Ausfallsicheres und effizientes elektrisches **An**triebssystem für **Ro**botertax**i**s

Finanziert von der Europäischen Union
NextGenerationEU

Gefördert durch:
Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Individueller Schlussbericht (Teil I & II)

Verbundprojekt	AnRox – Ausfallsicheres und effizientes elektrisches Antriebssystem für Robotertaxis
Teilvorhaben	**Dynamic Risk Management zum Finden von sicheren Zonen**
Förderkennzeichen	19A21004**H**
Projektlaufzeit	01.04.2021 – 30.06.2024
Datum	29.04.2025

EDI
Engineering Data Intelligence

Autoren

Dr. Thomas Freudenmann (EDI GmbH)

Hinweis: Gesamtvorhabens-spezifische Teile wurden aus dem gemeinsamen Abschlussbericht übernommen.

Adressen und Ansprechpartner:

Firmenbezeichnung	Kürzel	Ansprechpartner	Adresse
EDI GmbH – Engineering Data Intelligence	EDI	Dr. Thomas Freudenmann freudenmann@edi.gmbh	Hermann-Weick-Weg 3 76229 Karlsruhe

Teil I - Kurzbeschreibung

Das Projekt AnRox adressierte intelligente fehleroperable Antriebssysteme für zukünftige automatisierte Fahrzeuge als Basis für sicheren Betrieb, hohe Nutzerakzeptanz sowie wirtschaftliche Geschäftsmodelle der Betreiber. Ziel war die Erforschung und Validierung innovativer ausfallsicherer Antriebssysteme an der Leitanwendung Robotertaxi, bei denen Mehraufwände durch einen erhöhten Anwender- und Betreibernutzen kompensiert werden. Erzielt wurde dies durch ein eng verkettetes Vorgehen über alle relevanten Systemebenen hinweg, ausgehend vom Systemkontext (Anwendungsfall & Fahrzeugebene) bis hin zu der betrachteten Topologie- (Interaktion Antrieb & Chassis) und Komponentenebene (Energiebordnetz, Leistungselektronik & Maschine). Weiterhin wurden Freiheitsgrade von Mehrmotorenantrieben und intelligenten Diagnosekonzepten mit KI-basierten Verfahren ausgeschöpft. Die erarbeiteten Methoden und Ergebnisse sind generell auf alle automatisierten Elektrofahrzeuge übertragbar und wurden an einer durchgängigen Validierungskette von der Simulation über Komponentenprüfstand bis zum Fahrzeugdemonstrator demonstriert und abgesichert.

Die Schwerpunkte der EDI GmbH im Vorhaben lagen in der Erweiterung des KI-basierten Dynamik Risk Management (DRM)-Algorithmus zur Evaluierung von sicheren Zonen und der Validierung des Systems. Das Teilvorhaben "*Dynamic Risk Management zum Finden von sicheren Zonen*" trägt zu den förderpolitischen Zielen bei, indem es sichere Mobilitätslösungen für die Zukunft entwickelte, insbesondere im Mischverkehr von automatisierten und konventionellen Fahrzeugen. Das Teilprojekt verfolgte einen datengetriebenen, d.h. KI-basierten Ansatz, zur Generierung von Prüfszenarien zur Absicherung von automatisierten Fahrzeugen und zur Gewährleistung der funktionalen Sicherheit (SOTIF). In der frühen Entwicklungsphase stand die Simulation des Verkehrsverhaltens mittels PTV Vissim in Kombination mit KI-basierten Lernverfahren im Vordergrund. Die KI-basierte Toolchain ermöglichte eine objektive Absicherung automatisierter Fahrfunktionen, auch in der Simulation (digitale Homologation). Diese frühe Absicherung von neuen Funktionen ist gerade auch im Kontext von dem sogenannten Software Defined Vehicle (SDV)-Entwicklungsprozess relevant. Die anwendungsorientierte Umsetzung des Projekts erlaubte eine schnelle Übertragung der Ergebnisse in die Industrie, insbesondere für die Absicherung. Die online Anwendung des Dynamic Risk Management (DRM)-Algorithmus im Fahrzeug zum Finden von sicheren Haltezonen also übergeordneter Intelligenz-Layer eines Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) bedarf noch weiterer Entwicklung bzgl. Echtzeitfähigkeit und technische Integration bis hin zur Over-the-Air-Update-Fähigkeit (OTA-Update).

Inhaltsverzeichnis (Schlussbericht: Teil II)

Inhaltsverzeichnis (Schlussbericht: Teil II) ... 3

Abbildungsverzeichnis ... 4

Tabellenverzeichnis ... 5

1. Aufgabenstellung mit Fokus auf das Teilvorhaben ... 7

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde ... 9

3. Planung und Ablauf des Vorhabens ... 11

3.1. Projektaufbau ... 12

3.2. Veränderungen gegenüber ursprünglicher Planung ... 17

4. Erzielte Ergebnisse im Teilprojekt ... 20

4.1. AP1: Identifikation von Anforderungen an Antriebs-, Fahrwerkssysteme und Energiebordnetze eines Robotertaxis ... 20

4.2. AP2: Ausfallsichere und intelligente Antriebssysteme und Energiebordnetze ... 22

4.3. AP4: Validierung ... 26

5. Zielerreichung (TRL) ... 29

6. Voraussichtliche Nutzung und Verwertung ... 32

7. Veröffentlichungen und Verbreitung der Projektergebnisse ... 34

Literaturverzeichnis ... 36

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vorgehen im Förderprojekt AnRox 7
Abbildung 2: Konzept der Interaktion zwischen Dynamic Risk Management (DRM) und dem Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) eines automatisierten Fahrzeuges ... 9
Abbildung 3: Kern des Verbundprojektes AnRox inkl. Abgrenzung zu Vorarbeiten mit Fokus auf den Antriebsstrang 10
Abbildung 4: Struktur der Arbeitspakete und Cluster 14
Abbildung 5: Grobzeitplan AnRox 14
Abbildung 6: Hauptmeilensteine im Projekt AnRox 15
Abbildung 7: Ursprünglicher Grobzeitplan AnRox 17
Abbildung 8: Hauptmeilensteine im Projekt AnRox mit ursprünglicher Zeitplanung 17
Abbildung 9: Ausschnitt der HARA- & SOTIF-Matrix 21
Abbildung 11: AnRox Konzept für KI-Toolchain inklusive Dynamic Risk Management (DRM) 22
Abbildung 12: Automatische Evaluierung der Sicherheits-Statements mittels Simulation und Safety Cushion-Algorithmus mit speziellem Fokus auf Fahrverhalten auf Autobahnen 24
Abbildung 13: Risikomodell mit Risikowert 9,80 für geringes Risko aufgrund höherer Restgeschwindigkeit mit 120 km/h (**links**) und Risikomodell mit Risikowert 24,02 für hohes Risko aufgrund geringer Restgeschwindigkeit mit 20 km/h (**rechts**) 25
Abbildung 15: Testumfänge in der Simulationsumgebung PTV Vissim mit einer 28
Abbildung 16: Systematik der Technology-Readiness-Level (TRL) 30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Hauptmeilensteine des Projekts AnRox. 16
Tabelle 2: Hauptmeilensteine des Projekts AnRox mit ursprünglicher Zeitplanung 18
Tabelle 3: Ausgangs- und Ziel-TRL der Kerninnovationen im Projekt AnRox. 29

Abkürzungsverzeichnis

ADA	Americans with Disabilities Act
ADAS	*Advanced Driver Assistance Systems*
AnRox	*Ausfallsicheres und effizientes elektrisches Antriebssystem für Robotertaxis*
ASIL	*Automotive Safety Integrity Level*
BEV	Battery Electric Vehicle (batterieelektrisches Fahrzeug)
DRM	*Dynamic Risk Management*
EBN	Energiebordnetz
HARA	*Hazard Analysis and Risk Assessment*
HV	Hochvolt
KPIs	*Key Performance Indicators*
NV	Niedervolt
ODD	*Operational Design Domain*
OTA	*Over-the-Air*
SDV	*Software Defined Vehicle*
SOTIF	*Safety of the Intended Functionality*
UX	User Experience

1. Aufgabenstellung mit Fokus auf das Teilvorhaben

Das Verbundprojekt „***Ausfallsicheres und effizientes elektrisches Antriebssystem für Robotertaxis (AnRox)***“ hatte zum Ziel die Erforschung und Validierung von ganzheitlich optimierten System- und Komponentenlösungen für ausfallsichere Antriebssysteme und Energiebordnetze für das automatisierte elektrische Fahren. Dabei sollten Mehrkosten für ausfallsichere Antriebssysteme und Energiebordnetze minimiert und/oder durch einen nachweisbaren Mehrwert für Endnutzer oder Betreiber kompensiert werden. Die im Rahmen des Projekts entwickelten Methoden, Simulationstools und Lösungen fokussierten auf den Anwendungsfall eines Robotertaxis, sind jedoch generell auf alle elektrisch angetriebenen Fahrzeuge übertragbar. Eine Übersicht über die grundsätzliche Vorgehensweise, adressierte Analyse der Anforderungen aus Betreiber und Nutzersicht sowie die technischen Themenfelder gibt Abbildung 1.

Abbildung 1: Vorgehen im Förderprojekt AnRox

Aus Anwender- und Betreibersicht ergeben sich neue Anforderungen an zukünftige (teil-)automatisierte Fahrzeuge. Diese umfassen beispielweise veränderte Fahrprofile und Komfortanforderungen. Der Transport gehbehinderter Verkehrsteilnehmer (siehe US-amerikanische ADA-Gesetzgebung) kann zu neuen Einbaubedingungen führen. Weiterhin steigen mit zunehmendem Automatisierungsgrad die Sicherheits- und Zuverlässigkeitsanforderungen an den Antriebsstrang, von der Performanceprädiktion für kurzfristig anstehende Fahrmanöver bis hin zum zuverlässigen Abschluss der Fahrmission. Daraus ergeben sich erhöhte Effizienz-, Verfügbarkeits- und Lebensdaueranforderungen an das ausfallsichere Antriebssystem und das Energiebordnetz, deren iterative Analyse und entsprechende Ableitung der belastbaren Arbeitshypothesen, unter

anderem basierend auf Nutzerbefragungen, für die Erforschung der technischen Lösungen einen wichtigen Teil des Verbundprojekts darstellte.

Hinsichtlich der technischen Umsetzung bieten elektrische Antriebssysteme gegenüber Verbrennungsmotoren neue Freiheitsgrade und Lösungsvarianten sowohl auf Komponenten- als auch Topologieebene. Mit KI-basierten Betriebs-, Fehlererkennungs- und Behandlungsstrategien sind die Beherrschung hochkomplexer Systeme und die maximale Ausbeutung von neuen Freiheitsgraden möglich. Prädiktive Diagnose-Ansätze in Verbindung mit der Beherrschung von verketteten Fehlern (Dependent Failures) sind wichtige Bausteine für ein aufwandsminimiertes und ausfallsicheres Antriebssystem. Auf Antriebs- und Energiebordenetz-Topologieebene wurden verschiedene Varianten von Ein- und Mehrmaschinensystemen betrachtet und die Wechselwirkungen zu Lenkung, Bremse und Fahrwerk berücksichtigt. Die daraus resultierenden Erkenntnisse in Form vergleichender Bewertung und identifizierten Vor- und Nachteilen flossen direkt in neue Komponentenlösungen und Diagnoseansätze zur Steigerung der Betriebssicherheit ein. Abgesichert wurden die Ergebnisse anhand einer durchgängigen Validierungskette vom Komponentenprüfstand bis zum Fahrzeugdemonstrator und User Experience (UX) Studien am Fahrsimulator und Wizard-of-Oz-Fahrzeug.

Das Ziel dieses Teilvorhabens ist die Steigerung der Funktionalen Sicherheit (SOTIF) von Fahrzeugen unter Berücksichtigung der Automotive Safety Integrity Levels (ASIL)-Level durch den Einsatz von Künstlicher Intelligenz (KI). Die KI soll eine effiziente und sichere Betriebsstrategie ermöglichen, insbesondere im Hinblick auf das optimale Verhalten im Fehlerfall, um sichere Haltezonen vorherzusagen, die in Abhängigkeit des aktuellen Fahrkontextes (Operationsbereich (engl.: Operational Design Domain (ODD), Verkehrsdichte usw.) unterscheiden. D.h. mittels KI-basierter Betreibstrategie soll das automatisierte Fahren sicherer und robuster werden.

