....	80
5.1.4	Zusammenfassung und Diskussion der Untersuchungsergebnisse aus der Analyse realer Unfälle .....	83
5.2	Laborversuche im CARISSMA-Testzentrum und auf dem DEKRA Automobil Test Center.....	85
5.2.1	Versuche zur Automatic-Emergency-Braking(AEB)-Funktion am Beispiel eines Audi A4 und Tesla Model X .....	85

5.2.2	Versuche zur Dash-Cam-Funktion bei Tesla Model 3.....	99
5.2.3	Gewinnung von Sensorfusionsdaten aus CARISSMA-Versuchen und Versuchen der FSD GmbH.....	101
5.2.4	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse aus den Laborversuchen .....	103
5.3	Theorie zur Methode der visuellen Korrelation zwischen Sensorfusionsdaten und 3D-Unfallstellenvermessung .....	104
5.4	Gesamtkonzept eines Forensic Event Data Recorders (FEDR) .....	108
6	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse .....	119
6.1	Stellungnahme zu den Thesen.....	119
6.2	Zusammenfassung und Ausblick .....	123
7	Formelzeichen und Indizes .....	129
8	Literatur .....	132
9	Abbildungsverzeichnis.....	141
10	Tabellenverzeichnis .....	145
11	Anhang.....	146
11.1	Anhang I – Datenpunkte Real-Time-Monitoring in China am Beispiel Audi e-tron, Stand 2019.....	146
11.2	Anhang II - AHEAD-Datenliste zum EDR – Stand 2018.....	148
11.3	Anhang III – Veränderungen im Motorsteuergerät des BMW M4 (Kapitel 5.1.1)	152
11.4	Anhang IV – Logfiles Tesla Model S aus Kapitel 5.1.2 (erste und letzte Seite von 22 Seiten).....	154
11.5	Anhang V – erweiterte Versuchsdaten zu AEB-Versuche mit Tesla Model X aus Kapitel 5.2.1 .....	156
11.5.1	Beispiel Excelauswertung .....	156
11.5.2	Beispiel Fehlerrechnung .....	157
11.5.3	Gesamtübersichten der Versuchsauswertung.....	158
11.5.4	Vollständiger Bildabgleich am Beispiel Versuch 3.15 .....	161

### **2 Einleitung und Motivation**

Im Automotivbereich sind derzeit in technischer Hinsicht im Wesentlichen drei Megatrends zu verzeichnen. Dies ist einerseits die Tendenz hin zur Automatisierung von Fahrfunktionen, andererseits die Trends zur Vernetzung und zur Elektrifizierung der Fahrzeuge [1]. Diese Entwicklungen wirken sich folgerichtig auch auf die forensische Unfallrekonstruktion und damit einhergehend auf die Möglichkeiten der Aufklärung von Unfällen mit Beteiligung automatisierter, vernetzter und elektrifizierter Fahrzeuge aus.

Mit der Vision Zero wurde politisch das Ziel erklärt, die Zahl der Schwerverletzten und Toten auf europäischen Straßen bis 2050 auf nahezu null zu reduzieren [2]. In verschiedenen Publikationen wird davon ausgegangen, dass 90 % der Verkehrsunfallursachen in Europa auf menschliches Versagen zurückzuführen seien und dass daher die Automatisierung von Fahrzeugen einen wesentlichen Bestandteil zur Verwirklichung der Vision Zero darstellt [2, 3]. Die Automatisierung soll demnach menschliches Versagen reduzieren oder zumindest die Folgen abmildern [2]. Dabei ist jedoch anzumerken, dass nach Meinung des Autors die Datenquellen, auf denen die Abschätzung der angeführten 90 % der Verkehrsunfallursachen basiert, kritisch zu hinterfragen sind. Diese Aussage fußt darauf, dass mit den derzeitigen Möglichkeiten der forensischen Unfallrekonstruktion komplexe, unfallursächliche oder mitursächliche technische Mängel nur schwer bis gar nicht zu detektieren sind und demnach tauchen diese Mängel auch nicht in den Statistiken auf [4]. Auch wenn EDR-Daten (Event Data Recorder-Daten/Daten aus Ereignis- oder Unfalldatenspeichern) aus Fahrzeugen extrahiert werden können, führen wissenschaftliche Fehlerbetrachtungen immer noch zu erheblichen Toleranzbändern [5]. Aufgrund dieser Toleranzen und fehlender digitaler Spuren ist insbesondere eine Reihe möglicher, unfallursächlicher Systemeingriffe wie etwa fehlerhafte ABS-/ESP-Eingriffe oder Lenkaktionen der aktiven Lenkung bis dato kaum belastbar nachzuweisen.

Dies bedeutet, dass von einer gewissen Dunkelziffer an unfallursächlichen Mängeln auszugehen ist, die bisher im Ausschlussverfahren menschlichem Versagen angelastet werden. Zudem ist festzuhalten, dass sich in der derzeitigen Situation eine gewisse Ernüchterung hinsichtlich des Unfallvermeidungspotentials automatisierter Fahrzeuge eingestellt hat. Nach Schöneburg [6] sind nach dem derzeitigen technischen Stand des automatisierten Fahrens die in der Entwicklung befindlichen Systeme im Wesentlichen als Komfortsysteme anzusehen. Ziel



sei es zunächst, dass diese Systeme nicht zu mehr Unfällen führen, als dies ohne Einsatz der automatisierten Funktionen nur mit menschlicher Fahrzeugführerverantwortung der Fall ist. Dieser Umstand liegt vor allem in der komplexen Absicherung automatisierter Fahrfunktionen begründet. Dies wird schon bei einfachen Notbremssystemen deutlich [7], von komplexen Verkehrsszenarien in gewachsenen Innenstädten ganz zu schweigen. Neben neu gedachten, städtebaulichen Konzepten, wie der ‚Woven City‘ von Toyota [8], ist bei der Lösung dieser Problematik aber auch der enorme zukünftige Nutzen einer sehr genauen Unfallrekonstruktion zu sehen. Zum einen kann mit deutlich genauer aufgeklärten Verkehrsunfällen die Datengrundlage für die Abgrenzung der Unfallursachenermittlung zwischen menschlichem Versagen und technischen Mängeln qualitativ erheblich verbessert und dementsprechend das Sicherheitspotenzial der Automatisierungstechnik realistischer eingeschätzt werden. Zum anderen führt eine Rückkopplung einer sehr genauen forensischen Unfallrekonstruktion mit der technischen Entwicklung der Hersteller bzw. Zulieferer dazu, dass die komplexe Technologie der Automatisierung und Vernetzung durch reale Unfälle besser abgesichert und dynamisch homologiert werden kann. Zudem können *Lessons Learned* schnell in die Entwicklung integriert und im Rahmen der Zulassung und periodischen Überwachung im Feld geprüft werden. Nach Kuhn [9] wird die Gesellschaft im Hinblick auf das automatisierte Fahren noch einige unvorhergesehene Überraschungen erleben. Dem könne nur durch eine möglichst rasche Ursachenanalyse und darauf aufbauenden Gegenmaßnahmen begegnet werden. Hier ist der Ansatzpunkt für eine zukünftige ganzheitliche und sehr genaue Unfallanalyse insbesondere unter Einbeziehung von Systemkameradaten und damit die wesentliche Motivation für diese Arbeit zu sehen.

Einen deutlichen Schritt zur Verbesserung der Unfallaufklärung stellt die standardisierte Aufzeichnung digitaler Spuren im Rahmen eines EDR dar [3, 10]. Dennoch sind viele Unfälle auch in Zukunft unter Berücksichtigung des beispielsweise in den USA vorgeschriebenen EDR-Konzepts nach NHTSA 49 CFR Part 463 [11] bzw. der auf UNECE-Ebene diskutierten Konzepte nicht aufklärbar [3, 10]. Dies gilt im Speziellen perspektivisch für Unfälle mit Beteiligung automatisierter Fahrzeuge [10].

Aus diesem Grund sind neue EDR-Ansätze nötig, wobei speziell eine Erweiterung der gespeicherten Datenelemente sowie intelligente Triggerkriterien von besonderer Bedeutung sein dürften. Dabei werden die Potenziale, die eine standardisierte, eventbasierte Aufzeichnung von Systemkameradaten in Verbindung mit Sensordaten zur Verbesserung der Qualität der Unfallrekonstruktion bietet, im bisherigen wissenschaftlichen Diskurs nicht ausreichend herausgearbeitet.

Ein neuer Ansatz dazu sowie dessen Einbettung in eine ganzheitliche Unfallrekonstruktion werden in der vorliegenden Arbeit detailliert ausgeführt. Mit dieser Methode lassen sich die von den Systemen aufgezeichneten, digitalen Spuren (z. B. Geschwindigkeiten, Trajektorien, sonstige fahrdynamische Größen, Objekte und Objektpositionen im Fahrzeugumfeld usw.) plausibilisieren. Es können auch Objekte, die nicht aktiv in die Kollision involviert sind (z. B. Sichtverdeckung durch ein unbeteiligtes Fahrzeug) in der Unfallrekonstruktion mitberücksichtigt werden. Des Weiteren lassen sich zusätzlich prospektiv nicht vorhergesehene Szenarien, die dementsprechend nicht über explizit festgelegte Datenpunkte eines EDR erfassbar sind, durch Systemkameradaten auflösen. Als besonderer praktischer Nutzen der Systemkameradaten in Verbindung mit Objektdaten in der alltäglichen Gerichtspraxis ist die Möglichkeit zu sehen, einen technisch komplizierten Sachverhalt einem technischen Laien (z. B. einem Richter) besser verständlich zu machen.

Summa summarum soll die erarbeitete ganzheitliche Methode zu mehr Rechtssicherheit bei geübtem Datenschutz für alle führen. Gleichzeitig ist dadurch auch ein signifikanter Fortschritt in der Entwicklung und Absicherung automatisierter und vernetzter Fahrzeuge zu erwarten. Eine derartig detailliert ausgeführte Unfallrekonstruktion ist somit als Standortvorteil der Automobilindustrie in den Ländern anzusehen, in denen sie durch notwendigerweise hochqualifizierte, unabhängige Sachverständige durchgeführt werden kann.

### 3 Stand der Technik

#### 3.1 Gesetzliche Regelungen zu EDR/DSSAD

##### 3.1.1 Allgemeine Vorschriften und Arbeitsgruppen auf weltweiter Ebene (UNECE)

Innerhalb der UNECE-Aufbauorganisation stellt die Untergruppierung des world forum for harmonization of vehicle regulation (WP.29) das weltweite Forum für die Harmonisierung von Fahrzeugvorschriften dar (vergleiche Abbildung 1).

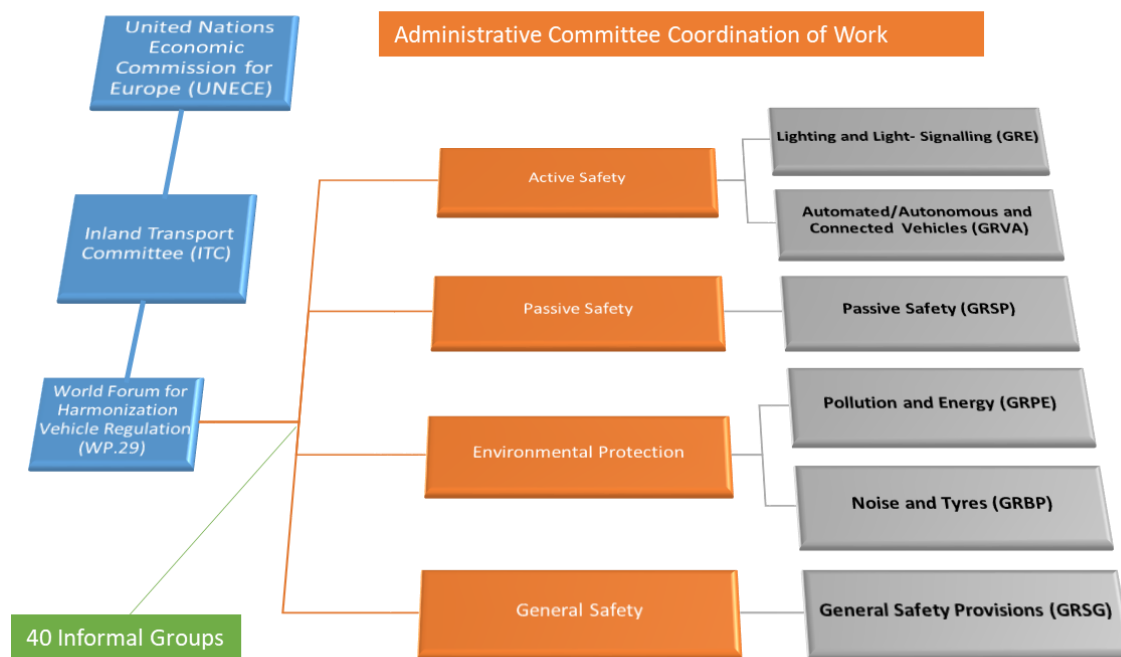


Abbildung 1: Struktur des Weltforums WP.29 [Quelle: Autor] abgeleitet aus [12]

Ziel der WP.29 ist es, einheitliche Bedingungen für die periodische technische Fahrzeugüberwachung zu schaffen und Wirtschaftsbeziehungen weltweit zu stärken. Insbesondere wird dabei auf die Verbesserung der Fahrzeugsicherheit, den Schutz der Umwelt, die Förderung der Energieeffizienz und die Erhöhung der Diebstahlsicherheit abgezielt [13]. Wie Abbildung 1 zeigt, ist die WP.29 insgesamt in sechs Arbeitsgruppen (GR – Groupes de rapporteurs) und in über vierzig informelle Arbeitsgruppen aufgeteilt. Die Arbeitsgruppe working party on breaks and running gear (GRRF) wurde im Juni 2018 konvertiert in die GRVA – working party on automated/autonomous and connected vehicles.

Die maßgebliche, informelle Arbeitsgruppe (IWG – Informal Working Group) zum Thema EDR/DSSAD wurde im Juli 2019 gegründet und arbeitet der GRVA bzw. der GRSG zu.

Einen Überblick über den derzeitigen Status quo weltweit bezüglich EDR liefert Abbildung 2.

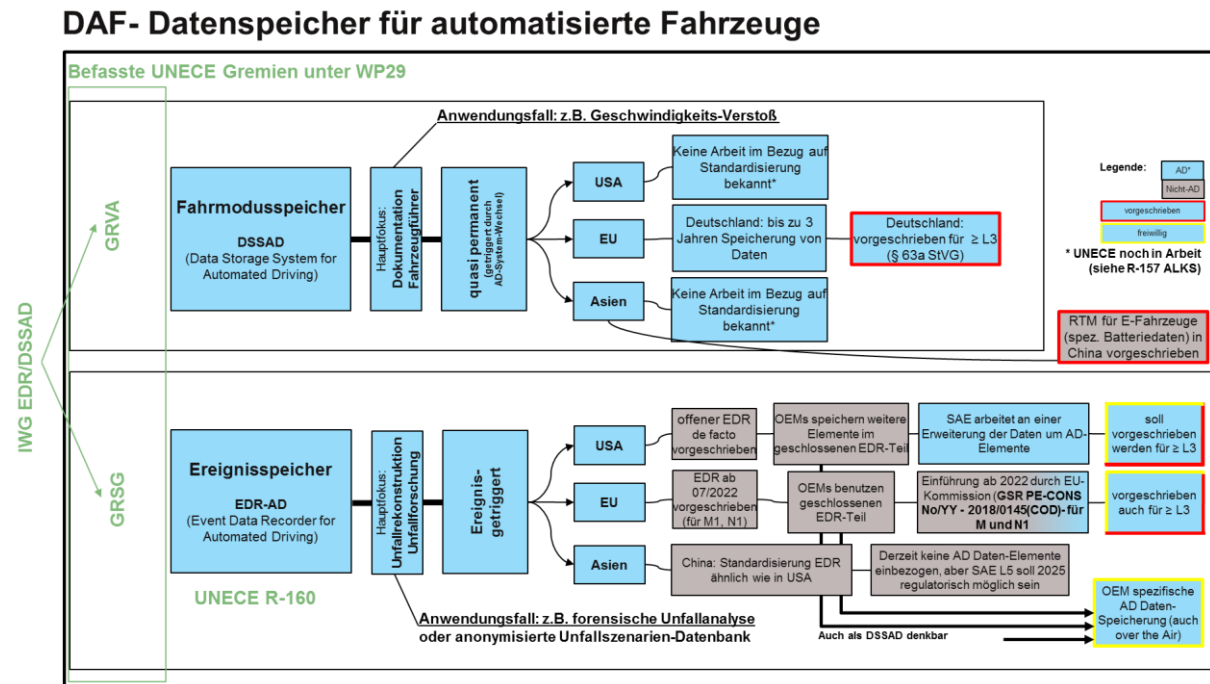


Abbildung 2: Überblick über Status quo EDR weltweit [Quelle: Autor]

Intensive Datenrecherchen auf den zugehörigen Internetseiten bzw. direkter Kontakt zu regelmäßigen Teilnehmern an den entsprechenden Sitzungen der IWG EDR/DSSAD zeigen, dass sich bei der verpflichtenden Einführung des EDR in Europa ab Juli 2022, bei der ebenfalls auf die UNECE referenziert wird, als kleinster gemeinsamer Nenner der weltweit beteiligten Nationen ein EDR im Wesentlichen nach US-Standard durchgesetzt hat [14]. Dies ist vor allem der Tatsache geschuldet, dass dieser US-Standard bereits längere Zeit erprobt, teilweise weltweit verfügbar ist und größere Änderungen aufgrund der Kürze der Zeitspanne entwicklungstechnisch nicht umzusetzen waren.

Nichtsdestotrotz ist evident, dass dieses EDR-Konzept nicht dafür ausgelegt ist, sämtliche derzeit im Feld auftretenden Unfälle, geschweige denn die in Zukunft auftretenden Events mit Beteiligung automatisierter Fahrzeuge, aufklären zu können [3]. Dem wird in der IWG EDR/DSSAD mittlerweile dadurch Rechnung getragen, dass eine Vielzahl zusätzlicher Datenpunkte und Datenformate bezüglich eines weiterentwickelten EDR-Konzepts diskutiert werden [14]. Manifestiert sind die bisherigen Regelungen betreffend EDR in der UNECE Regelung R-160 [15]. Regelungen zum DSSAD sind erstmalig in der R-157 [16] zum Automated Lane Keeping System (ALKS) unter Punkt 8 beschrieben, wobei die ALKS-

Funktionalität vorerst limitiert ist auf den niedrigen Geschwindigkeitsbereich bis 60 km/h ohne Spurwechsel auf Autobahnen oder autobahnähnlichen Straßen. Die von den verschiedenen Interessengruppen eingebrachten Vorschläge sollen in ein neues EDR-Konzept mit dem Arbeitstitel EDR 2.0 münden. Bis dato ist nach Kenntnisstand des Autors lediglich eine unabgestimmte *wish list* in Umlauf, die eine Vielzahl von Datenpunkten beinhaltet, die teilweise auf Vorarbeiten der Arbeitsgruppe AHEAD [17] unter Mitarbeit des Autors basieren. Konsensfähig dürften dabei, neben Datenpunkten zur Beurteilung von Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) und automatisierten Fahrfunktionen, die Aufzeichnung vorkollisionärer Beschleunigungen sowie der Einsatz verbesserter Triggerkriterien sein. Ein so erweiterter EDR soll frühestens 2027 verpflichtend eingeführt werden. Zusätzlich sollen in den kommenden zwei Jahren Vorschläge für ein EDR-Konzept für schwere Lkws (Fahrzeugklassen M2, N2, M3, N3) erarbeitet werden [14]. Die eventbasierte Speicherung von Systemkameradaten wird bislang, vor allem aufgrund datenschutzrechtlicher Bedenken, von vielen Contracting Parties (= stimmberechtigte Länder innerhalb der UNECE) abgelehnt. Aus Sicht des Autors sind es jedoch genau diese Systemkameradaten, die in Verbindung mit einer weiterentwickelten forensischen Unfallrekonstruktion (Accident Reconstruction 4.0) zu einem Quantensprung hinsichtlich Rechtssicherheit und Absicherung automatisierter Fahrfunktionen führen würden. Die Gründe dafür sowie Denkanstöße für einen implementierten und gelebten Daten-/Opferschutz werden im Rahmen dieser Dissertation ausführlich beleuchtet.

Als einfaches Beispiel, warum ein EDR nach US-Prägung eine Vielzahl von Unfällen vor allem mit vulnerablen Verkehrsteilnehmern nicht aufzeichnen kann, sei hierfür eine überschlägige Berechnung der Kollisionsgeschwindigkeit eines durchschnittlichen Pkws dargestellt, die notwendig ist, um die im US-Standard adressierten Auslösekriterien zur Aktivierung der Datenspeicherung anzustoßen:

Die nachfolgenden Berechnungen wurden bereits publiziert [10] und damit auch verifiziert. Eine Datenspeicherung im EDR wird nur dann aktiviert, wenn ein nicht reversibel aktivierbares Rückhaltesystem oder Fußgängerschutzsystem ausgelöst wird oder eine Änderung der Fahrzeuggeschwindigkeit eintritt, die innerhalb eines Intervalls von 150 ms 8 km/h erreicht oder überschreitet. Erfahrungen aus der täglichen Praxis des Autors zeigen, dass die Datenspeicherung bei Unfällen mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern sehr selten aktiviert wird, was auch das folgende vereinfachte Beispiel zeigt:

Im exemplarischen Unfallszenario nach Abbildung 3 überquert ein Fußgänger die Straße und wird von einem Fahrzeug angefahren.



Abbildung 3: Exemplarisches Unfallszenario, erzeugt mit PC-Crash [10]

Dabei kann in guter Näherung unterstellt werden, dass es sich um eine Kollision mit hundert Prozent Überdeckung handelt, die physikalisch als gerader Zentralstoß beschrieben werden kann [18]. Das dritte Newton'sche Bewegungsaxiom definiert Actio = Reactio und somit:

$$m_1 \cdot a_1 = m_2 \cdot a_2 \text{ [kg m/s}^2\text{]} \quad (1)$$

Mit:

- $m_1$  – Masse des stoßenden Fahrzeugs [kg]
- $m_2$  – Masse des Fußgängers [kg]
- $a_1$  – Beschleunigung des stoßenden Fahrzeugs [m/s<sup>2</sup>]
- $a_2$  – Beschleunigung des Fußgängers [m/s<sup>2</sup>]

Für die Aktivierung der Datenspeicherung muss ohne Aktivierung nicht reversibel aktivierbarer Rückhaltesysteme oder eines Fußgängerschutzsystems mindestens gelten:

Geschwindigkeitsänderung des Fahrzeugs  $\Delta v_1 \geq 8 \text{ km/h}$  innerhalb einer Zeitdauer von  $\Delta t_1 = 150 \text{ ms}$  [11] woraus sich für die Fahrzeugverzögerung ergibt:

$$a_1 = \frac{\Delta v_1}{\Delta t_1} = \frac{8,00 \left[ \frac{\text{km}}{\text{h}} \right]}{150 \text{ [ms]}} = 14,81 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \quad (2)$$

Mit:  $a_1$  – Beschleunigung des stoßenden Fahrzeugs [ $\text{m/s}^2$ ]  
 $\Delta v_1$  – stoßbedingte Geschwindigkeitsänderung des Fahrzeugs [ $\text{km/h}$ ]  
 $\Delta t_1$  – Zeitdauer des Stoßes bezogen auf das Fahrzeug [s]

Die Fahrzeugmasse wird mit 1420 kg (durchschnittliche Leermasse eines Fahrzeugs der VW-Gruppe [19]) und die Fußgängermasse mit 62 kg (durchschnittliches, weltweites Körpergewicht einer Person [20]) angenommen. Diese Daten sind in Anbetracht der stark zunehmenden Marktdurchdringung mit E-Fahrzeugen und damit einhergehenden höheren Fahrzeugmassen als eher konservativ für die durchschnittliche Kollisionsmasse eines Pkws anzusehen. Aus (1) und (2) ergibt sich:

$$a_2 = \frac{m_1 * a_1}{m_2} = \frac{1,42 * 10^3 \text{ [kg]} * 14,81 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]}{62 \text{ [kg]}} = 339,20 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] \quad (3)$$

Wegen des zentralen Stoßes gilt für die Stoßzeit:  $\Delta t_1 = \Delta t_2 = 150 \text{ ms}$  und somit:

$$\Delta v_2 = a_2 * \Delta t_2 = 339,20 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right] * 0,15 \text{ [s]} = 50,88 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \approx 183,17 \left[ \frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \quad (4)$$

Mit:  $a_2$  – Beschleunigung des Fußgängers [ $\text{m/s}^2$ ]  
 $\Delta v_2$  – stoßbedingte Geschwindigkeitsänderung des Fußgängers [ $\text{km/h}$ ]  
 $\Delta t_1$  – Zeitdauer des Stoßes bezogen auf den Fußgänger [s]

Außerdem handelt es sich um eine Kollision mit plastischem Anteil. Definitionsgemäß kann der Stoßkoeffizient damit theoretisch zwischen  $k = 0 \dots 1$  variieren [18]. Realistische Werte für eine Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision sind im Bereich  $k \approx 0,1 - 0,25$  [21] anzusetzen. Bei einer Kollision zwischen Auto und Fußgänger kann der  $k$ -Faktor noch stärker variieren.  $k$  lässt sich nach [22] wie folgt definieren:

$$k = -\frac{v_2' - v_1'}{v_2 - v_1} \quad [-] \quad (5)$$

Mit:  $k$  – Stoßkoeffizient [-]  
 $v_1'$  – Geschwindigkeit des Fahrzeugs unmittelbar nach dem Stoß [km/h]  
 $v_2'$  – Geschwindigkeit des Fußgängers unmittelbar nach dem Stoß [km/h]  
 $v_1$  – Geschwindigkeit des Fahrzeugs unmittelbar vor dem Stoß [km/h]  
 $v_2$  – Geschwindigkeit des Fußgängers unmittelbar vor dem Stoß [km/h]

Die Geschwindigkeit der querenden Person in Bezug auf die Bewegungsrichtung des Fahrzeugs zum Zeitpunkt der Kollision kann in guter Näherung mit  $v_2 = 0$  km/h angenommen werden. Zusätzlich gilt  $v' = v + \Delta v$  und damit:

$$k = \frac{\Delta v_2 - v_1 - \Delta v_1}{v_1} \quad [-] \quad (6)$$

Da wir an der Fahrzeuggeschwindigkeit interessiert sind, bei der die Kollision mit dem Fußgänger stattgefunden haben müsste, um die Datenspeicherung zu aktivieren, wird Gleichung (6) nach  $v_1$  aufgelöst. Die Untergrenze von  $v_1$  wird berechnet, wenn man  $k = 1$  setzt:

$$v_1 = \frac{\Delta v_2 - \Delta v_1}{1+k} = \frac{183,17 \left[ \frac{\text{km}}{\text{h}} \right] + 8,00 \left[ \frac{\text{km}}{\text{h}} \right]}{1+1[-]} = 95,58 \left[ \frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \quad (7)$$

Dieses Beispiel zeigt, dass die Kollisionsgeschwindigkeit des Fahrzeugs für die Aktivierung der Datenspeicherung mindestens in einer Größenordnung um 100 km/h liegen müsste. Die Grenzggeschwindigkeit ist unter Berücksichtigung von  $k < 1$  in der Realität [21] sogar noch höher. Als Fazit bedeutet dies, dass bei einem innerstädtischen Unfallszenario zwischen einem Fahrzeug und einem Fußgänger mit Fahrzeuggeschwindigkeiten in der Regel weit unter 100 km/h keine Datenspeicherung im EDR nach US-Prägung aufgrund der Überschreitung der  $\Delta v$ -Kriterien erfolgt. Insbesondere gilt dies für streifende Anstöße, bei denen erfahrungsgemäß oftmals kein Fußgängerschutzsystem ausgelöst wird. Es wird auch deutlich, dass mit zunehmender Gesamtmasse des Fahrzeugs auch dessen Kollisionsgeschwindigkeit zunehmen muss, um zu einer Datenspeicherung zu führen. Da etwa die Hälfte aller Verkehrstoten unter



vulnerablen Verkehrsteilnehmern zu finden ist, benötigt der EDR fortschrittlichere und an die Realität angepasste Trigger zur Aktivierung des Datenspeichers [23, 24].

#### **3.1.2 Vorschriften auf europäischer Ebene**

In der General Safety Regulation (GSR) [25] ist eine verpflichtende Einführung eines EDR auf europäischer Ebene ab Juli 2022 für Fahrzeuge der Klasse M1 und N1 vorgeschrieben. Perspektivisch sollen auch Fahrzeuge der Klassen M2, N2 sowie M3 und N3 ab 2025 mit einem derartigen Eventdatenrecorder ausgestattet werden [25]. Bezüglich der genauen Ausgestaltung bzw. der aufzuzeichnenden Datenpunkte inklusive Genauigkeit und Aufzeichnungsfrequenz wird auf die derzeit laufenden Arbeiten auf UNECE-Ebene, im Speziellen auf die Informal Working Group (IWG) EDR/DSSAD [14] referenziert.

Zusätzlich ist anzumerken, dass mit der EU-Verordnung Nr. 2019/2144 [25] über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern sowie von Systemen, Bauteilen und selbstständigen technischen Einheiten für diese Fahrzeuge ein gesetzlicher Rahmen geschaffen wurde, um durch die Einbeziehung hochentwickelter Fahrzeugsicherheitssysteme in den Homologationsprozess die Verkehrssicherheit nachhaltig zu verbessern. Dabei wurde ein zeitlicher Fahrplan festgelegt, beginnend mit dem 06.07.2022 bis zum 07.01.2029, bei dem stufenweise die adressierten Assistenzsysteme verpflichtend in der EU, im ersten Schritt für alle neu typgenehmigten und im zweiten Schritt für alle neu zugelassenen Fahrzeuge, eingeführt werden sollen. Es ist aus technischer Sicht abzusehen, dass diese Assistenzsysteme zur Absicherung ihrer ordnungsgemäßen Funktionalität diverse Datenelemente speichern werden, die hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Relevanz für die Unfallanalyse den bisher auf UNECE-Ebene vorgeschlagenen EDR-Systemen deutlich überlegen sein dürften. Ein Indiz dafür ist der im VW-Konzern weit verbreitete Assistenz System Monitor (ASM), der, entsprechend z. B. der Bedienungsanleitung zum Audi Q3 neuester Generation (Typ F3) [26], zusätzliche Unfalldaten im Vergleich zum verbauten EDR aufzeichnen soll. Eine Standardisierung derartiger Zusatzdaten ist bisher in der Gesetzgebung auf EU-Ebene nicht erkennbar.

### 3.1.3 Spezielle Vorschriften in ausgewählten Ländern

#### 3.1.3.1 Der Fahrmodusspeicher ab SAE-Level 3 in Deutschland

Deutschland hat bereits mit der Novellierung des Straßenverkehrsgesetzes (§ 63a StVG) die Datenverarbeitung einschließlich der Datenaufzeichnung für Fahrzeuge der SAE-Stufe  $\geq 3$  geregelt [27]. Demnach ist in Deutschland gesetzlich vorgeschrieben, dass in einem sogenannten Fahrmodusspeicher folgende Datenpunkte aufgezeichnet werden.

1. Differenzierung der Fahrzeugführerverantwortung zwischen Mensch und Fahrzeug und Aufzeichnung des Wechsels der Fahrzeugsteuerung inklusive Aufzeichnung von Übernahmeaufforderungen durch das System
2. GPS Zeit
3. GPS Ort

Auch soll eine Datenaufzeichnung stattfinden, wenn eine Störung der automatisierten Fahrfunktion vorliegt, wobei im Gesetzestext bisher offenbleibt, ob auch hinterlegt wird, welche Störung vorgelegen hatte.

Die gesetzlich vorgeschriebene Speicherfrist beträgt dabei für diese quasi permanent aufgezeichneten Daten sechs Monate. Dies liegt in der Nachverfolgbarkeit von Straßenverkehrsordnungswidrigkeiten und den entsprechenden Verjährungsfristen begründet. Im Falle eines Unfalls beträgt die Speicherfrist drei Jahre, wobei in jedem Fall die Daten nicht löschar sein sollen.

Mit dem Inkrafttreten des Gesetzes zum autonomen Fahren am 28. Juli 2021 wurde ein Rechtsrahmen geschaffen bzw. erweitert, um speziell auch Fahrzeuge mit der Automatisierungsstufe SAE-Level 4 in festgelegten Betriebsbereichen im öffentlichen Straßenverkehr im Regelbetrieb zuzulassen [28]. Dabei werden u. a. folgende Einsatzszenarien so wörtlich adressiert [28]:

- *Shuttle-Verkehre von A nach B,*
- *People-Mover (Busse, die auf einer festgelegten Route unterwegs sind),*
- *Hub2Hub-Verkehre (z. .B. zwischen zwei Verteilzentren),*
- *nachfrageorientierte Angebote in Randzeiten,*
- *die Beförderung von Personen und/oder Gütern auf der ersten oder letzten Meile,*
- *Dual Mode Fahrzeuge wie zum Beispiel beim Automated Valet Parking (AVP).*

Die technischen Anforderungen an den DSSAD wurden dabei jedoch nicht weiter präzisiert, zumal das Gesetz zum autonomen Fahren nur als Übergangslösung angesehen wird, bis auf internationaler Ebene harmonisierte Vorschriften vorliegen [28].

Hinsichtlich eines EDR sind in Deutschland bzw. auch in Gesamteuropa bis dato keine gesetzlichen Vorschriften vorhanden. Jedoch regelt die General Safety Regulation [25], dass ab Juli 2022 in der EU ein EDR verpflichtend bei Fahrzeugen der Klasse M1 und N1 vorgeschrieben ist, wenn diese neu in Verkehr gebracht werden. Die genaue Ausgestaltung dieses EDR, der demnach auch in Deutschland vorgeschrieben sein wird, referenziert auf entsprechende UNECE-Vorgaben, wie sie in Kapitel 3.1.1 angesprochen werden. Auf freiwilliger Basis gehen immer mehr Fahrzeughersteller dazu über, den bereits auf dem US-Markt vorgeschriebenen EDR auch in Europa freizuschalten [4], wobei in der aktuellen Berufspraxis des Autors vermehrt *external Trigger*, d. h. vom Hersteller zusätzlich festgelegte Trigger als Auslöseschwelle auch für leichter Kollisionen oder bei ADAS-Einsatz in den EDR-Protokollen zu finden sind. In Tabelle 1 ist ein grundsätzlicher Vergleich zwischen EDR und DSSAD (Data Storage System for Automated Driving/Fahrmodusspeicher) zu sehen.

Tabelle 1: Grundsätzliche Gegenüberstellung zwischen EDR und DSSAD [10]

	<b>Event Data Recorder (EDR)</b>	<b>Data Storage System for Automated Driving (DSSAD)</b>
<b>Hauptfunktionalität</b>	Unterstützt die Analyse und Rekonstruktion von Unfällen, klärt die Fahrzeugführerverantwortung bei komplexen Unfallszenarien	Klärung der Fahrzeugführerverantwortung zu einem bestimmten Zeitpunkt in Standardfällen
<b>Automatisierungsstufe nach SAE-Level</b>	SAE L0 – L5	SAE L3 – L5
<b>Ort der Datenspeicherung</b>	Fahrzeug	Fahrzeug (und Datentreuhänder /Trust Center)
<b>Trigger für Datenspeicherung</b>	Event-basiert	Quasi permanent
<b>Zeitspanne der Datenaufzeichnung</b>	Sekunden	Monate/Jahre

Die Hauptfunktionalität des DSSAD ist demnach die Klärung der Fahrzeugführerverantwortung zu einem bestimmten Zeitpunkt in Standardfällen wie beispielsweise Geschwindigkeitsübertretungen oder einfach gelagerten Verkehrsunfällen. Die darin definierten Datenelemente reichen jedoch nicht aus, um die Ursachen vieler Unfälle und die daraus erwachsenden Haftungsfragen zu klären [17]. Wenn das System beispielsweise den

Fahrer auffordert, die Fahraufgabe unter Berücksichtigung definierter Übergabezeiten im Falle eines gefährlichen Fahrszenarios zu übernehmen, zeichnet der DSSAD nur die Aufforderung, eine mögliche technische Störung des Systems und eventuell eine vom System definierte Übernahme der Fahraufgabe durch den Fahrer auf. Entscheidend ist jedoch, ob der Fahrer tatsächlich die Fahraufgabe übernommen hat und auch dazu in der Lage war. Auch Übersteuerungen automatisierter Fahrfunktionen durch den Fahrer und vice versa sind hinsichtlich ihrer Erfordernis und der damit einhergehenden Fahrzeugführerverantwortung, lediglich auf DSSAD-Datenpunkten basierend, unter Umständen nicht aufklärbar. Derart komplexe Übergabeszenarien und daraus resultierende Unfälle können nur mit Unterstützung eines EDR gelöst werden, da der DSSAD nicht für die Erkennung von Unfällen spezifiziert ist. Zusätzlich sind nach deutschem Recht die DSSAD-Datenelemente im Fall einer Kollision drei Jahre zu speichern (statt sechs Monate ohne Unfall). Daher muss der DSSAD Informationen über eine erfolgte Kollision sinnvollerweise aus dem EDR erhalten. Schließlich ist es auch sinnvoll, EDR und DSSAD regulatorisch zusammen zu betrachten, um eine abgestimmte Lösung sicherzustellen.

#### **3.1.3.2 Ausgestaltung des vorgeschriebenen EDR in Österreich bei automatisierten Erprobungsfahrzeugen im öffentlichen Verkehr**

In Österreich wird durch das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie das Testen von automatisierten Fahrfunktionen auf Straßen mit öffentlichem Verkehr unterstützt. Neben den vorhandenen, gesetzlichen Grundlagen in der Straßenverkehrsordnung (StVO 1960) wurden dafür auch neue bzw. erweiterte Regelungen geschaffen (KFG, AutomatFahrV) [29]. Konkrete Verhaltensregeln sind im *Code of practice, AustriaTech: Testing of automated driving on roads with public traffic/Tests von automatisiertem Fahren auf Straßen mit öffentlichem Verkehr* nachzulesen. Dabei ist unter dem Punkt Datenaufzeichnung zu entnehmen, dass Testfahrzeuge verpflichtend mit einem Datenaufzeichnungsgerät auszustatten sind. Wörtlich lautet die Formulierung:

*„Die Datenaufzeichnung hat alle Daten der Sensoren und Kontrollsysteme des Testfahrzeuges zu umfassen, ebenso wie andere Informationen, die Aufschluss über die Bewegung des Testfahrzeuges geben.*

*Folgende Daten sind jedenfalls – bevorzugt mit 10 Hz – aufzuzeichnen:*

- *Information, wann das Testfahrzeug manuell und wann es automatisiert gesteuert wird*
- *Fahrgeschwindigkeit*

- Lenkbefehle und deren Aktivierung*
- Bremsbefehle und deren Aktivierung*
- Einsatz der Lichtsignaleinrichtungen und Werte der anderen Fahrzeuganzeigen*
- Einsatz der Hupe*
- Daten der Sensoren über andere Verkehrsbeteiligte, Verkehrsteilnehmerinnen bzw. Verkehrsteilnehmer oder Objekte im Einflussbereich des Testfahrzeuges*
- Daten über die Funktionsfähigkeit (Zustandsüberwachung) der Sensoren*
- Daten über Fernbefehle, die die Bewegung des Fahrzeuges beeinflusst haben.*

*Diese Daten sollen es ermöglichen, herauszufinden, wer oder was das Testfahrzeug gesteuert hat, als es zu einem Vorfall gekommen ist. Die Daten müssen sicher gespeichert und auf Anfrage in lesbarer Form den zuständigen Behörden ausgehändigt werden. Gleiches gilt für ‚kritische Situationen‘. Es wird erwartet, dass Testbetreibende mit den ermittelnden Behörden ausnahmslos kooperieren.*

*Testfahrzeuge können auch mit einem Video- und Audioaufzeichnungssystem ausgestattet werden, das entbindet die Testbetreibenden jedoch nicht von ihrer Pflicht, die zuvor genannten Daten mittels Datenaufzeichnungsgerät aufzuzeichnen. Etwaige Datenschutzrechtliche Bestimmungen sind dabei dennoch stets zu beachten.“ [29]*

Die Firma Virtual Vehicle setzt diese Forderung nach einem High-End-EDR bei der Erprobung automatisierter Fahrfunktionen in ihrer Fahrzeugflotte durch den Einsatz eines sehr leistungsfähigen Datenloggers um. Dieser verfügt insbesondere für die Verarbeitung der datenmäßig sehr großen Videosignale über mehrere Grafikchips des Herstellers NVIDIA (vergleiche Abbildung 4).

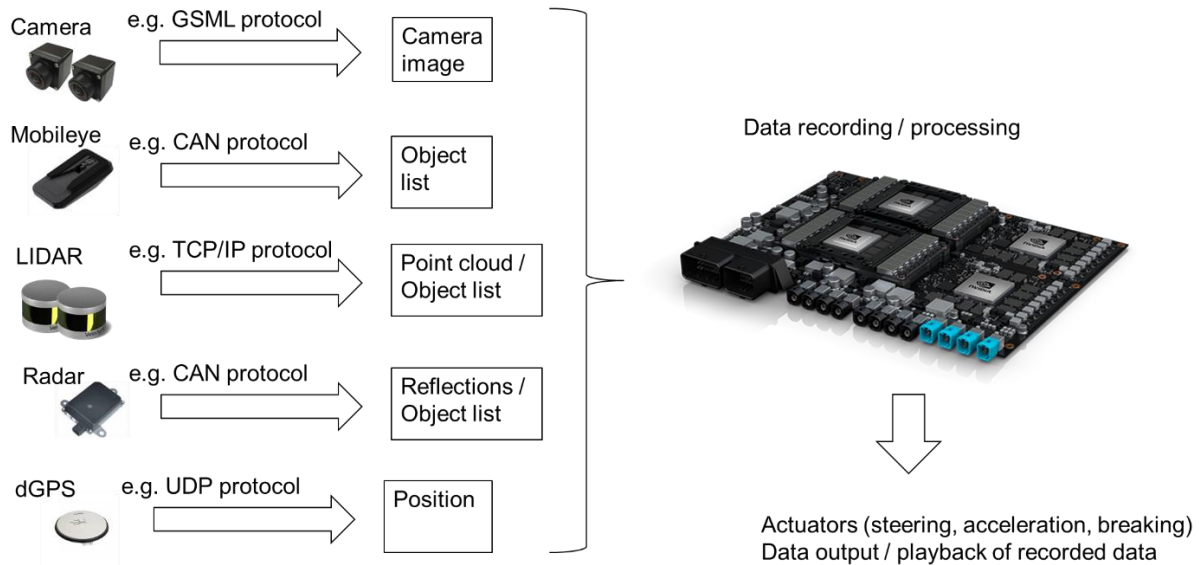


Abbildung 4: Sensor- und Datarecording-Konzept der Firma Virtual Vehicle [30]

### 3.1.3.3 Real-time-Monitoring der Traktionsbatterie in China

Entsprechend der *Technical specification of remote service and management system for electric vehicles Part 3* [31] ist es seit 2016 in der Volksrepublik China verpflichtend vorgeschrieben, dass bei Inverkehrbringen eines Elektrofahrzeuges über eine vordefinierte Schnittstelle diverse Parameter der Traktionsbatterie in Echtzeit von den Fahrzeugherstellern zur Verfügung gestellt werden müssen. Am Beispiel eines Audi E-tron ist in Anhang I eine Liste mit 107 Parametern enthalten, die über diese Schnittstelle in Echtzeit an ein entsprechendes Over-the-Air(OTA)-Modul übertragen werden. Diese Daten werden bei entsprechender Konnektivität der Luftschnittstelle direkt an Regierungsserver übertragen [31]. Die meisten der darin angeführten Parameter beziehen sich auf den Zustand der Traktionsbatterie und werden hauptsächlich durch das Batteriemanagementsystem (BMS) zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus werden jedoch auch globale Fahrzeugdaten wie GPS-Position des Fahrzeuges, Geschwindigkeit und Richtung des Fahrzeuges, die entsprechend über andere Steuergeräte an die definierte Schnittstelle übertragen werden, gespeichert. Diese Echtzeitdaten können speziell bei einer nicht ausgelösten Triggerung eines EDR, beispielsweise bei einem seitlich streifenden Anstoß an einen Fußgänger, wertvolle digitale Spuren für die forensische Unfallrekonstruktion bereitstellen.

Das in China vorgeschriebene Realtime Monitoring ist mit der Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) in der EU [32] an mehreren Stellen nicht in Einklang zu bringen, weshalb nach Kenntnisstand des Autors auch außerhalb Chinas dieses System bis dato keine Anwendung findet. Aus technischer Sicht ergeben sich eine Reihe von Vorteilen, wenn auf Echtzeitdaten

zurückgegriffen werden kann. Im Hinblick auf eine intelligente Ladeinfrastruktur (Smart Grid) besteht dabei für die entsprechenden Regierungsstellen die Möglichkeit, den Ladezustand der Gesamtfahrzeugflotte von Elektrofahrzeugen in China in Echtzeit bewerten zu können. Bei niedrigem Ladezustand könnten daraus z. B. Strategien für die Zuschaltung zusätzlicher Kraftwerkskapazitäten entwickelt werden. Der technische Vorteil für die Unfallrekonstruktion ist bei diesem Konstrukt darin zu sehen, dass durch die permanente Aufzeichnung der Daten bei jedem Unfall, Beinahe-Unfall oder sonstigem Ereignis digitale Spuren vorhanden sind. Mit diesen ließen sich prinzipiell auch Unfälle aufklären, bei denen die vordefinierten Triggerschwellen für EDR nicht erreicht werden bzw. wenn nach einem unfallbedingtem Fahrzeugbrand die lediglich fahrzeugintern abgespeicherten EDR-Daten aufgrund der Brandlast vernichtet worden wären.

#### **3.2 Stand der Technik in der forensischen Unfallrekonstruktion bezüglich Fehlertoleranzen und digitaler Spuren**

Die klassische Unfallrekonstruktion beruht auf dem Ansatz, den Unfallverlauf rückwärts, beginnend bei den Endstellungen der Fahrzeuge über die Auslaufspuren bis zur Kollision zu betrachten. Diese objektiven Anknüpfungstatsachen führen auch bei einer sehr genauen Unfallstellenaufnahme und unter Zuhilfenahme moderner Berechnungstools, die für 3D-Analysen in der Regel numerische Vorwärtsverfahren nutzen [33], bei seriöser Herangehensweise zu relativ großen Toleranzen. Toleranzfelder in einer Größenordnung von +/- 10 % bezogen auf den Mittelwert der errechneten Kollisionsgeschwindigkeit sind dabei entsprechend der Berufserfahrung des Autors regelmäßig in Ansatz zu bringen. Unter einer sehr genauen 3D-Unfallstellenaufnahme wird in diesem Zusammenhang eine dem derzeitigen Stand der Technik entsprechende Unfallstellenvermessung mittels 3D-Fotogrammetrie (z. B. unter Zuhilfenahme von Drohnen oder (Stativ-)Kameras) oder Laserscanner verstanden. Dabei sind mittlerweile bei üblichen Unfallstellenausdehnungen Genauigkeiten in einer Größenordnung von ca. +/- 1cm [34] möglich. Perspektivisch ist anzunehmen, dass aufgrund der Notwendigkeit der Bereitstellung teilweise ähnlich oder noch genauerer dynamischer 3D-Karten für automatisierte Fahrfunktionen ein noch einfacherer Zugriff auf sehr genaue 3D-Daten für Unfallanalytiker gegeben sein dürfte (vergleiche [35]). Inwieweit die bisher etablierten Software-Tools für die 3D-Fotogrammetrie wie Agisoft Metashape oder Reality Capture zusätzlich durch Softwarelösungen großer IT-Player wie Google oder Apple in Verbindung mit entsprechender Hardware (z. B. Mini-Laserscannern in Tablets oder Smartphones) für diesen

Einsatzbereich Konkurrenz bekommen, ist für den Autor derzeit noch nicht vollständig absehbar. In jedem Fall ist mit einer weiteren Erhöhung der Genauigkeit bei gleichzeitig höherer Wirtschaftlichkeit für den Sachverständigeneinsatz zu rechnen.

Die oben erwähnten relativ großen Toleranzfelder bei der klassischen Unfallanalyse beruhen vor allem darauf, dass exakte Parameter bezüglich der Fahrzeugfederung und -dämpfung, der Bereifung, des Brems- und Lenkverhaltens sowie der Straßenverhältnisse in der Regel dem gerichtlich bestellten Sachverständigen nicht zur Verfügung stehen [33]. Auch die Abschätzung der bei einer Kollision umgesetzten Deformationsenergie, die oftmals als Kontrollgröße verwendet wird, ist erheblich toleranzbehaftet [36]. Überdies ist zu konstatieren, dass bei modernen Fahrzeugen in der Regel vorkollisionäre Spuren wie Bremsspuren oder andere Reifenspuren fehlen und somit Ausgangsgeschwindigkeiten und vorkollisionäres Fahrverhalten vielfach nicht belastbar rekonstruiert werden können. Auch wenn EDR-Daten aus Fahrzeugen extrahiert werden können, führen wissenschaftliche Fehlerbetrachtungen immer noch zu erheblichen Toleranzbändern [5]. Aufgrund dieser Toleranzen und fehlender digitaler Spuren ist insbesondere eine Reihe möglicher unfallursächlicher Systemeingriffe wie etwa fehlerhafte ABS-/ESP-Eingriffe oder Lenkaktionen der aktiven Lenkung bisher kaum belastbar nachzuweisen.

Einen ersten Schritt zur Integration digitaler Spuren aus dem Fahrzeug und damit einer Verringerung der Fehlertoleranzen hinsichtlich des Unfallablaufes und speziell des vorkollisionären Einlaufverhaltens stellt die verpflichtende Einführung eines EDR auf europäischer Ebene in 2022 dar. Auf dem nordamerikanischen Automarkt ist ein derartiger EDR bereits seit 2006 auf freiwilliger Basis mit einer sehr hohen Marktdurchdringung [37] in den Fahrzeugen verbaut. Auf Basis dieser jahrelangen Erfahrung zeigen Veröffentlichungen amerikanischer Unfallanalytiker [38], dass der Fehler bei den im EDR-Report angegebenen  $\Delta v$  im Allgemeinen unter 5 km/h bei einer Geschwindigkeitsänderung von weniger als 55 km/h gelegen habe. Für Kollisionen mit einer Geschwindigkeitsänderung von mehr als 55 km/h sind herstellerspezifische Fehlerquellen dafür verantwortlich, dass auch größere Fehlertoleranzen auftreten können. Untersuchungen in Europa [5] zeigen aber auch, dass es bei der angezeigten Geschwindigkeit (indicated speed) in Verbindung mit einem bremsenden Einlauf in die Kollision zu Fehlern in einer Größenordnung von 10 % und mehr in Bezug auf die tatsächlich vorliegende Kollisionsgeschwindigkeit kommen kann. Neben nicht garantierter Antwortzeiten der auf dem CAN-Bus befindlichen Sensordaten liegt diese Tatsache vor allem auch in der geringen Aufzeichnungsrate von 2 Hz begründet [11]. Vor diesem Hintergrund ist es nach wie vor für die Absicherung der im EDR abgelegten Datenpunkte notwendig, eine fundierte



Unfallanalyse mit klassischer Stoßmechanik und sachverständiger Bewertung der relevanten analogen Spurenlage vorzunehmen.

Zusätzlich zu den zumindest auf europäischer Ebene nicht bei allen Herstellern zugänglichen EDR-Daten sind europäische Unfallanalytiker bei Beteiligung moderner Fahrzeuge an Straßenverkehrsunfällen häufig mit einer Vielzahl von darüber hinausgehenden, nicht standardisierten digitalen Spuren konfrontiert, die zunehmend in juristische Prozesse eingeführt werden.

#### 3.2.1 Allgemeiner Überblick über Quellen für digitale Spuren

Eine Übersicht über die Vielzahl unterschiedlicher, sich teilweise widersprechender digitaler Daten, die im Zusammenhang mit einem Verkehrsunfall in nachgeschaltete juristische Prozesse eingeführt werden, zeigt Abbildung 5.

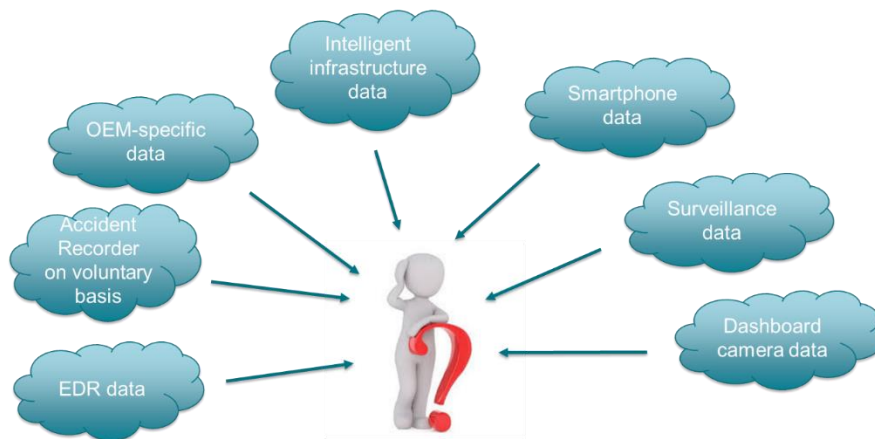


Abbildung 5: Überblick über Quellen für digitale Spuren bei der Unfallrekonstruktion [Quelle: Autor]

Neben den bereits angesprochenen EDR-Daten sind auf Fahrzeugebene auch Unfalldatenrekorder auf freiwilliger Basis in einigen Fahrzeugen verbaut. Vor allem in Deutschland sind einige Fahrzeugflotten, insbesondere Polizeifahrzeuge bzw. Fahrzeuge einiger Rettungsdienste, mit Unfalldatenspeichern (UDS) verschiedener Hersteller [39] ausgestattet. In diesen ist teilweise deutlich höher auflösendere Sensorik in Verbindung mit sensitiveren Triggeralgorithmen als bei bisher auf dem Markt befindlichen EDR-Konzepten verbaut [40]. Derartige UDS-Daten sind aktuell die valideste Grundlage für eine möglichst genaue Unfallrekonstruktion inklusive wissenschaftlicher Angabe von Toleranzen. Ein Zugriff auf fahrzeuginterne Daten wie etwa Systemkamera- oder Objektdaten ist ohne entsprechende Mithilfe des Herstellers bis jetzt nicht möglich. Der vergleichsweise hohe Preis der damit

ausgestatteten Fahrzeuge führt darüber hinaus dazu, dass nur eine sehr geringe Marktdurchdringung mit diesen Systemen gegeben ist. Versicherer gehen vermehrt dazu über, abgespeckte und damit kostengünstigere UDS-Varianten im Rahmen spezieller Pay-as-you-drive-Tarife mit Einverständnis des Kunden im Fahrzeug zu verbauen [41]. Besonders in der Schweiz ist bereits eine signifikante Anzahl dieser Unfalldatenspeicher verbaut und liefert einen Mehrwert bei der Unfallaufklärung, wenn keine EDR- oder genaueren UDS-Daten vorhanden sind [42].

Als weitere relevante Quelle für digitale Unfallspuren sind OEM-spezifische Daten zu nennen. Hersteller speichern in unterschiedlichen Steuergeräten bzw. wenn eine Over-the-Air-Anbindung des Fahrzeugs möglich ist auch auf herstellereigenen Backend-Servern in zunehmendem Maße unfallrelevante Daten. Dies geht teilweise soweit, dass ganze Videosequenzen mehrerer installierter Systemkameras an den Hersteller übertragen werden [43]. Die durch gängige Werkstatttester auslesbaren Dynamic Trouble Codes (DTC) beinhalten des Öfteren in den sogenannten Freeze-Frame-Daten, die als Randparameter beim Ablegen auftretender Fehler aufgezeichnet werden, unfallrelevante Elemente, z. B. die Fahrzeuggeschwindigkeit. In mehreren Veröffentlichungen [44–46] wird jedoch auf die Ungenauigkeiten dieser aufgezeichneten Daten hingewiesen. Da diese Daten in der Regel nicht für die Aufklärung von Verkehrsunfällen originär konzipiert wurden, sind, je nach verwendeter Fahrzeug-IT-Struktur und den damit verbundenen Latenzen beim Ablegen der Werte, teilweise auch vom Hersteller keine wissenschaftlich basierten Fehlerangaben belastbar anzugeben. Einige Hersteller wie Audi/VW und Toyota bieten neben dem standardisierten EDR auch selbst konzipierte Unfalldatenspeicher, die dezidiert die Einflüsse von Assistenzsystemen auf den Unfallablauf adressieren.

Bei Audi bzw. im gesamten VW-Konzern ist dies der sogenannte Assistenzsystemmonitor (ASM). Hauptaufgabe des ASM ist es, die Rolle und das Verhalten von Assistenzsystemen in einer Unfallsituation nachvollziehbar zu machen [26]. Wörtlich ist in der Bedienungsanleitung des Audi Q3 zu lesen: *„Zusätzlich zu den Daten, die der EDR speichert, zeichnet der ASM Assistenzsystem bezogene Daten aus einem Zeitraum von wenigen Sekunden vor dem Unfall oder der unfallnahen Situation auf. Die vom ASM erfassten Daten sind abhängig von der Ausstattung und können z. B. folgende Informationen umfassen: Statusinformationen der Assistenzsysteme (z. B. ein-/ausgeschaltet, Systemereignisse usw.), Regeleingriffe (z. B. durch ESC, ABS, Audi Presence usw.) Einstellungen der Assistenzsysteme (z. B. Geschwindigkeitseinstellungen). Um Daten aus dem ASM Speicher lesen zu können, sind spezielle Geräte und ein Zugang zum Fahrzeug oder zum ASM notwendig.“* [26] Ein ähnliches

System ist bei Toyota als vehicle control history (VCH) teilweise verbaut [47]. Da weder die einzelnen Datenpunkte noch der Zugriff auf diese Daten standardisiert sind, ist für die Extrahierung und Interpretation der Datenelemente in der Regel der Hersteller mit heranzuziehen. Dies gestaltet sich in der Gerichtspraxis teilweise sehr aufwendig und kostenintensiv (vergleiche Kapitel 5.1). Zusätzlich ist in vermehrtem Maße festzustellen, dass intelligente Infrastruktur, wie z. B. Ampelanlagen mit Induktionsschleifen und Aufzeichnungslogik bzw. Verkehrsüberwachungssysteme, unfallrelevante Daten speichern [48]. Dieser Trend wird sich prospektiv mit der Einführung von smarterer Infrastruktur wie Lidar- und Radarsensorik an Ampelanlagen noch verstärken. Beispielfhaft wird dies im Rahmen des Forschungsvorhabens In2Lab an der TH Ingolstadt im öffentlichen Verkehrsraum umgesetzt werden [49].

Eine oftmals sehr ergiebige Quelle für unfallrelevante, digitale Spuren kann ein durch die jeweiligen Unfallbeteiligten mitgeführtes Smartphone und die darin enthaltenen Daten sein. Neben Fitness-Apps und -Trackern für Fußgänger und Fahrradfahrer sind entsprechend der beruflichen Erfahrung des Autors vermehrt Apps im Umlauf, die Fahrgeschwindigkeiten und Fahrverhalten über längere Zeit aufzeichnen. Auch die von den Betriebssystemen bzw. abgeleiteten Apps wie Google Maps abgelegten Bewegungsprofile wären für Fragestellungen bezüglich des Fahrverhaltens mehrere Minuten bzw. Stunden vor der Kollision geeignet. Aufgrund der hohen datenschutzrechtlichen Hürden bzw. der teilweise ohne den Hersteller nur schwer interpretierbaren Daten werden diese digitale Spuren nach dem Verhältnismäßigkeitsgrundsatz bei der Strafverfolgung in der Regel nur bei exponierten Fällen herangezogen (vergleiche Kapitel 5.1). Im zunehmenden Maße werden Videos des Unfallablaufes, die entweder durch Dashboard-Kameras in einem unfallbeteiligten Fahrzeug oder in einem Zeugenfahrzeug bzw. durch Überwachungskameras aufgezeichnet werden, in Gerichtsprozesse eingeführt. Je nach Qualität der Kamera ist neben der Aufzeichnungsgüte vor allem die Gleichmäßigkeit der Zeitbasis ([fps] –frames per second) bei der Verwendung für die Unfallrekonstruktion kritisch zu bewerten [50].

In Summe bedeutet dies, dass, nachdem die Büchse der Pandora bezüglich der digitalen Spuren geöffnet wurde, mittlerweile in den Gerichtsprozessen zu viele, sich teilweise widersprechende Daten vorhanden sind, was prozessökonomisch erhebliche Probleme mit sich bringt. Dies gilt analog für die Verwertung der Spuren durch Versicherer im Rahmen der juristischen Bewertung von Verkehrsunfällen, die nicht zwangsläufig in ein Gerichtsverfahren münden muss. In der

Praxis bedeutet dies, dass auf alle Prozessbeteiligten, die mit der Auswertung, Interpretation und der Beurteilung der Daten befasst sind, mehr Arbeit zukommt.