Ein zentraler Aspekt ist die Weiterentwicklung und Implementierung des Dynamic Risk Management (DRM)-Modells, das zur Evaluierung der Verkehrssicherheit den Safety Cushion-Algorithmus nutzt, um Transparenz hinsichtlich der relevanten Anforderungen im Fehlerbetrieb zu gewährleisten. Die Interaktion zwischen DRM und den üblichen Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) von automatisierten bzw. autonomen Fahrzeugen wird in Abbildung 2 veranschaulicht zur Abbildung einer KI-basierten Betriebsstrategie.

Im Rahmen dieses Projekts arbeitet EDI mit den Koopeationspartnern zusammen, um relevante Key Performance Indicators (KPIs) zu erarbeiten, wie beispielsweise die notwendigen Geschwindigkeiten. Der Fokus liegt dabei auf Autobahn-Fahrsituationen, um die Effektivität und Sicherheit des DRM in diesen spezifischen Szenarien (ODD) zu evaluieren.

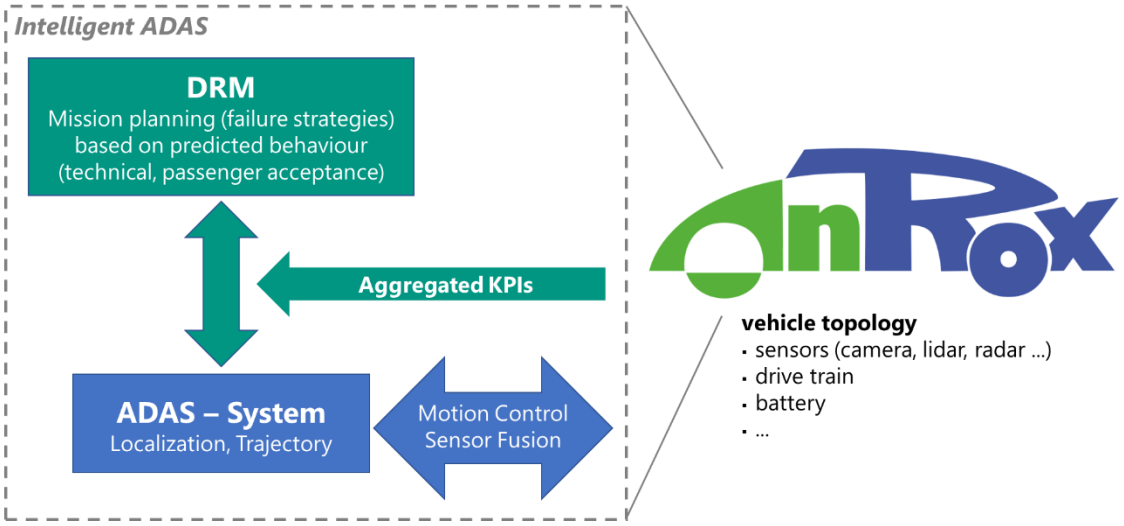


Abbildung 2: Konzept der Interaktion zwischen Dynamic Risk Management (DRM) und dem Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) eines automatisierten Fahrzeuges

Damit trägt das Verbundprojekt AnRox dazu bei, die Marktattraktivität des ausfallsicheren Antriebssystems inkl. des Energiebordnetzes sowie dessen leistungselektronischer Komponenten zu steigern und die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft für System- und Komponentenlösungen zukünftiger automatisierter Fahrzeuge zu sichern. Das Teilprojekt trägt insbesondere dazu bei die Funktionale Sicherheit quantitativ darzustellen, wodurch die Akzeptanz und das Vertrauen in die Automatisierung gesteigert wird. Dies ist entscheidend, um die gesellschaftliche und wirtschaftliche Integration automatisierter Fahrzeuge voranzutreiben und die Sicherheit im Straßenverkehr nachhaltig zu verbessern.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Förderprojekt AnRox adressierte den wichtigen und stark wachsenden Markt von (teil-)automatisierten Fahrzeugen mit Fokus auf intelligente zukunftsfähige Antriebslösungen und baute auf den bekannten Vorarbeiten auf. So wurde im Verbundprojekt AutoDrive bereits die Notwendigkeit von fehleroperablen Antriebssystemen für den sicheren Betrieb von (teil-)automatisierten Fahrzeugen nachgewiesen. Auch grundlegende Lösungsansätze wurden bereits in einigen Projekten adressiert, z.B. AutoDrive, 3F, ToSKa und HiBord. Die Neuheit und Schwerpunkte des vorliegenden Projektes AnRox mit Fokus auf den Antriebsstrang sowie die Abgrenzung zu den Vorarbeiten werden anhand Abbildung 3 erklärt.

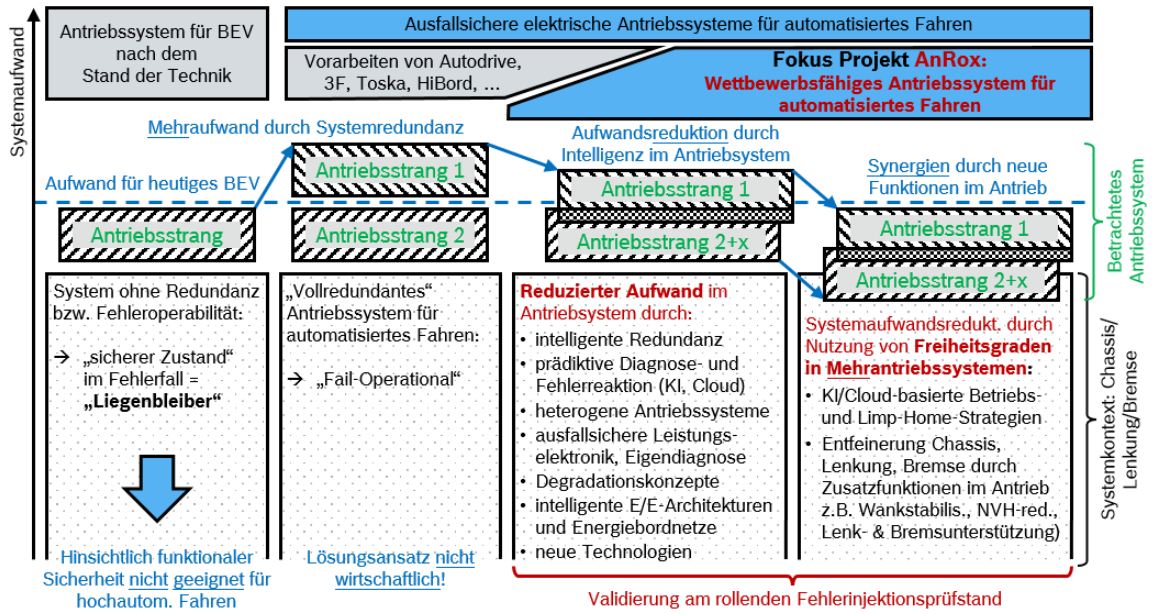


Abbildung 3: Kern des Verbundprojektes AnRox inkl. Abgrenzung zu Vorarbeiten mit Fokus auf den Antriebsstrang

Heutige batterieelektrische Fahrzeuge (BEV) verfügen über keinen fehleroperablen Antriebsstrang, sodass der Ausfall des Antriebssystems zum Liegenbleiben des Fahrzeugs im aktiven Verkehr führt. Eine Möglichkeit zur Realisierung eines ausfallsicheren elektrischen Antriebssystems ist die Verwendung einer systemischen Redundanz, wie im z.B. im Projekt AutoDrive realisiert. Durch ein vollredundantes Antriebssystem können die erhöhten Anforderungen an die Verfügbarkeit des Fahrzeugs erfüllt werden, jedoch stehen diese Lösungen aufgrund eines deutlich erhöhten Material- und Zusatzaufwandes einem wirtschaftlichen Betrieb entgegen. Zur Minimierung von Mehrkosten für ausfallsichere Antriebssysteme und/oder zur Kompensation dieser Kosten durch einen nachweisbaren Mehrwert für Endnutzer oder Betreiber wurde in AnRox der Ansatz einer ganzheitlichen Optimierung der eng verknüpften Domänen Antriebssystem, Energiebordnetz (EBN) und Leistungselektronik unter konsequenter Einbeziehung der Wechselwirkung zu Lenkung, Bremse und Chassis verfolgt. Für den Projekterfolg war die domänenübergreifende Verzahnung der Partnerbeiträge mit einem breit gefächerten Kompetenzspektrum entscheidend.

Als Referenzarchitektur wurde eine dem Stand der Technik und Forschung entsprechende Topologie des Antriebssystems mit einem Zentralantrieb verwendet, wobei die Sicherheitsanforderungen des hoch- und vollautomatisierten Fahrens an die Brems- und Lenkfunktionalität durch Vollredundanz in den Teilsystemen erfüllt wurden. Das Teilprojekt von EDI ergänzt die technische Weiterentwicklung durch eine intelligentes ADAS-System. Hierzu wird das bereits entwickelte Dynamic Risk Management (DRM)-Model aus vorherigen Projekten u.a. dem

Projekt Risk Estimation with a Learning KI - RELAI[1], weiterentwickelt (1)(2)(3)(4). Insbesondere wird der Fokus auf Fahrsituationen auf Autobahnen und möglichen Fehlerfällen des Antriebstrang in Abhängigkeit zur Fahrzeugtopologie gelegt.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Beschreibung der Inhalte der Arbeitspakete, der Zeitplanung sowie der Hauptmeilensteine im Verbundprojekt AnRox sind im Abschnitt 3.1 beschrieben. Die Veränderungen gegenüber der ursprünglichen Planung sind kurz im Abschnitt 3.2 zusammengefasst.

Das Teilprojekt ist hauptsächlich in den Arbeitspaketen AP1, AP2 und AP4 involviert und leistet hierbei folgende Beiträge:

In **AP1** identifiziert und analysiert das Teilprojekt geeignete Datenquellen, um Anforderungen an eine KI-basierte Betriebsstrategie abzuleiten. Dabei werden sowohl Datenquellen für den Mikro- als auch den Makro-Verkehrskontext berücksichtigt. Des Weiteren spielen die möglichen Fehlerquellen und deren Auswirkung aufgrund der Fahrzeugtopologien einen großen Einfluss die u.a. in einer großen HARA-/SOTIF-Matrix erfasst werden. Diese Anforderungen und relevanten Datenquellen sind essenziell für die nachfolgenden Arbeitspakete.

In **AP2** entwickelt das Teilprojekt KI-Modelle, u.a. wird das Dynamic Risk Management Modell weiterentwickelt, die auf den in AP1 definierten Anforderungen basieren. Diese Modelle ermöglichen ein sicheres und nachvollziehbares Verhalten des RoboTaxis im Fehlerfall in Abhängigkeit zum Verkehrskontext sowie eine sichere und akzeptable Betriebsstrategie, d.h. Finden von sicheren Haltezonen. Zur effizienten Datengenerierung und Kalibrierung der KI in frühen Phasen der Entwicklung von automatisierten Fahrzeugen wird im Teilprojekt das entsprechende Verkehrsverhalten mit der Verkehrsflusssimulation PTV Vissm abgebildet.

AP4 dient zur Validierung, indem in der Simulation die Funktionalen Sicherheits-Statements quantifiziert in Abhängigkeit der definierten Operational Design Domain (ODD): Autobahn und definierten KPIs, die durch die unterschiedlichen Fahrzeugtopologien variieren können. Das Teilprojekt optimiert das Gesamtsystemverhalten, um die Sicherheit der Insassen und anderer Verkehrsteilnehmer sowie die Nutzerakzeptanz sicherzustellen.

[1] https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/mfund-projekte/relai.html

3.1. Projektaufbau

Das Verbundprojekt AnRox ist in vier Arbeitspakete gegliedert (Abbildung 4**): (AP1)** ***Identifikation von Anforderungen an Antriebs-, Fahrwerksysteme und Energiebordnetze eines Robotertaxis*****, (AP2)** ***Ausfallsichere und intelligente Antriebssysteme und Energiebordnetze***, (AP3) *Komponenten für ausfallsichere Antriebe und Energiebordnetze* sowie **(AP4)** ***Validierung***. Zur Ableitung der Anforderungen an das Antriebs- und Fahrwerksystem sowie das Energiebordnetz eines Robotertaxis im AP1 wurden im ersten Schritt repräsentative Nutzungsprofile und Einsatzbereiche erforscht und identifiziert und damit der Anwendungsfall konkretisiert. Dabei wurden neben der Berücksichtigung des fehlerfreien Betriebs insbesondere auch die Anforderungen an den Fahrzeugbetrieb im Fehlerfall unter Berücksichtigung der Nutzerakzeptanz und der funktionalen Sicherheit abgeleitet. Die Ergebnisse wurden in Hinblick auf die Leistungs-, Verfügbarkeits- und Sicherheitsanforderungen in Form von gewichteten Kriterien (Anforderungen) für die Cluster „Antriebssysteme und Bordnetze“ sowie „Antriebs- und Bordnetzkomponenten“ zur Verfügung gestellt und in mehreren Iterationen über die Projektlaufzeit mit neuen Erkenntnissen aus dem Projekt verfeinert und nachgeschärft.

Zur Erarbeitung einer ganzheitlichen Vorzugslösung für ein ausfallsicheres Antriebssystem und Energiebordnetz im AP2 wurden mittels eines morphologischen Kastens verschiedene Topologien erarbeitet und bezüglich der (1) Ausfallsicherheit, (2) Energieeffizienz, (3) Attraktivität für den Endkunden sowie (4) Wirtschaftlichkeit optimiert und quantifiziert. Bei der Ausfallsicherheit wurde im Fehlerfall die Durchführung eines Fahrmanövers zum Erreichen des sicheren Zustandes (Stillstand) gefordert. Die Definition des erforderlichen Fahrmanövers war dabei Gegenstand der im Projekt durchzuführenden Anforderungsanalyse und setzte sich zusammen aus der Definition des im Fehlerfall noch zu erreichenden Fahrziels (bspw. ein Parkplatz) und der zulässigen Degradation der Fahrdynamik und Geschwindigkeit. Zur Energieeffizienzsteigerung wurden intelligente Betriebsstrategien unter Ausnutzung der neuen Freiheitsgrade erarbeitet und deren Leistungsfähigkeit anhand des Energieverbrauchs quantifiziert. Die Attraktivität für den Endkunden wurde zum einen über die verbesserte Ausfallsicherheit des Robotertaxis gesteigert, sodass mögliches Liegenbleiben im aktiven Verkehr vermieden wird. Zum anderen wurde durch die optimale Ausnutzung der Wechselwirkungen zwischen den Domänen Antrieb, Bremse, Lenkung und Fahrwerk auch die Fahrdynamik sowie der Fahrkomfort und Fahrruhe verbessert. Entsprechende Modelle zu deren Quantifizierung werden mittels der im Projekt durchzuführenden Studie für User Experience (UX) erstellt, parametriert und bei der Optimierung des Antriebssystems berücksichtigt.

Ausgehend von den Anforderungen an ein ausfallsicheres Antriebssystem wurden im AP3 ein fehlertoleranter elektrischer Antrieb und Komponenten für ein fehlertolerantes Energiebordnetz entworfen, realisiert und an geeigneten Komponentenprüfständen mit Fehlerinjektion validiert. Für

den Antrieb wurden inhärent fehlertolerante Topologien für die E-Maschine und die Leistungselektronik erarbeitet, bewertet und ausgewählt sowie ein notlauffähiges passives Thermomanagement entwickelt. Darüber hinaus wurden Condition-Monitoring-Verfahren für E-Antriebe erarbeitet. Zur Validierung der Fehlererkennung und -behandlung wurden modifizierten Prototypenmaschinen und Umrichtern am Prüfstand zur Laufzeit Fehler injiziert, um deren Wirksamkeit und Effektivität zu validieren. Für das Energiebordnetz wurde eine fehlertolerante Architektur mit den zugehörigen intelligenten Energieverteilknoten realisiert, die Fehler im Energiebordnetz erkennen und mittels Rekonfiguration der Energieflüsse im HV und NV Energiebordnetz behandeln. Dabei wurden die Anforderungen an Robustheit, Lebensdauer, Überlastfähigkeit usw. der zugrundeliegenden Halbleiter-Schalter berücksichtigt.

Zur Validierung der im Projekt erzielten Ergebnisse wurden im AP4 Prüfstände auf Komponenten- und Teilsystemebene mit der Möglichkeit zur Fehlerinjektion aufgebaut. Zusätzlich wurde zum Nachweis der Funktionalität auf Gesamtsystemebene eine flexible Fahrzeugvalidierungsplattform verwendet. Das Ziel war dabei Potenziale im Zusammenspiel der Domänen Antrieb, Bremse, Lenkung und Fahrwerk im Normal- und Fehlerfall sowie zugehöriger Betriebsstrategie zu evaluieren. Die Durchführung der UX Studien an einem Fahrsimulator und Bewertung der im Projekt erzielten Ergebnissen im Hinblick auf Fahrkomfort und Fahrruhe sowie an einem Wizard-of-Oz-Fahrzeug zur Validierung der Limp-Home-Manöver schließen die durchgehende Validierungskette über alle Systemebenen hinweg ab. Ebenfalls wurde insbesondere in PTV Vissim entsprechende Verkehrskontexte auf der Autobahn simuliert und der Einfluss von unterschiedlichen Fehlerfällen quantiifziert.

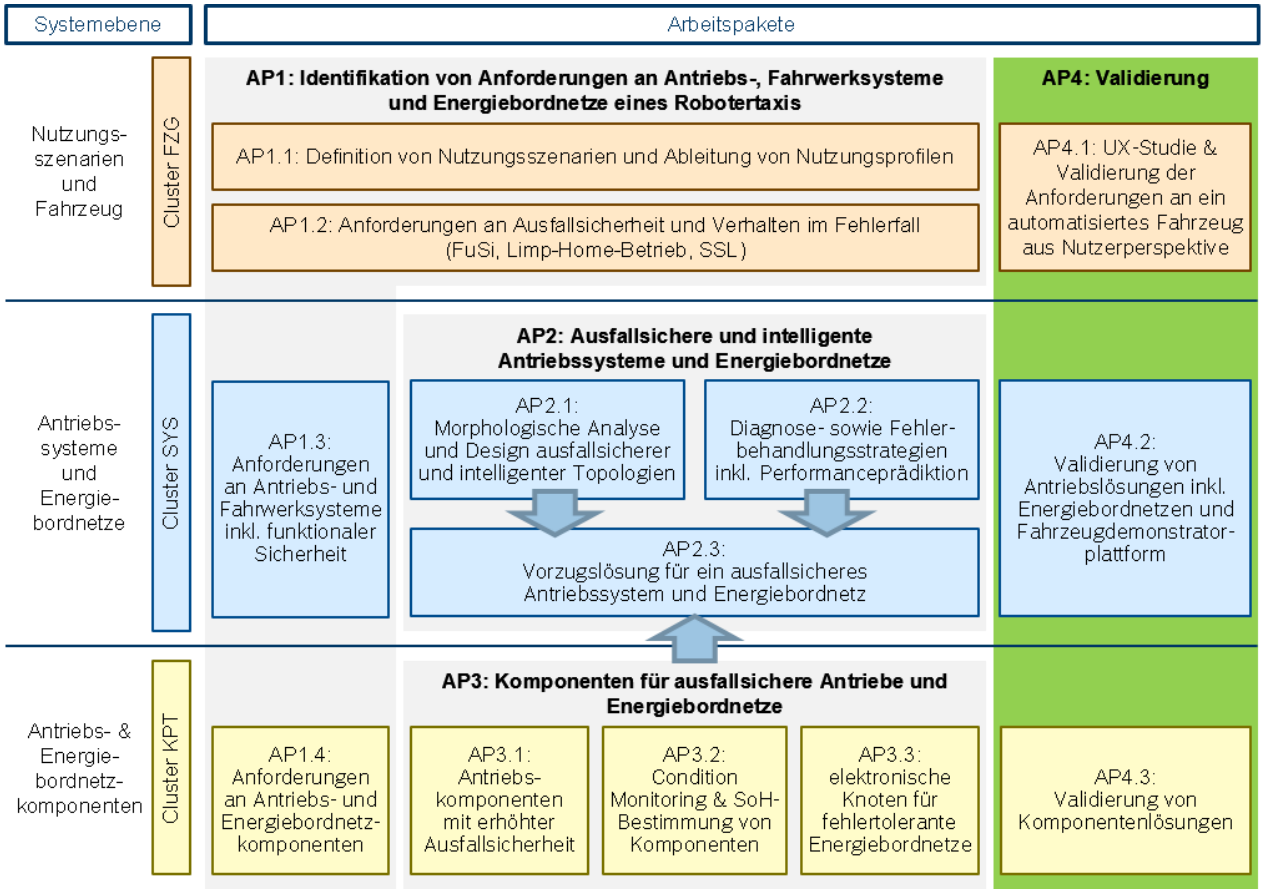


Abbildung 4: Struktur der Arbeitspakete und Cluster

Die Grobzeitplanung des Projektes AnRox ist in Abbildung 5 dargestellt.

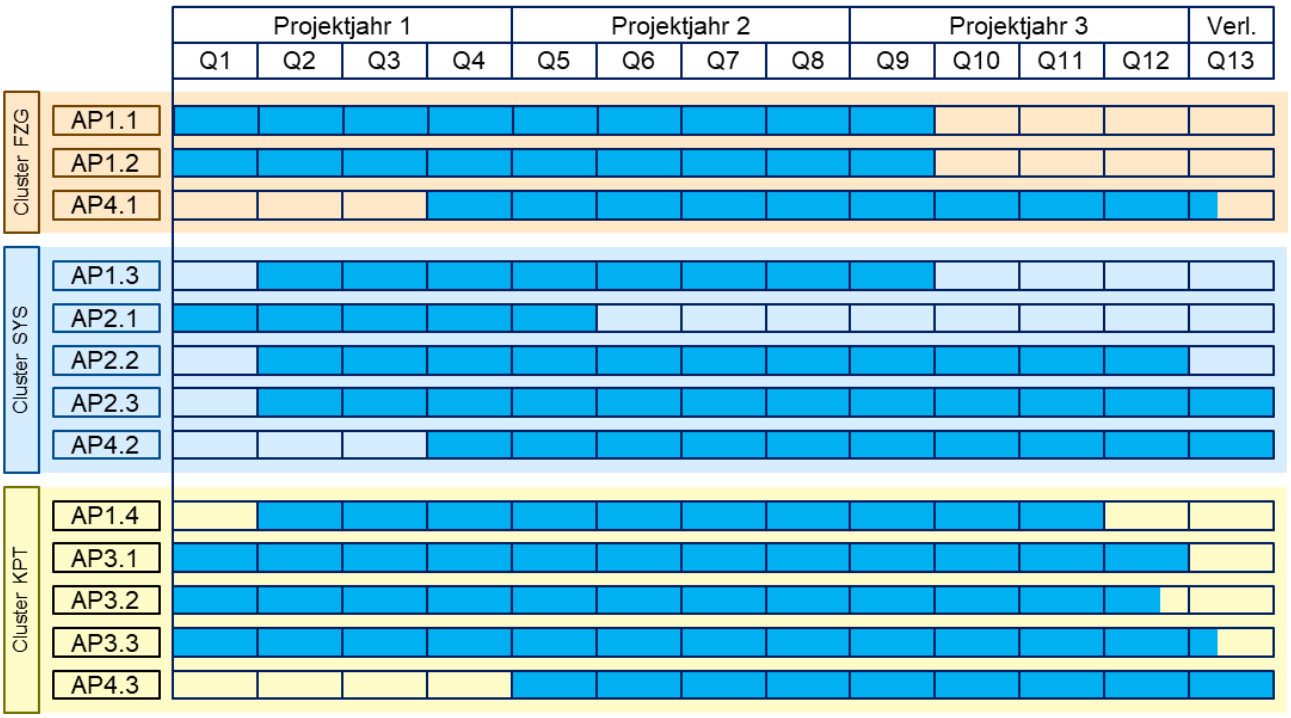


Abbildung 5: Grobzeitplan AnRox

Die Hauptmeilensteine des Projekts AnRox sind in der Abbildung 6 dargestellt und in der Tabelle 1 aufgelistet. Um die Erkenntnisse aus dem Projekt in die Weiterentwicklung der Anforderungen auf Fahrzeugebene, System- und Komponentenebene einfließen zu lassen erfolgt bei den Meilensteinen M1, M2 und M3 ein Split in drei Teile, bei den Meilensteinen M4 und M5 in zwei Teile.