Neben dem gerichtlich bestellten Sachverständigen sollen vermehrt auch Mitarbeiter der jeweiligen Fachabteilungen der Hersteller vor Gericht bezüglich der Generierung der Daten und deren Fehlertoleranzen Aussagen treffen (vergleiche Kapitel 5.1). Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, dass durch diese nicht standardisierten Daten mehr Fragen aufgeworfen als beantwortet werden. Der Ausweg aus diesem Dilemma ist ein standardisierter Eventdatenrekorder mit deutlich umfangreicheren Datenpunkten und intelligenteren Triggermethoden als dies im EDR US-amerikanischer Prägung realisiert ist [51]. Die Erwartung vieler Hersteller, wonach nach der verpflichtenden EDR-Einführung ab Juli 2022 in Europa der erhebliche Mehraufwand durch kostenlose Zuarbeiten für Gerichte im Rahmen von Verkehrsunfällen obsolet wird, ist unbegründet, solange in den Fahrzeugen selbst bzw. in der Infrastruktur deutlich wertvollere und genauere Daten gespeichert werden, wie dies in den vorgesehenen EDR-Konzepten der Fall ist. Entsprechende Lösungsansätze wurden unter Mitarbeit des Autors durch die Arbeitsgruppe AHEAD [17] in die informelle Arbeitsgruppe EDR/DSSAD auf UNECE-Ebene eingebracht. Die vorgeschlagenen Datenpunkte inkl. Genauigkeit und Auflösung sind im Anhang II dargestellt. Ein noch weitreichenderer Ansatz wird in der Forschungsgruppe des Autors unter Prof. Hans-Georg Schweiger an der TH Ingolstadt verfolgt. Unter der Bezeichnung Forensic EDR (FEDR) [51] wird dabei ein Konzept verfolgt, bei dem unter anderem die Einbindung von Systemkameradaten insbesondere in Verbindung mit Objektdaten eine wichtige Rolle spielt.

#### **3.2.2 Derzeitige Methoden zur Ermittlung von Positionen, Geschwindigkeiten und Trajektorien aus Fotos/Videos**

Da ein Schwerpunkt dieser Dissertation in der Entwicklung einer neuen Methode zur Analyse von Systemkameradaten in Verbindung mit Sensor(fusions)-Daten liegt, wurden bei der Literaturrecherche zum Stand der Technik auch die derzeitigen Methoden zur Ermittlung von Positionen, Geschwindigkeiten und Trajektorien aus Fotos/Videos berücksichtigt. Auf dem Fachgebiet der Unfallanalyse bzw. im Zuge der Überprüfung amtlicher Verkehrsüberwachungsmaßnahmen sind, nachzeitigem technischem Stand, eine Reihe von wissenschaftlichen Methoden publiziert, um Positionen, Geschwindigkeiten und Trajektorien aus Beweisfotos bzw. Beweisvideos zu ermitteln. Auf die für diese Arbeit relevantesten wird im Folgenden eingegangen.

### 3.2.2.1 Analytische fotogrammetrische Entzerrung von Fotos

Diese Methode wird vor allem im Rahmen der Überprüfung amtlicher Verkehrsüberwachungsmaßnahmen angewendet [52]. Der Vorteil besteht darin, dass Abstände und damit Positionen im Bild analytisch und mit expliziter Fehlerberechnung rekonstruiert werden können. Ein Beispiel verdeutlicht die dabei verwendete Vorgehensweise:

Die nachstehende Abbildung 6 zeigt die Szene mit einem PKW ähnlich wie auf einem Beweisfoto von Geschwindigkeitsmessenlagen.



Abbildung 6: Bildauswertung einer Fotografie eines stehenden Fahrzeugs [52]

In der in [52] beschriebenen Abfolge werden die Kameraparameter Schwenkwinkel, Neigungswinkel, Abstand zum Fahrzeug und Aufstellhöhe berechnet.

Kameraparameter:	
Chipgröße	$5456 \text{ Pixel} \times 3632 \text{ Pixel}$
Pixelabstand	$p = 4,30 \mu\text{m}$

Der Schwenkwinkel als Winkel zwischen Fahrbahnverlauf und Kameraausrichtung errechnet sich entsprechend unter diesen Randparametern zu:

Schwenkwinkel:	$\varphi = (19,02 \pm 0,23)^\circ$
----------------	------------------------------------

Für den Neigungswinkel  $\nu$  werden die Berechnungsformeln analog zum Schwenkwinkel angewandt. Das Vorzeichen gibt an, ob die Kamera aus der Waagerechten heraus nach unten (+) oder nach oben (-) geneigt wurde.

Neigungswinkel:	$\nu = -(1,29 \pm 0,15)^\circ$
-----------------	--------------------------------

Nach einiger Herleitungsarbeit berechnet sich der Abstand des Radaufstandspunkts der Vorderachse rechts zur in der auf Abbildung 6 eingezeichneten roten Linie auf der Fahrbahn zu:

Abstand:	$\Delta x = (0,93 \pm 0,03) \text{ m}$
----------	--

In dem hier dargestellten Beispiel befand sich der Kameranullpunkt in einer Höhe von  $(0,88 \pm 0,09) \text{ m}$  über dem Fahrbahnniveau. Der absolute Fehler für die Kamerahöhe ist mit 9 cm vergleichsweise groß. Das liegt hier an der unbekanntem Brennweite, die erst im Foto bestimmt werden kann. Bei hochwertigen Objektiven in Industriequalität mit Festbrennweiten ist die Brennweite exakt bekannt. Damit reduziert sich der absolute Fehler für die Kamerahöhe etwa um den Faktor 3. Nachvollzogen werden kann das am aktuellen Beispiel, indem der berechnete absolute Fehler für die Brennweite null gesetzt wird.

Berechnet ohne Brennweitenfehler:	
Kamerahöhe	$h = (0,88 \pm 0,03) \text{ m}$

Die Durchführung einer Bildauswertung erfordert größte Sorgfalt bei der Konstruktion der Fluchtpunkte. Wenn diese jedoch sauber erarbeitet wurden, können mit wenigen mathematischen Formeln belastbare Aussagen hinsichtlich der zu prüfenden Positionen und Abstände getroffen werden. Zusätzlich bietet diese Methode die Möglichkeit, eine analytische Fehlerrechnung basierend auf totalen Differenzialen durchführen zu können. Wenn die manuellen Konstruktionen beispielsweise durch Einsatz von künstlicher Intelligenz (KI) mit der erforderlichen Genauigkeit durchgeführt werden könnten, bietet die vorgestellte Methode

Potenzial für einen erhöhten Automatisierungsgrad bei der Rekonstruktion von Abständen und Positionen abgeleitet aus Fotos. Damit lassen sich, analog zu den Verfahrensweisen der im Weiteren vorgestellten Methoden, durch Einzelbildverfahren auch Videos und damit einhergehend Fahrzeuggeschwindigkeiten aus Videoaufnahmen auswerten.

#### **3.2.2.2 Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeit aus Videobildern und Volumetric Kinetic Mapping (VKM)**

Auf der Jahrestagung der EVU 2017 in Haarlem (NL) wurde durch Moser ein Verfahren vorgestellt, wie aus Videobildern in Verbindung mit Laserscanner-Daten die Fahrzeuggeschwindigkeit eines auf dem Video erkennbaren Fahrzeugs bestimmt werden kann [50]. Dabei wird die in einem Polizeifahrzeug installierte Dash-Cam bezüglich der Geschwindigkeit eines sich annähernden Pkws im Gegenverkehr ausgewertet. Die Vorgehensweise ist dabei so, dass zuerst die Linsenverzerrung der verwendeten Kameraoptik auf den verwendeten Videobildern korrigiert wird. Anschließend werden einzelne Videoframes bezüglich der jeweiligen Position des aufgezeichneten Pkws mit dem Kameraoptimierungsmodul in PC-Crash ausgewertet. Grundlage ist dabei eine möglichst genaue 3D-Aufnahme der Messörtlichkeit. Für die Fahrzeugpositionierung werden in diesem Fall zunächst die Radaufstandspunkte gewählt, die möglichst exakt händisch abgeschätzt werden müssen. Des Weiteren werden Ungleichmäßigkeiten bei der Videoframerate über einen entsprechenden Messaufbau gemessen und bei der Geschwindigkeitsberechnung berücksichtigt. Im vorliegenden Fall wird eine konstante Geschwindigkeit des beobachteten Pkws unterstellt, was durch eine Überblendung zwischen entzerrtem Video und virtuellem PC-Crash-Video optisch überprüft werden kann. Somit wurden nur zwei Positionen des beobachteten Pkws für die Geschwindigkeitsberechnung herangezogen, was zu einer berechneten Geschwindigkeit von  $118,6 \pm 5,3$  km/h für den aufgenommenen Pkw führt [50]. Dies entspricht einer Toleranz von  $\pm 4,5$  % auf den angegebenen Geschwindigkeitswert. In der Veröffentlichung von Kolla et al. [53] wird eine gebremste, bogenförmige Fahrbewegung eines Pkw aus den Videodaten einer fest installierten CCTV-Kamera abgeleitet. Der dabei umgesetzte Workflow ist auf Abbildung 7 zu sehen und wird als Volumetric Kinetic Mapping (VKM) bezeichnet.

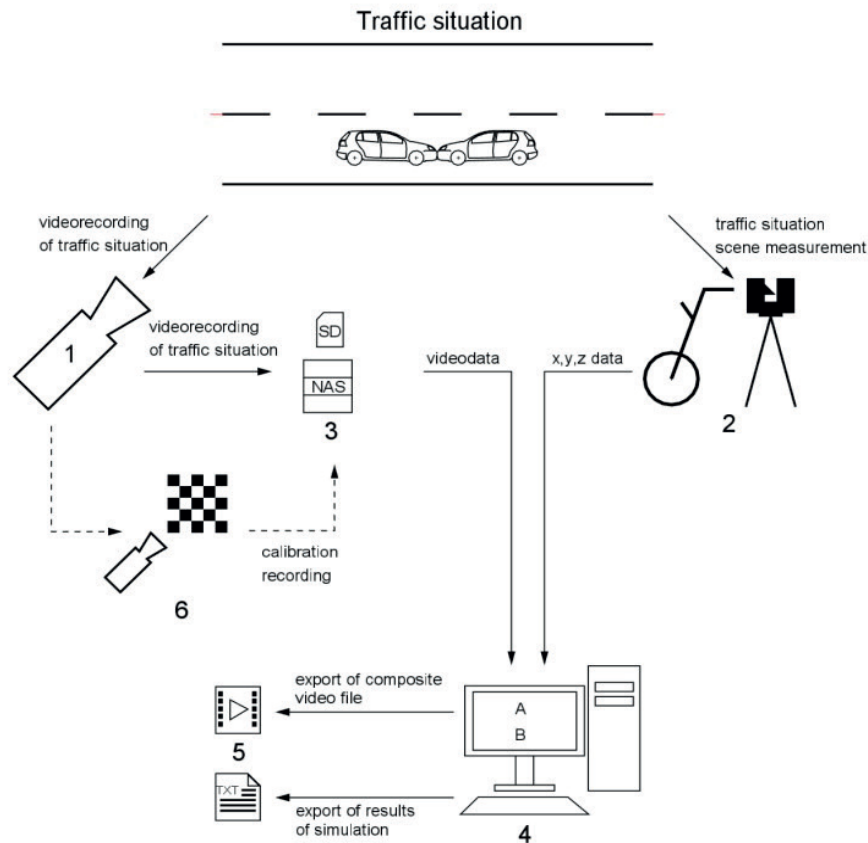


Abbildung 7: Schematische Darstellung der grundlegenden Schritte zur Erfassung und Verarbeitung von Eingabedaten für die Rekonstruktion von Straßenverkehrereignissen nach der VKM-Methode [53]

Als statische Monokamera wird bei den beschriebenen Versuchen eine GoPro Hero 4 Black eingesetzt. Dabei wird die Kameraauflösung künstlich auf einen Wert von 1024x576 Pixel bei 10 fps reduziert, um eine Worst-Case-Betrachtung hinsichtlich einer schlechten Aufnahmequalität einer CCTV-Kamera zu simulieren. Eine Berücksichtigung der Ungleichmäßigkeiten der Videoframerate wird in dieser Veröffentlichung nicht berücksichtigt. Nach Moser [50] ist dieser Faktor nicht zu vernachlässigen. Die verwendete GoPro Hero 4 Black liefert relativ gleichmäßige Frameraten, wodurch dieser Faktor bei den Versuchen von Kolla et al. zu keinen signifikanten Fehlern führte. Durch einen iterativen Ansatz bei der Korrelation des virtuellen mit den entzerrten Videos werden Unstetigkeiten bei der Videoanalyse geglättet. Durch eine hohe Anzahl von Einzelbildauswertungen wird eine sehr hohe Genauigkeit erreicht. Nach [53] liegt der Mittelwert der Abweichung bei + 0,24 km/h bei einer Standardabweichung von 0,83 km/h. Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von + 0,27 % bei einer Standardabweichung von 1,61 %. Als einfache optische Kontrolle dient das hybride Videofile (composite video file) aus der Überlagerung zwischen virtuellem und



entzerrtem Video, bei dem das Matchen des untersuchten Pkw durch das menschliche Auge relativ genau überprüft werden kann (vergleiche Abbildung 8).



Abbildung 8: Erstellung einer zusammengesetzten Videodatei nach Kolla [53]

Die deutlich höhere Genauigkeit des Verfahrens von Kolla im Vergleich zum Verfahren von Moser liegt in der weitaus höheren Anzahl ausgewerteter Zwischenpositionen und dem gewählten iterativen Ansatz bei der Generierung des virtuellen Fahrmanövers in PC-Crash. Eine wissenschaftliche Abhandlung zur Nutzung der VKM-Methode bei Dash-Cam-Videos soll nach Kolla zeitnah veröffentlicht werden.

### 4 Ziele und Thesen

Folgende Ziele sollen mit der vorliegenden Dissertation verfolgt werden:

1. Mit der Arbeit wird das Ziel verfolgt, moderne Methoden für die Gewinnung von Systemkameradaten bei neuesten Fahrzeugtypen darzustellen, die im Arbeitsalltag von Unfallanalytikern praktisch angewendet werden können.

1. These: In modernen Fahrzeugen werden teilweise Videosequenzen/Fotos von Systemkameras als digitale Spuren gespeichert, die Szenen von Verkehrsunfällen enthalten und der Unfallanalyse zugänglich gemacht werden können.

2. Ein weiteres Ziel ist es, neue Methoden für die Gewinnung von Sensor(fusions)-Daten aus modernen Fahrzeugen vorzustellen, die von Unfallanalytikern praktisch eingesetzt werden können.

2. These: In modernen Fahrzeugen werden Sensor(fusions)-Daten als digitale Spuren gespeichert, die unfallrelevant sind und der forensischen Unfallrekonstruktion zugänglich gemacht werden können.

3. Zusätzlich soll in der Arbeit gezeigt werden, wie durch eine neu entwickelte Methode der visuellen Korrelation zwischen den extrahierten Systemkamera- und Sensor(fusions)-Daten und einer verbesserten, sehr genauen 3D-Unfallstellenaufnahme eine signifikante Erhöhung der Qualität und Genauigkeit der forensischen Unfallrekonstruktion erzielt werden kann. Damit wird auch die Relevanz der standardisierten Aufzeichnung von Systemkameradaten im Rahmen eines zukünftig verpflichtenden EDR aufgezeigt.

3. These: Die Methode der visuellen Korrelation zwischen den extrahierten Systemkamera- und Sensor(fusions)-Daten und einer sehr genauen 3D-Unfallstellenaufnahme führt zu einer deutlichen Verbesserung der Genauigkeit und Aussagekraft einer wissenschaftlich fundierten Unfallrekonstruktion und zeigt die Notwendigkeit der standardisierten Aufzeichnung von Systemkameradaten im Rahmen eines zukünftig verpflichtenden EDR.

4. Das abschließende Ziel der Arbeit ist es, ein Konzept vorzustellen, wie die Ergebnisse einer derart aufgewerteten Unfallanalyse wesentlich zur Entwicklung speziell von automatisierten Fahrfunktionen bzw. zur Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur und Entschärfung von Unfallschwerpunkten beitragen können.

4. These: Es lässt sich ein ganzheitliches Konzept entwickeln, das auf den Ergebnissen einer derart aufgewerteten Unfallanalyse fußt und einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung speziell automatisierter Fahrfunktionen bzw. zur Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur und Entschärfung von Unfallschwerpunkten leisten kann.

### **5 Methoden zur Erreichung der Ziele**

Um die angesprochenen Ziele in der vorliegenden Dissertation zu erreichen, wird ein zweigeteilter Ansatz gewählt. Zum einen sollen auf Basis realer Verkehrsunfälle mit modernen Fahrzeugen effiziente Methoden zur Extraktion digitaler Spuren aus diesen Fahrzeugen dargestellt werden. Dabei werden Unfälle, bei denen Kameradaten gesichert werden konnten, solchen ohne entsprechende Videodokumentation gegenübergestellt. Der Fokus liegt dabei zusätzlich auf der Erarbeitung fortgeschrittener Methoden zur Gewinnung möglichst belastbarer digitaler Spuren für die Verkehrsunfallrekonstruktion. Zum anderen wird durch Laborversuche im CARISSMA Test- und Forschungszentrum und auf dem DEKRA Automobil Test Center am Lausitzring der Einfluss von Advanced Driver Assistant Systems (ADAS) auf den Unfallablauf näher untersucht. Ferner werden Möglichkeiten der zerstörungsfreien Extraktion von Systemkamera- und Sensor(fusions)-Daten eruiert. Dadurch ist es möglich, die gewonnenen digitalen Spuren hinsichtlich ihrer Relevanz in den Kontext einer vollumfänglichen Unfallrekonstruktion besser einzuordnen. Zusätzlich wird aufgrund eines fehlenden vollständigen Online-Zugriffs auf die Systemkameradaten in Verbindung mit den zugehörigen Sensor(fusions)-Daten bei den meisten Versuchsfahrzeugen ein selbst konzipierter Testaufbau vorgestellt. Mit diesem ist es möglich, die entwickelte Methode zur visuellen Korrelation zwischen den Systemdaten und einer sehr genauen 3D-Unfallstellenaufnahme zu verifizieren und zu validieren. Die Gesamtschau der gewonnenen Erkenntnisse mündet in die Erarbeitung eines Konzepts, wie die Ergebnisse einer derart aufgewerteten Unfallanalyse die Entwicklung speziell automatisierter Fahrfunktionen beschleunigen bzw. die Verkehrsinfrastruktur verbessern und Unfallschwerpunkte entschärfen können.

#### **5.1 Analyse realer Unfälle mit Fokus auf der Extraktion digitaler Spuren**

Anhand sehr eingehender Analysen realer Verkehrsunfälle mit Fokus auf digitalen Spuren kann praxisnah dargestellt werden, welcher enormer Umfang an digitalen Spuren bei modernen Fahrzeugen inzwischen für die Unfallanalyse zugänglich gemacht werden kann, wenn sowohl der technische Sachverständige als auch die Strafverfolgungsbehörden sämtliche Möglichkeiten ausschöpfen. Ein Schwerpunkt in dieser Arbeit wird dabei auf die Gewinnung von Systemkamera- und Sensor(fusions)-Daten gelegt. Gleichzeitig wird auf die Fehlertoleranzen der extrahierten Daten eingegangen. Es wurde bei den durchgeführten Untersuchungen versucht, so weit wie möglich die von Gomez Buquerin et al. [54]

vorgeschlagene Vorgehensweise hinsichtlich eines Prozessmodells für eine juristisch belastbare, digital-forensische Untersuchung an Automotive-Komponenten zu berücksichtigen (vergleiche Abbildung 9).

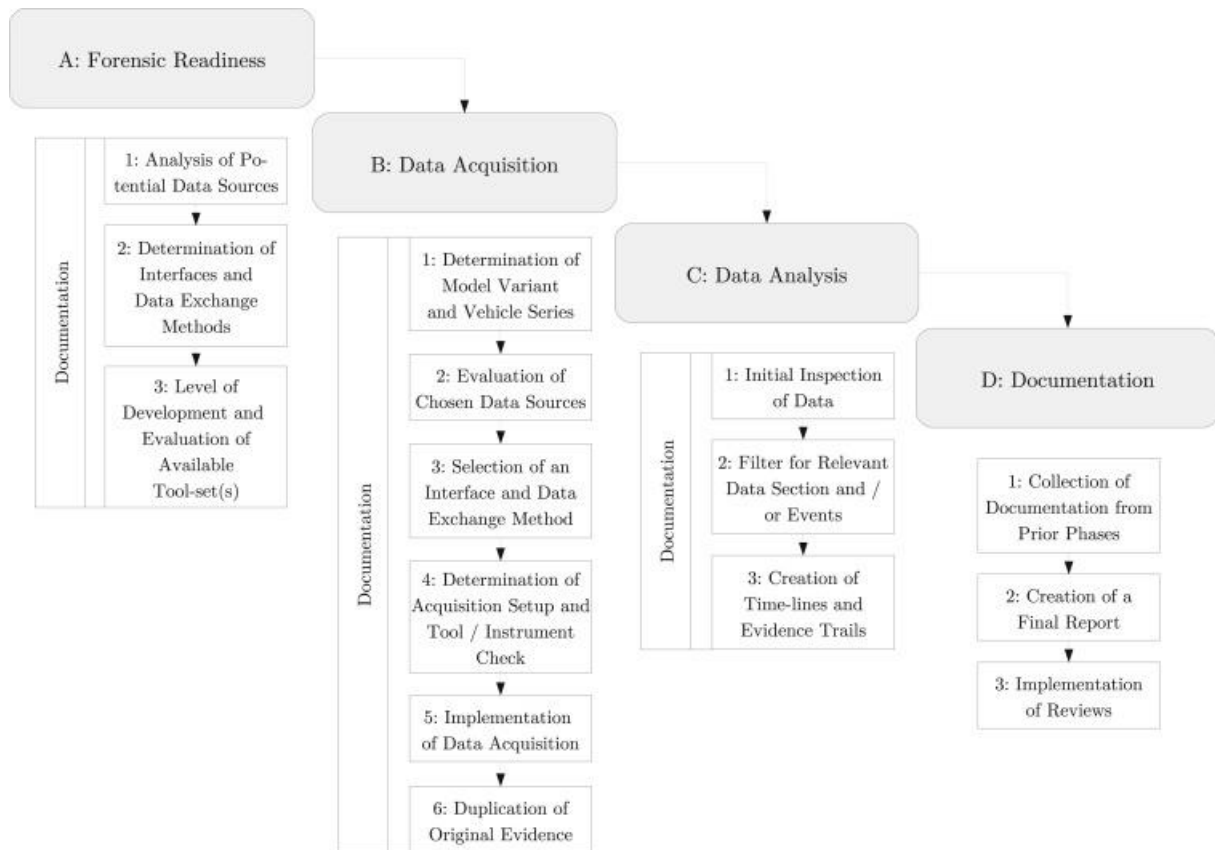


Abbildung 9: Prozessmodell für eine juristisch belastbare, digital-forensische Untersuchung an Automotive-Komponenten [54]

Insbesondere wurde beim physischen Ausbau von Speichereinheiten zunächst ein digitales forensisches Duplikat des Speicherinhalts angefertigt. Damit keine Spuren zerstört werden und um versehentliche Änderungen des Untersuchungsgegenstandes zu verhindern, wurden alle weiteren Untersuchungen ausschließlich auf einer schreibgeschützten Kopie durchgeführt. Diese Verfahrensweise wird auch von Hof et al. [55] beschrieben. Grundsätzlich wurden, wie in [54] beschrieben, zwei unterschiedliche Vorgehensweisen zur Extraktion der Daten gewählt. Es wird im Wesentlichen unterschieden zwischen Live Forensik mit Online-Akquisition der Daten (z. B. bei EDR-Auslese über Bosch CDR-Tool über OBD-Schnittstelle bei eingeschalteter Zündung) und Post-mortem-Forensik mit Offline-Akquisition der Daten (z.B. durch Auslöten von Speicherbausteinen und anschließende vom Fahrzeug getrennte Datenanalyse des Speicherinhalts). Bei Ersterem können auch Datenelemente aus flüchtigen Speichern z. B. aus flüchtigen RAM-Speicherbausteinen extrahiert werden, die bei der Offline-

Akquisition nicht mehr zugänglich wären. Bei der Post-mortem-Forensik mit Offline-Akquisition hingegen ist das Risiko ungewollter Beweismittelveränderung deutlich geringer einzuschätzen.

### 5.1.1 Hochgeschwindigkeitsunfall auf einer Autobahn mit einem leistungsmanipulierten BMW M4

Beim vorliegenden Verkehrsunfall handelt es sich um einen Hochgeschwindigkeitsunfall auf einer deutschen Autobahn, bei dem ein leistungsmanipulierter BMW M4 mit Erstzulassung Januar 2016 beteiligt war. Zur großräumigeren Übersicht über den Unfallablauf ist eine maßstäbliche, schematische Skizze auf Abbildung 10 visualisiert.

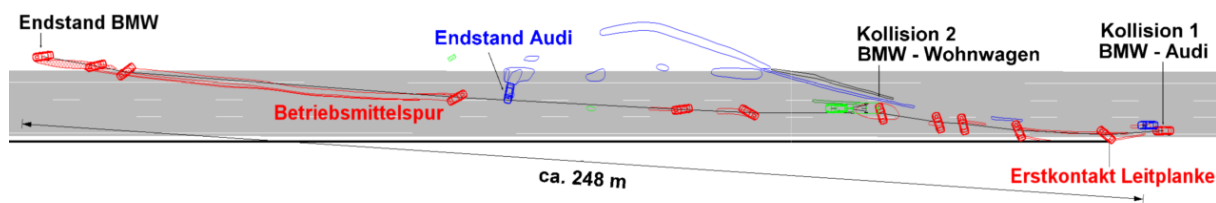


Abbildung 10: Vollständige Auslaufstrecke BMW M4 [Quelle: Autor]

Demnach fuhr der BMW leicht versetzt, annähernd längsachsenparallel und mit hoher Überschussgeschwindigkeit auf einen auf der linken Fahrspur befindlichen Audi A4 auf. Nach dieser ersten Kollision ist ein Überschlag des BMW nachvollziehbar und eine anschließende zweite Kollision des auf dem Dach rutschenden M4 gegen ein Wohnwagengespann. Im weiteren Auslauf des BMW ist ein Weiterrutschen auf dem Dach mit entsprechenden Rutschspuren und beim Abkommen von der Fahrbahn ein Aufstellvorgang des Fahrzeugs rekonstruierbar. Die Gesamtausdehnung der Unfallörtlichkeit, beginnend von ersten Schlagmarken auf der Fahrbahn bis zur Endstellung des BMW M4, beträgt ca. 248 m.

Der unfallbeteiligte BMW konnte aufgrund des Baujahrs und der europäischen Konfiguration nicht mit dem Bosch-CDR-Tool hinsichtlich relevanter EDR-Daten im Airbag Control Module (ACM) ausgelesen werden. Da der Fahrer des Audi A4 letale Verletzungen von diesem Unfall davontrug und darüber hinaus, nach anfänglichen Ermittlungen wegen Mordes nach § 211 StGB, aufgrund der Ermittlungsergebnisse der Strafverfolgungsbehörden dem BMW M4-

Fahrer Totschlag in Tateinheit mit verbotenem Kraftfahrzeugrennen gemäß §§ 212 Abs. 1, 315d Abs. 1 Nr. 3, Abs. 2, Abs. 5, 52, 69, 69a StGB zur Last gelegt wurde, wurden alle technischen Möglichkeiten ausgeschöpft, um sämtliche digitale Spuren im Fahrzeug für die Unfallrekonstruktion zugänglich zu machen. Die Vorgehensweise zur Erlangung dieser digitalen Spuren bestand zunächst darin, über einen Originalherstellertester bei einer BMW-Vertragswerkstatt mit entsprechender Anbindung des Werkstatttesters an die BMW-Zentrale einen 60-seitigen Komplettreport inklusive der Dynamic Trouble Codes (DTC) zu generieren. Die vollständigen Diagnosedaten, die auch nicht unfallrelevante Protokolleinträge beispielsweise aus dem Komfortbereich oder nachkollisionären Fehlermeldungen enthalten, umfasst 507 Seiten. Darüber hinaus wurden, mithilfe des Zulieferers des Airbag Control Moduls (ACM) der Firma Bosch, unfallrelevante Daten aus dem Airbag-Steuergerät des Fahrzeugs extrahiert. Des Weiteren wurden in Zusammenarbeit mit BMW das Motorsteuergerät des Fahrzeugs analysiert und entsprechende Veränderungen, die durch eine Tuning-App per Smartphone-Anbindung auf das Fahrzeug aufgespielt wurden, nachvollzogen. Eine Veränderung der Abgasanlage durch den Einsatz sogenannter Downpipes unterstützt die Leistungssteigerung durch die erwähnte Tuning-App. Zusätzlich wurden das eCall-Steuergerät sowie das Infotainment-Steuergerät hinsichtlich unfallrelevanter Daten ausgewertet. Die Auswertung des Infotainment-Steuergeräts erfolgte ohne Beteiligung des Fahrzeugherstellers mithilfe eines Forensik-Tools des Herstellers Berla. Weiters wurde das ABS-/ESP-Steuergerät ausgebaut und gesichert. Erste Analyse ergaben, dass bei diesem Steuergerät herstellerseitig als auch über die zur Verfügung stehenden Reverse-Engineering-Methoden keine Methoden bekannt sind, um beim konkreten Unfall relevante digitale Spuren zu extrahieren. Deshalb wurde bisher auf eine weitergehende Analyse dieses Steuergeräts verzichtet. Alle im Folgenden ausgeführten Zusammenhänge basieren, soweit keine explizite Quelle angegeben wird, auf den mündlichen bzw. schriftlichen Angaben der involvierten Entwicklungsabteilungen von BMW bzw. Bosch.

Eine Übersicht der Beschädigungen der beteiligten Fahrzeuge sowie der untersuchten Steuergeräte des BMW M4 ist auf Abbildung 11 zu sehen.



Abbildung 11: Übersicht der Beschädigungen an den beteiligten Fahrzeugen sowie Auflistung der untersuchten Steuergeräte des BMW M4 [Quelle: Autor]



Insbesondere das Airbag- und das Motor-Steuergerät wurden unter Mithilfe von BMW bzw. Bosch, aber auch durch Eigenanalysen, sehr tiefgreifend untersucht. Eine Übersichtsdarstellung der durchgeführten Untersuchungen an diesen beiden Steuergeräten ist auf Abbildung 12 visualisiert.

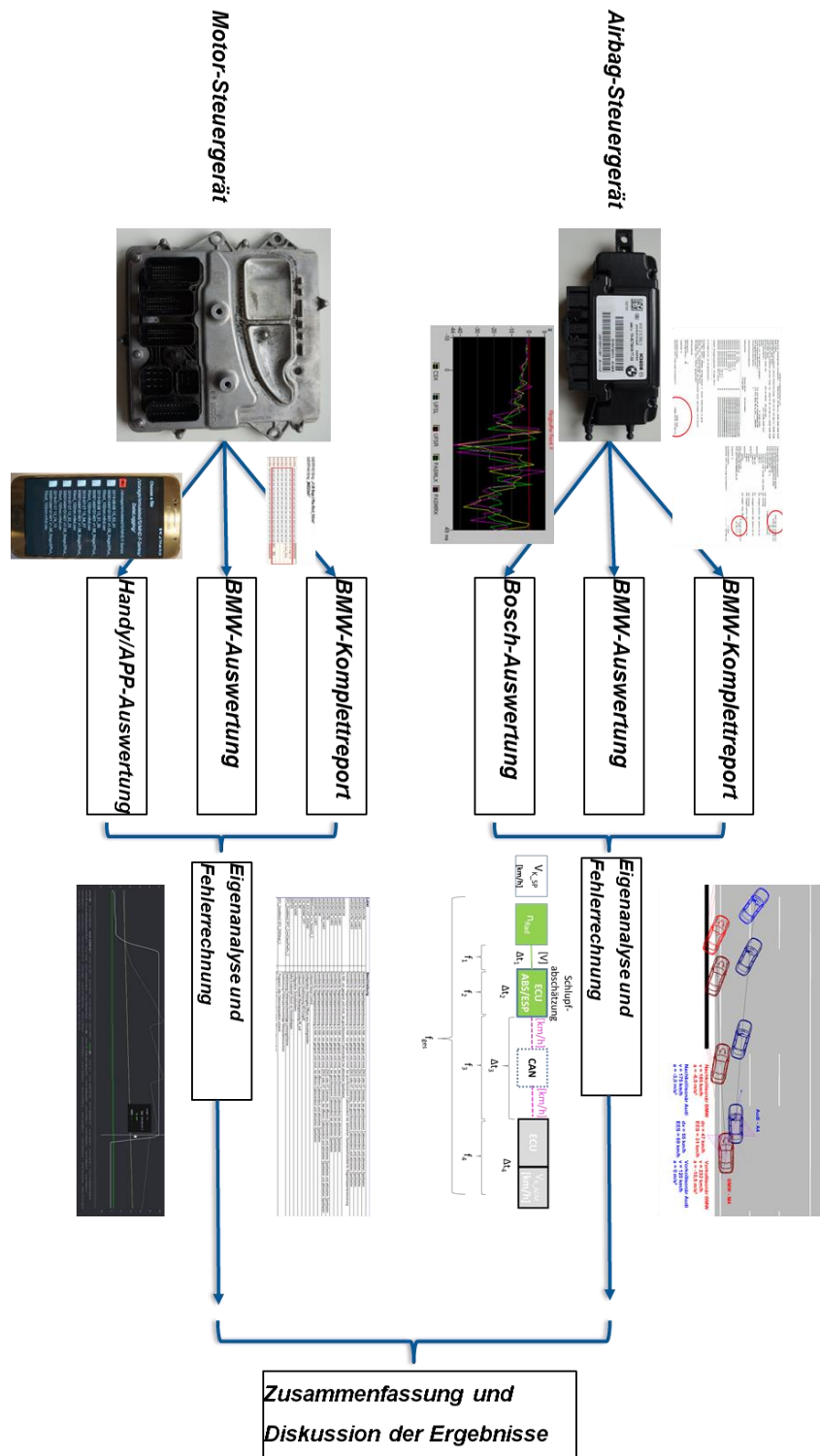


Abbildung 12: Detaillierte Darstellung der Analyseschritte beim Airbag- bzw. Motorsteuergerät des BMW M4 [Quelle: Autor]

### 5.1.1.1 Komplettreport von BMW inklusive DTCs

Wie sich beim gegenständlichen Unfall herausgestellt hat, wird bei einem Auslesevorgang einer BMW-Vertragswerkstatt mit deren Werkstatttester im Hintergrund, durch den Werkstattmitarbeiter nicht beeinflussbar, eine Vielzahl von Daten aus dem Fahrzeug abgefragt, zwischengespeichert und über das Internet an den Hersteller übermittelt. Diese Daten können anschließend durch entsprechend befugte Mitarbeiter der BMW AG eingesehen und relevante Daten daraus interpretiert werden. Die Diagnosetiefe übersteigt dabei deutlich die Möglichkeiten des Original-Diagnosetools der Vertragswerkstatt. Die tiefergehenden Diagnosedaten können auch dann noch herangezogen werden, wenn das Fahrzeug nicht mehr aktiv mit dem Werkstatttester verbunden ist. Wie lange die Daten gespeichert werden, ist nicht bekannt. Der Komplettreport, der von BMW zur Verfügung gestellt wurde, umfasst insgesamt 60 Seiten und zählt neben Steuergeräten mit deren Softwareständen auch Seriennummern und Konfigurationsdaten auf.

Des Weiteren werden aktuelle Steuergeräte, Systemzeiten, Einschaltzähler, Aufzeichnungen von Beschleunigungssensoren und relevante Fehlerspeicher detailliert aufgezählt. Diese sind teilweise mit einer Vielzahl von Umgebungsdaten, sogenannten Freeze-Frame-Daten, abgespeichert. Weitere Daten in diesem Komplettreport sind beispielsweise die Umgebungsdaten zu den verschiedenen Airbag-Auslösungen. In der Auswertung wurden zwei verschiedene Ereignisse abgespeichert, die für den Unfallablauf relevant sind. Bei einer Betriebsstundenzeit (Steuergeräte-Systemzeit) von 1.667:24:20:398 [hh:mm:ss:ms] kam es zum ersten Crash-Vorgang. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde das Fahrzeug 7.267-mal gestartet. Bei einem Kilometerstand von 77.685 km und 12 Minuten 36 Sekunden nach letztmaligem Startvorgang des Motors sei es bei einer abgelegten Geschwindigkeit des Fahrzeugschwerpunktes von 232,421875 km/h zur Kollision gekommen. Des Weiteren wurde noch der Schwimmwinkel mit einem Wert von 0,195500 Grad abgespeichert, was auf einen annähernd geraden, nicht schleudernden Einlauf in das erste Kollisionsereignis hindeutet. Durch die im Airbag-Steuergerät verbauten Beschleunigungssensoren wurde ein hauptsächlichlicher Geschwindigkeitsabbau in x-Richtung von 54 km/h diagnostiziert. Das Fahrzeugsystem hat detektiert, dass das Gurtschloss des Fahrers gesteckt war, was bei der technischen Untersuchung durch signifikante Anschmelzungen am Gurtband bzw. an den Umlenklaschen verifiziert werden konnte. Demnach ist davon auszugehen, dass der Fahrer angegurtet war. Die Daten zeigen, dass ca. 10 s nach dem ersten Crash ein weiteres Ereignis abgelegt wurde. Detaillierte Daten zu diesem Event sind aus dem von BMW zur Verfügung

## 5 Methoden zur Erreichung der Ziele

gestellten Komplettreport nicht ableitbar. Die Grundlagen aus dem Komplettreport, auf denen die dargestellten Ergebnisse basieren, sind auf Abbildung 13 und Abbildung 14 visualisiert, wobei die relevanten Daten durch rote Kreise markiert sind.

```
K454373 komplettreport.txt
Aktuelle Steuergeräte-Systemzeit: 1668:54:26 (hh:mm:ss) [0x00 0x00 0x00 0x5B
0x4D 0x02]
Steuergeräte-Systemzeit letzte Fehlerlöschung: 1651:52:34 (hh:mm:ss) [0x00 0x00
0x00 0x5A 0x80 0x82]
Steuergeräte-Systemzeit letzter Power On: 1668:53:58 (hh:mm:ss) [0x00 0x00 0x00
0x5B 0x4C 0x66]
Bordzeit letzter Power On: 255.15.65535 255:255:255
Einschaltzähler: 7277 [0x00 0x00 0x1C
0x60]
Anzahl von Programmiervorgängen: 0 [0x00 0x00]
Crash-Algorithmensatz: F32 ECE 06.50.03 F03502H00001T00
FGS-Algorithmensatz: Fxx ECE 0003.00.01_REL_000104
Sicherheitslastzähler: 2

Satelliteninformation:
Satelliten Fehlerzähler Seriennummer
Telegramme
-----
Satellit Tür links 0 42010088787001155232AF01D01A2007
Satellit Tür rechts 0 42010088787001155232AD01D01A3823
Satellit B-Säule links X 0 4201001081F001155212A30168474200
Satellit B-Säule links Y 0 4201001485F001155212A30168474208
Satellit B-Säule rechts X 0 4201001081F001155212A30168474208
Satellit B-Säule rechts Y 0 4201001485F001155212A30168474208
Satellit Zentralsensor X 0 4201061001005A164A0000000000F6E9
Satellit Zentralsensor Y 0 4201051201005A164A0000000000F6E9
Satellit Zentralsensor Low g Y 0 FFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFF
Satellit Zentralsensor Low g Z 0 FFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFF
Satellit Zentralsensor Roll Achse 0 FFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFFF

Inhalt Ereignisspeicher (Primär DTC):
-----
8 Ereignis(se) in SG gespeichert:
Ereignis Nummer: 1
Ort (Nr; Text): 930904: Airbag Fahrer 1. Stufe: Widerstand zu groß
Ready Text: Testbedingungen erfüllt
Warnung Text: Fehler würde das Aufleuchten einer Warnlampe verursachen
Vorhanden Text: Fehler gespeichert

DETAILFEHLER
Häufigkeit: 1
Heilungszähler: 40
Snapshot 1:
Kilometerstand: 77685 [Km]
Absolute Zeit (Fahrzeug-Systemzeit): 34006:18:05 [hh:mm:ss]
```

```
(Steuergeräte-Systemzeit)
STAT_BETRIEBSSTUNDENZAehler_BEGINN 1667:24:38 [hh:mm:ss]
STAT_BETRIEBSSTUNDENZAehler_ENDE 0:00:00 [hh:mm:ss]
STAT_AUSSENTEMPERATUR 13 [°C]
STAT_SG_TEMP_WERT: 38 °C 88 [0-n]
STAT_SYSTEMZUSTAND F2000 [text]
Pre-drive check: not running
Startup from energy safe mode: not running
Clamp_R: on
Clamp_L: not changed within 10s before Error
qualified
Clamp_15: on
Clamp_15: not changed within 10s before Error
qualified
Engine: not running
Engine: not changed within 10s before Error
qualified
Speed: not higher than 10km/h
STAT_ZEIT_NACH_POR 0:12:36 [hh:mm:ss]
STAT_POWER_ON_ZAEHLER 7267 [-]
STAT_BATTERIESPANNUNG_AM_SG 13.10 [-]
Snapshot 2:
Kilometerstand: -1 [Km]
Absolute Zeit (Fahrzeug-Systemzeit): ---:---:--- [hh:mm:ss]
```

Abbildung 13: Auszug aus dem Komplettreport von BMW – Teil 1 [Quelle: Autor]

```
Betriebsstundenzähler (Steuergeräte-Systemzeit):: 1667:24:20:398 (hh:mm:ss:ms)
[0x00 0x01 0x65 0x09 0x54 0x42E]
Systemzeit Diagnosemaster (Fahrzeug-Systemzeit):: 34006:17:47 (hh:mm:ss) [0x07
0x4C 0x05 0x88]
Einschaltzähler: 7267 0x00 0x00 0x1C 0x63
Zeitstempel Power ON (Bordzeit vom letzten Einschaltvorgang):: 23:3:47
20/10/2019 (hh:mm:ss - dd/mm/yyyy)
0x17 0x03 0x2F 0x14 0x4F 0x00 0x63
Betriebsstundenzähler letzter Power ON (Steuergeräte-Systemzeit vom letzten
Einschaltvorgang):: 1667:12:2:000 (hh:mm:ss:ms) [0x00 0x01 0x65 0x8E 0x0F
0x00]
Km-Stand: 77684 km [0x01 0x2F 0x04]
Status Fehlerspeichersperrung/Fluchtfunktion: 11111110
Fehlerspeicher nicht gesperrt
Fluchtfunktion nicht verbaut
Energiezustand: 01001001
Normalspannung
Geschwindigkeit Fahrzeugschwerpunkt 232.421875 km/h [0x3A 0x1B]
Quergeschwindigkeit: 0 km/h [0x00]
Schwimmwinkel: 0.195500 ° [0x00 0x0A]
Lenkwinkel: ungenügend [0xFF 0xFF]
Delta-v in x- und y-Richtung: x=0xCA y1=0xF y2=0x10
Delta-v-x = -54 km/h
Delta-v-y = +19 km/h
Delta-v-y2 = +16 km/h
Maximaler lateraler Rollwinkel: -175° 0xFF 0xD0
Systemzeit: 1667:24:20:398
Maximale laterale Winkelgeschwindigkeit: -174°/s 0xA9
Systemzeit: 1667:24:20:398
Algo-Pfad:
Richtung Schwere Zeit[ms] Bytes (HEX)
Frontal 11 15 80 00 0F
Frontal 5 25 85 00 19
Rollover 2 533 32 02 15
- 0 0 00 00 00
- 0 0 00 00 00
Info Algo Pfad: Algo Pfad Speicher war noch aufnahmefähig 0xFF
Crashrecord-Enkennung: Crashrecordsatz vollständig abgelegt 0xAA
```

```
Gurtschloss Fahrer gesteckt
Gurtschloss Beifahrer nicht gesteckt
Gurtschloss hinten links nicht gesteckt
Gurtschloss hinten rechts nicht gesteckt
Gurtschloss hinten Mitte nicht verbaut

Betriebsstundenzähler (Steuergeräte-Systemzeit):: 1667:24:30:588 (hh:mm:ss:ms)
[0x00 0x01 0x65 0xC9 0x78 0xFC]
Systemzeit Diagnosemaster (Fahrzeug-Systemzeit):: 34006:17:57 (hh:mm:ss) [0x07
0x4C 0x05 0x95]
Einschaltzähler: 7267 0x00 0x00 0x1C 0x63
Zeitstempel Power ON (Bordzeit vom letzten Einschaltvorgang):: 23:4:0
20/10/2019 (hh:mm:ss - dd/mm/yyyy)
0x17 0x04 0x00 0x14 0x4F 0x07 0xE3
Betriebsstundenzähler letzter Power ON (Steuergeräte-Systemzeit vom letzten
Einschaltvorgang):: 1667:12:2:000 (hh:mm:ss:ms) [0x00 0x01 0x65 0x8E 0x0F
0x00]
```

Abbildung 14: Auszug aus dem Komplettreport von BMW – Teil 2 [Quelle: Autor]

Sämtliche der angesprochenen digitalen Spuren sind aus physikalischer Sicht als Messwerte zu betrachten und wie jeder Messwert mit einer Fehlertoleranz zu versehen. Da es sich bei dem von BMW zur Verfügung gestellten Komplettreport nicht um ein standardisiertes Protokoll handelt, sind die angesprochenen Fehlertoleranzen nicht allgemeingültig anzugeben. Sie wären somit im Einzelfall vom Hersteller am besten in Zusammenarbeit mit dem Steuergeräte-Zulieferer anzugeben, da nur sie über die erforderliche Detailkenntnis der Messwertgenerierung und der verbauten Hardware verfügen. Im konkreten Fall konnten vonseiten des Herstellers bis dato trotz mehrfacher schriftlicher Nachfrage keine belastbaren Fehlertoleranzen angegeben werden. Dies liege, nach Angaben der involvierten Entwicklungsabteilungen von BMW, in der Komplexität der Messwertbildung, der Übertragung auf den beteiligten Bussystemen sowie der Verarbeitung und Speicherung der Werte im jeweiligen Steuergerät begründet und könne auch für den konkreten Fall nicht explizit mit einer Plus-Minus-Toleranz angegeben werden. Am Beispiel der im Komplettbericht angegebenen Fahrzeuggeschwindigkeit bei der ersten Kollision werden im Folgenden in Kapitel 5.1.1.2 Überlegungen zu Einflussgrößen der Fehlerrechnung und davon abgeleitet zu den anzusetzenden Toleranzen durchgeführt.

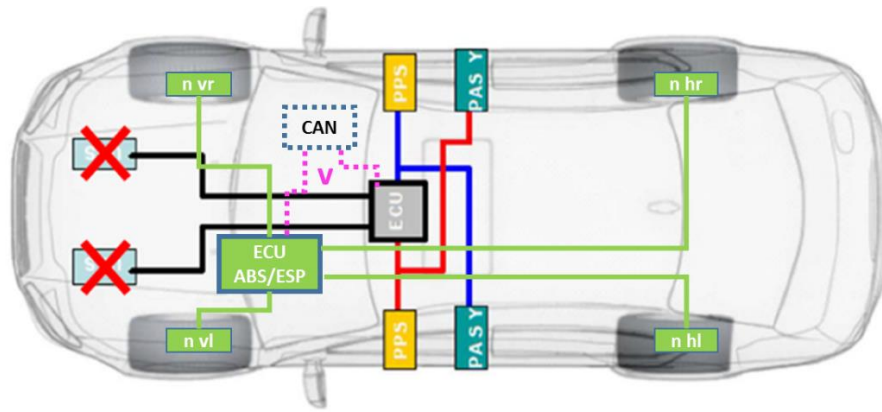
### **5.1.1.2 Auswertung des Airbag-Steuergeräts**

Das verbaute Airbag-Steuergerät vom Typ ACSM4B des Herstellers Bosch ist so aufgebaut, dass verschiedene hierarchische Systemebenen mit steigender Diagnosetiefe je nach Zugriffsrechten für eine Werkstatt, den Hersteller des Fahrzeuges oder in der untersten Ebene nur noch für den Steuergerätehersteller, in diesem Fall der Fa. Robert Bosch GmbH, zugänglich sind. Das gegenständliche Steuergerät ist nicht standardisiert und unabhängig über das Bosch CDR-Tool durch Dritte auslesbar. Zusätzlich gibt Bosch beim konkreten Steuergerät an, dass keine vorkollisionären Geschwindigkeiten aufgezeichnet werden. Bei der Auswertung des Airbag-Steuergeräts wurde ein dreistufiger Ansatz gewählt. Zunächst wurde eine elektronische Diagnose des verbauten Steuergeräts über ein Original-BMW-Diagnose-Tool in Verbindung mit der Generierung des oben angesprochenen Komplettreports im Hintergrund durchgeführt. Anschließend wurde das ausgebaute Steuergerät zusammen mit Entwicklungsingenieuren des Fahrzeugherstellers BMW untersucht. Dabei wurden im Wesentlichen die bereits aus dem Komplettreport bekannten Daten bestätigt. Im Ergebnis ergeben die Untersuchungen laut BMW, dass eine Kollisionsgeschwindigkeit des Fahrzeugschwerpunktes beim ersten Crash-Ereignis in einer Größenordnung um 232 km/h angegeben werden könne. Hierbei führt BMW aus, dass die Geschwindigkeit aus der mittleren Drehzahl der Vorder- und Hinterräder in

Drehrichtung zum Zeitpunkt der Crash-Erkennung ermittelt worden sei. Die tatsächliche Geschwindigkeit des Fahrzeugschwerpunkts kann davon abweichen. Wie groß die Abweichungen sind, könne laut BMW nicht sicher ermittelt werden. Zudem werden, basieren auf der Frequenz der zyklischen Geschwindigkeitsnachricht auf dem CAN-Bus von 50 Hz, Geschwindigkeitsdaten alle 20 ms erfasst, sodass der vom ABS-/ESP-Steuergerät berechnete und auf den CAN-Bus gelegte Geschwindigkeitswert zum Zeitpunkt der Crash-Erkennung auch 20 ms alt sein kann. Mitarbeitern von BMW war es möglich, aus dem ausgebauten Airbag-Steuergerät tiefergehende digitale Spuren auszulesen. Hierbei konnte eine laut BMW ungewöhnlich hohe Anzahl (373) sogenannter *Near-Crash-Non-Deployment* oder kurz *Near-Deployment-Events* festgestellt werden. BMW gibt an, dass keine weitere bzw. tiefergehende Auswertung der Near-Deployment-Events durch den Fahrzeughersteller durchgeführt werden könne, da dies nur noch auf Herstellerebene (Bosch) möglich sei.

Aus diesem Grund wurde anschließend von Bosch ein vollständiger Untersuchungsbericht des Airbag-Steuergeräts angefordert. In den gespeicherten Crashinformationen wurden im Crash-Counter insgesamt 375 Events gezählt. Zwei dieser Einträge sind Events, die zeitlich plausibel und anhand der erzeugten Sensorcurven dem gegenständlichen Unfallablauf zugeordnet werden können. Die anderen verbleibenden 373 Events sind, wie oben angesprochen, als Near-Deployments zu klassifizieren. Darin stellt der Algorithmus der Crasherkenkung durch die im Fahrzeug verbaute Sensorik eine Auffälligkeit fest. In der weiteren Plausibilisierung wird der Ablauf jedoch abgebrochen und der Insassenschutz nicht ausgelöst. Die Erkennung wird als Event gespeichert, jedoch ohne weitere detaillierte Sensordaten. Dennoch finden sich Umgebungsdaten zum Zeitpunkt dieses *Near-Crash-Non-Deployment*, die ausgelesen werden können. Das Steuergerät ist laut Bosch in der Lage, insgesamt fünf Events im Ringspeicher abzulegen. Der Ringspeicher wird zunächst mit fünf Events beschrieben. Kommt es zu einem sechsten Eintrag, wird der älteste Eintrag durch den neuen überschrieben, sodass sich immer nur maximal fünf Events im Speicher befinden. Im vorliegenden Steuergerät sind die Ereignisse mit den Nummern 371, 372, 373, 374 und 375 abgelegt. Informationen zu zeitlich vorgelagerten Ereignissen sind demnach nicht mehr vorhanden, da dies für diesen Steuergerätetyp nicht vorgesehen ist. Die plausibel zuordenbaren Crash-Events unterteilen sich in einen Frontcrash und einen Rose-Crash (Roll Over SENSing). Auf die drei abgespeicherten Near-Deployments wird später eingegangen. Beide dem Unfall zuordenbare Einträge sind mit einem Einschaltzähler mit dem identischen Wert von 7267 versehen. Dies ist auch gleichzeitig der letzte Wert des Einschaltzählers. Somit lässt dies den Rückschluss zu, dass das Fahrzeug seit diesen Events nicht mehr abgestellt bzw. wieder angelassen wurde, was wiederum darauf

hindeutet, dass beide Events zeitlich einander und dem Kollisionsablauf zuordenbar sind. Dieser Fakt wird zusätzlich über die jeweils abgespeicherte Steuergeräte-Operating-Time gestützt. Die durch den Crash-Algorithmus diagnostizierte Crashform ist vom Typ 5 ODB. Dabei steht die Zahl 5 für die höchstmögliche Crash-Schwere-Einstufung und als Crasheszenario ODB für Offset Deformable Barrier, vergleichbar einem Crash mit teilweiser Überdeckung gegen eine verformbare Barriere, wie dies beispielsweise bei einigen EURO-NCAP-Versuchen der Fall ist. Auf dieser Bewertungsgrundlage wurden vom Crash-Algorithmus sämtliche im Fahrzeug zur Verfügung stehende Sicherheitssysteme in festgelegter Reihenfolge gezündet. Die Fahrzeuggeschwindigkeit des ersten Crashes (Event-Nummer 374) wird mit ca. 232 km/h, wie schon im Untersuchungsbericht der BMW AG, angegeben. Für den zweiten Crash sind keine plausiblen Geschwindigkeitswerte vorhanden. Die Einträge wurden bei einem Kilometerstand von 77684 km gespeichert. Der Crashrecorder war vollständig beschrieben. Der Gurtstatus wurde für den Fahrersitz als geschlossen und für den Beifahrersitz als offen abgelegt. Das Steuergerät greift auf insgesamt fünf Sensorsignale zu. Diese rühren von fünf an unterschiedlichen Stellen im Fahrzeug platzierten Sensoren her. Die vier Satelliten-Sensoren sind ortsfest an der Karosserie angebracht und in der Lage, Beschleunigungen in der Längs-, Quer- und Hochachse (X, Y und Z-Achse) bzw. über Drucksensoren die Anstoßkonstellation zu detektieren und an das Steuergerät weiterzugeben. Beim unfallbeteiligten Fahrzeug sind keine Satelliten-Sensoren im Frontbereich verbaut. Im Steuergerät selbst ist ein weiterer multiaxialer Beschleunigungsaufnehmer zu finden. Die Darstellung auf Abbildung 15 Darstellung ist schematisch zu betrachten, wobei die eingezeichneten Positionen der Sensoren und Steuergeräte nicht zwangsläufig ihrer tatsächlichen Lage entsprechen.



- |   |       |  |
|---|-------|--|
| ECU ABS/ESP – Steuergerät ABS/ESP       | ECU   | – Airbag-Steuergerät ABS/ESP inklusive |
| CAN – CAN-Bus                           | PPS   | – Peripheral Pressure Sensor           |
| V – Fahrzeuggeschwindigkeit auf CAN-Bus | PAS Y | – Peripheral Acceleration Sensor       |

Abbildung 15: Schematische Darstellung der Platzierung der Beschleunigungssensoren des Airbagsystems und der Erfassung der Fahrzeuggeschwindigkeit [Quelle: Autor]

Am Beispiel der Kollisionsgeschwindigkeit soll verdeutlicht werden, wie eine vollumfängliche Fehlerbetrachtung der gespeicherten digitalen Spuren aus wissenschaftlicher Sicht aussehen müsste und warum dies aufgrund konzeptioneller Schwächen der vorherrschenden Elektronik-Architektur selbst durch den Fahrzeughersteller oder Steuergerätezulieferer zum Teil nicht durchführbar ist. Zum besseren Verständnis ist auf Abbildung 16 eine grafische Darstellung über die Zusammensetzung der Einzelfehler und dem daraus ableitbaren Gesamtfehler zu sehen.

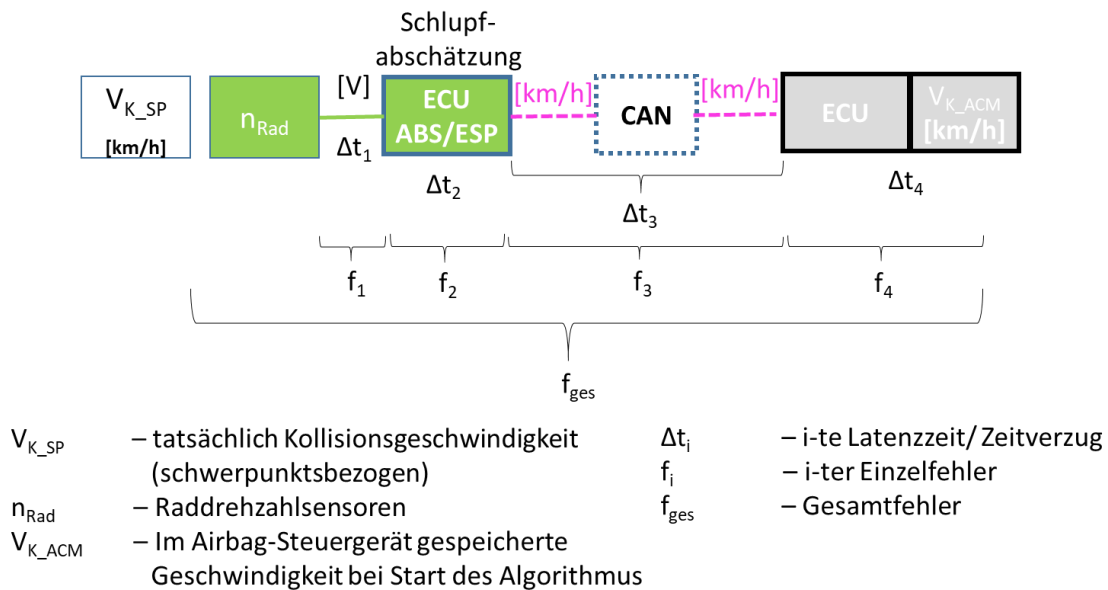


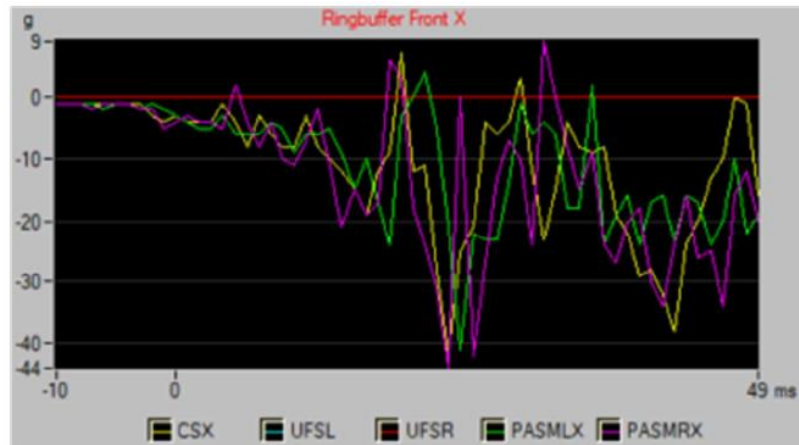
Abbildung 16: Schematische Darstellung der Einzelfehler und des sich daraus ergebenden Gesamtfehlers bezogen auf die Kollisionsgeschwindigkeit [Quelle: Autor]

Grundsätzlich setzen sich die betrachteten Fehler aus Mess- bzw. Berechnungsfehlern und Fehlern, die sich aus den zeitlichen Latenzen ergeben, zusammen. Die ursprüngliche Messwertquelle der im Airbag-Steuergerät abgelegten Geschwindigkeit bei Start des Crash-Algorithmus stammt von den Drehzahlsensoren der Räder. Diese liefern ein analoges Spannungssignal. Anschließend wird dieses Signal im ABS/ESP-Steuergerät durch einen Algorithmus verarbeitet, der unter anderem eine Schlupfabschätzung der Räder beinhaltet und auch bei unterschiedlichen Raddrehzahlen der Räder eine schwerpunktbezogene Geschwindigkeitsschätzung des Fahrzeugs durchführt. Bei dieser Abschätzung fallen auch Fehler aufgrund von Abweichungen zwischen den im Algorithmus verwendeten Parametern und den tatsächlichen, teilweise verschleißbehafteten Gegebenheiten an (z. B. Veränderung des Radumfangs durch Profilverschleiß). Das digitale, gerundete Geschwindigkeitssignal wird auf den CAN-Bus gelegt und dort vom Airbag-Steuergerät abgegriffen, wo es bei Start des Algorithmus nach einer Latenzzeit von  $\Delta t_4$  in den internen EEPROM geschrieben wird. Dabei erfolgt üblicherweise eine Vorverarbeitung zunächst im RAM, da der EEPROM nur seitenweise beschrieben werden kann (z. B. 32-Byte bei EEPROM Typ M95320-W [56]). Es ist festzuhalten, dass es sich bei Fahrzeugkollisionen um hochdynamische Vorgänge handelt, die auch innerhalb weniger Millisekunden zu relevanten Geschwindigkeitsänderungen führen können. Aus einer Vielzahl von Crashversuchen, die im schweizerischen Waldhaus durch DEKRA, AXA und zeitweise auch im Rahmen der AREC-Veranstaltungen (Accident Reconstruction Conference Group) durchgeführt wurden, lässt sich ableiten [57], dass je nach Kollisionstyp der wesentliche Energieaustausch typischerweise in einer Größenordnung zwischen 80 und 150 ms stattfindet. Deshalb sind auch die Latenz- oder Verzugszeiten  $\Delta t_1$  bis  $\Delta t_4$  zu bewerten. Durch diese Herangehensweise wird deutlich, dass die Einzelfehler oftmals gar nicht allgemeingültig bestimmt werden können, insbesondere wenn komplexe Algorithmen oder Bussysteme mit nicht garantierten Antwortzeiten und Priorisierungsschemata involviert sind. Wie die Zusammenarbeit mit BMW und Bosch beim gegenständlichen Unfall zeigt, sind auch die Fahrzeughersteller und Steuergerätezulieferer nicht in der Lage, die oben beschriebene detaillierte Fehlerrechnung auszuführen. Bus-Architekturen mit deterministischem Zeitverhalten, wie FlexRay oder Ethernet, böten die Möglichkeit einer zuverlässigeren Fehlerrechnung, was bei zukünftigen EDR-Konzepten berücksichtigt werden sollte. Die folgenden Ausführungen zur größenmäßigen Abschätzung der Einzelfehler soll vor diesem Hintergrund als Grundlage dienen, um die dominanten Fehler zu identifizieren und damit eine möglichst praktikable Fehlerrechnung auch ohne exakte Kenntnis aller vorgestellter Einzelfehler beispielsweise durch einen unabhängigen Sachverständigen zu ermöglichen. Die



analoge Signalübertragungslatenz  $\Delta t_1$  ist gegenüber den übrigen Latenzen als vernachlässigbar gering einzustufen. Die steuergeräteinternen Verzugszeiten  $\Delta t_2$  und  $\Delta t_4$  sind ohne detaillierte Kenntnis der Programmierabläufe nicht sinnvoll eingrenzbar. Darüber hinaus ist der konkrete Unfallablauf, im gegenständlichen Fall also eine vorkollisionäre Vollbremsung mit entsprechendem Schlupfniveau, zu berücksichtigen. Seitens BMW wurde beim untersuchten Unfall die Latenzzeit  $\Delta t_3$ , die im Wesentlichen durch die Taktung der Geschwindigkeitsnachrichten auf dem CAN-Bus von 50 Hz bestimmt sein soll, als einzig dominante Fehlerquelle angegeben. Das bedeutet, dass alle 20 ms ein neuer Geschwindigkeitswert auf den Bus geschrieben wird. Bei einer maximalen Fehlerbetrachtung führt dies dazu, dass ein Geschwindigkeitswert im Airbag-Steuergerät abgespeichert wird, der bereits vor 20 ms vom ABS/ESP-Steuergerät auf den CAN-Bus geschrieben wurde. Bei einer in Ansatz gebrachten maximalen Vollbremsverzögerung des BMW M4 von  $10,5 \text{ m/s}^2$  [58] ergibt sich damit ein Einzelfehler von  $-0,8 \text{ km/h}$ . Dieser Fehler wirkt sich im konkreten Fall immer in der Form aus, dass eine höhere Geschwindigkeit gespeichert wird als tatsächlich vorlag. In verschiedenen Literaturquellen wird als weiterer, noch deutlich relevanter Einzelfehler  $f_2$  angegeben [5, 59]. Bei kurz vor der Kollision eingeleiteten Vollbremsung sind dabei Abweichungen zwischen der im Airbag-Steuergerät abgelegten Geschwindigkeit bei Algorithmusstart zur tatsächlichen Kollisionsgeschwindigkeit in einer Größenordnung von ca. 10 % bezogen auf den Wert im Steuergerät nachweisbar. In diesen Veröffentlichungen wird die fehlerhafte Schlupfabschätzung durch das ABS-/ESP-Steuergerät als mögliche Ursache für diesen Effekt vermutet. Nach Dafürhalten des Autors ist es fraglich, ob der beschriebene Fehler allgemeingültig auf alle Fahrzeug- und Steuergerätehersteller anzuwenden ist. Beim untersuchten Unfall ist, entsprechend den Angaben der Beteiligten als auch basierend auf der Spurenlage, eine Bremsausgangsgeschwindigkeit von möglicherweise über 300 km/h denkbar und es ist in jedem Fall von einer längeren Bremsphase vor der Kollision auszugehen. Seitens BMW wird in dieser konkreten Unfallsituation nicht von einer derart hohen Fehlschätzung des Schlupfniveaus ausgegangen, zumal sich im Laufe der Vollbremsung ein quasi stationärer Zustand einpendelt. Vor diesem Hintergrund und unter Berücksichtigung der oben aufgezeigten Einzelfehlermöglichkeiten wird von BMW beim gegenständlichen BMW M4 als maximale Toleranz lediglich die Toleranz des angeblich dominanten Fehlers  $f_3$  von  $-0,8 \text{ km/h}$  angesehen. Ob dies zutreffend ist, müsste am besten durch entsprechende Versuche geklärt werden, die bis dato noch nicht durchgeführt werden konnten. Da beim konkreten Unfall des BMW M4 kein standardisiertes EDR-Protokoll aus dem Airbag-Steuergerät ableitbar war, beruhen alle Angaben zu den angegebenen Einzelfehlern auf den Aussagen der involvierten BMW- bzw.

Bosch-Entwicklungsingenieure. Prinzipiell trifft die dargelegte Fehlerbetrachtung auch bei EDR-fähigen Airbag-Steuergeräten zu. Hier finden sich dann im Protokoll unter dem Abschnitt *Data Limitations* oftmals Angaben zu Latenzzeiten im Airbag-Steuergerät. Es wird zusätzlich häufiger angegeben, dass es sich bei der abgelegten Geschwindigkeit um die im Kombiinstrument angezeigte Geschwindigkeit (indicated speed) handelt, einhergehend mit entsprechenden Toleranzen [60]. Dass mitunter ein erheblicher zeitlicher Versatz zwischen dem vom CAN-Bus abgegriffenen Geschwindigkeitswert und der physischen Speicherung auf entsprechenden Speichermedien besteht, zeigt beim untersuchten Unfall auch folgender Umstand. Der im Motorsteuergerät hinterlegte Geschwindigkeitswert, bei dem die Pluspol-Absprengung der 12V-Batterie erfolgt sein soll, ist mit 264 km/h angegeben. Laut BMW sei der Wert von 232 km/h im Airbag-Steuergerät als Wert für die Kollisionsgeschwindigkeit heranzuziehen und die Differenz von 32 km/h beruhe auf den angesprochenen Latenzzeiten. Diese würden sich unter Berücksichtigung der oben verwendeten Vollbremsverzögerung von  $10,5 \text{ m/s}^2$  auf einen Wert von rechnerisch  $\Delta t = 0,85 \text{ s}$  summieren, was im Vergleich zu den übrigen Latenzzeiten als sehr hoch erscheint. Der Wert ist aber auf Basis der dem Autor zugänglichen Daten im konkreten Fall auch nicht ausschließbar. Nachweisbar sei mit diesem Freeze-Frame-Datum laut BMW, dass der BMW M4 in der Annäherung irgendwann die Geschwindigkeit von 264 km/h innehatte. Die übrigen Einzelfehler aus Abbildung 16 werden nach Kenntnisstand des Autors bisher nicht in den Data Limitations auf dem Markt befindlicher EDR-Protokolle thematisiert. Beim vorliegenden Unfall wurden durch das Airbag-Steuergerät nach Angaben von Bosch 10 ms vor dem diagnostizierten Crash und 49 ms nach diesem Beschleunigungswerte im Ringspeicher abgelegt. Wie Abbildung 17 entnommen werden kann, wurde das Fahrzeug bereits vor dem eigentlichen Crash verzögert. Dies kann durch eine eingeleitete Vollbremsung erklärt werden. Die dabei erzielte Verzögerung dürfte in einer Größenordnung um 1 g liegen. Der genaue Wert ist auf den zur Verfügung gestellten Grafen nicht genauer ablesbar und wurde auch von Bosch nicht genauer angegeben.

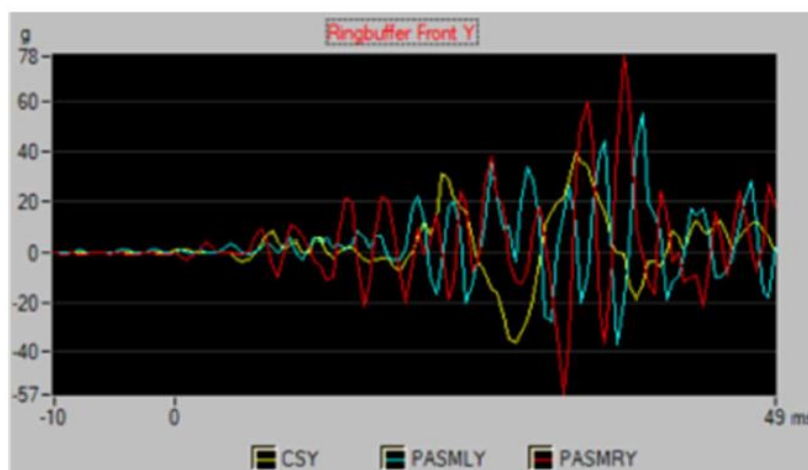


Longitudinal acceleration

Yellow: the ECU internal X-Sensor Signal; Green: PASMLX Signal; Purple: PASMRX Signal

Abbildung 17: Screenshot der Längsverzögerung Crash 1 aus Werksdiagnosetool von Bosch [Quelle: Autor]

Eine nähere Auswertung der Längsverzögerung war nicht möglich, da die zugrunde liegenden Rohdaten nur in verschlüsselter Form übersandt wurden und die notwendigen Entschlüsselungsdaten mit Verweis auf tangierte Betriebsgeheimnisse nicht zur Verfügung gestellt wurde. Wie den Sensoraufzeichnungen entnommen werden kann, betrug die größte Verzögerung in etwa -44 g bzw. +9 g in Längsrichtung und -57 g bzw. +78 g in Querrichtung (siehe Abbildung 18).



Lateral acceleration

Yellow: the ECU internal Y-Sensor Signal; Blue: PASMLY Signal; Red: PASMRY Signal

Abbildung 18: Screenshot der Längsverzögerung Crash 1 aus Werksdiagnosetool von Bosch [Quelle: Autor]

Da die Genauigkeit der Werte und die verwendete Filterung nicht bekannt gegeben wurde, sind diese Aufzeichnungen kritisch zu hinterfragen. Der virtuell rekonstruierte Unfallablauf mit dem Tool PC-Crash legt beispielsweise höhere Längs- als Querverzögerungen nahe. Durch die nur wenige Millisekunden auf das Fahrzeug wirkenden, relativ niedrigen Beschleunigungen ist aus technischer Sicht nachvollziehbar, dass der BMW-Fahrer als Insasse nur leicht verletzt wurde. Der Insasse des gegnerischen Audi hingegen trug tödliche Verletzungen davon. Diese Tatsache liegt im Wesentlichen in den letalen Kopfverletzungen des Audi-Fahrers durch den Kopfanprall an den inneren Dachholm im Bereich der B-Säule auf der Fahrerseite im Zuge des Unfallablaufs mit Überschlag des Audis im Böschungsbereich begründet. Weiterhin wurde von Bosch ein Diagramm zur Verfügung gestellt, das die Winkelgeschwindigkeit um die Längsachse in einen Zeitraum von -100 ms bis 1.090 ms vor bzw. nach dem Roll-Over-Event des BMW aufzeigt (siehe Abbildung 19).

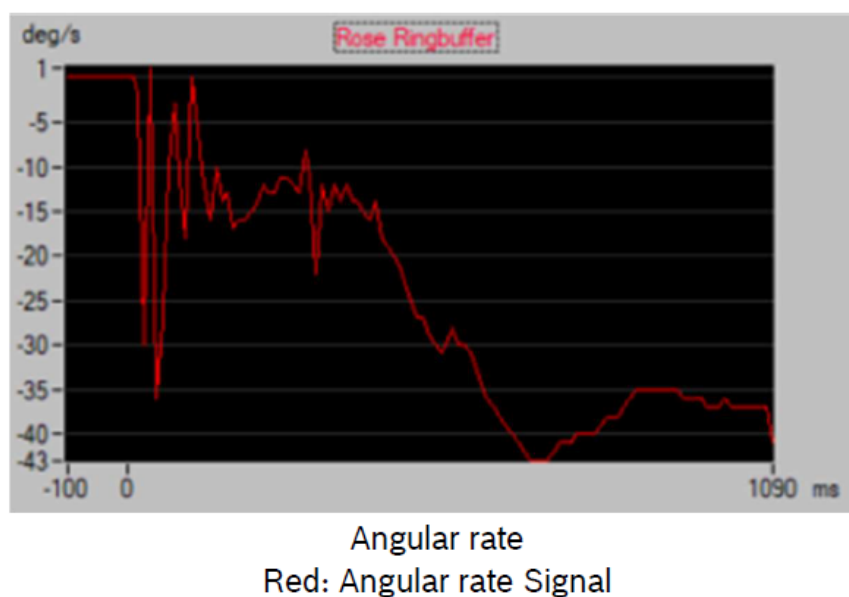
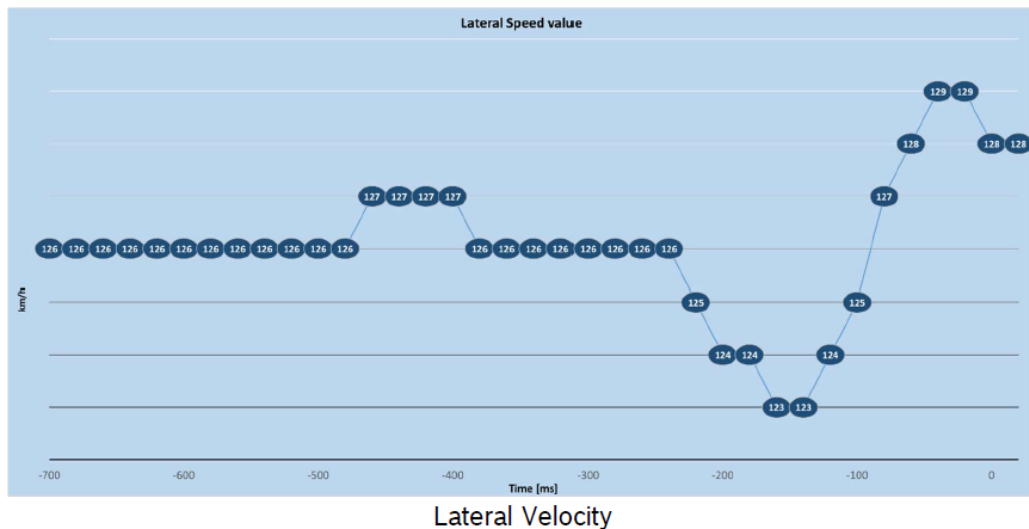


Abbildung 19: Screenshot der Winkelgeschwindigkeit um die Längsachse Crash 1 aus Werkstdiagnosetool von Bosch [Quelle: Autor]

Dem Diagramm lässt sich entnehmen, dass die Winkelgeschwindigkeit vor dem Einlauf in die Kollision annähernd 0 %/s betrug, was wiederum auf einen Einlauf ohne großen Wank- oder Rollwinkel in die erste Kollision rückschließen lässt. Das im Auswertebereich von Bosch dargestellte Geschwindigkeitsprofil der Quergeschwindigkeit über den Zeitraum von -700 ms bis 0 ms (siehe Abbildung 20) lässt sich dem ersten Crash (Crash gegen den Audi A4) nicht plausibel zuordnen, obwohl dies durch die involvierten Entwicklungsingenieure explizit so angegeben wurde.



Lateral Velocity  
 Blue: the Lateral speed value Signal  
 Lateral Velocity additional information: after the Crash at the time of 0 ms it was sent invalid data to the Airbag ECU, there is no available data after 0 ms.

Abbildung 20: Quergeschwindigkeit vermutlich bei Überschlag-Event des BMW – in Bosch-Untersuchungsbericht zu Crash 1 gehörig [Quelle: Autor]

Dieses Quergeschwindigkeitsprofil korrespondiert im Abgleich mit der an der Unfallstelle vorgefundenen Spurenlage am besten mit dem Überschlag-Vorgang des BMW als Trigger kurz nach der ersten Kollision mit dem Audi. Im Bosch-Untersuchungsbericht werden diese beiden Ereignisse in Crash 1 zusammengefasst. Dementsprechend ist je nach Graf als Time Zero entweder der Algorithmusstart ausgelöst durch die Frontalkollision zwischen BMW und Audi bzw. ausgelöst durch das Roll-Over-Event anzusehen. Der vom Fahrzeug diagnostizierte zweite Crash wäre dann dem Aufstellvorgang des BMW zuzuordnen, als dieser vom Dach wieder auf die Räder im Böschungsbereich nach dem Abkommen von der Fahrbahn gedreht wurde. Aufgrund der Tatsache, dass das Fahrzeug nach dem Überschlag auf dem Dach auf der Fahrbahn gerutscht ist, wurden unterschiedliche Raddrehzahlen an den einzelnen Rädern sensiert, was im Resultat zu einer unplausiblen Geschwindigkeit führt und als 0 km/h im zweiten Crash ausgegeben wird. Ebenfalls ist dadurch erklärbar, warum auf Abbildung 20 nach Time Zero keine valide Quergeschwindigkeit angegeben werden kann. Die aufgezeichnete Quergeschwindigkeitskomponente von 123 bis 129 km/h korrespondiert bei vektorieller Betrachtung mit den Ergebnissen der durchgeführten klassischen Kollisionsanalyse, wie sie auf Abbildung 21 dargestellt ist.

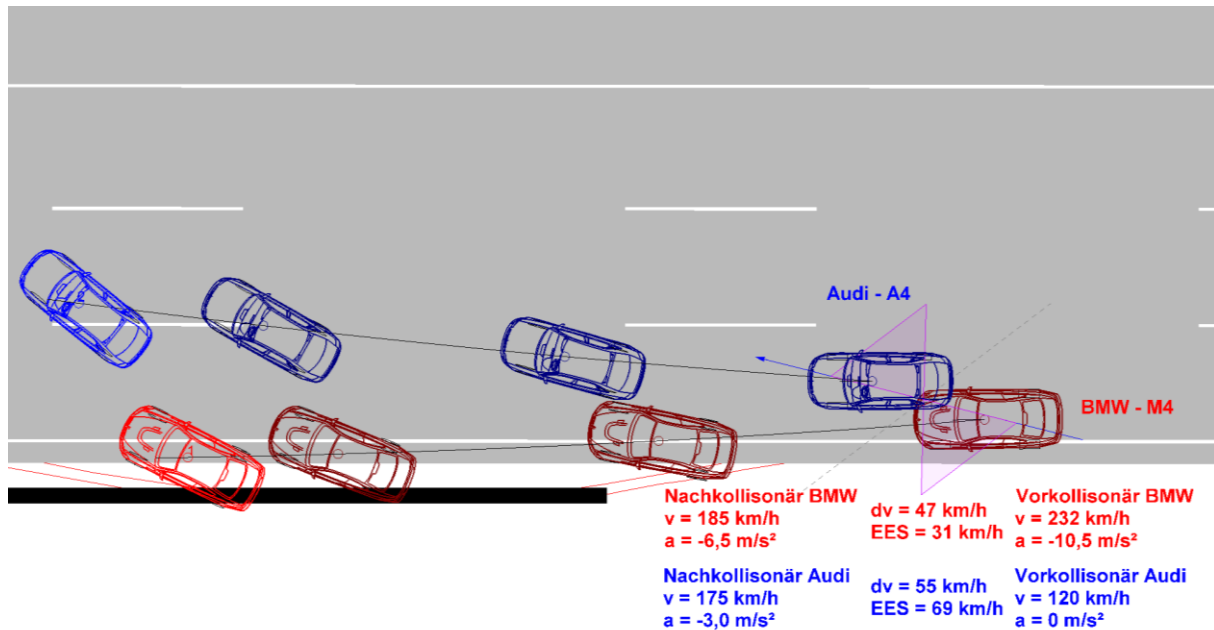
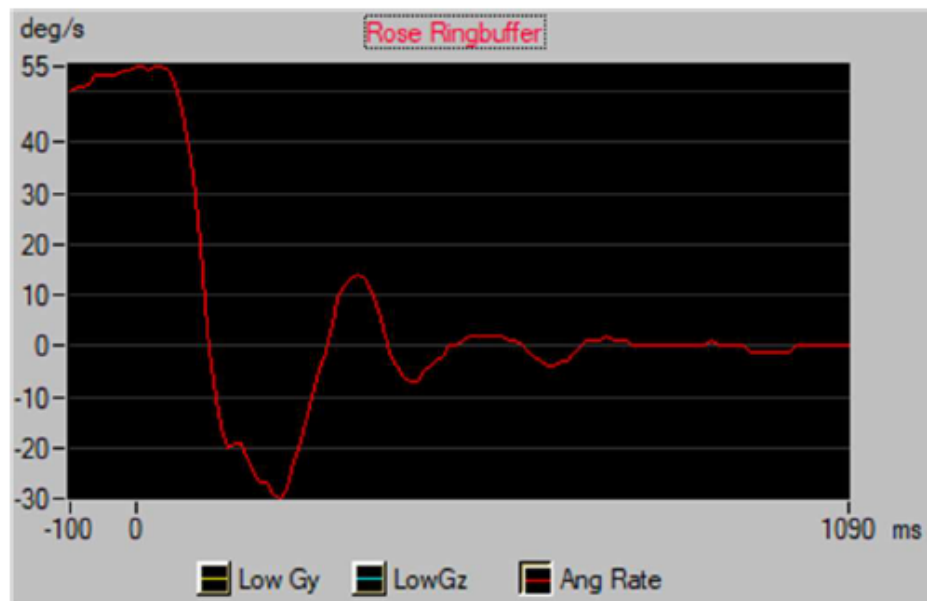


Abbildung 21: Klassische stoßbasierte Kollisionsanalyse der ersten Kollision zwischen BMW und Audi unter Berücksichtigung des Leitplankenanpralls des BMW [Quelle: Autor]

Zu beachten ist, dass diese Quergeschwindigkeitswerte laut Bosch Berechnungen aus der diagnostizierten Crash-Geschwindigkeit kombiniert mit den mathematisch integrierten Beschleunigungswerten zusätzlich vektoriell addiert mit den sensierten Drehwinkelgeschwindigkeiten darstellen.

Das zweite Event mit der Nummer 375 im internen Ringspeicher zeichnet Beschleunigungsausschläge in einer Größenordnung von 1 bis 2 g auf. Nach dem ersten Event empfing das Steuergerät keine plausiblen Quergeschwindigkeitswerte mehr, wodurch kein Geschwindigkeitsprofil ausgegeben wurde. Wie der zugehörigen Drehwinkelgeschwindigkeit des Fahrzeugs um die Längsachse (Abbildung 22) zum zweiten Event entnommen werden kann, schwingt diese von 55° bis -30° und pendelt sich dann um 0° ein. Dies ist plausibel damit in Einklang zu bringen, dass das Fahrzeug in den Stillstand gerät, was wiederum auf den Aufstellvorgang des BMW unmittelbar vor dem Endstand hindeutet.



Angular rate  
Red: Angular rate Signal

Abbildung 22: Screenshot der Winkelgeschwindigkeit um die Längsachse Event 2 aus Werksdiagnosetool von Bosch [Quelle: Autor]

Das zeitlich gesehen vor dem gegenständlichen Unfallgeschehen letzte aufgezeichnete Near-Deployment-Event mit der Nummer 373 wurde nur wenige Tage vor dem in Rede stehenden Unfall am 16.10.2019 gegen 23:18 Uhr bei einer Fahrgeschwindigkeit von 46 km/h und einer gespeicherten Kilometerlaufleistung von 77019 km abgelegt. Das Event wurde laut dem Bosch-Untersuchungsbericht durch das Überschreiten festgelegter Querbeschleunigungsschwellen basierend auf Werten eines oder mehrerer Satellitensensoren ausgelöst. Das davor vom Fahrzeug diagnostizierte Near-Deployment-Event (Crash Number 372) wurde am 04.10.2019 um 17:38 Uhr bei einer Geschwindigkeit von 59 km/h und einem Kilometerstand von 75872 km abgelegt. Wiederum wurde das Event durch eine überschrittene Querbeschleunigungskomponente des Diagnosealgorithmus getriggert. Am 12.09.2019 wurde ein weiterer, nicht plausibler Seitencrash bei einer Geschwindigkeit von 36 km/h und einem Kilometerstand von 72629 km gespeichert. Auch bei diesem Near-Deployment löste eine Wertüberschreitung des Querbeschleunigungssensors die Crash-Erkennung aus. Das jeweils geringe Geschwindigkeitsniveau in einer Größenordnung von 36 bis 59 km/h in Verbindung mit einem Querbeschleunigungswert, der die Triggerschwelle überschreitet, könnte so erklärt werden, dass sich das Fahrzeug driftend fortbewegte und es im Ablauf des Fahrmanövers speziell beim Abfangen aus diesem Zustand zu den hohen Querbeschleunigungswerten kam. Diese denkbare Fahrweise in Verbindung mit dem verbauten Zubehörfahrwerk und der damit



einhergehenden nicht optimalen Applikation des Fahrzeugs auf das Airbag-Steuergerät könnte die laut Bosch ungewöhnlich hohe Anzahl von Near-Deployment-Events erklären.

Bei einer explizierten Nachfrage, ob die vollständigen, ausgewerteten Rohdaten mit einem zur Interpretation notwendigen Tool bzw. einer Anleitung zur Verfügung gestellt werden können, wurde von der Fa. Bosch folgendermaßen geantwortet: „Das zur Interpretation benötigte Tool wird nicht herausgegeben. Der Bericht enthält alle relevanten Informationen.“ Auf dieser Grundlage ist es dem Autor nicht möglich, beispielsweise konkrete Zahlenwerte über die Bremsverzögerung vor dem Crash auszuwerten. Dennoch wurde eine Datei mit diversen HEX-Codes zur Verfügung gestellt, die die Rohdaten enthalten sollen. Die Verifikation und Interpretation dieser Daten bedürfen noch eines erheblichen Reengineering und wurden im Hinblick auf den zu erwartenden Nutzen noch nicht forschungstechnisch bearbeitet.

### 5.1.1.3 Auswertung des Motorsteuergeräts und der verwendeten Tuning-App

Bei der technischen Untersuchung des BMW nach dem Verkehrsunfall war augenfällig, dass eine Veränderung der Abgasanlage durch den Verbau von Downpipes, wie sie auf Abbildung 23 dargestellt sind, gegeben war.

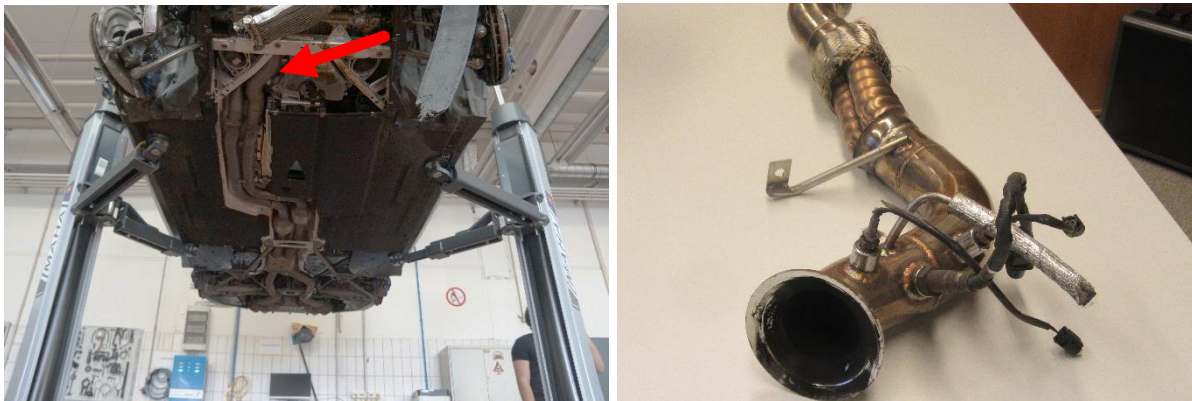


Abbildung 23: Downpipes verbaut am Fahrzeug (links) und im ausgebauten Zustand (rechts)  
[Quelle: Autor]

Dabei wurden Teile der originalen Abgasanlage teilweise ersetzt. Beispielsweise ist in der veränderten Anlage kein Katalysator verbaut, was eine nicht genehmigungsfähige Veränderung des Geräusch- und Abgasverhaltens nach sich zieht und damit alleine schon zum Erlöschen der Betriebserlaubnis nach §19 (2) StVZO [61] führt. Auf Basis dieser technischen Veränderungen des Abgasstrangs in Verbindung mit umfänglichen Hinweisen auf eine Manipulation des





Laufleistung von 46087 km am 28.09.2018 verkauft und ging damit in den Besitz und die Verfügungsgewalt des Beklagten über. Der letzte Abgleich fand im Zuge der technischen Untersuchung am 24.10.2019 bei einer Laufleistung von 77685 km statt. Eine weitere Softwareveränderung lässt sich bei einer Laufleistung von 76792 km und einem Änderungsdatum am 15.10.2019 nachweisen. Dieses Datum liegt wenige Tage vor dem gegenständlichen Unfall. Laut BMW lässt sich aus den Kennfelddaten schließen, dass die auf dem Fahrzeug aufgespielte Software eine Vermischung verschiedener I-Stufen darstellt, die in dieser Form mit den zusätzlich veränderten Parametern von der BMW AG bzw. der BMW M GmbH nicht freigegeben sind. Die Motorsteuerungssoftware wurde demnach extern von Dritten bearbeitet. Das Motorsteuergerät als Hardware wurde nicht getauscht. Die Seriennummer und das Herstellungsdatum sind identisch mit den Daten in der BMW-Datenbank und entsprechen dem Zustand bei Produktion des Fahrzeugs im Werk Regensburg. Zusätzlich lässt sich aus der Datenanalyse von BMW nachweisen, dass das Steuergerät des Doppelkupplungsgetriebes am 14.06.2019 geändert wurde. Diese Veränderung ist vermutlich im Zusammenhang mit einer geänderten GesamtAbstimmung des Antriebsstrangs zu sehen. Für die aufgeworfenen Fragestellungen war eine detaillierte Analyse dieser Veränderungen durch den Autor bisher nicht notwendig, weshalb darauf verzichtet wurde.

### **5.1.1.3.1 Nachweisbar veränderte Variablen, Parameter und Kennfelder**

Um die Funktionsweise der geänderten Motorsteuerungssoftware und die möglicherweise daraus resultierenden Auswirkungen und Gefahren besser verstehen zu können, wurde die vollständig ausgelesene Software mit dem von BMW zur Verfügung gestellten Soll-Softwarestand (Golden Image) abgeglichen. Man kann sich dieses Golden Image vorstellen wie eine Festplatte mit mehreren Partitionen. Eine Partition enthält den Programmcode, eine die Codier-/Applikationsparameter und eine enthält Laufzeit-/Verschleißparameter (z. B. Längung der Steuerkette, Zündwinkelverstellung usw.). Belastbare Nachweise einer Manipulation finden sich damit nur auf den beiden erstgenannten Partitionen. Beim konkreten Fahrzeug fanden sich sämtliche Abweichungen im Bereich der Codier-/Applikationsparameter. Hierbei wurde folgendermaßen vorgegangen: Mit einem Hex-Editor wurden die einzelnen Programmzeilen miteinander abgeglichen und die jeweiligen Änderungen bzw. Manipulationen sachverständig beurteilt. Exemplarisch wurden auf Abbildung 25 und Abbildung 26 verschiedene Labels ausgewählt, deren Hexadezimalwerte verändert wurden.

### VMAXOVC (Wert)

Unterschiede: Wert (phys)  
 Langbezeichner: Vmax-Begrenzungswert, variantencodiert  
 Wert: M 260.0000 km/h 0x8200  
 [swfl\_0000260b\_029\_020\_242]:  
 1 [DatenDME]: 350.0000 km/h 0xAF00  
 Bitmaske:

### VROHMAX (Wert)

Unterschiede: Wert (phys)  
 Langbezeichner: maximale erlaubte Rohgeschwindigkeit für Signal Range Check  
 Wert: M 333.0000 km/h 0xA680  
 [swfl\_0000260b\_029\_020\_242]:  
 1 [DatenDME]: 340.0000 km/h 0xAA00  
 Bitmaske:

Abbildung 25: Veränderungen bei Daten aus dem Motorsteuergerät im Bereich Maximalgeschwindigkeit [Quelle: Autor]

### MoFTrqPtd\_tqClthMaxAt\_CUR (Kennlinie)

Unterschiede: Wert (phys) (8)  
 Langbezeichner: Maximal mögliches Moment an der Kupplung für Automatikgetriebe.

#### Wert

M [swfl\_0000260b\_029\_020\_242]  
 1 [DatenDME]

x	PHY	M:	1520	1760	2000	4520	5000	5400	5560	5560
y	PHY	M:	560.000	560.000	560.000	560.000	560.000	560.000	560.000	560.000
	HEX	M:	0x2300	0x2300	0x2300	0x2300	0x2300	0x2300	0x2300	0x2300
	PHY	1:	800.000	800.000	800.000	800.000	800.000	800.000	800.000	800.000
	HEX	1:	0x3200	0x3200	0x3200	0x3200	0x3200	0x3200	0x3200	0x3200

Einheit: Nm  
 Bitmaske:

x-Achse: MoFTrqPtd\_tqClthMaxAt\_CUR/x

Abbildung 26: Veränderungen bei Daten aus dem Motorsteuergerät im Bereich maximal mögliches Moment an der Kupplung [Quelle: Autor]

Die Originalwerte sind in Schwarz dargestellt, die veränderten Werte in Rot. Die Veränderungen in den Labels weisen unterschiedliche Umfänge auf. Teilweise werden einzelne Werte bzw. Variablen manipuliert, in anderen Fällen werden gesamte Kennfelder verändert. In

der Tabelle in Anhang III, bestehend aus insgesamt drei Seiten, werden die veränderten Labels und deren funktionale Auswirkungen dargestellt. Grundlegend werden von der manipulierten Software Funktionsumfänge beeinflusst, die das Geräuschverhalten des Fahrzeuges ändern, die Leistung und das Drehmoment steigern, das Fahrverhalten beeinflussen, die Momentenbegrenzung verändern, die Maximalgeschwindigkeit erhöhen und damit insgesamt das Sicherheitskonzept in Teilbereichen aushebeln. Durch die Aufhebung beispielsweise der sicherheitsrelevanten Momentenbegrenzung kann es im Volllast-Betrieb unter Ausnutzung der maximal zur Verfügung stehenden Leistung zum Versagen von Bauteilen im Antriebsstrang (Getriebe, Kupplung, Antriebswelle etc.) kommen. Wird das Fahrzeug mit Maximalgeschwindigkeit bewegt, die im vorliegenden Fall auf Grundlage der geänderten Parameter über 300 km/h liegen dürfte, kann es zum Versagen von Bauteilen im Bereich der Rad-/Reifenkombinationen kommen, da bei diesen keine herstellerseitige Freigabe für diese Geschwindigkeitsbereiche vorliegt.

### **5.1.1.3.2 Analyse der verwendeten Tuning-App in Verbindung mit der Auswertung des Mobiltelefons**

Bei der technischen Untersuchung wurde im Handschuhfach ein Mobiltelefon des Typs Samsung Galaxy S6 und ein Adapter aufgefunden. Mit diesem ist es möglich, zusammen mit dem Mobiltelefon eine Verbindung über den Anschluss der On-Board-Diagnose (OBD) zum Fahrzeug aufzubauen. Zur weiteren Auswertung hinsichtlich der veränderten Parameter und der beweissicheren Zuordnung der App-Lizenz zum Fahrzeug wurde das Mobiltelefon, bei dem keine Benutzersperre implementiert worden war, dem Sachverständigen übergeben. Diese Auswertung fand nach der digital-forensischen Untersuchung der Kriminalpolizei statt. Bei der unfallanalytischen Auswertung wurde zum einen ein Fokus auf die App (Computer Applikation) als solches und zum anderen auf die von der App abgespeicherten Daten, Aufzeichnungen und Protokolle gelegt. Über das bereits im Software-Code aufgefundene Graffiti mit Hinweis auf den Hersteller MHD konnten durch eine umfangreiche Recherche belastbare Fakten über die Funktionsweise und das Vorgehen zum Aufspielen der Software eruiert werden. Hierzu wurden die Bedienungsanleitung des Herstellers, die Webseite des Herstellers [62] sowie diverse Tuningforen und Tutorial-Videos gesichtet. Auf der Homepage des Softwareherstellers MHD können prinzipiell verschiedene Freischaltungen durchgeführt werden. Die Firma MHD hat sich auf das Tuning von Fahrzeugen der Marke BMW über die Veränderung der Motorsteuerungssoftware spezialisiert. Dies ist, solange die betroffenen

Fahrzeuge beispielsweise auf einer Rennstrecke im nicht öffentlichen Raum bewegt werden, nach Kenntnisstand des Autors als gesetzeskonform einzustufen. Die für das unfallbeteiligte Fahrzeug benötigte App trägt für die vorliegende Motorvariante *M4 S 55 – F 82* den Namen *MHD Flasher F-Series S55*. MHD bietet die Software-Leistungsstufen für diesen Fahrzeugtyp in verschiedenen Stages an. Stage 1 ermöglicht es, die Leistung und das Drehmoment ausgehend von 431 PS und 550 Nm Drehmoment (Serienzustand) auf 530 PS und 700 Nm zu steigern. Mit Stage 2 kann eine Leistungssteigerung auf 560 PS und 780 Nm realisiert werden. In der hier nachweisbar zum Unfallzeitpunkt aufgespielten Softwareversion Stage 2 Plus wird mit einer Leistungssteigerung auf 575 PS und 850 Nm Drehmoment geworben. Gleichzeitig ist es in dieser Variante notwendig, eine bauliche Veränderung am Fahrzeug (Hardwareveränderung) durchzuführen. Hierzu muss der motornahe Katalysator entfernt werden und durch Downpipes, die im Prinzip Lehrrohre darstellen, ersetzt werden. Die durch diese Veränderung bei einer originalen Motorsteuerungssoftware entstehenden Fehlermeldungen werden durch die veränderte Software von MHD unterdrückt bzw. umgangen, was durch ausgewertete Fehlerspeichereinträge und die in Anhang III dokumentierten Identifier nachvollziehbar ist. Neben der Leistungssteigerung wird im Internetauftritt offen mit einer Aufhebung des Höchstgeschwindigkeitslimits und einem veränderten Soundverhalten des Fahrzeuges bei unterschiedlichen Betriebszuständen geworben [63]. In der höchstmöglichen Ausbaustufe, E- 30 Plus genannt, erfährt das Fahrzeug eine Leistungssteigerung auf 580 PS. Bei dieser Variante muss das Fahrzeug mit anderen Motorkolben ausgerüstet und mit einem anderen Kraftstoff gefahren werden, um die volle Leistung entfalten zu können. Da aufgrund des hohen Zerstellungsgrades am verunfallten Fahrzeug keine Fahrversuche oder Leistungsmessungen mehr durchgeführt werden konnten, wäre eine Verifizierung der tatsächlichen Leistungsdaten des BMW M4 zum Unfallzeitpunkt am besten durch den Aufbau eines Vergleichsfahrzeugs in Verbindung mit Fahrversuchen möglich. Auf diese Vorgehensweise wurde bisher aus Kosten- /Nutzengründen verzichtet.

### **5.1.1.3.3 Nachweisbare Einstellungen der Tuning-App in Bezug auf das Unfallfahrzeug**

Auf dem Speicher des Mobiltelefons fanden sich im Ordner der MHD-Applikation verschiedene Dateien, die die gewählten Einstellungen dokumentieren. Prinzipiell wäre es möglich, mit einem einzigen Mobiltelefon mehrere verschiedene Fahrzeuge zu manipulieren, wobei eine Veränderung eines Fahrzeuges einer gültige Lizenz bestehend aus einem Google-Account und einem zugeordneten Fahrzeug bzw. der Fahrzeugidentifizierungsnummer bedarf.

Veränderungen eines anderen Fahrzeuges mit einer anderen als der in der Lizenz eingetragenen Fahrzeugidentifizierungsnummer ist nicht möglich [62]. Die beiden im MHD-Ordner gefundenen Datensätze mit der Endung .xml beginnen mit der Fahrzeugidentifizierungsnummer des gegenständlichen Fahrzeuges. Dabei beinhaltet die erste Datei Zahlenkolonnen in hexadezimaler Schreibweise mit Speicherdatum der Datei vom 10.07.2019 um 17:25 Uhr und die zweite Datei eine Auflistung der gewählten App-Optionen mit Zeitstempel vom 15.10.2019 um 22:31 Uhr. Die sich aus den dokumentierten Einstelloptionen der App ergebenden Parameteränderungen konnten auch in den beschriebenen Programmcode-Veränderungen des sichergestellten Motorsteuergeräts nachvollzogen werden. Damit kann nachgewiesen werden, dass mit dem Mobiltelefon des angeklagten BMW-Fahrers Veränderungen am Motorsteuergerät des verunfallten Pkw durchgeführt wurden, die zum Unfallzeitpunkt das Fahrzeug beeinflussten. Insbesondere wurde durch die App ein Wert von 350 km/h als maximale Höchstgeschwindigkeit im Fahrzeug implementiert, was zur Folge hat, dass das Fahrzeug softwareseitig erst ab diesem Wert und nicht wie serienmäßig bei 250 km/h abgeregelt wird.

### **5.1.1.3.4 Weitere digitale Spuren auf dem Mobiltelefon des BMW-Fahrers**

Zusätzlich wurden im internen Speicher des Mobiltelefons des BMW-Fahrers Mess- bzw. Beschleunigungsfahrten mit Datum vom 27.07.2019 und vom 08.08.2019 in Form von .csv-Dateien gefunden, die hinsichtlich der Datenstruktur der vorgestellten App des Herstellers MHD zuzuordnen sind. Derartige Messfahrten können z. B. für eine Feinabstimmung zwischen den möglichen Einstellparametern in der App und dem konkreten Fahrzeug herangezogen werden. Prinzipiell ist in der App die Möglichkeit gegeben, sich zu den aufgezeichneten Messwerten einen zugeordneten Geschwindigkeitswert grafisch darstellen zu lassen. Bei den Auswahleinstellungen der Messaufzeichnung in der App wurde der entsprechende Haken jedoch nicht gesetzt. Um Rückschlüsse auf die gefahrene Geschwindigkeit bei den Messfahrten treffen zu können, wurden unter Berücksichtigung des in den Daten dokumentierten Ganges sowie der Drehzahl in Verbindung mit den aus den technischen Daten des BMW ermittelten Übersetzungsverhältnissen die sich daraus ergebenden Geschwindigkeiten berechnet. Bei diesen Geschwindigkeitswerten ist vor allem aufgrund der nicht genau eingrenzbaaren Schlupfverhältnisse zwischen Bereifung und Fahrbahn von erhöhten Toleranzen auszugehen. Die errechneten Mittelwerte lassen jedoch einen Rückschluss auf das Fahrverhalten bei den jeweiligen Messfahrten zu. Auffallend ist bei allen Aufzeichnungen, dass der Gaspedalsensor

über weite Strecken einen Wert von 100 Prozent, demnach eine Vollgasbeschleunigung sensierte. Die erste Aufzeichnung startete entsprechend den Daten am 27.07.2019 um 13:29:15 Uhr. Aus einer Ausgangsgeschwindigkeit von ca. 51 km/h wurde das Fahrzeug im dritten Gang bei einer Gaspedalstellung von 100 % bis auf eine Maximalgeschwindigkeit von 214 km/h beschleunigt (grafische Darstellung siehe Abbildung 27; die weiteren Auswertungen sind analog aufgebaut und werden nicht explizit dargestellt).



Abbildung 27: Grafische Darstellung der Messwerte der ersten Messfahrt des BMW vom 27.07.2019 um 13:29 Uhr [Quelle: Autor]

In einer zusätzlichen Aufzeichnung vom 27.07.2019 um 13:32:25 Uhr wurde bei einer Gaspedalstellung von ebenfalls 100 % von ca. 73 km/h bis auf 208 km/h beschleunigt. Die dritte Aufzeichnung an diesem Tag fand ab 13:34:07 Uhr statt. In dieser beschleunigte das Fahrzeug mit Vollgas von rund 75 bis 215 km/h. Bei allen drei Fahrten wurde jeweils aus dem dritten Gang mit der Messfahrt begonnen. Weitere zwei Messungen fanden am 08.08.2019 statt. Bei der ersten ab 15:51:56 Uhr beschleunigte das Fahrzeug, ausgehend von 73 km/h im fünften Gang, ohne den Gang zu wechseln bis auf eine Geschwindigkeit von 269 km/h. Die zweite Messung wurde ab 15:53:41 Uhr gefahren. Hierbei beschleunigt das Fahrzeug ebenfalls im fünften Gang von ca. 78 km/h bis 265 km/h. Beim angegebenen Beschleunigungszeitraum wurde jeweils eine Gaspedalstellung von 100 % gewählt.

### 5.1.1.4 Auswertung der eCall-Daten

Seit dem 31. März 2018 ist von der Europäischen Union der herstellerseitige Verbau eines automatischen Notrufsystems, kurz eCall (emergency call), für alle neu typgenehmigten Modelle von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen gesetzlich vorgeschrieben [64]. Obwohl der unfallbeteiligte BMW eine Erstzulassung von 2016 aufweist, ist das Fahrzeug bereits mit diesem System ausgestattet. Hierbei nimmt das Fahrzeug bei einer Crash-Erkennung selbstständig Kontakt zur Notrufzentrale, in der Praxis derzeit meist noch über einen vom

Hersteller beauftragten Serviceagenten, auf. Beim vorliegenden Unfall wurden die beim eCall übermittelten Daten durch die BMW AG zur Verfügung gestellt. Aus diesen Daten ist ersichtlich, dass das System ordnungsgemäß einen Notruf an einen Callcenter-Agenten absetzte. Es wurden Zusatzdaten wie die letzte gemeldete GPS-Position des Fahrzeugs, der Name des Callcenter-Agenten sowie ein Chatverlauf mit der Notrufzentrale, Aufpralldetails (Starker Frontanprall und Überschlag, ein Insasse), die Fahrzeugidentifizierungsnummer und die Information, dass eine Telefonverbindung zum Fahrzeug beendet wurde, aufgezeichnet. Das Crash-Ereignis wurde am 20.10.2019 um 23:33:50 Uhr erstellt. Dieser Zeitpunkt dürfte den Zeitpunkt der Kollision des BMW mit dem Audi darstellen. Trotz detaillierter Auswertung und Nachfrage bei BMW lassen sich aus den eCall-Daten keine Rückschlüsse auf eine vorkollisionäre Geschwindigkeit ziehen. Dies liegt darin begründet, dass zu unterschiedlichen Zeitpunkten verschlüsselte GPS-Positionen abgespeichert werden, die aus Datenschutzgründen nachträglich auch für den Fahrzeughersteller keine Bestimmung von Ort und Zeit zulassen sollen. BMW bezeichnet dies als Perlenkette der eCall-Daten.

### **5.1.1.5 Auswertung des Infotainment-Steuergeräts**

In zunehmendem Maße sind bei modernen Fahrzeugen unfallrelevante digitale Spuren in den verbauten Infotainment- oder Multimedia-Steuergeräten zu finden [43]. Dies ist deshalb so, weil unter anderem Daten der Fahrzeugnavigation, der Konnektivität eines möglicherweise verbundenen Mobiltelefons oder auch Daten von Connect-Services des Herstellers auf diesen Steuergeräten gespeichert werden. Die Berufspraxis des Autors zeigt, dass diese Daten teilweise nur für den Zulieferer des Steuergeräts zugänglich sind. Das im BMW verbaute Infotainment-Steuergerät des Herstellers Harman Automotive mit der Herstellerteilenummer 2908328 wurde laut Typschild in der Kalenderwoche 48/2015 produziert. Bei baugleichen Fahrzeugen und nahezu identischen Steuergerätetypen konnten in vorangegangenen Fällen aus der Berufspraxis des Autors über ein Tool des Herstellers Berla Daten in der Form ausgelesen werden, dass GPS/GNSS-Positionen mit eindeutigem Zeitstempel abgelegt wurden. Die Daten wurden in diesen Fällen über einen längeren Zeitraum gespeichert, was bei Verbindung der Wegpunkte zu einer Fahrroute mit berechenbaren Durchschnittsgeschwindigkeiten zwischen den Routenpunkten führt. Dies wiederum erlaubt Rückschlüsse auf die vorkollisionäre Fahrweise des Fahrzeuges. Die Datenauswertung der im Infotainment-Steuergerät des verunfallten BMW vorgefundenen 2.5-Zoll-Festplatte konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die auf der Festplatte enthaltenen Logdateien wurden ausgewertet. Hierbei konnten jedoch



keine GPS-Track-Logs identifiziert werden. Dennoch konnten Informationen zu gekoppelten Geräten, den Anruflisten, Kontakten und verschiedenen Events in Zusammenhang mit der Wiedergabe von Medien gesichert werden. Rückschlüsse auf das vorkollisionäre Fahrverhalten ergaben sich aus den Daten allerdings nicht.

### **5.1.2 Gegenverkehrsunfall eines Tesla Model S auf einer Landstraße (keine Systemkameradaten verfügbar)**

Der unfallbeteiligte Tesla, Typ Model S, Erstzulassung 20.07.2017, kollidierte bei diesem Szenario außerorts in einer langgezogenen Linkskurve mit einem im Gegenverkehr befindlichen VW Golf Plus. Die Fahrzeuge in ihren jeweiligen Endstellungen sowie der Fahrbahnverlauf sind auf Abbildung 28 als Drohnenaufnahme zu sehen.



Abbildung 28: Übersichtsaufnahme der Unfallörtlichkeit mit Drohne [Quelle: Autor]

Die entscheidende Fragestellung bei diesem Fall war, ob zum Zeitpunkt der Kollision die Autopilot-Funktion im Tesla – Autopilot Hardware-Revision 2.0/EU-Variante mit installierter Software-Version v9.0 2019.28.3.1 – aktiv war und inwieweit die

Fahrzeugführerverantwortung durch den Fahrer an das Fahrzeug abgegeben war. Der zweite Punkt obliegt letztendlich rechtlicher Würdigung, kann jedoch nur auf der Grundlage von digitalen Spuren beantwortet werden.

Da es sich um ein Fahrzeug nach SAE-Automatisierungsstufe Level 2 handelt, wäre eine derartige Übergabe der Fahrzeugführerverantwortung entsprechend der deutschen Gesetzeslage faktisch nicht zulässig und demzufolge die Fahrzeugführerverantwortung in jedem Fall beim Fahrer anzusiedeln. Im Sinne der Würdigung dieses Umstandes bei der Strafzumessung bzw. um einen technischen Mangel des Systems durch einen aktiven Lenkeingriff des Fahrzeugs auszuschließen, wurde der Tesla entsprechend aufwendig hinsichtlich digitaler Spuren analysiert. Dabei wurde ohne Mithilfe des Herstellers und ohne Verwendung des Bosch-CDR-Tools ein EDR-Report aus dem Airbag-Control-Modul generiert und eine detaillierte Analyse des von Tesla als Media Control Unit (MCU) oder auch als Center Information Display (CID) bezeichneten 17-Zoll-Touchscreen-Moduls sowie der Autopilot-Einheit (AP) durchgeführt.

### **5.1.2.1 Extraktion und Auswertung der EDR-Daten aus dem Airbag-Steuergerät**

Entsprechend den Angaben des Herstellers Tesla sowie einschlägiger nordamerikanischer Experten-Foren [65] verfügte das verunfallte Model S über einen Event Data Recorder, dessen Daten im Airbag-Steuergerät aufgezeichnet werden. Die Extraktion dieser Daten über einen sogenannten Tesla-Kit [65] war ursprünglich für alle Absatzmärkte, in denen Tesla-Fahrzeuge veräußert wurden, über einen detailliert beschriebenen Workflow möglich. Dieser Workflow beinhaltete zur Generierung eines EDR-Reports eine Anmeldung auf einer entsprechenden Tesla-Internetseite, wodurch die am Fahrzeug ausgelesenen Daten auch immer gleichzeitig an Tesla übermittelt wurden. Von 2017 bis etwa Mitte 2021 war diese Verfahrensweise nur noch bei Fahrzeugen des nordamerikanischen Marktes durchführbar. Im Rest der Welt und damit auch in Europa bzw. Deutschland konnten durch diese Verfahrensweise nur noch hexadezimale Rohdaten ausgelesen werden, die dann per Beweisbeschluss an Tesla versendet werden mussten. Eine direkte Generierung eines EDR-Reports ohne ein Involvieren des Herstellers war damit offiziell nicht mehr möglich. Auf Grundlage der Analyse zahlreicher auch im Internet zugänglicher EDR-Reports ist es jedoch über Reverse-Engineering-Methoden dem Autor möglich, die aus dem verunfallten Fahrzeug ausgelesenen Hex-Daten in analoger Weise wie aus einem EDR-Report bekannt zu interpretieren. Damit kann grundsätzlich eine Verifizierung der von Tesla bzw. der Tesla-EDR-Internetseite zur Verfügung gestellten Daten erfolgen. Bei dem konkreten Fall ergeben sich die auf Abbildung 29 dargestellten Längs- und

Querbeschleunigungen bzw. die auf Abbildung 30 zu sehenden kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderungen.

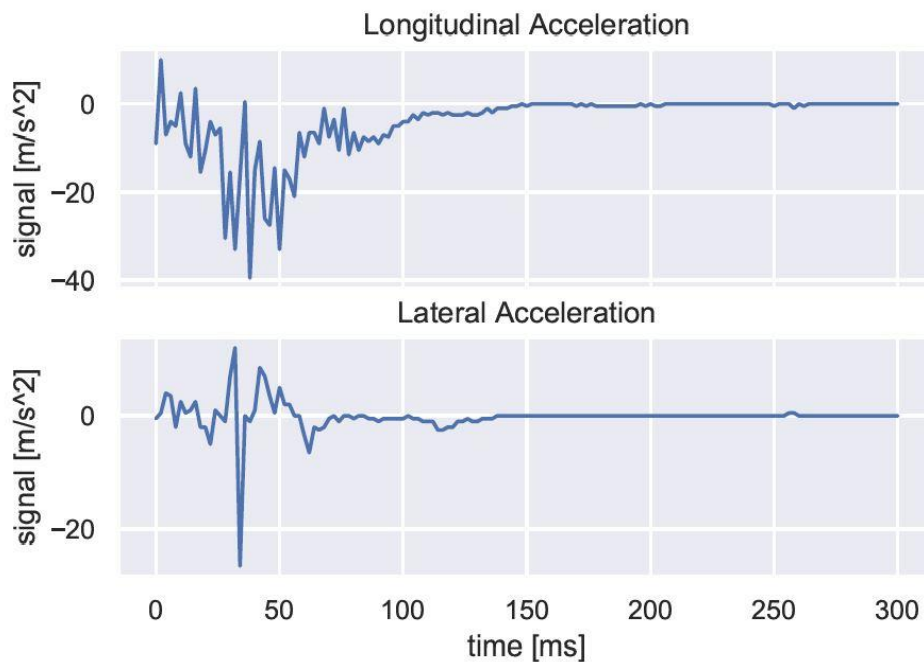


Abbildung 29: Längs- und Querbeschleunigungsverlauf extrahiert aus Hex-Daten aus dem Airbag-Steuergerät des verunfallten Tesla [Quelle: Autor]

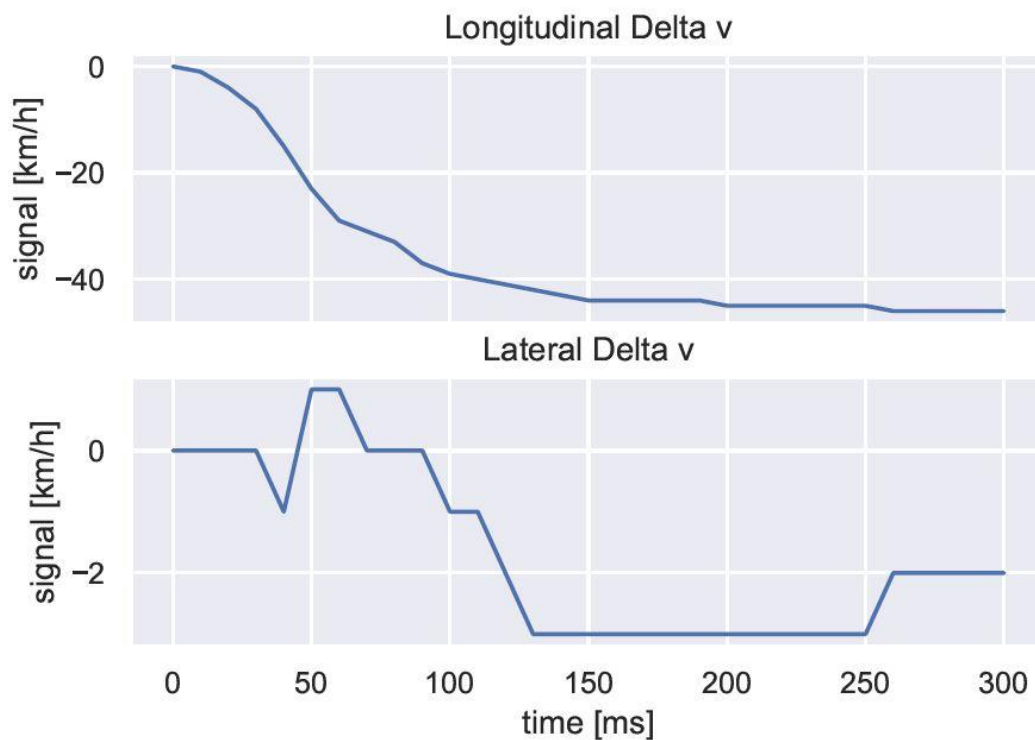


Abbildung 30: Kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung Delta v längs und quer [Quelle: Autor]

Des Weiteren sind insbesondere die Geschwindigkeitsdaten sowie die Gaspedalstellung und der Lenkwinkel am Lenkrad bis 5,0 s vor dem Unfall aus den Daten extrahierbar (siehe Abbildung 31).

time [s]	speed [km/h]	accelerator pedal [%]
-5.0	43.0	9.0
-4.5	42.0	24.0
-4.0	43.0	24.0
-3.5	44.0	23.0
-3.0	46.0	24.0
-2.5	47.0	25.0
-2.0	49.0	29.0
-1.5	51.0	30.0
-1.0	53.0	28.0
-0.5	56.0	24.0
0.0	56.0	14.0

time [s]	steering wheel angle [deg]
-5.0	-12.6
-4.5	-8.4
-4.0	-16.8
-3.5	-25.2
-3.0	-33.6
-2.5	-33.6
-2.0	-33.6
-1.5	-29.4
-1.0	-29.4
-0.5	-21.0
0.0	-12.6

Abbildung 31: Vorkollisionäre Daten zu Fahrzeuggeschwindigkeit, Gaspedalstellung und Lenkwinkel am Lenkrad [Quelle: Autor]

Aus diesen Daten würde sich eine Kollisionsgeschwindigkeit von 56,0 km/h bei einer Gaspedalstellung von 14 % und einem Lenkwinkel am Lenkrad nach links von 12,6° ergeben. In der Annäherung ist eine moderate Beschleunigung beginnend von 43,0 km/h 5,0 s vor Time Zero auf die angesprochenen 56,0 km/h zu verzeichnen. Parallel wurde durch einen entsprechenden Beweisbeschluss der zuständigen Strafverfolgungsbehörden der Fahrzeughersteller Tesla dazu verpflichtet, die über die im Fahrzeug verbauten Telematik-Systeme an den Hersteller mittels Luftschnittstelle (Over-the-Air) übersandten unfallrelevanten Daten zur Verfügung zu stellen. Nach E-Mail-Kontakt mit Tesla wurde mitgeteilt, dass derartige technische Fragestellungen nur durch die zuständigen Entwicklungsingenieure mit

Sitz in Amerika beantwortet würden. Es wurde weiterhin mitgeteilt, dass nach Tesla-interner Auswertung das verunfallte Fahrzeug nicht mit der Autopilot-Option ausgestattet sei und nur sehr wenige Daten vom konkreten Unfall durch das Fahrzeug übermittelt worden wären. Es seien ein paar wenige Telemetrie-Daten zum Unfallzeitpunkt abgelegt worden, die implizieren, dass das Fahrzeug bei Kollision eine Geschwindigkeit von 56,3 km/h aufwies, einhergehend mit einer Gaspedalstellung von 14 %, und dass das Bremspedal dabei nicht betätigt worden sei. Die von Tesla angegebene Kollisionsgeschwindigkeit ist konsistent mit den durch den Autor interpretierten Hex-Daten aus dem Airbag-Steuergerät in Einklang zu bringen. Es ist in diesem Fall auffällig, dass angeblich bei den Tesla zur Verfügung stehenden Daten die extrahierte Lenkwinkelinformation fehlt. In anderen publizierten Fällen [66] konnten deutlich umfangreichere digitale Spuren bis hin zu Videosequenzen der verbauten Systemkameras seitens Tesla zur Verfügung gestellt werden (vergleiche auch Kapitel 5.1.3). Dies ist bemerkenswert, da Tesla auch in diesen Fällen nur Over-the-Air auf das Fahrzeug zugreifen konnte. Nach Dafürhalten des Autors ist es vor diesem Hintergrund für unabhängige Dritte nicht möglich, nachzuvollziehen, zum einen in welchem Umfang von einem derartigen Event über Luftschnittstellen Daten an Tesla durch das Fahrzeug automatisiert übersandt werden und zum anderen, ob diese Daten dann nach entsprechender Aufforderung durch Strafverfolgungsbehörden vollumfänglich an diese weitergeleitet werden. Dies liegt insbesondere darin begründet, dass die über die EDR-Daten hinausgehenden digitalen Spuren wie Systemkamera-Videos oder Objektdaten nicht standardisiert sind und deshalb der Hersteller die Randbedingungen für deren Aufzeichnung nicht offenlegen muss. Beim konkreten Fall wird vonseiten Tesla argumentiert, dass unter den speziellen Randbedingungen dieses Unfalls keine entsprechenden Zusatzdaten gespeichert wurden. Doch allein schon die Auswertung der EDR-Daten zeigt, dass zusätzliche Daten, hier beispielsweise die Lenkwinkelinformation, im Fahrzeug gespeichert wurden und diese Daten prinzipiell auch Tesla über einen Remote-Zugriff zugänglich sein müssten. Um nachzuweisen, dass weitere unfallrelevante digitale Spuren im Fahrzeug vorhanden sind, die zur Aufklärung der aufgeworfenen Fragestellungen hinsichtlich des Eingreifens der Autopilot-Funktion beim gegenständlichen Unfall beitragen können, wurden das Autopilot-Steuergerät (kurz AP) sowie die Media Control Unit näher untersucht.