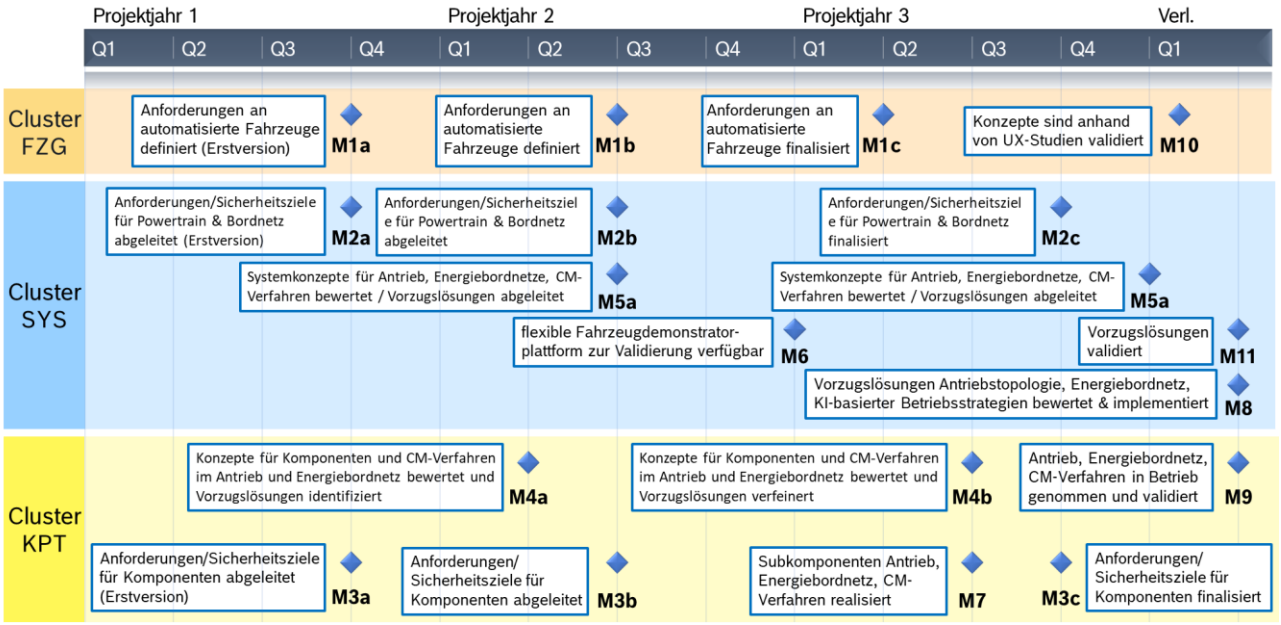


Abbildung 6: Hauptmeilensteine im Projekt AnRox

Nr.	Beschreibung	Projekt-monat
M1a	Anforderungen an ein automatisiertes Fahrzeug am Beispiel Robotertaxi sind definiert (Erstversion)	9
M1b	Anforderungen an ein automatisiertes Fahrzeug am Beispiel Robotertaxi sind definiert	18
M1c	Anforderungen an ein automatisiertes Fahrzeug am Beispiel Robotertaxi sind finalisiert	27
M2a	Anforderungen und Sicherheitsziele für Powertrain und Bordnetz sind abgeleitet (Erstversion)	9
M2b	Anforderungen und Sicherheitsziele für Powertrain und Bordnetz sind abgeleitet	18
M2c	Anforderungen und Sicherheitsziele für Powertrain und Bordnetz sind finalisiert	33
M3a	Anforderungen und Sicherheitsziele für Komponenten sind abgeleitet (Erstversion)	9
M3b	Anforderungen und Sicherheitsziele für Komponenten sind abgeleitet	18
M3c	Anforderungen und Sicherheitsziele für Komponenten sind finalisiert	33
M4a	Konzepte für zu realisierende Komponenten und CM-Verfahren im Antrieb und Energiebordnetz sind bewertet und Vorzugslösungen identifiziert	15
M4b	Konzepte für zu realisierende Komponenten und CM-Verfahren im Antrieb und Energiebordnetz sind bewertet und Vorzugslösungen verfeinert	30
M5a	Systemkonzepte für Antrieb und Energiebordnetze (inkl. Thermomanagementsystem) sowie CM-Verfahren sind bewertet und Vorzugslösungen abgeleitet	18
M5b	Systemkonzepte für Antrieb und Energiebordnetze (inkl. Thermomanagementsystem) sowie CM-Verfahren sind bewertet und Vorzugslösungen verfeinert	36
M6	Flexible Fahrzeugdemonstratorplattform zur Validierung ist verfügbar	24
M7	Subkomponenten von Antrieb & Energiebordnetz sowie CM-Verfahren realisiert	30
M8	**Vorzugslösung für Antriebs- und Bordnetzsysteme inkl. KI-basierter Betriebsstrategien sind entwickelt, bewertet und am Achs-, Fahrzeug- und Bordnetzdemonstratoren validiert**	39
M9	Antrieb, Condition-Monitoring und Energiebordnetz sind realisiert, in Betrieb genommen und am Prüfstand validiert	39
M10	Konzepte sind anhand von UX-Studien validiert	37
M11	Vorzugslösungen sind validiert	39

Tabelle 1: Hauptmeilensteine des Projekts AnRox.

3.2. Veränderungen gegenüber ursprünglicher Planung

Der ursprüngliche Zeitplan des Verbundprojekts ist in Abbildung 7 und der Meilensteinplan in Abbildung 8 dargestellt. Die Hauptmeilensteine des Projekts AnRox nach ursprünglicher Zeitplanung sind in Tabelle 2 aufgelistet.

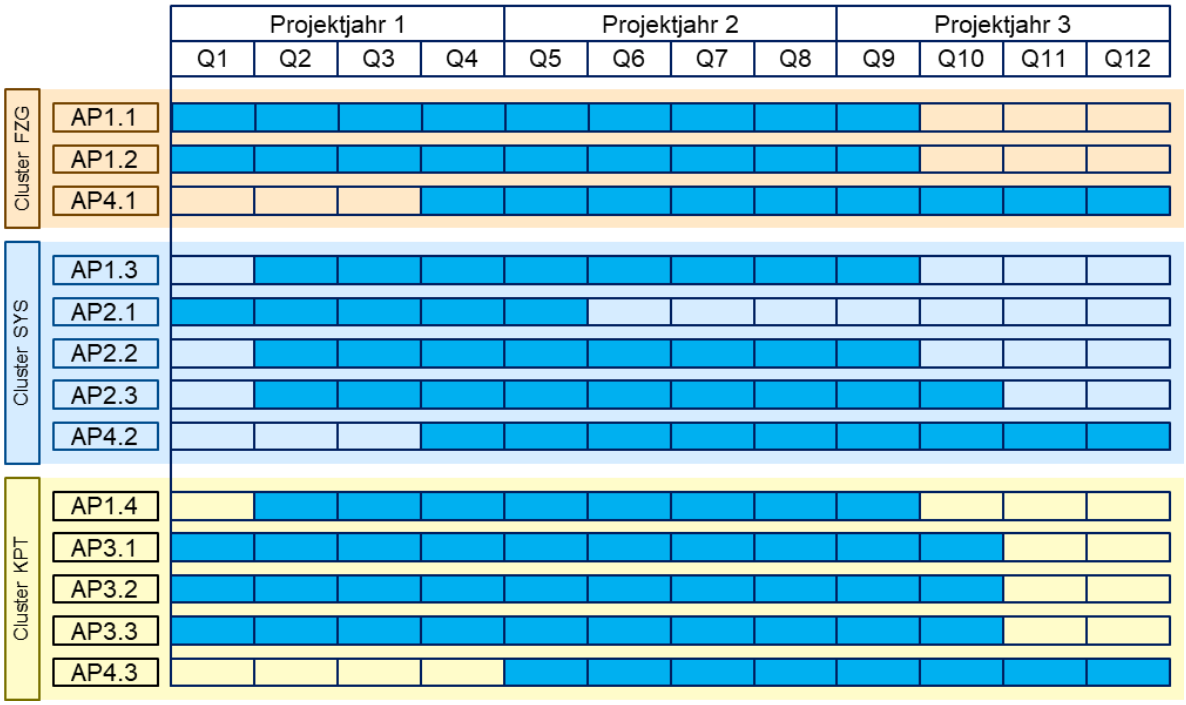


Abbildung 7: Ursprünglicher Grobzeitplan AnRox

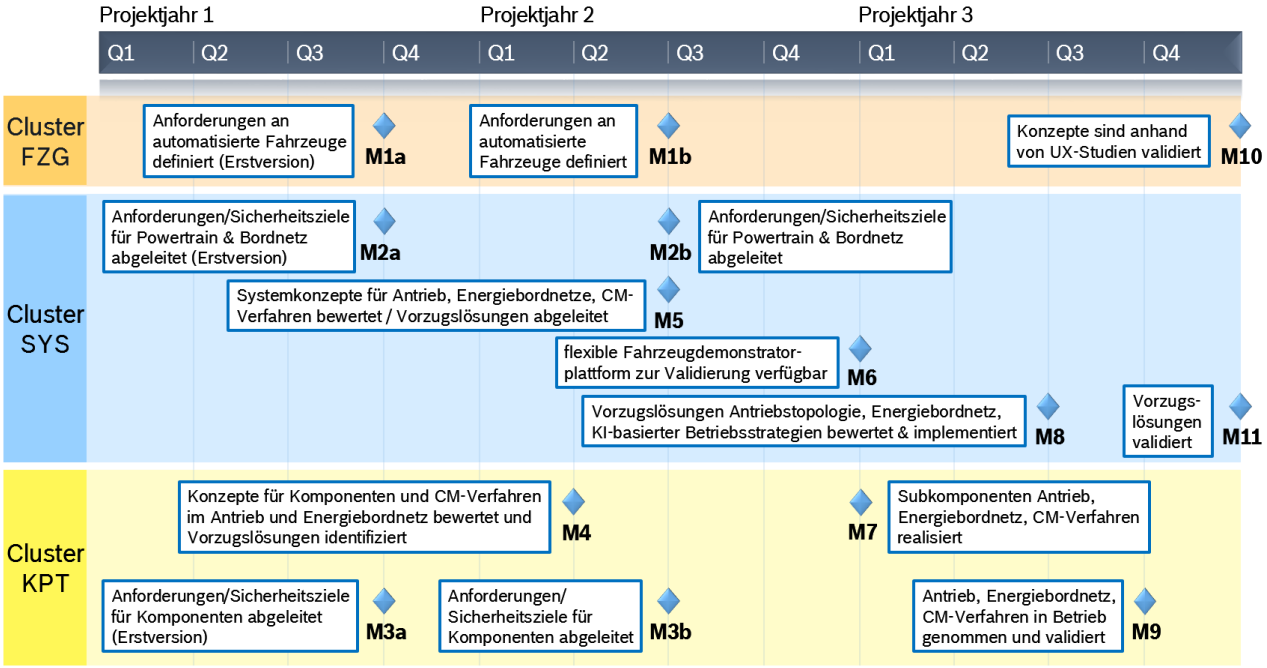


Abbildung 8: Hauptmeilensteine im Projekt AnRox mit ursprünglicher Zeitplanung

Nr.	Beschreibung	Projekt-monat
M1a	Anforderungen an ein automatisiertes Fahrzeug am Beispiel Robotertaxi sind definiert (Erstversion)	9
M1b	Anforderungen an ein automatisiertes Fahrzeug am Beispiel Robotertaxi sind definiert	18
M2a	Anforderungen und Sicherheitsziele für Powertrain und Bordnetz sind abgeleitet (Erstversion)	9
M2b	Anforderungen und Sicherheitsziele für Powertrain und Bordnetz sind abgeleitet	18
M3a	Anforderungen und Sicherheitsziele für Komponenten sind abgeleitet (Erstversion)	9
M3b	Anforderungen und Sicherheitsziele für Komponenten sind abgeleitet	18
M4	Konzepte für zu realisierende Komponenten und CM-Verfahren im Antrieb und Energiebordnetz sind bewertet und Vorzugslösungen identifiziert	15
M5	Systemkonzepte für Antrieb und Energiebordnetze (inkl. Thermomanagementsystem) sowie CM-Verfahren sind bewertet und Vorzugslösungen abgeleitet	18
M6	Flexible Fahrzeugdemonstratorplattform zur Validierung ist verfügbar	24
M7	Subkomponenten von Antrieb & Energiebordnetz sowie CM-Verfahren realisiert	24
M8	Vorzugslösung für Antriebs- und Bordnetzsysteme inkl. KI-basierter Betriebsstrategien sind entwickelt, bewertet und am Achs-, Fahrzeug- und Bordnetzdemonstratoren validiert	30
M9	Antrieb, Condition-Monitoring und Energiebordnetz sind realisiert, in Betrieb genommen und am Prüfstand validiert	33
M10	Konzepte sind anhand von UX-Studien validiert	36
M11	Vorzugslösungen sind validiert	36

Tabelle 2: Hauptmeilensteine des Projekts AnRox mit ursprünglicher Zeitplanung

Aufgrund von Lieferverzügen, unerwarteter Notwendigkeit von Re-Designs beim Aufbau von Demonstratoren sowie verzögerter Inputs aus vorgelagerten Arbeitspaketen kam es im Cluster *Antriebs- und Energiebordnetzkomponenten* zu Verzögerungen bei der Fertigstellung und Validierung von Antriebskomponenten (elektrische Motoren, thermische Komponenten, Mehrprozessorplattform) sowie Energiebordnetzkomponenten (Energiebordnetzknoten).