### 5.1.2.2 Extraktion und Auswertung der digitalen Spuren aus der Autopilot-Einheit bzw. der MCU

Zunächst soll im Folgenden auf die grundsätzliche IT-Architektur im Umfeld der untersuchten Steuergeräte und anschließend auf die Extraktion und Auswertung der digitalen Spuren eingegangen werden.

#### 5.1.2.2.1 Grundsätzliche IT-Architektur im Umfeld der Autopilot-Einheit und identifizierte relevante Speicherbausteine auf AP und MCU

Der grundlegende Aufbau der Netzwerkstruktur des untersuchten Model S ergibt sich aus [67] und ist auf Abbildung 32 grafisch dargestellt.

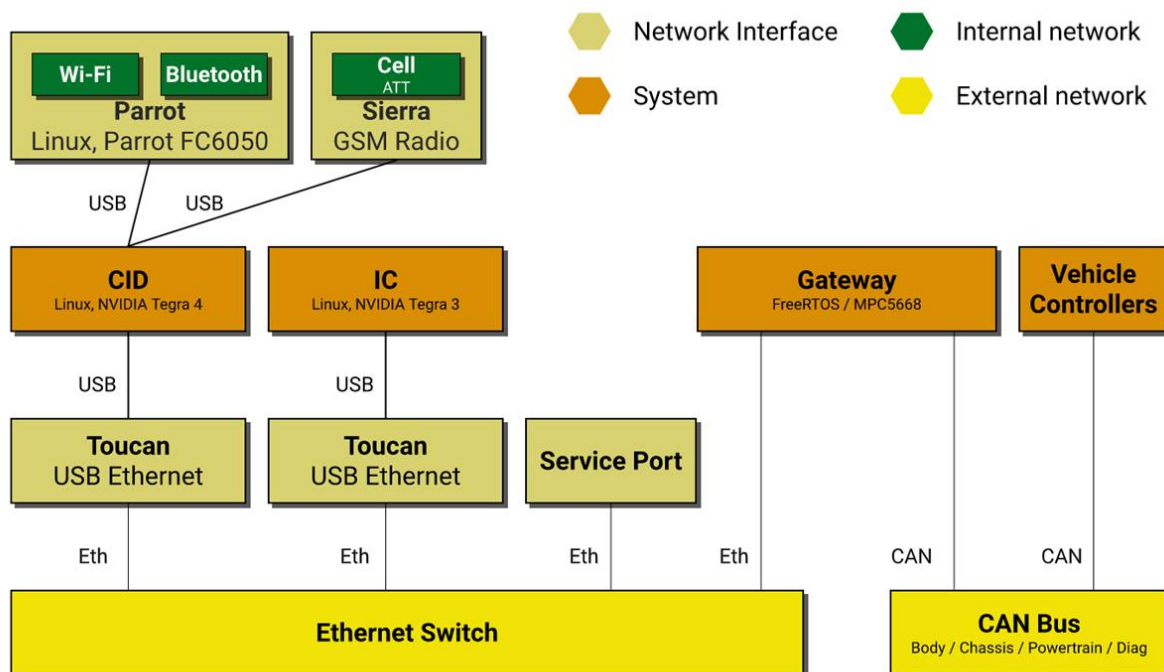


Abbildung 32: Überblick über das System-Design der Netzwerkarchitektur des untersuchten Tesla Model S [67]

Aus dieser Darstellung wird deutlich, dass ein wesentlicher Teil der Kommunikation zwischen den Netzwerkteilnehmern über USB bzw. Ethernet (Eth) und nicht über CAN-Bussysteme abläuft. Das AP-Steuergerät ist auf derselben Hierarchieebene wie CID oder IC anzusiedeln und ebenfalls im Ethernet-Verbund eingegliedert, wurde jedoch in [67] nicht betrachtet. Über den Weg USB/Ethernet findet auch ein Informationsaustausch zwischen CID und AP statt, wobei unfallrelevante Daten gespiegelt sowohl auf Speicherbausteinen des CID als auch des

AP-Steuergeräts vorhanden sind. Da die Internetanbindung über das CID realisiert wird, müssen sämtliche Daten, die Over-the-Air versandt werden sollen, zunächst auf entsprechende Speicherbausteine des CID kopiert werden, um anschließend Datei für Datei Over-the-Air verschickt werden zu können. Eine Pufferung erfolgt über eine SD-Card, deren Inhalt vom Netherlands Forensic Institute in einer aktuellen Veröffentlichung tiefgreifend untersucht wird [68]. Die interne Kommunikation innerhalb der AP-Einheit, die auch die Anbindung zu den verbauten Systemkameras über ein Common System Interface (CSI) beschreibt, ist auf Abbildung 33 visualisiert.

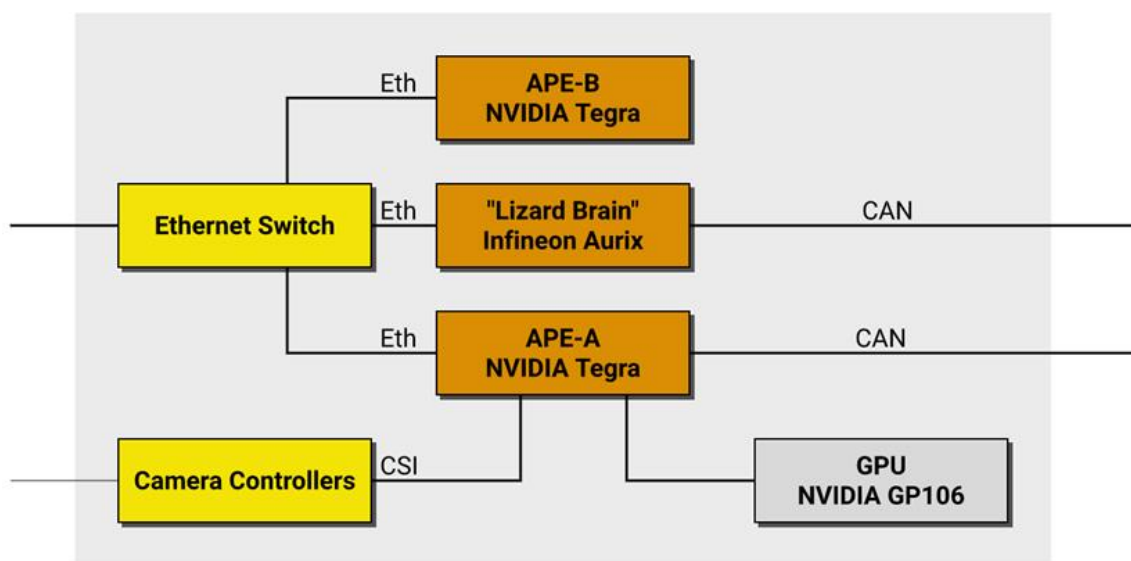


Abbildung 33: Interne Kommunikation innerhalb der AP-Einheit unter Einbeziehung der Systemkameras [69]

Die Architektur der AP-Einheit Version 2.0 sowie 2.5 basiert demnach auf der NVIDIA Drive PX-Plattform, die darauf ausgerichtet ist, Fahrerassistenz- und automatisierte Fahrfunktionen auch auf Grundlage von Deep-Learning-Methoden bereitzustellen und erstmals auf der Consumer Electronics Show in Las Vegas in 2015 vorgestellt wurde [70]. Neben den NVIDIA Tegra CPUs als Herzstück ist auch noch ein Infineon Aurix Safety Co-Prozessor integriert, der Systeme bis ASIL-D/SIL3 hinsichtlich ihrer Funktionssicherheit ermöglicht [71]. Der Boot-Prozess der eigentlichen AP-Software ist auf Abbildung 34 illustriert.

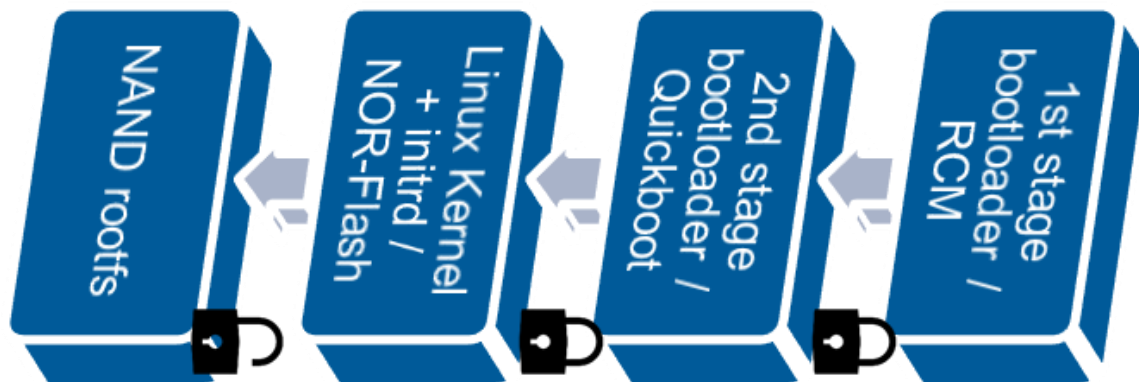


Abbildung 34: Aufbaustruktur der AP-Software [Quelle: Autor]

Die Gesamtheit der oben dargelegten Hard- und Softwarearchitektur ermöglicht somit eine Secure-Boot-Funktion, wobei aufgrund der A/B-Image-Struktur ein Flashen des Systems auch im laufenden Betrieb möglich ist, da eine lauffähige Version immer einfach redundant vorhanden ist. Als Betriebssystem wird ein Linux-Kernel mit einem mit *Buildroot* erstellten benutzerdefinierten Userland verwendet. In der Gesamtschau zeigt sich, auch unter Berücksichtigung der Untersuchungsergebnisse beim verunfallten Tesla Model S, dass die integrierten Fahrfunktionen (Lane Keeping, Parking, Automatic Emergency Braking usw.) als eigene Programme ablaufen. Die Funktionalitäten des Sensor-Processings (Kameras, Radar, Ultraschall) laufen hingegen in separaten Hintergrund-Tasks ab. Des Weiteren ist festzuhalten, dass die Inter-Prozess-Kommunikation via Shared-Memory vollzogen wird. Im Fall eines Events, wie dies beispielsweise ein vom System detektierter Unfall oder Beinahe-Unfall wäre, werden Abbilder, sogenannte Snapshots, der Software-Tasks erzeugt, die dann für die spätere Analyse abgelegt und teilweise auch Over-the-Air an den Hersteller durch das System übersandt werden. Aus diesem Grund ist es für Praxis an der Unfallstelle zielführend, wenn möglichst zeitnah neben der Spannungsversorgung durch die Traktionsbatterie auch die der 12V-Batterie unterbrochen wird. Dies hat neben brandtechnischen Sicherheitsaspekten auch zur Folge, dass möglichst viele digitale Spuren im Fahrzeug verbleiben und nicht nach außen gesendet oder von dort verändert werden können. Die beim gegenständlichen Tesla gesicherten Snapshots konnten bis dato noch nicht vollständig interpretiert werden. Aus unfallanalytischer Sicht ist hier noch vermehrter Forschungsaufwand notwendig, speziell im Hinblick auf die Extraktion von Systemkamera- und Sensor(fusions)-Daten, die in den Snapshots enthalten sein dürften. Die Kamera-Konfiguration des untersuchten Tesla Model S ist auf Abbildung 35 zu sehen.



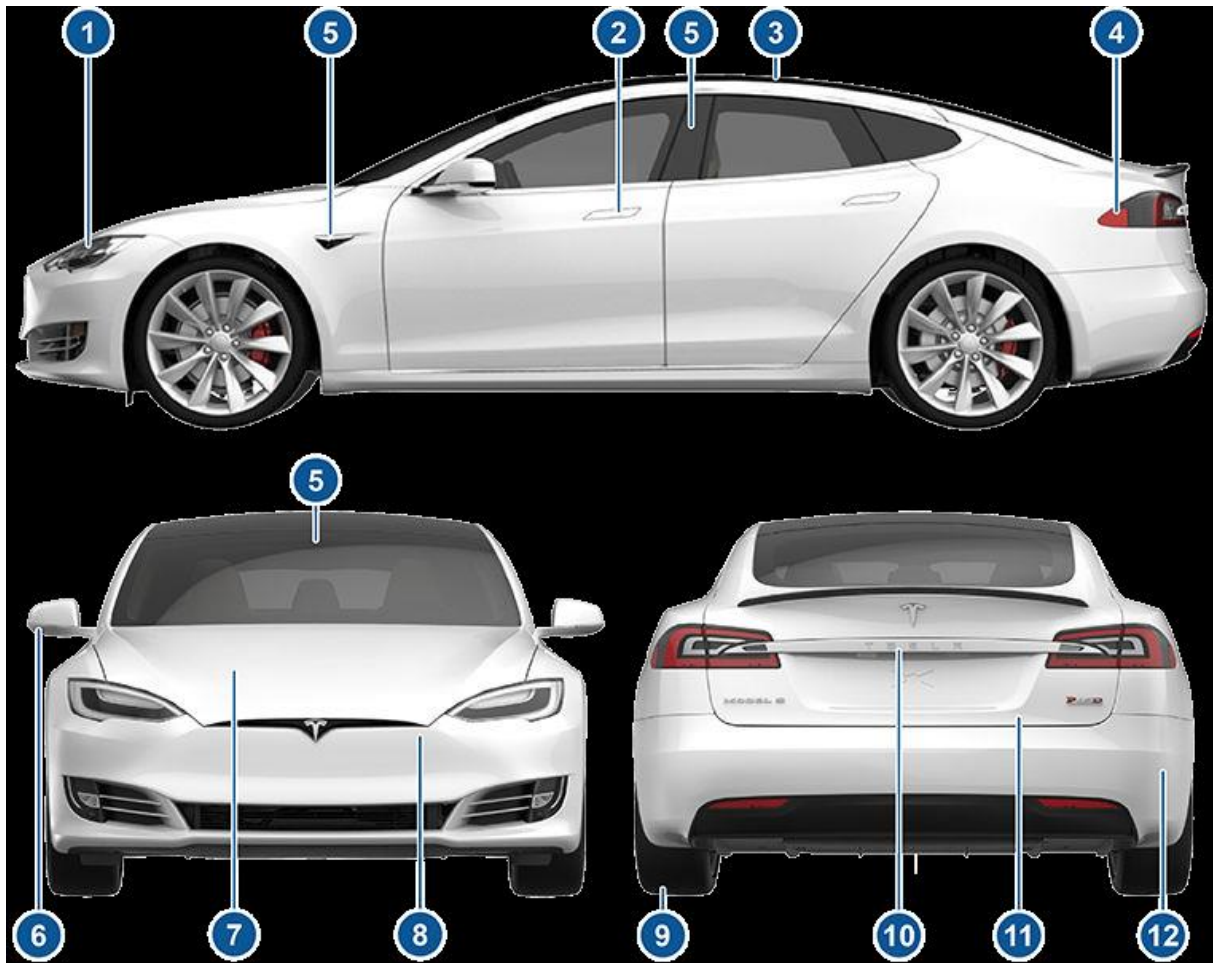


Abbildung 35: Kamera-Konfiguration des untersuchten Tesla Model S [72]; die relevanten Positionen werden im Text unten erklärt

Die Bilder werden mit insgesamt acht verschiedenen Kameras aufgenommen [72]:

- Drei Kameras im Bereich der Windschutzscheibe (Position 5 im Bild links unten auf Abbildung 35):
  - Hauptkamera vorwärts, 150 m Reichweite, 50° FOV (Field of View)
  - Vorwärtskamera für Fernbereich, 250 m Reichweite, 35°FOV
  - Vorwärtskamera für Nahbereich, 60 m Reichweite, 150°FOV
- Zwei Kameras im Bereich des Kotflügels vorne links und rechts (Position 5 im Bild oben auf Abbildung 35)
- Zwei Kameras im Bereich der B-Säule links und rechts (Position 5 im Bild oben auf Abbildung 35)
- Eine rückwärtige Kamera (Position 10 im Bild unten rechts auf Abbildung 35)

Die rückwärtige Kamera wird, wie der Nummerierung in [72] zu entnehmen ist, nicht für Autopilot-Funktionalitäten eingesetzt. Die Kamera-Streams werden mit der NVIDIA NvMedia-Bibliothek vorverarbeitet (Farbkorrektur, Objektivkorrektur) und anschließend

werden die Kamerabilder in ein neuronales Caffe-Netzwerk eingespeist, das auf der Inception-v3-Architektur basiert [73] (siehe Abbildung 36). Eine Einführung in die Grundlagen der künstlichen Intelligenz und ihrer Anwendungsgebiete in der Unfallrekonstruktion wurde aus [74] abgeleitet.

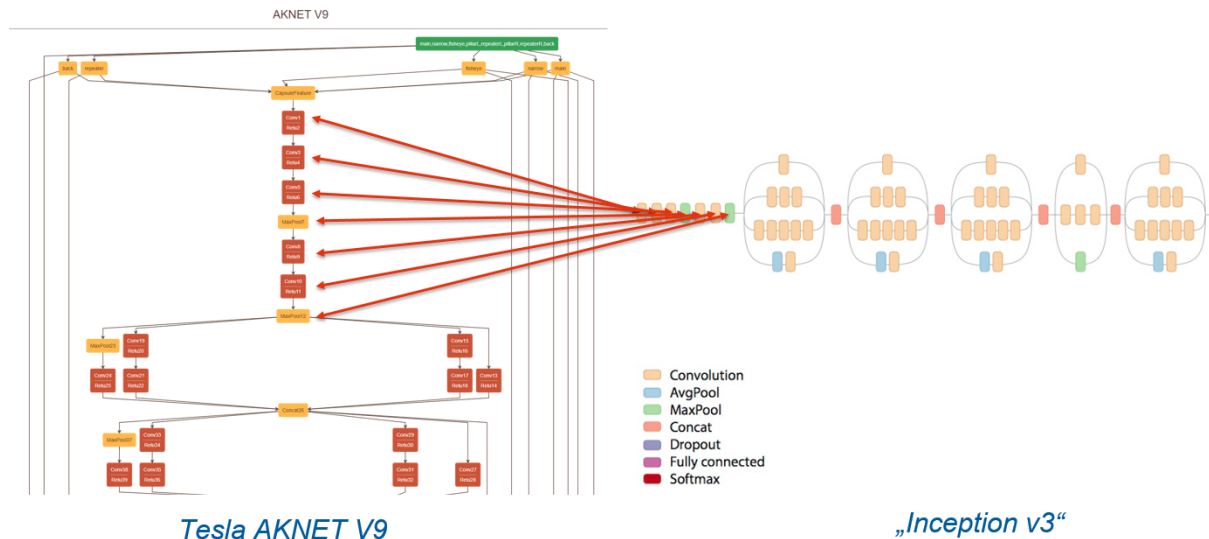


Abbildung 36: Korrelation zwischen Tesla AKNET V9 und der Inception-v3-Architektur in Anlehnung an [73]

Auf dieser Basis ist in Verbindung mit der digital-forensischen Analyse der beim gegenständlichen Tesla Model S gesicherten Snapshots eine Offenlegung der von Tesla im Autopilot-Steuergerät verwendeten Computer-Vision Software möglich. Die extrahierten Daten erlauben ein profundes Verständnis des tiefen neuronalen Netzwerks mit den entsprechenden Gewichten der Faltungs-, Pooling- und vollvermaschten Layer. Damit lassen sich Angriffsvektoren auf die KI-basierte Bildverarbeitung des untersuchten Tesla darstellen, wie dies beispielsweise in [75] beschrieben wird. Entsprechend dieser Quelle wird aus einem Stoppschild durch das Anbringen eines für das menschliche Auge unscheinbaren Tags nach Verarbeitung durch die KI des Systems ein Vorfahrtsschild. Vor dem Hintergrund zunehmender Automatisierung von Fahrfunktionen hätte eine solche Manipulation erhebliches Potenzial, schwere Verkehrsunfälle zu generieren.

### 5.1.2.2.2 Extraktion unfallrelevanter digitaler Spuren aus MCU

Um die Fragestellung, ob die Autopilot-Funktion beim untersuchten Unfall zum Kollisionszeitpunkt aktiviert war, klären zu können, wurden einzelne Speicherbausteine der

MCU sowie der AP-Einheit herausgelötet. Die auf den offengelegten Platinen identifizierten Bauteile sind auf Abbildung 37 zu sehen.

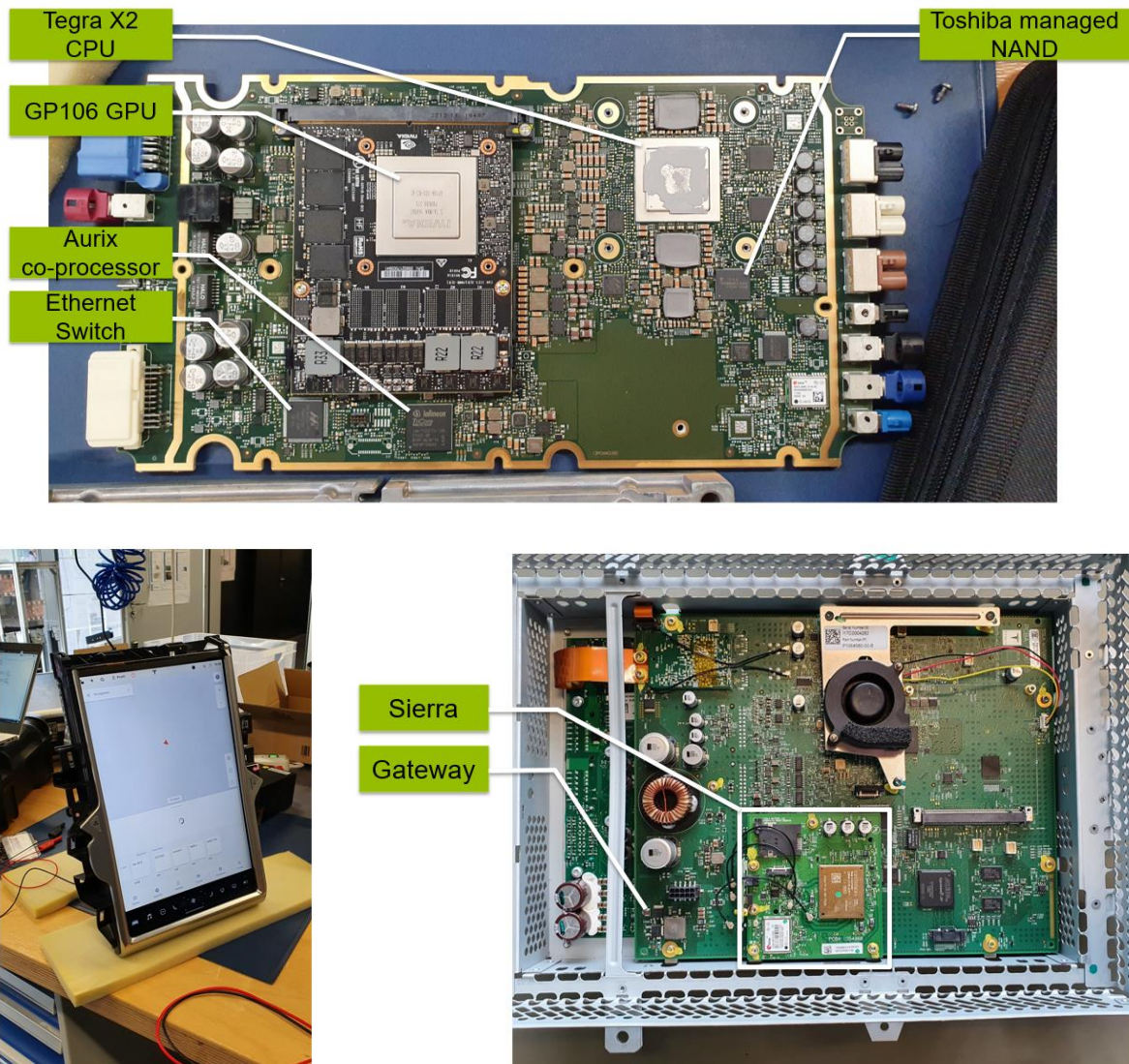


Abbildung 37: Bauteile AP (oben) und CID (unten) [Quelle: Autor]

### 5.1.2.2.3 Auswertung des Log-Files aus einem Speicherbaustein der MCU

Beim direkten Zugriff auf den als relevant identifizierten Speicherbaustein auf dem Mainboard der MCU (= CID) konnte ein Log-File extrahiert und aufbereitet werden (Anhang IV). Diesen Daten lässt sich entnehmen, dass beim gegenständlichen Fahrzeug die Autopilot-Funktion während oder unmittelbar vor dem Unfallereignis nicht aktiviert war. Auch eine testweise Aktivierung *Autopilot Trial* lag nicht vor. Im extrahierten Vehicle Log wurde vom Fahrzeug am 01.09.2019 um 13:01:36 Uhr eine Kollision festgestellt. Die Aufzeichnung beginnt

4.479,167 s vor der Kollision und endet 2.976,852 s nach der durch das System detektierten Kollision. In Übereinstimmung mit der Fahrzeugkonfiguration am CID finden sich keine Hinweise auf eine Aktivität des Autopilot-Systems. Die Einträge im Log-File mit dem Bezeichner *DAS\_autopilotState* dokumentieren ein inaktives AP-System. Das Fahrzeug protokolliert die Aktivierung des Geschwindigkeits- und Abstandsassistenten ACC und der Lenkfunktion der Autopilot-Funktion separat (ACC + Auto Steer). Eine Aktivierung des Systems wird jeweils im Zustandsübergang zusammen mit dem vorherigen Systemzustand gespeichert. Also z.B.:

*DAS\_accState now 'On' (was 'CancelGeneric')*

für eine Aktivierung des ACC-Systems aus dem vorherigen Zustand *CancelGeneric*.

*DAS\_autopilotState now 'Available' (was 'Unavailable')*

für einen Wechsel des Autopilot-Systems in die Betriebsbereitschaft (noch keine Aktivierung) aus dem vorherigen Zustand *nicht betriebsbereit = Unavailable*

Im betrachteten Zeitraum lag keine Betriebsbereitschaft des Autopilot-Systems vor. Das System konnte und wurde folglich vom Fahrer auch nicht aktiviert. Das System protokolliert die Stärke des vom Fahrer aufgebrauchten Lenkmoments (*VAPI\_handsOnLevel*) in vier Wertebereichen von 0 (keine Drehmomentapplikation) bis 3 (sehr starke Drehmomentapplikation). Eine physikalische Relation mit konkreter Angabe des vom Fahrer am Lenkrad aufgebrauchten Drehmoments in Nm für die angegebenen Bereiche ist derzeit noch nicht untersucht bzw. publiziert. Im zeitlichen Bereich von ca. 10 s bis 4,6 s vor Kollision wurde eine Lenkaktivität des Fahrers durch das System festgestellt. Eine vorkollisionäre Bremsbetätigung (*VAPI\_espBrakePedalState*) wurde nicht festgestellt. Die letzte Betätigung des Bremspedals wurde zwischen ca. 143 und 129 s vor Kollision registriert. Es lässt sich somit zusammenfassend festhalten, dass in den Vehicle Logs des MCU-Steuergeräts keine Hinweise auf die Aktivität eines Fahrerassistenzsystems (DAS = Driver Assistance System) protokolliert sind. Das Fahrzeugsystem hat aber vor und nach der Kollision Aktivitäten des Fahrers registriert (u. a. Bremsen und Lenken).

### **5.1.3 Kollision eines Tesla Model S mit einem Motorradfahrer innerorts an einer Einmündung (Systemkameradaten verfügbar)**

An einer Straßeneinmündung, an der die Verkehrsregelung *rechts vor links* gilt, kommt es zu einem Unfall zwischen einem von rechts kommendem Motorrad und dem aus Sicht des Motorradfahrers von links kommenden PKW. Dieses Szenario und die im Folgenden



beschriebenen Ableitungen wurden durch den Autor bereits in [66] zur öffentlichen Diskussion gestellt.

Bei der klassischen Unfallaufnahme fällt die hohe Wurfweite des Motorradfahrers auf. Mit entsprechenden virtuellen Rekonstruktionsmethoden lässt sich damit eine überhöhte Geschwindigkeit des Motorradfahrers nachweisen. Der Unfall fand in einer Tempo-30-Zone statt. Bei seriöser Berechnung ist, trotz sehr genauer dreidimensionaler Unfallaufnahme, auch mit den neuesten Methoden aufgrund der Unsicherheiten bei den Anknüpfungstatsachen sowie den mathematischen Grenzen der verwendeten Rechenmodelle von Toleranzen in einer Größenordnung von bis zu +/-10 km/h bei der Kollisionsgeschwindigkeit des Motorradfahrers auszugehen. Dies zeigen ähnlich gelagerte Fälle aus der Berufspraxis des Autors. Von der vorkollisionären Einlaufphase beider Fahrzeuge fehlen aufgrund verbauter ABS-Systeme bzw. nicht eingeleiteter Bremsung jegliche Spuren. Darüber hinaus ist beim unfallbeteiligten Tesla Model S kein unabhängig auslesbarer EDR verbaut. Selbst bei einem verbauten EDR wäre aufgrund der stark streifenden Kollision nicht zwangsläufig von einer Speicherung des Unfalls im EDR auszugehen, da die Trigger-Schwellen nach 49 CFR Part 563 beim gegenständlichen Unfall nicht erreicht wurden. Beim beteiligten PKW werden jedoch umfangreiche Daten proprietär und per Luftschnittstelle (OTA) an den Hersteller gesendet. Dabei ist für unabhängige Dritte intransparent, in welchem Umfang Daten permanent bzw. eventbasiert gesendet werden. Im konkreten Fall konnten über eine entsprechende staatsanwaltschaftliche Anordnung beim Hersteller sämtliche Systemvideos gesichert werden, die den Unfall dokumentieren. Ein Standbild aus der Frontkamera ist auf Abbildung 38 zu sehen.

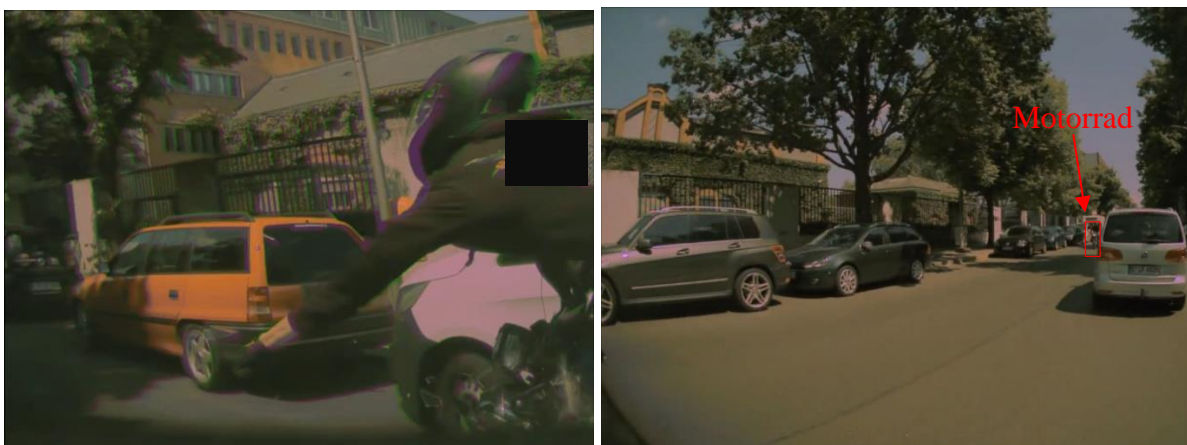


Abbildung 38: Standbild aus Systemvideo (Frontkamera) zum unmittelbaren Kollisionszeitpunkt (links) und Sichtverdeckung durch VW Touran in der Annäherung aus Sicht der nach vorne gerichteten Flankenkamera (rechts) [43]

Unter Zuhilfenahme dieser Videos sind der Unfall und insbesondere die Unfallursache erheblich genauer aufklärbar. Die Videos zeigen, neben der nachvollziehbaren, erhöhten Geschwindigkeit des Motorradfahrers, auch die deutliche Sichtverdeckung für den Pkw-Fahrer durch einen querenden VW Touran. Die genaue Weg-Zeit-mäßige Synchronisation der unfallbeteiligten Fahrzeuge mit dem VW Touran ist ohne das entsprechende Videomaterial nicht möglich. Der beteiligte Pkw nimmt über seine verbauten Sensorsysteme und deren Sensorfusion seine Umwelt wahr. Mithilfe dieser Sensorfusionsdaten können Objekte erkannt bzw. verfolgt werden. Diese Objektinformationen, z. B. wann der Pkw das Motorrad erkannte und als Gefahr einstufte, wären für eine weiterführende Unfallanalyse von höchstem Interesse, denn damit könnte ein Reaktionspunkt des Fahrzeuges ermittelt und mit entsprechend aufwendiger virtueller Simulation Vermeidungsszenarien durch das Fahrzeug betrachtet werden. So ließe sich beispielsweise auch nachweisen, dass der Unfall für das System vermeidbar oder unvermeidbar war. Grundvoraussetzung für eine derartige Vorgehensweise ist jedoch, dass die Objektdaten in Verbindung mit den Systemkameradaten zur Verfügung stehen. Durch diese Verfahrensweise kann unter perspektivisch korrekter Einblendung der Objektdaten in die Videodaten eine Korrelation zwischen dem, was das Fahrzeug registriert hat, und dem, was ein Mensch über die Videos sehen würde, hergestellt werden. Dabei könnte beispielsweise nachvollzogen werden, ob die Begrenzung eines Objekts richtig erkannt wurde, und es könnten in Verbindung mit einer sehr genauen 3D-Unfallstellenvermessung und über die Auswertung der Systemkameravideos auch Nachrechnungen der vom System detektierten Entfernungen und Geschwindigkeiten durchgeführt werden. Somit ließen sich auch Hinweise auf fehlerhafte oder fehlerhaft kalibrierte Sensorsysteme leichter detektieren.

Da im vorliegenden Fall jedoch die relevanten Steuergeräte des Teslas für eine weitergehende Analyse hinsichtlich abgespeicherter Objektdaten nicht mehr zugänglich und laut Hersteller auch keine derartigen Daten auf den Backend-Servern vorhanden waren, wurden Versuche mit einem im Forschungszentrum CARISSMA konzipierten Sensorfusions-Testaufbau gemacht (siehe Kapitel 5.2.3). Mit diesen Versuchen soll das enorme Potenzial von Systemkameradaten in Verbindung mit Sensor(fusions) nachgewiesen werden.

### **5.1.4 Zusammenfassung und Diskussion der Untersuchungsergebnisse aus der Analyse realer Unfälle**

Es ist festzuhalten, dass durch die dargestellten Methoden eine Vielzahl unfallrelevanter digitaler Spuren aus den untersuchten Fahrzeugen extrahiert werden konnte. Das Grundproblem bei der Verwendung der ausgelesenen Daten im Rahmen einer juristischen Aufarbeitung eines Verkehrsunfalls ist darin zu sehen, dass die Datenpunkte oftmals, wie exemplarisch anhand der ausgearbeiteten Unfälle gezeigt, nicht standardisiert sind und auch nicht originär für die Aufklärung von Verkehrsunfällen konzipiert wurden. Dies hat zur Folge, dass in den meisten Fällen keine belastbaren Fehlertoleranzen selbst vom Fahrzeughersteller oder involvierten Steuergeräte-Zulieferer angegeben werden können. Am Beispiel der vermeintlich abgelegten Kollisionsgeschwindigkeit von ca. 232 km/h im Airbag-Steuergerät des BMW M4 in Verbindung mit einer detaillierten Auswertung aller zugänglichen digitalen Spuren aus diesem Steuergerät wird deutlich, dass die bestehende Elektronik-Architektur nicht dafür ausgelegt ist, juristisch belastbare Werte mit eindeutiger Fehlertoleranzangabe zu liefern. Teilweise werden durch eine tiefgründige Auswertung zusätzliche Fragen aufgeworfen, die nicht zweifelsfrei geklärt werden können. Auch bei den aufgearbeiteten Fällen war partiell bei diskussionswürdigen Datenelementen und deren Interpretation ein Verweis des Herstellers auf den Zulieferer und zurück in einer Endlosschleife zu konstatieren. Der gewählte Hochgeschwindigkeitsunfall illustriert plastisch, wie immens groß inzwischen die Datenflut ist, die im Rahmen einer vollumfänglichen Unfallrekonstruktion allein schon aus Gründen der Beweissicherungspflicht auszuwerten ist. Der damit einhergehende deutlich erhöhte Arbeitsaufwand für alle im juristischen Prozess Beteiligten, vor allem für die involvierten Sachverständigen, aber auch für die Fahrzeug- bzw. Steuergerätehersteller der unfallbeteiligten Fahrzeuge, führt zu prozessökonomisch nicht wünschenswerten Konstellationen hinsichtlich der zu erwartenden Kosten und Prozessdauern. Zudem besteht die Gefahr, dass ohne standardisierte, vertrauenswürdige Datenpunkte sich teilweise widersprechende digitale Spuren ergeben, die nicht zu mehr Rechtssicherheit führen, sondern die im juristischen Prozess die Beteiligten verunsichern. Wie [76] zeigt, sind viele Sachverständige auch noch nicht in ausreichendem Maße hinsichtlich der Extraktion und Verwendung dieser digitalen Spuren geschult und qualifiziert. Die enorme Komplexität und der große Umfang der bei den dargelegten Unfällen gesicherten digitalen Spuren öffnet bei nicht sach- und fachgerechter Vorgehensweise Fehlinterpretationen Tür und Tor.

Letztendlich zeigen die durchgeführten Analysen der realen Unfälle, dass eine Plausibilisierung der digitalen Spuren und deren Einordnung in einen wissenschaftlich begründbaren Ergebnisraum nur in der Zusammenschau mit einer klassischen Unfallrekonstruktion basierend auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten möglich ist. Vor diesem Hintergrund kommt in Zukunft einer möglichst genauen Aufnahme der relevanten Spurenlage an der Unfallstelle sowie an den beteiligten Fahrzeugen und der virtuellen Rekonstruktion durch ganzheitlich ausgebildete Sachverständige mit zusätzlicher Expertise hinsichtlich der Einordnung digitaler Spuren eine noch größere Bedeutung zu. Um Rechtssicherheit und gleiche juristische Randbedingungen herzustellen, ist es auch notwendig, standardisierte juristische Verfahren einzuführen, damit die digitalen Spuren sinnvoll und kostengünstig in den juristischen Prozess eingeführt werden können. Dies gilt insbesondere so lange, bis verbesserte und standardisierte EDR-Systeme flächendeckend verfügbar sind (siehe FEDR-Konzept in Kapitel 5.4), die eine autarke Unfallrekonstruktion durch einen unabhängigen Dritten ermöglichen würden. Es ist unbedingt zu vermeiden, dass Art und Umfang der gesicherten digitalen Spuren und die Kosten für deren Beschaffung vom Engagement der beteiligten Gutachter oder Strafverfolgungsbehörden abhängen und damit möglicherweise je nach Unfallort differieren. Insbesondere das Thema wie, in welcher Weise und zu welchen Kosten die Fahrzeug- bzw. Steuergerätehersteller über rechtlich bindende Beschlüsse eine Mitwirkungspflicht bei der Bereitstellung und Interpretation unfallrelevanter Spuren haben, bedarf einer abgestimmten und standardisierten juristischen Vorgehensweise. Dieser Punkt wird perspektivisch mit der erhöhten Marktdurchdringung automatisierter und vor allem vernetzter Fahrzeuge signifikant wichtiger werden, da vermehrt unfallrelevante Daten exklusiv auf Backend-Servern der Hersteller zu finden sein dürften. Dies zeigen auch die untersuchten Realunfälle. Teilweise betrifft dies sogar Videosequenzen eines Unfalls, die von den Systemkameras aufgezeichnet wurden (siehe Kapitel 5.1.3). Insgesamt würde eine möglichst standardisierte technische und juristische Vorgehensweise nicht nur zu mehr Rechtssicherheit auf diesem Gebiet beitragen, sondern eine solche Vorgehensweise würde es den Herstellern durch klare Rahmenbedingungen erlauben, ihre Mitwirkungsprozesse zu optimieren, was sich qualitäts- und kostenmäßig positiv auf alle Verfahrensbeteiligten auswirken würde.

Die Analyse der beispielhaft ausgewählten realen Verkehrsunfälle führt plakativ vor Augen, warum unter den extrahierten digitalen Spuren hochauflösende Videoaufnahmen verbauter Systemkameras das größte Potenzial haben, komplexe Unfallabläufe unter Beteiligung von (teil-)automatisierten und vernetzten Fahrzeugen möglichst anschaulich auch für technische Laien aufzuklären. Vor dem Hintergrund sehr großer Datenmengen kommt den Videos nach



einer sachverständigen Aufbereitung außerdem eine Position als Kontroll- und Plausibilisierungsinstanz zu. Zusätzlich ergeben sich mannigfaltige Aspekte bei der Einbeziehung der Systemkameradaten, die in Kapitel 5.3 ausführlich erläutert werden.

### **5.2 Laborversuche im CARISSMA-Testzentrum und auf dem DEKRA Automobil Test Center**

Da im realen Verkehrsgeschehen bis dato sehr wenige Unfälle mit Beteiligung von Advanced Driver Assistant Systems (ADAS) oder Fahrzeugen mit automatisierten Fahrfunktionen auf SAE-Level 3+ präsent sind, kann auch dementsprechend der Einfluss dieser Systeme auf den Unfallablauf und die Möglichkeiten der Extraktion digitaler Spuren nur unzureichend wissenschaftlich aufgearbeitet werden. Deshalb wurden in den Einrichtungen des CARISSMA Test- und Forschungszentrums Laborversuche durchgeführt, die zum einen mögliche Methoden für einen zerstörungsfreien Zugang zu den relevanten digitalen Spuren aufzeigen sollten und zum anderen den Einfluss der Systeme auf den Unfallablauf am Beispiel der AEB-Funktion näher aufklären. Da ein vollständiger zerstörungsfreier Zugriff auf die Systemkamera- bzw. Sensorfusionsdaten in Echtzeit bei den verwendeten Versuchsfahrzeugen der Marken Audi und Tesla nicht möglich war, wurde ein eigenständiger Testaufbau entwickelt. Mit diesem Testaufbau soll die entwickelte Methode zur visuellen Korrelation zwischen Sensorfusionsdaten und sehr genauer 3D-Unfallstellenaufnahme validiert werden.

#### **5.2.1 Versuche zur Automatic-Emergency-Braking(AEB)–Funktion am Beispiel eines Audi A4 und Tesla Model X**

An der TH Ingolstadt wurden im Forschungszentrum CARISSMA Versuche zur automatischen Notbremsfunktion (AEB) von Fahrzeugen sowohl indoor als auch outdoor durchgeführt, die eingehend bei der durch die israelische Ländergruppe virtuell veranstalteten EVU-Jahrestagung 2020 am 07.10.2021 durch den Autor vorgestellt wurden [77]. Die AEB-Funktion wurde dabei deshalb gewählt, weil sie standardmäßig bis dato nicht im EDR nach US-Norm erfasst wird [11] aber unfallrelevante Systemeingriffe durchführt. Ziel dieser Versuche war es, das AEB-Systemverhalten moderner Fahrzeuge, wie Bremsverzögerung, Verzugszeiten, und eventuell gespeicherte digitale Spuren zu untersuchen. Es wurde auf zwei Grundscenarien zurückgegriffen, die unter der Bezeichnung Car-to-Pedestrian Nearside Child 50 % (CPNC-50) bzw. Car-to-Car Rear Stationary (CCRs) in den EURO-NCAP-Testprotokollen definiert sind.

Dabei bewegt sich ein von parkenden Fahrzeugen verdecktes Kinder-Target in den Fahrkorridor des Vehicle under Test (VUT). Fahrzeug und Fußgänger-Target werden dabei so synchronisiert, dass sich ein möglicher Kontakt in der Mitte der Fahrzeugfront ereignen würde (siehe Abbildung 39)

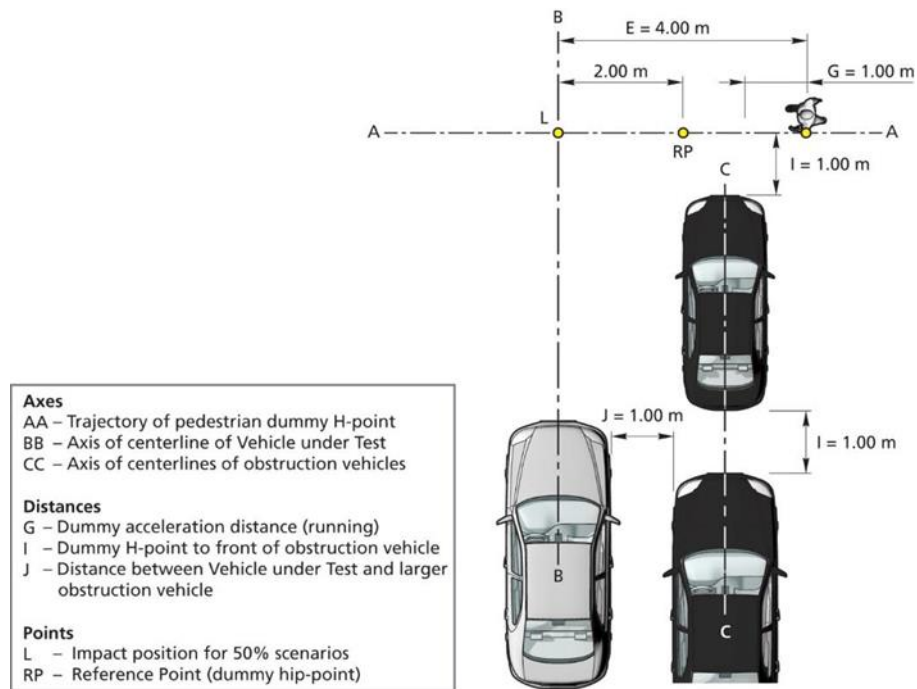


Abbildung 39: Grafische Darstellung des EURO-NCAP Tests CPNC-50 [78]

Es ist aus Sicht des Autors darauf hinzuweisen, dass dieses Szenario entsprechend den EURO-NCAP-Rahmenbedingungen nur einen sehr engen Ausschnitt des realen Verkehrsgeschehens wiedergibt. Um die Resilienz der untersuchten AEB-Systeme näher zu beurteilen, wurden auch Versuche bei Regen und Dunkelheit durchgeführt. Des Weiteren wurden leicht abgeänderte Randbedingungen, beispielsweise die Verwendung eines Erwachsenen- oder Kinder-Targets, Ausgangsgeschwindigkeiten des VUT von 14 bis 32 km/h sowie eine leichte Variation der Synchronisation zwischen den beteiligten Objekten bei den Versuchen mitberücksichtigt.

### 5.2.1.1 Versuchsmethode und Versuchsdurchführung

Im ersten Schritt wurden Vorversuche auf der Outdoor-Versuchsanlage mit einem selbst konstruierten Schaumstoff-Dummy, der von einer UFO-Plattform der Firma Humanetics gezogen wurde, durchgeführt. Die vorhandene Fahrbahnoberfläche, eine Schwarzteerdecke, weist Reibbeiwerte auf einem Niveau wie auf öffentlichen Straßen auf. Als Ego-Fahrzeug

wurde ein Audi A4 Avant mit der Ausstattungsvariante Audi pre sense city und als Sichthindernis ein Audi Q7 verwendet. Dies ist auf Abbildung 40 zu sehen.

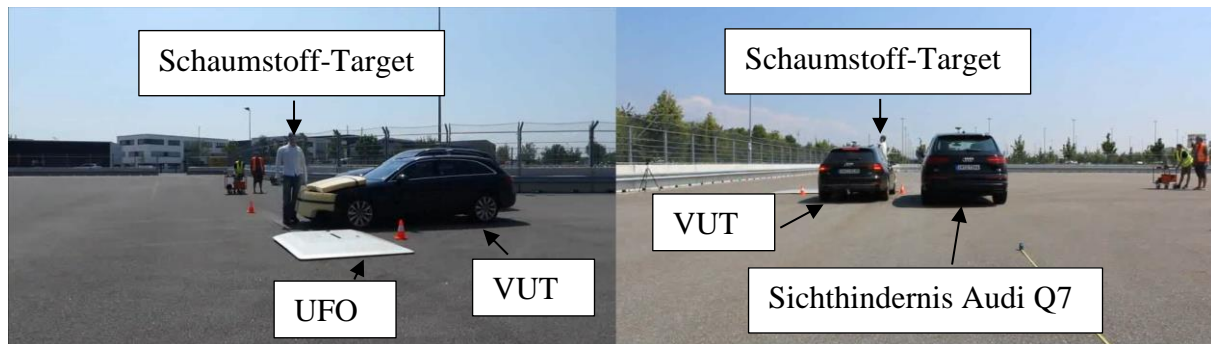


Abbildung 40: Versuchsanordnung AEB-Outdoor-Versuch mit Audi A4 Avant [Quelle: Autor]

Bei diesen Versuchen zeigte sich, dass das AEB-System des Audis nicht sicher auf den selbst konstruierten Schaumstoff-Target reagierte und dieser durch die Kollisionen teilweise irreversibel geschädigt wurde. Die Vorversuche lieferten jedoch wertvolle Ergebnisse im Hinblick auf den Umfang und die Auswertung der verwendeten Mess- und Videotechnik und bzgl. einer effizienten Versuchsdurchführung. Für die Erfassung der Fahrdynamikdaten wurde ein Automotive Dynamic Motion Analyzer (ADMA) mit Differential-GNSS-Anbindung (DGNSS) des Herstellers Genesis verwendet. Dieses Messmittel bietet eine Genauigkeit von  $\pm 0,01$  m/s bei der Geschwindigkeit, von  $\pm 0,001$  g bei der Beschleunigung und von  $\pm 0,1$  m betreffend die gemessenen Entfernungen. Im Innenraum des Fahrzeuges wurden ausschließlich GoPro-Kameras und im Außenbereich digitale Spiegelreflexkameras für die Aufzeichnung der Versuchsvideos verwendet. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus den Vorversuchen wurden Indoor-Versuche durchgeführt, bei denen in der CARISSMA-Versuchshalle unter Laborbedingungen Tests auch bei Dunkelheit bzw. Regen gefahren wurden. Dabei wurde als VUT ein Tesla Model X mit Erstzulassung 2018 und Autopilot Version 2.5, Softwareversion Feb. 2020 verwendet. Insgesamt wurden 13 Versuche mit vollständiger Datenaufzeichnung durchgeführt. Es wurden acht Notbremsversuche mit einem querenden, auf einer UFO-Plattform befestigten Erwachsenen-Target der Firma 4a und fünf Notbremsversuche auf ein stehendes Global Vehicle Target (GVT) ausgeführt. Die Vorversuche zeigen, dass der Tesla in dieser Versuchskonfiguration gar nicht auf das Kinder-Target reagiert, weshalb auch keine detaillierte Auswertung der Vorversuche erfolgte. Wie auf Abbildung 41 zu sehen, wurden zur übersichtlichen Dokumentation und Auswertung insgesamt sechs synchronisierte Videostreams aufgezeichnet.



Abbildung 41: Versuchsaufbau AEB-Tests mit Kamera-Setup und Beschreibung [Quelle: Autor]

Diese wurden mit den Bewegungsdaten der UFO-Plattform und den Fahrdaten des Teslas, die mittels des erwähnten ADMA-Inertialsystems der Firma Genesis in Verbindung mit einem Correvit-Geschwindigkeitssensor der Firma Kistler aufgezeichnet wurden, korreliert. Beim Tesla wurden neben den Fahrdaten und den damit erfassten Systemeingriffen insbesondere im Hinblick auf Bremsverzögerung und Verzugszeiten des AEB-Systems darüber hinaus auch die angezeigten Piktogramme und Systemmeldungen im Kombiinstrument ausgewertet. Über die Positionsbestimmung, die neben den verwendeten Messsystemen auch durch die Nutzung des Kameraoptimierungsmoduls in PC-Crash verfeinert wurde, kann eine Verknüpfung zwischen Anzeige im Kombiinstrument und der tatsächlichen Position der unfallbeteiligten Verkehrsteilnehmer bestimmt werden.

### 5.2.1.2 Vergleich der Piktogramm-Anzeige im Kombiinstrument mit der realen Position des VRU

Da eine Online-Extraktion der Systemkamera- bzw. Sensorfusions-Daten in Echtzeit beim verwendeten Tesla-Versuchsfahrzeug im ersten Schritt nicht möglich war, wurden die Anzeigen im Kombiinstrument hilfsweise herangezogen. Damit lassen sich, wie oben ausgeführt, Fragen bezüglich Latenzzeiten unter Vernachlässigung der Verzugszeit der Anzeige im Kombiinstrument bzw. Fragen zur Objekterkennung, Klassifizierung sowie Verortung in erster Näherung beantworten. Damit eine Interpretation erfolgen kann, wurden die synchronisierten externen Videodaten analysiert, die bereits eine zeitliche Vergleichbarkeit zwischen dem real aufgenommenen Geschehen und der dargestellten Anzeige im Kombiinstrument ermöglichen. Hierfür wurden einzelne Zeitpunkte in der Videosequenz bildlich festgehalten, damit die Anzeige im Kombiinstrument dem realen Geschehen

gegenübergestellt werden kann. Es wurde die Kamera mit freier Sicht aus der Windschutzscheibe für den Abgleich mit den Aufzeichnungen des Kombiinstrument verwendet. Damit aus den aufgezeichneten Zeitpunkten die dazugehörigen Positionen ermittelt werden können, wurde mithilfe des Rekonstruktionstools PC-Crash ein Bildabgleich durchgeführt. Dabei wurde das Programmmodul *Kamera Optimierung* verwendet. Basis dafür ist eine 3D-Vermessung der CARISSMA-Versuchshalle sowie die Piktogramm-Einblendung des Ego-Fahrzeugs und erkannter Objekte im Kombiinstrument des Teslas. Diese Vorgehensweise ist auf Abbildung 42 dargestellt.



Abbildung 42: Positionsbestimmung durch Kameraoptimierungsmodul in PC-Crash [77]

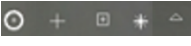
Der Messfehler der realen Position, sowohl des VUT als auch des Targets von  $\pm 0,1$  m basierend auf den ADMA-Daten, kann durch diese Methode reduziert werden. Dennoch wurde der maximale Fehler von  $\pm 0,1$  m bei der Auswertung berücksichtigt (siehe Abbildung 43 und Abbildung 44 – die Größe der Symbole  stellt ungefähr den Fehler dar). Die Fehlerabschätzung der ermittelten Position des VUT relativ zur Target-Darstellung im Display kann nur auf allgemeinen Überlegungen zur Genauigkeit der verwendeten Methode (Bildüberlagerung in PC-Crash) beruhen. Die Erfahrungen des Autors mit dieser Methode in Kombination mit dem auf dem Display dargestellten Blickwinkel und der sehr guten Übereinstimmung der Referenzpunkte (rote und grüne Punkte auf Abbildung 42) lassen eine Genauigkeit von weniger als  $\pm 0,1$  m erwarten (siehe Abbildung 43 und Abbildung 44). Zur weiteren Interpretation des Verhaltens des Systems wurden die ermittelten Positionen mit den Videoaufnahmen korreliert und in einer Übersicht zusammengefasst. Dazu wurde eine Vorlage verwendet, die der Tabelle 2 entnommen werden kann. Die Videos wurden mit einer Aufnahmezeitrate von 60 fps aufgezeichnet und haben somit das Zeitformat [s:f].





Tabelle 2: Vorlage zur Auswertung der Positionen zwischen Kombiinstrument und Realität

Beschreibung der aufgenommenen Position, Zeitpunkt der Aufnahme	
1. Aufnahme der Kamera, die die Sicht aus der Windschutzscheibe des VUT aufzeichnet.	2. Aufnahme der Kamera, die die Anzeige des Kombiinstrumentes aufzeichnet.
3. Aufnahme der Kamera, die die Gesamtübersicht von außen aufzeichnet.	4. Auswertung der Positionen PC-Crash

Für die folgenden Interpretationen wurden die Aufnahmen von drittens und viertens aus Tabelle 2 zur besseren Vergleichbarkeit entfernt. Eine detailliertere Aufstellung der Versuchsdaten ist im Anhang V zu finden.

Am Beispiel des Versuchs 3.7 (Tabelle 3 und Abbildung 43) ist eine deutliche Fehlinterpretation des Systems festzustellen, da zu Beginn der Erkennung ein Motorrad auf der Fahrbahn detektiert wird, wohingegen sich das 4a-Erwachsenen-Target zu diesem Zeitpunkt mittig zur Fahrzeugachse befand. Vor der Kollision wurde das Target als Mensch erkannt und auch so im Display wiedergegeben.

Tabelle 3: Auszug aus der Auswertung von Versuch 3.7

Versuch 3.7	
Position 1: Erstes Erscheinen des Targets (in Form eines Motorrads) als Warnung, Videozeitpunkt: 10:19 [s:f]	
	
Position 2: Erkennung als menschliches Target kurz vor Kollision, Videozeitpunkt: 10:25 [s:f]	
	

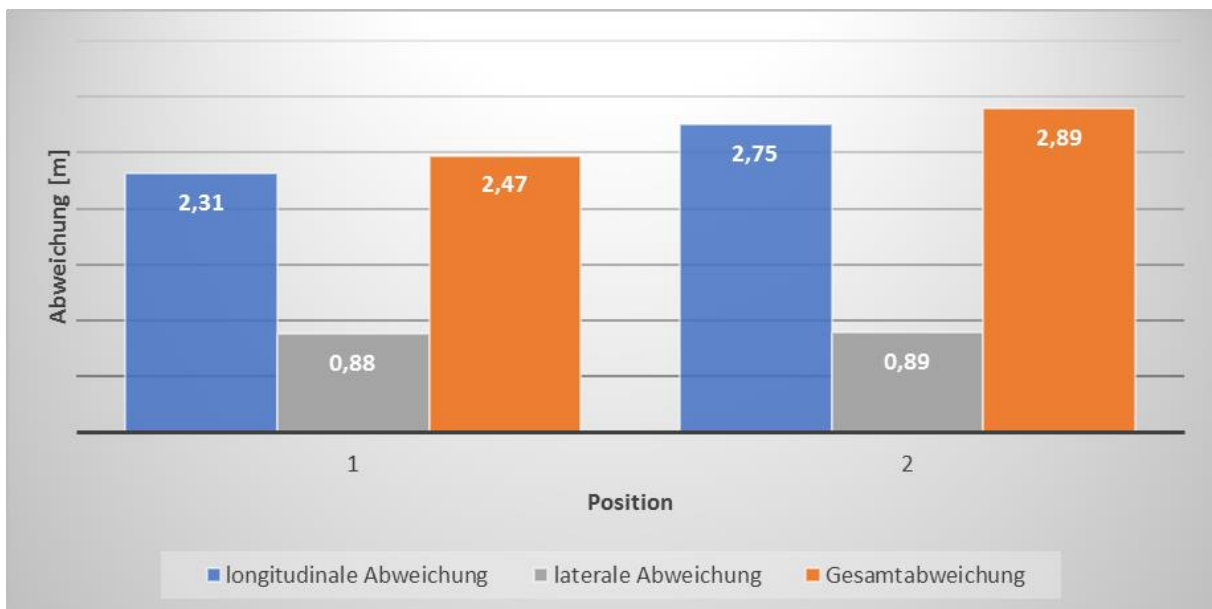
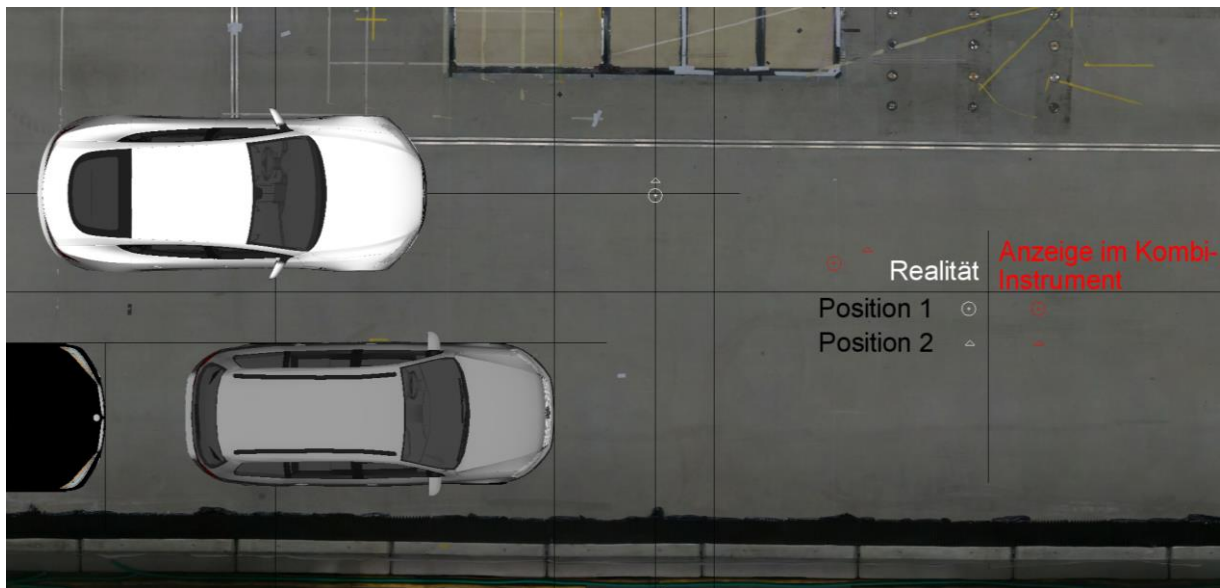


Abbildung 43: Vergleich zwischen Realität und Anzeige im Kombi-Instrument aus Experiment 3.7 [77]

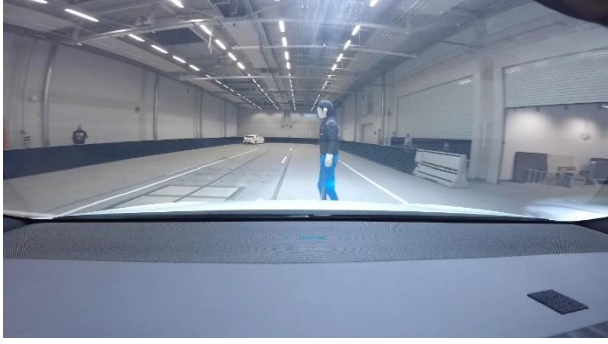







Weitere Fehlinterpretationen des Systems sind dem Versuch 3.15 aus der Tabelle 4 und Abbildung 44 zu entnehmen. In diesem Fall wurde das Target detektiert, jedoch wird es trotz unmittelbar bevorstehender Kollision nicht als Gefahr erfasst. Im weiteren Verlauf des Versuches wird kein Target im Display angezeigt, wobei sich dieses unmittelbar im Gefahrenbereich befindet. Nach der Kollision wird der Dummy wieder als Gefahr dargestellt und im weiteren Verlauf des Crashes wird zusätzlich seitlich, auf Höhe der geparkten Fahrzeuge, ein zweiter Mensch als Gefahr erkannt.

Abbildung 43 und Abbildung 44 zeigen, dass die größte Abweichung zwischen der Repräsentanz im Kombiinstrument und der Realität überwiegend bei der ersten Erkennung des Objektes vorliegt. Dies ist auch denklogisch dadurch nachvollziehbar, dass zu diesem Zeitpunkt beide Unfallbeteiligte noch relativ weit voneinander entfernt sind und damit bei der von Tesla hauptsächlich verwendeten Fußgängererkennung über die Windschutzscheiben-Systemkamera unter Zuhilfenahme künstlicher Intelligenz [79] die größten Fehler auftreten. Des Weiteren ist zu konstatieren, dass kurz bevor eine Objekterkennung abbricht, bzw. bei Entstehung der beschriebenen Artefakte, ebenfalls größere Fehler bei den durchgeführten Untersuchungen auftreten. Dies ließe sich beispielsweise dadurch erklären, dass im System Plausibilisierungsalgorithmen implementiert sind, die bei einer entsprechenden Überschreitung von Grenzwerten dazu führen, dass Objekte nicht mehr im Kombiinstrument dargestellt werden. Kurz bevor dies der Fall ist, wären demnach bei den untersuchten Versuchen die Fehler am größten, was sich auch mit den Versuchsergebnissen deckt.

Grundsätzlich ist auch festzuhalten, dass ein Kontakt des Fahrzeuges mit dem Target dann am besten verhindert werden konnten, wenn die Situation durch das System möglichst früh als Gefahr eingestuft wurde, was mit der Darstellung eines roten Piktogramms im Kombiinstrument einhergeht. Die Genauigkeit der Positionsanzeige der Piktogramme ist kritisch zu hinterfragen. Zusätzlich sind Latenzzeiten bei der Anzeige zu erwarten. Eine belastbarere Aussage darüber, was das System zu welchem Zeitpunkt detektiert hat, lässt sich nur über einen Echtzeitmitschnitt der Objektlisten auf den Bussystemen des Fahrzeugs realisieren. Das Hauptproblem ist dabei die Entschlüsselung der Busnachrichten, was ohne die Mithilfe des Fahrzeugherstellers erheblichen Reverse-Engineering-Aufwand bedeutet. Dieser Punkt soll jedoch bei zukünftigen Versuchen im Forschungszentrum CARISSMA berücksichtigt werden.



Tabelle 4: Auszug aus der Auswertung von Versuch 3.15

<b>Versuch 3.15</b>	
Position 1: Erstes Erscheinen des Targets ohne Warnung trotz Gefahrenbereich, Videozeitpunkt: 09:21 [s:f]	
	
Position 3: Kollisionszeitpunkt ohne Erkennung des Targets, Videozeitpunkt: 09:34 [s:f]	
	
Position 4: Wiedererkennung des Targets als Warnung, Videozeitpunkt: 09:41 [s:f]	
	
Position 5: Erkennung eines zweiten Targets an der Seite des VUT, Videozeitpunkt: 09:56 [s:f]	
	

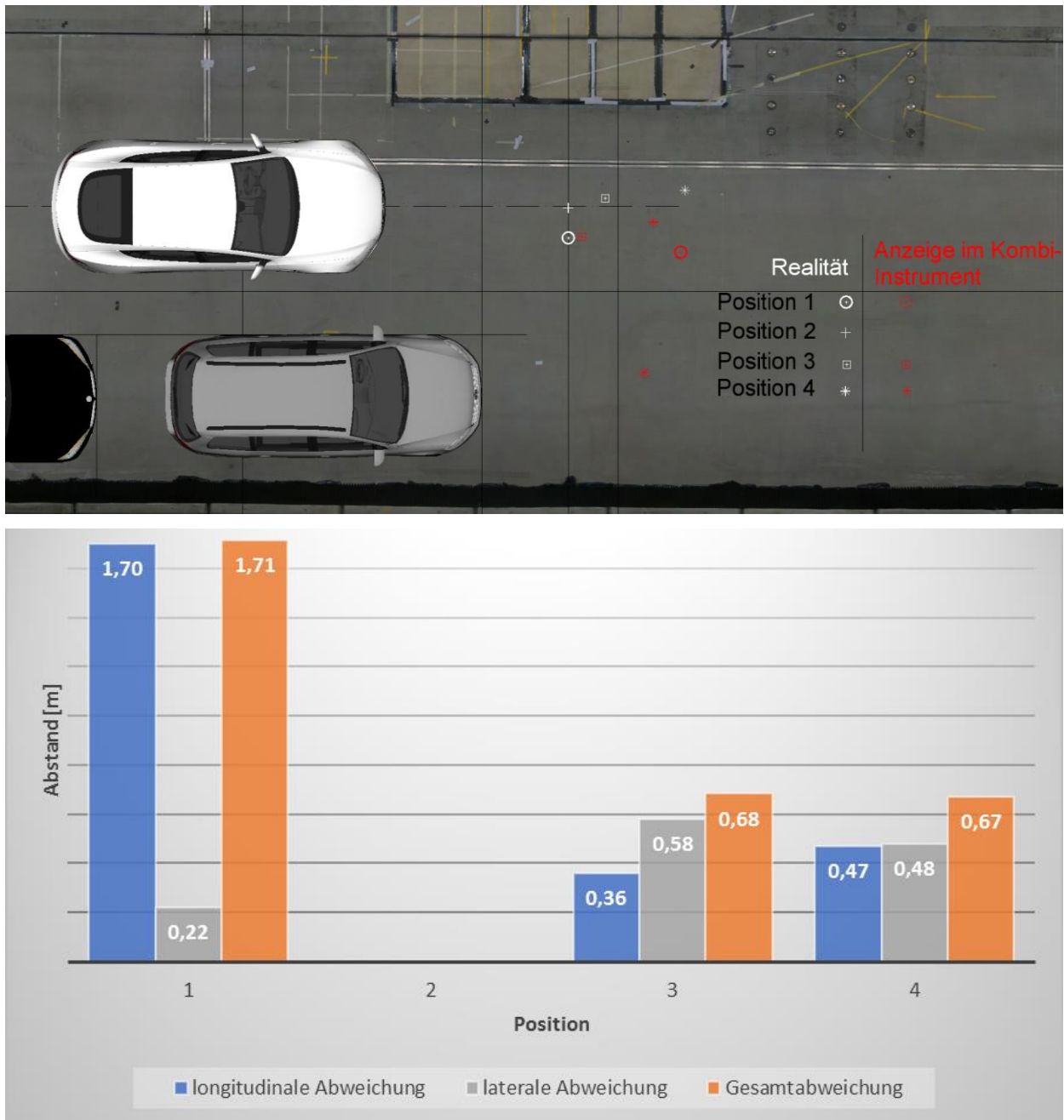


Abbildung 44: Vergleich zwischen Realität und Anzeige im Kombi-Instrument aus Experiment 3.15 [77]

### 5.2.1.3 Diskussion der Versuchsergebnisse

Grundsätzlich ist bei den durchgeführten Versuchen zwischen Notbremsversuchen auf ein stehendes Fahrzeug-Target (C2C-Versuche) und denen mit einem kreuzenden Fußgänger-Target zu unterscheiden. Eine Vergleichbarkeit von Versuchen mit unterschiedlichem Testablauf ist aus Sicht des Autors nicht sinnvoll, weshalb für jede Versuchsreihe eine eigene Übersichtstabelle erstellt wurde. Bei den C2C-Versuchen sprach beim verwendeten Tesla die

AEB-Funktion in 100 % der Fälle sicher an und es wurden mittlere Bremsverzögerungen in einem Bereich von 7,47 bis 7,94 m/s<sup>2</sup> erzielt (vergleiche Abbildung 45).

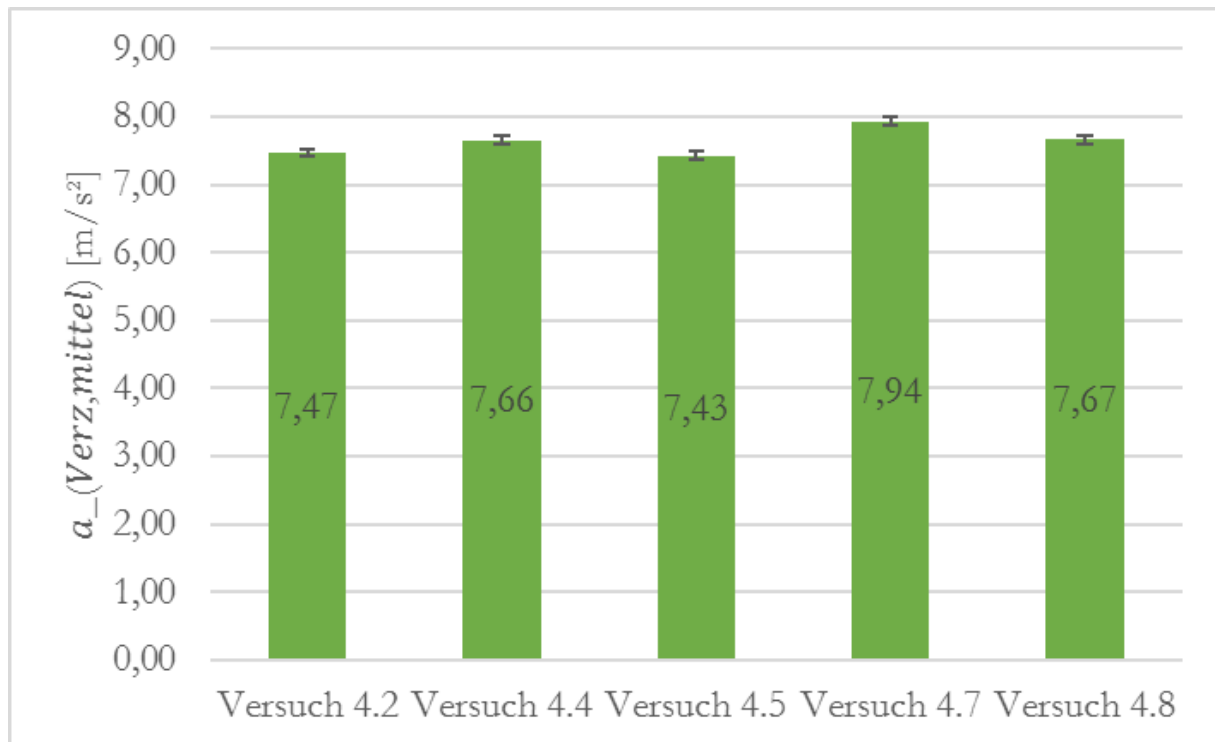


Abbildung 45: Mittlere Verzögerung aus C2C-Versuchen [77]

Dies entspricht dem maximalen Vollbremsverzögerungsniveau, das mit der verbauten Fahrbahnoberfläche in der Indoor-Halle erzielbar ist. Das Verzögerungspotenzial wurde auch durch manuell ausgeführte Vollbremsversuche verifiziert. Bei sämtlichen der folgenden Charts wurde eine ausführliche Fehlerrechnung durchgeführt, die durch die angegebenen Vertrauensbereiche in Form der kleinen schwarzen Balken abzulesen ist.

Die durchgeführten Versuche mit dem stationären Target unter verschiedenen Umgebungsbedingungen fanden jeweils ohne Kollision statt, da das AEB-System frühzeitig reagierte. Die Durchläufe 4.2 und 4.4 wurden mit eingeschaltetem Hallenlicht gefahren. Bei den restlichen ausgewerteten Durchläufen wurde die Halle komplett abgedunkelt und beim Versuch 4.8 die Indoor-Regenanlage eingesetzt. Bei den Tests, die im Dunkeln durchgeführt wurden, ist festzustellen, dass das Target durch die Sensoren früher erkannt wird, als es subjektiv für den Fahrer möglich war (vergleiche Abbildung 46). Dies zeigt, dass die heute schon verbauten Assistenzsysteme und perspektivisch noch mehr automatisierte Fahrfunktionen das Potenzial aufweisen, die Verkehrssicherheit über die Grenzen der physiologischen menschlichen Leistungsfähigkeit hinaus zu erhöhen.

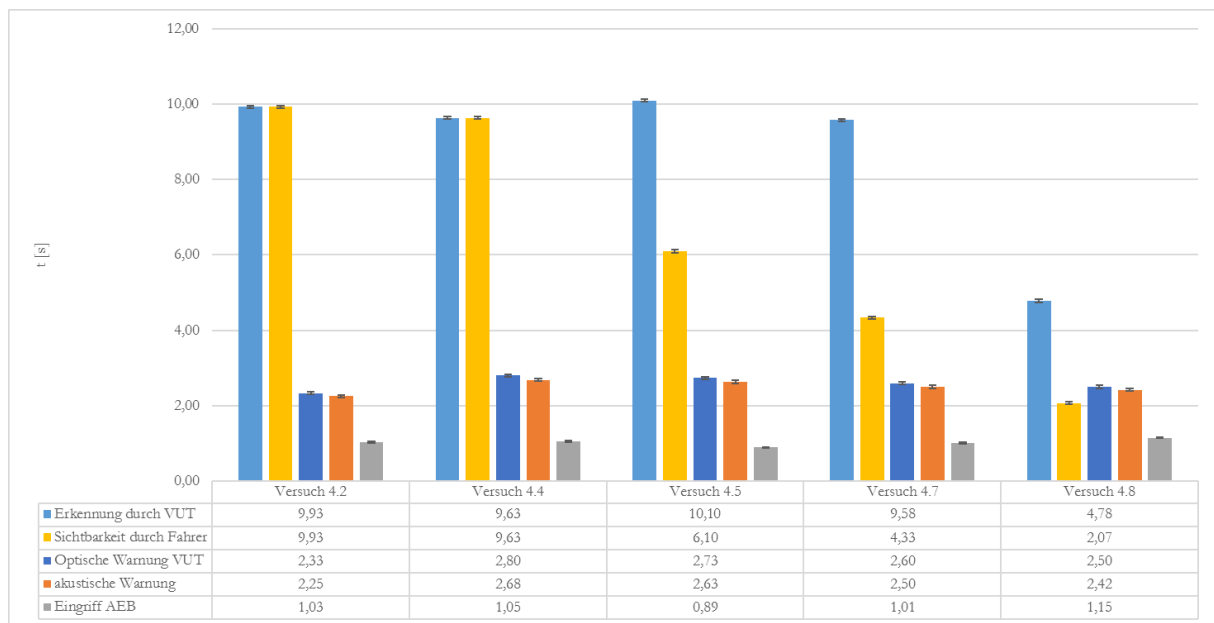


Abbildung 46: Auswertung der zeitlichen Abstände zu  $t_0$  aus C2C-Versuchen [77]

Im folgenden Abschnitt wird eine detaillierte Auswertung der Versuche mit dem kreuzenden Fußgänger-Target durchgeführt. Wie Abbildung 47 zeigt, ist in den Labortests trotz vergleichbarer Randbedingungen ein Systemverhalten mit einer großen Bandbreite bezüglich der AEB-Funktion zu beobachten.

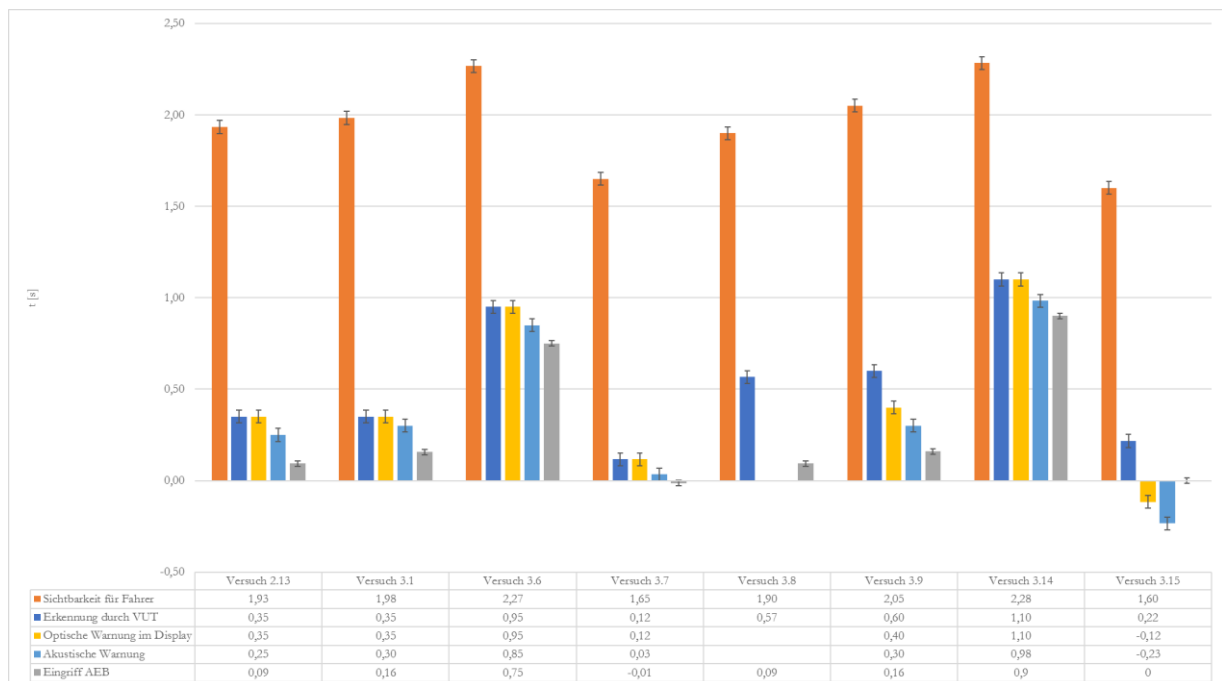


Abbildung 47: Auswertung der zeitlichen Abstände zu  $t_0$  aus Versuchen mit Erwachsenen-Target [77]

Dabei sind die Bezeichnungen der einzelnen Grafikbalken analog auf Abbildung 46 anzuwenden und wie folgt zu verstehen: Unter der *Sichtbarkeit für den Fahrer* wird der Zeitpunkt herangezogen, ab der die volle Silhouette des Fußgänger-Targets aus Fahrersicht erkennbar ist. In erster Näherung wurde bei der Auswertung dabei auf das Videomaterial der an der Windschutzscheibe angebrachten Kamera zurückgegriffen. Bei zukünftigen Versuchen werden hier Eye-Tracking-Systeme referenziert auf den Fahrer eingesetzt. Als *Erkennung durch VUT* wird der Zeitpunkt unterstellt, bei dem erstmals im Kombiinstrument ein graues oder rotes Piktogramm des VRU bzw. eines Artefaktes erscheint. Die *Optische Warnung im Display* ist definiert als erstes Erscheinen einer roten Repräsentanz (Piktogramm) des VRU. Unter *Akustische Warnung* wird der Beginn des vom System initiierten Piep-Geräusches vor Eingriff der AEB-Funktion verstanden. Der *Eingriff AEB* bezeichnet den Beginn der Einblendung *automatische Notbremsung wird durchgeführt* im Kombiinstrument, was unter Berücksichtigung der Ansprechzeiten des Bremssystems in unmittelbarem zeitlichen Zusammenhang mit der Einleitung der Vollbremsverzögerung durch das System steht. Nur bei einer sehr frühzeitigen Erkennung des Targets durch das VUT, wie dies bei den Versuchen 3.6 und 3.14 der Fall war, konnte eine Kollision vermieden werden. Warum die daraus ableitbare Latenzzeit des Systems, also die zeitliche Differenz zwischen der Sichtbarkeit für den Fahrer und die Erkennung des Targets durch das VUT wie auf Abbildung 47 dargestellt, trotz vergleichbarer Randbedingungen derart differiert, ist letztendlich ohne tiefere Kenntnis der Methoden der Objekterkennung und Klassifikation durch die implementierte künstliche Intelligenz (KI) nicht belastbar möglich. An diesem konkreten Beispiel wird die Notwendigkeit von Forschung in Richtung einer erklärbaren künstlichen Intelligenz (explainable AI) deutlich. Die Versuche deuten darauf hin, dass der Black-Box-Prozess der Systemkameradaten-Verarbeitung mittels künstlicher Intelligenz sehr sensitiv auf minimale Änderung der Randbedingung reagiert. Aus unfallanalytischer Sicht ist bei Verwendung von KI-Systemen bei der aktiven oder passiven Fahrzeugsicherheit vor diesem Hintergrund eine *explainable AI* mit Dokumentation der Entscheidungsgrundlagen, warum das System wie reagiert hat, zu fordern. Wie die durchgeführten Versuche zeigen, ist das Systemverhalten ohne eine derartige Dokumentation nicht konsistent erklärbar. Im Versuchsdurchlauf 3.8 beispielsweise fand keine Warnung durch das VUT statt, obwohl dieses das Target 0,57 s vor der Kollision erkannt hatte. Trotz fehlender Warnung hat das Versuchsfahrzeug vor der Kollision einen Bremsvorgang eingeleitet. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass das Target als Gefahr erkannt wurde, aber der Fahrer nicht auf diese Gefahr aufmerksam gemacht wurde. Ein ähnliches Verhalten zeigt der Versuch 3.15, bei dem der Fahrer nach der Kollision durch Warnsignale auf die Gefahr

hingewiesen wurde. Bei den Versuchen 2.13, 3.1, 3.7 und 3.9 konnte durch die späte Erkennung des Targets durch das System die Kollision nicht verhindert werden. Wird als objektive Reaktionsaufforderung für die Vermeidbarkeit des Unfalls die vollständige Sichtbarkeit der Silhouette des Fußgänger-Targets aus Sicht des Fahrers des VUT herangezogen, so wäre bei den im Versuch gegebenen Randbedingungen hinsichtlich Fußgängergeschwindigkeit und Annäherungsgeschwindigkeit des Fahrzeuges der Unfall für einen aufmerksamen menschlichen Fahrer in jedem Fall vermeidbar gewesen. Dabei wird als Verzugszeit (menschliche Verzugszeit inklusive Schwellzeit der Bremsanlage) in dieser Verkehrssituation ein Wert von 0,8 s unterstellt. Dies entspricht dem Standardwert, der im Gerichtsbezirk Ingolstadt, entsprechend der langjährigen Berufspraxis des Autors, in derartigen Verkehrsszenarien zur Anwendung kommt. Als mittlere Vollbremsverzögerung wird der auf Basis der Versuchsreihe ermittelte Mittelwert von  $7,63 \text{ m/s}^2$  bei den gegebenen Fahrbahnverhältnissen herangezogen. Ein aufmerksamer menschlicher Fahrer würde demnach in diesem Verkehrsszenario deutlich besser abschneiden als das untersuchte AEB-System, das in weniger als 25 % der Testfahrten eine Kollision verhindern konnte. Im Falle des verwendeten Tesla Model X ist zudem zu beachten, dass die Warnmeldung *Luftfederungseinstellung nicht verfügbar* (siehe Abbildung 42) Warnmeldungen z. B. über den Ausfall des Radarsensors optisch im Display überlagert. Der Ausfall des Radarsensors wurde durch Abkleben desselben simuliert. Diese Überlagerung macht es dem Fahrer unmöglich, den Ausfall des AEB-Systems vor der Kollision zu erkennen. Bei intaktem Sensor-Set wurde aber bei den C2C-Tests eine Kollision in 100 % der Fälle vom AEB-System verhindert, weshalb eine Information des Fahrers über den Ausfall des Systems wichtig wäre. Somit wäre eine Priorisierung dieser AEB-Ausfallmeldung in diesem Fall sinnvoll.

Es ist auszuführen, dass die automatische Notbremsfunktion beim verwendeten Tesla in den C2C-Versuchsszenarien auf ein stehendes Global Vehicle Target (GVT) deutlich stabiler und reproduzierbarer funktionierte als beim Szenario mit dem kreuzenden Fußgänger-Target. Dies dürfte in erster Linie darin begründet liegen, dass beim Szenario mit dem stationären GVT eine für die Sensorkonfiguration des Tesla deutlich einfacher zu erkennende Verkehrssituation vorliegt. Dabei liefert speziell der verbaute Radar an der Fahrzeugfront auch bei geänderten Wetter- und Helligkeitsbedingungen zuverlässige Signale.


### 5.2.1.4 Schlussfolgerungen aus den durchgeführten AEB-Versuchen

Die wichtigsten Schlussfolgerungen aus den AEB-Tests, die mit einem Tesla Model X als Testfahrzeug durchgeführt wurden, lassen sich wie folgt zusammenfassen. Im Längsszenario, in dem das Testfahrzeug mit einem stehenden Pkw-Target interagiert, wird die automatische Notbremsung sicher ausgelöst. Dies gilt auch bei Dunkelheit und Regen. Die mittlere Vollbremsverzögerung, mit der das System verzögert, ist vergleichbar mit der mittleren Vollbremsverzögerung, die messbar ist, wenn der Fahrer die Vollbremsung einleitet. In diesem Szenario schneidet das System in einigen Fällen besser ab als ein menschlicher Fahrer, weil der für das System in diesen Verkehrssituationen entscheidende Radarsensor den menschlichen Sinnen überlegen ist und daher die Bremsung früher erfolgt. Dies gilt insbesondere bei Dunkelheit und Regen. Bei dem kreuzenden Fußgänger-Szenario konnte nur in weniger als 25 % der Fälle eine Berührung mit dem Auto vermieden werden. Darüber hinaus gibt es eine große Varianz in der Systemreaktion. In diesem Szenario würde ein aufmerksamer menschlicher Fahrer den Unfall prinzipiell eher vermeiden. In beiden Fällen ist es jedoch ohne Zugang zu robusten digitalen Spuren von Sensor(fusions)-Daten des Fahrzeugs für unabhängige Dritte nicht möglich, zu beurteilen, welcher Anteil am Unfallablauf durch das System und welcher durch den Fahrer zu verantworten ist. Entsprechende Datenpunkte, die eine Unterscheidung der Verantwortung des Fahrers zwischen Mensch und System auf wissenschaftlicher Grundlage ermöglichen, sollten daher in künftigen verbindlichen EDR-Konzepten berücksichtigt werden. Darüber hinaus erscheint das Black-Box-Konzept bisheriger KI-Anwendungen bei sicherheitskritischen Assistenzsystemen nicht geeignet, eine transparente Unfalluntersuchung zu gewährleisten. Es sollten verstärkt Anstrengungen in Richtung *explainable AI* unternommen und die Entscheidungsgrundlagen des Systems sollten in fortschrittlichen EDR-Systemen gespeichert werden.

### 5.2.2 Versuche zur Dash-Cam-Funktion bei Tesla Model 3

Einige Fahrzeughersteller gehen dazu über, die ohnehin in den Fahrzeugen verbauten Systemkameras als Dash-Cams zu nutzen. Hintergrund ist, dass aus Marketinggründen damit geworben wird, dass damit unkompliziert beispielsweise bei einer Fahrt auf einer Serpentinestrecke je nach Anordnung der Systemkameras aus verschiedenen Blickwinkeln Videos aufgenommen werden können und einfach für den Fahrer für private Aufnahmen zugänglich sind. Am Beispiel eines Tesla Model 3 mit Erstzulassung 2019 wurde die



Gewinnung dieser Systemkameradaten im Rahmen eines AEB-Versuchs mit ähnlichem Versuchsaufbau wie bei dem in Kapitel 5.2.1 dargestellten Versuchen auf dem Gelände des DEKRA Automobil Test Center am Lausitzring nachvollzogen. Das dabei verwendete Erwachsenen-Target des Herstellers 4a wird von einem Seilzugsystem ebenfalls von 4a bewegt. Ziel war es im Wesentlichen, mit diesen Versuchen nachzuweisen, dass es über die im verwendeten Tesla Model 3 implementierte Dash-Cam-Funktionalität möglich ist, Systemkameradaten von Unfallszenarien aus dem Fahrzeug zu extrahieren. Dazu wurde auf einem leeren, FAT32 formatierten, handelsüblichen USB-Stick ein Ordner mit dem Namen *TeslaCam* erzeugt. Dieser Stick wurde anschließend in den linken USB-Port in der Konsole unter dem zentralen Display eingesteckt. Danach erscheint am oberen rechten Rand des Displays das Dash-Cam-Symbol . Wird dieses gedrückt, so werden die letzten zehn Minuten der Videoaufzeichnung der nach vorne gerichteten Systemkameras auf dem USB-Stick gespeichert. Ein Beispiel für die Aufzeichnung dieser Videos ist in der Bilderserie auf Abbildung 48 zusehen.

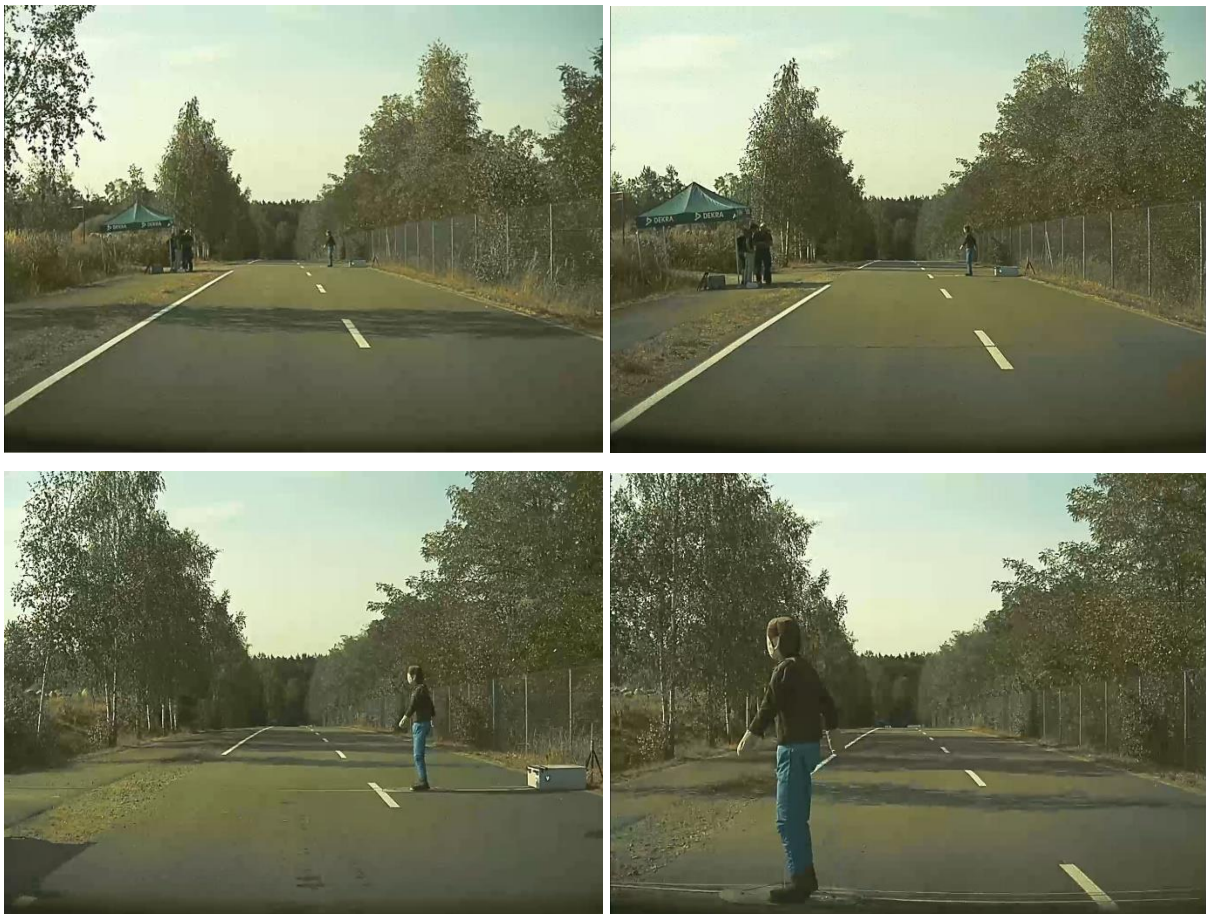


Abbildung 48: Bilderserie aus Dash-Cam-Aufzeichnung der zentralen Frontkamera des verwendeten Tesla Model 3 in Annäherung an 4a Erwachsenen-Target [Quelle: Autor]



Die Videos liegen auf dem USB-Stick in 1 s langen Einzelvideos vor, die nahtlos in einander übergehen. Sie weisen ein Bildformat der Größe 1280 x 960 Pixel und eine Bildrate von 36 fps auf. Damit sind diese Videos sehr gut für die forensische Unfallrekonstruktion sowie die weitere Verwendung in der in Kapitel 5.3 näher erläuterten Methode der visuellen Korrelation zwischen Sensorfusionsdaten und 3D-Unfallstellenvermessung geeignet.

### 5.2.3 Gewinnung von Sensorfusionsdaten aus CARISSMA-Versuchen und Versuchen der FSD GmbH

Da die Extraktion von Systemkameradaten in Verbindung mit Sensorfusionsdaten bei den untersuchten Realunfällen bzw. den verwendeten Versuchsfahrzeugen bisher noch nicht gelungen ist, wurde ein Sensoraufbau in der CARISSMA-Forschungshalle konzipiert, der es ermöglicht, die Sensorsysteme Kamera und Lidar eigenständig zu fusionieren und somit auch auf die Rohdaten zugreifen zu können (Abbildung 49).

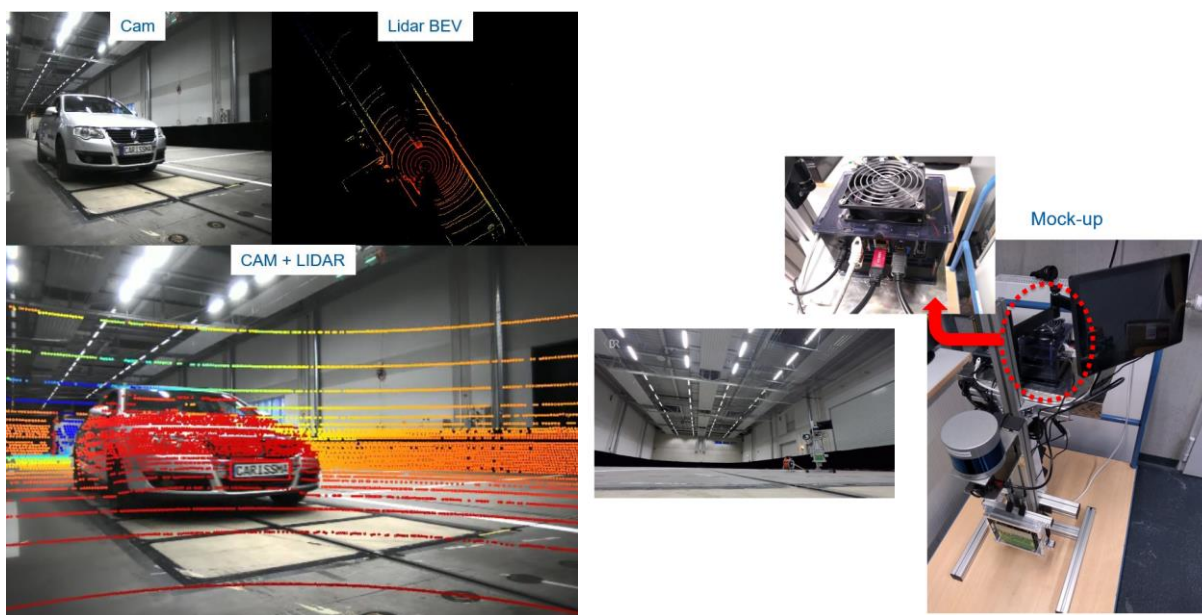


Abbildung 49: Darstellung Versuchsanordnung (rechts) und Ergebnisse (links) der Fusion [80]

Der Aufbau der Versuchsanordnung sowie die Ergebnisse der durchgeführten Datenfusion werden ausführlich von Vriesman et al. [80] erläutert. Zur Veranschaulichung der vorgeschlagenen prinzipiellen Vorgehensweise der Sensorfusion ist auf Abbildung 50 der aus dieser Veröffentlichung entnommene Workflow dargestellt.

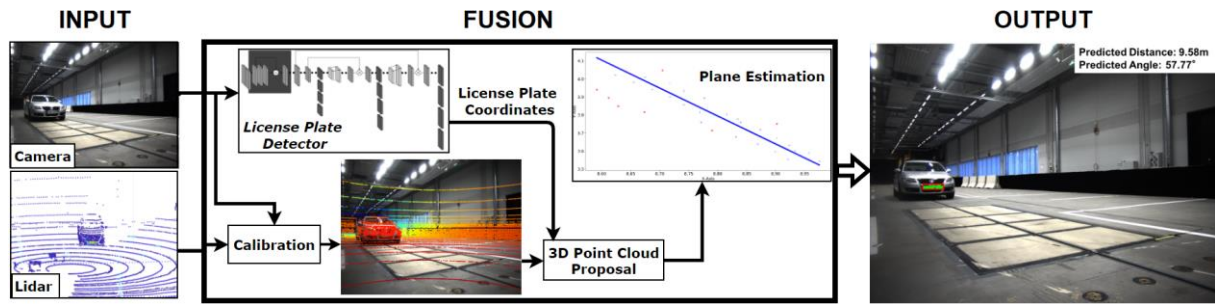


Abbildung 50: Workflow, der von Vriesman et al. für die Sensorfusion vorgeschlagen wird [80]

Auf der Hardwareseite wurden seriennahe Elemente wie die Systemkamera des Herstellers Flir, Typ Chameleon3 sowie die Lidar-Einheit des Herstellers Velodyne, Typ VLC 32 verwendet. Da das verwendete Versuchsfahrzeug, ein VW Passat Typ 3C, über die in der CARISSMA-Halle installierte Seilzuganlage mit 10 km/h, 20 km/h und 30 km/h während der Versuche bewegt wurde, können diese Geschwindigkeitswerte aufgrund der hohen Genauigkeit von  $\pm 0,2$  km/h als valide Referenz herangezogen werden. Auf diesen Werten basierend wurde eine Fehlerrechnung des von Vriesman et al. entwickelten Sensorfusionsverfahrens für Kamera- und Lidar-Daten hinsichtlich Abstands- und Winkelfehler jeweils bezogen auf die drei Geschwindigkeitsniveaus bei den Versuchen durchgeführt (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Abstands- und Winkelfehler des Sensorfusionsansatzes über alle Fälle [80]

	Case	Avg. Distance Error (m)	Avg. Angle Error(°)
(10 km/h)	1	$0.019 \pm 0.014$	$2.55 \pm 1.73$
(20 km/h)	2	$0.02 \pm 0.026$	$2.23 \pm 2.23$
(30 km/h)	3	$0.03 \pm 0.038$	$3.05 \pm 2.14$

Aufgrund der verwendeten seriennahen Hardware sowie der herangezogenen, teilweise etablierten KI-Methoden (z. B. Objekterkennungsmodell YOLOv4 nach Bochkovskiy et al. [81]) ist in Verbindung mit der dargestellten Fusionsperformanz (vergleiche Tabelle 5) davon auszugehen, dass dieses Test-Setup als guter Ersatz für Serienfahrzeuge mit Systemkamera- und Lidar-Daten-Fusion herangezogen werden kann.

Die Ergebnisse dieser Voruntersuchung dienen als Grundlage für die Einbindung in die Methode zur visuellen Korrelation zwischen Sensorfusionsdaten und 3D-Unfallstellenvermessung (siehe Kapitel 5.3).

### 5.2.4 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse aus den Laborversuchen

Es ist festzuhalten, dass aus den verwendeten Versuchsfahrzeugen zusätzliche digitale Spuren im Vergleich zu den untersuchten realen Verkehrsunfällen gewonnen werden konnten. Insbesondere können perspektivisch vermehrt unfallrelevante Systemkameradaten über Dash-Cam-Funktionalitäten, die die Hersteller selbst implementieren, aus den Fahrzeugen extrahiert werden. Bei neueren Baureihen von BMW (z. B. 3er BMW Typ G20 oder 8er BMW Typ G16), ist neben der Dash-Cam-Funktionalität auch eine Speicherung der Fahrtrajektorie der letzten 50 m, die als Komfort-Feature *Rückfahrassistent* beworben wird, implementiert [82]. Diese Fahrfunktion soll bei einer Geschwindigkeit bis maximal 35 km/h ein exaktes Zurückfahren einer vorher automatisch aufgezeichneten Vorwärtsfahrt der letzten 50 m ermöglichen. Diese Komfortfunktion lässt sich beispielsweise beim Rückwärtsrangieren in engen Tiefgaragen oder Parkplatzzufahrten einsetzen. Aus unfallanalytischer Sicht ließen sich damit sehr gut die Annäherungstrajektorien eines solchen BMWs an eine konkrete Kollisionsstelle rückverfolgen. Solange das Fahrzeug noch fahrbereit ist, wie dies nach Unfällen mit Fußgängern oder Radfahrern häufig der Fall ist, könnte eventuell an der Unfallörtlichkeit sogar noch ein Rückfahrversuch durchgeführt werden.

Eine Extraktion von Systemkameradaten in Verbindung mit den zugehörigen und zeitlich synchronisierten Sensor(fusions)-Daten konnte bisher im Rahmen der Forschungstätigkeit bei serienmäßigen Fahrzeugen nicht umgesetzt werden. Deshalb sieht der Autor weiteren Forschungsbedarf in diese Richtung. Ein vielversprechender Ansatz erscheint dabei die tiefgehende Analyse der im Kapitel 5.1.2 erwähnten Snapshot-Datenpakete, die zumindest eine Post-mortem-Analyse von Systemkamera- und Sensor(fusions)-Daten erwarten lässt. Eine Online-Akquisition der Daten an Serienfahrzeugen ohne entsprechenden Entwicklerzugang erfordert erhebliches Reengineering und ist meist nur für einen konkreten Fahrzeugtyp mit zugehöriger Steuergerätekonfiguration und nicht universell möglich. Für die zukünftig geplanten Forschungsvorhaben zu diesem Themengebiet sind spezielle Entwicklerzugänge oder standardisierte Schnittstellen (z. B. ASAM Open Simulation Interface – OSI) zu bevorzugen. Erste Ansätze wurden bereits in Zusammenarbeit mit der FSD GmbH durchgeführt [83] und werden in Kapitel 5.3 näher erläutert. Auch stehen zukünftig in CARISSMA prototypische Fahrzeugplattformen zur Verfügung, die einen vollständigen Online-Zugriff auf diese Daten in Echtzeit erlauben. Bei der breiten Masse der Rekonstruktion realer Verkehrsunfälle lässt sich eine derartige Datenextraktion nach Dafürhalten des Autors nur

sinnvoll über erweiterte Datenpunkte in modernen EDR-Konzepten, wie sie in Kapitel 5.4 adressiert werden, umsetzen.

### 5.3 Theorie zur Methode der visuellen Korrelation zwischen Sensorfusionsdaten und 3D-Unfallstellenvermessung

Grundsätzlich basiert die entwickelte Methode der visuellen Korrelation zwischen Sensorfusionsdaten und 3D-Unfallstellenvermessung auf den Vorarbeiten von Kolla et al. und Moser et al. [50, 53], wie sie in Kapitel 3.2.2.2 diskutiert werden. Zusätzlich zur Rekonstruktion der fahrdynamischen Daten eines auf einem Video aufgezeichneten Fahrzeugs und der Berechnung einer virtuellen Repräsentanz dieses Fahrzeugs wird ein weiterer Layer/eine weitere Ebene hinzugefügt. Die prinzipielle Vorgehensweise ist auf Abbildung 51 zu sehen.

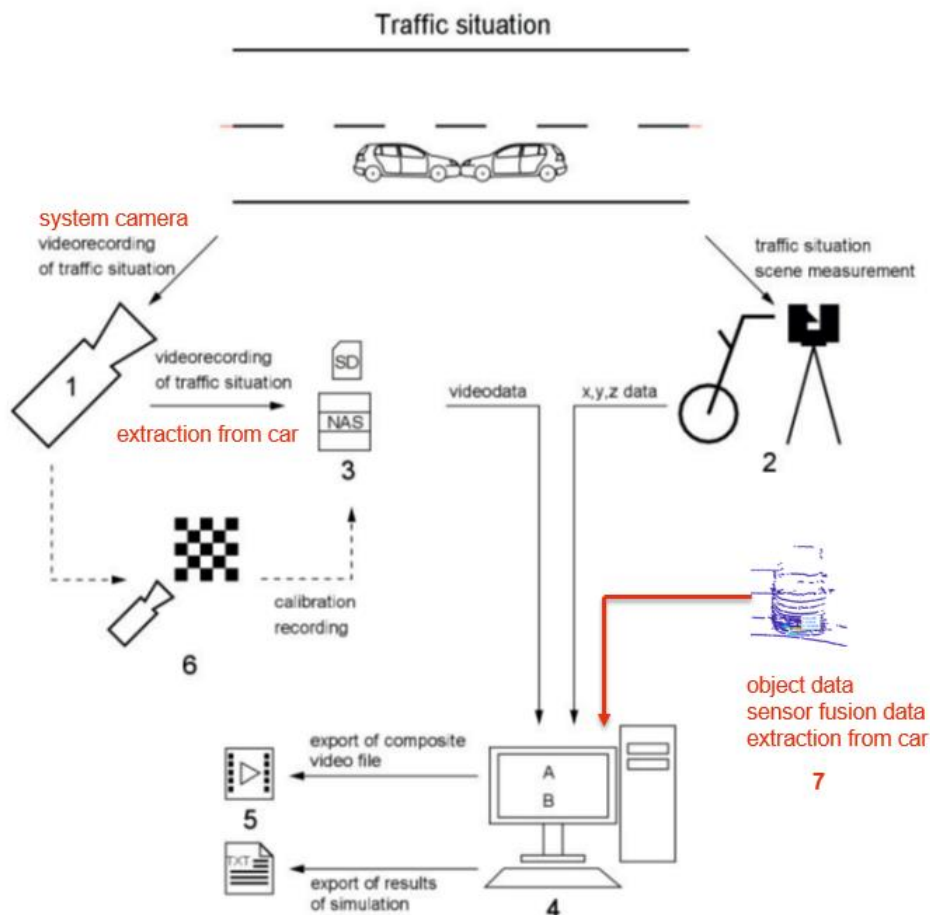


Abbildung 51: Schematischer Workflow der Methode der visuellen Korrelation zwischen Sensorfusionsdaten und 3D-Unfallstellenvermessung in Anlehnung an [53]

Im Unterschied zu den vorgestellten Methoden von Kolla und Moser werden Systemkameradaten des Ego-Fahrzeugs als Grundlage verwendet und keine CCTV- oder Dash-Cam-Videos. Dabei finden die im Kapitel 5.1 bzw. 5.2 gezeigten Möglichkeiten der Extraktion solcher Systemkameradaten in Verbindung mit der Gewinnung von Sensor(fusions)-Daten aus dem Fahrzeug Anwendung. Ziel dieser Methode ist es, eine Gegenüberstellung zwischen dem, was das Fahrzeug während des Unfallablaufes *gesehen* hat und dem, was basierend auf der objektiven Spurenlage tatsächlich vorhanden war, visuell zu generieren.

Die Systemkameradaten werden dabei analog zur Verfahrensweise wie mit CCTV- oder Dash-Cam-Videos zunächst bezüglich der Linsenverzerrung optisch korrigiert. Aus diesem entzerrten Videomaterial wird anschließend durch die von Kolla et al. gezeigte VKM-Methode ein hybrides (composite) Video-File generiert, bei dem ein virtuelles Computermodell mit dem auf dem Video erkennbaren Objekt überlagert wird. Zusätzlich wird ein weiteres virtuelles Modell des getrackten Objekts, das die Sensorfusionsdaten repräsentiert, die das Ego-Fahrzeug zu diesem Objekt ermittelt hat, in das hybride Video integriert. Durch diesen Ansatz wird zum einen bei intaktem Sensor-Set des Ego-Fahrzeugs die iterative Methode von Kolla et al. beschleunigt, da zusätzlich die Sensorfusionsdaten des Ego-Fahrzeugs zur Verfügung stehen und durch die Zusammenführung aller Daten eine schnellere Konvergenz und auch höhere Genauigkeit der Rekonstruktionsergebnisse erzielt wird. Zum anderen können Sensor-Dekalibrationen bzw. -Degradationen visuell sehr leicht erkannt werden, wenn eine signifikante Abweichung zwischen dem auf dem Systemkameravideo dargestellten Objekt und der virtuellen Repräsentation der Sensorfusionsdaten zu erkennen ist.

Ein erster Proof of Concept wurde dazu in Zusammenarbeit mit der FSD GmbH bezüglich einer statischen Betrachtung eines Pylonen vor einem modifizierten VW Passat durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist auf Abbildung 52 zu sehen.

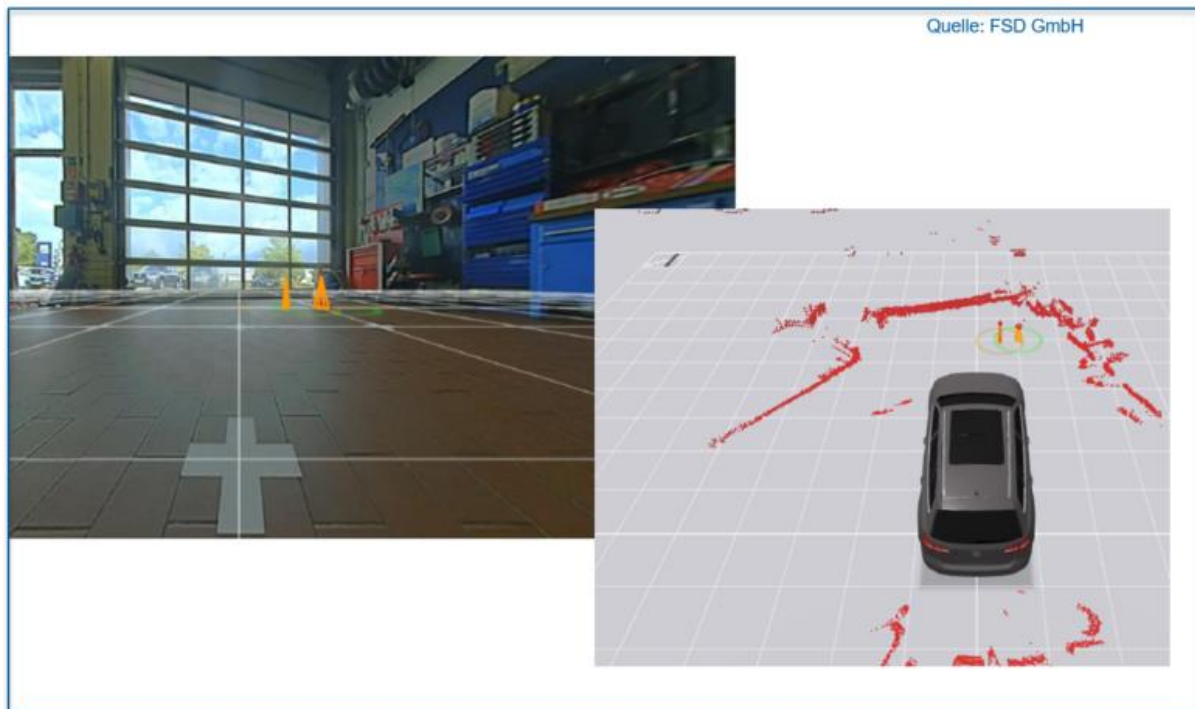


Abbildung 52: Proof of Concept mit statischem Versuch – durch dekalibrierten Lidar-Sensor vorne rechts wird der real nur einmal vorhandene Pylon durch das Fahrzeug doppelt gesehen – realer Pylon rechts und Geisterobjekt links [83]

Das verwendete Versuchsfahrzeug, ein VW Passat mit serienmäßig verbauter Systemkamera in der oberen Frontscheibenmitte sowie einem Frontradar im Bereich der Mitte der Fahrzeugfront, wurde im unteren Bereich der Frontschürze links und rechts zusätzlich durch jeweils einen Lidar-Sensor versuchsseitig ergänzt. Darüber hinaus ist es beim verwendeten Versuchsfahrzeug möglich, auf die jeweiligen Sensorrohdaten sowie die weiterverarbeiteten Objektdaten zuzugreifen. Durch eine gezielte Dekalibrierung des Lidar-Sensors vorne rechts erscheint der real nur einmal vorhandene Pylon doppelt. Das Geisterobjekt – der fälschlicherweise durch das System zusätzlich erkannte Pylon – ist optisch einfach durch seine Position außerhalb der Kreuzungspunkte der weißen Markierungslinien auf Abbildung 52 zu erkennen. Der reale Pylon war exakt im Kreuzungspunkt positioniert.

Um die Leistungsfähigkeit der Methode auch in einem dynamischen Versuchsaufbau zu verifizieren, wird der in Kapitel 5.2.3 vorgestellte Versuchsaufbau gewählt. Dabei fährt ein VW Passat auf den Versuchsaufbau zu. Die Ergebnisse sind auf Abbildung 53 zu sehen.





Abbildung 53: Vorläufige Ergebnisse des dynamischen Versuchsaufbaus [Quelle: Autor]

Da die Kalibrierungssensoren speziell der Sensorsysteme Lidar und Radar bekannt und frei zugänglich sind, können diese auch händisch verändert und somit gezielte Dekalibrierungen durchgeführt werden. Im Beispiel auf Abbildung 53 führt diese Dekalibrierung dazu, dass das zweite virtuelle VW-Passat-Modell (rot dargestellt), das die aus den Sensorfusionsdaten gewonnen Informationen repräsentiert, deutlich von dem aus dem Systemkameradaten rekonstruierten Fahrzeug (grau dargestellt) abweicht. Der Mensch weist als visuelles Wesen ein hoch entwickeltes optisches Sinnesorgan mit entsprechendem Auflösungs- und Auswertevermögen auf. Durch die aufgezeigte visuelle Methode ist es damit auch für einen technischen Laien, wie dies in aller Regel die in einem Gerichtsverfahren beteiligten Juristen sind, visuell einfach nachzuvollziehen, dass das Sensor-Set des Egos-Fahrzeugs *geschickt* hat. Das heißt im konkreten Versuchsszenario, dass der getrackte VW-Passat vom System an einer anderen Position gesehen wurde, als er tatsächlich war. Dies kann entsprechende Auswirkungen speziell auf aktiv eingreifende/automatisierte Fahrfunktionen und deren Beitrag zur Unfallursächlichkeit haben. Darauf aufbauend können auch Vermeidbarkeitsbetrachtungen unter Zugrundelegung eines intakten/korrekt kalibrierten Sensor-Setups durchgeführt werden. Um dies tun zu können, wären erst weitere Testreihen zur Genauigkeit der aufgezeigten Methode der visuellen Korrelation zwischen Sensorfusionsdaten und 3D-Unfallstellenvermessung notwendig, die aufgrund Pandemie-bedingter Verzögerungen bisher nicht durchgeführt werden konnten.

Die vorgestellte Methode ist zeitlich als sehr aufwendig anzusehen. Da es sich bei der Generierung von Objektdaten aus Videos (insbesondere Bestimmung des vollständigen fahrdynamischen Zustands eines abgebildeten Fahrzeugs) um eine Problemstellung aus dem Wissenschaftsgebiet der Computer Vision handelt, können auch neuartige automatisierte bzw.

auf KI basierende Lösungsansätze aus diesem Gebiet herangezogen werden. Dabei verspricht vor allem die Anwendung von SLAM- Algorithmen (Simultaneous Localization and Mapping) eine deutliche Zeitreduktion bei der Auswertung zugrunde liegender Systemkameradaten. Diese Methode kann analog auf Dash-Cam-Videos angewandt werden. Nach Kenntnisstand des Unterzeichners ist bis dato die Anwendung von SLAM-Algorithmen auf Systemkamera- oder Dash-Cam-Daten noch nicht wissenschaftlich gelöst und bedarf weiterer Forschungsarbeit. Auch für diese Arbeit sollen die geplanten Testreihen herangezogen werden, wobei neben den verbauten Systemkameras zusätzlich mehrere gängige Dash-Cams sowie mindestens eine 360°- Kamera im Testfahrzeug installiert werden. Die 360°-Kamera bietet den Vorteil, dass sie hinsichtlich der äußeren Orientierung (sechs DOF) im Gegensatz zu den übrigen Kameras vollständig bestimmt ist und somit als Referenz in diesem Bereich dienen kann.

### **5.4 Gesamtkonzept eines Forensic Event Data Recorders (FEDR)**

Ausgangspunkt für das entwickelte Gesamtkonzept ist zunächst die Fragestellung, was die eigentliche Aufgabe eines Event Data Recorders sein soll. Nach Dafürhalten des Unterzeichners ist dies nicht unter allen, im Gesetzgebungsverfahren beteiligten Parteien unstrittig. Auf UNECE-Ebene ist aus den frei zugänglichen Dokumenten der IWG EDR/DSSAD [14] als Aufgabenbereich des EDR die Rekonstruktion von Verkehrsunfällen sowie die Zurverfügungstellung anonymisierter Unfalldaten aus realen Unfällen für die Verkehrsunfallforschung definiert. Aus Stellungnahmen des BMVI und auch ableitbar aus dem Gesetzgebungsverfahren zur Einführung eines verpflichtenden EDR auf EU-Ebene ab 2022 hingegen wird im Wesentlichen die Unfallforschung adressiert und weniger die möglichst genaue Aufklärung von Verkehrsunfällen [25]. „EDR is not for court“ wird in diesem Zusammenhang als Standpunkt hochrangiger EU-Funktionäre kolportiert. Dies spiegelt sich beispielsweise auch in der konkreten Ausgestaltung des EDR ab 2022 wider, wo die letzten vier Stellen der Fahrgestellnummer sowie, was aus unfallanalytischer Sicht noch kritischer zu bewerten ist, Ort und Zeitstempel eines Unfalls nicht gespeichert werden [25, 84]. Ohne Orts- und insbesondere Zeitstempel ist bei Mehrfach-Events unter diesen Bedingungen eine eindeutige Zuordnung zu einem Verkehrsunfall aus technischer Sicht nicht zweifelsfrei möglich.