Die Lieferverzüge der Bauteile zum Aufbau der Antriebskomponenten im Arbeitspaket AP3.1 (elektrische Motoren, thermische Komponenten, Mehrprozessorplattform) von bis zu 9 Monaten und zum Aufbau der Energiebordnetzkomponenten im Arbeitspaket AP3.3 von ca. 6 Monaten wurden

durch die ergriffenen Maßnahmen teilweise kompensiert, führten aber dazu, dass die Fertigstellung der Demonstratoren im AP3.1 und AP3.3 erst im Projektmonat 36 fertiggestellt wurden.

Durch die oben beschriebene Verzögerung war auch die experimentelle Validierung an unterschiedlichen Komponentenprüfständen in den Arbeitspaketen AP4.2 und AP4.3 der Partner sowie die vergleichende Bewertung der im Cluster *Antriebssysteme und Energiebordnetze* betrachteten Vorzugstopologien im Arbeitspaket AP2.3 verzögert möglich. Diese speziell durch verzögerte Hardware-Bereitstellung dominierten Effekte ließen sich durch eine kostenneutrale Projektverlängerung um drei Monate effektiv ausgleichen.

4. Erzielte Ergebnisse im Teilprojekt

In diesem Abschnitt werden die erzielten Projektergebnisse des Teilprojekts nach Arbeitspaketen vorgestellt und inhaltlich zusammengefasst.

4.1. AP1: Identifikation von Anforderungen an Antriebs-, Fahrwerkssysteme und Energiebordnetze eines Robotertaxis

Das Ziel vom Arbeitspaket AP1 ist die Ableitung der relevanten Anforderungen sowohl für den Normalbetrieb als auch für den fehlerbehafteten Betrieb eines Robotertaxis und daraus resultierender Anforderungen an das Antriebssystem, Energiebordnetz sowie deren Komponenten.

AP1.1.2 stellt die Grundlage für alle nachfolgenden Arbeitspakete mit Fokus auf die KI-basierte Betriebsstrategie dar. Hier stand die detaillierte Analyse und Ausarbeitung der relevanten Nutzerprofile und Einsatzszenarien mit Fokus auf die Funktionale Sicherheit des RoboTaxis im Vordergrund, wobei die typischen Verkehrs- und Fahrsituationen im Mittelpunkt standen, denen autonome Fahrzeuge (RoboTaxis) begegnen können. Ebenfalls hat EDI auf die Anforderungen für die Entwicklung des KI-basierten DRM-Algorithmus den Fokus gelegt, der als Basis für die KI-basierte Betriebsstrategie diente. Insbesondere die Ausgearbeiteten SOTIF/HARA und ASIL-Bewertungs-Kriterien in einer großen Matrix (kurz: HARA- & SOTIF-Matrix) waren die Grundlage für die weitere Entwicklung der KI und der KI-basierten Toolchain. Folgende Punkte wurden konkret erarbeitet und in der HARA/SOTIF-Matrix zusammengefasst:

- **Analyse der Verkehrskontexte:**
  EDI unterstützte bei der umfassenden Analyse der relevanten Verkehrsnetzwerke, wobei sowohl urbane als auch außerstädtische und insbesondere Autobahn Szenarien einbezogen wurden. Dazu gehörten Szenarien wie:
  - Autobahnfahrten mit variierendem Verkehrsaufkommen,
  - städtische Kreuzungen mit Fußgängerbeteiligung,
  - ländliche Straßen mit eingeschränkter Sicht.
- **Erstellung von Nutzerprofilen:**
  Es wurden typische Fahrzeugnutzungsmuster definiert, d.h. auch Fahrten mit und ohne Passagere usw.. Diese Profile halfen dabei, spezifische Anforderungen an die KI-Modelle mit Fokus auf die Sicherheitsaspekte abzuleiten, wie die bevorzugte Reaktion auf kritische Situationen oder die Risikobereitschaft in unterschiedlichen Szenarien.
- **Definition relevanter Szenarien:**
  Basierend auf den Nutzerprofilen wurden die wichtigsten Verkehrssituationen systematisch identifiziert, kategorisiert und priorisiert. Szenarien wurden in Bezug auf Häufigkeit,

Komplexität und potenzielles Risiko bewertet, um eine strukturierte Basis für die weitere Entwicklung zu schaffen.

Ergebnis:

Die ausgearbeiteten Nutzerprofile und Szenarien boten eine klare Orientierung für die Ableitung von Anforderungen an das Dynamic Risk Management (DRM) sowie die Verkehrsfluss-Simulationsmodelle in PTV Vissim mit Fokus auf die Sicherheit (HARA- & SOTIF-Matrix) (siehe Abbildung 9). Dies ermöglichte eine gezielte Entwicklung und Validierung von KI-basierten Strategien zur Bewältigung spezifischer Verkehrskontexte, d.h. das Quantifizieren der jeweiligen Sicherheitsstatements. Dies stellt auch im weiteren Projektverlauf eine wichtige Grundlage dar, weshalb ein verstärkter Fokus auf die quantifizierte Absicherung gelegt und die Basis für die KI-basierte Toolchain geschaffen wurde.

ODD	Fehlermodus	Fahrsituation	Fahrsituation	Iteration	SOTIF ID	Nutzerklasse	Lösung (Maßnahmenpaket)	Bewertung Severity	Bewertung Controllability	Akzeptanz der Risikoevaluierung
Autobahn	Vortriebsverlust	Fahrzeug verliert an Vortrieb und kommt auf der linken Spur einer Autobahn zum Stehen.	Reduktion der Geschwindigkeit auf die Ersatzgeschwindigkeit 0km/h (Ausrollen) auf der linken Spur einer Autobahn	Nr 1.	1		1.1 Ausrollen 2.1 Ersatzgeschwindigkeit 0 km/h	S3	C2	nein
			Reduktion der Geschwindigkeit auf die Ersatzgeschwindigkeit 0km/h (Ausrollen) auf der linken Spur einer Autobahn	Nr 2.	1.1		1.1 - ohne Verbesserung 2.1 - zusätzlich zu 2.1. + 5.0 Warnsignale (Warnblinkanlage, Drehlich) [6.1 - Car2Car/Car2x (auch bei Mischverkehr mit Schnittstelle evt. Radio)]	S3	C1	nein
			Ausrollen mit Spurwechsel um von der linken Spur einer Autobahn zum Standstreifen zu kommen und dort kontrolliertes abbremsen.	Nr. 1	2		1.1 Ausrollen 2.1 Ersatzgeschwindigkeit 0 km/h 4.1 Spurwechsel mit Sicherheitsabstand	S3	C1	nein
			Ausrollen mit Spurwechsel um von der linken Spur einer Autobahn zum Standstreifen zu kommen und dort kontrolliertes abbremsen.	Nr. 2	2.1		1.1 Ausrollen 2.1 Ersatzgeschwindigkeit 0 km/h 4.1 zusätzlich zu 4.1 + 5.0 Warnblinkanlage aktiv	S3	C0	ja
	Vortriebsverlust	Fahrzeug verliert an Vortrieb und kommt auf dem Standstreifen einer Autobahn zum Stehen.	Aussteigen der Insassen UC3 auf Standstreifen einer Autobahn	Nr. 1	3		1.1 Ausrollen	S3	C3	nein
			Weiterfahren mit 60 km/h bis zum nächsten sicheren Ort (safe stop location) um die Passagiere abzusetzten.	Nr. 2	3.1		1.1 - zusätzlich +2.5 Weiterfahren 60 km/h 3.4 Weiterfahrt bis Sicherer Standort. Safe-Stop Location	S3	C0	ja
	Vortriebsverlust	Fahrzeug verliert an Vortrieb und kommt auf der linken Spur einer Autobahn zum Stehen.	Reduktion der Geschwindigkeit auf die Ersatzgeschwindigkeit 60km/h* auf der linken Spur einer Autobahn.	Nr. 1	4		1.1 Ausrollen 2.5 Ersatzgeschwindigkeit <60 km/h	S3	C2	nein

Abbildung 9: Ausschnitt der HARA- & SOTIF-Matrix

In **AP 1.2.2** entwickelt EDI basierend auf den Ergebnissen von AP1.1.2 spezifische Anforderungen für die Verfügbarkeit und den degradierten Betrieb autonomer Fahrzeuge (RoboTaxi). Der Schwerpunkt lag dabei auf der Berücksichtigung spezifischer Herausforderungen für das KI-basierte DRM-Modell und den zur Evaluierung genutzten Safety Cushion Algorithmus.

- **Integration von Störfallanforderungen:**
  EDI unterstützte bei der Spezifizierung von Anforderungen an die Verarbeitung kritischer Fehlerzustände, wie Brems-, Energie- oder Lenkfehler. Diese Anforderungen flossen direkt in die Simulationsumgebung PTV VISSIM ein und dienten für die Entwicklung des KI-basierten DRM-Modells
- **Definierung der Betriebsziele:**
  Es wurde eine Zielhierarchie für den degradierten Betrieb erstellt, z. B. sicherer Anhalteort

(Standstreifen, Parkplatz, d.h. nächste Ausfahrt) oder eine Notfallstrategie bei Systemausfällen, d.h. angemessene Geschwindigkeiten.

- **Sicherstellung der Verfügbarkeit:**

  Anforderungen an die Datenverarbeitung und Robustheit der KI-Modelle wurden spezifiziert, um auch bei teilweiser Sensor- oder Aktuatorbeeinträchtigung zuverlässige Entscheidungen zu gewährleisten.

Ergebnis:

Die abgeleiteten Anforderungen legten die Grundlage für die Entwicklung eines robusten KI-basiertes DRM-Systems, das flexibel auf unterschiedliche Störfälle reagieren kann und quantifiziert die Funktionale Sicherheits-Statements wiedergibt. In Abbildung 10 ist der Input und Output der KI-basierten Toolchain schematisch dargestellt. Die HARA- & SOTIF-Matrix diente als Inputparameter wobei anschließend automatisiert ein Testplan nach der Methode der Statistischen Versuchsplanung entworfen wurde. In der Simulation wurde über einen definierten Zeitraum diese Szenarien abgebildet und anschließend automatisiert mittels dem Safety Cushion Algorithmus ausgewertet, wodurch quantifizierte funktionale Sicherheits-Statement generiert werden konnten.

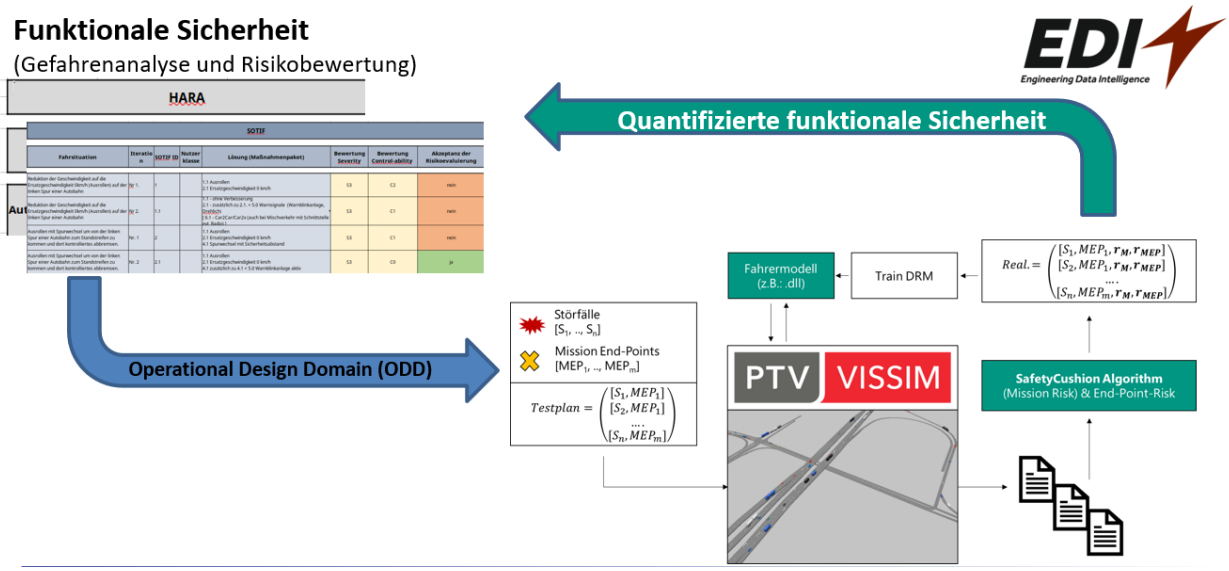


Abbildung 10: AnRox Konzept für KI-Toolchain inklusive Dynamic Risk Management (DRM)

4.2. AP2: Ausfallsichere und intelligente Antriebssysteme und Energiebordnetze

Das Ziel von Arbeitspaket AP2 war die Ableitung der relevanten Antriebssystem- und Energiebordnetzarchitekturen sowie die Erforschung von Diagnose- und Fehlerreaktionskonzepte,

die zum einen die benötigte Redundanz durch intelligente Algorithmen reduzieren können und zum anderen ein gewisses Maß an Performanceprädiktion bereitstellen können, sodass die Fahrzeugautomatisierung höhere Planungssicherheit für die Verfügbarkeit der Aktoren hat.

Das Hauptarbeitspaket von EDI **AP2.2.1** konzentrierte sich auf die Entwicklung des KI-basierten Dynamic Risk Management (DRM)-Modells, das mithilfe von KI adaptive Betriebsstrategien bestimmen kann. Die Implementierung und Optimierung der KI erfolgte in der Verkehrsfluss Simulationsumgebung PTV Vissim, wobei ein spezieller Auswertealgorithmus (Safety Cushion) zur Quantifizierung der Sicherheits-Statements mit Fokus auf ODD: Autobahn weiterentwickelt wurde und zum Einsatz kam.

- **Integration des Safety Cushion-Algorithmus:**
  Der Algorithmus bewertete Risiken basierend auf definierten Parametern wie Fahrzeuggeschwindigkeit, Abstand zu anderen Verkehrsteilnehmern und Verkehrsvolumen, wobei jeweils die Geschwindigkeitsvektoren der Verkehrsteilnehmer berücksichtig und zur Evaluierung genommen werden.
- **Automatisierte Tests:**
  EDI entwickelte eine KI-basierte Toolchain zur Generierung und Durchführung automatisierter Testszenarien. Mithilfe der HARA- & SOTIF-Matrix wurden Szenarien priorisiert und simuliert, um eine maximale Testabdeckung zu gewährleisten und die Sicherheits-Statements zu quantifizieren.
- **Modellierung von Risiko und Verhalten:**
  Die evaluierten Ergebnisse der Simulationen flossen in ein KI-basiertes Risikomodell ein: Der DRM-Modell kann bei definierten Szenarien das Risiko voraussagen, auch ohne das dieses spezifisch simuliert wurde. In Abbildung 12 wird das Dynamic Risk Management (DRM)-Modell veranschaulicht, das zwei unterschiedliche Risikoszenarien darstellt. Auf der linken Seite ist ein Risikomodell mit einem Risikowert von 9,80 für ein geringes Risiko dargestellt. Dieses Szenario basiert auf einer höheren Restgeschwindigkeit von 120 km/h, was auf eine Situation hinweist, in der das Fahrzeug trotz eines Systemfehlers noch über ausreichende Manövrierfähigkeit verfügt. Auf der rechten Seite wird ein Risikomodell mit einem Risikowert von 24,02 für ein hohes Risiko gezeigt. Dieses Szenario resultiert aus einer geringen Restgeschwindigkeit von 20 km/h, was auf eine Fehlfunktion im Antriebsstrang hindeutet, in der das Fahrzeug nur eingeschränkte Möglichkeiten hat. Diese Darstellung verdeutlicht, dass das DRM-Modell in der Lage ist, unterschiedliche Risikolevels zu identifizieren und zu quantifizieren. Auf Basis dieser Risikobewertungen können gezielt Strategien gewählt oder definierte Fehlfunktionen ermöglicht werden, um die Sicherheit des Fahrzeugs in verschiedenen Verkehrssituationen zu gewährleisten. Beispielsweise könnten bei einem hohen Risikolevel präventive Maßnahmen wie eine

automatische Bremsung oder ein Ausweichmanöver initiiert werden, während bei einem geringen Risikolevel weniger invasive Maßnahmen ausreichen könnten. Durch die Anwendung des DRM-Modells wird somit eine dynamische und situationsabhängige Risikobewertung ermöglicht, die eine präzise und effektive Steuerung der Fahrzeugfunktionen unterstützt. Das DRM-Modell ist in das EDI hive IoT & KI Framework integriert, wodurch bei einer Veränderung der einzelnen Parameter auch die entsprechenden Wechselwirkungen und der direkte Einfluss auf die Risikowerte deutlich wird.

Ergebnis:

Das entwickelte DRM-Modell bietet eine präzise Risikoanalyse, ermitteln geeignete Betriebsstrategien und Quantifizierung der Sicherheits-Statements, selbst in komplexen und dynamischen Verkehrssituationen wie auf Autobahnen. In Kombination mit der automatischen Verarbeitung eines Dateninput einer Umfangreichen Gefahrenanalyse (HARA- & SOTIF-Matrix) und der automatischen Auswertung mittels Safety Cushion Algorithmus kann das DRM-Modell fortlaufend angepasst und verfeinert werden. Generell steht somit eine KI-basierte Toolchain zur quantifizierten Absicherung der funktionalen Sicherheit zur Verfügung die Testkosten und -zeit entlang der gesamten Entwicklungskette, vom Dienstleister über die Zulieferer bis hin zu den OEMs reduziert und im Zusammenspiel mit der PTV Vissim Simulation eine Digitale Homologation darstellt. Diese frühe Absicherung von neuen Funktionen für das automatisierte Fahren (RoboTaxi) ist gerade auch im Kontext von dem sogenannten Software Defined Vehicle (SDV)-Entwicklungsprozess relevant.

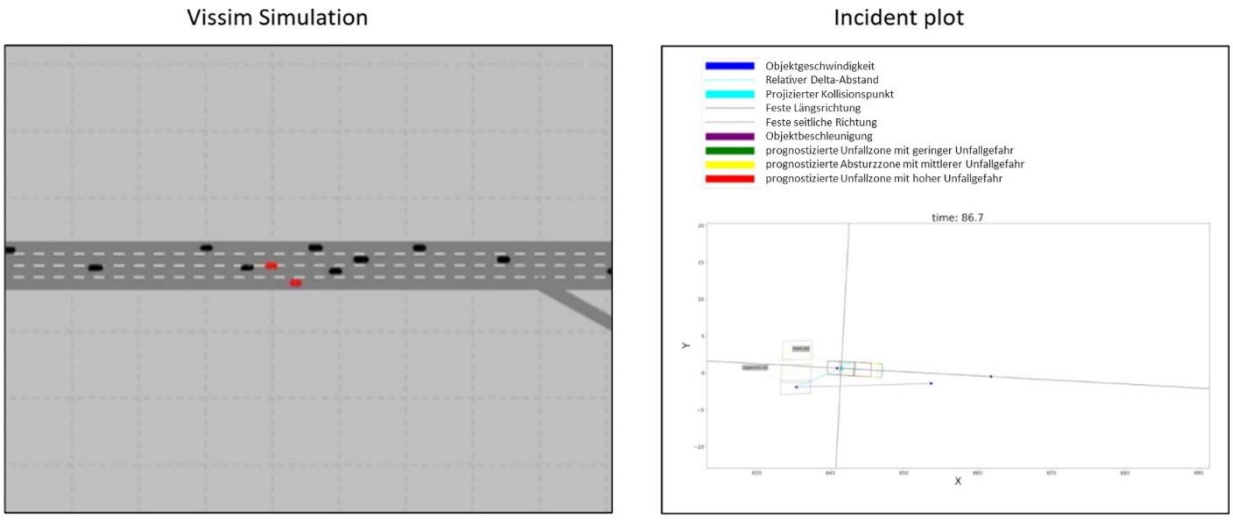


Abbildung 11: Automatische Evaluierung der Sicherheits-Statements mittels Simulation und Safety Cushion-Algorithmus mit speziellem Fokus auf Fahrverhalten auf Autobahnen

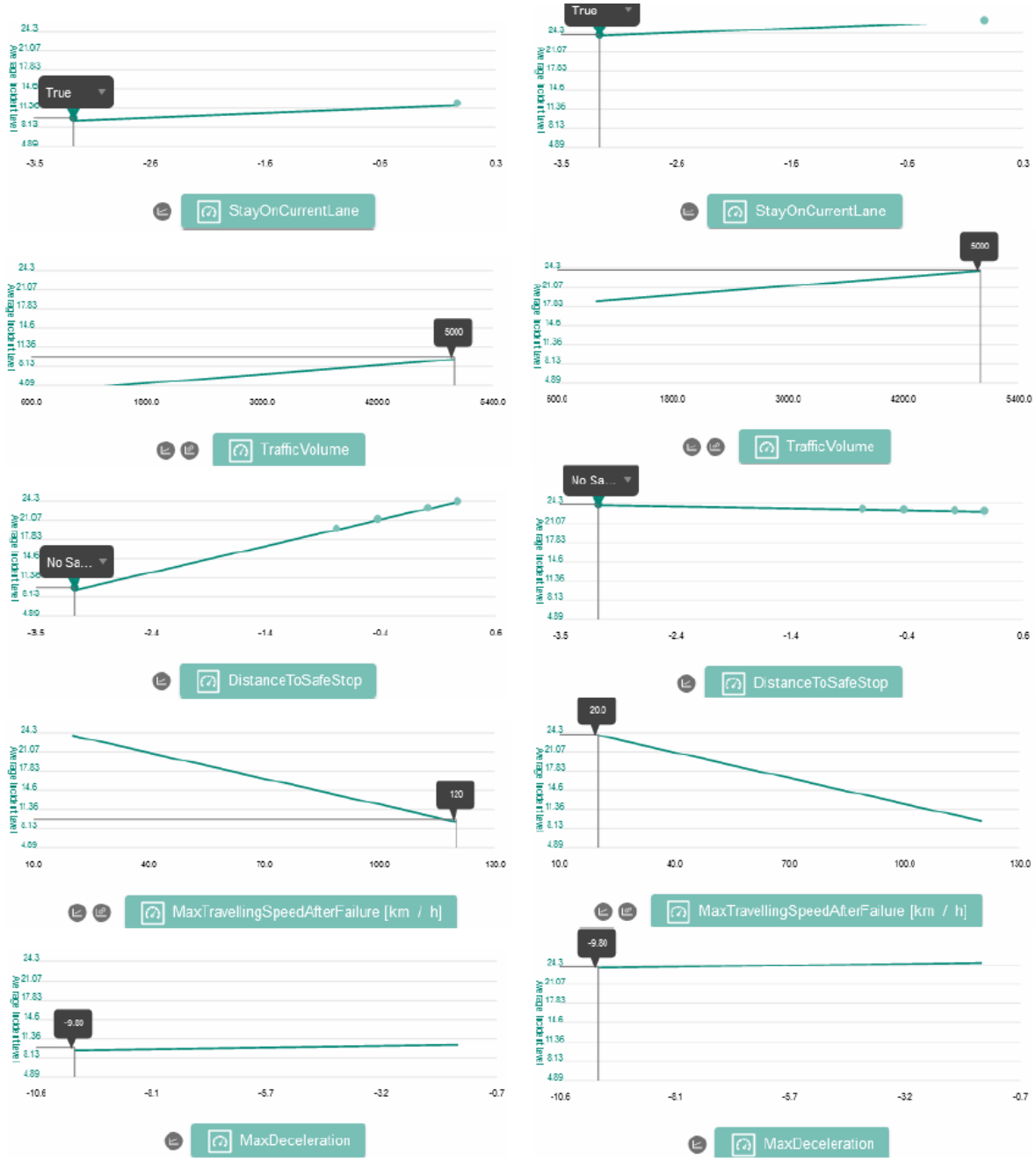


*Abbildung 12: Risikomodell mit Risikowert 9,80 für geringes Risko aufgrund höherer Restgeschwindigkeit mit 120 km/h (**links**) und Risikomodell mit Risikowert 24,02 für hohes Risko aufgrund geringer Restgeschwindigkeit mit 20 km/h (**rechts**)*

4.3. AP4: Validierung

Das Ziel vom Arbeitspaket AP4 war die Validierung der in AnRox erarbeiteten Lösungen für ausfallsichere Antriebssysteme und Energiebordnetze sowie der Komponentenlösungen.