Wie bereits in der Einleitung zu dieser Arbeit erwähnt, ist aus Sicht des Autors eine möglichst exakte Unfallaufklärung jedoch Grundvoraussetzung für Rechtssicherheit, belastbare Unfallforschung und damit auch letztendlich die Entwicklung sicherer, automatisierter und



vernetzter Fahrzeugsystemen. Bei einem derart eingeschränkten EDR-Konzept, wie es ab 2022 in der EU verpflichtend eingeführt wird, steht zu befürchten, dass der eigentliche Grundkonsens, dass der EDR für eine Verbesserung der Verkehrsunfallforschung eingesetzt werden soll, aus den oben genannten Gründen nicht in ausreichendem Umfang erreicht werden wird. Für den Aspekt der möglichst genauen Unfallaufklärung speziell von Unfällen mit Beteiligung von ADAS oder noch höher automatisierter Fahrfunktionen bedeutet dies, dass der Sachverständige in jeden Fall auf nicht standardisierte digitale Spuren im Fahrzeug zurückgreifen wird, wie dies auch in der vorliegenden Arbeit bei den analysierten realen Unfällen geschehen ist. Dies ist notwendig, da diese nicht standardisierten Daten zum Teil als deutlich genauer und hochwertiger anzusehen sind als die Daten, die aus dem gesetzlich vorgeschriebenen EDR zu extrahieren sein werden. Die damit verbundenen Folgen bezüglich des entstehenden Mehraufwands bei Sachverständigen und notwendigerweise hinzugezogenen Rechtsabteilungen der Fahrzeughersteller wurden durch den Autor bereits in mehreren Publikationen formuliert [1, 24, 43, 51, 66].

Es ist ein Privileg, in einer wissenschaftlichen Arbeit wie der vorliegenden unabhängig und frei von Einflussnahme oder Restriktionen gesamtheitliche Zukunftskonzepte aufzuzeigen, die einen möglichst großen gesamtgesellschaftlichen Nutzen versprechen. Unter dieser Prämisse wird im Folgenden das Konzept eines speziell aus Sicht eines Unfallanalytikers für Unfallanalytiker entwickelten EDR vorgestellt. Dieser Forensic Event Data Recorder, kurz FEDR, hätte jedoch auch einen breiten Zusatznutzen für viele Stakeholder im automotiven Bereich und würde durch gelebten Daten- und Opferschutz sowohl für Verbraucher- als auch Herstellerseite einen signifikanten Mehrwert bieten.

Grundlage dieses Konzeptes ist eine Event-basierte Speicherung und keine permanente, wie dies beispielsweise bei den chinesischen Konzepten teilweise der Fall ist [31]. Wird ein Event tatsächlich als realer Unfall klassifiziert, so sind damit alle personenbezogenen Daten, die dabei potenziell gespeichert werden (z. B. auch Videos) aus dem technischen Blickwinkel des Autors datenschutzrechtlich als unkritisch zu bewerten. Dies vor dem Hintergrund, da gezielt ein Event gespeichert wird und damit die personenbezogenen Daten entweder von Beteiligten oder Zeugen des Unfalles und damit nicht von unbeteiligten Personen stammen. Die Aufzeichnung von Beinahe-Unfällen oder kritischen Verkehrssituationen als Event würde gerade der Entwicklung KI-basierter, automatisierter und vernetzter Systeme einen erheblichen Hub verleihen. Die so aufgezeichneten Daten sind als enormer Wettbewerbsvorteil von Marktteilnehmern anzusehen, die diese Aufzeichnung nicht aus Datenschutzgründen unterlassen. Perspektivisch ist zu erwarten, dass ähnlich wie bei Smartphones durch explizite

Zustimmung des Fahrers oder Halters quasi permanent auch personenbezogene Daten an den Hersteller übermittelt werden und im Gegenzug kostenlose oder verbilligte Services angeboten werden, die diese Daten benötigen. Vor diesem Hintergrund ist auf Abbildung 54 das Gesamtkonzept eines FEDR dargestellt, das in Anlehnung an eine vorangegangene Publikation des Autors zu diesem Thema [66] zu sehen ist.

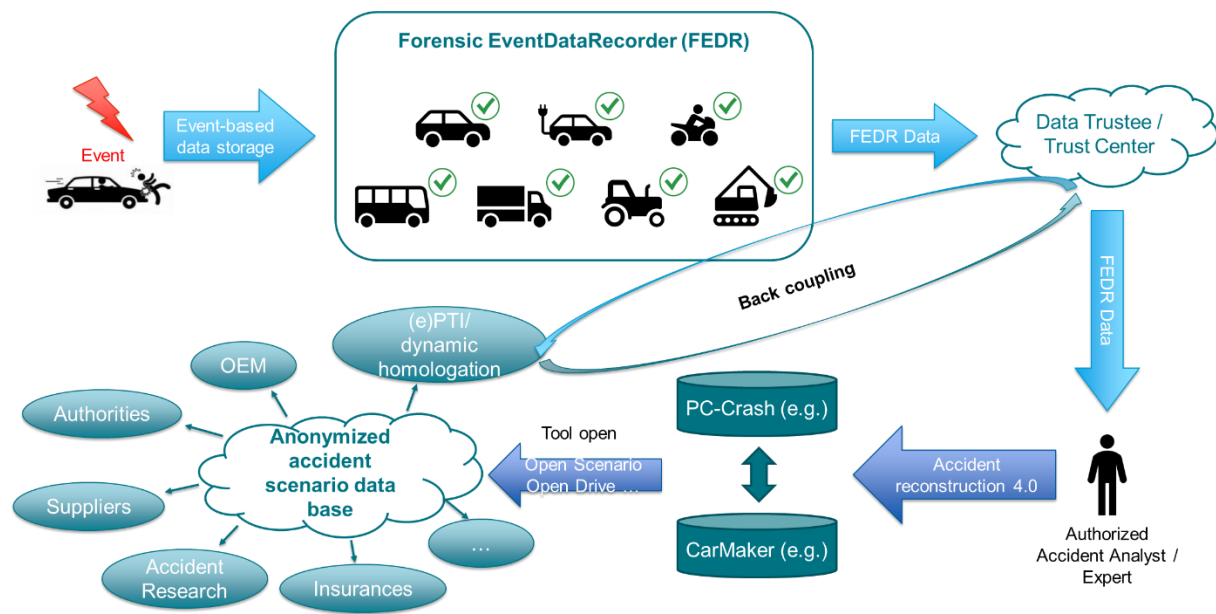


Abbildung 54: Gesamtkonzept eines Forensic Event Data Recorders (FEDR) in Anlehnung an [66]

Wichtig ist aus unfallanalytischer Sicht, dass möglichst viele Verkehrsteilnehmer perspektivisch mit einem FEDR ausgestattet werden. Letztendlich ist dies neben den in der Arbeit dargelegten, zusätzlich notwendigen Datenpunkten (speziell Systemkamera- und Sensorfusionsdaten) besonders im Hinblick auf automatisierte und vernetzte Systeme als Schlüssel dafür zu sehen, um grundsätzlich Unfälle und speziell solche mit VRUs sicherer aufklären zu können. Erst dadurch kann ein tieferes Verständnis für diese Unfälle entwickelt werden, was als Grundlage für deren Verhinderung dient. Wenn das Szenario eintritt, dass ohnehin und permanent Daten Over-the-Air an den Hersteller gesendet werden, so ist dies nur mit ausreichenden Cyber-Security-Konzepten über den gesamten Lebenszyklus des Fahrzeuges denkbar. Eine möglichst stabile Absicherung hinsichtlich der auftretenden Angriffsvektoren ist so relevant wie eine funktionierende Bremsanlage, wobei bei einer erfolgreich durchgeführten Hackerattacke sogar potenziell ganze Fahrzeugflotten betroffen sein können. Hier ist massiver Forschungsbedarf zu sehen, dem in CARISSMA mit einer eigenen Forschungsgruppe *Security*

*in Mobility* begegnet wird. Wenn jedoch ein solcher Over-the-Air-Datenaustausch sicher möglich ist, dann sollte ein fairer Zugang zu diesen Daten allen berechtigten Stakeholdern und nicht nur dem Fahrzeughersteller möglich gemacht werden. Anderenfalls wäre die Konsequenz, dass speziell hoheitliche Aufgaben wie die Fahrzeugüberwachung (Periodical Technical Inspection – PTI), aber auch die forensische Verkehrsunfallrekonstruktion nicht mehr unabhängig durchgeführt werden könnten und damit obsolet wären. Dies trifft in noch stärkerem Maße auf die als ePTI bezeichnete electronic Periodical Technical Inspection zu, die durch die Working Group ISO TC22-SC31-WG07 vorangetrieben wurde. Entsprechend der Norm ISO 20730-3 [85] ist auch bereits eine System List zur ePTI definiert. Getreu dem Prinzip *the vehicle is the single source of truth* – das Fahrzeug ist die einzige vertrauenswürdige Quelle für Fahrzeugdaten – muss für hoheitliche Aufgaben ein Zugriff auf diese unverfälschten Daten ermöglicht werden. Ohne diese Daten ist eine Beurteilung der Verkehrssicherheit der im Feld befindlichen Fahrzeuge bzw. eine belastbare und rechtssichere Unfallaufklärung nicht möglich, da sich beispielsweise bei Softwareupdates wesentliche Funktionalitäten der Fahrzeuge komplett ändern können, was ohne die OTA-Daten aber nicht beurteilbar wäre. Deshalb ist auch, wie auf Abbildung 54 dargestellt, eine Rückkopplung zwischen der Instanz Data Trustee/Trust Center und Überwachungsorganisationen bzw. staatlichen Stellen, die mit der Fahrzeugüberwachung betraut sind, notwendig. Für die Unfallaufklärung ist entscheidend zu wissen, wie der aktuelle Homologationsstatus eines Fahrzeugs aussieht, um so einen Soll-Ist-Abgleich auch hinsichtlich valider Softwarestände und aktueller Rückrufaktionen durchführen zu können. In diesem Zuge könnten auch an Unfallsachverständige Informationen bezüglich häufig auftretender, fahrzeugspezifischer Mängel weitergeleitet werden, wie dies beispielsweise im Rahmen der PTI in Deutschland über die FSD-Systemdaten-Plattform bereits möglich ist. Diese Plattform ist dem Autor, der auch als amtlich anerkannter Prüfer (aaP) in Bayern tätig ist, aus seiner langjährigen Berufspraxis bekannt. Oftmals ist zur Beurteilung auch eine Datenhistorie nötig, da möglich ist, dass relevante Daten nicht mehr im Fahrzeug, sondern nur noch auf Backend Servern zur Verfügung stehen. Anders als bei einem Smartphone kann jedoch ein unsicheres Fahrzeugsystem bzw. eine ganze Flotte unsicherer Fahrzeugsysteme zu einer erheblichen Verkehrsgefährdung führen. Hier würde somit ohne entsprechende Absicherung auch durch Nutzung der OTA-Daten eine kritische Infrastruktur entstehen. Um einen fairen Zugang zu Fahrzeugdaten Over-the-Air für alle berechtigten Stakeholder zu gewährleisten, werden derzeit mehrere Varianten diskutiert (vergleiche Abbildung 55).

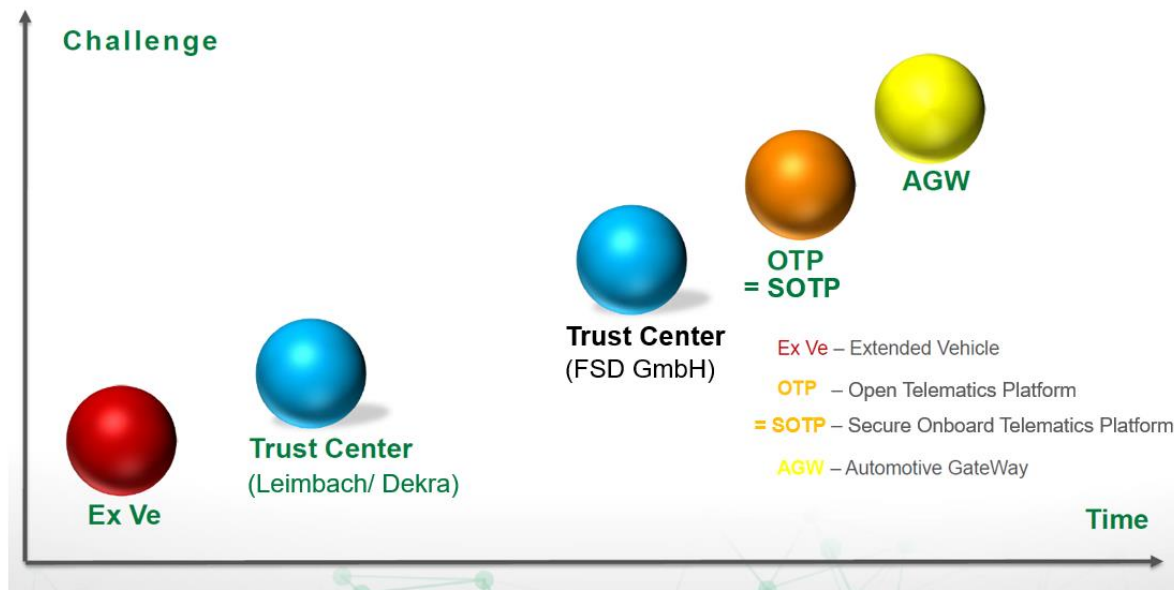


Abbildung 55: Konzepte eines Zugangs zu Fahrzeugdaten Over-the-Air in Anlehnung an [86]

Die angesprochenen Stakeholder können im Übrigen auch Serviceanbieter wie etwa Versicherungen mit Pay-as-you-drive-Tarifen oder Zulieferer bzw. Start-ups mit Use-Cases wie einer Lebensdauer-Prädiktion für Traktionsbatterien oder Apps für KI- und Big-Data-getriebene Maßnahmen zur Lebensdauererhöhung dieser Batterie sein. Die dargestellten Konzepte werden, wie auf Abbildung 55 visualisiert, hinsichtlich ihres Zeithorizonts bzw. der technischen und politischen Herausforderungen qualifiziert. Im Einzelnen werden im Folgenden die aufgeführten Konzepte vorgestellt, wobei kein Anspruch auf Vollständigkeit in dieser Arbeit erhoben wird und die Konzepte auf High-Level-Niveau erklärt werden. Dabei wird nicht auf technische Details eingegangen und es wird bewusst auf eine abschließende Bewertung der Konzepte verzichtet, da dies außerhalb des Rahmens dieser Dissertation anzusiedeln ist.

### 1. Extended Vehicle (ExVe):

Dabei handelt es sich um ein Konzept, bei dem die Over-the-Air gesendeten Daten (OTA-Daten) über OEM-Backends an entsprechend berechnigte Dritte weitergeleitet werden. Dieses Konzept wäre prinzipiell schon jetzt durchführbar, wobei der Nachteil speziell für hoheitliche Tätigkeiten darin besteht, dass die Daten nicht unabhängig vom Hersteller und damit auch nicht ungefiltert zur Verfügung stehen. Speziell wenn der Hersteller, wie dies beispielsweise bei Verkehrsunfällen mit Involvierung von Produkthaftungsfragen vorkommt, eine beteiligte Partei

mit Eigeninteressen darstellt, ist das ExVe-Modell ungeeignet für eine transparente Aufklärung. Ebenso zeigen die Erfahrungen im Abgasbereich mit Defeat Devices verschiedener Hersteller im Rahmen der Beurteilung im Homologationsprozess, dass die Überwacher auch in die Lage versetzt werden müssen, überwachen zu können. Diese Problematiken hinsichtlich Verkehrsunfällen und Homologation werden sich mit zunehmender Automatisierung und Vernetzung der Fahrzeuge sowie einer *dynamischen Homologation* aufgrund von Software-Updates noch verschärfen.

### 2. Trust Center (Leimbach/DEKRA):

Dieses Konzept wurde federführend von Frank Leimbach, Leiter des Bereichs *Konzernrepräsentanz Technische Angelegenheiten* bei DEKRA entwickelt. Der prinzipielle Ablauf des Zugriffs auf OTA-Daten für berechtigte Datennutzer ist auf Abbildung 56 zu sehen. Kern dieses Konzepts ist es, dass sämtliche Daten, die vom Fahrzeug an den Hersteller über eine Luftschnittstelle gesendet werden, dupliziert werden. Diese Duplikation soll durch den jeweiligen Telekommunikations Service Provider (z. B. Deutsche Telekom) geschehen, wobei die Kosten für den zusätzlichen, längerfristigen Speicheraufwand durch die Shareholder des Trust Centers (z. B. Überwachungsorganisationen wie DEKRA, staatliche Stellen wie das Kraftfahrtbundesamt KBA) zu übernehmen wären. Der Vorteil der Trust-Center-Architektur nach diesem Vorbild ist in einer sehr schnellen Umsetzbarkeit zu sehen, da grundsätzlich fast keine zusätzliche Infrastruktur notwendig wäre und auf sämtliche an den OEM übermittelte Daten inklusive Historie zurückgegriffen werden könnte. Die technische Umsetzbarkeit ist dabei noch an konkreten Beispielen mit Involvierung von OEMs nachzuweisen.

Insbesondere wird Problematiken zu begegnen sein, die sich aus der verwendeten verschlüsselten Kommunikation mit Perfect Forward Secrecy (PFS) [87] zwischen Fahrzeug und OEM Backend ergeben, um beispielsweise einen Man-in-the-Middle-Angriff [88], der Ähnlichkeit mit der dargestellten Trust-Center-Architektur nach Leimbach/DEKRA aufweist, auszuschließen.

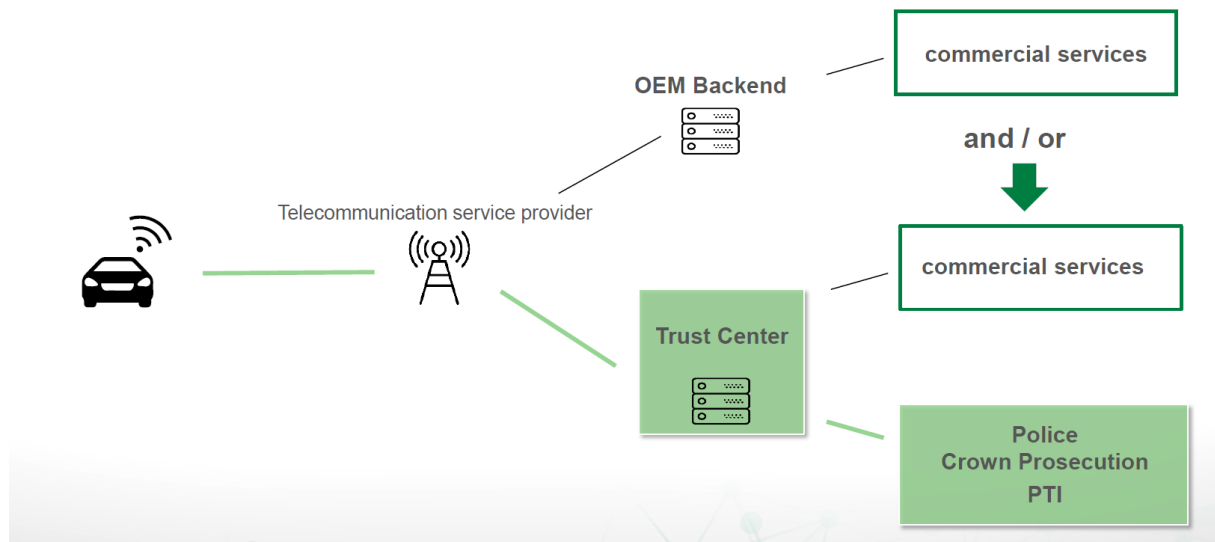


Abbildung 56: Trust Center nach Ausprägung Leimbach/DEKRA, Stand März 2021 [86]

### 3. Trust Center (FSD GmbH)

Das Trust-Center-Konzept, das von der FSD GmbH, der zentralen Stelle in Deutschland nach StVG zur Bereitstellung von Fahrzeugsystemdaten, vertreten wird, verfolgt einen dezentralen Ansatz, wie er auf Abbildung 57 zu sehen ist. Dieses Konzept ist nutzerzentriert ausgelegt und realisiert eine Trennung zwischen Zugriffverwaltung und Nutzung (Separation of Duties). Unter Trust Center wird bei diesem Konzept die Instanz verstanden, die die unabhängige Zugriffskontrolle über die Verteilung von Zertifikaten an berechnigte Datennutzer umsetzt. Auch der OEM wäre ein solcher berechtigter Datennutzer. Der Umfang der zugänglichen Daten könnte über diese Zertifikate an den jeweiligen Rechtsrahmen der verschiedenen Märkte angepasst werden. Für diesen Ansatz ist es notwendig, dass die bisherige Infrastruktur der Datenübertragung über Luftschnittstellen deutlich verändert wird, was einen entsprechenden Zeithorizont mit sich bringen würde. Andererseits ermöglicht diese Architektur auch eine bidirektionale Kommunikation, womit z. B. die Ansteuerung von Aktuatoren im Rahmen einer Hauptuntersuchung (PTI) oder auch die Einspeisung von Mixed-Reality-Testszenarien durch Überwachungsorganisationen während der Prüfung ermöglicht würde.

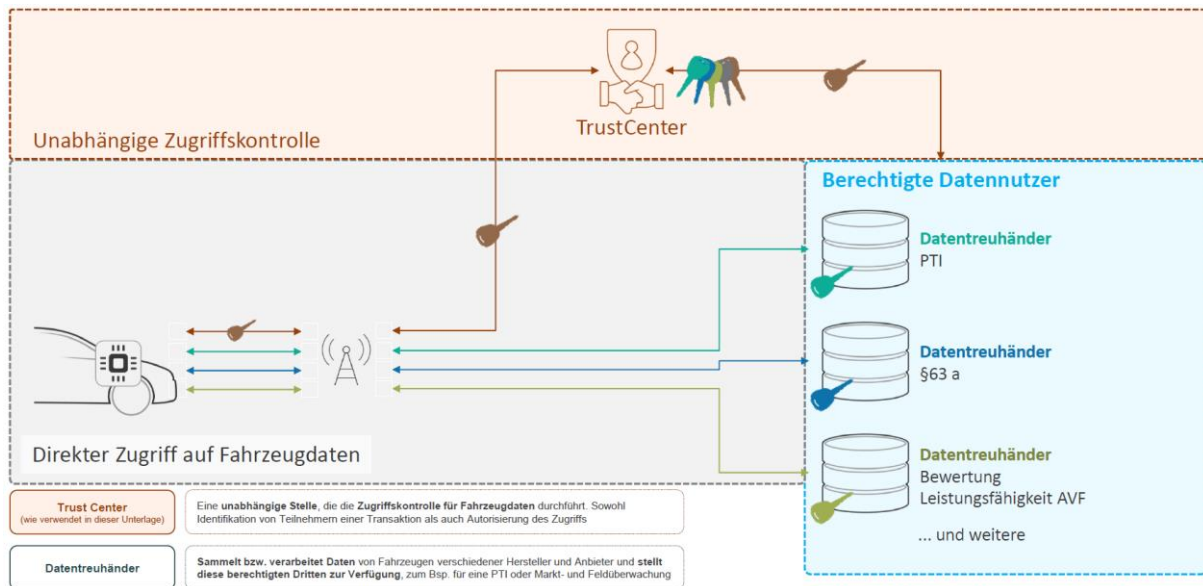


Abbildung 57: Trust Center nach Ausprägung FSD GmbH [89]

Es ließe sich damit beispielsweise durch Einspielung eines kreuzenden virtuellen Fußgängers die AEB-Funktionalität eines Fahrzeugs in geschützter Umgebung im Rahmen der PTI testen. Grundsätzlich wäre es angesichts des angedeuteten notwendigen Zeitrahmens für die Umsetzung der beiden Trust-Center-Konzepte auch denkbar, dass zuerst die Variante nach Leimbach/DEKRA umgesetzt wird und, sobald die Infrastrukturvoraussetzung für die Variante nach FSD geschaffen wurden, auf diese umgesattelt wird.

#### 4. Open Telematics Platform (OTP)/Secure Onboard Telematics Platform (SOTP) bzw. Automotive GateWay (AGW) – Variante FiA

Der Terminus OTP ist dabei weitgehend gleichzusetzen mit dem Begriff SOTP, wobei letzterer mit der Implikation eines höheren Sicherheitsniveaus inzwischen hauptsächlich verwendet wird. Grundsätzlich ist eine genaue Definition, was unter SOTP zu verstehen ist, bis dato in der Literatur nicht gegeben. In [90] wird der Ansatz der Federation international de l'Automobile (FiA) näher erläutert, der auch als Grundlage für die weiteren Ausführungen dienen soll. Der Grundsatz der Separation of Duties ist auch bei diesem Konzept gegeben, wie auf Abbildung 58 illustriert. Insgesamt ist die Architektur gut mit der des Trust Centers nach FSD-Ausprägung vergleichbar, wobei die Zugriffsverwaltung hauptsächlich über den Automotive Gateway Admin geregelt wird. Das FiA-Konzept geht tiefer auf die technische Ausgestaltung insbesondere der IT-Security ein, wohingegen das FSD-Konzept wie auch das DEKRA-Konzept technikoffen sind. Zusätzlich ist bei der FiA-Variante eine Docker Unit integriert, die



ein Installation zertifizierter Apps von Independent Service Providern (ISP) ermöglichen soll. Unter ISP würden in diesem Szenario auch Überwachungsorganisationen fallen, womit ähnliche PTI-bezogene Use Cases, wie bei der FSD-Variante, möglich wären.

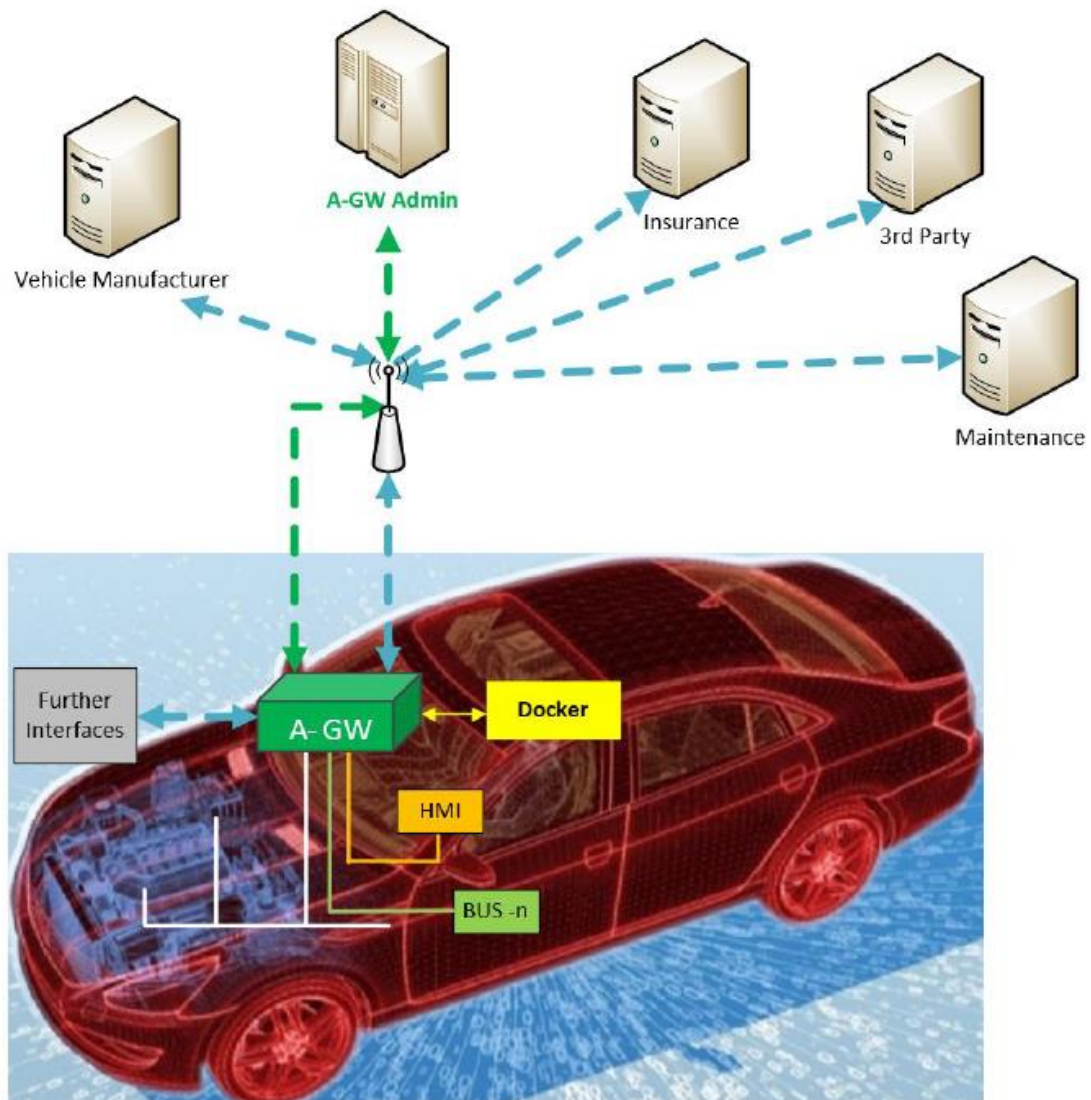


Abbildung 58: SOTP mit Automotive GateWay, Docker und HMI in Anlehnung an [90]

Welche Form der Übertragung von Fahrzeugdaten OTA sich durchsetzen wird, ist nach dem momentanen Stand für den Autor noch nicht absehbar. Dass jedoch eine solche Übertragung von Fahrzeugdaten und damit auch von unfallrelevanten Daten zukünftig kommen wird, ist allen aufgeführten Szenarien gemein.

Dies ist auch vor dem Hintergrund zu sehen, dass perspektivisch ein erheblicher Teil der Wertschöpfungskette im automotiven Sektor über die Nutzung von OTA-Fahrzeugdaten generiert und damit das Handling dieser Daten optimiert werden wird. Deshalb sollten auch in



einem zukünftigen EDR-Konzept diese Strukturen genutzt werden. Wie auf Abbildung 54 visualisiert ist, könnten auch speziell geschulte und autorisierte Unfallanalytiker in die Nutzung dieser OTA-Daten mit Unfallrelevanz eingebunden werden. Eine Standardisierung dieser Daten ist vor dem Hintergrund der in dieser Arbeit aufgeführten Problematiken bzgl. Fehlertoleranzen und zusätzlicher Datenpunkte wie Systemkamera- und Sensor(fusions)-Daten trotzdem zu fordern. Um sämtliche erforderliche Daten auch unter Berücksichtigung von Car-to-X-Anwendungen (C2X) und der möglichen Nachweisführung von Cyberattacken zu erfassen, ist weiterer Forschungsbedarf gegeben. Die FEDR-Daten dienen in Verbindung mit einer sehr genauen 3D-Unfallstellenvermessung als Grundlage für eine Unfallrekonstruktion 4.0. Dabei entstehen sehr realitätsnahe virtuelle Unfall- bzw. Vermeidbarkeitsszenarien über die Nutzung gängiger Softwaretools, beispielsweise PC-Crash oder CarMaker. Wenn echtzeitfähige Simulationstools verwendet werden, so besteht auch die Möglichkeit der Nutzung einer Mixed-Reality-Versuchsumgebung (MRVU), wie diese beispielhaft im Forschungszentrum CARISSMA vorangetrieben wird. Ziel ist es, mittels dieser Versuchsumgebung, variabel und je nach Bedarf den Anteil von Realität und Virtualität mischen zu können. Konkret bedeutet dies, dass beispielsweise ganze Fahrzeuge oder auch nur einzelne Steuergeräte in eine Echtzeitsimulation des realen Unfallhergangs integriert werden und damit reale Systemantworten anstatt geschätzter genutzt werden können. Insbesondere bei komplexen Systemen und Funktionen wie AEB oder automatisierten Fahrfunktionen wird dies für die virtuelle Simulation von Vermeidbarkeitsszenarien erhebliche Vorteile mit sich bringen. Die so generierten virtuellen Verkehrsunfallszenarien sollen anschließend anonymisiert in eine Unfallszenario-Datenbank eingespeist werden. Dabei sollen offene Schnittstellen wie Open Scenario und Open Drive verwendet werden, damit mit möglichst vielen Tools auf die Datenbank zugegriffen werden kann. So könnten die Erkenntnisse und *Lessons Learned* aus einem Verkehrsunfall, der von Unfallanalytikern detailliert aufgearbeitet wurde, nicht nur wie bisher zur juristischen Aufarbeitung herangezogen werden, sondern auch einen Mehrwert für viele weitere Anwendungen bieten. Dies könnte ebenfalls ein Baustein für die Weiterentwicklung der GIDAS-Datenbank (German In-Depth Accident Study) sein. Unter dem Arbeitstitel GIDAS 4.0 werden derzeit die Randbedingungen für einen ganzheitlicheren Ansatz unter Einbeziehung der Themen Elektrifizierung, Automatisierung und Vernetzung erarbeitet [91]. Vom vorgestellten Gesamtkonzept in dieser Dissertation würde eine Reihe von Stakeholdern profitieren. So könnten beispielsweise OEMs und Zulieferer vor allem im Hinblick auf automatisierte und vernetzte Fahrfunktionen auch Unfallszenarien nutzen, bei denen ihre Produkte nicht beteiligt waren und von denen sie sonst keine detaillierten

Informationen hätten. Damit ließen sich vorausschauend Unfälle vermeiden. Behörden wie die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) oder das Kraftfahrtbundesamt (KBA) sowie Unfallforschungsinstitute könnten diese realitätsnahen Daten, bei entsprechend schneller Bereitstellung, dafür nutzen, im Feld auftretende Auffälligkeiten schneller und valider zu detektieren. Insbesondere im Hinblick auf KI-Anwendungen, die ganze Fahrzeugflotten betreffen können, ist ein schnelles Handeln notwendig, um eventuell in der Entwicklung nicht detektierten Corner Cases oder Fehlentwicklungen effizient entgegenzutreten zu können. Darüber hinaus könnten diese Szenarien für Verkehrsbehörden von großer Bedeutung sein, um Unfallschwerpunkte zu entschärfen bzw. die Wirksamkeit und Verbesserungsmöglichkeiten bei Smart-Infrastructure-Maßnahmen besser beurteilen zu können. Zusätzlich bieten diese Daten für Versicherer erhebliches Potenzial, um Risiken neuer Technologien belastbarer abzuschätzen und neue Geschäftsmodelle zu entwickeln. Dieses Datengold von auf realen Unfällen basierenden anonymisierten Unfallszenarien dürfte für viele Drittanbieter und Start-ups interessant sein, wobei die vollen Einsatzmöglichkeiten derzeit noch gar nicht absehbar sind. Der zentrale Baustein im vorgestellten Gesamtkonzept ist die Arbeit eines entsprechend qualifizierten und autorisierten Unfallanalytikers bzw. perspektivisch eines Unfallanalytik-Teams inklusive IT-Spezialisten. Aufgrund der juristischen Rahmenbedingungen und der weiten Verbreitung von Rechtsschutzversicherungen ist in Deutschland eine sehr hohe Dichte derartiger Unfallanalytiker vorhanden, die jedoch mit Aus- und Weiterbildung entsprechend dem vorgelegten Gesamtkonzept fortgebildet werden müssten. Im Vergleich zu anderen Regionen der Welt ist jedoch zu konstatieren, dass speziell in Deutschland, aber auch in Europa, die größten Kapazitäten gut ausgebildeter Unfallanalytiker vorhanden sind. Dies wäre ein enormer Wettbewerbsvorteil für die hier ansässige Automobilindustrie bei der Entwicklung sicherer automatisierter und vernetzter Fahrfunktionen unter Mitwirkung des vorgestellten Gesamtkonzepts eines FEDR.

### 6 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

#### 6.1 Stellungnahme zu den Thesen

1. These: In modernen Fahrzeugen werden teilweise Videosequenzen/Fotos von Systemkameras als digitale Spuren gespeichert, die Szenen von Verkehrsunfällen enthalten und der Unfallanalyse zugänglich gemacht werden können.

Die Arbeit zeigt drei mögliche Wege auf, wie aus modernen Fahrzeugen unfallrelevante Videosequenzen/Fotos der Systemkameras extrahiert werden können. Zum einen ist dies der Zugriff über Backend-Server, auf die proprietär nur der Hersteller zugreifen kann, die jedoch über entsprechende Beschlüsse der zuständigen Strafverfolgungsbehörden prinzipiell der Unfallanalyse zugänglich gemacht werden können. Dabei ist jedoch festzuhalten, dass für unabhängige Dritte nicht transparent nachvollziehbar ist, ob die Daten authentisch, integer und vollständig vom jeweiligen Hersteller übermittelt werden. Die aufgeführten, realen Unfallbeispiele zeigen, dass teilweise auch beim selben Fahrzeugtyp (hier Tesla Model S) in einem Fall Videodaten über den Hersteller vorhanden sind und im anderen Fall laut Hersteller nicht. Deshalb ist die in der Arbeit vorgestellte digitale Datenanalyse post mortem und offline als zweiter Weg dazu geeignet, die Angaben des Herstellers, die auf Over-the-Air-Daten beruhen, zu verifizieren und zu plausibilisieren. Insbesondere die extrahierten Snapshot-Datenpakete aus dem Autopilot- bzw. MCU-Steuergerät des im Kapitel 5.1.2 untersuchten Tesla Model S versprechen auch Zugriff auf Systemkamera- sowie Sensorfusionsdaten. Der dafür notwendige Reverse-Engineering-Aufwand konnte in der vorliegenden Arbeit noch nicht vollständig durchgeführt werden und bedarf weiterer Forschung. Die dritte Methode, wie auf unfallrelevante Systemkameradaten zugegriffen werden kann, ist die für die meisten Unfallanalytiker in Zukunft praktikabelste und damit wohl weitverbreitetste Methode. Bei modernen Fahrzeugen ist ein zunehmender Trend dahingehend festzustellen, dass die verbauten Systemkameras als zusätzliches Feature eine Dash-Cam-Funktionalität implementiert haben. Am Beispiel von Tesla bzw. BMW-Fahrzeugen wird in der Arbeit dargestellt, wie über handelsübliche USB-Speichersticks diese Daten extrahiert werden können und somit für die Unfallanalyse zur Verfügung stehen. Das von Gomez Buquerin et al. [54] vorgeschlagene Prozessmodell für eine juristisch belastbare, digital-forensische Untersuchung an Automotive-Komponenten wurde bei den analysierten realen Unfällen in praktikabler Weise entsprechend den Bedürfnissen eines Unfallanalytikers angewendet.

2. These: In modernen Fahrzeugen werden Sensor(fusions)-Daten als digitale Spuren gespeichert, die unfallrelevant sind und der forensischen Unfallrekonstruktion zugänglich gemacht werden können.

In der vorliegenden Dissertation werden insgesamt drei reale Unfälle sehr tiefgreifend hinsichtlich unfallrelevanter digitaler Spuren untersucht. Bei allen drei exemplarischen Fällen zeigt die Arbeit die Vielfalt und die enorme Datenmenge an digitalen Spuren, die mittlerweile für die Unfallanalyse zugänglich gemacht werden können. Die Daten-Extraktion ist auch notwendig, weil ohne diese viele unfallrelevante Fragestellungen gar nicht beantwortet werden können.

Dabei wird insbesondere auf die Problematik eingegangen, dass die meisten dieser Sensordaten bzw. deren Speichervorgang nicht originär für die Rekonstruktion von Verkehrsunfällen konzipiert wurden. Eine Angabe von Fehlertoleranzen ist damit oft nur erschwert bzw. gar nicht belastbar möglich. In der Arbeit werden Ansätze für eine Fehlerrechnung unter Einbeziehung einer möglichst genauen Abschätzung der identifizierten System-Latenzen durchgeführt. In der Summe führen die extrahierten Sensordaten trotz der beschriebenen Problematiken zu genaueren und juristisch belastbareren Unfallrekonstruktionen unter der Prämisse, dass zusätzlich eine klassische Unfallrekonstruktion unter Einbeziehung von Energie- und Impulserhaltung sowie fahrbahnbezogener Spuren durchgeführt wird. Sensorfusionsdaten konnten in der vorgelegten Forschungsarbeit bisher nur unter Laborbedingungen extrahiert werden, wobei perspektivisch zum einen durch noch tieferes Reverse-Engineering als auch über Over-the-Air-Connect-Services der Hersteller diese Daten dem Unfallanalytiker zugänglich gemacht werden könnten. Neueste Untersuchungen von Hoogendijk [68] zeigen zumindest für Fahrzeuge des Herstellers Tesla erste Ansätze, wie aus der verbauten SD-Karte, die zur Pufferung der an den Hersteller übermittelten Daten dient, auch durch das Fahrzeugensierte Abstandswerte zu vorausfahrenden Fahrzeugen extrahiert werden können. Es besteht jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf auf dem Gebiet der Extraktion der Sensor(fusions)-Daten, wobei auch eine möglichst breite Abdeckung an Fahrzeugherstellern berücksichtigt werden sollte.

3. These: Die Methode der visuellen Korrelation zwischen den extrahierten Systemkamera- und Sensor(fusions)-Daten und einer sehr genauen 3D-Unfallstellenaufnahme führt zu einer deutlichen Verbesserung der Genauigkeit und Aussagekraft einer wissenschaftlich fundierten

Unfallrekonstruktion und zeigt die Notwendigkeit der standardisierten Aufzeichnung von Systemkameradaten im Rahmen eines zukünftig verpflichtenden EDR.

Die in dieser Dissertation vorgestellte Methode der visuellen Korrelation zwischen extrahierten Systemkamera- und Sensor(fusions)-Daten und einer sehr genauen 3D-Unfallstellenaufnahme basiert auf den Vorarbeiten von Kolla [53] und Moser [50]. Unter einer sehr genauen 3D-Unfallstellenaufnahme wird in diesem Zusammenhang eine dem derzeitigen Stand der Technik entsprechende Unfallstellenvermessung mittels 3D-Fotogrammetrie (z. B. unter Zuhilfenahme von Drohnen oder (Stativ-)Kameras) oder Laserscanner verstanden. Dabei sind mittlerweile bei üblichen Unfallstellenausdehnungen Genauigkeiten in einer Größenordnung von ca. +/- 1cm möglich. Perspektivisch ist anzunehmen, dass aufgrund der Notwendigkeit der Bereitstellung teilweise ähnlicher oder noch genauerer dynamischer 3D-Karten für automatisierte Fahrfunktionen ein noch einfacherer Zugriff auf sehr genaue 3D-Daten für Unfallanalytiker gegeben sein dürfte (vergleiche [35]). Inwieweit die bisher etablierten Software-Tools für die 3D-Fotogrammetrie wie Agisoft Metashape oder Reality Capture zusätzlich durch Softwarelösungen großer IT-Player wie Google oder Apple in Verbindung mit entsprechender Hardware (z. B. Mini-Laserscannern in Tablets oder Smartphones) für diesen Einsatzbereich Konkurrenz bekommen, ist für den Autor derzeit noch nicht vollständig absehbar.

Die Arbeit zeigt, dass durch die visuelle Korrelation-Methode die ursprünglichen Verfahren von Kolla und Moser beschleunigt und bei intaktem Sensor-Set um die Genauigkeitsinformation der Sensorfusionsdaten erhöht werden können. Durch diese Methode können zugleich die übrigen digitalen Spuren verifiziert werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit bei Sensor-Dekalibration oder -Degradation durch diese Methode derartige Sensorproblematiken im Rahmen der Unfallanalyse zu detektieren. Damit kann nachgewiesen werden, dass die vorgestellte Methode die Genauigkeit und Aussagekraft einer wissenschaftlich fundierten Unfallrekonstruktion deutlich verbessert und deshalb Systemkameradaten im Rahmen eines zukünftig verpflichtenden EDR als standardisierter Datenpunkt mitberücksichtigt werden sollten.

4. These: Es lässt sich ein ganzheitliches Konzept entwickeln, das auf den Ergebnissen einer derart aufgewerteten Unfallanalyse fußt und einen wesentlichen Beitrag zur Entwicklung speziell automatisierter Fahrfunktionen bzw. zur Verbesserung der Verkehrsinfrastruktur und Entschärfung von Unfallschwerpunkten leisten kann.

Das in dieser Arbeit als Gesamtkonzept eines Forensic Event Data Recorders (FEDR) dargestellte Konstrukt basiert im Wesentlichen darauf, dass nicht nur in Pkws, sondern bei allen motorisierten Verkehrsteilnehmern eine verpflichtende Einführung eines EDR erhebliche Verkehrssicherheitspotenziale heben könnte. Sogenannte Wearables, d.h. Computertechnologien, die man am Körper oder an/in der Kleidung tragen kann, würden diesen Ansatz speziell für unmotorisierte Verkehrsteilnehmer ergänzen, was in dieser Arbeit jedoch ausgeklammert wurde. Werden in dem vorgestellten EDR-Konzept Datenpunkte, die speziell für die Rekonstruktion von Verkehrsunfällen mit entsprechender Authentizität, Integrität und Vollständigkeit entwickelt wurden und die mit einer wissenschaftlich basierten Fehlertoleranz versehen sind, abgelegt, so prägt der Autor in diesem Zusammenhang die Bezeichnung Forensic Event Data Recorder (FEDR). Weiterer integraler Bestandteil dieses Gesamtkonzeptes ist es, dass die FEDR-Daten über eine Cloud-Lösung an einen Datentreuhänder oder ein Trust Center übermittelt werden und so über Zugriffsberechtigungen die autorisierten Unfallsachverständigen barrierefrei und schnell an alle hinterlegten Daten gelangen können. In Verbindung mit modernen virtuellen Unfallrekonstruktionstools lassen sich unter Verwendung offener Schnittstellen (z. B. Open Scenario, Open Drive) diese präzise rekonstruierten realen Unfallszenarien schnell in anonymisierte Unfallszenarien-Datenbanken überführen. Damit hätte eine ganze Reihe von Shareholdern die Möglichkeit, auf sehr genaue reale Unfallszenarien zuzugreifen. Zusätzlich ließe sich damit schnell auf eventuell in der Fahrzeugentwicklung bisher unberücksichtigte Corner Cases speziell im Rahmen der Entwicklung automatisierter Fahrfunktionen reagieren und die beteiligten Fahrzeughersteller hätten die Möglichkeit, auch auf Unfallszenarien zurückzugreifen, bei denen ihre Fahrzeuge nicht beteiligt waren. So könnten alle Hersteller und die sonstigen im Entwicklungsprozess Beteiligten auch von den *Lessons Learned* der Mitbewerber profitieren. Darüber hinaus lässt sich mit diesem Konzept die Verkehrsinfrastruktur vor allem im Hinblick auf sicherheitskritische Smart Infrastructure verbessern und es trägt zur Entschärfung von Unfallschwerpunkten bei.

## 6.2 Zusammenfassung und Ausblick

Die grundsätzlich verwendeten Methoden zur Erreichung der beschriebenen Ziele der vorliegenden Dissertation sind in einer übersichtlichen Zusammenfassung auf Abbildung 59 visualisiert.



Abbildung 59: Übersichtsdarstellung der verwendeten Methoden zur Erreichung der Ziele der Dissertation [Quelle: Autor]

Die Ergebnisse dieser Arbeit können in zwei Gruppen aufgeteilt werden. Entsprechend dem Titel erfolgt eine Untergliederung einerseits hinsichtlich der Extraktion und andererseits bezüglich der Verwendung der Systemkamera- und Sensor(fusions)-Daten für die Verkehrsunfallrekonstruktion. Die erarbeiteten Zusammenhänge sind im Schema auf Abbildung 60 zusammenfassend dargestellt und sind teilweise bereits in den Stellungnahmen zu den Thesen in Kapitel 6.1 näher erläutert.

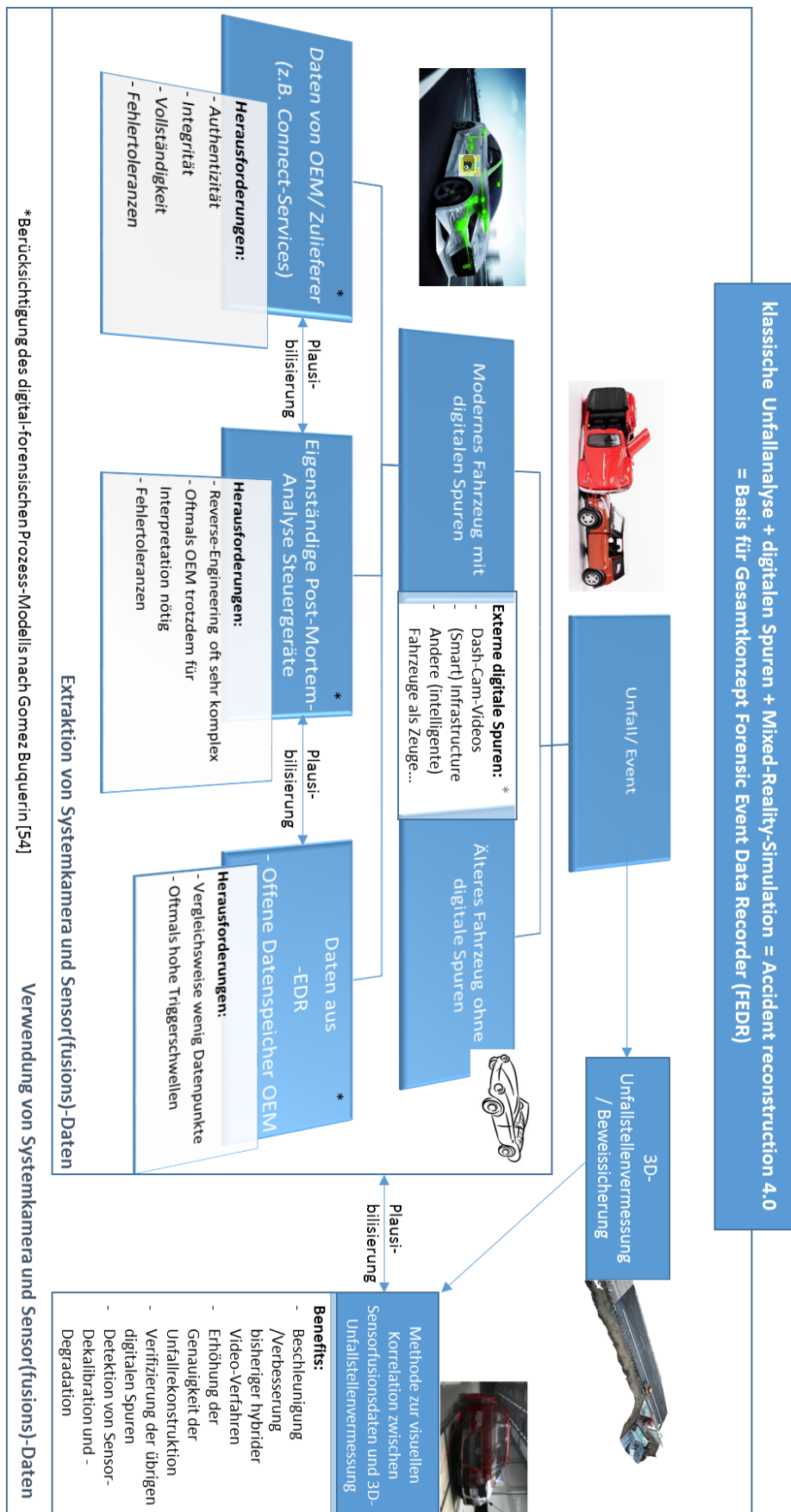


Abbildung 60: Schematische Darstellung der in der Dissertation erarbeiteten Zusammenhänge [Quelle: Autor]



Die durchgeführten Analysen realer Unfälle sowie die Laborversuche im CARISSMA-Testzentrum und auf dem DEKRA Test Center zeigen, dass bei modernen Fahrzeugen über die bisher bekannten digitalen Spuren hinaus eine Vielzahl zusätzlicher, unfallrelevanter Daten in entsprechenden Speicherbausteinen verschiedener Steuergeräte vorhanden ist. Dabei werden mit dieser Dissertation auf der einen Seite Hinweise dafür gegeben, welcher enorme Umfang an digitalen Spuren grundsätzlich unter entsprechender, gerichtlich angeordneter Zusammenarbeit mit dem Fahrzeughersteller extrahiert werden kann. Auf der anderen Seite werden auch Wege aufgezeigt, wie Daten speziell aus Airbag-, Motor-, eCall-, Infotainment- und Autopilot-Steuergeräten sowie Handy-Apps forensisch sicher und teilweise auch ohne die Hilfe des OEM oder entsprechenden Zulieferers aus den Fahrzeugen gewonnen werden können. In beiden Fällen ist hinsichtlich der Verwendbarkeit der Daten für die Unfallrekonstruktion aufgrund der Tatsache, dass die abgelegten Datenpunkte nicht originär für die Unfallrekonstruktion konzipiert wurden und es sich somit nicht um standardisierte Daten handelt, auf die kritische Bewertung der Fehlertoleranzen dieser Werte hinzuweisen. In manchen Fällen wird dargelegt, dass aufgrund der Fahrzeug-IT-Architektur gar keine wissenschaftlich fundierte Fehlerrechnung durchführbar ist. Vor diesem Hintergrund zeigt die vorliegende Dissertation, dass die Extraktion von Systemkameradaten aus den unfallbeteiligten Fahrzeugen als Kontrollinstanz zu einer signifikanten Erhöhung der Qualität und Genauigkeit der forensischen Rekonstruktion führt. Die Arbeit beweist, dass mit der vorgestellten Methode der visuellen Korrelation zwischen Sensorfusionsdaten und 3D-Unfallstellenvermessung, im besten Fall in Verbindung mit Sensor(fusions)- bzw. Objektdaten, die übrigen digitalen Spuren plausibilisiert und verifiziert werden können. Dies gilt insbesondere für die fahrdynamischen Größen der unfallbeteiligten Fahrzeuge in allen sechs Freiheitsgraden sowie alle Ableitungen daraus wie Bewegungstrajektorien, Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Nicken, Wanken, Gieren. Zusätzlich kann durch den Vergleich zwischen dem, was das untersuchte Fahrzeug über seine Sensorkonfiguration gesehen hat und dem, was tatsächlich basierend auf einer möglichst genauen Unfallstellenaufnahme vorhanden war, Rückschlüsse auf Sensor-Dekalibrationen und -Degradationen gezogen werden. Insgesamt sieht der Autor jedoch noch einen enormen Forschungsbedarf hinsichtlich der Einflüsse von Fahrerassistenzsystemen (FAS) und automatisierten Fahrfunktionen auf den Unfallablauf, der im Rahmen dieser Arbeit aufgrund des Umfangs nur angedeutet werden konnte. Dies betrifft sowohl die Einflüsse auf das Fahrverhalten des Fahrzeugs als auch bisher wenig berücksichtigter Effekte im Bereich der Mensch-Maschine-Schnittstelle (Human Machine Interface HMI) und damit einhergehenden Veränderungen des (Reaktions-)Verhaltens des Fahrers.

Zusätzlich ist anzumerken, dass die steigende Marktdurchdringung durch *intelligente* und vernetzte Fahrzeuge mit automatisierten Fahrfunktionen die Möglichkeit eröffnet, dass ein unbeteiligtes Fahrzeug mit entsprechender Sensorkonfiguration auch als *Zeuge* für die Rekonstruktion eines Verkehrsunfalls herangezogen werden könnte. In Verbindung mit teilweise schon in Verkehr befindlichen C2X-Anwendungen ist hier erheblicher Forschungsbedarf zu sehen. Es ist anzumerken, dass insbesondere die geplanten Versuche zur Validierung der entwickelten Methode zur visuellen Korrelation zwischen Sensorfusionsdaten und 3D-Unfallstellenvermessung aufgrund der Einschränkungen durch die Corona-Pandemie nicht vollumfänglich durchgeführt werden konnten. Diese Versuche sowie die auf dieser Datengrundlage basierenden KI-Methoden (z. B. SLAM), die in dieser Arbeit angesprochen werden, sollen in folgenden Forschungsarbeiten auch in Kooperation mit der Firma Dr. Steffan Datentechnik DSD durchgeführt bzw. erarbeitet werden. Dabei sollen neben Systemkameradaten zusätzlich handelsübliche Dash-Cams in die Versuchsfahrzeuge verbaut und ausgewertet werden.

In Verbindung mit einer Mixed-Reality-Versuchsumgebung, die ebenfalls in weiteren Forschungsarbeiten zu konkretisieren ist, und der Event-getriggerten Aufzeichnung von außergewöhnlichen Verkehrssituationen (z.B. Beinahe-Unfällen) in einem verpflichtenden EDR bietet dieser Ansatz erhebliches Potenzial für eine zukünftige Periodical Technical Inspection (PTI). Auch lässt sich durch die sachverständige Auswertung dieser Verkehrssituationen ein Teil einer auf Feldbeobachtungen basierenden dynamischen Homologation unter Berücksichtigung von Over-the-Air-Software-Updates realisieren. Durch diese Verfahrensweise kann den zukünftigen Herausforderungen bei der Zulassung insbesondere automatisierter Fahrfunktionen mithilfe einer Erweiterung des in Europa bisher vorherrschenden Vorsorgeprinzips durch gezielte Feldüberwachung in Verbindung mit einer leistungsfähigen PTI begegnet werden. Dieses Konstrukt wäre als erheblicher Standortvorteil für Deutschland und Europa gegenüber dem Rest der Welt anzusehen, da hier eine wesentlich höhere Dichte gut ausgebildeter Unfallsachverständigen vorhanden ist, die schnell auch hinsichtlich ihrer Expertise bezüglich digitaler Spuren weitergebildet werden könnten und müssten.

Auf Grundlage der durchgeführten Versuche und analysierten Realunfälle lässt sich ableiten, dass durch die eventbasierte Aufzeichnung von Systemkameradaten auch besonders das Bewegungsverhalten von Vulnerable Road Users (VRU) beim Unfall deutlich genauer aufgeklärt werden kann, als dies ohne Videomaterial der Fall ist. Des Weiteren können Objekte oder Fahrzeuge, die nicht aktiv in die Kollision involviert sind, mitberücksichtigt werden. Dies

ist besonders bei dynamischen Sichtverdeckungen sowie bei Einschlag- und Abdrängungsvorgängen ohne Berührung entscheidend.

Zusätzlich ist auszuführen, dass durch die entwickelte Methode auch ungewöhnliche Szenarien aufgeklärt werden können, die vorher nicht über explizite Aufzeichnung von Datenpunkten etwa im Rahmen eines EDR-Konzepts bedacht wurden. Als Beispiel wäre hier exemplarisch das Herunterfallen einer Person von einem Gerüst vor einen vorbeifahrenden Pkw zu nennen. Ohne eine entsprechende Videoaufzeichnung würden die Sensordaten den Schluss nahelegen, dass die Person aus dem Nichts plötzlich vor dem Fahrzeug auftauchte. Nach dem Motto *Ein Video sagt mehr als tausend Terabyte* trägt das entwickelte Verfahren dazu bei, technischen Laien, wie dies oftmals die Prozessbeteiligten mit Ausnahme der Sachverständigen sind, einen schwierigen physikalischen Sachverhalt besser verständlich zu machen. Prinzipiell kann die aufgezeigte Methode auch auf Videomaterial von Dash-Cams angewendet werden, wobei hier noch Forschungsbedarf hinsichtlich einer möglichst genauen Synchronisierung mit den aus dem Fahrzeug extrahierten Sensor(fusions)-Daten nötig ist. Die Einbeziehung von Methoden der künstlichen Intelligenz wie etwa SLAM verspricht dabei eine erhebliche Beschleunigung der Anwendungsverfahren in der Unfallanalyse.

Abschließend wird ein Gesamtkonzept für einen Forensic Event Data Recorder (FEDR) vorgestellt (siehe Abbildung 54 bzw. Bild unten), das neben einem gelebten Datenschutzkonzept auch zu mehr Rechts- und Verkehrssicherheit für alle führt. Dieser Ansatz, der in der Stellungnahme zur 4. These in Kapitel 6.1 bereits zusammenfassend erläutert wird, ist als integrative Klammer dieser Arbeit zu sehen, in die sich alle in der Dissertation bearbeiteten Themen sinnvoll einfügen. Dabei werden neben den Bedürfnissen der Unfallanalyse auch die der (e)PTI, der (dynamischen) Homologation, der Fahrzeug- und Infrastrukturentwicklung sowie des Opfer- und Verbraucherschutzes mitberücksichtigt. Dies könnte auch ein Baustein für die Weiterentwicklung der GIDAS-Datenbank in Richtung GIDAS 4.0 sein.