In AP4.1.3 wurde die Validierung vom Dynamic Risk Management im Fahrzeugkontext vorgenommen.

Die Validierung der KI-basierten DRM-Modelle erfolgte durch die Simulation definierter Szenarien in der angepassten PTV Vissim-Umgebung. Diese Umgebung ermöglichte eine systematische Prüfung der Risikobewertung und Betriebsstrategien.

- **Prüfung der Szenarien:**
  Die Simulation deckte eine Vielzahl von Verkehrskontexten ab, in denen das Dynamic Risk Management auf Robustheit und Zuverlässigkeit geprüft wurde. Aufgrund der Simulation konnte ein großer Versuchsumfang in der mehrfachen Echtzeit durchgeführt werden. Unter Berücksichtigung der Design of Experiments (DoE)-Methode, mithilfe von PTV VISSIM wurde ein großer Versuchsumfang durchgeführt. Beispiel eines Testplans: (180 Möglichkeiten):
    - Maximale Verzögerung: -1,5, -3,4, -9,8
    - Maximale Geschwindigkeit nach Ausfall: 20, 50, 80, 120
    - Abstand bis zum sicheren Anhalten: 500, 1000, 1500, 2000, kein Anhalten
    - Verkehrsvolumen: 1000, 2000, 3000
- **Erprobung des Safety Cushion-Algorithmus:**
  Der Algorithmus bewertete die Risiken und erfasste die Häufigkeit von Vorfällen unterschiedlicher Schweregrade („niedrig“, „mittel“, „hoch“, „Unfall“).
- **Validierung der Ergebnisse:**
  Die Simulationsergebnisse bestätigten die Effizienz der DRM-Modelle und identifizierten potenzielle Optimierungsmöglichkeiten, die in zukünftigen Iterationen berücksichtigt werden können. Konkret zeigten die Ergebnisse, welche Geschwindigkeiten zur Reduktion des Risikos erreicht werden sollten und welche Anhaltestrategien bei den erreichbaren Geschwindigkeiten optimal sind. Die Tests wurden in der Simulationsumgebung PTV Vissim durchgeführt, mit einer Gesamtsimulationszeit von 432 Stunden. Dabei wurden etwa eine Million Fahrzeuge auf einer 2,5 km langen Straße in mehrfacher Echtzeit simuliert, von

denen 8.640 fehlerbehaftet waren (siehe Abbildung 13). Diese umfangreichen Simulationen ermöglichten eine detaillierte Analyse der Verkehrsdynamik und der Effektivität der DRM-Modelle unter realitätsnahen Bedingungen. Die Ergebnisse liefern wertvolle Einblicke in die notwendigen Geschwindigkeitsanpassungen und Anhaltestrategien, um das Risiko im Straßenverkehr bei Fehlfunktionen des Antriebsstrangs signifikant zu reduzieren. Diese Erkenntnisse bilden die Grundlage für weitere Optimierungen und die Entwicklung robustere DRM-Modelle in zukünftigen Forschungsarbeiten.

Herausforderungen:

- Eine vollständige Validierung der KPIs konnte innerhalb der Projektlaufzeit nicht abgeschlossen werden, da auch reale Versuche nur begrenzt durchführbar waren. Die vorhandene Simulationsinfrastruktur und KI-basierte Toolchain erlaubt jedoch eine spätere Erweiterung und Validierung von weiteren Parametern.

Ergebnis:

Die Validierung zeigte die Leistungsfähigkeit des KI-basierten DRM-Modells und die Möglichkeit der Quantifizierung von Sicherheits-Statements mittels Simulation und KI-basierten Toolchain für eine effiziente und abgesicherte Entwicklung und Bereitstellung von automatisierten Fahrfunktionen bzw. Robo-Taxis. Der DRM-Algorithmus zum Finden von sicheren Haltezonen bedarf weiterer Entwicklung, insbesondere hinsichtlich Echtzeitfähigkeit und technischer Integration bis hin zur Over-the-Air-Update-Fähigkeit (OTA-Update). Diese Weiterentwicklung ist notwendig, um die maximale Sicherheit auch im Fehlerfall zu gewährleisten. Die Integration des DRM-Algorithmus ins Fahrzeug stellt eine besondere Herausforderung dar, da strenge Homologationen und Sicherheitsanforderungen erfüllt werden müssen. Dies erfordert umfangreiche Tests und Validierungen, um sicherzustellen, dass der Algorithmus zuverlässig und sicher auch im Fahrzeug funktioniert.

Anzahl "Unfall"	Anzahl "hoch"	Anzahl "mittel"	Anzahl "niedrig"	mittleres Incident Level	maximale Verzögerung [m/s²]	maximale Geschwindigkeit nach Ausfall [km/h]	Abstand bis zum sicheren Anhalten [m]
6	52	56	31	33	-9,8	50	1000
0	1	24	7	29	-9,8	80	kein Anhalten
0	8	33	23	28	-3,4	80	2000
1	7	45	20	29	-9,8	80	1500
4	10	25	14	31	-1,5	120	1500
32	132	47	50	35	-9,8	80	500
0	4	2	0	37	-9,8	120	500
5	8	35	12	31	-1,5	120	kein Anhalten
1	13	40	26	29	-1,5	120	kein Anhalten
8	32	55	22	32	-1,5	20	1000
0	0	3	0	30	-1,5	120	500
0	0	2	3	24	-1,5	50	kein Anhalten
0	9	32	16	29	-9,8	80	2000
0	1	5	2	29	-3,4	20	1000
0	1	30	13	28	-1,5	50	kein Anhalten
0	0	1	0	30	-3,4	80	kein Anhalten
0	1	3	0	33	-3,4	80	1000
0	16	17	5	33	-1,5	80	500
1	0	25	8	29	-1,5	80	kein Anhalten
0	172	113	143	31	-9,8	20	500
0	5	30	14	29	-3,4	50	2000
...	...	...	...	...	...	...	...

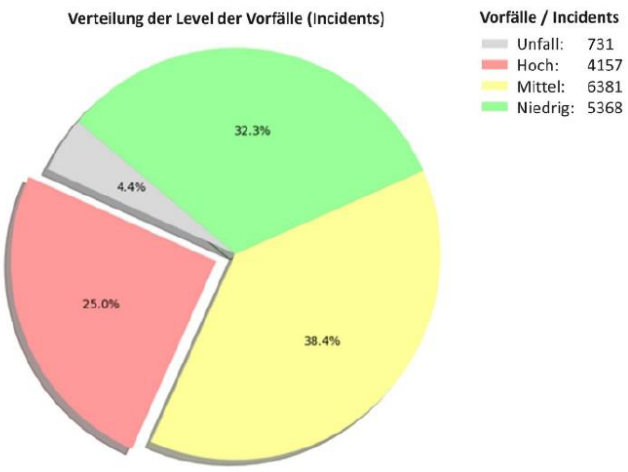


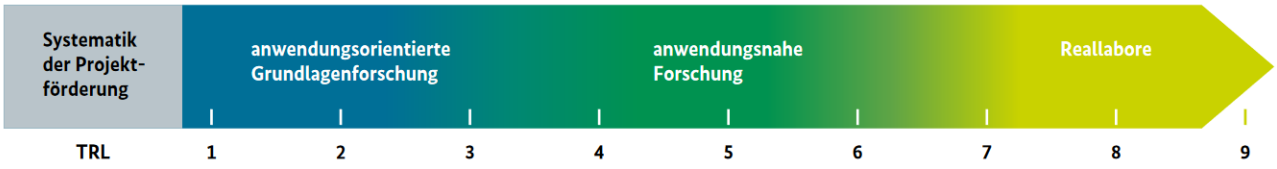
Abbildung 13: Testumfänge in der Simulationsumgebung PTV Vissim mit einer Gesamtsimulationszeit von 432 h, bei etwa 1 Million Fahrzeuge auf einer 2,5 km Straße mit 8640 fehlerbehafteten Fahrzeugen

5. Zielerreichung (TRL)

Im Rahmen des Verbundprojektes AnRox wurden von den Partnern Ziele definiert, bestimmte TRL-Level für die jeweiligen Konzepte, Algorithmen, Methoden, (Teil-)Systemen und Komponenten zu erreichen. Diese sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die Definition der TRL-Level ist in Abbildung 14 dargestellt. EDI war im Teilprojekte Dynamic Risk Management zum Finden von sicheren Zonen verantwortlich für die Weiterentwicklung des DRM-Algorithmus (siehe Tabelle)

Kerninnovation	Cluster	Ausgangs-TRL	Ziel-TRL
HMI Konzept zur Erhöhung der Nutzerakzeptanz im degradierten Betrieb	FZG	0	2
Nutzerprofile für zukünftige Robotertaxis	FZG	0	2
Dynamic Risk Management Algorithmus	**SYS**	**4-5**	**7**
Domänenübergreifende (Antrieb & Chassis) Betriebsstrategie für den Normalbetrieb zur Generierung neuer Fahrfunktionen wie z.B. Komfort	SYS	2-3	6
Domänenübergreifende (Antrieb & Chassis) Betriebsstrategie für den Fehlerfall (inkl. Fehlerdetektion und -reaktionen)	SYS	1-2	6
Performanceprädiktion für Antriebssystem zur Planung kurzfristig anstehender Fahrmanöver	SYS	1-2	5
Antriebssysteme optimiert für das domänenübergreifende Zusammenspiel mit Lenk-, Brems- und Fahrwerksystemen	SYS	1-2	5
Methodik zur Bewertung zuverlässiger Antriebsarchitekturen auf Systemverhaltensebene entwickelt und in einem prototypischen Softwarewerkzeug realisiert	SYS	2	5-6
Bidirektionales On-Board Ladegerät mit Zusatzfunktionalität „Bordnetzversorgung“ während des Fahrbetriebs	KPT	3	5
Ausfallsicheres Leistungsmodul mit angepasster Topologie und integrierter Sensorik	KPT	1-2	4
Condition Monitoring der E-Maschine und fehlertolerante Regelung der E-Antriebs	KPT	1-2	4
Modulare Mehrprozessorplattform	KPT	3	6
Ausfallsicherer Antrieb	KPT	1-2	5
Intelligente elektronische Energieverteiler mit Fehlerdetektion und –isolation im 12V-Energiebordnetz	KPT	3	5-6

Tabelle 3: Ausgangs- und Ziel-TRL der Kerninnovationen im Projekt AnRox.



TRL-Stufe	Definition
1	Ein grundsätzliches Prinzip wurde wissenschaftlich beobachtet, welches für eine Technologie/Verfahren/etc. in Frage kommt.
2	Die Funktionsweise und mögliche Anwendungen einer Technologie/Verfahren/o. Ä. wurden wissenschaftlich beschrieben.
3	Für einzelne Elemente der Technologie/Verfahren/o. Ä. wurde ein Funktionsnachweis im Labor/in einer Versuchsumgebung erbracht.
4	Generelle Funktion der Technologie/Verfahren/o. Ä. konnte im Labor/in einer Versuchsumgebung nachgewiesen werden.
5	Technologie/Verfahren/o. Ä. wurde in einem anwendungsorientierten Gesamtsystem implementiert und generelle Machbarkeit nachgewiesen.
6	Demonstrationsanlage/-konzept in anwendungsähnlicher Umgebung funktioniert.
7	Prototyp mit systemrelevanten Eigenschaften existiert und wird im Betriebsumfeld getestet.
8	Verkaufsmuster/-prototyp liegt vor und erfüllt alle Anforderungen der Endanwendung.
9	Kommerzieller Einsatz.