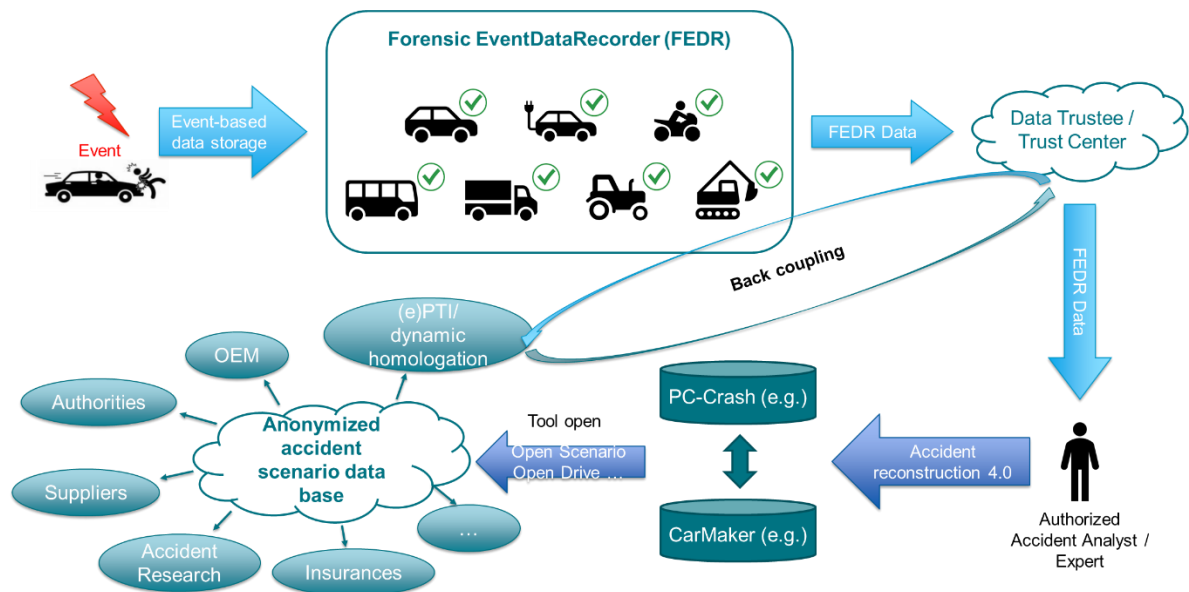


Abbildung 54: Gesamtkonzept eines Forensic Event Data Recorders (FEDR) in Anlehnung an [66]

Als Ausblick sollen die aus Sicht des Autors aus dieser Dissertation ableitbaren und in der Zusammenfassung bereits begründeten Forschungspotenziale kurz und prägnant aufgelistet werden:

1. Durchführung der aufgrund der Corona-Pandemie verschobenen Versuche bzw. zusätzliche Fahr Simulator-Studien zu Einflüssen von FAS und automatisierten Fahrfunktionen inklusive Generierung der Video-Datenbasis für KI, um mit einem adaptierten SLAM-Verfahren die Methode zur visuellen Korrelation zwischen Sensorfusionsdaten und 3D-Unfallstellenvermessung zu beschleunigen
2. Weiterentwicklung des FEDR-Konzepts inklusive technischer Realisierung unter Berücksichtigung erweiterter Datenelemente, verbesserter Trigger, Detektionsmöglichkeiten von Cyber-Angriffen und weiterer Datenmanipulation und Umsetzung eines sicheren Over-the-Air-Datenzugangs für Berechtigte
3. Weitere Forschung zur Extraktion von Systemkamera- und Sensor(fusions)-Daten mit Fokus auf eine breitere Fahrzeugherstellerabdeckung bzw. weiterführendes Reverse-Engineering bei Tesla-Fahrzeugen bezüglich der bereits extrahierten Snapshot-Daten und Datenanalyse der relevanten SD-Karte
4. Entwicklung und Forschung an einer Mixed-Reality-Versuchsumgebung (MRVU) für die Unfallrekonstruktion unter Einbeziehung weiterentwickelter Fahrermodelle und von Referenz-Algorithmen für Vermeidbarkeitsbetrachtungen auch für automatisierte Systeme inklusive Differenzierung der Fahrzeugführerverantwortung; Einbeziehung von explainable AI
5. Erforschung der Einflüsse von C2X auf die Verkehrsunfallanalyse
6. Forschung zu den Möglichkeiten und Grenzen neuer (e)PTI-Konzepte unter Berücksichtigung von Mixed-Reality-Prüfungen und Over-the-Air-Datenzugängen

## 7 Formelzeichen und Indizes

aaP	amtlich anerkannter Prüfer
ABS	Antiblockiersystem
ACM	Airbag Control Modul
ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistance System
AEB	Automatic Emergency Braking
AGW	Automotive GateWay
AHEAD	Aggregated Homologation-proposal for EventRecorderData for Automated Driving
AI	Artificial Intelligence
ALKS	Automated Lane Keeping System
AP	Autopilot-Steuergerät bei Tesla
AREC	Accident Reconstruction Conference Group
ASAM	Association for Standardization of Automation and Measuring Systems
ASIL A-D	Automotive Safety Integrity Level A bis D
ASM	Assistenz System Monitor
AVF	Automatisiertes und vernetztes Fahren
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BEV	Bird's Eye View (Draufsicht)
BEV	Battery Electric Vehicle
BMS	Batteriemanagementsystem
C2X	Car-to-X
CAN	Controller Area Network
CARISSMA	Center of Automotive Research on Integrated Safety Systems and Measurement Area
CCTV	Closed Circuit Television
CDR	Crash Data Retrieval
CFR	Code of Federal Regulations
CDI	Center Information Display bei Tesla
CPNC	Car-to-Pedestrian Nearside Child
CPU	Central Processing Unit
CSI	Common System Interface

DAS	Driver Assistance System
DOF	Degrees of Freedom
DSGVO	Datenschutzgrundverordnung
DSSAD	Data Storage System for Automated Driving
DTC	Dynamic Trouble Codes
eCall	emergency Call
ECU	Electronic Control Unit
EDR	Event Data Recorder; entspricht Ereignisdatenspeicher
ePTI	electronic Periodical Technical Inspection
ESC	Electronic Stability Control
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
eth	Ethernet
Euro NCAP	European New Car Assessment Program
EVU	Europäische Vereinigung für Unfallforschung und Unfallanalyse
Ex Ve	Extended Vehicle
FEDR	Forensic Event Data Recorder
FiA	Federation international de l'Automobile
FOV	Field of View
fps	frames per second
FSD	Fahrzeugsystemdaten
GIDAS	German In-Depth Accident Study
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GR	Group de rapporteurs
GRRF	Working Party on Breaks and Running Gear
GRSG	Working Party on General Safety Provisions
GRVA	Working Party on Automated/Autonomous and Connected Vehicles
GSR	General Safety Regulation
GVT	Global Vehicle Target
HMI	Human Machine Interface
IT	Informationstechnik
ISP	Independent Service Provider
ISO	International Organization for Standardization
IWG	Informal Working Group

KBA	Kraftfahrtbundesamt
KFG	Kraftfahrgesetz
KI	künstliche Intelligenz = artificial intelligence (AI)
Lidar	Light detection and ranging
MCU	Media Control Unit bei Tesla
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
OBD	On-Board-Diagnose
ODB	Offset Deformable Barrier
OEM	Original Equipment Manufacturer
OTA	Over-the-Air
OTP	Open Telematics Platform
OSI	ASAM Open Simulation Interface
PAS	Peripheral Acceleration Sensor
PFS	Perfect Forward Secrecy
Pkw	Personenkraftwagen
PPS	Peripheral Pressure Sensor
PTI	Periodical Technical Inspection
Rose-Crash	Roll Over Sensing Crash
SAE	Society of Automotive Engineers
SIL 1-4	Safety Integrity Level 1 bis 4
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SOTP	Secure Onboard Telematics Platform
StGB	Strafgesetzbuch
StVG	Straßenverkehrsgesetz
StVZO	Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung
TH	Technische Hochschule
UDS	Unfalldatenspeicher
UFO	UltraFlat Overrunable – Hersteller Humanetics
UNECE	United Nations Economic Commission for Europe
USA	United States of America
VCH	Vehicle Control History – Datenaufzeichnungssystem von Toyota
VKM	Volumetric Kinetic Mapping
VRU	Vulnerable Road User
VUT	Vehicle Under Test

## 8 Literatur

- [1] K. Böhm, D. Paula und H.-G. Schweiger, „EDR bei Unfällen mit automatisierten Fahrzeugen: Tagung der deutschen Ländergruppe der europäischen Vereinigung für Unfallanalyse und Unfallforschung (EVU) an der TH Ingolstadt“, 11. Nov. 2019.
- [2] European Commission, *Road safety: Commission welcomes agreement on new EU rules to help save lives*. Brussels, 2019. [Online]. Verfügbar unter: [https://europa.eu/rapid/press-release\\_IP-19-1793\\_en.htm](https://europa.eu/rapid/press-release_IP-19-1793_en.htm)
- [3] J. Gwehenberger, O. Braxmeier, C. Lauterwasser, M. Kreutner, M. Borrack und C. Reinkemeyer, „Bedarf und Anforderungen für EDR / DSSAD - eine Analyse auf der Basis von Versicherungsschäden der Allianz Versicherung in Deutschland“, *VKU - Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, Jg. 58, Nr. 2, 2020.
- [4] H.-G. Schweiger, C. Fothén und K. Böhm, „Automatisiertes Fahren: Wie sich Rechtssicherheit erreichen lässt“, *all-electronics.de*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.all-electronics.de/automatisiertes-fahren-wie-sich-rechtssicherheit-erreichen-laesst/>
- [5] M. Weyde, „Digitale Spuren in Zusammenhang mit Kraftfahrzeugen: Möglichkeiten für die Aufklärung von Verkehrsstraftaten“. Herausforderungen und Chancen der Digitalisierung und alternativer Antriebe im Bereich Verkehr, LZPD Neuss, März 2019.
- [6] R. Schöneburg, „Vorwort“ in *12. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit- Fahrzeugsicherheit, in Verbindung mit Berliner Erklärung*, S. 1–2.
- [7] M. Zwick und H. Bäumler, „Fahrtechnischer Vergleich moderner Pkw-Notbremsassistentensysteme im Straßenverkehr“, *VKU - Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, Jg. 55, Nr. 2, 2017. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.vkuonline.de/sixcms/media.php/4541/90008\\_2017\\_55\\_02\\_I\\_050-065\\_Beitrug\\_Notbremsassistentenz-Zwick\\_159874\\_print.pdf](http://www.vkuonline.de/sixcms/media.php/4541/90008_2017_55_02_I_050-065_Beitrug_Notbremsassistentenz-Zwick_159874_print.pdf), 2017
- [8] A. Techel, *Woven City: Toyota baut Stadt der Zukunft*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dekra-solutions.com/2020/05/woven-city-toyota-baut-stadt-der-zukunft/> (Zugriff am: 17. November 2020).
- [9] A. Kuhn, „About New Roles and Needs in the Development and Safeguarding of Futures Automated Driving Functions“ in *Proceedings annual congress EVU, Barcelona, Oktober 2019*.



- [10] D. Paula, K. Böhm und H.-G. Schweiger, „Reconstruction of traffic accidents with automated and electrified vehicles“ in *20. Internationales Stuttgarter Symposium - März 2020*, S. 357–371.
- [11] B. Preamble, *Event Data Recorders: 49 CFR Part563*, 2018. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.govinfo.gov/content/pkg/CFR-2018-title49-vol6/xml/CFR-2018-title49-vol6-part563.xml>
- [12] *WP.29 - Presentation / UNECE*. [Online]. Verfügbar unter: <https://unece.org/transportvehicle-regulations/wp29-presentation> (Zugriff am: 9. August 2021).
- [13] UNECE - United Nations Economic Commission for Europe, *WP.29 - Introduction*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.unece.org/trans/main/wp29/introduction.html> (Zugriff am: 17. November 2020).
- [14] UNECE - United Nations Economic Commission for Europe, *DSSAD / EDR*. [Online]. Verfügbar unter: <https://wiki.unece.org/pages/viewpage.action?pageId=87621709>.
- [15] *UN Regulation No. 160 - Event Data Recorder (EDR) / UNECE*. [Online]. Verfügbar unter: <https://unece.org/transport/documents/2021/10/standards/un-regulation-no-160-event-data-recorder-edr> (Zugriff am: 31. Oktober 2021).
- [16] *UN Regulation No. 157 - Automated Lane Keeping Systems (ALKS) / UNECE*. [Online]. Verfügbar unter: <https://unece.org/transport/documents/2021/03/standards/un-regulation-no-157-automated-lane-keeping-systems-alks> (Zugriff am: 31. Oktober 2021).
- [17] AHEAD, *Homologation-proposal for EventRecorderData for Automated Driving: Accident data storage is real privacy*. Position Paper for UNECE EDR/DSSAD IWG. [Online]. Verfügbar unter: <https://wiki.unece.org/download/attachments/87623808/EDR-DSSAD-02-04-r1%20%28AHEAD%29%20Position%20Paper%20on%20EDR.pdf?api=v2>.
- [18] M. Prechtl, *Mathematische Dynamik: Modelle und analytische Methoden der Kinematik und Kinetik*, 2. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint: Springer Spektrum, 2016.
- [19] A. Ahlswede, *Durchschnittliches Gewicht von PKW ausgewählter Autohersteller 2017*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/238004/umfrage/gewicht-von-pkw-nach-autoherstellern/> (Zugriff am: 22. Oktober 2019).

- [20] Statista Research Department, *Menschliches Körpergewicht - Durchschnitt in Nordamerika, Asien und weltweit 2011*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/256678/umfrage/durchschnittliches-koerpergewicht-in-nordamerika-asien-und-weltweit/> (Zugriff am: 22. Oktober 2019).
- [21] D. Wallner, „Physikalische Modellbildung von integrierten Fahrzeugsicherheitssystemen: Theoretische Untersuchungen hinsichtlich Integration und Optimierung aktiver und passiver Sicherheitssysteme“. Diplomarbeit, Technische Universität, Graz, 2008.
- [22] H. Burg und A. Moser, *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation*, 3. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [23] S. Dürnberger und Kreutner Melanie, „EDR-Daten heute und in Zukunft“, *VKU - Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik*, Jg. 55, Nr. 10, S. 328–341, 2017. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vkuonline.de/edr-daten-heute-und-in-zukunft-2023508.html>
- [24] M. Kreutner und K. Böhm, „What should an EDR for automated vehicles look like from an accident analyst's point of view?: An elaboration of the informal working group AHEAD“. Tüv Süd crash.tech2018 -Ingolstadt, 13. März 2018.
- [25] *REGULATION (EU) 2019/2144 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL: GSR*, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/2144/oj>
- [26] Audi AG, *Bedienungsanleitung Audi Q3 (S.290-291) - Typ F3 (2018)*.
- [27] *Straßenverkehrsgesetz (StVG) § 63a Datenverarbeitung bei Kraftfahrzeugen mit hoch- und vollautomatisierter Fahrfunktion: StVG § 63a*, 2017. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/stvg/\\_\\_63a.html](https://www.gesetze-im-internet.de/stvg/__63a.html)
- [28] BMVI, *Gesetz zum autonomen Fahren tritt in Kraft*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/gesetz-zum-autonomen-fahren.html> (Zugriff am: 31. Oktober 2021).
- [29] Österreichische Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, *Code of Practice: Test von automatisiertem Fahren auf Straßen mit öffentlichem Verkehr*. Version 3 - November 2018.
- [30] J. Bernasch, „Event data recording in automated driving: EVU- 28th Annual congress EVU, Barcelona“, 25. Okt. 2019.
- [31] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine - Standardization Administration Committee, *GB/T 32960.3-2016 - Technical*

- specification of remote service and management system for electric vehicles - Part 3: Communication protocol and data format.* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.chinesestandard.net/PDF.aspx/GBT32960.3-2016> (Zugriff am: 6. Dezember 2019).
- [32] VERORDNUNG (EU) 2016/679 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES zum Schutz natürlicher Personen bei der Verarbeitung personenbezogener Daten, zum freien Datenverkehr und zur Aufhebung der Richtlinie 95/46/EG (Datenschutz-Grundverordnung), 2016. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016R0679>
- [33] DSD - Dr. Steffan Datentechnik, Hg., „Technisches Handbuch PC-Crash“, (S. 429) Linz, Apr. 2019.
- [34] P. Richter, „Bewertung der Qualität von 3D-Punktwolken in der Unfallrekonstruktion“. (S. 88-89) Diplomarbeit an der Fakultät Kraftfahrzeugtechnik der Westsächsischen Hochschule Zwickau, 2021.
- [35] atlatec, *High Definition Maps for Autonomous Driving and Simulation - atlatec.* [Online]. Verfügbar unter: <https://atlatec.de/de/> (Zugriff am: 9. August 2021).
- [36] M. Görtz, „MODELL ZUR BESTIMMUNG VON DEFORMATIONSENERGIEN AN FAHRZEUGEN NACH VERKEHR SUNFÄLLEN“. ( S. 136-138) Dissertation, Institut für Gerichtsingenieurwesen, Universität Žilina, 2018.
- [37] NHTSA, *EDR - Questions & Answers.* [Online]. Verfügbar unter: [https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/edr\\_qas\\_11aug2006.pdf](https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.dot.gov/files/edr_qas_11aug2006.pdf) (Zugriff am: 15. Oktober 2019).
- [38] C. Wilkinson, D. King und G. Sigmund, „Evaluation of the accuracy of longitudinal speed change reported by event data recorders in frontal crash tests.pdf“ in *Proceedings annual congress EVU 2019 Barcelona.*
- [39] Kast GmbH, *UDS AT: Unfalldatenspeichertechnologie by SWOBODA und KAST.* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kast-gmbh.de/brochure/docs/magazine/#page/16> (Zugriff am: 17. November 2017).
- [40] Kast GmbH, *UDS AT: Unfalldatenspeichertechnologie by SWOBODA und KAST.* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.kast-gmbh.de/brochure/docs/magazine/#page/4> (Zugriff am: 17. November 2020).
- [41] AXA Schweiz, *DrivePartner: Ihr Auto-Assistent.* [Online]. Verfügbar unter: <https://www.axa.ch/de/privatkunden/angebote/fahrzeug->

- reisen/autoversicherung/drivepartner-auto-assistent.html (Zugriff am: 17. November 2020).
- [42] E. Arisov, J. Becker, M. Erny und A. Zeier Röschmann, „Individualisierte Versicherungslösungen in einer digitalen Welt: Eine Studie des Zentrums für Risk & Insurance“, *Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften- school of management and law*, 2019.
- [43] K. Böhm, D. Paula, L. Wech und H.-G. Schweiger, „Event Data Recorder (EDR) for accidents with automated vehicles: The accident analysis of the future“ in *12. VDI-Tagung Fahrzeugsicherheit- Fahrzeugsicherheit - VDI-Berichte Nr. 2364, 2019, S. 349–364*.
- [44] T. Hoger und I. Holtkötter, „Uncertainties of speed calculations when retrieving data from EDR and Error Codes (DTCs) after crash events“ in *EVU annual conference 2018 Dubrovnic*.
- [45] M. Coyne, A. Spek, J. Reynolds, J. van Essen und H. Bot, „Vehicle Fault Memory Data Extraction and Interpretation“ in *EVU annual conference 2010 Prag*.
- [46] A. Spek und H. Bot, „Accuracy of freeze frame data and EDR data in full scale crash tests“ in *Proceedings annual congress EVU 2012 Brasov*.
- [47] O. Ryo, Kenshiro Kato, Takaaki Terashima und I. Akinori, „Accident Reconstruction with Vehicle Control History in Toyota Vehicles with Toyota Pre-collision Safety System“ in *Proceedings annual congress EVU 2019 Barcelona*.
- [48] R. Hengeveld, E. Wisse, M. van Riel und N. Lieshout, „Use of digital data in investigations of road traffic accidents“ in *Proceedings annual congress EVU 2017 Haarlem NL*.
- [49] Technische Hochschule Ingolstadt, *Ingolstadt Innovation Lab - In2Lab*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.thi.de/forschung/carissma/c-ecos/kooperative-intelligente-verkehrssysteme/car2x-kommunikation-fuer-verkehrssicherheit-und-effizienz/in2lab> (Zugriff am: 18. November 2020).
- [50] A. Moser und H. Burg, „Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeit aus Videobildern und Laserscanner Daten in PC-Crash“ in *Proceedings annual congress EVU 2017 Haarlem NL*.
- [51] K. Böhm, „Podiumsdiskussion im Rahmen der juristischen Fachkonferenz des Deutschen Verkehrssicherheitsrats (DVR)“, 6. Okt. 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dvr.de/aktuelle-infos/juristische-fachkonferenz-2020-rechtsfragen-zur-verkehrssicherheit>

- [52] K. Böhm, K. Iwig, D. Paula, T. Kubjatko und H.-G. Schweiger, „Beweisfotoauswertung mittels Fotogrammetrie“, *Znalectvo 2/2020 - Fachzeitschrift der Universität Zilina, EDIS – vydavateľstvo ŽU v Žiline, ISSN 1335 – 809X, EV 549/08*.
- [53] E. Kolla, J. ONDRUŠ und P. VERTAL, „Reconstruction of traffic situations from digital video-recording using method of volumetric kinetic mapping“, *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*, Jg. 84, Nr. 2, S. 147–169, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.aaejournal.com/Reconstruction-of-traffic-situations-from-digital-video-recording-using-method-of,110229,0,1.html>
- [54] K. K. Gomez Buquerin, C. Corbett und H.-J. Hof, „A generalized approach to automotive forensics“, *Forensic Science International: Digital Investigation*, Jg. 36, S. 301111, 2021, doi: 10.1016/j.fsidi.2021.301111.
- [55] H.-J. Hof, D. Bayerl und K. G. Buquerin, „Überwachung in modernen Fahrzeugen“ (De;de), *Datenschutz Datensich*, Jg. 45, Nr. 6, S. 399–403, 2021, doi: 10.1007/s11623-021-1459-5.
- [56] STMicroelectronics, *M95320-W - STMicroelectronics*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.st.com/en/memories/m95320-w.html> (Zugriff am: 31. Oktober 2021).
- [57] S. Schlosser, „Telefon-Interview im Februar 2021 durch Autor mit S. Schlosser: Lehrgangsteilnehmer interne Grundausbildung Unfallanalyse bei DEKRA und Teilnehmer der jährlichen Versuche in Wildhaus“.
- [58] autobild.de, *Die besten und schlechtesten Bremser seit 2013*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.autobild.de/bilder/die-besten-und-schlechtesten-bremser-seit-2013-5207764.html#bild15> (Ausgangswert in Publikation 11,59 m/s<sup>2</sup> auf Teststrecke- unter Praxis-Bedingungen am Unfallort Reduktion auf 10,5 m/s<sup>2</sup>) (Zugriff am: 2. Februar 2021).
- [59] M. Weyde und D. Otte, „EDR und seine Möglichkeiten, u.a. Raserunfälle“. 10. gmttb Jahrestagung, Konstanz, Okt. 2021.
- [60] *EUR-Lex - 31975L0443 - EN - EUR-Lex*. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A31975L0443> (Zugriff am: 2. Februar 2021).
- [61] § 19 StVZO - *Einzelnorm*. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo\\_2012/\\_19.html](https://www.gesetze-im-internet.de/stvzo_2012/_19.html) (Zugriff am: 3. Februar 2021).
- [62] M. H. Tuning, *Instructions*. [Online]. Verfügbar unter: <https://mhd tuning.com/pages/instructions> (Zugriff am: 3. Februar 2021).

- [63] M. H. Tuning, *MHD Super License for S55*. [Online]. Verfügbar unter: <https://mhdtuning.com/products/mhd-super-license-for-s55> (Zugriff am: 3. Februar 2021).
- [64] *EUR-Lex - 32015R0758 - EN - EUR-Lex*. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32015R0758> (Zugriff am: 3. Februar 2021).
- [65] Crash Data Group, *Tesla EDR Kit - Crash Data Group*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.crashdatagroup.com/tesla-edr-kit/> (Zugriff am: 18. Februar 2021).
- [66] K. Böhm, D. Paula, T. Kubjatko, H.-G. Schweiger, „New developments on EDR (Event Data Recorder) for automated vehicles“, *Open Engineering*. [Online]. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1515/eng-2020-0007>
- [67] K. Mahaffey, *Hacking a Tesla Model S: What we found and what we learned*. [Online]. Verfügbar unter: <https://blog.lookout.com/hacking-a-tesla> (Zugriff am: 12. Mai 2021).
- [68] F. Hoogendijk, „Reverse engineering and evaluation of Tesla vehicle logs“ in *Proceedings annual congress EVU 2020 Online*.
- [69] Keen Security Lab Blog, *Tencent Keen Security Lab: Experimental Security Research of Tesla Autopilot*. [Online]. Verfügbar unter: <https://keenlab.tencent.com/en/2019/03/29/Tencent-Keen-Security-Lab-Experimental-Security-Research-of-Tesla-Autopilot/> (Zugriff am: 13. Mai 2021).
- [70] Wikipedia, *Nvidia Drive*. [Online]. Verfügbar unter: [https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nvidia\\_Drive&oldid=1003840123](https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Nvidia_Drive&oldid=1003840123) (Zugriff am: 13. Mai 2021).
- [71] Infineon Technologies AG, *32-bit AURIX™ TriCore™ Microcontroller - Infineon Technologies*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.infineon.com/cms/de/product/microcontroller/32-bit-tricore-microcontroller/> (Zugriff am: 13. Mai 2021).
- [72] Tesla, *Model S owner's manual 2018- Seite 4*.
- [73] C. Szegedy *et al.*, „Going Deeper With Convolutions“ in *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2015, S. 1–9.
- [74] A. Moser und H. Steffan, „Artificial Intelligence (AI) in Accident Reconstruction.pdf“, *Proceedings annual congress EVU 2019 Barcelona*.
- [75] *Threat of Adversarial Attacks on Deep Learning in Computer Vision: A Survey*. [Online]. Verfügbar unter: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8294186> (Zugriff am: 5. August 2021).

- [76] D. Paula, K. Böhm, T. Kubjatko und H.-G. Schweiger, „Challenges in forensic reconstruction of traffic accidents involving Advanced Driver Assistance Systems (ADAS)“, *EVU 2020 online*.
- [77] K. Böhm, D. Paula, B. Geidl, L. Grassl, T. Kubjatko und H.-G. Schweiger, „Reliability and performance of the AEB system of a Tesla Model X under different conditions“, *Proceedings annual congress EVU 2020 online*.
- [78] carhs.training gmbh, Hg., *SafetyCompanion 2020 VERSION 1.4- S. 156-166*, 2020.
- [79] Tesla, *Model X owner's manual 2018- Seite 4*.
- [80] D. Vriesman, M. Pederiva, J. Martino, A. Britto, A. Zimmer und T. Brandmeier, „A Fusion Approach for Pre-Crash Scenarios based on Lidar and Camera Sensors“, *IEEE 93rd Vehicular Technology Conference 2021*.
- [81] A. Bochkovskiy, C.-Y. Wang und H. Liao, „Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection“, *ArXiv*, vol. *abs/2004.10934*, Jg. 2020.
- [82] YouTube, *BMW Rückfahrsistent | Tutorial/HowTo/Erklärung*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.youtube.com/watch?v=m3MgpybtDGY> (Zugriff am: 3. Juni 2021).
- [83] FSD Zentrale Stelle nach StVG, Hg., *Präsentationsstand: ‚Umfeldsensorik-Prüfen 21‘ VdTÜV/DEKRA: Sachverständigentag (SVT), Berlin*, Feb. 2019.
- [84] Deutscher Verkehrssicherheitsrat, *DVR Beschlüsse: Lessons Learned zur General Safety Regulation*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dvr.de/ueber-uns/beschluesse> (Zugriff am: 1. November 2021).
- [85] International Organization for Standardization, *ISO/DIS 20730-3(en), Road vehicles — Vehicle interface for electronic Periodic Technical Inspection (ePTI) — Part 3: Data definitions*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:20730:-3:dis:ed-1:v1:en:fig:1> (Zugriff am: 18. November 2021).
- [86] F. Leimbach, „Status Trust Center durch F. Leimbach: Leiter des Bereichs „Konzernrepräsentanz Technische Angelegenheiten“ bei DEKRA, Stand März 2021“.
- [87] Wikipedia, *Perfect Forward Secrecy*. [Online]. Verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Perfect\\_Forward\\_Secrecy&oldid=212897323](https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Perfect_Forward_Secrecy&oldid=212897323) (Zugriff am: 15. Juni 2021).
- [88] Wikipedia, *Man-in-the-Middle-Angriff*. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Man-in-the-Middle-Angriff&oldid=211562689> (Zugriff am: 15. Juni 2021).
- [89] J. Bönninger und F. Blüthner, „Fairer Zugang zu Fahrzeug Daten over the air, Stand März 2021“.

- [90] M. Bartsch und M. Wagner, „IT Security der On-Board Telematik Plattform“, 16. Juni 2020.
- [91] Verkehrsunfallforschung an der TU Dresden GmbH, *GIDAS 4.0*. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gidas.org/gidas4.html> (Zugriff am: 18. November 2021).



## 9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur des Weltforums WP.29 [Quelle: Autor] abgeleitet aus [12].....	15
Abbildung 2: Überblick über Status quo EDR weltweit [Quelle: Autor] .....	16
Abbildung 3: Exemplarisches Unfallszenario, erzeugt mit PC-Crash [10] .....	18
Abbildung 4: Sensor- und Datarecording-Konzept der Firma Virtual Vehicle [30].....	26
Abbildung 5: Überblick über Quellen für digitale Spuren bei der Unfallrekonstruktion [Quelle: Autor] .....	29
Abbildung 6: Bildauswertung einer Fotografie eines stehenden Fahrzeugs [52] .....	33
Abbildung 7: Schematische Darstellung der grundlegenden Schritte zur Erfassung und Verarbeitung von Eingabedaten für die Rekonstruktion von Straßenverkehrsereignissen nach der VKM-Methode [53].....	36
Abbildung 8: Erstellung einer zusammengesetzten Videodatei nach Kolla [53].....	37
Abbildung 9: Prozessmodell für eine juristisch belastbare, digital-forensische Untersuchung an Automotive-Komponenten [54].....	41
Abbildung 10: Vollständige Auslaufstrecke BMW M4 [Quelle: Autor].....	42
Abbildung 11: Übersicht der Beschädigungen an den beteiligten Fahrzeugen sowie Auflistung der untersuchten Steuergeräte des BMW M4 [Quelle: Autor].....	44
Abbildung 12: Detaillierte Darstellung der Analyseschritte beim Airbag- bzw. Motorsteuergerät des BMW M4 [Quelle: Autor].....	45
Abbildung 13: Auszug aus dem Komplettreport von BMW – Teil 1 [Quelle: Autor] .....	47
Abbildung 14: Auszug aus dem Komplettreport von BMW – Teil 2 [Quelle: Autor] .....	47
Abbildung 15: Schematische Darstellung der Platzierung der Beschleunigungssensoren des Airbagsystems und der Erfassung der Fahrzeuggeschwindigkeit [Quelle: Autor].....	51
Abbildung 16: Schematische Darstellung der Einzelfehler und des sich daraus ergebenden Gesamtfehlers bezogen auf die Kollisionsgeschwindigkeit [Quelle: Autor] ....	51
Abbildung 17: Screenshot der Längsverzögerung Crash 1 aus Werksdiagnosetool von Bosch [Quelle: Autor] .....	55
Abbildung 18: Screenshot der Längsverzögerung Crash 1 aus Werksdiagnosetool von Bosch [Quelle: Autor] .....	55
Abbildung 19: Screenshot der Winkelgeschwindigkeit um die Längsachse Crash 1 aus Werksdiagnosetool von Bosch [Quelle: Autor].....	56

Abbildung 20: Quergeschwindigkeit vermutlich bei Überschlag-Event des BMW – in Bosh-Untersuchungsbericht zu Crash 1 gehörig [Quelle: Autor].....	57
Abbildung 21: Klassische stoßbasierte Kollisionsanalyse der ersten Kollision zwischen BMW und Audi unter Berücksichtigung des Leitplankenanpralls des BMW [Quelle: Autor] .....	58
Abbildung 22: Screenshot der Winkelgeschwindigkeit um die Längsachse Event 2 aus Werksdiagnosetool von Bosch [Quelle: Autor].....	59
Abbildung 23: Downpipes verbaut am Fahrzeug (links) und im ausgebauten Zustand (rechts) [Quelle: Autor] .....	60
Abbildung 24: Graffiti am Programmcode-Ende mit Verweis auf Softwarestand des Entwicklers [Quelle: Autor] .....	61
Abbildung 25: Veränderungen bei Daten aus dem Motorsteuergerät im Bereich Maximalgeschwindigkeit [Quelle: Autor].....	63
Abbildung 26: Veränderungen bei Daten aus dem Motorsteuergerät im Bereich maximal mögliches Moment an der Kupplung [Quelle: Autor].....	63
Abbildung 27: Grafische Darstellung der Messwerte der ersten Messfahrt des BMW vom 27.07.2019 um 13:29 Uhr [Quelle: Autor] .....	67
Abbildung 28: Übersichtsaufnahme der Unfallörtlichkeit mit Drohne [Quelle: Autor] .....	69
Abbildung 29: Längs- und Querbeschleunigungsverlauf extrahiert aus Hex-Daten aus dem Airbag-Steuergerät des verunfallten Tesla [Quelle: Autor] .....	71
Abbildung 30: Kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung Delta v längs und quer [Quelle: Autor] .....	71
Abbildung 31: Vorkollisionäre Daten zu Fahrzeuggeschwindigkeit, Gaspedalstellung und Lenkwinkel am Lenkrad [Quelle: Autor] .....	72
Abbildung 32: Überblick über das System-Design der Netzwerkarchitektur des untersuchten Tesla Model S [67] .....	74
Abbildung 33: Interne Kommunikation innerhalb der AP-Einheit unter Einbeziehung der Systemkameras [69] .....	75
Abbildung 34: Aufbaustruktur der AP-Software [Quelle: Autor] .....	76
Abbildung 35: Kamera-Konfiguration des untersuchten Tesla Model S [72]; die relevanten Positionen werden im Text unten erklärt.....	77
Abbildung 36: Korrelation zwischen Tesla AKNET V9 und der Inception-v3-Architektur in Anlehnung an [73] .....	78
Abbildung 37: Bauteile AP (oben) und CID (unten) [Quelle: Autor].....	79

Abbildung 38: Standbild aus Systemvideo (Frontkamera) zum unmittelbaren Kollisionszeitpunkt (links) und Sichtverdeckung durch VW Touran in der Annäherung aus Sicht der nach vorne gerichteten Flankenkamera (rechts) [43]	81
Abbildung 39: Grafische Darstellung des EURO-NCAP Tests CPNC-50 [78]	86
Abbildung 40: Versuchsanordnung AEB-Outdoor-Versuch mit Audi A4 Avant [Quelle: Autor].....	87
Abbildung 41: Versuchsaufbau AEB-Tests mit Kamera-Setup und Beschreibung [Quelle: Autor].....	88
Abbildung 42: Positionsbestimmung durch Kameraoptimierungsmodul in PC-Crash [77]....	89
Abbildung 43: Vergleich zwischen Realität und Anzeige im Kombi-Instrument aus Experiment 3.7 [77].....	91
Abbildung 44: Vergleich zwischen Realität und Anzeige im Kombi-Instrument aus Experiment 3.15 [77].....	94
Abbildung 45: Mittlere Verzögerung aus C2C-Versuchen [77].....	95
Abbildung 46: Auswertung der zeitlichen Abstände zu t0 aus C2C-Versuchen [77].....	96
Abbildung 47: Auswertung der zeitlichen Abstände zu t0 aus Versuchen mit Erwachsenen-Target [77].....	96
Abbildung 48: Bilderserie aus Dash-Cam-Aufzeichnung der zentralen Frontkamera des verwendeten Tesla Model 3 in Annäherung an 4a Erwachsenen-Target [Quelle: Autor] .....	100
Abbildung 49: Darstellung Versuchsanordnung (rechts) und Ergebnisse (links) der Fusion [80].....	101
Abbildung 50: Workflow, der von Vriesman et al. für die Sensorfusion vorgeschlagen wird [80].....	102
Abbildung 51: Schematischer Workflow der Methode der visuellen Korrelation zwischen Sensorfusionsdaten und 3D-Unfallstellenvermessung in Anlehnung an [53].	104
Abbildung 52: Proof of Concept mit statischem Versuch – durch dekalibrierten Lidar-Sensor vorne rechts wird der real nur einmal vorhandene Pylon durch das Fahrzeug doppelt gesehen – realer Pylon rechts und Geisterobjekt links [83] .....	106
Abbildung 53: Vorläufige Ergebnisse des dynamischen Versuchsaufbaus [Quelle: Autor] .	107
Abbildung 54: Gesamtkonzept eines Forensic Event Data Recorders (FEDR) in Anlehnung an [66].....	110

Abbildung 55: Konzepte eines Zugangs zu Fahrzeugdaten Over-the-Air in Anlehnung an [86].....	112
Abbildung 56: Trust Center nach Ausprägung Leimbach/DEKRA, Stand März 2021 [86] .	114
Abbildung 57: Trust Center nach Ausprägung FSD GmbH [89].....	115
Abbildung 58: SOTP mit Automotive GateWay, Docker und HMI in Anlehnung an [90] ..	116
Abbildung 59: Übersichtsdarstellung der verwendeten Methoden zur Erreichung der Ziele der Dissertation [Quelle: Autor] .....	123
Abbildung 60: Schematische Darstellung der in der Dissertation erarbeiteten Zusammenhänge [Quelle: Autor] .....	124

**10 Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Grundsätzliche Gegenüberstellung zwischen EDR und DSSAD [10]..... 23  
Tabelle 2: Vorlage zur Auswertung der Positionen zwischen Kombiinstrument und Realität 90  
Tabelle 3: Auszug aus der Auswertung von Versuch 3.7 ..... 90  
Tabelle 4: Auszug aus der Auswertung von Versuch 3.15 ..... 93  
Tabelle 5: Abstands- und Winkelfehler des Sensorfusionsansatzes über alle Fälle [80]..... 102

## 11 Anhang

### 11.1 Anhang I – Datenpunkte Real-Time-Monitoring in China am Beispiel Audi e-tron, Stand 2019

- 1 VIN Code
- 2 Registration Time
- 3 Vehicle Type
- 4 Vehicle model
- 5 Vehicle use purpose
- 6 Types of energy storage device
- 7 Drive motor type
- 8 Rated power of drive motor
- 9 Rated speed of drive motor
- 10 Rated torque of drive motor
- 11 Installation number of drive motors
- 12 Arrangement type / location of drive motor
- 13 Cooling mode of drive motor
- 14 Range of electric vehicle
- 15 Maximum speed of electric vehicle
- 16 Total number of traction battery packs
- 17 For each traction battery pack serial number
- 18 For each traction battery pack manufacturer code/list of traction battery code
- 19 For each traction battery pack: rated energy
- 20 For each traction battery pack: rated voltage
- 21 For each traction battery pack battery manufacturing date code
- 22 For each traction battery pack batter type / battery type code
- 23 For each traction battery pack: maximum temperature
- 24 For each traction battery pack: minimum temperature
- 25 Start time
- 26 Cutoff time
- 27 Accumulated driving mileage
- 28 Residual mileage / leftover mileage
- 29 Charge-discharge state
- 30 Positioning state
- 31 Longitude
- 32 Latitude
- 33 Speed
- 34 Direction
- 35 Motor controller temperature
- 36 Drive e-motor speed
- 37 Drive e-motor temperature
- 38 Motor bus current / drive motor current
- 39 Accelerator pedal travel
- 40 Brake pedal state
- 41 Power system ready
- 42 Emergent power off request
- 43 Current state of vehicle
- 44 High-voltage battery current / total current of traction battery
- 45 Battery capacity
- 46 Residual energy
- 47 Total voltage of battery
- 48 Maximum temperature of cell
- 49 Minimum temperature of cell
- 50 Maximum voltage of cell
- 51 Minimum voltage of cell
- 52 Insulation resistance value
- 53 High-voltage interlock status
- 54 Battery balance activation
- 55 Liquid fuel consumption
- 56 Abnormal alarm of motor control unit
- 57 Abnormal alarm: motor controller temperature
- 58 " Drive motor temperature
- 59 "Motor drive system failure
- 60 "Dcdc temperature
- 61 " Dcdc state

- 62 " Of vehicle control unit (vci)
- 63 " Of battery management system
- 64 " Total voltage of battery
- 65 " Maximum temperature of the cell
- 66 " Minimum temperature of the cell
- 67 " Maximum voltage of the cell
- 68 " Minimum voltage of the cell
- 69 " High voltage interlock state
- 70 " Insulation resistance value
- 71 "Collision signal state
- 72 " Energy storage system fault
- 73 Abnormal alarm of braking system
- 74 Brake system failure
- 75 Total number of simultaneous alarms
- 76 Alarm signal value
- 77 Alarm level
- 78 Highest alarm level
- 79 Warning marker of whole vehicle state
- 80 Total number of other failures of whole vehicle state
- 81 List of codes for other failures of whole vehicle state
- 82 Alarm marking of traction battery
- 83 Total number of other failures of traction battery
- 84 List of codes of other failures of traction battery
- 85 Alarm marking of motor fault
- 86 Total number of other failures of e-motor
- 87 List of codes for other failures of e-motor
- 88 Total number of other failures
- 89 List of codes for other failures
- 90 List of codes of other failures of traction battery
- 91 Over-voltage of overall voltage of traction battery
- 92 Over-current of overall current of traction battery
- 93 Over-voltage of max voltage basic unit
- 94 Under-voltage of min. Voltage of basic unit
- 95 CAN communication fault of whole vehicle
- 96 CAN communication fault of drive system
- 97 Too low insulation resistance of whole vehicle and traction battery
- 98 High voltage interlock of complete vehicle fails
- 99 Extremely large voltage limit difference of basic units / cell voltage too high
- 100 Over-temperature of basic unit / cell
- 101 Extremely large temperature difference of basic units / cells
- 102 Under-voltage of overall voltage of traction battery
- 103 Over-temperature of driving motor
- 104 Over-current of e-motor
- 105 Charge connection failure
- 106 Whole vehicle charge failure
- 107 Over-speed of driving motor

11.2 Anhang II - AHEAD-Datenliste zum EDR – Stand 2018

Data Element	source	Requirement	early Precrash -30s to -5s	Near Precrash -5s to -0s	Crash -0,04s to 0,25s	Near Postcrash 0,0s to 5s	Far Postcrash +5s to +10s	Accuracy	Resolution	Driving Data	Surroundings	Driver	Crash
Longitudinal acceleration	VERONICA	R	10 Hz ± 2 g	25 Hz ± 2 g	-	25 Hz ± 2 g	10 Hz ± 2 g	± 5%	0.16 ms <sup>2</sup> (0.016 g)				
	AHEAD	R	10 Hz ± 2 g	25 Hz ± 2 g	-	25 Hz ± 2 g	10 Hz ± 2 g	± 5%	0.16 ms <sup>2</sup> (0.016 g)	x			x
	NHTSA	NR	-	-	-	-	-	-	-				
Lateral acceleration	VERONICA	R	10 Hz ± 2 g	25 Hz ± 2 g	-	25 Hz ± 2 g	10 Hz ± 2 g	± 5%	0.16 ms <sup>2</sup> (0.016 g)				
	AHEAD	R	10 Hz ± 2 g	25 Hz ± 2 g	-	25 Hz ± 2 g	10 Hz ± 2 g	± 5%	0.16 ms <sup>2</sup> (0.016 g)	x			x
	NHTSA	NR	-	-	-	-	-	-	-				
Normal acceleration	VERONICA	IR	10 Hz ± 2 g	25 Hz ± 2 g	-	25 Hz ± 2 g	10 Hz ± 2 g	± 5%	0.16 ms <sup>2</sup> (0.016 g)				
	AHEAD	R	10 Hz ± 2 g	25 Hz ± 2 g	-	25 Hz ± 2 g	10 Hz ± 2 g	± 5%	0.16 ms <sup>2</sup> (0.016 g)	x			x
	NHTSA	NR	-	-	-	-	-	-	-				
Longitudinal acceleration (IP)	VERONICA	R	-	-	250 Hz ± 50 g	-	-	± 5%	1 ms <sup>2</sup> (0.1 g)				
	AHEAD	R	-	-	1 kHz ± 50 g	-	-	± 5%	1 ms <sup>2</sup> (0.1 g)				x
	NHTSA	IR	-	-	100 Hz ± 50 g	-	-	± 10%	0.5 g				
Lateral acceleration (IP)	VERONICA	R	-	-	250 Hz ± 50 g	-	-	± 5%	1 ms <sup>2</sup> (0.1 g)				
	AHEAD	R	-	-	1 kHz ± 50 g	-	-	± 5%	1 ms <sup>2</sup> (0.1 g)				x
	NHTSA	IR	-	-	100 Hz ± 5 g	-	-	± 10%	0.5 g				
Normal acceleration (IP)	VERONICA	IR	-	-	250 Hz ± 50 g	-	-	± 5%	1 ms <sup>2</sup> (0.1 g)				
	AHEAD	R	-	-	1 kHz ± 50 g	-	-	± 5%	1 ms <sup>2</sup> (0.1 g)				x
	NHTSA	IR	-	-	100 Hz ± 5 g	-	-	± 10%	0.5 g				
Δv, longitudinal	VERONICA	NR	-	-	-	-	-	-	-				
	AHEAD	NR	-	-	100 Hz	-	-	-	-				x
	NHTSA	R	-	-	100 Hz ± 100 kmh <sup>2</sup>	-	-	± 10%	1 kmh				
Maximum Δv, longitudinal	VERONICA	NR	-	-	-	-	-	-	-				
	AHEAD	NR	-	-	-	-	-	-	-				
	NHTSA	R	-	-	N/A	-	-	± 10%	1 kmh				
Time, maximum Δv, longitudinal	VERONICA	NR	-	-	-	-	-	-	-				
	AHEAD	NR	-	-	-	-	-	-	-				
	NHTSA	R	-	-	N/A	-	-	± 3 ms	2.5 ms				
Δv, lateral	VERONICA	NR	-	-	-	-	-	-	-				
	AHEAD	NR	-	-	100 Hz	-	-	-	-				x
	NHTSA	IR	-	-	100 Hz ± 100 kmh <sup>2</sup>	-	-	± 10%	1 kmh				
Maximum Δv, lateral	VERONICA	NR	-	-	-	-	-	-	-				
	AHEAD	NR	-	-	-	-	-	-	-				
	NHTSA	IR	-	-	N/A	-	-	± 10%	1 kmh				
Time, maximum Δv, lateral	VERONICA	NR	-	-	-	-	-	-	-				
	AHEAD	NR	-	-	-	-	-	-	-				
	NHTSA	IR	-	-	N/A	-	-	± 3 ms	2.5 ms				
Time, maximum Δv, resultant	VERONICA	NR	-	-	-	-	-	-	-				
	AHEAD	NR	-	-	-	-	-	-	-				
	NHTSA	IR	-	-	N/A	-	-	± 3 ms	2.5 ms				
Vehicle roll angle***	VERONICA	IE	-	10 Hz ± 1080° s	-	10 Hz ± 1080°	10 Hz ± 1080° s	± 10%	10°				
	AHEAD	R	-	10 Hz ± 1080° s	10 Hz ± 1080°	10 Hz ± 1080°	10 Hz ± 1080°	± 10%	10°				x
	NHTSA	IR	-	10 Hz ± 1080° 4	-	10 Hz ± 1080°	10 Hz ± 1080° 4	± 10%	10°				
v (Speed, vehicle indicated)	VERONICA	R	10 Hz 0-250 kmh	10 Hz 0-250 kmh	-	10 Hz 0-250 kmh	10 Hz 0-250 kmh	± (3% + 1kmh)	1 kmh				
	AHEAD	R	10 Hz 0-250 kmh	10 Hz 0-250 kmh	-	10 Hz 0-250 kmh	10 Hz 0-250 kmh	± (3% + 1kmh)	1 kmh	x			x
	NHTSA	R	-	2 Hz 0-200 kmh	-	-	-	± 1 kmh	1 kmh				
Engine throttle, percent full	VERONICA	R	-	2 Hz 0-100%	-	-	-	± 5%	0.01				
	AHEAD	R	-	2 Hz 0-100%	-	-	-	± 5%	0.01	x		x	x
	NHTSA	R	-	2 Hz 0-100%	-	-	-	± 5%	0.01				
Engine speed, in r/min	VERONICA	IR	-	2 Hz 0-10000 rpm	-	-	-	± 100 rpm	100 rpm				
	AHEAD	R	-	2 Hz 0-10000 rpm	-	-	-	± 100 rpm	100 rpm	x			x
	NHTSA	IR	-	2 Hz 0-10000 rpm s	-	-	-	± 100 rpm	100 rpm				
Brake status (Service brake, on, off)	VERONICA	R	10 Hz / OnOff	25 Hz / OnOff	-	25 Hz / OnOff	10 Hz / OnOff	NA	On or Off				
	AHEAD	R	10 Hz / OnOff	25 Hz / OnOff	-	25 Hz / OnOff	10 Hz / OnOff	NA	On or Off	x		x	x
	NHTSA	R	-	2 Hz / OnOff	-	-	-	NA	On and Off				
ABS activity	VERONICA	IE	2 Hz / OnOff	10 Hz / OnOff	-	-	-	NA	On and Off				
	AHEAD	R	2 Hz / OnOff	10 Hz / OnOff	-	-	-	NA	On and Off	x			x
	NHTSA	IR	-	2 Hz / OnOff s	-	-	-	NA	On and Off				
Stability control, on, off, engaged	VERONICA	IE	2 Hz / OnOffEng	10 Hz / OnOffEng	-	-	-	-	On, Off, Engaged				
	AHEAD	R	2 Hz / OnOffEng	10 Hz / OnOffEng	-	-	-	-	On, Off, Engaged	x			x
	NHTSA	IR	-	2 Hz / OnOffEng s	-	-	-	-	On, Off, Engaged				
Steering wheel angle (steering input)	VERONICA	IR	2 Hz / ± 250°	10 Hz / ± 250°	-	-	-	± 5%	0.01				
	AHEAD	R	2 Hz / ± 250°	10 Hz / ± 250°	-	-	-	± 5%	0.01	x		x	x
	NHTSA	IR	-	2 Hz / ± 250° s	-	-	-	± 5%	0.01				
Ignition cycle, crash	VERONICA	R	-	NA / 0-60000 s	-	-	-	± 1 cycle	1 cycle				
	AHEAD	R	-	NA / 0-60000 s	-	-	-	± 1 cycle	1 cycle				x
	NHTSA	R	-	NA / 0-60000 s	-	-	-	± 1 cycle	1 cycle				
Ignition cycle, download	VERONICA	R	-	-	-	-	NA / 0-60000 s	± 1 cycle	1 cycle				
	AHEAD	R	-	-	-	-	NA / 0-60000 s	± 1 cycle	1 cycle				x
	NHTSA	R	-	-	-	-	NA / 0-60000 s	± 1 cycle	1 cycle				
Safety belt status, driver	VERONICA	NR	-	NA / OnOff s	-	-	-	NA	On or Off				
	AHEAD	R	-	NA / OnOff s	-	-	-	NA	On or Off	x		x	x
	NHTSA	R	-	NA / OnOff s	-	-	-	NA	On or Off				
Safety belt status, front passenger	VERONICA	IE	-	NA / OnOff s	-	-	-	NA	On or Off				
	AHEAD	R	-	NA / OnOff s	-	-	-	NA	On or Off	x			x
	NHTSA	IR	-	NA / OnOff s	-	-	-	NA	On or Off				
Safety belt status, rear passengers	VERONICA	NR	-	NA / OnOff s	-	-	-	NA	On or Off				
	AHEAD	R	-	NA / OnOff s	-	-	-	NA	On or Off	x			x
	NHTSA	NR	-	-	-	-	-	-	-				
Frontal air bag warning lamp, on, off	VERONICA	R	-	NA / OnOff s	-	-	-	NA	On or Off				
	AHEAD	R	-	NA / OnOff s	-	-	-	NA	On or Off	x			x
	NHTSA	R	-	NA / OnOff s	-	-	-	NA	On or Off				
Frontal air bag suppression switch status, front passenger	VERONICA	IR	-	NA / OnOffAut s	-	-	-	NA	On, Off or Auto				
	AHEAD	R	-	NA / OnOffAut s	-	-	-	NA	On, Off or Auto	x			x
	NHTSA	IR	-	NA / OnOffAut s	-	-	-	NA	On, Off or Auto				
Frontal air bag deployment, time to deploy/first stage, driver	VERONICA	R	-	-	NA / 0-250 ms	-	-	± 2 ms	1 ms				
	AHEAD	R	-	-	NA / 0-250 ms	-	-	± 2 ms	1 ms				x
	NHTSA	R	-	-	NA / 0-250 ms	-	-	± 2 ms	1 ms				
Frontal air bag deployment, time to deploy/first stage, front passenger	VERONICA	R	-	-	NA / 0-250 ms	-	-	± 2 ms	1 ms				
	AHEAD	R	-	-	NA / 0-250 ms	-	-	± 2 ms	1 ms				x
	NHTSA	R	-	-	NA / 0-250 ms	-	-	± 2 ms	1 ms				









### 11.3 Anhang III – Veränderungen im Motorsteuergerät des BMW M4 (Kapitel 5.1.1)

Identifizier/Label	Beschreibung	Funktionsumfang Oberbegriff
AKRGCCATM	Kennfeld für Abgasklappensteuerung in Abh. von gangst und nmot (DKG oder AT Getriebe), bei geschlossenem CabrioVerdeck und aktivierten Sporttaster	Abgasklappensteuerung
AKRGCCATM_VAR1	Kennfeld für Abgasklappensteuerung in Abh. von gangst und nmot (DKG oder AT Getriebe), bei geschlossenem CabrioVerdeck und aktivierten Sporttaster	Abgasklappensteuerung
AKRGCCATM_VAR2	Kennfeld für Abgasklappensteuerung in Abh. von gangst und nmot (DKG oder AT Getriebe), bei geschlossenem CabrioVerdeck und aktivierten Sporttaster	Abgasklappensteuerung
AKRGCCATM_VAR3	Kennfeld für Abgasklappensteuerung in Abh. von gangst und nmot (DKG oder AT Getriebe), bei geschlossenem CabrioVerdeck und aktivierten Sporttaster	Abgasklappensteuerung
AKRGCCM	Kennfeld für Abgasklappensteuerung in Abh. von gangst und nmot, bei geschlossenem CabrioVerdeck bei aktivierten Sporttaster	Abgasklappensteuerung
AKRGCCM_VAR1	Kennfeld für Abgasklappensteuerung in Abh. von gangst und nmot, bei geschlossenem CabrioVerdeck bei aktivierten Sporttaster	Abgasklappensteuerung
AKRGCCM_VAR2	Kennfeld für Abgasklappensteuerung in Abh. von gangst und nmot, bei geschlossenem CabrioVerdeck bei aktivierten Sporttaster	Abgasklappensteuerung
AKRGCCM_VAR3	Kennfeld für Abgasklappensteuerung in Abh. von gangst und nmot, bei geschlossenem CabrioVerdeck bei aktivierten Sporttaster	Abgasklappensteuerung
AKRGCOATM	Kennfeld für Abgasklappensteuerung in Abh. von gangst und nmot (DKG oder AT Getriebe), bei offenem CabrioVerdeck und aktivierten Sporttaster und aktivierten Sporttaster	Abgasklappensteuerung
AKRGCOATM_VAR1	Kennfeld für Abgasklappensteuerung in Abh. von gangst und nmot (DKG oder AT Getriebe), bei offenem CabrioVerdeck und aktivierten Sporttaster und aktivierten Sporttaster	Abgasklappensteuerung
AKRGRCOM	Kennfeld für Abgasklappensteuerung in Abh. von gangst und nmot, bei offenem CabrioVerdeck und aktivierten Sporttaster	Abgasklappensteuerung
AKRGRCOM_VAR1	Kennfeld für Abgasklappensteuerung in Abh. von gangst und nmot, bei offenem CabrioVerdeck und aktivierten Sporttaster	Abgasklappensteuerung
BMWiscord_cw_NoiseCtl_C	Codewort Noise Control	Geräuschverhalten
CW_ATLST_SOUND	Konfiguration Wastegate-Öffnen aus Akustikgründen	Geräuschverhalten
CW_MDDMK_OFF	Codewort Deaktivierung MD-Eingriff	Momentenbegrenzung
CW_RF	Codewort Auswahl Maxbegrenzung Rf_soll	Maximalbegrenzung Füllung
CW_SOUND	Konfiguration Schubblubbern	Geräuschverhalten
DEPVD	Delta Ersatzwert Druck vor Drosselklappe	Laststeuerung
DFC_DisblMsk2.DFC_CorClassPwrErr_C	Deaktivierung Fehlerspeichereinträge Leistungsklasse	Deaktivierung Fehlerspeichereinträge Leistungsklasse
DFC_DisblMsk2.DFC_EMShpl_C	Deaktivierung Fehlerspeichereinträge Manipulationsschutz: Programm oder Datenmanipulation erkannt	Deaktivierung Fehlerspeichereinträge Manipulationsschutz: Programm oder Datenmanipulation erkannt
DFC_DisblMsk2.DFC_MDMOTmax_C	Deaktivierung Fehlerspeichereinträge Manipulationsschutz: Motorleistung zu hoch	Deaktivierung Fehlerspeichereinträge Manipulationsschutz: Motorleistung zu hoch
DFC_DisblMsk2.DFC_TWCDPrCatB1_C	Deaktivierung Fehlerspeichereinträge Katalysator Diagnose	Deaktivierung Fehlerspeichereinträge Katalysator Diagnose
DFC_DisblMsk2.DFC_TWCDPrCatB2_C	Deaktivierung Fehlerspeichereinträge Katalysator Diagnose	Deaktivierung Fehlerspeichereinträge Katalysator Diagnose
DPTVMDM	maximale untere Toleranz des Drucks vor DK	Ladedrucksensor
DPTVDMX	maximale obere Toleranz des Drucks vor DK	Ladedrucksensor
K_ATLERR_UBMIN	Ub Min-Schwelle für ATL Error	Ladedruckdiagnose
K_BS_MN	Lambda-Minimalwert fuer Bauteilschutz	Lambda-Begrenzung
K_DWGRD_SOUND	Faktor zum schnellen Rammen ins Schubabschalten bei Anforderung Schubblubbern	Geräuschverhalten
K_EDA_MD_ANZ_BS_SCAL_CODE0	Basisskaliierung pro Bereich in der Anzeige	Leistungs- und Drehmomentanzeige
K_EDA_MD_ANZ_BS_SCAL_CODE1	Basisskaliierung pro Bereich in der Anzeige	Leistungs- und Drehmomentanzeige
K_EDA_MD_ANZ_BS_SCAL_CODE2	Basisskaliierung pro Bereich in der Anzeige	Leistungs- und Drehmomentanzeige
K_EDA_MD_ANZ_BS_SCAL_CODE3	Basisskaliierung pro Bereich in der Anzeige	Leistungs- und Drehmomentanzeige
K_EDA_MD_ANZ_BS_SCAL_CODE4	Basisskaliierung pro Bereich in der Anzeige	Leistungs- und Drehmomentanzeige
K_EDA_P_ANZ_SPORT_BS_SCAL_CODE0	Basisskaliierung pro Bereich in der Anzeige	Leistungs- und Drehmomentanzeige
K_EDA_P_ANZ_SPORT_BS_SCAL_CODE1	Basisskaliierung pro Bereich in der Anzeige	Leistungs- und Drehmomentanzeige
K_EDA_P_ANZ_SPORT_BS_SCAL_CODE2	Basisskaliierung pro Bereich in der Anzeige	Leistungs- und Drehmomentanzeige
K_EDA_P_ANZ_SPORT_BS_SCAL_CODE3	Basisskaliierung pro Bereich in der Anzeige	Leistungs- und Drehmomentanzeige
K_ES_LA_MN	Minimalebegrenzung Lambda-Sollwert	Lambda-Regelung
K_MS_SOUND_AKT	maximale Abgasmassenstrom zur Aktivierung von Wastegate-Öffnen aus Akustikgründen	Geräuschverhalten
K_NKW_SOUND_AKT	maximale Drehzahl zur Aktivierung von Wastegate-Öffnen aus Akustikgründen	Geräuschverhalten
K_NKW_SOUND_MN	Min. Motordrehzahl, ab der Schubblubbern zugelassen wird	Geräuschverhalten
K_NKW_SOUND_MX	Max. Motordrehzahl, bis der Schubblubbern zugelassen wird	Geräuschverhalten
K_PLD_SOLL_MAX	Maximaler Solladedruck wegen Diagnose Ladedrucksensor	Maximalbegrenzung Ladedruck
K_PLDDUESP_MX	Max. Regeldifferenz f. Aktivierung der Überspülphase	Scavenging Freigabe
K_RF_MAX	Konstante maximales Rf	Maximalbegrenzung Füllung
K_RFMNOFS_SA	Offset auf Rf_min, unterhalb dem Schubabschaltung zugelassen wird	Fahrverhalten
K_T_NK_SOUND_MX	Max. Temperatur nach Kat, unterhalb der Schubblubbern zugelassen wird	Geräuschverhalten
K_T_VL_SOUND_MX	Max. Abgastemperatur vor Lader Bank 1 und 2, unterhalb der Schubblubbern zugelassen wird	Geräuschverhalten
K_TD_UESA_MAX	Max. Dauer des VM-Zustands Übergang ins Schubabschalten	Fahrverhalten
K_UESA_ETAZLAUS_MX	Ausblendschwelle, bei der ohne UESA direkt in SA gewechselt wird	Fahrverhalten
K_V_SOUND_HS_MX	Geschwindigkeitsgrenze für B_sound beim HS ohne B_sport	Geräuschverhalten
K_V_SOUND_HS_SPORT_MX	Geschwindigkeitsgrenze für B_sound beim HS mit B_spor	Geräuschverhalten
K_V_SOUND_MX	Max. Fzg.geschw.lim.it, bis der Schubblubbern zugelassen wird	Geräuschverhalten
KF_ASPR_NORM_WARM_LAST_PF1	Kennfeld optimale Einlassspreizung warm ungedrosselt	Laststeuerung
KF_ATL_PVERD	Verdichterkennfeld mit erforderlicher Verdichter- / Turbinenleistung	Ladedruck
KF_ATLRPID_MN	Regelgröße untere Schwelle	Ladedruckdiagnose
KF_ATLRPID_MX	Regelgröße obere Schwelle	Ladedruckdiagnose
KF_ATLVSTPDYN_XE	Offset auf Vorsteuerung bei Solladedruckdynamik	Ladedruck
KF_BSLGF	Lambda Fettauflgrenze für Bauteilschutz-Füllungseingriff	Lambda-Begrenzung
KF_DKST	Kennfeld Drosselklappensollwinkel	Drosselklappe Start
KF_DPLDSOLL_SPORT	Offset auf den Soll-Ladedruck im Sportmodus	Sportvorspannung
KF_DRFV_SPUEL	maximaler, nichtlinearer Anteil an Rfv_i (Drf_spuel + Drf_uk)	Laststeuerung
KF_DZVMIN_NORMAL_SOT	Zuendwinkelingriff fuer Soundtuning	Geräuschverhalten
KF_DZVMIN_SPORT_SOT	Zuendwinkelingriff fuer Soundtuning bei B_sport	Geräuschverhalten
KF_EDA_ANZ_SPORT_MDK_IST	Anpassung des Moments für die Performanceanzeige	Leistungs- und Drehmomentanzeige
KF_ESPR_NORM_WARM_LAST_PF1	Kennfeld optimale Einlassspreizung warm ungedrosselt	Laststeuerung
KF_F_MDMX_TANS	Faktor Max. Füllung	Maximalbegrenzung
KF_F_SPORT	Faktor Momentengradient bei Sportschalter	Fahrverhalten
KF_F_SPORT_PLUS	Faktor Momentengradient bei Sportschalter Plus	Fahrverhalten
KF_FATLR_I	Verstärkung Regeldifferenz - I Anteil	Ladedruck
KF_FK_FTRANSVL	Laststeuerung/Ladedruck	Laststeuerung/Ladedruck
KF_FMS_DKPSRPL_MX	Obere Massenstromquotient für Diagnose Massenstrom im Saugrohr Msev_diag versus Msdk_diag	Massenstromdiagnose
KF_FPLD_MAX	Begrenzung des Druckverhältnisses über Verdichter zur Vermeidung von Lader-Überdrehzahl und zu hohen Temperaturen nach Verdichter	Ladedruckbegrenzung
KF_FRKKORR_1	Kennfeld Vorsteuerungskorrektur Bank 1	Gemischkorrektur
KF_FTRANSVL	Laststeuerung/Ladedruck	Laststeuerung/Ladedruck
KF_GANGSOLLFREIG_SPORT	Kennfeld zur Freigabe präzierte Gang in Sport Mode	Fahrverhalten
KF_HUBESTM	Sollwert Einlassventilhub im Start (Abh. von Tmot_start)	Starthub
KF_KHNST_BA_BAS	Betriebsartenwunsch Temperierung Katalysator NST	Temperierung Katalysator
KF_KHNST_NKW_LL_HOMDOE	Leerlaufdrehzahlvorgabe fuer Temperierung Katalysator HOM, DOE ausgekuppelt	Temperierung Katalysator
KF_KHNST_NKW_LL_HOMDOE_DRV	Leerlaufdrehzahlvorgabe fuer Temperierung Katalysator HOM, DOE im Vorwärtsgang	Temperierung Katalysator
KF_KHNST_NKW_LL_HOMEE_DRV	Leerlaufdrehzahlvorgabe fuer Temperierung Katalysator HOM, EE im Vorwärtsgang	Temperierung Katalysator
KF_LA_SK	Basislambda im Homogenen bei Superklopfen	Lambdavorgabe bei Superklopfen
KF_LABAS_1	Basislambda im Homogenen Bank 1	Lambda-Regelung
KF_LABAS_2	Basislambda im Homogenen Bank 2	Lambda-Regelung
KF_LAMIN_H	Lam dabrenngrenze fett	Lambda-Regelung
KF_MD_RES_NST_KEY	Momentenreserve nach Start bei Keystart	Motorstart
KF_MDIOP_1	optimales Moment bei LA 1	Momentenstruktur
KF_MDIOP_2	optimales Moment bei LA 1	Momentenstruktur
KF_MDKMAX_GANG_MOD1	maximal zulässiges Kupplungsmoment gangabhängig MOD1	Momentenbegrenzung
KF_MDKMAX_GANG_MOD2	maximal zulässiges Kupplungsmoment gangabhängig MOD2	Momentenbegrenzung
KF_MDR_ABV_AT	rel gewünschtes Moment am Hinterrad (AT)	Fahrverhalten
KF_PATLR_D	D-Anteil des leistungs-basierten Ladedruckreglers	Ladedruckregelung
KF_PDFF_ATLR_P	Korrektur Druckdifferenz f. P-Anteil des leistungs-basierten Ladedruckregler	Ladedruckregelung