Abbildung 14: Systematik der Technology-Readiness-Level (TRL)

Dynamic Risk Management Algorithmus

Im Rahmen des Projekts wurde der KI-basierte Dynamic Risk Management (DRM)-Algorithmus gezielt für kritische und komplexe Fahrsituationen auf Autobahnen weiterentwickelt. Dabei konnte die Technologiereife des Algorithmus von einem **Technology Readiness Level (TRL) 3** auf **TRL 7** angehoben werden. Insbesondere für die Quantifizierung der Sicherheits-Statements zur Entwicklung und Absicherung von automatisierten Fahrfunktionen kann die entwickelte KI-Toolchain inklusive des KI-basierten DRM nach einer internen Weiterentwicklung für die Industrie eingesetzt werden.

Der im Rahmen des Projekts entwickelte DRM-Algorithmus stellt einen übergeordneten Intelligenz-Layer dar, der die kurzfristige Planung relevanter Betriebsstrategien in komplexen und kritischen Fahrsituationen übernimmt. Wie im Konzept und in der PTV-VISSIM-Simulationsumgebung dargestellt, dient der DRM-Algorithmus primär der strategischen Entscheidungsfindung und der Risikobewertung. Die Echtzeitausführung der Steuerungs- und Regelungsaufgaben, insbesondere im Robotaxi-Kontext, bleibt jedoch einem konventionellen ADAS-System vorbehalten. Durch diese Arbeitsteilung wird eine effiziente und sichere Fahrzeugführung gewährleistet, bei der der DRM-Algorithmus als übergeordnete Intelligenz die

Grundlage für robuste und sicherheitsorientierte Planung bildet. Für die abgesicherte Integration im Fahrzeug muss der DRM-Algorithmus zum Finden von sicheren Haltezonen entsprechen weiterentwickelt werden, insbesondere hinsichtlich Echtzeitfähigkeit und technischer Integration auf Fahrzeug-spezifische Hardware bis hin zur Over-the-Air-Update-Fähigkeit (OTA-Update).

6. Voraussichtliche Nutzung und Verwertung

Zeitnahe Verwertung (1-3 Jahre)

In den nächsten 1-3 Jahren wird angestrebt die KI-basierte Toolchain zur quantifizierten Absicherung der funktionalen Sicherheit als einfach vermarktbares EDI-Produkt für die Digital Homologation mittels entsprechenden Lizenzmodellen anzubieten. Diese Toolchain ermöglicht ein effizientes Testen und die Bereitstellung sicherer automatisierter Fahrzeuge. Durch die Nutzung von Simulationsmodellen in frühen Entwicklungsstadien können Anforderungen an das Gesamtsystem weiter spezifiziert und transparent definiert werden. Dies führt zu einer Reduktion der Testkosten und -zeit entlang der gesamten Entwicklungskette, vom Dienstleister über die Zulieferer bis hin zu den OEMs.

Erste Gespräche mit renommierten Prüfeinrichtungen wie DEKRA haben bereits stattgefunden, und konkrete Verhandlungen über Direktbeauftragungen zur Anwendung der KI-basierten Toolchain für die Evaluierung automatisierter Fahrfunktionen sind im Gange. Diese Pilotprojekte werden dazu beitragen, die Marktreife und Anwendbarkeit der Technologie zu validieren, insbesondere im Hinblick auf die digitale Homologation.

Die Integration der KI-basierten Toolchain in bestehende Entwicklungsprozesse von Zulieferen und OEMs wird in den nächsten 1-3 Jahren vorangetrieben. Dies umfasst die Anpassung der Toolchain an spezifische Anforderungen der Automobilindustrie und die Schulung von Entwicklern und Ingenieuren in der Anwendung der neuen Technologie. Um die KI-basierte Toolchain effektiv zu nutzen, muss eine entsprechende Hardware-Infrastruktur aufgebaut werden. Dies umfasst leistungsfähige Server, die die erforderlichen Simulationen und Berechnungen durchführen können. Die Simulationsmodelle werden weiter verfeinert und erweitert, um eine noch genauere Abbildung realer Verkehrssituationen zu ermöglichen. Dies umfasst die Formalisierung von Testszenarien für die Simulation sowie eine erweiterte Beschreibung in Standard-Formaten mit Fokus auf Automotive-relevante Nomen. Diese Entwicklungen werden in Industrieprojekten oder geförderten Projekten vorangetrieben. Ein besonderer Fokus wird auf die Erweiterung der Anwendungsfälle gelegt, insbesondere auf innerstädtische Fahrkontexte. Diese sind besonders komplex und erfordern eine detaillierte Modellierung und Simulation. Die entwickelte Lösung wird daher weiter angepasst, um auch in diesen anspruchsvollen Umgebungen zuverlässig zu funktionieren. Dies umfasst die Berücksichtigung von spezifischen innerstädtischen Verkehrssituationen, wie etwa Kreuzungen, Fußgängerzonen und Baustellen.

Generell wird durch EDI die digitale Homologation in den nächsten Jahren weiter vorangetrieben. Dies umfasst die Validierung der KI-basierten Toolchain durch renommierte Prüfeinrichtungen und die Anpassung der Technologie an die Anforderungen der digitalen Homologation mit Fokus auf die relevanten Normen. Diese frühe Absicherung von neuen Funktionen ist gerade auch im Kontext von

dem sogenannten Software Defined Vehicle (SDV)-Entwicklungsprozess relevant. Durch die Mitgliedschaft von EDI im Spitzencluster Elektromobilität Süd-West (e-mobil BW) wird der direkte Austausch mit relevanten Unternehmen der Branche ermöglicht, was die Weiterentwicklung und Markteinführung der Technologie unterstützt. Ebenfalls operiert EDI seit vielen Jahren auch weltweit, wodurch auch hier von einer weiteren Verbreitung und entsprechende Geschäftsentwicklungen auszugehen ist.

Mittelfristige Verwertung (3-5 Jahre)

In den nächsten 3-5 Jahren wird die Weiterentwicklung des Dynamic Risk Management (DRM)-Algorithmus vorangetrieben. Der DRM-Algorithmus zum Finden von sicheren Haltezonen bedarf weiterer Entwicklung, insbesondere hinsichtlich Echtzeitfähigkeit und technischer Integration bis hin zur Over-the-Air-Update-Fähigkeit (OTA-Update). Diese Weiterentwicklung ist notwendig, um die maximale Sicherheit auch im Fehlerfall zu gewährleisten. Die Integration des DRM-Algorithmus ins Fahrzeug stellt eine besondere Herausforderung dar, da strenge Homologationen und Sicherheitsanforderungen erfüllt werden müssen. Dies erfordert umfangreiche Tests und Validierungen, um sicherzustellen, dass der Algorithmus zuverlässig und sicher auch im Fahrzeug funktioniert.

Zudem wird das EDI hive IoT & KI Framework weiter ausgebaut und verbreitet. Damit das EDI hive IoT & KI Framework die Echtzeit-Evaluierung von unterschiedlichen Verkehrs- und Fahrzeugkontexten und die Steuerung von Fahrzeugen in verschiedenen Szenarien ermöglicht. Durch die Integration der KI-basierten Toolchain und des DRM-Algorithmus wird das Framework weiter verfeinert und an die Anforderungen der Automobilindustrie angepasst.

Langfristige Partnerschaften und Kooperationen mit Unternehmen der Automobilindustrie, Prüfeinrichtungen und Forschungsinstituten werden in den nächsten 3-5 Jahren aufgebaut. Diese Kooperationen werden dazu beitragen, die entwickelte Lösung kontinuierlich zu verbessern und an neue Anforderungen anzupassen. Um die entwickelte Lösung erfolgreich zu implementieren, ist eine umfassende Schulung und Wissensvermittlung erforderlich. Schulungsprogramme und Workshops für Entwickler, Ingenieure und andere Fachkräfte werden entwickelt, um sicherzustellen, dass die Technologie effektiv genutzt wird. Dies umfasst auch die Erstellung von Dokumentationen und Handbüchern, die die Anwendung der KI-basierten Toolchain und des DRM-Algorithmus erläutern.

7. Veröffentlichungen und Verbreitung der Projektergebnisse

Die Veröffentlichung und Verbreitung der Projektergebnisse erfolgte auf vielfältige Weise, um eine breite wissenschaftliche und industrielle Wirksamkeit und Verbreitung zu erzielen. Neben der Nutzung sozialer Medienplattformen wie LinkedIn, wo verschiedene Posts die Fortschritte und Ergebnisse des Projekts kommunizierten, wurden die Ergebnisse auch in spezialisierten Netzwerken und auf Fachkonferenzen präsentiert.

Ein zentraler Kanal für die Verbreitung der Ergebnisse war das Netzwerk des Spitzenclusters Elektromobilität Süd-West (e-mobil BW), in dem die entwickelten Lösungen und Technologien vorgestellt und diskutiert wurden. Dies ermöglichte einen direkten Austausch mit relevanten Akteuren der Automobilindustrie und förderte die Validierung und Weiterentwicklung der Technologie.

Darüber hinaus wurden die Projektergebnisse auf internationalen Fachkonferenzen und Messen einem breiten Fachpublikum präsentiert. Besonders hervorzuheben sind die folgenden Vorträge und Präsentationen, die von Thomas Freudenmann gehalten wurden:

1. **Freudenmann, T. (2022):** *RELAI – Risk Estimation with Learning AI.* Präsentiert im Rahmen der UK Delegationreise zum Thema "Connected and Automated Driving". Diese Präsentation fokussierte sich auf die Risikoabschätzung mittels lernender KI-Algorithmen und deren Anwendung im Bereich des vernetzten und automatisierten Fahrens.
2. **Freudenmann, T. (2022):** *Dynamic Risk Management.* Vorgestellt auf der ADAS & Autonomous Vehicle Technology Expo in Stuttgart. Der Vortrag behandelte die dynamische Risikomanagement-Strategie und deren Implementierung in modernen Fahrerassistenzsystemen (ADAS) und autonomen Fahrzeugen.
3. **Freudenmann, T. (2023):** *Incident Detector Application for Weak Sensor Signals.* Präsentiert auf der Autonomous-Vehicles-Conference in Berlin. Diese Präsentation konzentrierte sich auf die Anwendung von KI zur Erkennung von Vorfällen bei schwachen Sensorsignalen, was besonders in komplexen Verkehrssituationen von Bedeutung ist.
4. **Freudenmann, T. (2023):** *Dynamic Risk Management.* Erneut vorgestellt auf der ADAS & Autonomous Vehicle Technology Expo in Stuttgart. Der Vortrag vertiefte die Themen des dynamischen Risikomanagements und stellte aktuelle Entwicklungen und Anwendungen vor.
5. **Freudenmann, T. (2023):** *AI & Schwarm-Intelligence.* Präsentiert beim Open House des FZI in Karlsruhe. Der Vortrag beleuchtete die Integration von KI und Schwarmintelligenz in die Entwicklung autonomer Fahrzeuge und deren Potenzial zur Verbesserung der Fahrsicherheit und Effizienz.

Diese Präsentationen trugen maßgeblich zur wissenschaftlichen Anerkennung und industriellen Akzeptanz der entwickelten Technologien bei. Sie ermöglichten einen intensiven Austausch mit Experten aus der Automobilindustrie, Forschungseinrichtungen und Prüfinstituten, was die Weiterentwicklung und Markteinführung der Technologien unterstützte.

Literaturverzeichnis

(1) Y. Saito, P. Raksincharoensak, H. Inoue, M. El-Haji and T. Freudenmann, "Context-Sensitive Hazard Anticipation Based on Driver Behavior Analysis and Cause-and-Effect Chain Study", in AVEC, 2018

(2) M. El-Haji, T. Freudenmann, H. Inoue, P. Raksincharoensak and Y. Saito, "Validation Methodology to Establish Safe Autonomous Driving Algorithms with a High Driver Acceptance Using a Virtual Environment", FASTzero, USA, 2019

(3) T. Freudenmann, V. Bopp-Bertenbreiter, M. El-Haji, M. Martin "RELAI: Risk assessment for automated driving based on multiple data sources, 27th ITS World Congress. Experience Future Mobility Now, 2021

(4) V. Bopp-Bertenbreiter, S. Bähr, S. Albrecht, T. Freudenmann, M. El-Haji, M. Martin, N. Ahn, S. Rauber „Watch Out Car, He's Drunk! How Passengers of Vehicles Perceive Risky Crossing Situations Based on Situational Parameters", In: HCI in Mobility, Transport, and Automotive Systems, 4th International Conference, MobiTAS, 2022