KF_PEDAL_0	Pedalprogression Soft	Fahrverhalten
KF_PEDAL_0_ANF	Anfahr-Pedalprogression Soft	Fahrverhalten
KF_PEDAL_1	Pedalprogression Sport	Fahrverhalten
KF_PEDAL_1_ANF	Anfahr-Pedalprogression Sport	Fahrverhalten
KF_PEDAL_2	Pedalprogression Spezial	Fahrverhalten
KF_PEDAL_2_ANF	Anfahr-Pedalprogression Spezial	Fahrverhalten
KF_PSPLD_DYN	Soll-Druckverh. im Turbobetrieb	Laststeuerung
KF_PSPLD_ECO	Soll-Druckverh. im Normalbetrieb	Laststeuerung
KF_PSPN KOR	Druckkorrektur für Umrechnung Drfnorm_spuel nach Drfnorm_spuel	Laststeuerung
KF_RAMP_MDKMIN_COMF	Temperaturabhängiger Gradient der Ueberblendung Mj_st auf mkd_min_vramp_tmp	Start
KF_RFMATL_KR		Maximalbegrenzung Füllung
KF_ST_RKBAS_VVT	Kennfeld Basis-Rk Menge VVT Betrieb	Startkraftstoffmasse
KF_ZW_PF1	Grundzündwinkel Pfad 1	Zündwinkelvorgabe
KF_ZW_PF2	Grundzündwinkel Pfad 2	Zündwinkelvorgabe
KF_ZWMIN_KSOT	Zwmin für Soundtuning kalt	Geräuschverhalten
KF_ZWMIN_WSOT	Zwmin für Soundtuning warm	Geräuschverhalten
KFRKM_UM	Kennfeld optimales Motormoment in der Funktionsüberwachung	Sicherheitskonzept
KFSKMX0	Schwelle für Superklopfererkennung , Zylinder 0	Klopfererkennung
KFSKMX1	Schwelle für Superklopfererkennung , Zylinder 1	Klopfererkennung
KFSKMX2	Schwelle für Superklopfererkennung , Zylinder 2	Klopfererkennung
KFSKMX3	Schwelle für Superklopfererkennung , Zylinder 3	Klopfererkennung
KFSKMX4	Schwelle für Superklopfererkennung , Zylinder 4	Schwelle für Superklopfererkennung , Zylinder 4
KFSKMX5	Schwelle für Superklopfererkennung , Zylinder 5	Klopfererkennung
KL_ATLR_MX	Maximalbegrenzung für Erhöhung des ATL-Reglerausgang relativ zur Vorsteuerung	Ladedruckregelung
KL_ATLRI_MX	Max. Limit I Anteil	Ladedruckregelung
KL_ATLVSTDYN_T	Haltezeit Eingriff DT1-Glied Sollladedruckdynamik (Dauer D-Anteil)	Ladedruckregelung
KL_ATLVSTDYN_T1	T1-Zeit Eingriff DT1-Glied Sollladedruckdynamik	Ladedruckregelung
KL_DKVL	Vollast-Kennlinie fuer Drosselklappensollwinkel	Laststeuerung
KL_EGS_SOUND	Erlauben des Schubblubbers abhängig vom St_egsprog_kor	Geräuschverhalten
KL_F_MDMX_TMOT	Faktor Max. Fuellung	Maximalbegrenzung Füllung
KL_FGRPLD_SPORT	Grundladedruck bei Vorspannung über das Sport-Kennfeld	Ladedruckregelung
KL_FK_MSSOLATL	Filterkonstante für korr. Sollmassenstrom	Ladedruckregelung
KL_FK_PLDDIFF	Filterkonstante für Ladedruckabweichung	Ladedruckregelung
KL_FK_PLDSVLD	Filterkonstante für Sollruck-Verhältnis	Ladedruckregelung
KL_FPATLR_D	Korrekturfaktor für D-Anteil des leistungs-basierten Ladedruckreglers	Ladedruckdiagnose
KL_FPLDSVLD_MIN_DIS	Minimalgrenze des Soll-Aufladungsfaktors für Abbruch Ladedruckregelung bei sinkender Sollruckvorgabe	Ladedruckregelung
KL_FUPSRF_ATL	Schluckgerade	Ladedruckbegrenzung
KL_HUBV	Sollwert Einlassventilhub bei B_gdvhub	Laststeuerung
KL_INVUEB_WANDLER	Inverse Wandlerüberhöhung über Schlupf (1/Mue)	Fahrverhalten
KL_KUEHLN	Faktor zur Reduzierung des Sollmoments in Abhängigkeit der Motordrehzahl	Maximalbegrenzung Füllung
KL_LAMX	max. Luftaufwand	Maximaler Luftaufwand
KL_LDRFKRA	RF Schwelle	Klopfadaption
KL_MDKMX_ATL_AT	Max. Turbo-Luftaufwand	Max. Turbo-Luftaufwand
KL_MDKMX_ATL_DKG	Max. Turbo-Luftaufwand	Fahrverhalten
KL_MDKMX_ATL_HS	Max. Turbo-Luftaufwand	Fahrverhalten
KL_MDMAX	Maximalmomentenkennlinie (Nkw_opt) Normal bei ZKA	Fahrverhalten
KL_MDMAX_AT	Maximalmomentenkennlinie (Nkw_opt) Normal bei ZKA (AT)	Fahrverhalten
KL_MDMAX_BST	Maximalmomentenkennlinie (Nkw_opt) Boost bei ZKA	Fahrverhalten
KL_MDMAX_BST_AT	Maximalmomentenkennlinie (Nkw_opt) Boost bei ZKA (AT)	Fahrverhalten
KL_MDMAX_BST_MDFW	Maximalmomentenkennlinie Boost bei ZKA in der MDFW	Fahrverhalten
KL_MDMAX_BST_MDFW_AT	Maximalmomentenkennlinie Boost bei ZKA in der MDFW (AT)	Fahrverhalten
KL_MDMAX_MDFW	Maximalmomentenkennlinie Normal bei ZKA in der MDFW	Fahrverhalten
KL_MDMAX_MDFW_AT	Maximalmomentenkennlinie Normal bei ZKA in der MDFW (AT)	Fahrverhalten
KL_PSPVDK_INTMN	Faktor auf Druck vor Drosselklappe für Begrenzung des modellierten Saugrohrdruck (Mszyl abhängig bei Ladeluftkühler nach Drosselklappe)	Laststeuerung
KL_PSPVDK_SOLMAXGD	Maximales Solldruckverhältnis über der DK; drehzahlabhängig bei LLK hinter DK	Laststeuerung
KL_RF_MAX	Kennlinie maximal zulässige Füllung über Drehzahl	Maximalbegrenzung Füllung
KL_RF_MAX_UESP	Kennlinie maximal zulässige Füllung über Drehzahl beim Überspülen	Maximalbegrenzung Füllung
KL_RFMATLNL	Begrenzung RI bei Alt-Varianten im Fehlerfall (b_atlerr_md)	Maximalbegrenzung Füllung
KL_T_IKAT_SOUND_MX	Temperaturschwelle Kat für Schubblubberfreigabe	Geräuschverhalten
KL_TD_SOUND_MX	Max. Dauer über Fzg.geschw., während der im Mormalprogramm Schubblubbern erlaubt wird.	Geräuschverhalten
KL_TD_SOUND_MX_SPORT	Max. Dauer über Fzg.geschw., während der im Sportprogramm Schubblubbern erlaubt wird.	Geräuschverhalten
KTAKR_IDiYOff_T	Verzögerung der zweiten Abgasklappe bei 2-Klappen-System	Abgasklappensteuerung
MoF_nEng_DST		Sicherheitskonzept
MoF_rAPPoS_DST		Sicherheitskonzept
MoF_rTrqInrMax_CUR	Kennlinie maximales inneres Moment in der Funktionsüberwachung	Sicherheitskonzept
MoFTrqPtd_facDrvDemTraOut0At_MAP	Kennfeld Fahrwunsch als Abtriebsmoment für Automatikgetriebe.	Sicherheitskonzept
MoFTrqPtd_facDrvDemTraOut0Mk_MAP	Kennfeld Fahrwunsch als Abtriebsmoment für Handschalter.	Sicherheitskonzept
MoFTrqPtd_facDrvDemTraOut1At_MAP	Kennfeld Fahrwunsch als Abtriebsmoment für Automatikgetriebe.	Sicherheitskonzept
MoFTrqPtd_facDrvDemTraOut1Mk_MAP	Kennfeld Fahrwunsch als Abtriebsmoment für Handschalter.	Sicherheitskonzept
MoFTrqPtd_facDrvDemTraOut2At_MAP	Kennfeld Fahrwunsch als Abtriebsmoment für Automatikgetriebe.	Sicherheitskonzept
MoFTrqPtd_facDrvDemTraOut2Mk_MAP	Kennfeld Fahrwunsch als Abtriebsmoment für Handschalter.	Sicherheitskonzept
MoFTrqPtd_tqCtthMaxAt_CUR	Maximal mögliches Moment an der Kupplung für Automatikgetriebe.	Sicherheitskonzept
MoFTrqPtd_tqCtthMaxM_CUR	Maximal mögliches Moment an der Kupplung für Handschalter.	Sicherheitskonzept
MoFTrqPtd_vVehFldDA_DST		Sicherheitskonzept
PVDEMX	Ersatzwert für maximalem Druck vor DK	Ladedruck
TVSTAKR	Verzögerungszeit für Ansteuerung Abgasklappe nach Start	Abgasklappensteuerung
VBSMX	obere Plausibilitätsschwelle für Radgeschwindigkeit	Maximalgeschwindigkeit
VMAXOVC	Vmax-Begrenzungswert, variantencodiert	Maximalgeschwindigkeit
VROHMAX	maximale erlaubte Rohgeschwindigkeit für Signal Range Check	Maximalgeschwindigkeit

11.4 Anhang IV – Logfiles Tesla Model S aus Kapitel 5.1.2 (erste und letzte Seite von 22 Seiten)

TIC [s]	Localtime	Message	Kommentar
-4479.167	2019-09-01 11:57:06	INFO DAS_autopilotState now '<invaild>' (was Disabled)	kein AP Status verfügbar
-4202.546	2019-09-01 12:07:05	INFO VAPL_doorState now DriverRear (was 7)	Fahrstufe P eingestellt
-4201.389	2019-09-01 12:07:06	INFO DAS_autopilotState now P (was '<invaild>')	AP Status Fehler
-4201.389	2019-09-01 12:07:06	INFO DAS_autopilotState now Disabled (was F fail)	AP Status Deaktiviert
-4193.287	2019-09-01 12:07:13	INFO VAPL_doorState now " (was DriverRear)	
-4190.972	2019-09-01 12:07:15	INFO VAPL_doorState now DriverFront (was 1)	
-4188.657	2019-09-01 12:07:17	INFO DAS_autopilotState now Failf (was Disabled)	AP Status Fehler
-4187.500	2019-09-01 12:07:18	INFO DAS_autopilotState now Disabled (was F fail)	AP Status Deaktiviert
-4180.556	2019-09-01 12:07:24	INFO VAPL_doorState now " (was DriverFront)	
-4164.352	2019-09-01 12:07:38	INFO VAPL_espBrakePedalState now Applied (was '<invaild>')	Bremse betätigt
-4162.037	2019-09-01 12:07:40	INFO VAPL_handsoNlevel now 0 (was '<invaild>')	
-4160.880	2019-09-01 12:07:41	INFO VAPL_passengeSeatbelt now Unlatched (was '<invaild>')	
-4160.880	2019-09-01 12:07:41	INFO VAPL_smfState now D (was P)	Fahrstufe D eingestellt
-4160.880	2019-09-01 12:07:41	INFO DBGWWR Whimig D-Start log entry. Elapsed time (secs)= 874.123 odometerValid= 23104.2 true lastodometer= 23104.2	
-4160.880	2019-09-01 12:07:41	INFO VAPL_espBrakePedalState now NotApplied (was A,plied)	Bremse nicht betätigt
-4160.880	2019-09-01 12:07:41	INFO DBGWWR Whimig TripCurrentStart log entry. Elapsed time (secs)= 0.047 odometerValid= 23104.2 true lastodometer= 23104.2	
-4160.880	2019-09-01 12:07:41	INFO VAPL_handsoNlevel now 1 (was 0)	
-4159.722	2019-09-01 12:07:42	INFO VAPL_handsoNlevel now 2 (was 1)	
-4158.555	2019-09-01 12:07:43	INFO VAPL_espBrakePedalState now Applied (was NotApplied)	Bremse betätigt
-4156.250	2019-09-01 12:07:45	INFO VAPL_espBrakePedalState now NotApplied (was A,plied)	Bremse nicht betätigt
-4155.093	2019-09-01 12:07:46	INFO VAPL_espBrakePedalState now Applied (was NotApplied)	Bremse betätigt
-4152.778	2019-09-01 12:07:48	INFO VAPL_handsoNlevel now 1 (was 2)	
-4151.620	2019-09-01 12:07:49	INFO VAPL_handsoNlevel now 2 (was 1)	
-4144.676	2019-09-01 12:07:55	INFO VAPL_espBrakePedalState now NotApplied (was A,plied)	Bremse nicht betätigt
-4143.519	2019-09-01 12:07:56	INFO VAPL_handsoNlevel now 3 (was 2)	
-4142.361	2019-09-01 12:07:56	INFO VAPL_espBrakePedalState now Applied (was NotApplied)	Bremse betätigt
-4141.204	2019-09-01 12:07:58	INFO VAPL_espBrakePedalState now NotApplied (was A,plied)	Bremse nicht betätigt
-4137.731	2019-09-01 12:07:01	INFO VAPL_handsoNlevel now 2 (was 3)	
-4127.315	2019-09-01 12:07:10	INFO VAPL_handsoNlevel now 3 (was 2)	
-4126.157	2019-09-01 12:07:11	INFO VAPL_handsoNlevel now 2 (was 3)	
-4120.370	2019-09-01 12:07:16	INFO VAPL_handsoNlevel now 3 (was 2)	
-4118.056	2019-09-01 12:07:18	INFO VAPL_handsoNlevel now 2 (was 3)	
-4116.898	2019-09-01 12:07:19	INFO VAPL_espBrakePedalState now NotApplied (was A,plied)	Bremse nicht betätigt
-4114.583	2019-09-01 12:07:21	INFO VAPL_handsoNlevel now 3 (was 2)	
-4109.954	2019-09-01 12:07:25	INFO VAPL_handsoNlevel now 0 (was 2)	
-4107.639	2019-09-01 12:07:27	INFO DBGWWR Whimig Driving log entry. Elapsed time (secs)= 45.985 odometerValid= 23104.2 true lastodometer= 23104.2	
-4106.324	2019-09-01 12:07:27	INFO VAPL_handsoNlevel now 1 (was 0)	
-4104.167	2019-09-01 12:07:29	INFO VAPL_handsoNlevel now 1 (was 1)	
-4099.537	2019-09-01 12:07:34	INFO VAPL_handsoNlevel now 0 (was 1)	
-4098.380	2019-09-01 12:07:35	INFO VAPL_handsoNlevel now 2 (was 0)	
-4087.963	2019-09-01 12:07:44	INFO DBGWWR Whimig Driving log entry. Elapsed time (secs)= 16.982 odometerValid= 23104.3 true lastodometer= 23104.2	
-4083.333	2019-09-01 12:07:48	INFO VAPL_handsoNlevel now 1 (was 2)	
-4082.176	2019-09-01 12:07:49	INFO VAPL_handsoNlevel now 1 (was 1)	
-4081.019	2019-09-01 12:07:50	INFO VAPL_handsoNlevel now 1 (was 0)	
-4078.704	2019-09-01 12:07:52	INFO DBGWWR Whimig Driving log entry. Elapsed time (secs)= 8.000 odometerValid= 23104.3 true lastodometer= 23104.3	
-4076.389	2019-09-01 12:07:54	INFO VAPL_handsoNlevel now 1 (was 2)	

TTC [s]	Localtime	Message	Kommentar
-62,500	2019-09-01 13:00:42	INFO DBGFWR Writing Driving log entry: Elapsed time (secs)= 5,001 odometer/valid= 23116,6 true lastodometer= 23116,6	
-61,343	2019-09-01 13:00:43	INFO VAPL_handsohl_evel now '2' (was '0')	
-67,870	2019-09-01 13:00:46	INFO DBGFWR Writing Driving log entry: Elapsed time (secs)= 4,002 odometer/valid= 23116,7 true lastodometer= 23116,6	
-63,241	2019-09-01 13:00:50	INFO VAPL_handsohl_evel now '1' (was '2')	
-62,003	2019-09-01 13:00:51	INFO VAPL_handsohl_evel now '2' (was '1')	
-62,083	2019-09-01 13:00:51	INFO DBGFWR Writing Driving log entry: Elapsed time (secs)= 5,005 odometer/valid= 23116,8 true lastodometer= 23116,7	
-48,611	2019-09-01 13:00:54	INFO DASHMap_speedLimit now 50' (was '100')	
-47,454	2019-09-01 13:00:55	INFO VAPL_handsohl_evel now '0' (was '2')	
-45,139	2019-09-01 13:00:57	INFO DBGFWR Writing Driving log entry: Elapsed time (secs)= 5,994 odometer/valid= 23116,8 true lastodometer= 23116,8	
-43,991	2019-09-01 13:00:58	INFO VAPL_handsohl_evel now '1' (was '0')	
-38,194	2019-09-01 13:01:03	INFO VAPL_handsohl_evel now '0' (was '1')	
-37,037	2019-09-01 13:01:04	INFO VAPL_handsohl_evel now '2' (was '0')	
-34,722	2019-09-01 13:01:06	INFO DBGFWR Writing Driving log entry: Elapsed time (secs)= 9,007 odometer/valid= 23116,9 true lastodometer= 23116,8	
-26,620	2019-09-01 13:01:13	INFO DBGFWR Writing Driving log entry: Elapsed time (secs)= 6,999 odometer/valid= 23117,1 true lastodometer= 23116,9	
-19,676	2019-09-01 13:01:19	INFO VAPL_handsohl_evel now '0' (was '2')	
-18,519	2019-09-01 13:01:20	INFO VAPL_handsohl_evel now '1' (was '0')	
-18,519	2019-09-01 13:01:20	INFO DBGFWR Writing Driving log entry: Elapsed time (secs)= 7,009 odometer/valid= 23117, true lastodometer= 23116,9	
-15,046	2019-09-01 13:01:23	INFO VAPL_handsohl_evel now '2' (was '1')	
-13,889	2019-09-01 13:01:24	INFO VAPL_handsohl_evel now '1' (was '2')	
-11,574	2019-09-01 13:01:26	INFO DBGFWR Writing Driving log entry: Elapsed time (secs)= 5,987 odometer/valid= 23117,1 true lastodometer= 23117	
-10,417	2019-09-01 13:01:27	INFO VAPL_handsohl_evel now '2' (was '1')	
-5,787	2019-09-01 13:01:31	INFO VAPL_handsohl_evel now '0' (was '2')	
-4,630	2019-09-01 13:01:32	INFO VAPL_handsohl_evel now '2' (was '0')	
-1,157	2019-09-01 13:01:35	INFO DBGFWR Writing Driving log entry: Elapsed time (secs)= 8,999 odometer/valid= 23117,1 true lastodometer= 23117,1	
0,000	2019-09-01 13:01:36	INFO VAPL_espBrakePedalState now 'Applied' (was 'NotApplied')	Bremsa betätigt
0,000	2019-09-01 13:01:36	INFO VAPL_espBrakePedalState now 'NotApplied' (was 'Applied')	Bremsa nicht betätigt
0,000	2019-09-01 13:01:36	INFO VAPL_doorState now 'TrunkFront' (was '')	Fronthaube (Frunk) offen erkannt
0,000	2019-09-01 13:01:36	INFO VAPL_handsohl_evel now '3' (was '2')	
2,315	2019-09-01 13:01:38	INFO VAPL_handsohl_evel now '1' (was '3')	
3,472	2019-09-01 13:01:39	INFO VAPL_handsohl_evel now '0' (was '1')	
10,417	2019-09-01 13:01:45	INFO VAPL_passengerSeatbelt now 'Unlatched' (was 'Latched')	
10,417	2019-09-01 13:01:45	INFO VAPL_doorState now 'DriverFrontTrunkFront' (was 'TrunkFront')	
15,046	2019-09-01 13:01:49	INFO VAPL_doorState now 'DriverFrontPassengerFrontTrunkFront' (was 'DriverFrontTrunkFront')	
16,204	2019-09-01 13:01:50	INFO VAPL_handsohl_evel now '1' (was '0')	
17,361	2019-09-01 13:01:51	INFO VAPL_handsohl_evel now '0' (was '1')	
28,935	2019-09-01 13:02:01	INFO VAPL_handsohl_evel now '1' (was '0')	
28,935	2019-09-01 13:02:01	INFO VAPL_shiftState now 'P' (was 'D')	Fahrstufe P eingestellt
28,935	2019-09-01 13:02:01	INFO DBGFWR Writing D-End log entry: Elapsed time (secs)= 26,005 odometer/valid= 23117,2 true lastodometer= 23117,1	
33,565	2019-09-01 13:02:05	INFO VAPL_handsohl_evel now '0' (was '1')	
34,722	2019-09-01 13:02:06	INFO VAPL_handsohl_evel now '2' (was '0')	
34,722	2019-09-01 13:02:06	INFO DBGFWR Writing TripCurrent-End log entry: Elapsed time (secs)= 4,938 odometer/valid= 23117,2 true lastodometer= 23117,2	
35,880	2019-09-01 13:02:07	INFO VAPL_passengerSeatbelt now '<invalid>' (was 'Unlatched')	
38,194	2019-09-01 13:02:09	INFO VAPL_espBrakePedalState now '<invalid>' (was 'NotApplied')	
39,352	2019-09-01 13:02:10	INFO VAPL_handsohl_evel now '<invalid>' (was '1')	
64,815	2019-09-01 13:02:32	INFO VAPL_shiftState now '<invalid>' (was 'P')	
396,991	2019-09-01 13:07:19	INFO VAPL_doorState now 'DriverFrontPassengerFrontRearTrunkFront' (was 'DriverFrontPassengerFrontTrunkFront')	
402,778	2019-09-01 13:07:24	INFO VAPL_doorState now 'DriverFrontPassengerFrontTrunkFront' (was 'DriverFrontPassengerFrontRearTrunkFront')	
653,935	2019-09-01 13:11:01	INFO VAPL_doorState now 'DriverFrontPassengerFrontRearTrunkFront' (was 'DriverFrontPassengerFrontTrunkFront')	
678,231	2019-09-01 13:11:22	INFO VAPL_doorState now 'DriverFrontPassengerFrontRearTrunkFront' (was 'DriverFrontPassengerFrontTrunkFront')	
700,231	2019-09-01 13:11:53	INFO VAPL_doorState now 'DriverFrontPassengerFrontPassengerRearTrunkFront' (was 'DriverFrontPassengerFrontRearTrunkFront')	
714,120	2019-09-01 13:11:53	INFO VAPL_doorState now 'DriverFrontPassengerFrontTrunkFront' (was 'DriverFrontPassengerFrontRearTrunkFront')	
740,741	2019-09-01 13:12:16	INFO VAPL_doorState now 'DriverFrontPassengerFrontPassengerRearTrunkFront' (was 'DriverFrontPassengerFrontTrunkFront')	
752,315	2019-09-01 13:12:26	INFO VAPL_doorState now 'DriverFrontPassengerFrontTrunkFront' (was 'DriverFrontPassengerFrontTrunkFront')	
2935,185	2019-09-01 13:43:52	INFO VAPL_doorState now 'DriverFrontPassengerFrontRearTrunkFront' (was 'DriverFrontPassengerFrontTrunkFront')	
2961,806	2019-09-01 13:44:15	INFO VAPL_doorState now 'DriverFrontPassengerFrontRearTrunkFront' (was 'DriverFrontPassengerFrontTrunkFront')	
2971,065	2019-09-01 13:44:23	INFO VAPL_doorState now 'DriverFrontPassengerFrontRearTrunkFront' (was 'DriverFrontPassengerFrontTrunkFront')	
2976,852	2019-09-01 13:44:28	INFO VAPL_doorState now 'DriverFrontPassengerFrontTrunkFront' (was 'DriverFrontPassengerFrontRearTrunkFront')	

## 11.5 Anhang V – erweiterte Versuchsdaten zu AEB-Versuche mit Tesla Model X aus Kapitel 5.2.1

### 11.5.1 Beispiel Excelauswertung

#### Auswertung der Daten mittels Video- und ADMA-Zeiten V3.7

Aufnahmerate 2020-03-03\_V7

60 [fps]

Zeitpunkte	Video [s]	Video [fps]	Videozeit [s]	ADMA [s]	Beschl. [m/s <sup>2</sup> ]	Geschw. [m/s]	Distanz [m]	Abstand Target [m]
Beginn	1	2	1,03	0,32			0	39,37
VUT gl. Höhe mit Passat	10	16	10,27	9,55			38,47	0,90
Stillstand nach Bremsvorgang	12	4	12,07	11,35			43,15	-3,78
Kollision	10	26	10,43	9,72		5,25	39,37	0
optische Warnung (Kombi)	10	19	10,32	9,60			38,74	0,63
akustisches Warnsignal	10	24	10,40	9,68			39,16	0,21
Start Bremsvorgang (AEB)	10	27	10,45	9,73		5,245	39,47	-0,10
Geom. Sichtbarkeit (Fahrer)	8	47	8,78	8,07			29,7	9,67
Geom. Erkennung von VUT	10	19	10,32	9,60			38,74	0,63
Max. Verzögerung				9,89		8,48		

#### Differenzen zur Berechnung (Ohne Kollision wird der Zeitpunkt Stillstand verwendet)

Gesamte Fahrt Video	11,03 [s]	43,15 [m]
Kollision - Gl. Höhe	0,17 [s]	0,9 [m]
Kollision - Stillstand	1,63 [s]	-3,78 [m]
Kollision - Start AEB	-0,01 [s]	-0,1 [m]
Kollision - Sichtbarkeit (Fahrer)	1,65 [s]	9,67 [m]
Kollision - Erkennung von VUT	0,12 [s]	0,63 [m]
Kollision - akust. Warnung	0,03 [s]	0,21 [m]
Kollision - opt. Warnung	0,12 [s]	0,63 [m]

#### Ergebnisse

delta t Bremsvorgang	1,62 [s]
mittlere Verzögerung	3,24 [m/s <sup>2</sup> ]
mittlere Verzögerung (Matlab)	3,25 [m/s <sup>2</sup> ]

Zeiten der Referenzpunkte	
Fahrdynamische Daten aus grafischer Auswertung	
Berechnete Daten aus Matlab Skript	



### 11.5.2 Beispiel Fehlerrechnung

#### Auswertung der Daten mittels Video- und ADMA-Zeiten

Aufnahmerate 2020-03-03\_V7

Fehler aus Videodaten

Abw. Geschw. aus Adma

Abw. Beschl. aus Adma

Abw. Distanz aus Adma

60 [fps]  
5 [fps]  
0,01 [m/s]  
0,001 [g]  
0,1 [m]

1)

Zeitpunkte	Video [s]		Video [fps]		Min [fps]		Max [fps]		Videozeit [s]		Min [s]		Max [s]		Delta [s]		ADMA [s]		Min [s]		Max [s]		Delta [s]	
	1	2	1	2	1	2	3	4	1,03	1,02	1,05	1,03	1,02	1,05	0,03	0,03	0,32	0,25	0,39	0,25	0,39	0,14	0,14	
Beginn	10	16	15	15	17	17	17	17	10,27	10,25	10,28	10,25	10,28	0,03	0,03	9,55	9,48	9,62	9,48	9,62	0,14	0,14		
VLT gl. Höhe mit Passat	12	4	3	3	5	5	5	5	12,07	12,05	12,08	12,05	12,08	0,03	0,03	11,35	11,35	11,36	11,35	11,36	0,01	0,01		
Sitlstand nach Bremsvorgang	10	26	25	25	27	27	27	27	10,43	10,42	10,45	10,42	10,45	0,03	0,03	9,72	9,68	9,76	9,68	9,76	0,08	0,08		
Kollision	10	19	18	18	20	20	20	20	10,32	10,30	10,33	10,30	10,33	0,03	0,03	9,60	9,53	9,67	9,53	9,67	0,14	0,14		
optische Warnung (Kombi)	10	24	23	23	25	25	25	25	10,40	10,38	10,42	10,38	10,42	0,05	0,05	9,68	9,61	9,76	9,61	9,76	0,14	0,14		
akustisches Warnsignal	10	27	27	27	27	27	27	27	10,45	10,45	10,45	10,45	10,45	0,03	0,03	9,73	9,73	9,74	9,73	9,74	0,01	0,01		
Start Bremsvorgang (ALB)	8	47	46	46	48	48	48	48	8,78	8,77	8,80	8,77	8,80	0,03	0,03	8,07	8,00	8,14	8,00	8,14	0,14	0,14		
Geom. Sichtbarkeit (Fährer)	10	19	18	18	20	20	20	20	10,32	10,30	10,33	10,30	10,33	0,03	0,03	9,60	9,53	9,67	9,53	9,67	0,14	0,14		
Geom. Erkennung von VLT	10	19	18	18	20	20	20	20	10,32	10,30	10,33	10,30	10,33	0,03	0,03	9,60	9,53	9,67	9,53	9,67	0,14	0,14		
Max. Verzögerung	10	19	18	18	20	20	20	20	10,32	10,30	10,33	10,30	10,33	0,03	0,03	9,60	9,53	9,67	9,53	9,67	0,14	0,14		

Zeitpunkte

Beginn

VLT gl. Höhe mit Passat

Sitlstand nach Bremsvorgang

Kollision

optische Warnung (Kombi)

akustisches Warnsignal

Start Bremsvorgang (ALB)

Geom. Sichtbarkeit (Fährer)

Geom. Erkennung von VLT

Max. Verzögerung

Differenzen zur Berechnung (Ohne Kollision wird der Zeitpunkt Sitlstand verwendet)

Beschl. [m/s²]	Geschw. [m/s]	Min [m/s]		Max [m/s]		Delta [m/s]		Distanz [m]		Min [m]		Max [m]		Delta [m]		Dist. Target [m]		Min [m]		Max [m]		Delta [m]	
		10	10	10	10	11	11	10	10	10	10	11	11	0,09	0,73	39,37	39,79	38,95	0,11	1,69	39,37	39,79	0,84
0	38,47	38,11	38,11	38,84	38,84	0,73	0,73	39,37	39,37	39,37	39,37	39,37	39,37	0,00	0,00	0,90	1,69	0,11	0,11	1,57	0,84	1,57	
5,25	43,15	43,15	43,15	43,15	43,15	0,00	0,00	43,15	43,15	43,15	43,15	43,15	43,15	0,00	0,00	-3,78	-3,36	-4,20	-4,20	-0,84	0,84	0,84	
5,14	39,37	38,74	38,74	39,58	39,58	0,84	0,84	39,37	38,74	39,58	38,74	39,58	39,58	0,84	0,84	0	0,42	-0,42	-0,42	0,84	0,84	0,84	
5,26	38,74	38,74	38,74	39,1	39,1	0,73	0,73	38,74	38,74	39,1	38,74	39,1	39,1	0,73	0,73	0,63	1,42	-0,16	-0,16	1,57	1,57	1,57	
5,245	39,16	38,79	38,79	39,58	39,58	0,79	0,79	39,16	38,79	39,58	38,79	39,58	39,58	0,79	0,79	0,21	1,03	-0,60	-0,60	1,53	1,53	1,53	
5,23	39,42	39,42	39,42	39,47	39,47	0,05	0,05	39,42	39,42	39,47	39,42	39,47	39,47	0,05	0,05	-0,05	0,39	-0,50	-0,50	0,89	0,89	0,89	
6,03	30,74	30,38	30,38	31,11	31,11	0,73	0,73	30,74	30,38	31,11	30,38	31,11	31,11	0,73	0,73	8,63	9,42	7,85	7,85	1,57	1,57	1,57	
8,48	38,74	38,37	38,37	39,1	39,1	0,73	0,73	38,74	38,37	39,1	38,37	39,1	39,1	0,73	0,73	0,63	1,42	-0,16	-0,16	1,57	1,57	1,57	

Gesamte Fahrt Video	Diff [s]		Max [s]		Min [s]		Delta [s]		Diff [m]		Max [m]		Min [m]		Delta [m]	
	6)	7)	6)	7)	6)	7)	6)	7)	12)	13)	12)	13)	12)	13)	12)	13)
Kollision - Gl. Höhe	11,03	11,07	11,00	11,00	0,07	0,07	43,15	43,15	0,9	1,69	0,11	1,57	0,00	0,00	0,00	0,00
Kollision - Sitlstand	0,17	0,20	0,13	0,13	0,07	0,07	0,9	1,69	0,11	1,57	0,11	1,57	0,00	0,00	0,00	0,00
Kollision - Start APB	1,63	1,67	1,60	1,60	0,07	0,07	-3,78	-3,36	-4,20	-0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84
Kollision - Start AFB	-0,01	0,00	-0,03	-0,03	0,03	0,03	-0,05	0,39	-0,50	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89	0,89
Kollision - Sichtbarkeit (Fährer)	1,65	1,68	1,62	1,62	0,07	0,07	8,63	9,42	7,85	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57
Kollision - Erkennung von VLT	0,12	0,15	0,08	0,08	0,07	0,07	0,63	1,42	-0,16	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57
Kollision - akust. Warnung	0,05	0,07	0,00	0,00	0,07	0,07	0,21	1,03	-0,60	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
Kollision - opt. Warnung	0,12	0,15	0,08	0,08	0,07	0,07	0,63	1,42	-0,16	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57	1,57

**Ergebnisse**  
delta t Bremsvorgang  
mittlere Verzögerung  
mittlere Verzögerung (Nahlab)

1,62	3,24 (4)	3,25	0,12
------	----------	------	------

0,07	0,07	0,07	0,07
------	------	------	------

= Likwerte, welche aus Matlab oder dem Video entnommen werden müssen  
= Errechnete Abweichung aus Deltawerten  
= Gemessene Abweichung aus Messdaten

11.5.3 Gesamtübersichten der Versuchsauswertung

	Versuch 2.13		Versuch 3.1		Versuch 3.6		Versuch 3.7		
Wichtige Kontrolldaten:	Messwert	Fehler	Einheit	Messwert	Fehler	Einheit	Messwert	Fehler	Einheit
Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeuges vor Bremsseingriff vom Tacho?	14		[km/h]	20		[km/h]	20		[km/h]
Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeuges vor Bremsseingriff aus ADMA?	14,00	0,09	[km/h]	18,90	0,09	[km/h]	18,54	0,07	[km/h]
Fahrgeschwindigkeit des Targets vor Bremsseingriff	5		[km/h]	5		[km/h]	5		[km/h]
1. Hat der Notbremsassistent eingegriffen?	JA			JA			JA		
wenn "Ja": Wie hoch war die mittlere Verzögerung während der Vollbremsung?*	5,12	0,12	[m/s <sup>2</sup> ]	2,53	0,21	[m/s <sup>2</sup> ]	6,83	0,08	[m/s <sup>2</sup> ]
wenn "Ja": Wie hoch war die maximale Verzögerung?*	9,21	0,00	[m/s <sup>2</sup> ]	11,35	0,00	[m/s <sup>2</sup> ]	9,03	0,00	[m/s <sup>2</sup> ]
wenn "Ja": Wie groß war der Abstand zum Target zu Zeitpunkt optischer Warnung (FCW)?*	1,37	1,77	[m]	1,78	1,34	[m]	3,2	1,62	[m]
wenn "Ja": Wie groß war der Abstand zum Target zu Zeitpunkt akustische Warnung (FCW)?*	0,96	1,83	[m]	1,52	1,29	[m]	2,52	0,81	[m]
wenn "Ja": Wie groß war der Abstand zum Target zu Zeitpunkt Beginn Vollbremsung?*	0,33	1,09	[m]	0,78	0,6	[m]	2,01	0,45	[m]
2. Kam es zum Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und Target? Wenn "NEIN": Zeitpunkt Stillstand wurde zur Berechnung verwendet.	JA			JA		NEIN			JA
wenn bei 1. "Ja": TTC bei optischer Warnung (FCW)?*	0,35	0,07	[s]	0,35	0,07	[s]	0,95	0,07	[s]
wenn bei 1. "Ja": TTC bei akustischer Warnung (FCW)?*	0,25	0,07	[s]	0,30	0,07	[s]	0,85	0,07	[s]
wenn bei 1. "Ja": TTC bei Eingriff Notbremsassistent (AEB)?*	0,09	0,03	[s]	0,16	0,03	[s]	0,75	0,03	[s]
TTC bei geometrischer Sichtbarkeit des Targets (Fahrer)?*	1,93	0,07	[s]	1,98	0,07	[s]	2,27	0,07	[s]
TTC bei geometrischer Erkennung des Targets (VUT)?*	0,35	0,07	[s]	0,35	0,07	[s]	0,95	0,07	[s]
Abstand zum Trajektorie bei geometrischer Sichtbarkeit (Fahrer)?*	9,11	1,77	[m]	10,36	1,33	[m]	13,38	0,75	[m]
Abstand zum Target bei geometrischer Erkennung (VUT)?*	1,37	1,77	[m]	1,78	1,34	[m]	3,20	0,82	[m]
wenn bei 2. "Ja": Kollisionsgeschwindigkeit	12,6	0,468	[km/h]	15,80	2,178	[km/h]	k.A.	k.A.	[km/h]
wenn bei 1. "Ja": Abstand zwischen Target und Fahrzeug nach Stillstand Fahrzeug?*(wenn bei 2. "Ja": Wert negativ)	-0,94	1,04	[m]	-2,25	0,55	[m]	0,01	0,2	[m]
gesamte Bremsdauer Vollbremsung	0,76	0,1	[s]	2,09	0,1	[s]	0,75	0,0333	[s]
gesamter Bremsweg Vollbremsung	1,27	2,13	[m]	3,03	1,15	[m]	2	0,65	[m]

	Versuch 3.8			Versuch 3.9			Versuch 3.14			Versuch 3.15		
Wichtige Kontrolldaten:	Messwert	Fehler	Einheit	Messwert	Fehler	Einheit	Messwert	Fehler	Einheit	Messwert	Fehler	Einheit
Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeuges vor Bremsengriff vom Tacho?	20		[km/h]	20		[km/h]	25		[km/h]	25		[km/h]
Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeuges vor Bremsengriff aus ADMA?	18,792	0,11	[km/h]	18,774	0,09	[km/h]	24,606	0,09	[km/h]	23,706	0,07	[km/h]
Fahrgeschwindigkeit des Targets vor Bremsengriff?	5		[km/h]	5		[km/h]	5		[km/h]	5		[km/h]
1. Hat der Notbremsassistent eingegriffen?	J/A			J/A			J/A			J/A		
wenn "Ja": Wie hoch war die mittlere Verzögerung während der Vollbremsung?*	1,61	0,32	[m/s <sup>2</sup> ]	2,97	0,18	[m/s <sup>2</sup> ]	7,59	0,09	[m/s <sup>2</sup> ]	2,37	0,28	[m/s <sup>2</sup> ]
wenn "Ja": Wie hoch war die maximale Verzögerung?*	6,76	0,00	[m/s <sup>2</sup> ]	14,23	0,00	[m/s <sup>2</sup> ]	10,25	0,00	[m/s <sup>2</sup> ]	7,65	0,00	[m/s <sup>2</sup> ]
wenn "Ja": Wie groß war der Abstand zum Target zu Zeitpunkt optischer Warnung (FCW)?*	k.A.	k.A.	[m]	2,08	1,28	[m]	4,8	1,67	[m]	-0,78	1,63	[m]
wenn "Ja": Wie groß war der Abstand zum Target zu Zeitpunkt akustische Warnung (FCW)?*	k.A.	k.A.	[m]	1,55	1,28	[m]	3,98	0,95	[m]	-1,46	1,62	[m]
wenn "Ja": Wie groß war der Abstand zum Target zu Zeitpunkt Beginn Vollbremsung?*	0,47	0,66	[m]	0,81	0,6	[m]	3,43	0,47	[m]	0	0,8	[m]
2. Kam es zum Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und Target? Wenn "NEIN": Zeitpunkt Stillstand wurde zur Berechnung verwendet.	J/A			J/A			NEIN			J/A		
wenn bei 1. "Ja": TTC bei optischer Warnung (FCW)?*	k.A.	k.A.	[s]	0,40	0,07	[s]	1,10	0,07	[s]	-0,12	0,07	[s]
wenn bei 1. "Ja": TTC bei akustischer Warnung (FCW)?*	k.A.	k.A.	[s]	0,30	0,07	[s]	0,98	0,07	[s]	-0,23	0,07	[s]
wenn bei 1. "Ja": TTC bei Eingriff Notbremsassistent (AEB)?*	0,09	0,03	[s]	0,16	0,03	[s]	0,9	0,03	[s]	0	0,03	[s]
TTC bei geometrischer Sichtbarkeit des Targets (Fahrer)?*	1,90	0,07	[s]	2,05	0,07	[s]	2,28	0,07	[s]	1,60	0,07	[s]
TTC bei geometrischer Erkennung des Targets (VUT)?*	0,57	0,07	[s]	0,60	0,07	[s]	1,10	0,07	[s]	0,22	0,07	[s]
Abstand zum Trajektorie bei geometrischer Sichtbarkeit (Fahrer)?*	10,00	1,34	[m]	10,73	1,26	[m]	15,96	0,95	[m]	11,43	1,66	[m]
Abstand zum Target bei geometrischer Erkennung (VUT)?*	2,95	1,28	[m]	3,13	1,28	[m]	4,80	0,95	[m]	1,46	1,72	[m]
wenn bei 2. "Ja": Kollisionsgeschwindigkeit	18,41	0,414	[km/h]	15,44	2,286	[km/h]	k.A.	k.A.	[km/h]	23,706	0,324	[km/h]
wenn bei 1. "Ja": Abstand zwischen Target und Fahrzeug nach Stillstand Fahrzeug?*(wenn bei 2. "Ja": Wert negativ)	-5,84	0,55	[m]	-1,5	0,54	[m]	0,24	0,2	[m]	-8,08	0,73	[m]
gesamte Bremsdauer Vollbremsung	3,16	0,1	[s]	1,76	0,1	[s]	0,9	0,03	[s]	2,75	0,1	[s]
gesamter Bremsweg Vollbremsung	6,31	1,21	[m]	2,31	1,14	[m]	3,19	0,67	[m]	8,08	1,53	[m]



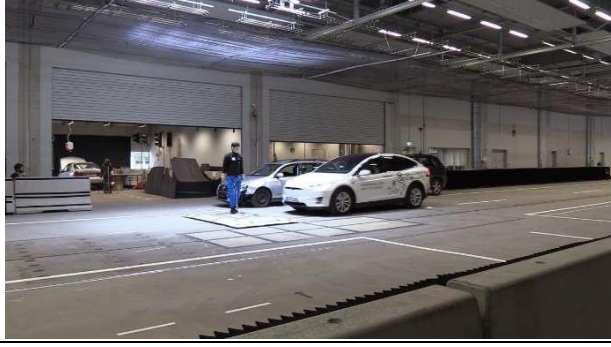
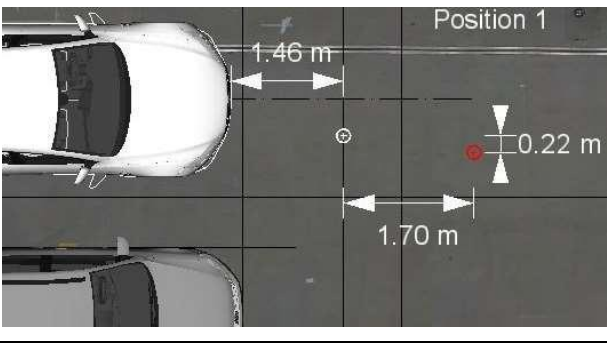


Wichtige Kontrolldaten:	Versuch 4.2		Versuch 4.4		Versuch 4.5		Versuch 4.7		Versuch 4.8	
	Messwert	Fehler	Messwert	Fehler	Messwert	Fehler	Messwert	Fehler	Messwert	Fehler
Fährtschwindigkeit des Fahrzeuges vor Bremsengriff vom Tacho?	29	[km/h]	30	[km/h]	25	[km/h]	30	[km/h]	32	[km/h]
Fährtschwindigkeit des Fahrzeuges vor Bremsengriff aus ADNA?	27,738	0,09 [km/h]	29,07	0,09 [km/h]	23,796	0,09 [km/h]	29,124	0,07 [km/h]	31,752	0,072 [km/h]
Fährtschwindigkeit des Targets vor Bremsengriff?	0	[km/h]	0	[km/h]	0	[km/h]	0	[km/h]	0	[km/h]
I. Hat der Notbremsassistent eingegriffen?	JA		JA		JA		JA		JA	
wenn "ja": Wie hoch war die mittlere Verzögerung während der Vollbremsung?	7,47	0,10 [m/s <sup>2</sup> ]	7,66	0,11 [m/s <sup>2</sup> ]	7,43	0,09 [m/s <sup>2</sup> ]	7,94	0,10 [m/s <sup>2</sup> ]	7,67	0,12 [m/s <sup>2</sup> ]
wenn "ja": Wie hoch war die maximale Verzögerung?	9,65	0,00 [m/s <sup>2</sup> ]	9,95	0,00 [m/s <sup>2</sup> ]	10,30	0,00 [m/s <sup>2</sup> ]	10,24	0,00 [m/s <sup>2</sup> ]	9,85	0,00 [m/s <sup>2</sup> ]
Zeitpunkt optischer Warnung (FCW)?	15,738	0,84 [m]	20,238	0,87 [m]	17,148	0,8 [m]	18,515	0,86 [m]	18,231	0,89 [m]
wenn "ja": Wie groß war der Abstand zum Target zu Zeitpunkt optischer Warnung (FCW)?										
Zeitpunkt akustischer Warnung (FCV)?	15,088	0,85 [m]	19,228	0,87 [m]	16,408	0,79 [m]	17,695	0,85 [m]	17,551	0,81 [m]
wenn "ja": Wie groß war der Abstand zum Target zu Zeitpunkt Beginn Vollbremsung?	5,47	0,28 [m]	5,78	0,28 [m]	4,228	0,26 [m]	5,515	0,28 [m]	6,471	0,30 [m]
2. Kam es zum Zusammenstoß zwischen Fahrzeug und Target?	NEIN		NEIN		NEIN		NEIN		NEIN	
Wenn "NEIN", wurde bei TTC-Bestimmung der Stillstand zur Berechnung verwendet.										
wenn bei 1. "ja": TTC bei optischer Warnung (FCW)?	2,33	0,07 [s]	2,80	0,07 [s]	2,73	0,07 [s]	2,60	0,07 [s]	2,50	0,07 [s]
wenn bei 1. "ja": TTC bei akustischer Warnung (FCV)?	2,25	0,07 [s]	2,68	0,07 [s]	2,63	0,07 [s]	2,50	0,07 [s]	2,42	0,07 [s]
wenn bei 1. "ja": TTC bei Eingriff Notbremsassistent (AEB)?	1,03	0,03 [s]	1,05	0,03 [s]	0,89	0,03 [s]	1,01	0,03 [s]	1,15	0,03 [s]
TTC bei geometrischer Sichtbarkeit des Targets (Fahrer)?	9,93	0,07 [s]	9,63	0,07 [s]	6,10	0,07 [s]	4,33	0,07 [s]	2,07	0,07 [s]
TTC bei geometrischer Erkennung des Targets (VUT)?	9,93	0,07 [s]	9,63	0,07 [s]	10,10	0,07 [s]	9,58	0,07 [s]	4,78	0,07 [s]
Abstand zum Target bei geometrischer Sichtbarkeit (Fahrer)?	54,07	0,20 [m]	54,29	0,20 [m]	43,99	0,76 [m]	32,99	0,87 [m]	14,55	0,83 [m]
Abstand zum Target bei geometrischer Erkennung (VUT)?	54,07	0,20 [m]	54,29	0,20 [m]	52,43	0,20 [m]	55,06	0,20 [m]	36,07	0,78 [m]
wenn bei 2. "ja": Kollisionsgeschwindigkeit	keine Kollision	[km/h]	keine Kollision	[km/h]	keine Kollision	[km/h]	keine Kollision	[km/h]	keine Kollision	[km/h]
wenn bei 1. "ja": Abstand zwischen Target und Fahrzeug nach Stillstand Fahrzeug? (wenn bei 2. "ja": Wert negativ)	1,478	0 [m]	1,448	0 [m]	1,068	0 [m]	1,235	0 [m]	1,101	0 [m]
gesamte Bremsdauer Vollbremsung	1,03	0,0333 [s]	1,05	0,0333 [s]	0,89	0,0333 [s]	1,01	0,0333 [s]	1,15	0,0333 [s]
gesamter Bremsweg Vollbremsung	3,99	0,28 [m]	4,33	0,28 [m]	3,16	0,26 [m]	4,28	0,28 [m]	5,37	0,3 [m]

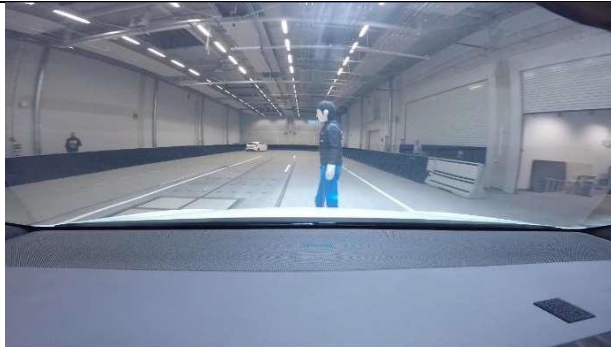

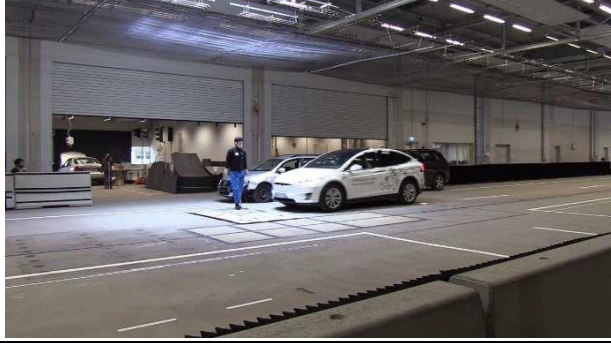
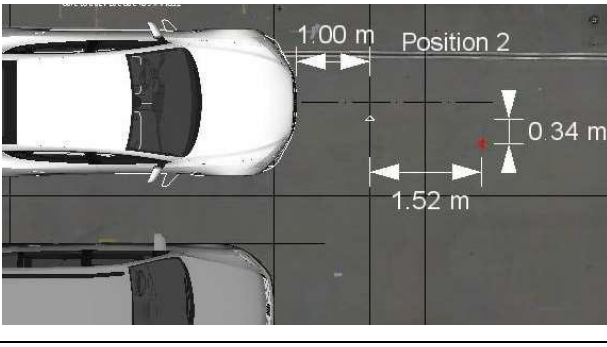
11.5.4 Vollständiger Bildabgleich am Beispiel Versuch 3.15

### Versuch 3.15

Position 1: Erstes Erscheinen des Targets im Display ohne Warnung trotz Gefahrenbereich, TTC: 0,22 s

	
	 <p style="text-align: right;">Position 1</p>

Position 2: kurzzeitiges Ende der Erkennung des Targets, TTC: 0,15 s

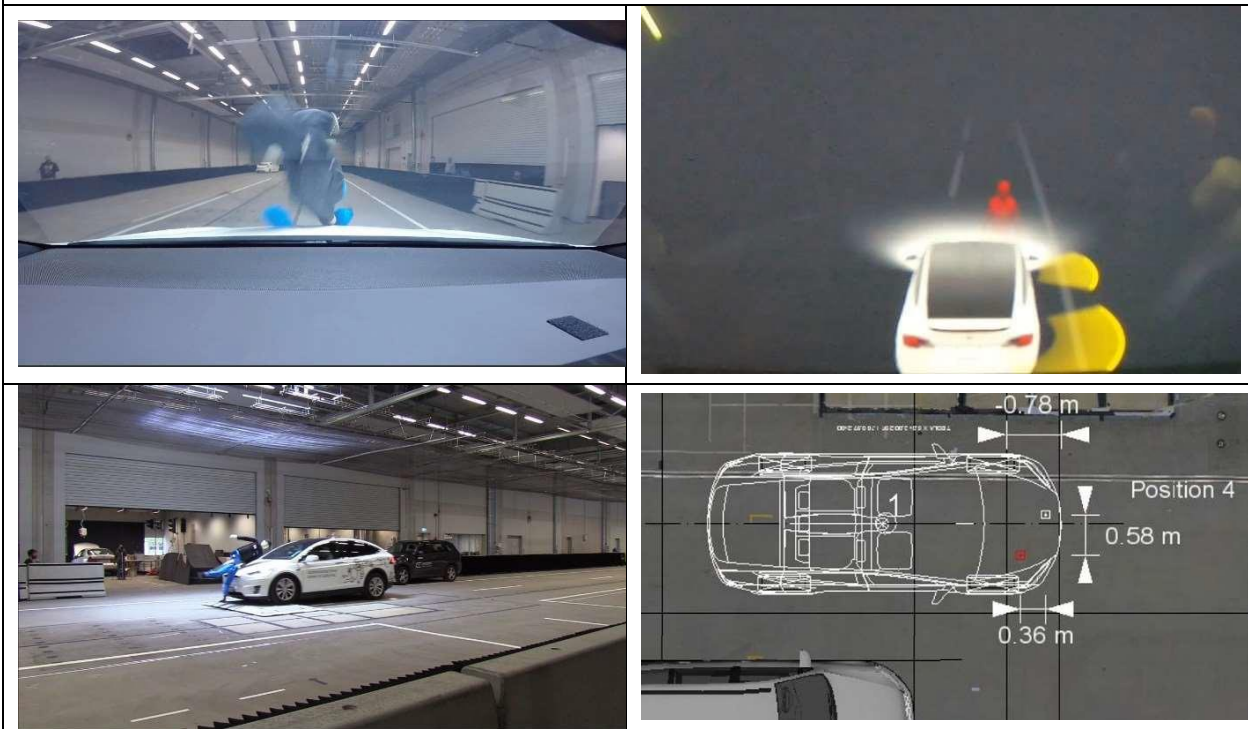
	
	 <p style="text-align: right;">Position 2</p>



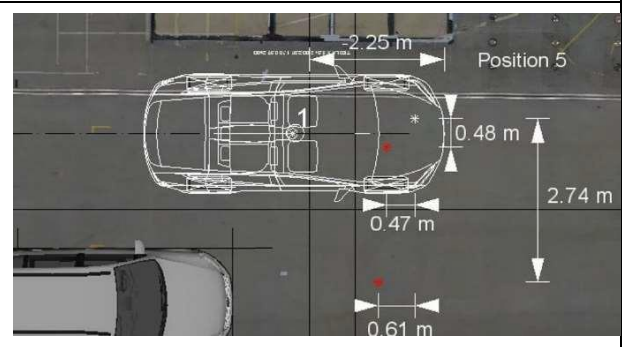
Position 3: Kollisionszeitpunkt ohne Erkennung des Targets, TTC: 0,00 s



Position 4: Wiedererkennung des Targets als Warnung, TTC: -0,12s



Position 5: Erkennung eines zweiten Targets an der Seite des VUT, TTC:  $-0,37$  s



Position 6: Erkennung der am Boden liegenden Teile durch Ultraschallsensor, TTC:  $-1,28$  s

